

www.mientayvn.com

Khi đọc qua tài liệu này, nếu phát hiện sai sót hoặc nội dung kém chất lượng xin hãy thông báo để chúng tôi sửa chữa hoặc thay thế bằng một tài liệu cùng chủ đề của tác giả khác. Tài liệu này bao gồm nhiều tài liệu nhỏ có cùng chủ đề bên trong nó. Phần nội dung bạn cần có thể nằm ở giữa hoặc ở cuối tài liệu này, hãy sử dụng chức năng Search để tìm chúng.

Bạn có thể tham khảo nguồn tài liệu được dịch từ tiếng Anh tại đây:

http://mientayvn.com/Tai_lieu_da_dich.html

Thông tin liên hệ:

Yahoo mail: thanhlam1910_2006@yahoo.com

Gmail: frbwrthes@gmail.com


Theo yêu cầu của khách hàng, trong một năm qua, chúng tôi đã dịch qua 16 môn học, 34 cuốn sách, 43 bài báo, 5 sổ tay (chưa tính các tài liệu từ năm 2010 trở về trước) Xem ở đây

**DỊCH VỤ
DỊCH
TIẾNG
ANH
CHUYÊN
NGÀNH
NHANH
NHẤT VÀ
CHÍNH
XÁC
NHẤT**

Chỉ sau một lần liên lạc, việc dịch được tiến hành

Giá cả: có thể giảm đến 10 nghìn/1 trang

Chất lượng: Tạo dựng niềm tin cho khách hàng bằng công nghệ 1. Bạn thấy được toàn bộ bản dịch; 2. Bạn đánh giá chất lượng. 3. Bạn quyết định thanh toán.



Bài giảng
Quang điện tử

Chương 1

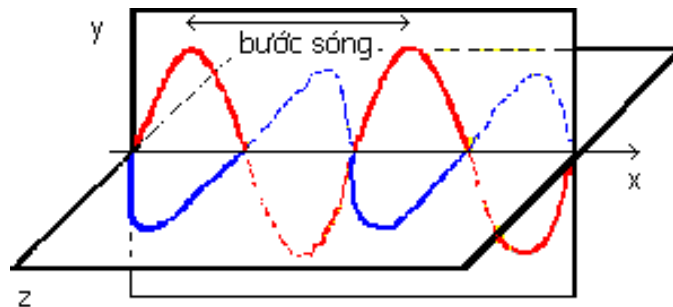
CÁC KIẾN THỨC CƠ BẢN

1.1 Ánh sáng

1.1.1. Tính chất vật lý của ánh sáng

Bằng phương pháp toán học, Macxoen đã chứng minh rằng điện từ trường do một điện tích điểm dao động theo phương thẳng đứng tại một điểm sinh ra sẽ lan truyền trong không gian dưới dạng sóng. Sóng đó được gọi là sóng điện từ.

Người ta nói rằng điện tích dao động đã bức xạ ra sóng điện từ. Nếu xét theo một phương truyền Ox, sóng điện từ là sóng ngang có thành phần điện dao động theo phương thẳng đứng và thành phần từ dao động theo phương nằm ngang.



Hình 1.1. Sóng điện từ lan truyền trong không gian

Tần số sóng điện từ bằng tần số f của điện tích dao động và vận tốc của nó trong chân không bằng vận tốc ánh sáng trong chân không.

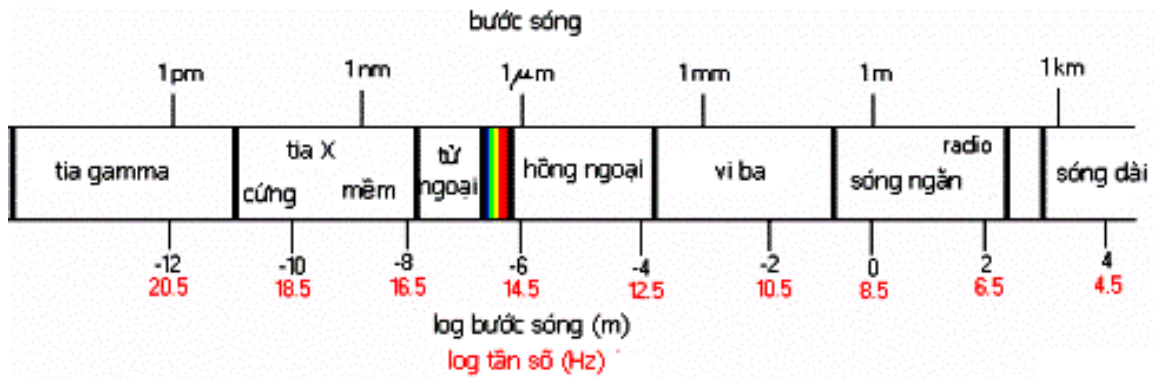
Năng lượng của sóng điện từ tỉ lệ với lũy thừa bậc 4 của tần số.

Ngày nay, người ta đã biết rằng sóng điện từ có đầy đủ các tính chất như sóng cơ học, nhưng sóng cơ học, truyền đi trong những môi trường đàn hồi, còn sóng điện từ thì tự nó truyền đi mà không cần nhờ đến sự biến dạng của một môi trường đàn hồi nào cả, vì vậy nó truyền được cả trong chân không.

Ánh sáng khả kiến dùng để chỉ các bức xạ điện từ có bước sóng nằm trong vùng quang phổ nhìn thấy được bằng mắt thường (tức là từ khoảng 400 nm đến 700 nm).

"Ánh sáng lạnh" là ánh sáng có bước sóng tập trung gần vùng quang phổ tím. "Ánh sáng nóng" là ánh sáng có bước sóng nằm gần vùng đỏ.

Ánh sáng có quang phổ trải đều từ đỏ đến tím là ánh sáng trắng, ánh sáng có bước sóng tập trung tại vùng quang phổ rất hẹp gọi là "ánh sáng đơn sắc".



Hình 1.2. Phân loại Sóng điện từ

Ánh sáng tự nhiên hoặc ánh sáng nhìn thấy được chiếm một phần rất nhỏ trong phổ sóng điện từ.

1.1.2. Bước sóng và màu sắc ánh sáng

Đo bước sóng của những ánh sáng đơn sắc khác nhau bằng phương pháp giao thoa, người ta thấy mỗi ánh sáng đơn sắc có một bước sóng hoàn toàn xác định. Chẳng hạn:

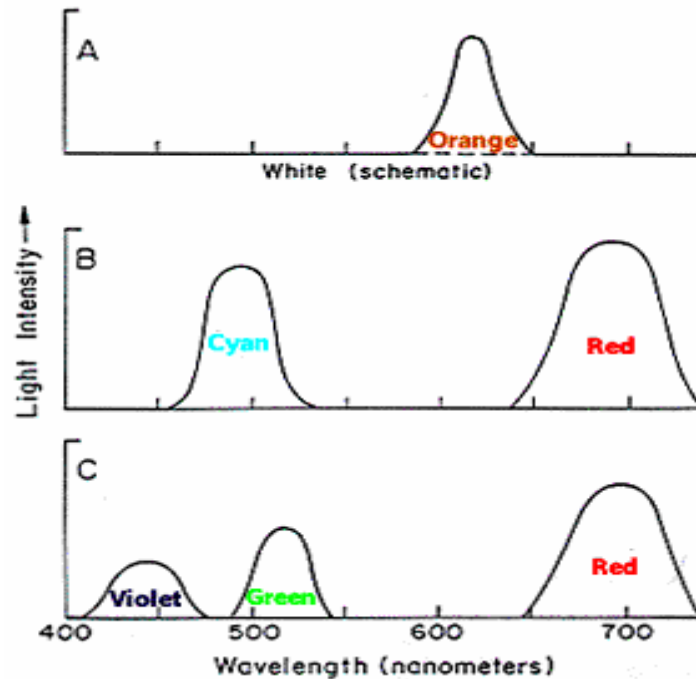
- ánh sáng màu đỏ ở đầu của dải màu liên tục có bước sóng: $0,760\mu\text{m}$.
- ánh sáng màu tím ở cuối của dải màu liên tục có bước sóng: $0,400\mu\text{m}$
- Ánh sáng vàng do đèn hơi natri phát ra có bước sóng: $0,589\mu\text{m}$.

Như vậy, ánh sáng đơn sắc là ánh sáng có một bước sóng xác định. Màu ứng với ánh sáng đó gọi là màu đơn sắc hay màu quang phổ.

Thực ra, những ánh sáng đơn sắc có bước sóng lân cận nhau thì gần như có cùng một màu. Vì vậy, người ta đã phân định ra trong quang phổ liên tục những vùng màu khác nhau:

- Vùng đỏ có bước sóng từ: $0,760\mu\text{m} \rightarrow 0,640\mu\text{m}$
- Vùng da cam và vàng có bước sóng từ: $0,640\mu\text{m} \rightarrow 0,580\mu\text{m}$ (Vùng da cam và Vùng vàng)
- Vùng lục có bước sóng từ: $0,580\mu\text{m} \rightarrow 0,495\mu\text{m}$
- Vùng lam - chàm có bước sóng từ: $0,495\mu\text{m} \rightarrow 0,440\mu\text{m}$ (Vùng lam-chàm)
- Vùng tím có bước sóng từ: $0,440\mu\text{m} \rightarrow 0,400\mu\text{m}$

Ngoài các màu đơn sắc, còn có các màu không đơn sắc, là hỗn hợp của nhiều màu đơn sắc với những tỉ lệ khác nhau.



Hình 1.3. màu sắc và bước sóng của ánh sáng

1. Tia hồng ngoại

Tia hồng ngoại là những bức xạ không nhìn thấy được có bước sóng lớn hơn bước sóng của ánh sáng đỏ ($0,75\mu\text{m}$). Tia hồng ngoại có bản chất là sóng điện từ. Tia hồng ngoại do các vật bị nung nóng phát ra.

Vật có nhiệt độ thấp chỉ phát ra được các tia hồng ngoại. Chẳng hạn như thân thể người ở nhiệt độ 37°C chỉ phát ra các tia hồng ngoại trong đó mạnh nhất là các tia có bước sóng ở vùng $9\mu\text{m}$.

Vật có nhiệt độ 500°C bắt đầu phát ra ánh sáng màu đỏ tối nhưng mạnh nhất vẫn là các tia hồng ngoại ở vùng bước sóng $3,7\mu\text{m}$.

Trong ánh sáng mặt trời, có khoảng 50% năng lượng của chùm sáng là thuộc về các tia hồng ngoại. Nguồn phát tia hồng ngoại thường dùng là các bóng đèn có dây tóc bằng vonfram nóng sáng công suất từ 250W đến 1000W. Nhiệt độ dây tóc bóng đèn đó vào khoảng 2000°C .

Tác dụng nổi bật nhất của tia hồng ngoại là tác dụng nhiệt. Ngoài ra, tia hồng ngoại cũng có tác dụng lên một loại kính ảnh đặc biệt gọi là kính ảnh hồng ngoại. Nếu chụp ảnh các đám mây bằng kính ảnh hồng ngoại thì ảnh các đám mây sẽ nổi lên rất rõ rệt. Đó là các đám mây chứa hơi nước ít hay nhiều sẽ hấp thụ các tia hồng ngoại yếu hay mạnh rất khác nhau.

Ứng dụng quan trọng nhất của các tia hồng ngoại là dùng để sấy hoặc sưởi. Trong công nghiệp, người ta dùng tia hồng ngoại để sấy khô các sản phẩm sơn (như vỏ ô tô, vỏ tủ lạnh v.v...) hoặc các hoa quả như chuối, nho v.v... Trong y học, người ta dùng đèn hồng ngoại để sưởi ấm ngoài da cho máu lưu thông được tốt.

2. Tia tử ngoại

Tia tử ngoại là những bức xạ không nhìn thấy được, có bước sóng ngắn hơn bước sóng của ánh sáng tím ($0,40\mu\text{m}$).

Tia tử ngoại có bản chất là sóng điện từ.

Mặt Trời là một nguồn phát tia tử ngoại rất mạnh. Khoảng 9% công suất của chùm ánh sáng mặt trời là thuộc về các tia tử ngoại. Các hồ quang điện cũng là những nguồn phát tia tử ngoại mạnh. Trong các bệnh viện và phòng thí nghiệm, người ta dùng các đèn thuỷ ngân làm nguồn phát các tia tử ngoại. Ngoài ra những vật nung nóng trên 3000°C cũng phát ra tia tử ngoại rất mạnh.

Tia tử ngoại bị thuỷ tinh, nước v.v... hấp thụ rất mạnh. Thạch anh thì gần như trong suốt đối với các tia tử ngoại có bước sóng nằm trong vùng từ $0,18\mu\text{m} \rightarrow 0,4\mu\text{m}$ (gọi là vùng tử ngoại gần).

Tia tử ngoại có tác dụng rất mạnh lên kính ảnh. Nó có thể làm cho một số chất phát quang. Nó có tác dụng ion hoá không khí. Ngoài ra, nó còn có tác dụng gây ra một số phản ứng quang hoá, phản ứng quang hợp v.v...

Tia tử ngoại có một số tác dụng sinh học.

Trong công nghiệp, người ta sử dụng tia tử ngoại để phát hiện các vết nứt nhỏ, vết xước trên bề mặt các sản phẩm tiện. Muốn vậy, người ta xoa trên bề mặt sản phẩm một lớp bột phát quang rất mịn. Bột sẽ chui vào các khe nứt, vết xước. Khi đưa sản phẩm vào chùm tử ngoại, các vết đó sẽ sáng lên.

Trong y học, người ta dùng tia tử ngoại để chữa bệnh còi xương.

3. Tia X

Năm 1895, nhà bác học Ron-ghen (Roentgen), người Đức, nhận thấy rằng khi cho dòng tia catốt trong ống tia catốt đập vào một miếng kim loại có nguyên tử lượng lớn như bạch kim hoặc vonfram thì từ đó sẽ phát ra một bức xạ không nhìn thấy được. Bức xạ này đi xuyên qua thành thuỷ tinh ra ngoài và có thể làm phát quang một số chất hoặc làm đen phim ảnh. Người ta gọi bức xạ này là tia X

Khi mới được phát hiện, người ta tưởng lầm tia X là một dòng hạt nào đó. Tuy nhiên, khi cho tia X đi qua điện trường và từ trường mạnh thì nó không bị lệch đường. Như vậy, tia X không mang điện. Tia X là một loại sóng điện từ có bước sóng ngắn hơn bước sóng của tia tử ngoại. Bước sóng của tia X nằm trong khoảng từ $10^{-12} \rightarrow 10^{-8}\text{m}$ (tia X mềm).

Tia X có những tính chất và công dụng sau

Tính chất nổi bật của tia X là khả năng đâm xuyên. Nó truyền qua được những vật chắn sáng thông thường như giấy, bìa, gỗ. Nó đi qua kim loại khó khăn hơn. Kim loại có khối lượng riêng càng lớn thì khả năng cản tia X của

nó càng mạnh. Chẳng hạn, tia X xuyên qua dễ dàng một tấm nhôm dày vài cm, nhưng lại bị lớp chì dày vài mm cản lại. Vì vậy, chì được dùng làm các màn chắn bảo vệ trong kĩ thuật kỹ thuật Ronghen.

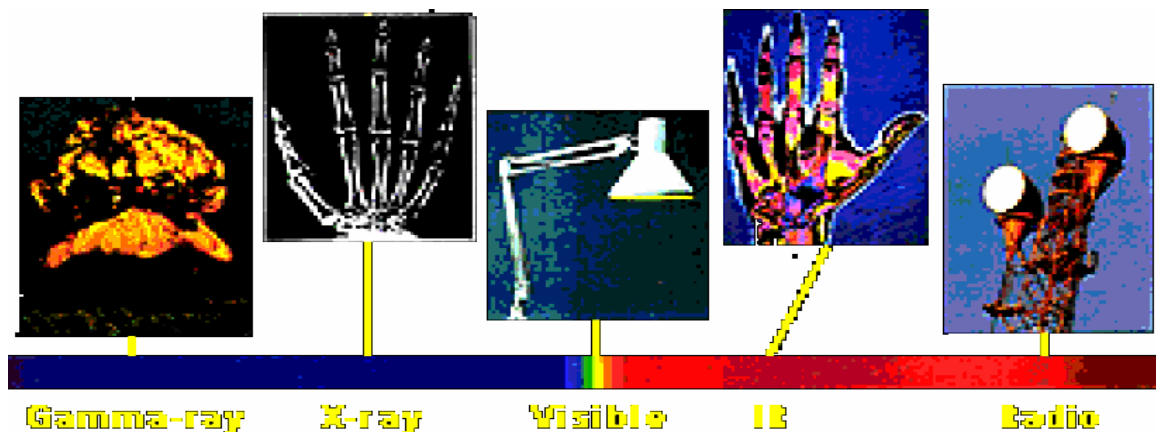
Nhờ khả năng đâm xuyên mạnh mà tia X được dùng trong y học để chiếu điện, chụp điện, trong công nghiệp để dò các lỗ hỏng khuyết tật nằm bên trong các sản phẩm đúc.

Tia X có tác dụng rất mạnh lên kính ảnh, nên nó được dùng để chụp điện.

Tia X có tác dụng làm phát quang một số chất. Màn huỳnh quang dùng trong việc chiếu điện là màn có phủ một lớp platinocyanua bary. Lớp này phát quang màu xanh lục dưới tác dụng của tia X.

Tia X có khả năng ion hoá các chất khí. Người ta lợi dụng đặc điểm này để làm các máy đo liều lượng tia X.

Tia X có tác dụng sinh lý. Nó có thể huỷ hoại tế bào, giết vi khuẩn. Vì thế tia X dùng để chữa những ung thư nông, gần ngoài da.



Hình 1.4. Ứng dụng sóng điện từ.

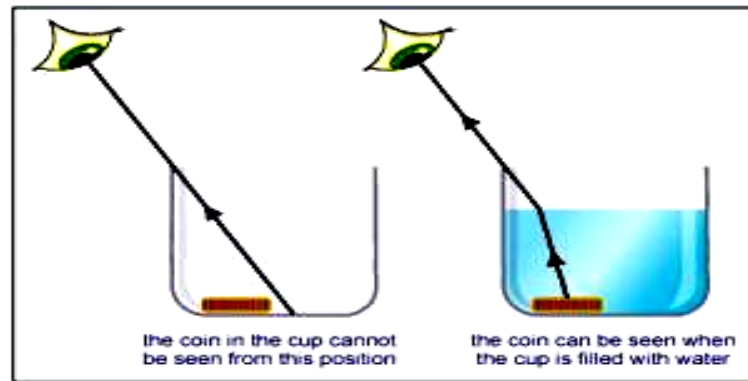
1.1.3. Các hiện tượng quang hình học

Ánh sáng nói riêng, các bức xạ điện từ nói chung dù ở bất kỳ tần số nào đều có tốc độ truyền như nhau trong môi trường chân không: $299\,792,5\text{ km/s} \approx 300\,000\text{ km/s}$

Tuy nhiên, ở trong môi trường khác tốc độ truyền ánh sáng sẽ thay đổi

- Môi trường chân không và không khí : $300\,000\text{ km/s}$
- Môi trường nước : $225\,000\text{ km/s}$
- Thủy tinh : $200\,000\text{ km/s}$

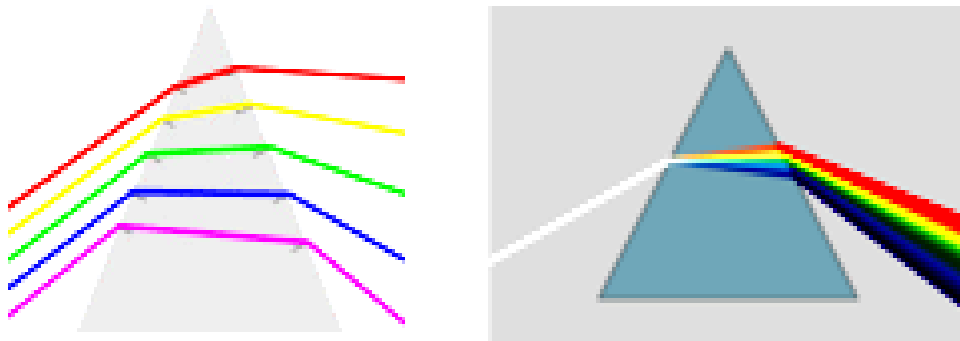
1. Hiện tượng khúc xạ ánh sáng



Hình 1.5. Hiện tượng khúc xạ ánh sáng

Khúc xạ thường dùng để chỉ hiện tượng ánh sáng đổi hướng khi đi qua mặt phân cách giữa hai môi trường có chiết suất khác nhau. Mở rộng ra, đây là hiện tượng đổi hướng đường đi của bức xạ điện từ, khi lan truyền trong môi trường không đồng nhất

2. Hiện tượng tán sắc



Hình 1.6. Hiện tượng tán sắc

Ánh sáng trắng là tổng hợp của rất nhiều tia sáng, mỗi tia sáng tương ứng với các độ dài sóng điện từ khác nhau và có màu sắc khác nhau. Tia sáng có sóng điện từ ngắn càng dễ bị khúc xạ. Như vậy có nghĩa là ánh sáng xanh dễ bị khúc xạ hơn so với ánh sáng đỏ

Lăng kính là một dụng cụ quang học, sử dụng để khúc xạ, phản xạ và tán xạ ánh sáng sang các màu quang phổ (như màu sắc của cầu vồng). Lăng kính thường được làm theo dạng kim tự tháp đứng, có đáy là hình tam giác.

Tia sáng đi từ một môi trường (như môi trường không khí) sang một môi trường khác (như thủy tinh trong lăng kính), nó sẽ bị chậm lại, và giống như kết quả, nó sẽ hoặc bị cong (khúc xạ) hoặc bị phản xạ hoặc đồng thời xảy ra cả hai hiện tượng trên. Góc mà tia sáng hợp với trục thẳng góc tại điểm mà tia sáng đi vào trong lăng kính được gọi là góc tới, và góc tạo ra ở đầu bên

kia, qua quá trình khúc xạ được gọi là góc ló. Tương tự, tia sáng đi vào trong lăng kính được gọi là tia tới và tia sáng đi ra ngoài lăng kính được gọi là tia ló.

Các lăng kính phản xạ được sử dụng để phản xạ ánh sáng, ví dụ như các ống nhòm, vì, nhờ hiện tượng phản xạ toàn phần, chúng dễ dàng được sử dụng hơn là các gương. Các lăng kính tán sắc được sử dụng để chia ánh sáng thành các thành phần quang phổ màu, bởi vì độ khúc xạ của chúng phụ thuộc vào bước sóng của tia sáng (hiện tượng tán sắc); khi một tia sáng trắng đi vào trong lăng kính, nó có một góc tới xác định, trải qua quá trình khúc xạ, và phản xạ bên trong lăng kính, dẫn đến việc tia sáng bị bẻ cong, hay gập khúc, và vì vậy, màu sắc của tia sáng ló sẽ khác nhau. Ánh sáng màu xanh có bước sóng nhỏ hơn ánh sáng màu đỏ và vì vậy nó cong hơn so với ánh sáng màu đỏ. Cũng có loại lăng kính phân cực, nó có thể chia ánh sáng thành các thành phần phân cực khác nhau.

1.1.4. Lượng tính sóng hạt của ánh sáng

Nguyên tử gồm:

Hạt nhân (điện tích +Z) gồm:

- Proton (p), $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ kg, tích điện dương + 1,602. 10^{-19} C.
- Neutron(n), $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg, không mang điện .

Hạt nhân của các nguyên tố đều bền (trừ các nguyên tố phóng xạ).

Electron(e) , $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg , tích điện âm - 1,602. 10^{-19} C.

Trong bảng hệ thống tuần hoàn (HTTH), số TT nguyên tố = điện tích hạt nhân = số e.

1. Hiện tượng quang điện

Ánh sáng là một sóng điện từ lan truyền trong chân không với vận tốc $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, được đặc trưng bằng bước sóng λ hay tần số dao động $\nu = c/\lambda$

Thuyết sóng của ánh sáng giải thích được những hiện tượng liên quan với sự truyền sóng như giao thoa và nhiễu xạ nhưng không giải thích được những dữ kiện thực nghiệm về sự hấp thụ và sự phát ra ánh sáng khi đi qua môi trường vật chất.

Năm 1900, M.Planck đưa ra giả thuyết: “ Năng lượng của ánh sáng không có tính chất liên tục mà bao gồm từng lượng riêng biệt nhỏ nhất gọi là lượng tử. Một lượng tử của ánh sáng (photon) có năng lượng là $E=h\nu$

Trong đó

- E là năng lượng của photon
- ν : tần số bức xạ
- $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s - hằng số Planck.

Năm 1905, Anhsanh đã dựa vào thuyết lượng tử đã giải thích thỏa đáng hiện tượng quang điện. Bản chất của hiện tượng quang điện là các kim loại kiềm trong chân không khi bị, khi bị chiếu sáng sẽ phát ra các electron; năng lượng của các electron đó không phụ thuộc vào cường độ của ánh sáng chiếu vào mà phụ thuộc vào tần số ánh sáng.

Anhsanh cho rằng khi được chiếu tới bề mặt kim loại, mỗi photon với năng lượng $h\nu$ sẽ truyền năng lượng cho kim loại. Một phần năng lượng E_0 được dùng để làm bật electron ra khỏi nguyên tử kim loại và phần còn lại sẽ trở thành động năng của electron

$$h\nu = E_0 + \frac{1}{2}mv^2$$

Những bức xạ có tần số bé hơn tần số giới hạn sẽ không gây ra hiện tượng quang điện.

Sử dụng công thức trên ta có thể tính được vận tốc của electron bật ra trong hiện tượng quang điện.

2. Mô hình nguyên tử Bohr

Trong nguyên tử mỗi electron quay xung quanh nhân chỉ theo những quỹ đạo tròn đồng tâm có bán kính xác định.

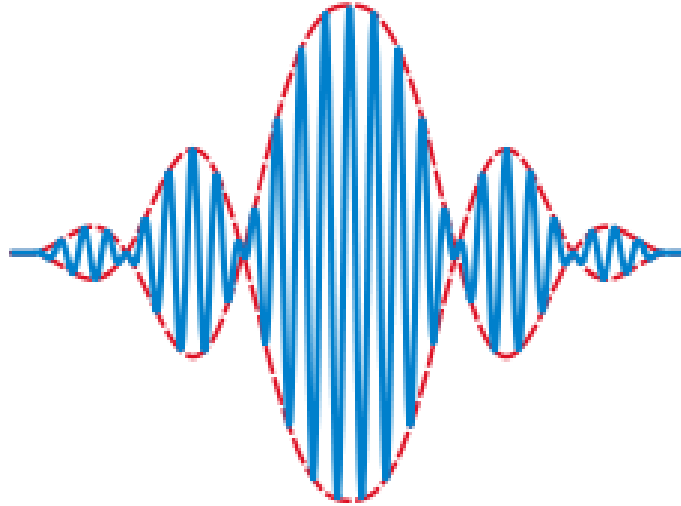
Mỗi quỹ đạo ứng với một mức năng lượng xác định của electron. Quỹ đạo gần nhân nhất ứng với mức năng lượng thấp nhất, quỹ đạo càng xa nhân ứng với mức năng lượng càng cao.

Khi e chuyển từ quỹ đạo này sang quỹ đạo khác thì xảy ra sự hấp thụ hoặc giải phóng năng lượng. Khi e chuyển từ quỹ đạo có mức năng lượng thấp sang mức năng lượng cao hơn thì nó hấp thụ năng lượng. Khi electron chuyển từ một mức năng lượng cao sang mức năng lượng thấp hơn thì xảy ra sự phát xạ năng lượng. Năng lượng của bức xạ hấp thụ hoặc giải phóng là

$$\Delta E = E_n - E_m = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Electron tồn tại ở các mức năng lượng riêng biệt trong một nguyên tử. Các mức năng lượng có thể hiểu là tương ứng với các quỹ đạo riêng biệt của electron xung quanh hạt nhân. Electron ở bên ngoài sẽ có mức năng lượng cao hơn những electron ở phía trong. Khi có sự tác động vật lý hay hóa học từ bên ngoài, các hạt electron này cũng có thể nhảy từ mức năng lượng thấp lên mức

năng lượng cao hay ngược lại. Các quá trình này có thể tạo ra hay hấp thụ các photon. Tập hợp các photon này tạo ra ánh sáng.



1.7. Minh họa tượng trưng 1 photon

Bước sóng (màu sắc) của tia sáng phụ thuộc vào sự chênh lệch năng lượng giữa các mức.

3. Lượng tính sóng hạt của các hạt vi mô

Mô hình trên đều không giải thích được 1 số vấn đề thực nghiệm đặt ra. Nguyên nhân là do:

- Không đề cập đến tính chất sóng của electron
- Do đó coi quỹ đạo chuyển động của electron trong nguyên tử là quỹ đạo tròn có bán kính xác định.

Năm 1924 nhà vật lý học người Pháp Louis De Broglie đã đưa ra giả thuyết: mọi hạt vật chất chuyển động đều có thể coi là quá trình sóng được đặc trưng bằng bước sóng λ và tuân theo hệ thức

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Trong đó

- m - Khối lượng của hạt, kg
- v - Vận tốc chuyển động của hạt, m/s
- h - Hằng số Planck, $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s

Đối với hạt vĩ mô: m khá lớn ($h = \text{const}$) $\rightarrow \lambda$ khá nhỏ \rightarrow tính chất sóng có thể bỏ qua.

Đối với hạt vi mô : m nhỏ ($h = \text{const}$) $\rightarrow \lambda$ khá khá lớn \rightarrow không thể bỏ qua tính chất sóng.

Ví dụ : Một hạt có khối lượng $m = 0,3 \text{ kg}$, vận tốc chuyển động $V = 30 \text{ m/s}$ thì λ của hạt là?

Giải:

Áp dụng hệ thức Louis De Broglie

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{0,3 \cdot 30} = 0,736 \cdot 10^{-34} \text{ m}$$

λ của hạt vô cùng nhỏ nên bỏ qua tính chất sóng của hạt.

4. Nguyên lý bất định Heisenberg

Không thể xác định đồng thời chính xác cả toạ độ và vận tốc của hạt, do đó không thể vẽ được chính xác quỹ đạo chuyển động của hạt.

$$\Delta x \cdot \Delta v_x \geq \frac{h}{m}$$

Đây là hệ thức bất định Heisenberg

Trong đó

- Δx Độ bất định (sai số) về toạ độ theo phương x
- Δv_x Độ bất định (sai số) về vận tốc theo phương x

Nếu Δx càng nhỏ thì Δv_x càng lớn, nghĩa độ bất định về toạ độ càng nhỏ thì độ bất định về vận tốc càng lớn. Từ đây rút ra một kết luận quan trọng là không thể dùng cơ học cổ điển để mô tả một cách chính xác quỹ đạo chuyển động của hạt vi mô như thuyết của Bohr mà phải sử dụng một môn khoa học mới là cơ học lượng tử.

1.1.5. Ánh sáng laser

Laser là tên viết tắt của cụm từ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation có nghĩa là "khuếch đại ánh sáng bằng phát xạ kích thích" hoặc "khuếch đại ánh sáng bằng bức xạ cưỡng bức".

Tính chất

Trong thực tế, Laser là sự tạo ra một chùm hạt photon được phát xạ thỏa mãn các điều kiện sau đây

- Tất cả các photon phát ra đều có cùng bước sóng giống nhau.(ta gọi đây là sự đơn sắc)
- Tất cả các photon đều có cùng pha dao động. Nói cách khác là các photon phải được tạo ra vào cùng một thời điểm như nhau.
- Tất cả các photon đều cùng phân cực theo một phương .

Sự khác nhau giữa ánh sáng thường và ánh sáng Laser

Ánh sáng laser gồm nhiều photon cùng một tần số, đồng pha và bay gần như song song với nhau, nên có cường độ rất cao và chiều dài đồng pha của chùm sáng lớn. Tia laser thông dụng có thể có chiều dài đồng pha cỡ vài chục cm . Các tính chất này rất quý cho nhiều ứng dụng thực nghiệm.

1.2. Bản chất của sự nhìn thấy

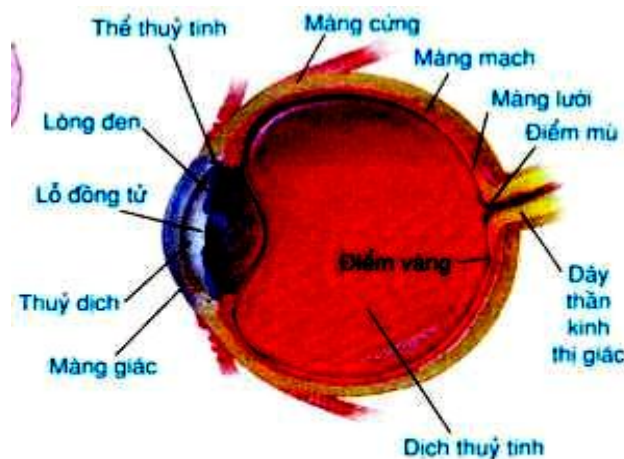
Chúng ta nhìn thấy được mọi vật xung quanh là do nguồn sáng chiếu vào vật đó rồi phản xạ vào mắt ta, nên ta thấy được vật đó.

Các dao động của điện trường trong ánh sáng tác động mạnh đến các tế bào cảm thụ ánh sáng trong mắt người.

1.2.1. Cấu tạo của mắt

Mắt giống như một máy ảnh. Nó có chức năng tạo ra một ảnh thật, nhỏ hơn vật, trên một lớp tế bào nhạy với ánh sáng, để từ đó tạo ra những tín hiệu thần kinh, đưa lên não. Tuy nhiên hệ thống quang học của mắt phức tạp hơn hệ thống quang học của máy ảnh rất nhiều.

Bộ phận chính của mắt là một thấu kính hội tụ, trong suốt, mềm, gọi là thủy tinh thể. Độ cong của hai mặt thủy tinh thể có thể thay đổi được nhờ sự co giãn của cơ đỡ nó.



Hình 49-2. Sơ đồ cấu tạo của mắt (mắt trâu hổ ngàng)

Hình 1.8. Cấu tạo sơ lược mắt

Đằng trước thủy tinh thể là một chất lỏng trong suốt, có chiết suất $n = 1,333$ gọi là thủy dịch.

Đằng sau thủy tinh thể cũng là một chất lỏng trong suốt khác, có chiết suất $n = 1,333$, gọi là dịch thủy tinh.

Mặt ngoài cùng của mắt là một màng mỏng trong suốt, cứng như sừng, gọi là giác mạc.

Thành trong của mắt, phân đôi diện với thủy tinh thể, gọi là võng mạc. Nó đóng vai trò như một màn ảnh, tại đó có các tế bào nhạy sáng, nằm ở đầu các dây thần kinh thị giác.

Trên võng mạc, có một vùng nhỏ màu vàng, rất nhạy với ánh sáng, nằm gần giao điểm V của trục chính của mắt với võng mạc. Vùng này gọi là điểm vàng.

Dưới điểm vàng một chút có điểm mù M là điểm hoàn toàn không nhạy sáng, vì tại đó các dây thần kinh phân nhánh và không có đầu dây thần kinh thị giác.

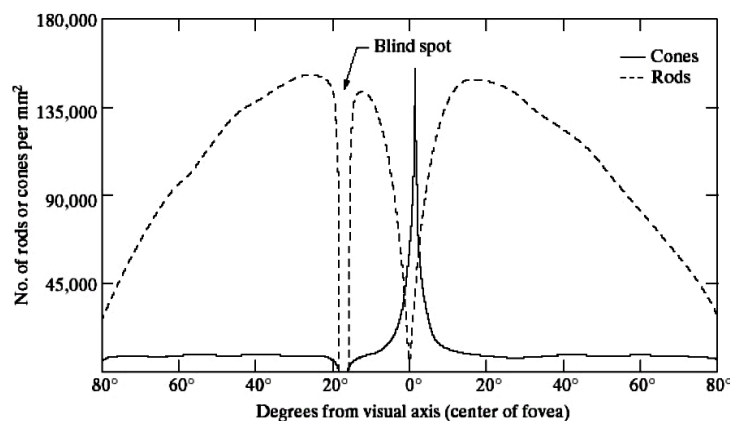
Sát mặt trước của thủy tinh thể có một màng không trong suốt, màu đen (hoặc xanh hay nâu) gọi là màng mỏng mắt (hay lòng đen).

Giữa màng mỏng mắt có một lỗ tròn nhỏ gọi là con ngươi. Tùy theo cường độ của chùm ánh sáng tới mà đường kính của con ngươi sẽ tự động thay đổi, để điều chỉnh chùm sáng chiếu vào võng mạc. ở ngoài nắng, con ngươi thu nhỏ lại; trong phòng tối, nó mở rộng ra.

Một đặc điểm rất quan trọng về mặt cấu tạo của mắt là: độ cong (do đó, tiêu cự) của thủy tinh thể có thể thay đổi được. Trong khi đó, khoảng cách từ quang tâm của thủy tinh thể đến võng mạc ($d' = OV$) lại luôn luôn không đổi ($d' = 2,2\text{cm}$).

Võng mạc người được chia làm 2 lớp (xét về mặt chức năng) gồm lớp tế bào cảm nhận ánh sáng và lớp tế bào dẫn truyền xung thần kinh.

Về tế bào học, võng mạc người chỉ có 2 loại tế bào: Tế bào gậy và tế bào nón.

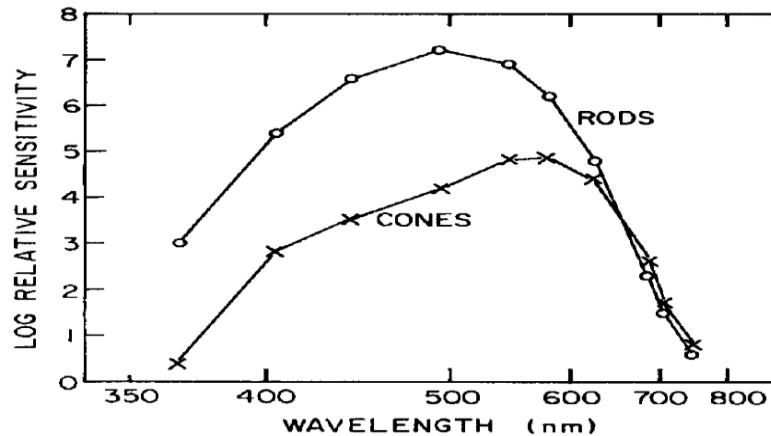


Hình 1.9. Phân bố các tế bào que và tế bào nón trong võng mạc

Tế bào gậy có chức năng xác định về cấu trúc, hình thể vật , những hình ảnh trong tối.

- Có từ 75-150 triệu
- Rất nhạy cảm với ánh sáng
- Cảm nhận trên dải rộng
- Ánh sáng ban ngày và đêm

- Cung cấp khả năng nhìn đêm
- Cảm nhận độ chói (cường độ sáng)
- Độ phân giải cao



Hình 1.10. Độ nhạy sáng của tế bào que và tế bào nón

Tế bào nón có chức năng xác định rõ về màu sắc, độ sắc nét. Trong đó, tế bào nón lại được phân thành 3 loại, nhận cảm màu sắc ánh sáng tương ứng với 3 vùng quang phổ khác nhau

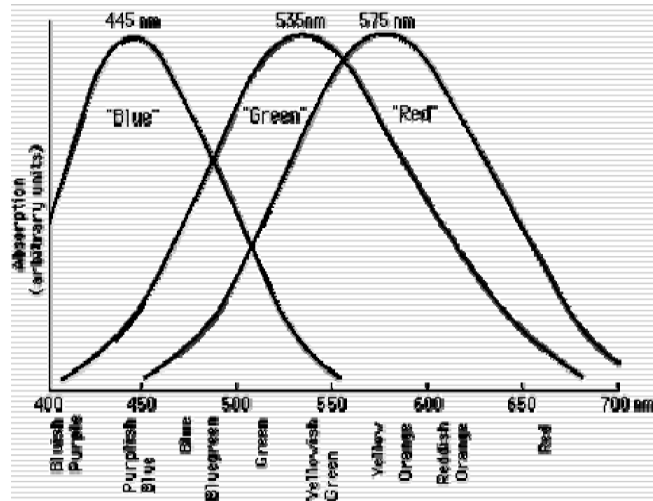
- Có từ 6-7 triệu
- Tập trung chủ yếu tại điểm vàng tại trung tâm võng mạc
- Cảm nhận trên dải hẹp
- Độ phân giải thấp
- Có 3 loại tế bào nón cảm nhận các tần số cảm nhận màu sắc 460 nm (xanh lam), 575 nm (xanh lục), 625 nm (đỏ)
- Chỉ có khả năng nhìn ban ngày

Có 3 loại tế bào nón cảm nhận 3 vùng quang phổ khác nhau (tức ba màu sắc khác nhau). Sự kết hợp cùng lúc 3 tín hiệu từ 3 loại tế bào này tạo nên những cảm giác màu sắc.

Tế bào cảm giác màu đỏ và màu lục có phổ hấp thụ rất gần nhau, do vậy mắt người phân biệt được rất nhiều màu nằm giữa màu đỏ và lục (màu vàng, màu da cam, xanh nõn chuối, ...).

Tế bào cảm giác màu lục và màu lam có phổ hấp thụ nằm xa nhau, nên mắt người phân biệt về các màu xanh không tốt.

Để tạo ra hình ảnh màu trên màn hình, người ta cũng sử dụng 3 loại đèn phát sáng ở 3 vùng quang phổ nhạy cảm của người.

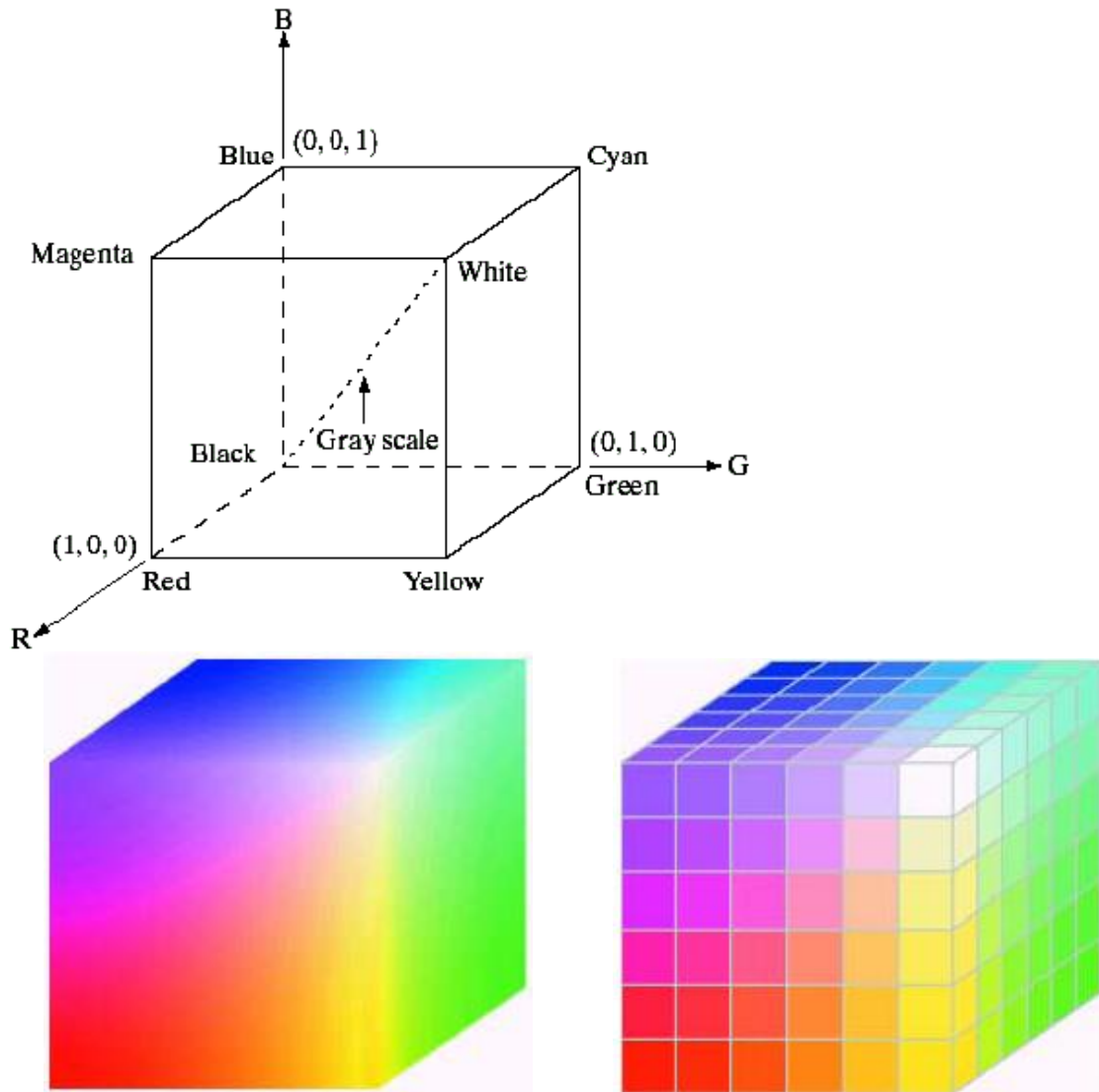


Hình 1.11. Các tế bào nón hấp thụ các phổ $S_i(\lambda)$ có đỉnh tại các bước sóng

1.2.2. Các thuộc tính mô tả màu sắc

Các màu được phân biệt dựa theo các thuộc tính: độ sáng, sắc độ, và độ bão hòa màu

- Độ sáng: đặc trưng cho độ rọi cảm nhận
- Đặc trưng màu (Chrominance)
 - Sắc độ(Hue)
 - Là thuộc tính liên quan tới bước sóng chủ yếu trong hỗn hợp các bước sóng ánh sáng.
 - Đặc trưng cho màu sắc chủ đạo được người quan sát cảm nhận
 - Độ bão hòa (Saturation)
 - Đặc trưng cho độ thuần khiết tương đối
 - Phụ thuộc vào độ rộng của phổ ánh sáng
 - Thể hiện lượng màu trắng được trộn với sắc độ
 - Hue và độ bão hòa gọi là đặc trưng màu(chromaticity)



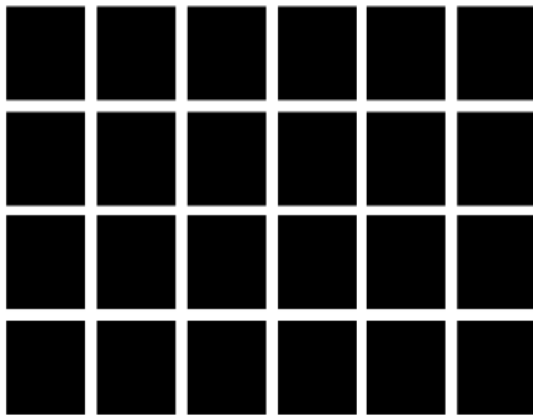
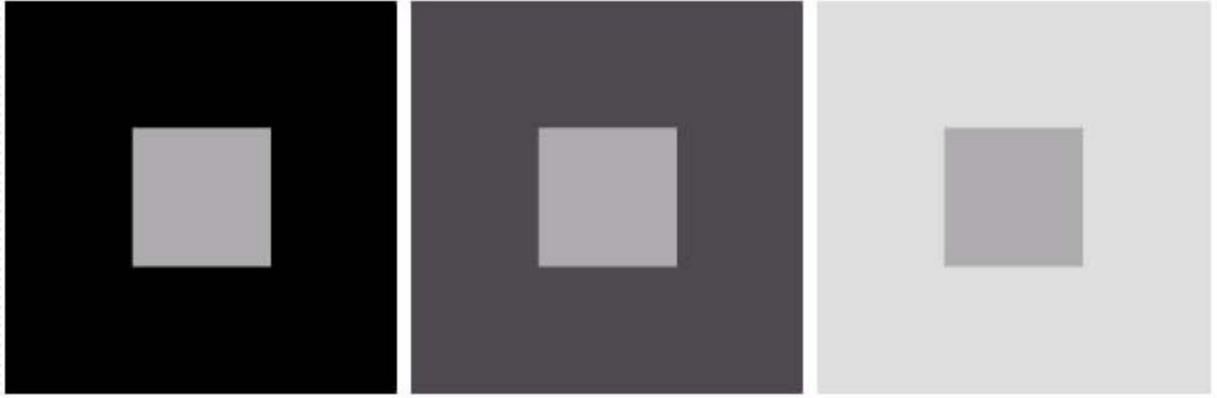
24-bit RGB color cube

RGB safe color cube

Hình 1.12. Sự biểu diễn màu sắc

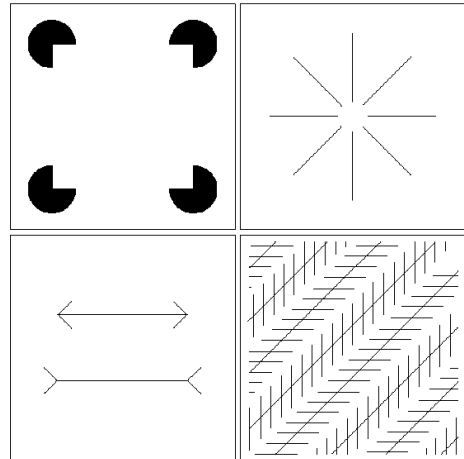
Hầu hết mắt của các sinh vật nhạy cảm với bức xạ điện từ có bước sóng nằm trong khoảng từ 300 nm đến 1200 nm. Khoảng bước sóng này trùng khớp với vùng phát xạ có cường độ mạnh nhất của Mặt Trời.

Các loài vật trên Trái Đất tiến hoá để thu nhận vùng bức xạ tự nhiên mạnh nhất đem lại lợi thế sinh tồn cho chúng.



Do You see the Phantom Spots?

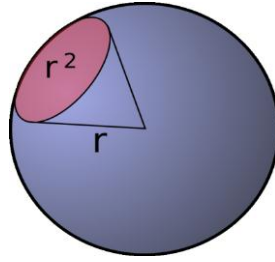
a b
c d
FIGURE 2.9 Some well-known optical illusions.



Hình 1.13. Sự cảm nhận sai độ tương phản và hình dáng kích thước của mắt

1.3. Góc khối

1.3.1. Khái niệm góc khối



Hình 1.14. Góc khối

Đơn vị đo góc khối là góc khối tương tại tâm của một hình cầu có bán kính r theo một phần trên bề mặt của hình cầu có diện tích r^2 . Như vậy ta có 4π Steradian trong hình cầu

1.3.2. Góc trông vật và năng suất phân li của mắt

Góc trông vật AB có dạng một đoạn thẳng đặt vuông góc với trục chính của mắt, là góc tạo bởi hai tia sáng đi từ hai đầu A và B của vật qua quang tâm O của mắt.

Muốn phân biệt được hai điểm A và B thì không những hai điểm đó phải nằm trong giới hạn nhìn rõ của mắt, mà góc trông đoạn AB phải đủ lớn. Thực vậy, khi đoạn AB ngắn lại, góc trông đoạn AB giảm đi, hai ảnh A' và B' của chúng trên võng mạc sẽ tiến lại gần nhau. Khi hai ảnh A', B' nằm trên cùng một đầu tế bào nhạy ánh sáng thì ta không còn phân biệt được hai điểm A và B nữa.

Do đó, người ta gọi năng suất phân li của mắt là góc trông nhỏ nhất α_{min} giữa hai điểm A và B mà mắt còn có thể phân biệt được hai điểm đó. Lúc đó hai ảnh A' và B' của chúng nằm tại hai tế bào nhạy sáng cạnh nhau trên võng mạc.

Năng suất phân li của mắt phụ thuộc vào từng con mắt. Phép đo đặc thống kê cho ta kết quả

$$\alpha_{\text{min}} \approx 1' \approx \frac{1}{3500} \text{rad}$$

1.3.3. Sự lưu ảnh trên võng mạc

Sau khi tắt ánh sáng kích thích trên võng mạc, phải mất một khoảng thời gian cỡ 0,1s, võng mạc mới hồi phục lại như cũ. Trong khoảng thời gian đó, cảm giác sáng chưa bị mất và người quan sát vẫn còn thấy hình ảnh của vật. Đó là sự lưu ảnh trên võng mạc.

Hiện tượng này được sử dụng trong chiếu bóng, trong vô tuyến truyền hình

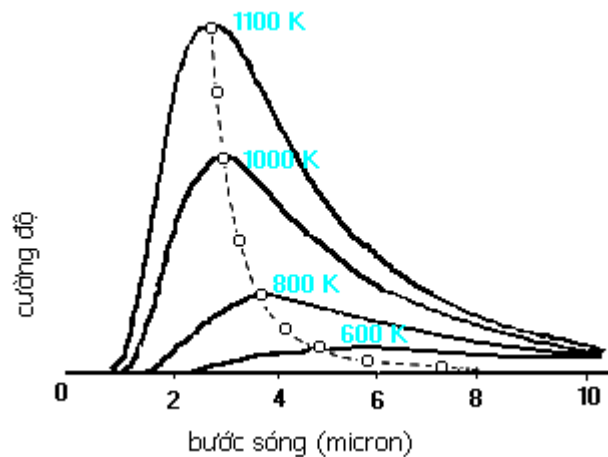
1.4. Trắc quang

1.4.1. Quang phổ

1. Quang phổ liên tục

Nếu nguồn là một bóng đèn có dây tóc nóng sáng thì qua lăng kính ta thấy có một dải sáng có màu biến đổi liên tục từ đỏ đến tím. Đó là quang phổ liên tục của ngọn đèn

Các vật rắn, lỏng hoặc khí có tỉ khối lớn khi bị nung nóng sẽ phát ra quang phổ liên tục. Mặt Trời là một khối khí có tỉ khối lớn phát sáng. Quang phổ của ánh sáng mặt trời là quang phổ liên tục. Trong quang phổ liên tục các vạch màu cạnh nhau nằm sát nhau đến mức chúng nối liền với nhau tạo nên một dải màu liên tục.



Hình 1.15. Bước sóng tia hồng ngoại phát ra giảm khi nhiệt độ các vật bị nung nóng tăng.

Một đặc điểm quan trọng của quang phổ liên tục là nó không phụ thuộc thành phần cấu tạo của nguồn sáng, mà chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ của nguồn sáng.

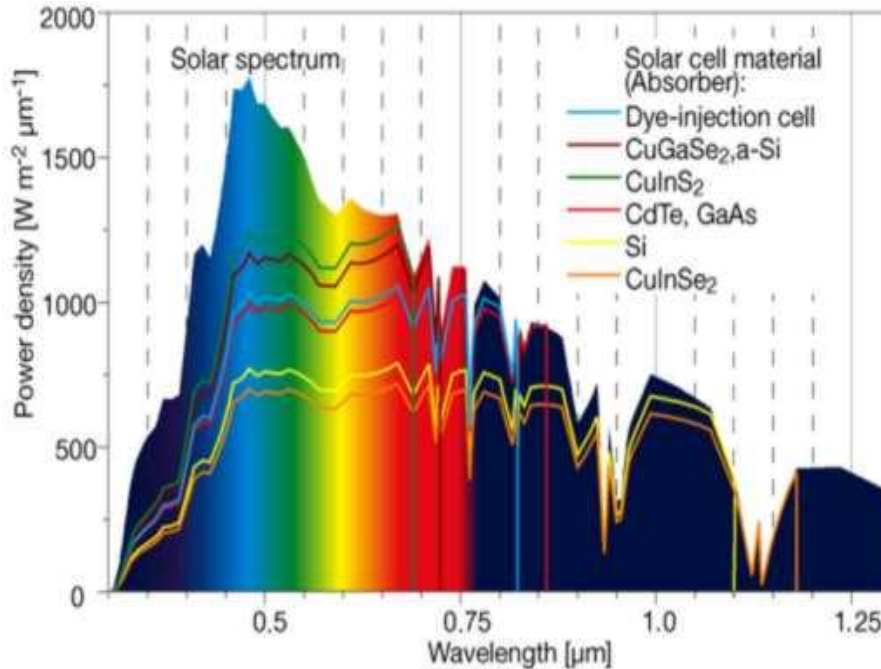
Một miếng sắt và một miếng sứ đặt trong lò, nung đến cùng một nhiệt độ sẽ cho hai quang phổ liên tục rất giống nhau.

Ở nhiệt độ 500°C , vật bắt đầu phát sáng đỏ, nhưng rất yếu, nên mắt chưa cảm nhận được và vật vẫn tối.

Nhiệt độ càng cao, miền phát sáng của vật càng mở rộng về phía ánh sáng có bước sóng ngắn của quang phổ liên tục.

Các dây tóc bóng đèn có nhiệt độ khoảng từ 2500 K đến 3000K phát sáng khá mạnh ở vùng ánh sáng nhìn thấy và cho một quang phổ liên tục có đủ màu sắc từ đỏ đến tím. ánh sáng của các bóng đèn này là ánh sáng trắng.

Nhiệt độ của bề mặt Mặt Trời khoảng 6000K. Vùng sáng mạnh của quang phổ liên tục của Mặt Trời nằm lân cận bước sóng $0,47\mu\text{m}$, ánh sáng mặt trời là ánh sáng trắng.



Hình 1.16. Phổ mặt trời

Trên bầu trời có các ngôi sao màu sáng xanh. Nhiệt độ của các ngôi sao này càng cao hơn nhiệt độ của Mặt Trời rất nhiều.

Người ta lợi dụng đặc điểm trên để xác định nhiệt độ của các vật phát sáng do nung nóng như nhiệt độ của dây tóc bóng đèn, hồ quang, lò cao, Mặt Trời, các sao v.v...

Muốn đo nhiệt độ của một vật bị nung nóng sáng, người ta so sánh độ sáng của vật đó với độ sáng của một dây tóc bóng đèn ở một vùng bước sóng nào đó (thường là đỏ).

Nhiệt độ của dây tóc bóng đèn ứng với những độ sáng khác nhau đã hoàn toàn biết trước.

2. Quang phổ vạch phát xạ.

Chiếu một chùm tia sáng do một đèn phóng điện chứa khí loãng (đèn hơi thủy ngân, đèn hydro, đèn natri v.v...) phát ra vào khe của một máy quang phổ, ta sẽ thu được trên tấm kính của buồng ảnh một quang phổ phát xạ của chất khí hoặc hơi kim loại đó. Quang phổ này bao gồm một hệ thống những vạch màu riêng rẽ nằm trên một nền tối và gọi là quang phổ vạch.

Quang phổ vạch phát xạ do các khí hay hơi ở áp suất thấp bị kích thích phát sáng ra. Có thể kích thích cho một chất khí phát sáng bằng cách đốt nóng hoặc bằng cách phóng một tia lửa điện qua đám khí hay hơi đó v.v...

Thực nghiệm cho thấy quang phổ vạch phát xạ của các nguyên tố khác nhau thì rất khác nhau về số lượng các vạch quang phổ, vị trí các vạch, màu sắc các vạch và độ sáng tỉ đối của các vạch đó.

Như vậy, mỗi nguyên tố hoá học ở trạng thái khí hay hơi nóng sáng dưới áp suất thấp cho một quang phổ vạch riêng, đặc trưng cho nguyên tố đó.

3. Quang phổ vạch hấp thụ

Chiếu một chùm sáng trắng do một đèn có dây tóc nóng sáng phát ra vào khe của một máy quang phổ ta thu được một quang phổ liên tục trên tấm kính của buồng ảnh. Nếu trên đường đi của chùm sáng ta đặt một ngọn đèn có hơi natri nung nóng thì trong quang phổ liên tục nói trên xuất hiện một vạch tối (thực ra là hai vạch tối nằm sát cạnh nhau) ở đúng vị trí của vạch vàng trong quang phổ phát xạ của natri. Đó là quang phổ hấp thụ của natri.

Nếu thay hơi natri bằng hơi kali thì trên quang phổ liên tục xuất hiện những vạch tối ở đúng chỗ những vạch màu của quang phổ phát xạ của kali. Đó là quang phổ hấp thụ của kali.

Quang phổ của Mặt Trời mà ta thu được trên Trái Đất là quang phổ hấp thụ. Bề mặt của Mặt Trời (quang cầu) phát ra một quang phổ liên tục. ánh sáng từ quang cầu đi qua lớp khí quyển của Mặt Trời đến Trái Đất cho ta một quang phổ hấp thụ của khí quyển đó.

Điều kiện để thu được quang phổ hấp thụ là nhiệt độ của đám khí hay hơi hấp thụ phải thấp hơn nhiệt độ của nguồn sáng phát ra quang phổ liên tục.

4. Hiện tượng đảo sắc các vạch quang phổ

Có một hiện tượng đặc biệt liên hệ giữa quang phổ vạch hấp thụ và quang phổ vạch phát xạ của cùng một nguyên tố: hiện tượng đảo sắc. Hiện tượng này xảy ra như sau

Giả sử đám hơi hấp thụ ở trong thí nghiệm trên được nung nóng đến nhiệt độ mà chúng có thể phát sáng, tuy nhiệt độ này vẫn còn thấp hơn nhiệt độ của nguồn sáng trắng. Trên kính ảnh của máy quang phổ, ta thu được quang phổ hấp thụ của đám hơi đó.

Bây giờ ta đột nhiên tắt nguồn sáng trắng đi. Ta sẽ thấy biến mất nền quang phổ liên tục trên kính ảnh, đồng thời những vạch đen của quang phổ hấp thụ trở thành những vạch màu của quang phổ vạch phát xạ của chính nguyên tố đó. Đó là hiện tượng đảo sắc của vạch quang phổ.

Thí dụ: trong quang phổ hấp thụ của hơi natri có một vạch đen kép nằm đúng vị trí của hai vạch vàng ($0,5890\mu\text{m}$, $0,5896\mu\text{m}$) của natri.

Vậy, ở một nhiệt độ nhất định, một đám hơi có khả năng phát ra những ánh sáng đơn sắc nào thì nó cũng có khả năng hấp thụ những ánh sáng đơn sắc đó.

Quang phổ vạch hấp thụ của mỗi nguyên tố cũng có tính chất đặc trưng riêng cho nguyên tố đó. Vì vậy, cũng có thể căn cứ vào quang phổ vạch hấp

thụ để nhận biết sự có mặt của nguyên tố đó trong các hỗn hợp hay hợp chất. Đó là nội dung của phép phân tích quang phổ hấp thụ.

Nhờ có việc phân tích quang phổ hấp thụ của Mặt Trời mà người ta đã phát hiện ra heli ở trên Mặt Trời, trước khi tìm thấy nó ở Trái Đất. Ngoài ra người ta còn thấy có mặt của rất nhiều nguyên tố trong khí quyển Mặt Trời như hiđrô, natri, canxi, sắt v.v...

5. Phép phân tích quang phổ và tiện lợi của phép phân tích quang phổ

Phép phân tích thành phần cấu tạo của các chất dựa vào việc nghiên cứu quang phổ gọi là phép phân tích quang phổ.

Trong phép phân tích quang phổ định tính, người ta chỉ cần biết sự có mặt của các thành phần khác nhau trong mẫu mà người ta cần nghiên cứu. Phép phân tích quang phổ định tính thì đơn giản và cho kết quả nhanh hơn các phép phân tích hoá học.

Trong phép phân tích quang phổ định lượng, người ta cần biết cả nồng độ của các thành phần trong mẫu. Phép phân tích quang phổ hết sức nhạy. Người ta có thể phát hiện được một nồng độ rất nhỏ của chất trong mẫu (thường vào khoảng 0,002%).

Nhờ phép phân tích quang phổ mà người ta đã biết được thành phần cấu tạo và nhiệt độ của các vật ở rất xa như Mặt Trời và các sao.

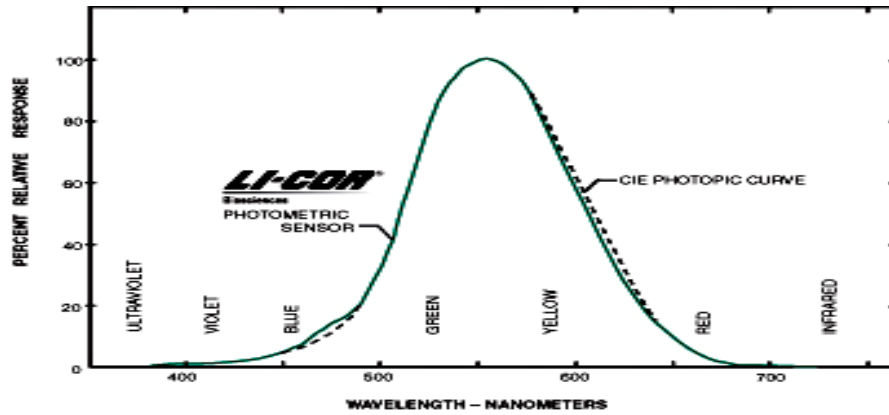
1.4.2. Khái niệm quang trắc

Các hệ đo ánh sáng dựa trên cơ sở mô phỏng đáp ứng của mắt người với ánh sáng.

Trắc quang là phép đo các đại lượng liên quan với ánh sáng trong vùng 400-700 nm.

Phép trắc quang và quang kế sử dụng các đại lượng và đơn vị khác với bức xạ kế. Các hệ trắc quang dựa trên cơ sở các bộ thu có đáp ứng với năng lượng bức xạ theo kiểu như đáp ứng của mắt người.

Người ta dùng một số rất lớn dữ liệu thống kê để tạo ra đường cong chuẩn mô tả đáp ứng phổ của mắt, gọi là đường quan sát chuẩn (hay đường đặc trưng cho quan sát chuẩn) (Standard observer curve hay Luminosity curve for the Standard observer) hay còn gọi là đường cong CIE (“Commision International de l’Eclairage” của Hội đồng “International Commision on Illumination”).



Hình 1.17. đường quan sát chuẩn

Lưu ý trên đồ thị đường cong chuẩn (độ trung tương đối phụ thuộc bước sóng). Bước sóng 555nm là sáng nhất. Một nguồn có thể bức xạ một năng lượng bức xạ như nhau ở 555nm và 610nm, sẽ có độ sáng 0,5 khi hoạt động ở 610nm so với độ sáng 1 khi hoạt động ở 555 nm

BẢNG ĐỘ TRUNG TƯƠNG ĐỐI η ($\eta = 1$ Tại bước sóng 555 nm)

Bước sóng (nm)	Độ trung tương đối	Bước sóng (nm)	Độ trung tương đối
410	0,001	570	0,952
420	0,004	585	0,870
430	0,012	595	0,757
443	0,023	600	0,631
450	0,038	610	0,503
460	0,060	621	0,381
470	0,091	630	0,265
480	0,193	640	0,175
490	0,208	650	0,107
500	0,323	660	0,061
510	0,503	670	0,032
520	0,710	680	0,017
530	0,862	690	0,008
540	0,954	700	0,004
550	0,995	710	0,002
560	0,995	720	0,001

Dòng công suất quang được đo theo Lumen và ký hiệu F_v . Lumen có nghĩa tương tự như đơn vị của công suất Watt nhưng dùng trong vùng bước sóng khả kiến

Quan hệ giữa dòng công suất bức xạ và dòng công suất quang

$$F_v = 683[\text{lm/W}].\Phi_e \eta$$

Với

- F_v : Dòng quang (lumen)
- Φ_e : Dòng bức xạ (Watt)
- 683 lm/W : Hằng số vật lý
- η : Độ trung tương đối ở bước sóng đang xét

Các đặc trưng cơ bản:

- Năng lượng quang trung (Luminous Energy): Q_v lumen.second (lm.s)
- Dòng quang trung: $F_v = dQ_v/dt$ lumen (lm)
- Mật độ dòng quang trung chiếu xạ : $E_v = dF_v/dA$ lm/m²
- Kích thích quang trung: $M_v = dF_v/dA$ lm/m²
- Cường độ sáng): $I_v = dF_v/d\omega = E_v .R^2$ lm/sr
- ω góc đặc (góc khối) Sr (Steradian)
- Độ quang trung-Luminance $L_v = dF_v / (d\omega.dA.\cos\theta)$ lm/sr.m²

Độ quang trung-Luminance L_v của một nguồn có cường độ $I_{(\theta)}$ tại vị trí của đầu thu

$$L_v = I_{(\theta)_t} / a \cos\theta$$

$I_{(\theta)}$: Cường độ bức xạ, là hàm số theo θ (góc giữa tia tới và pháp tuyến của diện tích bị chiếu xạ)

a : Diện tích của nguồn bức xạ.

1.4.3. Các đơn vị đo bức xạ

Các khái niệm cơ bản

Radiant energy (năng lượng bức xạ) (J)	Q_e	Joule
Radiant Flux (dòng bức xạ) (W)	$\Phi_e = (dQ_e/dt) _{\text{qua diện tích } dA}$	Watt
Flux density (mật độ dòng quang tới /đvdt) còn gọi là irradiance (độ rọi năng lượng):	$H_e = d\Phi_e/dA$	(W/m^2)
Radiant Emittance (độ trung năng lượng) là mật độ dòng kích thích trên bề mặt của nguồn được kiểm tra:	$M_e = d\Phi_e/dA$	(W/m^2)
Radiant Intensity (cường độ bức xạ)	$I_e = d\Phi_e/d\omega$	(W/sr)
	với $d\omega = dA/R^2$	Steradian (sr)
Chú ý trường hợp nguồn điểm đẳng hướng	$I_e = \Phi_e/4\pi = H_e R^2$	
Radiance (công suất bức xạ trên đơn vị góc đặc và trên đơn vị diện tích)	$L_\lambda = d\Phi_e/d\omega dA \cos\theta$	$(W/sr.m^2)$
Spectral Radiant Power (công suất bức xạ trên đơn vị bước sóng):	$\Phi_\lambda = dQ_e/d\lambda$	(W/nm)
Spectral Emittance (phổ kích thích, độ rọi phổ)	$W_\lambda = dM_e/d\lambda$	$(W/m^2.nm)$
Spectral Radiant Intensity: (W/sr.nm)	$I_\lambda = dI_e/d\lambda$	
Spectral Radiance	$L_\lambda = dL_e/d\lambda$	$(W/sr.m^2.nm)$

Đơn vị ánh sáng và bức xạ điện từ có liên quan				
1	năng lượng bức xạ	jun	J	$1J = 1N.1m = 1m^2.kg.s^{-2}$

2	công suất bức xạ (thông lượng bức xạ)	oát	W	$1W = 1J/1s = 1m^2.kg.s^{-3}$
3	cường độ bức xạ	oát trên steradian	W/sr	Oát trên steradian là cường độ bức xạ của một nguồn điểm phát đều thông lượng bức xạ 1 oát trong góc khối 1 steradian. $1W/sr = 1m^2.kg.s^{-3}$
4	độ chói năng lượng	oát trên steradian mét vuông	W/(sr.m ²)	Oát trên steradian mét vuông là độ chói năng lượng theo một hướng đã cho tại một điểm trên bề mặt có cường độ bức xạ của phân tử bề mặt ấy là 1 oát trên steradian và diện tích hình chiếu của phân tử lên mặt phẳng vuông góc với hướng trên là 1 mét vuông. $1W/(sr.m^2) = 1kg.s^{-3}$
5	năng suất bức xạ	oát trên mét vuông	W/m ²	Oát trên mét vuông là năng suất bức xạ tại một điểm trên bề mặt có thông lượng bức xạ từ một phân tử diện tích 1 mét vuông của bề mặt này là 1 oát. $1W/m^2 = 1kg.s^{-3}$
6	độ rọi năng lượng	oát trên mét vuông	W/m ²	Oát trên mét vuông là độ rọi năng lượng ở một điểm trên bề mặt có thông lượng bức xạ 1 oát chiếu lên phân tử diện tích 1 mét vuông của bề mặt đó. $1W/m^2 = 1kg.s^{-3}$
7	cường độ sáng	candela	cd	Candela là cường độ sáng theo một phương xác định của một nguồn phát ra bức xạ đơn sắc có tần số 540×10^{12} héc và có cường độ bức xạ theo phương đó là 1/683 oát trên steradian (CGPM lần thứ 16, 1979). Đơn vị cơ bản.

8	độ chói	candela trên mét vuông	cd/m^2	<p>Candela trên mét vuông là độ chói của một nguồn phẳng 1 mét vuông có cường độ sáng 1 candela đo theo phương vuông góc với nguồn.</p> $1\text{cd/m}^2 = 1\text{m}^{-2}.\text{cd}$
9	quang thông	lumen	lm	<p>Lumen là quang thông do một nguồn sáng điểm cường độ 1 candela phát đều trong góc khối 1 steradian.</p> $1\text{lm} = 1\text{cd}.1\text{sr} = 1\text{cd}$
10	lượng sáng	lumen giây	lm.s	<p>Lumen giây là lượng sáng của quang thông 1 lumen tính trong thời gian 1 giây.</p> $1\text{lm.s} = 1\text{cd.s}$
		lumen giờ	lm.h	$1\text{lm.h} = 3\,600\text{lm.s}$
11	năng suất phát sáng (độ trung)	lumen trên mét vuông	lm/m^2	<p>Lumen trên mét vuông là năng suất phát sáng của một nguồn hình cầu có diện tích mặt ngoài 1 mét vuông phát ra một quang thông 1 lumen phân bố đều theo mọi phương.</p> $1\text{lm/m}^2 = 1\text{m}^{-2}.\text{cd}$
12	độ rọi	lux	lx	<p>Lux là độ rọi của một mặt phẳng nhận quang thông 1 lumen phân bố đều trên diện tích 1 mét vuông của mặt đó.</p> $1\text{lx} = 1\text{lm}/1\text{m}^2 = 1\text{m}^{-2}.\text{cd}$
13	lượng rọi	lux giây	lx.s	<p>Lux giây là lượng rọi ứng với độ rọi 1 lux trong thời gian 1 giây.</p> $1\text{lx.s} = 1\text{m}^{-2}.\text{s.cd}$
		lux giờ	lx.h	$1\text{lx.h} = 3\,600\text{lx.s}$
14	độ tụ (quang lực)	một trên mét	m^{-1}	<p>Một trên mét là độ tụ của một hệ quang có tiêu cự 1 mét trong môi trường chiết suất bằng 1.</p> $1\text{m}^{-1} = 1\text{m}^{-1}$

		điôp	dp	Điôp là tên gọi khác của đơn vị một trên mét. $1dp = 1m^{-1}$
--	--	------	----	--

Chương 2

BÁN DẪN

2.1. Lý thuyết dải năng lượng

2.1.1 Mức năng lượng và dải năng lượng

Ta biết rằng vật chất được cấu tạo từ những nguyên tử (đó là thành phần nhỏ nhất của nguyên tố mà còn giữ nguyên tính chất của nguyên tố đó). Theo mô hình của nhà vật lý Anh Rutherford (1871-1937), nguyên tử gồm có một nhân mang điện tích dương (Proton mang điện tích dương và Neutron trung hoà về điện) và một số điện tử (electron) mang điện tích âm chuyển động chung quanh nhân và chịu tác động bởi lực hút của nhân.

Nguyên tử luôn luôn trung hoà điện tích, số electron quay chung quanh nhân bằng số proton chứa trong nhân - điện tích của một proton bằng điện tích một electron nhưng trái dấu). Điện tích của một electron là $-1,602 \cdot 10^{-19}$ C (Coulomb), điều này có nghĩa là để có được 1 Coulomb điện tích phải có $6,242 \cdot 10^{18}$ electron. điện tích của điện tử có thể đo được trực tiếp nhưng khối lượng của điện tử không thể đo trực tiếp được. Tuy nhiên, người ta có thể đo được tỉ số giữa điện tích và khối lượng (e/m), từ đó suy ra được khối lượng của điện tử là $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ Kg

$$m_e = m_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Đó là khối lượng của điện tử khi nó chuyển động với vận tốc rất nhỏ so với vận tốc ánh sáng ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s). Khi vận tốc điện tử tăng lên, khối lượng của điện tử được tính theo công thức Lorentz-Einstein:

Mỗi điện tử chuyển động trên một đường tròn và chịu một gia tốc xuyên tâm. Theo thuyết điện từ thì khi chuyển động có gia tốc, điện tử phải phát ra năng lượng. Sự mất năng lượng này làm cho quỹ đạo của điện tử nhỏ dần và sau một thời gian ngắn, điện tử sẽ rơi vào nhân. Nhưng trong thực tế, các hệ thống này là một hệ thống bền theo thời gian. Do đó, giả thuyết của Rutherford không đứng vững.

Nhà vật lý học Đan Mạch Niels Bohr (1885- 1962) đã bỏ tước bằng các giả thuyết sau:

- Có những quỹ đạo đặc biệt, trên đó điện tử có thể di chuyển mà không phát ra năng lượng. Tương ứng với mỗi quỹ đạo có một mức năng lượng nhất định. Ta có một quỹ đạo dừng.

- Khi điện tử di chuyển từ một quỹ đạo tương ứng với mức năng lượng w_1 sang quỹ đạo khác tương ứng với mức năng lượng w_2 thì sẽ có hiện tượng bức xạ hay hấp thụ năng lượng. Tần số của bức xạ (hay hấp thụ) này là

$$f = \frac{w_2 - w_1}{h}$$

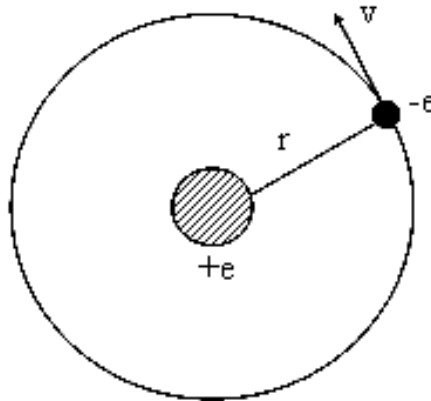
Trong đó, $h=6,62.10^{-34}$ J.s (hằng số Planck).

- Trong mỗi quỹ đạo dừng, moment động lượng của điện tử bằng bội số của

$$\frac{h}{2\pi} = \hbar$$

Moment động lượng:

$$m.v.r = n \cdot \frac{h}{2\pi} = n \cdot \hbar$$



Hình 2.1. Mô hình nguyên tử hydro

Với giả thuyết trên, người ta đã dự đoán được các mức năng lượng của nguyên tử hydro và giải thích được quang phổ vạch của Hydro, nhưng không giải thích được đối với những nguyên tử có nhiều điện tử. Nhận thấy sự đối tính giữa sóng và hạt, Louis de Broglie (Nhà vật lý học Pháp) cho rằng có thể liên kết mỗi hạt điện khối lượng m , chuyển động với vận tốc v một bước sóng

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Trong khi giải phương trình Schrodinger để tìm năng lượng của những điện tử trong một nguyên tử duy nhất, người ta thấy rằng mỗi trạng thái năng lượng của electron phụ thuộc vào 4 số nguyên gọi là 4 số nguyên lượng

- Số nguyên lượng xuyên tâm (Số nguyên lượng chính). Xác định kích thước của quỹ đạo $n=1,2,3,\dots,7$
- Số nguyên lượng phương vị: (Số nguyên lượng phụ). Xác định hình thể quỹ đạo $l=1,2,3,\dots,n-1$
- Số nguyên lượng từ. Xác định phương hướng của quỹ đạo $m_l=0, \pm 1, \dots, \pm l$
- Số nguyên lượng Spin. Xác định chiều quay của electron

$$m_s = \pm \frac{1}{2}$$

Trong một hệ thống gồm nhiều nguyên tử, các số nguyên lượng tuân theo nguyên lý ngoại trừ Pauli. Nguyên lý này cho rằng: trong một hệ thống không thể có 2 trạng thái nguyên lượng giống nhau, nghĩa là không thể có hai điện tử có 4 số nguyên lượng hoàn toàn giống nhau.

2.1.2 Phân bố điện tử trong nguyên tử theo năng lượng

Tất cả các nguyên tử có cùng số nguyên lượng chính n hợp thành một tầng có tên là K,L,M,N,O,P,Q ứng với $n=1,2,3,4,5,6,7$.

Ở mỗi tầng, các điện tử có cùng số l tạo thành các phụ tầng có tên s, p, d, f tương ứng với $l=0,1,2,3$

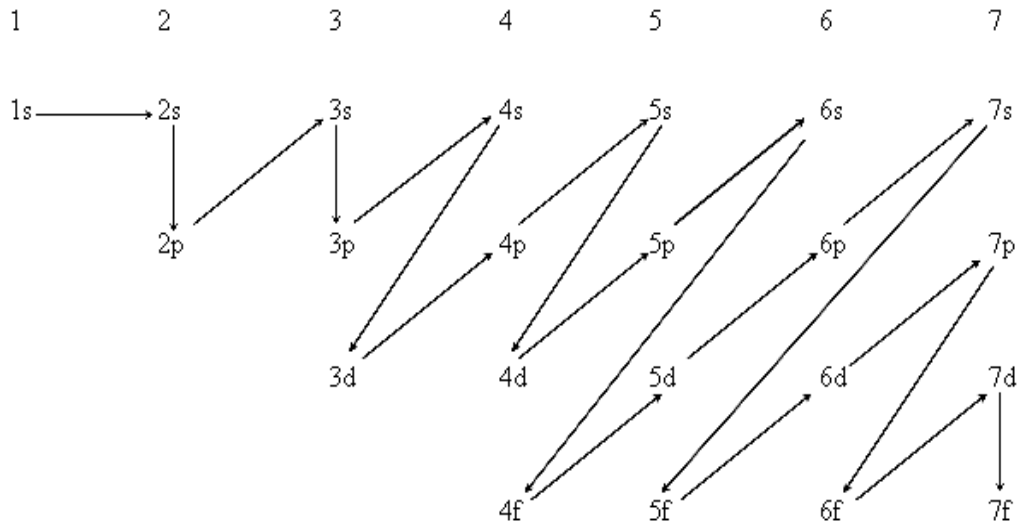
- Tầng K ($n=1$) có một phụ tầng s có tối đa 2 điện tử.
- Tầng L ($n=2$) có một phụ tầng s có tối đa 2 điện tử và một phụ tầng p có tối đa 6 điện tử.
- Tầng M ($n=3$) có một phụ tầng s (tối đa 2 điện tử), một phụ tầng p (tối đa 6 điện tử) và một phụ tầng d (tối đa 10 điện tử).
- Tầng N ($n=4$) có một phụ tầng s (tối đa 2 điện tử), một phụ tầng p (tối đa 6 điện tử), một phụ tầng d (tối đa 10 điện tử) và một phụ tầng f (tối đa 14 điện tử).

Như vậy:

- Tầng K có tối đa 2 điện tử.
- Tầng L có tối đa 8 điện tử.
- Tầng M có tối đa 18 điện tử.

- Tầng N có tối đa 32 điện tử.
- Các tầng O,P,Q cũng có 4 phụ tầng và cũng có tối đa 32 điện tử.

Ứng với mỗi phụ tầng có một mức năng lượng và các mức năng lượng được xếp theo thứ tự như sau:

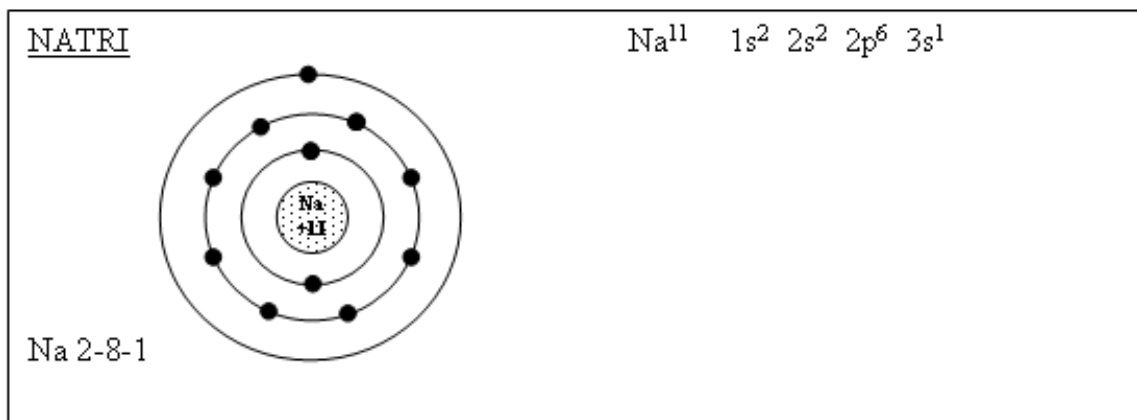


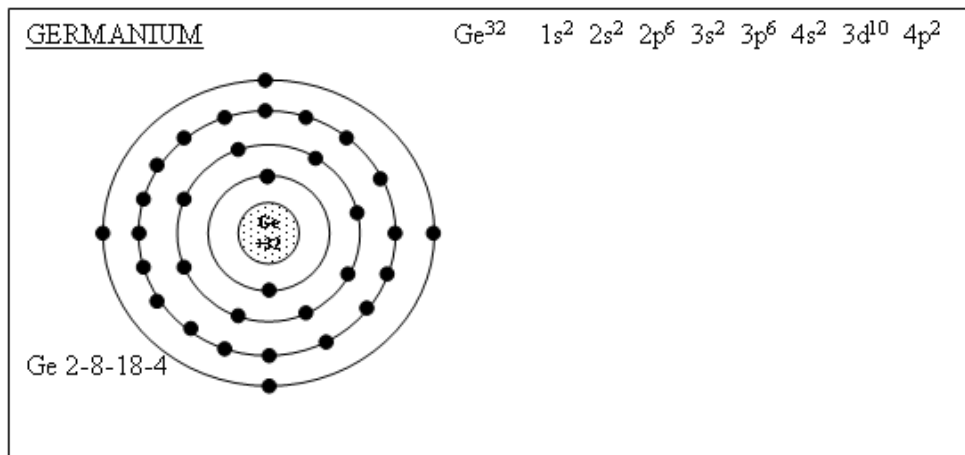
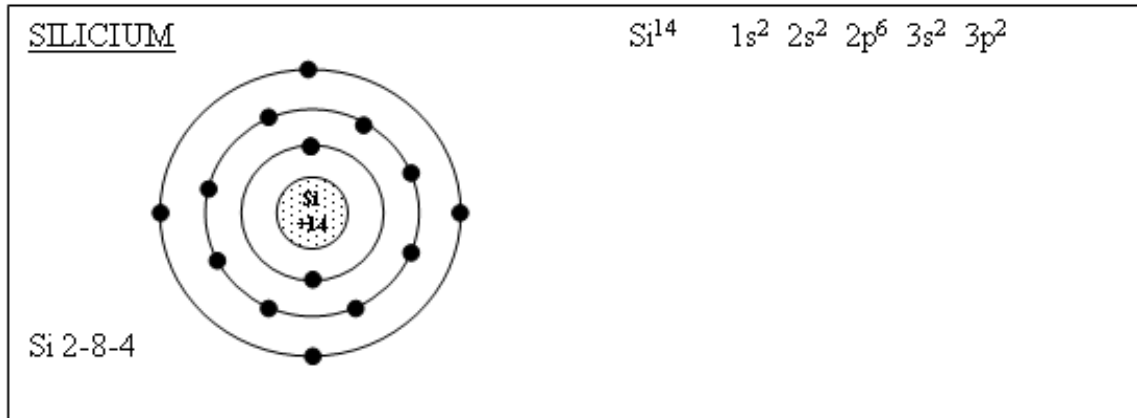
Hình 2.2. Phân bố điện tử trong nguyên tử theo năng lượng

Khi không bị kích thích, các trạng thái năng lượng nhỏ bị điện tử chiếm trước (gần nhân hơn) khi hết chỗ mới sang mức cao hơn (xa nhân hơn).

Thí dụ: nguyên tử Na có số điện tử $z=11$, có các phụ tầng 1s,2s,2p bị các điện tử chiếm hoàn toàn nhưng chỉ có 1 điện tử chiếm phụ tầng 3s.

Cách biểu diễn





Hình 2.3. . Mô hình nguyên tử Na, Si, Ge

Lớp bảo hoà: Một phụ tầng bảo hoà khi có đủ số điện tử tối đa.

Một tầng bảo hoà khi mọi phụ tầng đã bảo hoà. Một tầng bảo hoà rất bền, không nhận thêm và cũng khó mất điện tử.

Tầng ngoài cùng: Trong một nguyên tử, tầng ngoài cùng không bao giờ chứa quá 8 điện tử. Nguyên tử có 8 điện tử ở tầng ngoài cùng đều bền vững (trường hợp các khí trơ).

Các điện tử ở tầng ngoài cùng quyết định hầu hết tính chất hoá học của một nguyên tố.

2.1.3. Dải năng lượng (Energy bands)

Những công trình khảo cứu ở tia X chứng tỏ rằng hầu hết các chất bán dẫn đều ở dạng kết tinh.

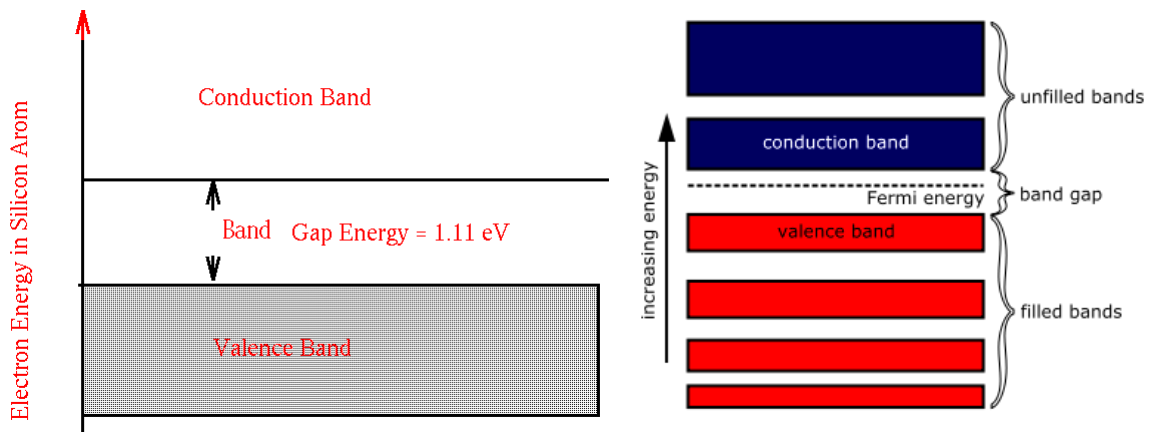
Tính chất dẫn điện của các vật liệu rắn được giải thích nhờ lý thuyết vùng năng lượng. Như ta biết, điện tử tồn tại trong nguyên tử trên những mức năng lượng gián đoạn (các trạng thái dừng). Nhưng trong chất rắn, khi mà các nguyên tử kết hợp lại với nhau thành các khối, thì các mức năng lượng này bị phủ lên nhau, và trở thành các vùng năng lượng và sẽ có ba vùng chính.

Ta khảo sát một tinh thể bất kỳ, năng lượng của điện tử được chia thành từng dải. Dải năng lượng cao nhất bị chiếm gọi là dải hoá trị, dải năng lượng thấp nhất chưa bị chiếm gọi là dải dẫn điện. Khoảng cách hai dải năng lượng này gọi là dải cấm.

Vùng hóa trị (valence band): Là vùng có năng lượng thấp nhất theo thang năng lượng, là vùng mà điện tử bị liên kết mạnh với nguyên tử và không linh động.

Vùng dẫn (Conduction band): Vùng có mức năng lượng cao nhất, là vùng mà điện tử sẽ linh động (như các điện tử tự do) và điện tử ở vùng này sẽ là điện tử dẫn, có nghĩa là chất sẽ có khả năng dẫn điện khi có điện tử tồn tại trên vùng dẫn. Tính dẫn điện tăng khi mật độ điện tử trên vùng dẫn tăng.

Vùng cấm (Forbidden band): Là vùng nằm giữa vùng hóa trị và vùng dẫn, không có mức năng lượng nào do đó điện tử không thể tồn tại trên vùng cấm. Nếu bán dẫn pha tạp, có thể xuất hiện các mức năng lượng trong vùng cấm (mức pha tạp). Khoảng cách giữa đáy vùng dẫn và đỉnh vùng hóa trị gọi là độ rộng vùng cấm, hay năng lượng vùng cấm (Band Gap). Tùy theo độ rộng vùng cấm lớn hay nhỏ mà chất có thể là dẫn điện hoặc không dẫn điện.



Hình 2.4. Dải năng lượng

Như vậy, tính dẫn điện của các chất rắn và tính chất của chất bán dẫn có thể lý giải một cách đơn giản nhờ lý thuyết vùng năng lượng như sau

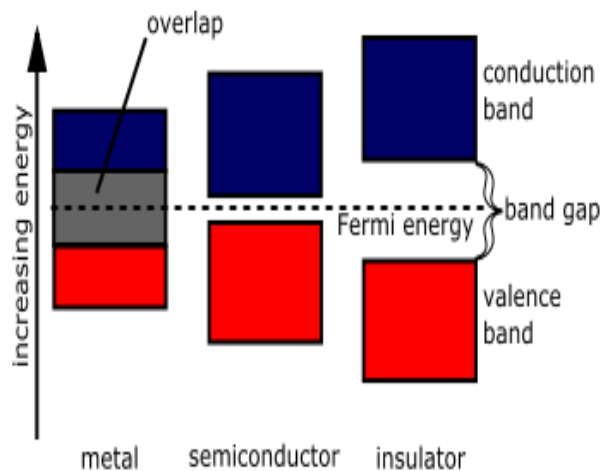
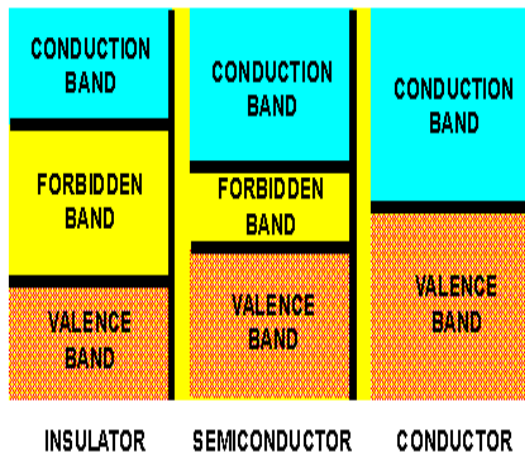
Kim loại có vùng dẫn và vùng hóa trị phủ lên nhau (không có vùng cấm) do đó luôn luôn có điện tử trên vùng dẫn vì thế mà kim loại luôn luôn dẫn điện.

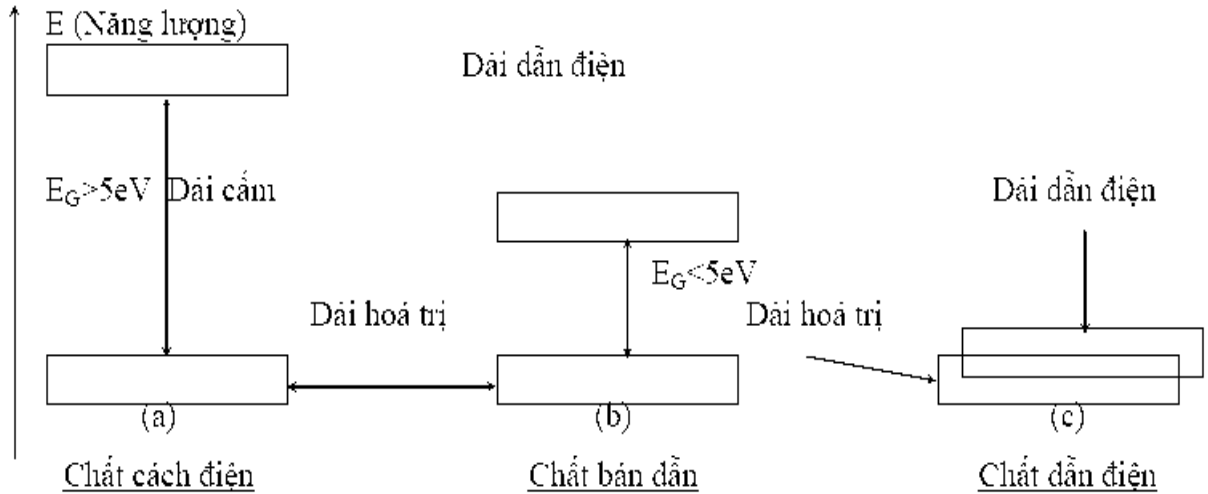
Các chất bán dẫn có vùng cấm có một độ rộng xác định. Ở không độ tuyệt đối (0 K), mức Fermi nằm giữa vùng cấm, có nghĩa là tất cả các điện tử tồn tại ở vùng hóa trị, do đó chất bán dẫn không dẫn điện. Khi tăng dần nhiệt độ, các điện tử sẽ nhận được năng lượng nhiệt ($k_B.T$ với k_B là hằng số Boltzmann) nhưng năng lượng này chưa đủ để điện tử vượt qua vùng cấm nên điện tử vẫn ở vùng hóa trị. Khi tăng nhiệt độ đến mức đủ cao, sẽ có một số

điện tử nhận được năng lượng lớn hơn năng lượng vùng cấm và nó sẽ nhảy lên vùng dẫn và chất rắn trở thành dẫn điện. Khi nhiệt độ càng tăng lên, mật độ điện tử trên vùng dẫn sẽ càng tăng lên, do đó, tính dẫn điện của chất bán dẫn tăng dần theo nhiệt độ (hay điện trở suất giảm dần theo nhiệt độ).

Ta có 3 trường hợp tóm tắt sau

- Dải cấm có độ cao khá lớn ($E_G > 5\text{eV}$) ($1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Đây là trường hợp của các chất cách điện. Thí dụ như kim cương có $E_G = 7\text{eV}$, SiO_2 $E_G = 9\text{eV}$.
- Dải cấm có độ cao nhỏ ($E_G < 5\text{eV}$). Đây là trường hợp chất bán dẫn điện. Thí dụ: Germanium có $E_G = 0,75\text{eV}$, Silicium có $E_G = 1,12\text{eV}$, Galium Arsenic có $E_G = 1,4\text{eV}$
- Dải hoá trị và dải dẫn điện chồng lên nhau, đây là trường hợp của chất dẫn điện. Thí dụ như đồng, nhôm...





Hình 2.5. Độ dẫn điện phụ thuộc vào dải cấm

Giả sử ta tăng nhiệt độ của tinh thể, nhờ sự cung cấp nhiệt năng, điện tử trong dải hoá trị tăng năng lượng.

Trong trường hợp (a), vì E_G lớn, điện tử không đủ năng lượng vượt dải cấm để vào dải dẫn điện. Nếu ta cho tác dụng một điện trường vào tinh thể, vì tất cả các trạng thái trong dải hoá trị đều bị chiếm nên điện tử chỉ có thể di chuyển bằng cách đổi chỗ cho nhau. Do đó, số điện tử đi, về một chiều bằng với số điện tử đi, về theo chiều ngược lại, dòng điện trung bình triệt tiêu. Ta có chất cách điện.

Trong trường hợp (b), một số điện tử có đủ năng lượng sẽ vượt dải cấm vào dải dẫn điện. Dưới tác dụng của điện trường, các điện tử này có thể thay đổi năng lượng dễ dàng vì trong dải dẫn điện có nhiều mức năng lượng trống để tiếp nhận chúng. Vậy điện tử có năng lượng trong dải dẫn điện có thể di chuyển theo một chiều duy nhất dưới tác dụng của điện trường, ta có chất bán dẫn.

Trong trường hợp (c) cũng giống như trường hợp (b) nhưng số điện tử trong dải dẫn điện nhiều hơn làm cho sự di chuyển mạnh hơn, ta có kim loại hay chất dẫn điện.

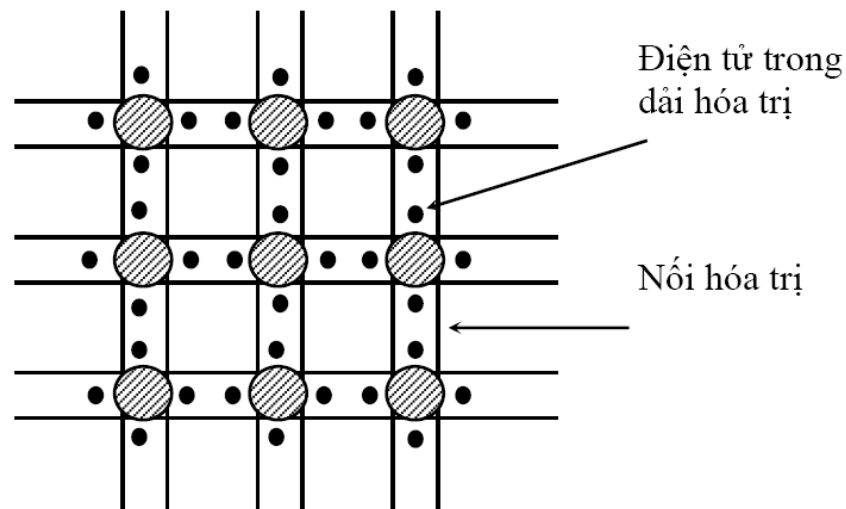
2.2. Sự dẫn điện trong bán dẫn

2.2.1. Chất bán dẫn điện (Semiconductor)

1. chất bán dẫn điện thuần (Pure semiconductor)

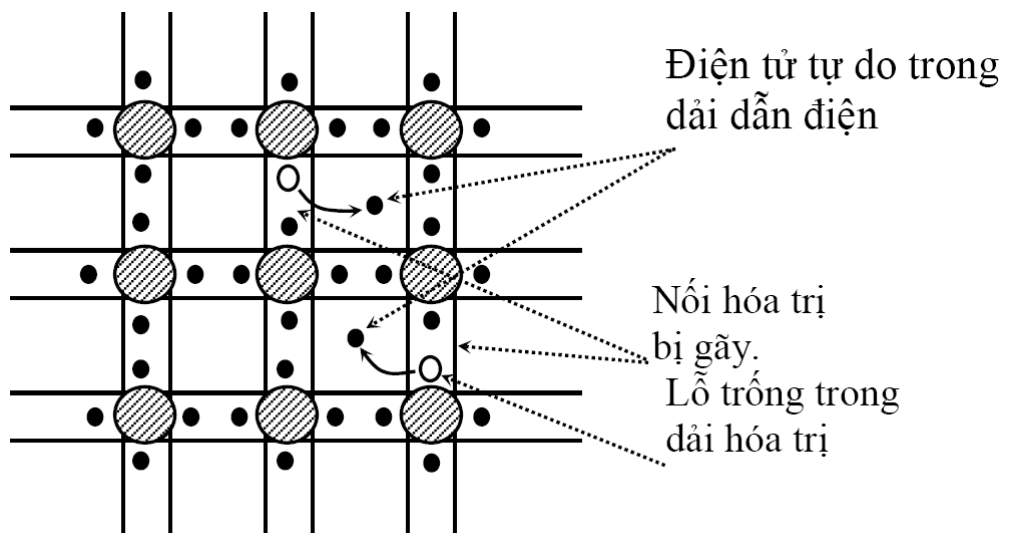
Hầu hết các chất bán dẫn đều có các nguyên tử sắp xếp theo cấu tạo tinh thể. Hai chất bán dẫn được dùng nhiều nhất trong kỹ thuật chế tạo linh kiện điện tử là Silicon và Germanium. Mỗi nguyên tử của hai chất này đều có 4 điện tử ở ngoài cùng kết hợp với 4 điện tử của 4 nguyên tử kế cận tạo

thành 4 liên kết hoá trị. Vì vậy tinh thể Ge và Si ở nhiệt độ thấp là các chất cách điện.



Hình 2.6. Tinh thể chất bán dẫn ở nhiệt độ thấp ($T = 0^0K$)

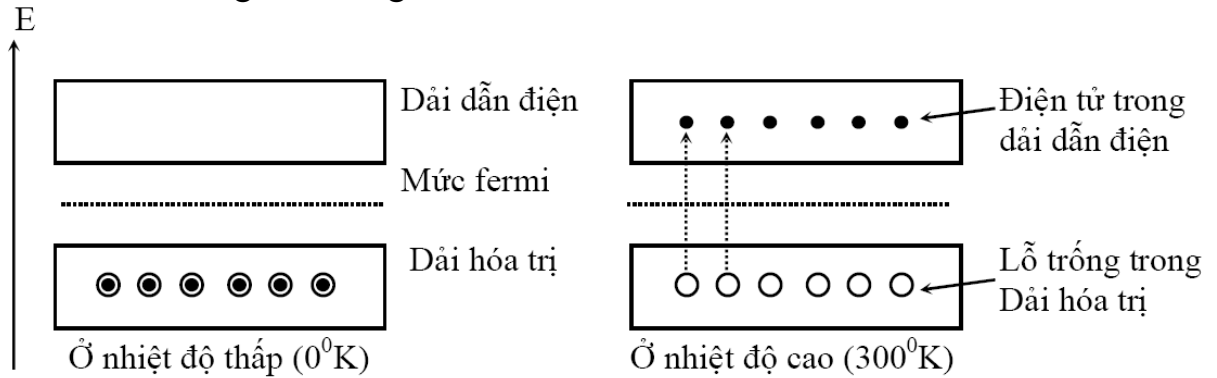
Nếu ta tăng nhiệt độ tinh thể, nhiệt năng sẽ làm tăng năng lượng một số điện tử và làm gãy một số nối hoá trị. Các điện tử ở các nối bị gãy rời xa nhau và có thể di chuyển dễ dàng trong mạng tinh thể dưới tác dụng của điện trường. Tại các nối hoá trị bị gãy ta có các lỗ trống (hole). Về phương diện năng lượng, ta có thể nói rằng nhiệt năng làm tăng năng lượng các điện tử trong dải hoá trị.



Hình 2.7. Tinh thể chất bán dẫn ở nhiệt độ cao ($T = 3000K$)

Khi năng lượng này lớn hơn năng lượng của dải cấm (0,7eV đối với Ge và 1,12eV đối với Si), điện tử có thể vượt dải cấm vào dải dẫn điện và chừa lại những lỗ trống (trạng thái năng lượng trống) trong dải hoá trị). Ta nhận thấy số điện tử trong dải dẫn điện bằng số lỗ trống trong dải hoá trị.

Nếu ta gọi n là mật độ điện tử có năng lượng trong dải dẫn điện và p là mật độ lỗ trống có năng lượng trong dải hoá trị. Ta có $n=p=n_i$
 Khi T tăng thì n_i tăng.

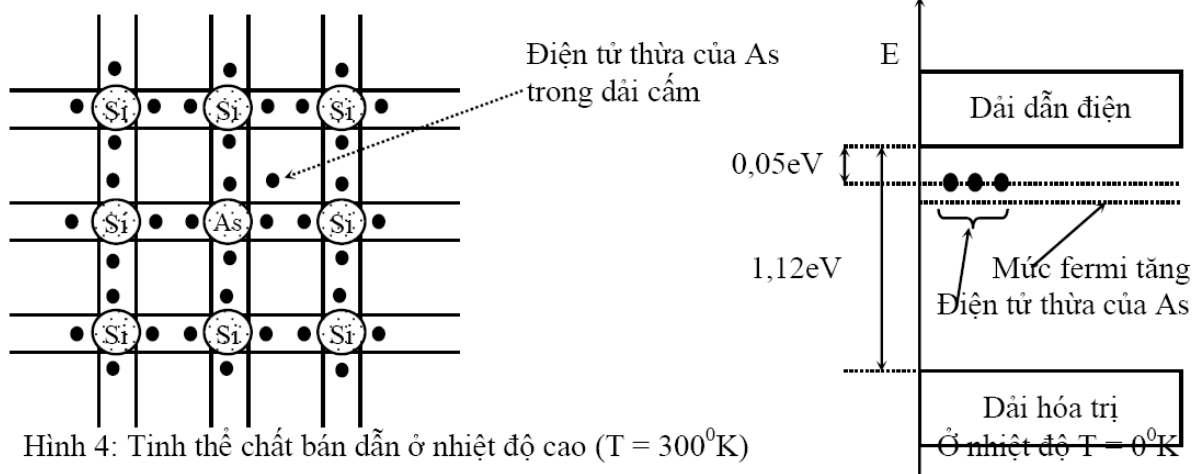


Hình 2.8. Tinh thể chất bán dẫn

Ta gọi chất bán dẫn có tính chất $n = p$ là chất bán dẫn thuần. Thông thường người ta gặp nhiều khó khăn để chế tạo chất bán dẫn loại này.

2. Chất bán dẫn ngoại lai hay có chất pha (Doped/Extrinsic Semiconductor)

Chất bán dẫn loại N: (N - type semiconductor)



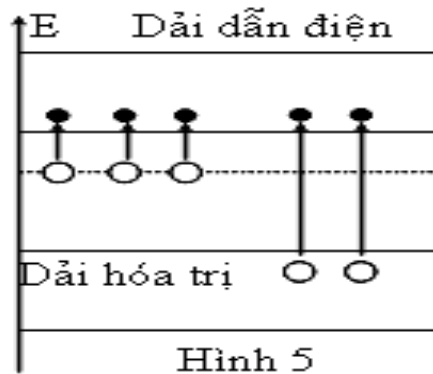
Hình 4: Tinh thể chất bán dẫn ở nhiệt độ cao ($T = 300^0K$)

Hình 2.9. Tinh thể Si

Giả sử ta pha vào Si thuần những nguyên tử thuộc nhóm V của bảng phân loại tuần hoàn như As (Arsenic), Photpho (p), Antimony (Sb). Bán kính nguyên tử của As gần bằng bán kính nguyên tử của Si nên có thể thay thế một nguyên tử Si trong mạng tinh thể. Bốn điện tử của As kết hợp với 4 điện tử của Si lân cận tạo thành 4 nối hoá trị, Còn dư lại một điện tử của As. Ở nhiệt độ thấp, tất cả các điện tử của các nối hoá trị đều có năng lượng trong dải hoá trị, trừ những điện tử thừa của As không tạo nối hoá trị có năng lượng E_D nằm

trong dải cấm và cách đẩy dẫn điện một khoảng năng lượng nhỏ chừng $0,05eV$.

Giả sử ta tăng nhiệt độ của tinh thể, một số nối hoá trị bị gãy, ta có những lỗ trống trong dải hoá trị và những điện tử trong dải dẫn điện giống như trong trường hợp của các chất bán dẫn thuần. Ngoài ra, các điện tử của As có năng lượng E_D cũng nhận nhiệt năng để trở thành những điện tử có năng lượng trong dải dẫn điện. Vì thế ta có thể coi như hầu hết các nguyên tử As đều bị Ion hoá (vì khoảng năng lượng giữa E_D và dải dẫn điện rất nhỏ), nghĩa là tất cả các điện tử lúc đầu có năng lượng E_D đều được tăng năng lượng để trở thành điện tử tự do.



Hình 2.10. tăng nhiệt độ

Nếu ta gọi N_D là mật độ những nguyên tử As pha vào (còn gọi là những nguyên tử cho donor atom).

$$\text{Ta có: } n = p + N_D$$

Với

- n mật độ điện tử trong dải dẫn điện.
- p mật độ lỗ trống trong dải hoá trị.

Người ta cũng chứng minh được: $n \cdot p = n_i^2$ ($n < p$)

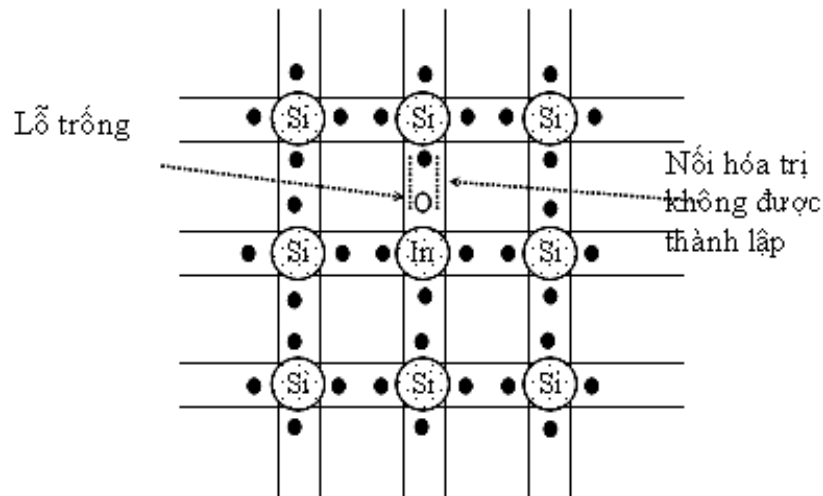
n_i mật độ điện tử hoặc lỗ trống trong chất bán dẫn thuần trước khi pha.

Chất bán dẫn như trên có số điện tử trong dải dẫn điện nhiều hơn số lỗ trống trong dải hoá trị gọi là chất bán dẫn loại N.

Chất bán dẫn loại P

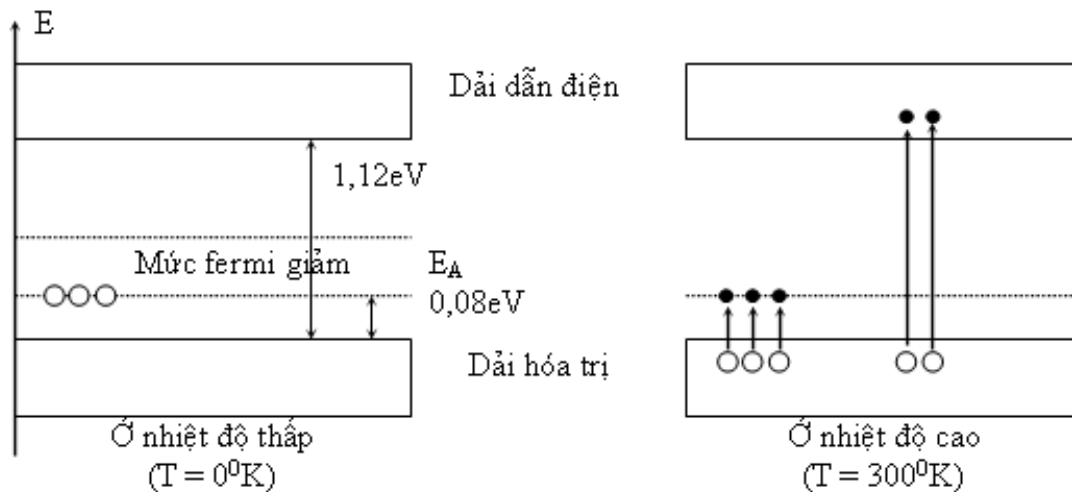
Thay vì pha vào Si thuần một nguyên tố thuộc nhóm V, ta pha vào những nguyên tố thuộc nhóm III như Indium (In), Gallium (Ga), nhôm (Al),... Bán kính nguyên tử In gần bằng bán kính nguyên tử Si nên nó có thể thay thế một nguyên tử Si trong mạng tinh thể. Ba điện tử của nguyên tử In kết hợp với

ba điện tử của ba nguyên tử Si kế cận tạo thành 3 nối hoá trị, còn một điện tử của Si có năng lượng trong dải hoá trị không tạo một nối với Indium. Giữa In và Si này ta có một trạng thái năng lượng trống có năng lượng E_A nằm trong dải cấm và cách dải hoá trị một khoảng năng lượng nhỏ chừng $0,08\text{eV}$.



Hình 2.11. Tinh thể chất bán dẫn loại P

Ở nhiệt độ thấp ($T=0\text{ }^0\text{K}$), tất cả các điện tử đều có năng lượng trong dải hoá trị. Nếu ta tăng nhiệt độ của tinh thể sẽ có một số điện tử trong dải hoá trị nhận năng lượng và vượt dải cấm vào dải dẫn điện, đồng thời cũng có những điện tử vượt dải cấm lên chiếm chỗ những lỗ trống có năng lượng E_A .



Hình 2.12. tăng nhiệt độ chất bán dẫn loại P

Nếu ta gọi N_A là mật độ những nguyên tử Indium pha vào (còn được gọi là nguyên tử nhận), ta cũng có:

$$p = n + N_A$$

- p : mật độ lỗ trống trong dải hoá trị.
- n : mật độ điện tử trong dải dẫn điện.

Người ta cũng chứng minh được:

$$n.p = n_i^2 \quad (p > n)$$

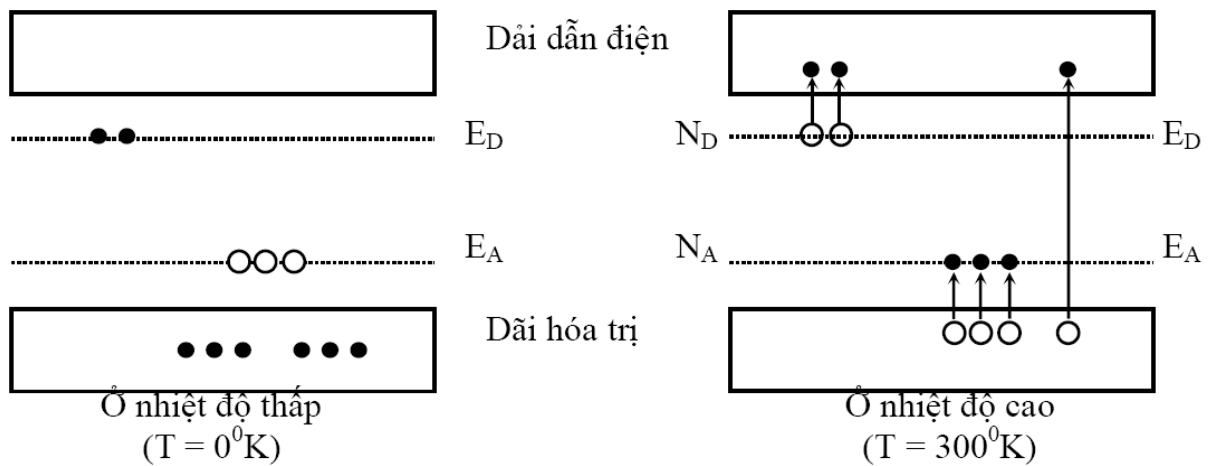
n_i là mật độ điện tử hoặc lỗ trống trong chất bán dẫn thuần trước khi pha.

Chất bán dẫn như trên có số lỗ trống trong dải hoá trị nhiều hơn số điện tử trong dải dẫn điện được gọi là chất bán dẫn loại P.

Như vậy, trong chất bán dẫn loại p, hạt tải điện đa số là lỗ trống và hạt tải điện thiểu số là điện tử.

Chất bán dẫn hỗn hợp

Ta cũng có thể pha vào Si thuần những nguyên tử cho và những nguyên tử nhận để có chất bán dẫn hỗn hợp. Hình sau là sơ đồ năng lượng của chất bán dẫn hỗn hợp.



Hình 2.13. Dải năng lượng Chất bán dẫn hỗn hợp

Trong trường hợp chất bán dẫn hỗn hợp, ta có:

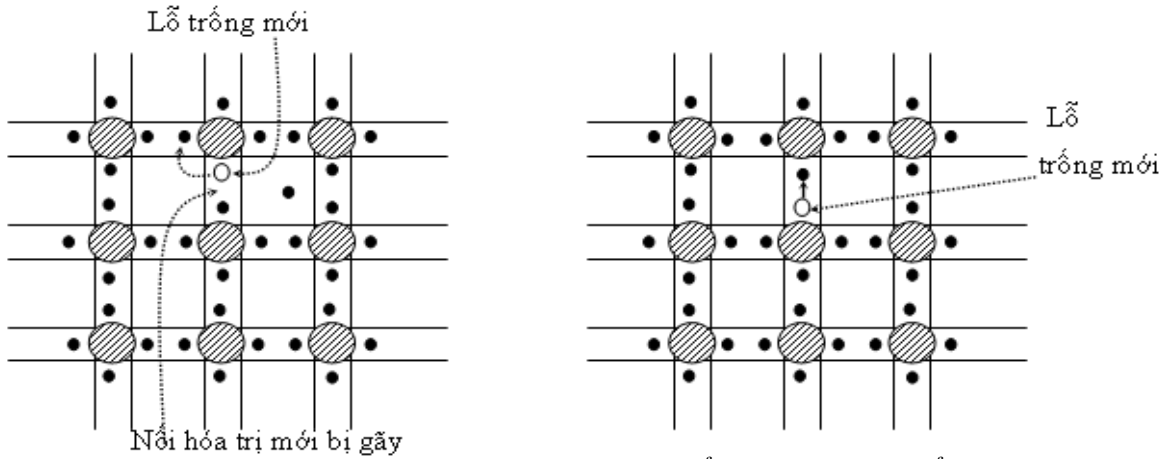
$$n + N_A = p + N_D$$

$$n.p = n_i^2$$

Nếu $N_D > N_A \Rightarrow n > p$, ta có chất bán dẫn hỗn hợp loại N.

Nếu $N_D < N_A \Rightarrow n < p$, ta có chất bán dẫn hỗn hợp loại P.

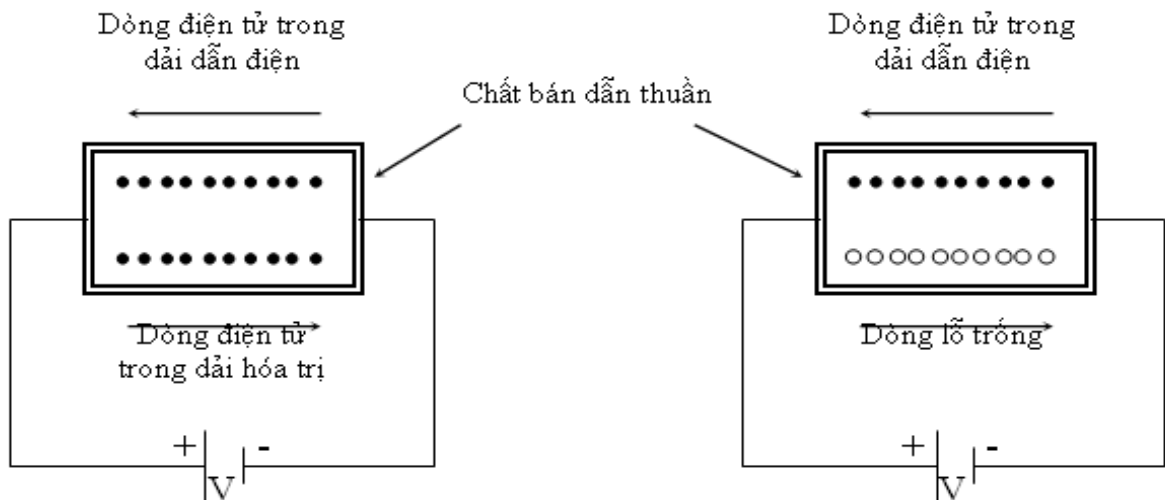
2.2.2 Dẫn suất của chất bán dẫn



Hình 2.15. những điện tử di chuyển trong tinh thể

Dưới tác dụng của điện trường, những điện tử có năng lượng trong dải dẫn điện di chuyển tạo nên dòng điện I_n , nhưng cũng có những điện tử di chuyển từ một nối hoá trị bị gãy đến chiếm chỗ trống của một nối hoá trị đã bị gãy. Những điện tử này cũng tạo ra một dòng điện tương đương với dòng điện do lỗ trống mang điện tích dương di chuyển ngược chiều, ta gọi dòng điện này là I_p . Hình sau đây mô tả sự di chuyển của điện tử (hay lỗ trống) trong dải hoá trị ở nhiệt độ cao.

Vậy ta có thể coi như dòng điện trong chất bán dẫn là sự hợp thành của dòng điện do những điện tử trong dải dẫn điện (đa số đối với chất bán dẫn loại N và thiếu số đối với chất bán dẫn loại P) và những lỗ trống trong dải hoá trị (đa số đối với chất bán dẫn loại P và thiếu số đối với chất bán dẫn loại N).



Hình 2.16. Dòng điện trong chất bán dẫn

Dưới tác dụng của điện trường, các điện tử và lỗ trống di chuyển với vận tốc trung bình $v_n = \mu_n E$ và $v_p = \mu_p E$.

Tương ứng với những dòng điện này, ta có những mật độ dòng điện J , J_n , J_p sao cho: $J = J_n + J_p$

$$J_n = n \cdot e \cdot v_n = n \cdot e \cdot \mu_n \cdot E.$$

- J_n Mật độ dòng điện trôi của điện tử
- μ_n là độ linh động của điện tử
- n là mật độ điện tử trong dải dẫn điện

$$J_p = n.e.v_p = n.e.\mu.p.E.$$

- J_p Mật độ dòng điện trôi của lỗ trống
- μ_p là độ linh động của lỗ trống
- p là mật độ lỗ trống trong dải hoá trị).

Như vậy: $J = e.(n.\mu_n + p.\mu_p).E.$

Theo định luật Ohm, ta có: $J = \sigma.E$

$\Rightarrow \sigma = e.(n.\mu_n + p.\mu_p)$ được gọi là dẫn suất của chất bán dẫn.

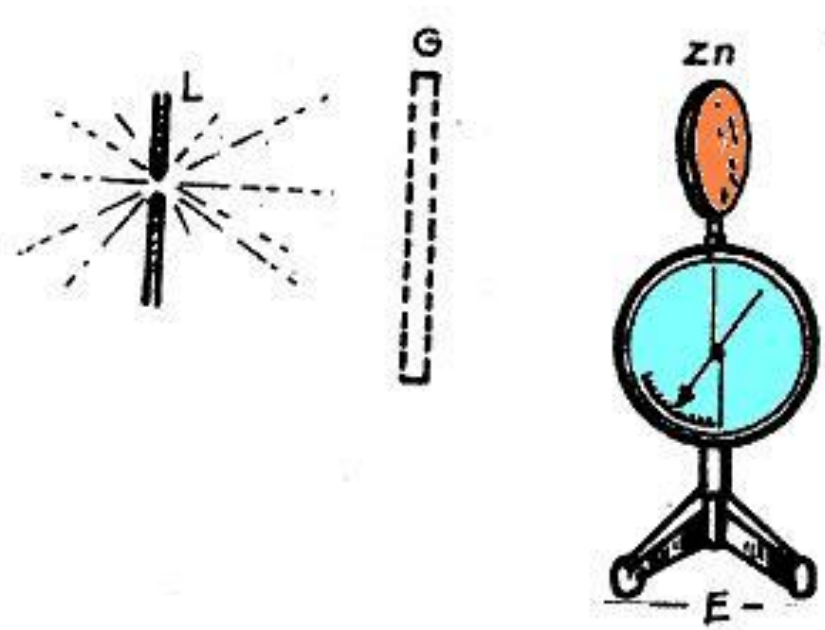
Trong chất bán dẫn loại N, ta có $n \gg p$ nên $\sigma \approx n.\mu_n.e.$

Trong chất bán dẫn loại P, ta có $p \gg n$ nên $\sigma \approx p.\mu_p.e.$

2.3. Hiện tượng quang điện

2.3.1. Thí nghiệm Hecxo

Năm 1887, nhà bác học Hecxo người Đức đã làm thí nghiệm sau: chiếu một chùm ánh sáng do một hồ quang phát ra vào một tấm kẽm tích điện âm, gắn trên một điện nghiệm (có thể thay điện nghiệm bằng tĩnh điện kế). Ông thấy hai lá của điện nghiệm sụp lại. Điều đó chứng tỏ tấm kẽm đã mất điện tích âm.



Hình 2.17. Tĩnh thể

Nếu tấm kẽm tích điện dương thì không có hiện tượng gì xảy ra.

Hiện tượng cũng xảy ra tương tự nếu thay tấm kẽm bằng các tấm đồng, nhôm, bạc, niken v.v...

Nếu dùng một tấm thủy tinh không màu chắn chùm tia hồ quang thì hiện tượng trên không xảy ra. Ta biết rằng thủy tinh hấp thụ mạnh các tia tử ngoại.

Nhiều thí nghiệm tương tự đã đưa ta đến kết luận:

Khi chiếu một chùm sáng thích hợp (có bước sóng ngắn) vào mặt một tấm kim loại thì nó làm cho các electron ở mặt kim loại đó bị bật ra. Đó là hiện tượng quang điện.

Thực ra, khi chiếu ánh sáng tử ngoại vào tấm kẽm tích điện dương thì vẫn có electron bị bật ra. Tuy nhiên, chúng lập tức bị hút trở lại, nên điện tích của tấm kẽm coi như không thay đổi.

2.3.2. Tế bào quang điện

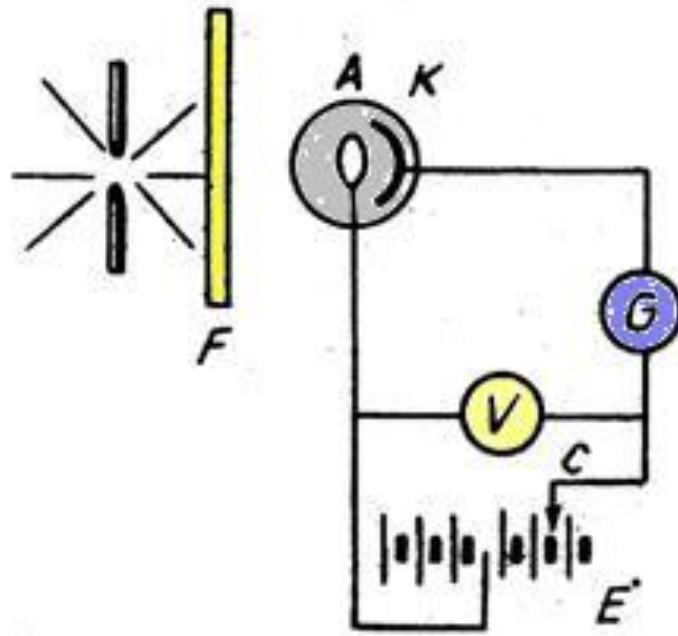
Tế bào quang điện là một bình chân không nhỏ trong đó có hai điện cực: anốt A và catốt K. Anốt (anôt) là một vòng dây kim loại. Catốt (catôt) có dạng một chòm cầu làm bằng kim loại (mà ta cần nghiên cứu) phủ ở thành trong của tế bào.

Ánh sáng do một hồ quang phát ra, được chiếu qua một kính lọc F để lọc lấy một thành phần đơn sắc nhất định, chiếu vào catốt K.

Ta thiết lập giữa anốt và catốt một điện trường nhờ bộ acquy E. Hiệu điện thế U giữa A và K có thể thay đổi (về độ lớn và về dấu) nhờ thay đổi vị trí của chốt cắm C trên bộ nguồn.

Một vôn kế V dùng để đo hiệu điện thế U và một miliampe kế nhạy G để đo cường độ dòng điện chạy qua tế bào quang điện.

Điện trở trong của các acquy rất nhỏ so với điện trở của tế bào quang điện.



Hình 2.18. Tế bào quang điện

Khi chiếu vào catốt ánh sáng có bước sóng ngắn thì trong mạch xuất hiện dòng điện mà ta gọi là dòng quang điện.

Trong tế bào quang điện, dòng quang điện có chiều từ anốt sang catốt. Nó là dòng các êlectron quang điện bay từ catốt sang anốt dưới tác dụng của điện trường giữa anốt và catốt.

Nghiên cứu sự phụ thuộc của hiện tượng quang điện vào bước sóng của ánh sáng kích thích (ánh sáng chiếu vào catốt) người ta thấy: đối với mỗi kim loại dùng làm catốt, ánh sáng kích thích phải có bước sóng nhỏ hơn một giới hạn λ_0 nào đó thì mới gây ra được hiện tượng quang điện. Nếu ánh sáng kích thích có bước sóng lớn hơn thì dù chùm ánh sáng có mạnh cũng không gây ra hiện tượng quang điện.

Sau khi chiếu ánh sáng vào catốt để gây ra hiện tượng quang điện, người ta nghiên cứu sự phụ thuộc của cường độ dòng quang điện I vào hiệu điện thế U_{AK} giữa anốt và catốt. đường cong đồ thị này gọi là đường đặc trưng von-ampe của tế bào quang điện.

Thoạt tiên khi tăng U_{AK} thì dòng quang điện I tăng. Khi U_{AK} đạt đến một giá trị nào đó thì cường độ dòng quang điện đạt đến giá trị bão hoà I_{bh} .

Sau đó giá trị của cường độ dòng quang điện sẽ không đổi dù có tăng U_{AK} .

Nghiên cứu sự phụ thuộc của cường độ dòng quang điện bão hoà I_{bh} vào cường độ của chùm ánh sáng kích thích, ta thấy I_{bh} tỉ lệ thuận với cường độ sáng kích thích

Muốn cho dòng quang điện triệt tiêu hoàn toàn thì phải đặt giữa anốt và catốt một hiệu điện thế âm U_h nào đó ($U_h = U_{AK} < 0$). U_h được gọi là hiệu điện thế hãm. Giá trị của U_h ứng với giao điểm của đường đặc trưng von-ampe của tế bào quang điện với trục hoành.

Thí nghiệm cho thấy giá trị của hiệu điện thế hãm U_h ứng với mỗi kim loại dùng làm catốt hoàn toàn không phụ thuộc vào cường độ của chùm sáng kích thích mà chỉ phụ thuộc vào bước sóng của chùm sáng kích thích đó. Nếu hai chùm sáng kích thích 1 và 2, đơn sắc, có cùng bước sóng, thì các đường đặc trưng von-ampe 1 và 2 sẽ cắt trục U tại cùng một điểm U_h .

2.3.3 Các định luật quang điện

a) Định luật quang điện thứ nhất

Đối với mỗi kim loại dùng làm catốt có một bước sóng giới hạn λ_0 nhất định gọi là giới hạn quang điện. Hiện tượng quang điện chỉ xảy ra khi bước sóng λ của ánh sáng kích thích nhỏ hơn giới hạn quang điện ($\lambda \leq \lambda_0$).

Giá trị giới hạn quang điện λ_0 của một số kim loại (tính ra μm) được cho

Bạc 0,26, Canxi 0,45, Đồng 0,30, Natri 0,50, Kẽm 0,35,
Kali 0,55, Nhôm 0,36, Xedi 0,66.

Ta thấy ánh sáng nhìn thấy được chỉ có khả năng gây ra được hiện tượng quang điện ở canxi và các kim loại kiềm.

b) Định luật quang điện thứ hai

Với ánh sáng kích thích có bước sóng thoả mãn định luật quang điện thứ nhất thì cường độ dòng quang điện bão hòa tỉ lệ thuận với cường độ của chùm sáng kích thích.

c) Định luật quang điện thứ ba

Sự tồn tại của hiệu điện thế hãm U_h chứng tỏ rằng khi bật ra khỏi mặt kim loại, các electron quang điện có một vận tốc ban đầu v_0 . Điện trường cản mạnh đến mức độ nào đó thì ngay cả những electron có vận tốc ban đầu lớn nhất $v_{0\text{max}}$ cũng không bay đến được anốt. Lúc đó dòng quang điện triệt tiêu hoàn toàn và công của điện trường cản có giá trị đúng bằng động năng ban đầu cực đại của electron quang điện.

$$eU_h = \frac{mv_{0\text{max}}^2}{2}$$

Từ sự nghiên cứu thực nghiệm giá trị của U_h mà ta đã trình bày ở bài trước, ta rút ra định luật sau

Động năng ban đầu cực đại của các electron quang điện không phụ thuộc vào cường độ của chùm sáng kích thích, mà chỉ phụ thuộc vào bước sóng của ánh sáng kích thích và bản chất kim loại dùng làm catốt.

2.3.4 Thuyết lượng tử

a) Các định luật quang điện hoàn toàn mâu thuẫn với tính chất sóng của ánh sáng. Thực vậy, theo thuyết sóng, khi ánh sáng chiếu vào mặt catốt, điện trường biến thiên trong sóng ánh sáng sẽ làm cho các electron trong kim loại dao động. Cường độ của chùm sáng kích thích càng lớn, thì điện trường đó càng mạnh và nó làm cho electron dao động càng mạnh. Đến mức độ nào đó thì electron sẽ bị bật ra, tạo thành dòng quang điện. Do đó, bất kì chùm sáng nào cũng có thể gây ra hiện tượng quang điện, miễn là nó có cường độ đủ lớn và động năng ban đầu cực đại của electron quang điện phải phụ thuộc vào cường độ của chùm sáng kích thích.

b) Ta chỉ có thể giải thích được các định luật quang điện, nếu thừa nhận một thuyết mới gọi là thuyết lượng tử do nhà bác học Plăng (Planck) người Đức, đề xướng vào năm 1900.

Theo thuyết lượng tử: *Những nguyên tử hay phân tử vật chất không hấp thụ hay bức xạ ánh sáng một cách liên tục, mà thành từng phần riêng biệt, . Mỗi phần có mang một năng lượng hoàn toàn xác định được gọi là lượng tử ánh sáng, có độ lớn là $\epsilon = hf$, trong đó, f là tần số của ánh sáng mà nó phát ra, còn h là một hằng số gọi là hằng số Plăng.*

$$h = 6,625.10^{-34} \text{J.s}$$

Mỗi phần đó gọi là một lượng tử năng lượng

Ta thấy mỗi lượng tử ánh sáng rất nhỏ, mỗi chùm sáng dù yếu cũng chứa một số rất lớn lượng tử ánh sáng. Do đó, ta có cảm giác chùm sáng là liên tục.

Khi ánh sáng truyền đi, các lượng tử ánh sáng không bị thay đổi, không phụ thuộc khoảng cách tới nguồn sáng, dù nguồn đó là một ngôi sao nằm cách xa ta hàng triệu năm ánh sáng.

2.3.5 Giải thích các định luật quang điện bằng thuyết lượng tử

Nhà bác học Anhxtanh (Einstein), người Đức, là người đầu tiên vận dụng thuyết lượng tử để giải thích các định luật quang điện. Ông coi chùm sáng như một chùm hạt và gọi mỗi hạt là một photon. Mỗi photon ứng với một lượng tử ánh sáng.

Theo Anhxtanh, trong hiện tượng quang điện có sự hấp thụ hoàn toàn photon chiếu tới. Mỗi photon bị hấp thụ sẽ truyền toàn bộ năng lượng của nó

cho một electron. Đối với các electron nằm ngay trên bề mặt kim loại thì phần năng lượng này sẽ được dùng vào hai việc

Cung cấp cho electron đó một công A để nó thắng được các lực liên kết trong tinh thể và thoát ra ngoài. Công này gọi là công thoát.

Cung cấp cho electron đó một động năng ban đầu. So với động năng ban đầu mà các electron nằm ở các lớp sâu thu được khi bị bứt ra thì động năng ban đầu này là cực đại

$$hf = A + \frac{mv_{0\max}^2}{2} \quad (8-1)$$

Đây là công thức Anhtan về hiện tượng quang điện.

Đối với các electron nằm ở các lớp sâu bên trong mặt kim loại thì trước khi đến bề mặt kim loại, chúng đã chạm với các ion của kim loại và mất một phần năng lượng. Do đó động năng ban đầu của chúng nhỏ hơn động năng ban đầu cực đại nói ở trên.

Công thức (8-1) cho thấy động năng ban đầu cực đại của các electron quang điện chỉ phụ thuộc tần số f (hay bước sóng λ) của ánh sáng kích thích và bản chất của kim loại dùng làm catốt (K) mà không phụ thuộc vào cường độ của chùm sáng kích thích. Đó chính là nội dung của định luật quang điện thứ ba.

Công thức (8-1) còn cho thấy: nếu năng lượng của photon nhỏ hơn công thoát A thì nó không thể làm cho electron bật ra khỏi catốt và hiện tượng quang điện sẽ không xảy ra.

Ta có

$$hf \geq A \Rightarrow h \cdot \frac{c}{\lambda} \geq A \Rightarrow \lambda \leq \frac{hc}{A}$$

Đặt
$$\frac{hc}{A} = \lambda_0 \Rightarrow \lambda \leq \lambda_0 \quad (8-2)$$

λ_0 chính là giới hạn quang điện của kim loại. Bất đẳng thức (8-2) biểu thị định luật quang điện thứ nhất.

Cuối cùng, ta giải thích định luật quang điện thứ hai như sau

Với chùm sáng có khả năng gây ra hiện tượng quang điện thì số electron quang điện bị bật ra khỏi catốt trong đơn vị thời gian tỉ lệ thuận với số photon đến đập vào mặt catốt trong thời gian đó. Mặt khác, số photon này lại tỉ lệ thuận với cường độ của chùm sáng; còn cường độ dòng quang điện bão hoà lại tỉ lệ thuận với số electron quang điện bị bật ra khỏi catốt trong đơn vị thời gian. Vì vậy, cường độ của dòng quang điện bão hoà sẽ tỉ lệ thuận với cường độ của chùm sáng kích thích.

2.3.6 Lượng tính sóng - hạt của ánh sáng

Ánh sáng nhìn thấy cũng như các tia hồng ngoại, tia tử ngoại, tia Ronghen, đều là các sóng điện từ có bước sóng khác nhau. Người ta nói chúng có cùng bản chất điện từ

Ta lại thấy ánh sáng có tính chất hạt (tính chất lượng tử). Vậy, ánh sáng vừa có tính chất sóng, vừa có tính chất hạt. Người ta nói: ánh sáng có lưỡng tính sóng - hạt.

Những sóng điện từ có bước sóng càng ngắn thì photon ứng với chúng có năng lượng càng lớn. Thực nghiệm cho thấy tính chất hạt của chúng thể hiện càng đậm nét, tính chất sóng càng ít thể hiện.

Ta có thể coi những tác dụng sau đây là những biểu hiện của tính chất hạt: khả năng đâm xuyên, tác dụng quang điện, tác dụng ion hoá, tác dụng phát quang.

Ngược lại, những sóng điện từ có bước sóng càng dài thì photon ứng với chúng có năng lượng càng nhỏ. Thực nghiệm cho thấy: tính chất hạt của chúng càng khó thể hiện, tính chất sóng của chúng càng dễ bộc lộ. Ta dễ dàng quan sát thấy hiện tượng giao thoa, hiện tượng tán sắc của các sóng đó.

2.3.7 Hiện tượng quang dẫn

Một số chất bán dẫn là chất cách điện khi không bị chiếu sáng và trở thành chất dẫn điện khi bị chiếu sáng. Hiện tượng giảm mạnh điện trở của chất bán dẫn khi bị chiếu sáng gọi là hiện tượng quang dẫn.

Trong hiện tượng quang điện, khi có ánh sáng thích hợp chiếu vào catốt của tế bào quang điện thì electron sẽ bị bật ra khỏi catốt. Vì vậy, hiện tượng này còn gọi là hiện tượng quang điện ngoài. (hay hiện tượng quang điện bên ngoài)

Trong hiện tượng quang dẫn, mỗi photon của ánh sáng kích thích khi bị hấp thụ sẽ giải phóng một electron liên kết để nó trở thành một electron tự do chuyển động trong khối chất bán dẫn đó. Các electron liên kết khi được giải phóng, sẽ để lại một "lỗ trống" mang điện dương. Những lỗ trống này cũng có thể chuyển động tự do từ nút mạng này sang nút mạng khác và cũng tham gia vào quá trình dẫn điện.

Hiện tượng giải phóng electron liên kết để cho chúng trở thành các electron dẫn gọi là hiện tượng quang điện bên trong.

Vì năng lượng cần thiết để giải phóng một electron liên kết chuyển nó thành electron dẫn không lớn lắm, nên để gây ra hiện tượng quang dẫn, không đòi hỏi photon phải có năng lượng lớn. Rất nhiều chất quang dẫn hoạt động được với ánh sáng hồng ngoại. Thí dụ: CdS có giới hạn quang dẫn là $0,9\mu\text{m}$. Ta hiểu giới hạn quang dẫn của một chất là bước sóng dài nhất của ánh sáng

có khả năng gây ra hiện tượng quang dẫn ở chất đó. Đây là một lợi thế của hiện tượng quang dẫn so với hiện tượng quang điện.

2.3.8 Quang trở (LDR)

Cấu tạo Quang trở gồm một lớp chất bán dẫn (cadimi sunfua CdS chẳng hạn) (1) phủ trên một tấm nhựa cách điện (2). Có hai điện cực (3) và (4) gắn vào lớp chất bán dẫn đó

Nối một nguồn khoảng vài vôn với quang trở thông qua một miliampe kế. Ta thấy khi quang trở được đặt trong tối thì trong mạch không có dòng điện. Khi chiếu quang trở bằng ánh sáng có bước sóng ngắn hơn giới hạn quang dẫn của quang trở thì sẽ xuất hiện dòng điện trong mạch.

Điện trở của quang trở giảm đi rất mạnh khi bị chiếu sáng bởi ánh sáng nói trên. Đo điện trở của quang trở CdS, người ta thấy: khi không bị chiếu sáng, điện trở của nó vào khoảng $3 \cdot 10^6 \Omega$; khi bị chiếu sáng, điện trở của nó chỉ còn khoảng 20Ω .

Ngày nay, quang trở được dùng thay cho các tế bào quang điện trong hầu hết các mạch điều khiển tự động.

2.3.9 Pin quang điện:

Pin quang điện là một nguồn điện trong đó quang năng được biến đổi trực tiếp thành điện năng. Pin hoạt động dựa vào hiện tượng quang điện bên trong xảy ra trong một chất bán dẫn.

Ta hãy xét một pin quang điện đơn giản. Pin đồng oxit (h.8.6)

Pin có một điện cực bằng đồng. Trên bản đồng này có phủ một lớp đồng oxit Cu_2O . Người ta phun một lớp vàng rất mỏng trên mặt lớp Cu_2O để làm điện cực thứ hai. Lớp vàng này mỏng đến mức cho ánh sáng truyền qua được. ở chỗ tiếp xúc giữa Cu_2O và Cu hình thành một lớp có tác dụng đặc biệt: nó chỉ cho phép electron chạy qua nó theo chiều từ Cu_2O sang Cu.

Khi chiếu một chùm sáng có bước sóng thích hợp vào mặt lớp Cu_2O thì ánh sáng sẽ giải phóng các electron liên kết trong Cu_2O thành electron dẫn. Một phần các electron này khuếch tán sang cực Cu. Cực Cu thừa electron nên nhiễm điện âm. Cu_2O nhiễm điện dương. Giữa hai điện cực của pin hình thành một suất điện động.

Nếu nối hai điện cực với nhau bằng một dây dẫn thông qua một điện kế, ta sẽ thấy có một dòng điện chạy trong mạch theo chiều từ Cu_2O sang Cu.

Ngoài pin quang điện đồng oxit, còn có rất nhiều loại pin quang điện khác, phổ biến nhất là pin selen.

Ngày nay, các pin quang điện có rất nhiều ứng dụng. Các pin mặt trời ở các máy tính bỏ túi, trên các vệ tinh nhân tạo v.v... đều là pin quang điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. SÁCH LINH KIỆN QUANG ĐIỆN TỬ (THẦY DƯƠNG MINH TRÍ).
2. TÀI LIỆU CẤU KIỆN ĐIỆN TỬ (THS. TRẦN THỊ CẨM).
3. <http://www.vocw.edu.vn/content/m10422/latest/>.
4. http://www.onthi.com/?a=OT&ot=LT&hdn_lt_id=572
5. http://www.onthi.com/ly-thuyet/thuyet-luong-tu-va-cac-dinh-luat-quang-dien_573.html.
6. http://www.onthi.com/ly-thuyet/quang-tro-va-pin-quang-dien_574.html.
7. www.wikipedia.org.

Và một số tài liệu tham khảo khác.

Chương 3

LED-LIGHT EMITTING DIODE

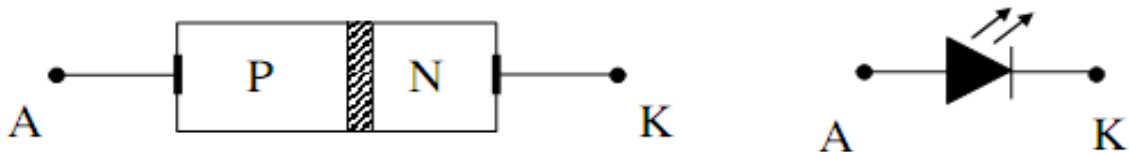
3.1. Giới thiệu về Diode phát quang - LED (Light Emitting Diode)

Điốt phát quang là linh kiện bán dẫn quang điện tử. Nó có khả năng phát ra ánh sáng khi có hiện tượng tái hợp xảy ra trong tiếp xúc P-N. Điốt phát quang thường được gọi tắt là LED do viết tắt từ các từ tiếng Anh: Light-Emitting Diode. Tùy theo vật liệu chế tạo mà ta có ánh sáng bức xạ ra ở các vùng bước sóng khác nhau.

Chất bán dẫn của LED được làm từ một miếng tinh thể cực mỏng. Vỏ bao bọc chất bán dẫn được làm trong suốt (nhưng thường là có màu sắc). Hai chân bọc chì được kéo đưa ra khỏi lớp bao bọc epoxy.

Chất bán dẫn có 2 cực p và n được chia bởi một mối nối. Cực p mang điện tích dương; cực n mang điện tích âm (electron). Mối nối p-n nằm giữa cực p và cực n.

Loại bức xạ ra ánh sáng nhìn thấy gọi là LED chỉ thị. LED chỉ thị có ưu điểm là tần số hoạt động cao, kích thước nhỏ, công suất tiêu hao nhỏ, không sụt áp khi bắt đầu làm việc. LED không cần kính lọc mà vẫn cho ra màu sắc. LED chỉ thị rất rõ khi trời tối. Tuổi thọ của LED khoảng 100 ngàn giờ.



Hình 3.1. Cấu tạo và ký hiệu LED

Vật liệu chế tạo LED là các nguyên tử nhóm III và V: GaAs, GaP, GaAsP... đây là những vật liệu tái hợp trực tiếp. Nồng độ hạt dẫn của P và N rất cao nên điện trở của chúng rất nhỏ. Do đó khi mắc LED phải mắc nối tiếp với một điện trở hạn dòng.

3.2. Nguyên lý làm việc và cấu tạo của LED

Dựa trên hiệu ứng phát sáng khi có hiện tượng tái hợp điện tử và lỗ trống ở vùng chuyển tiếp P – N. LED sẽ phát quang khi được phân cực thuận, nghĩa là biến đổi năng lượng điện thành năng lượng quang. Cường độ phát quang tỉ lệ với dòng qua LED. Khi phân cực thuận các hạt dẫn đa số sẽ di chuyển về phía bán dẫn bên kia.

Khối bán dẫn loại p chứa nhiều lỗ trống tự do mang điện tích dương nên khi ghép với khối bán dẫn n (chứa các điện tử tự do) thì các lỗ trống này có xu hướng chuyển động khuếch tán sang khối n. Cùng lúc khối p lại nhận thêm các điện tử (điện tích âm) từ khối n chuyển sang. Kết quả là khối p tích điện âm (thiếu hụt lỗ trống và dư thừa điện tử) trong khi khối n tích điện dương (thiếu hụt điện tử và dư thừa lỗ trống).

Ở biên giới hai bên mặt tiếp giáp, một số điện tử bị lỗ trống thu hút và khi chúng tiến lại gần nhau, chúng có xu hướng kết hợp với nhau tạo thành các nguyên tử trung hoà. Quá trình này có thể giải phóng năng lượng dưới dạng ánh sáng (hay các bức xạ điện từ có bước sóng gần đó).

Tùy theo mức năng lượng giải phóng cao hay thấp mà bước sóng ánh sáng phát ra khác nhau (tức màu sắc của LED sẽ khác nhau). Mức năng lượng (và màu sắc của LED) hoàn toàn phụ thuộc vào cấu trúc năng lượng của các nguyên tử chất bán dẫn.

Điện tử từ bên N sẽ khuếch tán sang P và lỗ trống bên P sẽ khuếch tán sang N. Trong quá trình di chuyển chúng sẽ tái hợp với nhau và phát ra các photon.

Tùy theo mức năng lượng giải phóng cao hay thấp mà bước sóng ánh sáng phát ra khác nhau (tức màu sắc của LED sẽ khác nhau). Mức năng lượng (và màu sắc của LED) hoàn toàn phụ thuộc vào cấu trúc năng lượng của các nguyên tử chất bán dẫn.

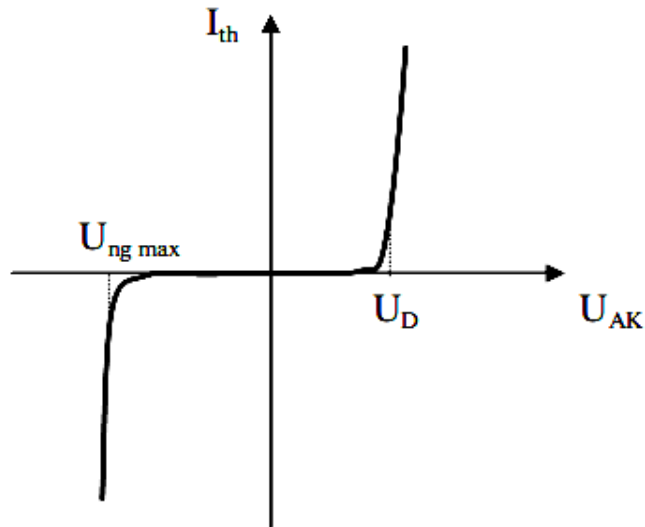
LED thường có điện thế phân cực thuận cao hơn điốt thông thường, trong khoảng 1,5 đến 3 V. Nhưng điện thế phân cực nghịch ở LED thì không cao. Do đó, LED rất dễ bị hư hỏng do điện thế ngược gây ra.

Loại LED	Điện thế phân cực thuận
Đỏ	1,4 - 1,8V
Vàng	2 - 2,5V
Xanh lá cây	2 - 2,8V

Hình 3.2. Điện thế phân cực thuận của LED

Đặc tuyến V- A của LED giống như của diode thông thường

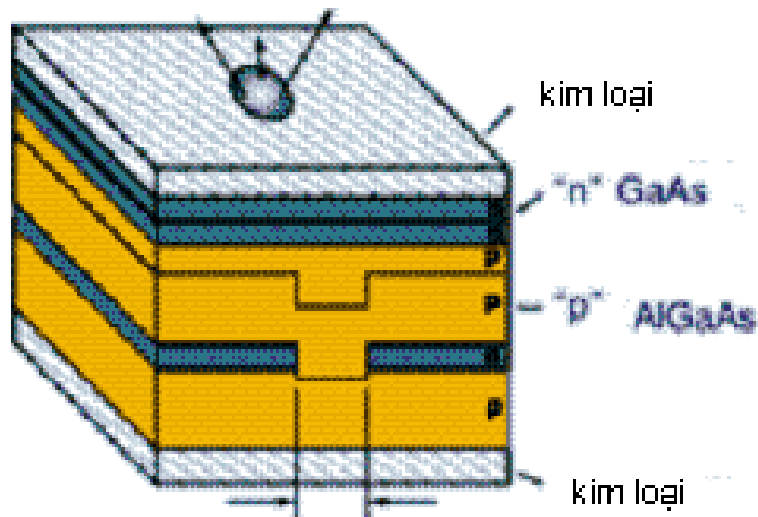
Điện áp phân cực thuận $U_D = 1,6 - 3 \text{ V}$; điện áp phân cực ngược $U_{ng} = 3 - 5 \text{ V}$; dòng I_D khoảng vài chục mA



Hình 3.3. Đặc tuyến Von-Ampe của LED

Để tăng cường tính định hướng cho LED, người ta thường cấu tạo LED với một lỗ cho ánh sáng đi qua.

Có hai loại LED là SLED (LED phát xạ mặt) và ELED (LED phát xạ cạnh). Dưới đây là hình minh họa cho việc lấy ánh sáng ra của một SLED.



Hình 3.4. Cấu tạo SLED

Tham số của LED

* Nhiệt độ

Khoảng nhiệt độ làm việc của LED : - 60 °C đến +80 °C LED rất nhạy với nhiệt độ. Nhiệt độ càng tăng bước sóng của LED càng ngắn (bước sóng giảm 0,02 μm – 0,009 μm / °C).và điện áp phân cực cho điốt có thể bị giảm (khoảng từ 1,3 mV đến 2,3 mV/ °C).

Độ rộng vùng cấm của các vật liệu càng lớn thì năng lượng được giải phóng ra càng lớn và bức xạ được phát ra có bước sóng càng ngắn.

Nhiệt độ tăng → cường độ bức xạ quang giảm (1% / °C)

* **Công suất phát xạ** vài trăm mW đến vài W

* **Vật liệu**

Về nguyên tắc tất cả các chuyển tiếp P – N đều có khả năng phát ra ánh sáng khi được phân cực thuận nhưng chỉ có một số loại vật liệu tái hợp trực tiếp mới cho hiệu suất tái hợp cao.

Các LED truyền thống được làm từ các loại nguyên liệu chất bán dẫn vô cơ, sản xuất những màu sau đây:

- Aluminium gallium arsenide (AlGaAs) — red and infrared
- Aluminium gallium phosphide (AlGaP) — green
- Aluminium gallium indium phosphide (AlGaInP) — high-brightness orange-red, orange, yellow, and green
- Gallium arsenide phosphide (GaAsP) — red, orange-red, orange, and yellow
- Gallium phosphide (GaP) — red, yellow and green
- Gallium nitride (GaN) — green, pure green (or emerald green), and blue also white (if it has an AlGaN Quantum Barrier)
- Indium gallium nitride (InGaN) — 450–470 nm — near ultraviolet, bluish-green and blue
- Silicon carbide (SiC) as substrate — blue
- Silicon (Si) as substrate — blue (under development)
- Sapphire (Al₂O₃) as substrate — blue
- Zinc selenide (ZnSe) — blue
- Diamond (C) — ultraviolet
- Aluminium nitride (AlN), aluminium gallium nitride (AlGaN), aluminium gallium indium nitride (AlGaInN) — near to far ultraviolet (down to 210 nm)

Với sự thay đổi đa dạng của màu sắc, những LED đa màu có thể được thiết kế để sản xuất những mẫu mới lạ.

Một số loại LED thông dụng

Vật liệu	E_G (eV)	λ_p (nm)	vùng bức xạ	U_D (V) ở $I=20mA$	$U_{ngực}$ Max	t_r (nsec)	Loại tái hợp
Ge	0,66	-	-	-	-	-	G. tiếp
Si	1,09	-	-	-	-	-	G. tiếp
GaAs	1,43	910	Hồng ngoại	1,6 + 1,8	5	50	T. tiếp
GaAsP	1,9	660	Đỏ	1,6 + 1,8	5		T. tiếp
GaAlAs	1,91	650	Đỏ	1,6 + 1,8	5		T. tiếp
GaAsP	2,0	635	Cam	2,0 + 2,2	5	100	T. tiếp
GaAsP	2,1	585	Vàng	2,2 + 2,4	5	100	T. tiếp
GaAsP	2,2	565	Lá cây	2,4 + 2,7	5	400	T. tiếp
GaP	2,24	560	Lá cây	2,7 + 3,0	5	-	G. tiếp
SiC	2,5	490	Da trời	3,0	-	900	G. tiếp
Gallium-Nitrit	3,1	400	Tím	3,0	-	-	G. tiếp

Hình 3.4. Vật liệu của LED

Phân loại và ứng dụng của LED

LED bức xạ ánh sáng nhìn thấy được sử dụng trong báo hiệu, màn hình, quảng cáo... còn LED bức xạ ánh sáng trong vùng hồng ngoại dùng trong các hệ thống thông tin quang hoặc các hệ thống tự động điều khiển hoặc bảo mật.

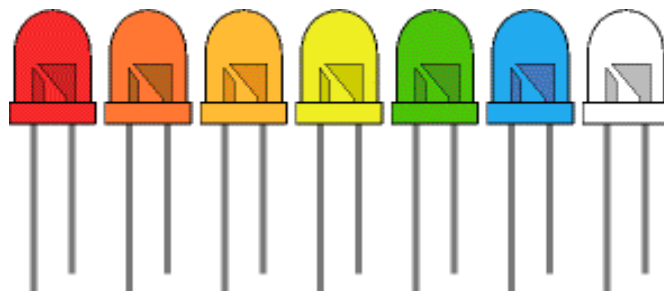
Để việc sử dụng được đơn giản và gọn nhẹ người ta thường ghép nhiều LED với nhau, nếu ghép các cực anốt với nhau thì các đầu điều khiển đi vào các catốt (điều khiển bằng xung âm) và LED gọi là anốt chung. Nếu ghép các cực catốt với nhau thì cực điều khiển đi vào anốt (điều khiển bằng xung dương) và LED gọi là catốt chung. Người ta thường tạo LED theo các cấu trúc sau

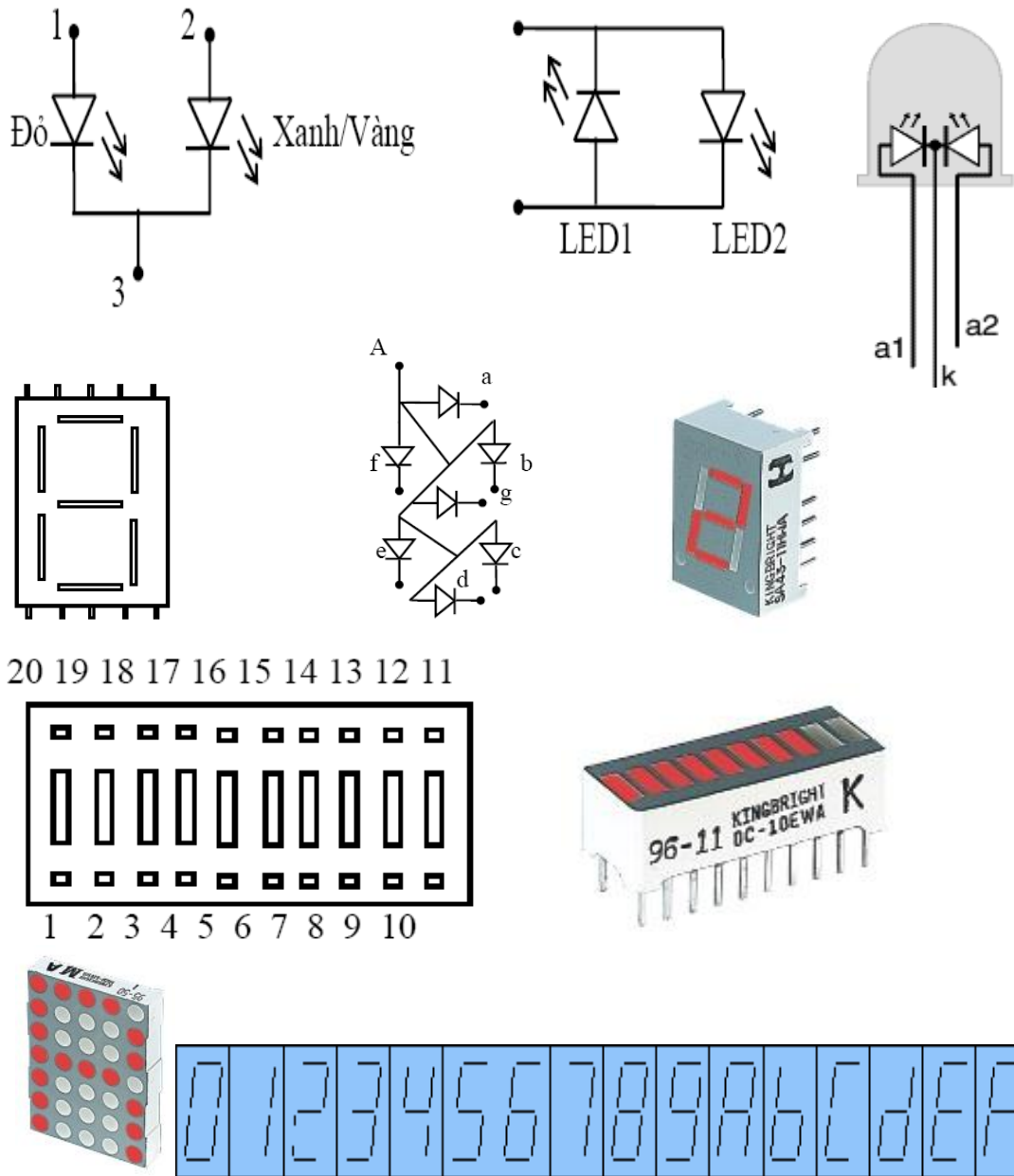
LED đơn

LED đôi

LED 7 đoạn. Đây là một tổ hợp gồm có 7 LED được đấu nối với nhau theo hình số 8 dùng để hiện thị các số thập phân từ 0 đến 9.

Bảng chiếu sáng LED: Đây là tập hợp nhiều LED thành một chuỗi với mạch tổ hợp hoặc không có mạch tổ hợp bên trong.





Hình 3.5. Các loại LED

3.3. LED hồng ngoại (Infrared LED, IR LED)

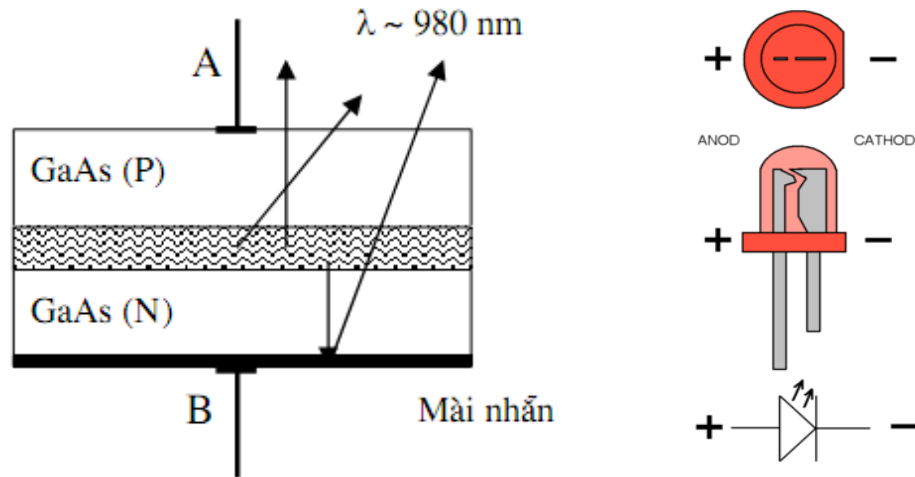
Đối với các hệ thống thông tin quang yêu cầu tốc độ bit xấp xỉ 100 đến 200Mbit/s cùng sợi quang đa mode với công suất quang khoảng vài chục μW , các điốt phát quang bán dẫn thường dùng làm các nguồn sáng.

Hồng ngoại ít bị suy giảm khi qua khói bụi và chất bán dẫn nên LED hồng ngoại có hiệu suất cao

3.3.1. Cấu tạo

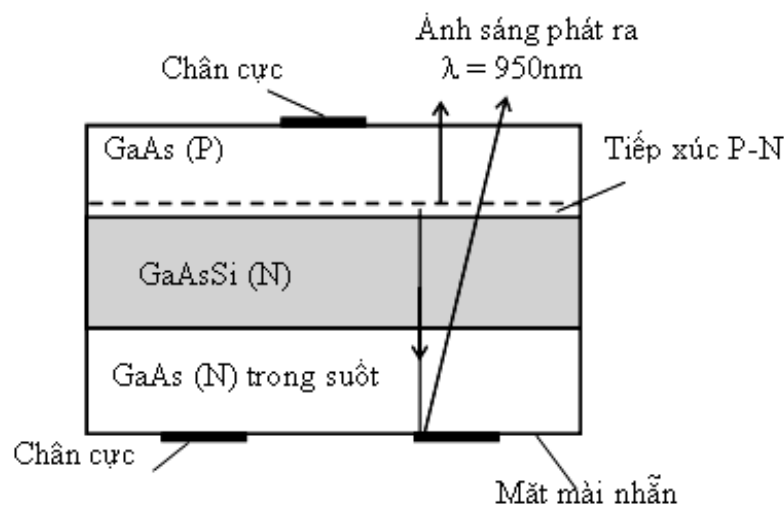
Cấu tạo của LED hồng ngoại cơ bản là giống các LED chỉ thị. Chỉ có một điểm khác biệt là một mặt của bán dẫn được mài nhẵn làm gương phản chiếu để đưa ánh sáng ra khỏi LED theo một chiều với độ tập trung cao.

Do đặc điểm cấu tạo đặc biệt nên LED hồng ngoại tạo ra ánh sáng nằm trong vùng hồng ngoại. Ngoài ra, những tia có hướng đi vào trong lớp bán dẫn sẽ gặp gương phản chiếu và bị phản xạ trở lại để đi ra ngoài theo cùng một hướng. Việc này sẽ tăng hiệu suất một cách đáng kể cho LED. Tia hồng ngoại có khả năng xuyên qua chất bán dẫn tốt hơn so với ánh sáng nhìn thấy nên hiệu suất phát của LED hồng ngoại cao hơn rất nhiều so với LED phát ánh sáng màu.



Hình 3.6. Cấu tạo LED hồng ngoại bước sóng 980nm

Để bức xạ ánh sáng hồng ngoại, LED hồng ngoại được chế tạo từ vật liệu Galium Asenit (GaAs) với độ rộng vùng cấm $EG = 1,43 \text{ eV}$ tương ứng với bức xạ bước sóng khoảng 900nm.



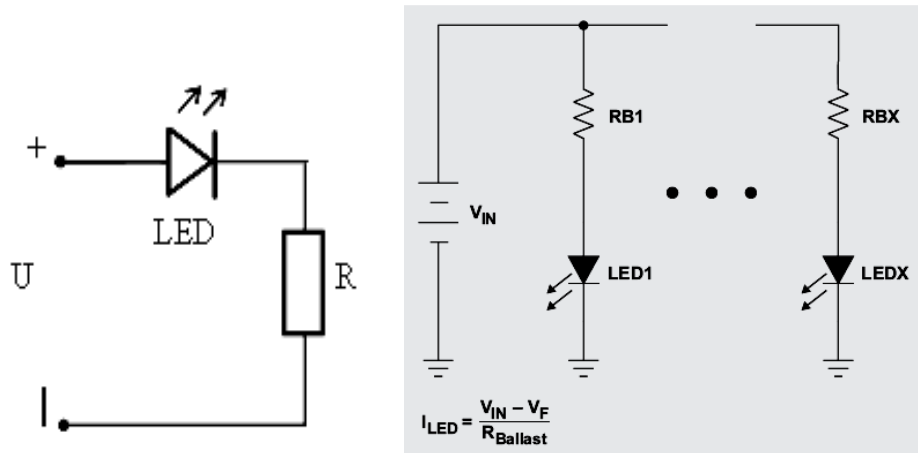
Hình 3.7. Cấu trúc của LED hồng ngoại bức xạ bước sóng 950 nm

Trong GaAs (N) tạo một lớp tinh thể có tính chất lưỡng tính với tạp chất Silic là GaAsSi (N) và một tiếp xúc P-N được hình thành. Tùy theo nồng độ pha tạp chất Silic ta có bức xạ với bước sóng phù hợp với các điểm cực đại

của các detector (LED thu). Mặt dưới của LED được mài nhẵn tạo thành một gương phản chiếu tia hồng ngoại phát ra từ lớp tiếp xúc P-N.

3.3.2. Nguyên lý làm việc

Hình sau mô tả sơ đồ nguyên lý đấu nối LED hồng ngoại trong mạch điện.



Hình 3.8. Sơ đồ nguyên lý của LED hồng ngoại

Khi phân cực thuận cho điốt, các hạt dẫn đa số sẽ khuếch tán qua tiếp xúc P-N, chúng tái hợp với nhau và phát ra bức xạ hồng ngoại. Các tia hồng ngoại bức xạ ra theo nhiều hướng khác nhau. Những tia hồng ngoại có hướng đi vào trong các lớp chất bán dẫn, gặp gương phản chiếu sẽ được phản xạ trở lại để đi ra ngoài theo cùng hướng với các tia khác. Điều này làm tăng hiệu suất của LED.

Ánh sáng hồng ngoại có đặc tính quang học giống như ánh sáng nhìn thấy, nghĩa là nó có khả năng hội tụ, phân kỳ qua thấu kính, có tiêu cự.... Tuy nhiên, ánh sáng hồng ngoại rất khác ánh sáng nhìn thấy ở khả năng xuyên suốt qua vật chất, trong đó có chất bán dẫn. Điều này giải thích tại sao LED hồng ngoại có hiệu suất cao hơn LED chỉ thị vì tia hồng ngoại không bị yếu đi khi vượt qua các lớp bán dẫn để ra ngoài.

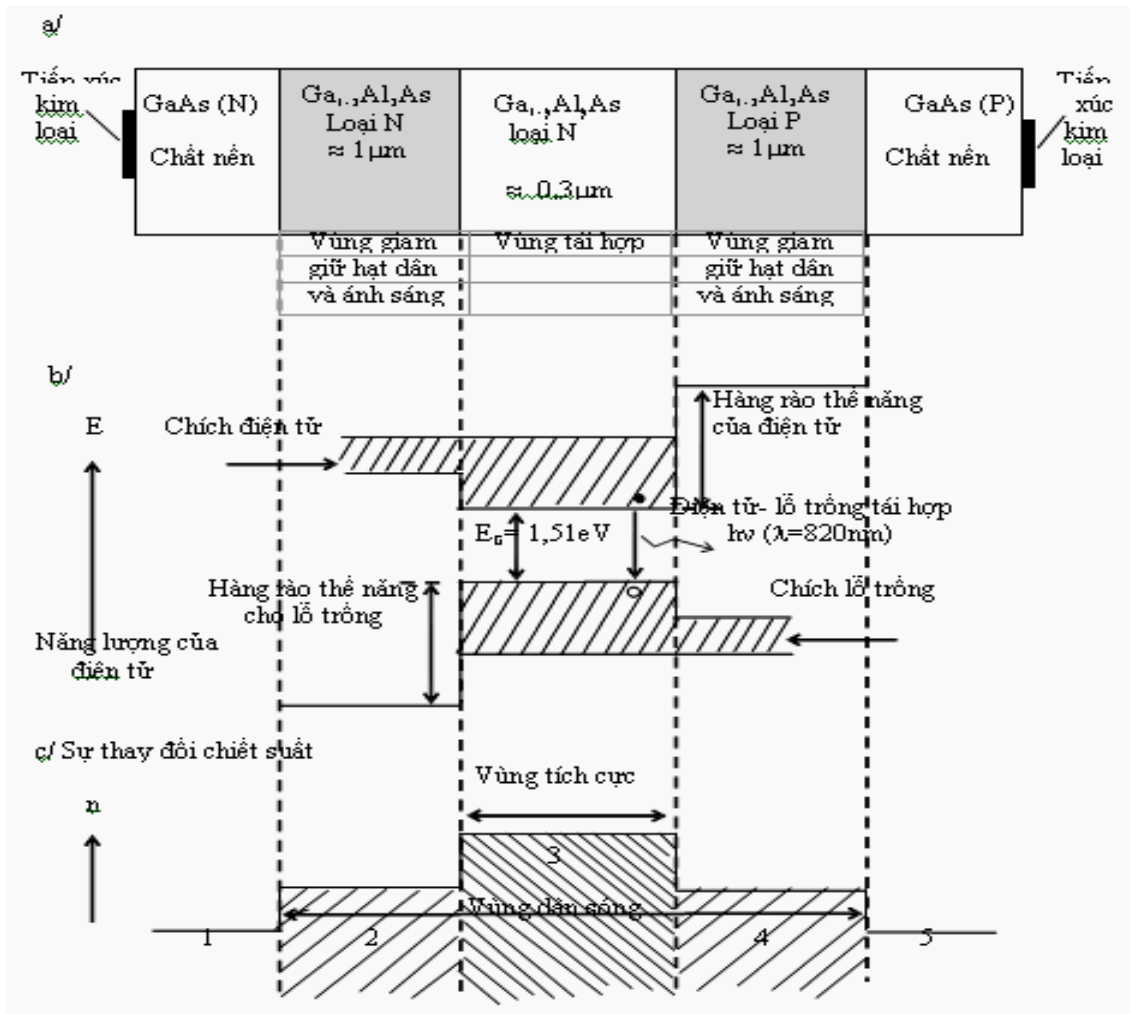
Tuổi thọ của LED hồng ngoại dài đến 100 000 giờ. LED hồng ngoại không phát ra ánh sáng nhìn thấy nên rất có lợi trong các thiết bị kiểm soát vì không gây sự chú ý.

3.3.3. LED hồng ngoại cấu trúc đặc biệt

Để truyền dẫn trong sợi quang đạt hiệu quả người ta sử dụng các loại LED hồng ngoại có độ sáng phát ra cao, có thời gian đáp ứng nhanh và hiệu suất lượng tử cao, đó là LED cấu trúc dị thể kép. Đây là cấu trúc được sử dụng rất rộng rãi hiện nay.

Hình sau biểu diễn một LED cấu trúc dị thể kép (double heterostructure) bởi vì có hai lớp hợp kim $Ga_{1-x}Al_xAs$ loại N và P đều có độ rộng vùng cấm lớn hơn độ rộng vùng cấm của lớp tích cực $Ga_{1-y}Al_yAs$ loại N, cũng có nghĩa

là chiết suất của hai lớp này nhỏ hơn chiết suất của lớp tích cực (trong đó % phân tử lượng $x > y$). Bằng phương pháp cấu trúc Sandwich của các lớp hợp kim tổng hợp khác nhau, cả 2 loại hạt dẫn và trường ánh sáng được giam giữ lại trong trung tâm của lớp tích cực, (xem hình b). Đồng thời sự khác nhau về chiết suất của các lớp kề cận này đã giam giữ trường ánh sáng trong lớp tích cực ở trung tâm (xem hình c). Sự giam giữ hạt dẫn và ánh sáng ở trong lớp tích cực đã làm tăng độ bức xạ và hiệu suất quang lượng tử.



Hình 3.9.

a/ Mặt cắt của LED cấu trúc dị thể kép loại GaAlAs với $x > y$

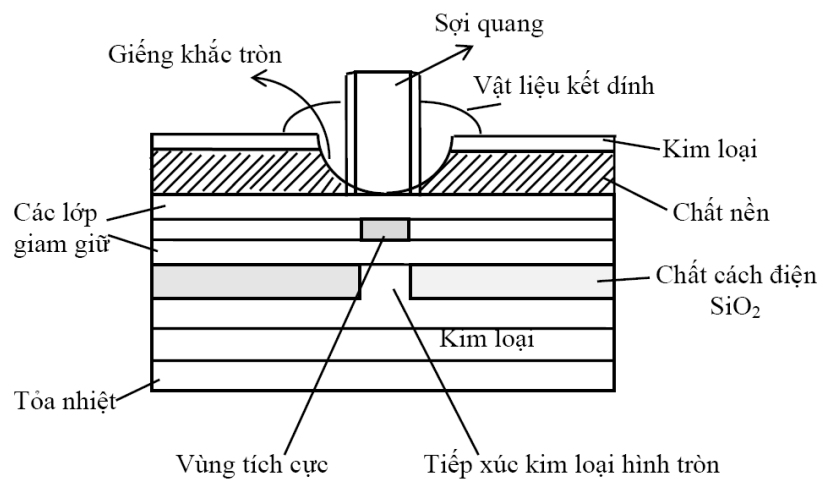
b/ Giảm đồ năng lượng của vùng tích cực

và hàng rào thế năng của điện tử và lỗ trống

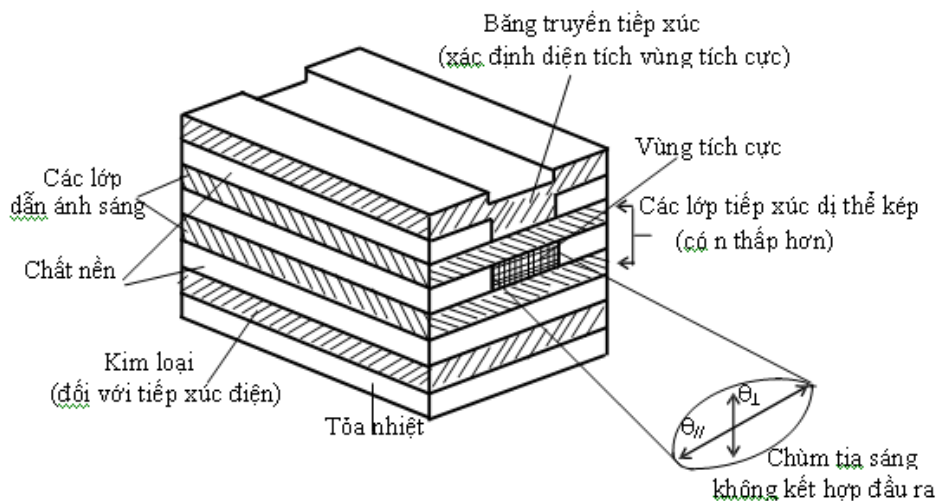
c/ Sự thay đổi chiết suất trong các lớp dị thể

Hai dạng cơ bản của LED được dùng cho sợi quang là bức xạ bề mặt (còn gọi là bức xạ Burrus) và bức xạ cạnh.

Trong bức xạ bề mặt, mặt phẳng của vùng tích cực bức xạ ánh sáng vuông góc với trục x của sợi quang như mô tả trong hình sau. Trong cấu trúc này một "cái giếng" được khắc qua phần chất nền của LED, sau đó sợi quang được gắn chặt vào để nhận ánh sáng bức xạ ra. Diện tích vòng tròn tích cực trong bề mặt bức xạ trên thực tế có đường kính $50\mu\text{m}$ và bề dày đến $2,5\mu\text{m}$. Phổ bức xạ cơ bản là đẳng hướng với độ rộng chùm tia nửa công suất 120° . Phổ đẳng hướng này từ một bức xạ bề mặt được gọi là phổ Lambe, trong đó độ phát sáng ở mọi hướng đều bằng nhau, nhưng công suất giảm đi theo hàm $\cos\theta$, với θ là góc giữa hướng chiếu ánh sáng và đường vuông góc với bề mặt. Do vậy công suất giảm xuống 50% so với trị số đỉnh của nó khi $\theta = 60^\circ$, để tổng độ rộng chùm tia nửa công suất là 120° .



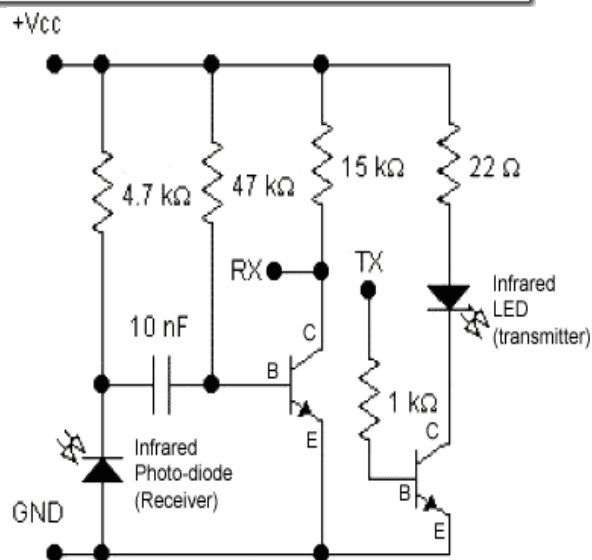
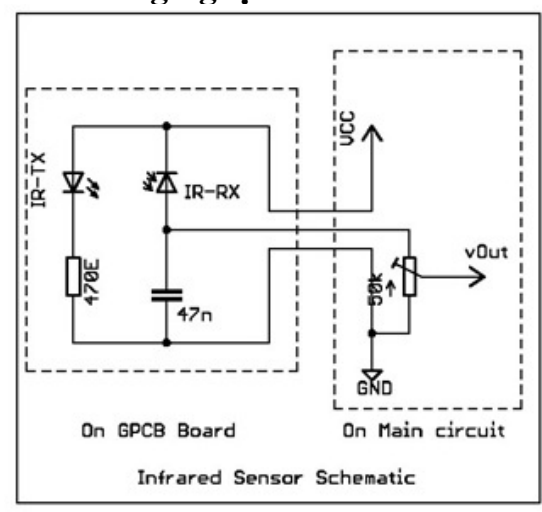
Hình 3.10. Mặt cắt của LED bức xạ bề mặt. Vùng tích cực được giới hạn bởi một đường tròn có diện tích tương ứng với mặt cắt đầu lõi của sợi quang



Hình 3.11. Cấu trúc của LED dị thể kép bức xạ cạnh. Chùm tia ra là Lambe ở bề mặt của tiếp xúc P-N ($\theta_{//} = 120^\circ$) và hướng vuông góc với tiếp xúc P-N là $\theta_{\perp} = 30^\circ$.

LED bức xạ cạnh được mô tả ở hình trên gồm một vùng tiếp xúc tích cực và hai lớp dẫn ánh sáng. Cả hai lớp dẫn quang đều có chiết suất thấp hơn của vùng tích cực nhưng cao hơn chiết suất của các vật liệu xung quanh. Cấu trúc này tạo ra một kênh dẫn sóng hướng bức xạ ánh sáng theo hướng lõi sợi quang. Để ghép khít lõi sợi quang đường kính từ $50\mu\text{m}$ đến $100\mu\text{m}$, bằng truyền tiếp xúc đối với bức xạ cạnh có chiều rộng là $50\mu\text{m}$ đến $70\mu\text{m}$. Chiều dài của vùng tích cực khoảng từ $100\mu\text{m}$ đến $150\mu\text{m}$. Phổ bức xạ của LED bức xạ cạnh định hướng tốt hơn so với bức xạ bề mặt, như biểu diễn trong hình (8-13). Ở bề mặt song song với tiếp xúc, mà tại đó không có hiệu ứng dẫn sóng, thì chùm tia bức xạ là phổ Lambe với độ rộng nửa- công suất của $\theta_{//} = 1200$. Trong bề mặt vuông góc với tiếp xúc, bằng việc chọn độ dày của ống dẫn sóng, độ rộng chùm tia nửa- công suất θ_{\perp} được tạo ra nhỏ hơn 25 đến 35° .

3.3.4. Các mạch lái LED hồng ngoại



Hình 3.12. Các mạch lái LED hồng ngoại

3.3.5. LED hồng ngoại LD271

**LD 271, LD 271 H
LD 271 L, LD 271 HL
GaAs-IR-Lumineszenzdiode
GaAs Infrared Emitter**

Features

- GaAs infrared emitting diode, fabricated in a liquid phase epitaxy process
- High reliability
- High pulse handling capability
- long leads
- Available in groups
- Same package as SFH 300, SFH 203

Applications

- IR remote control of hi-fi and TV-sets, video tape recorders, dimmers
- Remote control of various equipment
- Photointerrupters

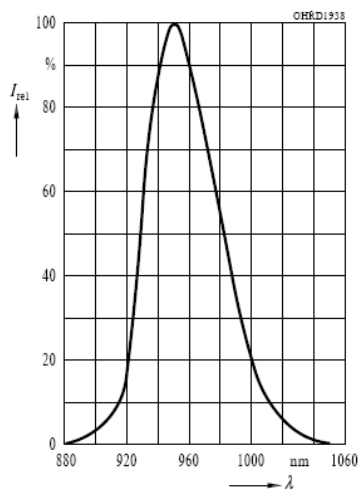
Maximum Ratings

Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Betriebs- und Lagertemperatur Operating and storage temperature range	$T_{op}; T_{stg}$	□55 ... + 100	°C
Sperrschichttemperatur Junction temperature	T_j	100	°C
Sperrspannung Reverse voltage	V_R	5	V
Durchlaßstrom Forward current	I_F	130	mA
Stoßstrom, $t_p = 10 \mu s, D = 0$ Surge current	I_{FSM}	3.5	A
Verlustleistung Power dissipation	P_{tot}	220	mW
Wärme widerstand Thermal resistance	R_{thJA}	330	K/W

Bezeichnung Description	Symbol Symbol	Wert Value		Einheit Unit
		LD 271 LD 271 L	LD 271 H LD 271 HL	
Strahlstärke Radiant intensity $I_F = 100 \text{ mA}, t_p = 20 \text{ ms}$ $I_F = 1 \text{ A}, t_p = 100 \mu s$	I_e $I_{e \text{ typ.}}$	15 (≥ 10) 120	> 16	mW/sr mW/sr

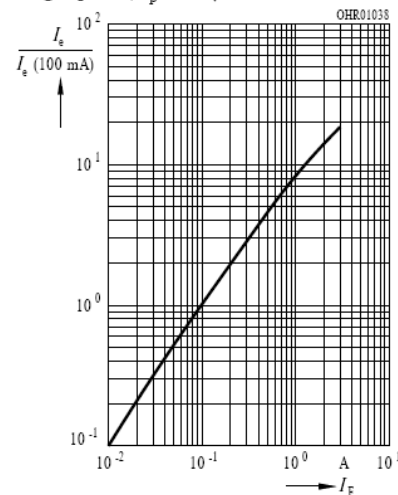
Hình 3.13. Các thông số kỹ thuật LD 271

Relative spectral emission
 $I_{rel} = f(\lambda)$

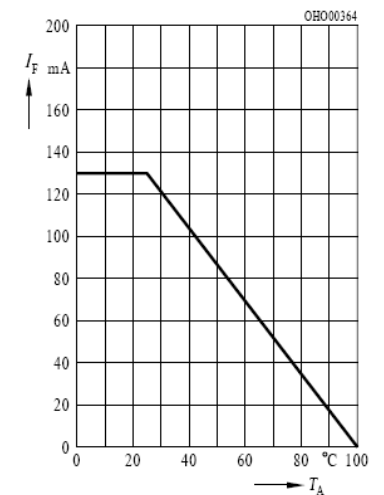


Radiant intensity $\frac{I_e}{I_e \text{ 100 mA}} = f(I_F)$

Single pulse, $t_p = 20 \mu s$



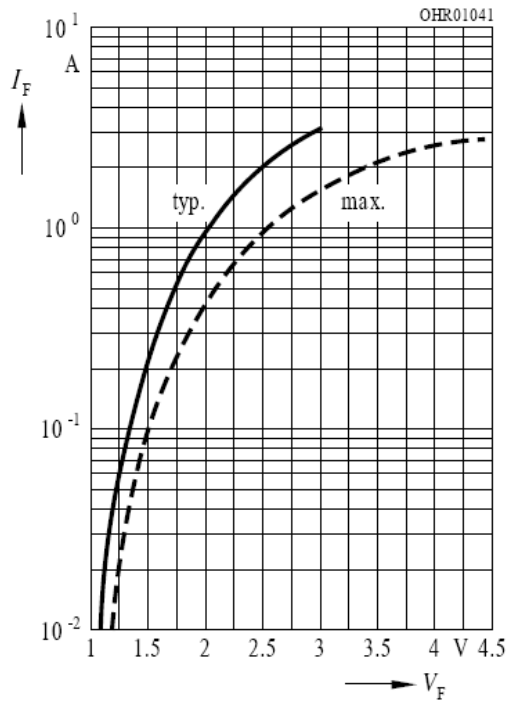
Max. permissible forward current
 $I_F = f(T_A)$



Hình 3.14. Tính chất phổ của LD 271

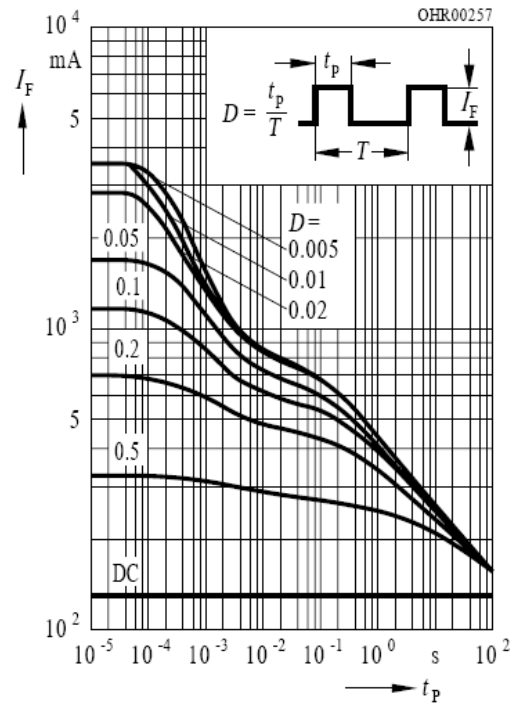
Forward current

$I_F = f(V_F)$, single pulse, $t_p = 20 \mu s$

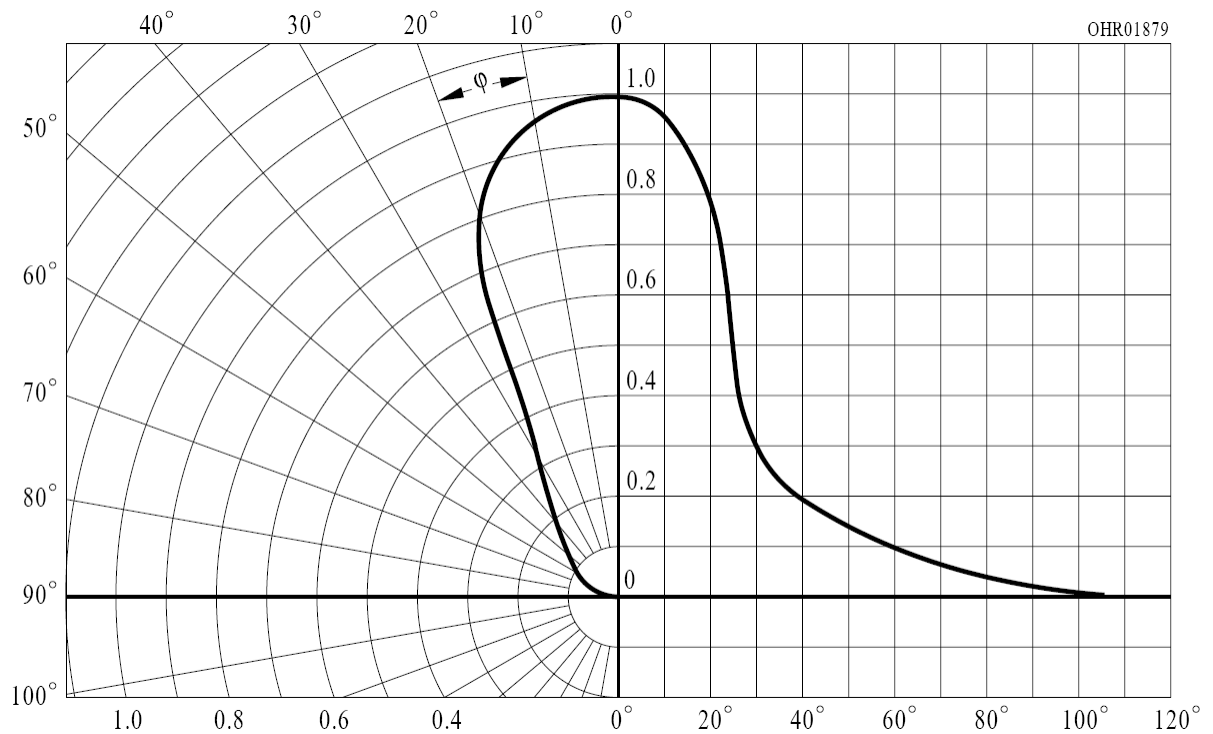


Permissible pulse handling capability

$I_F = f(\tau)$, $T_C = 25 \text{ }^\circ\text{C}$,
duty cycle $D = \text{parameter}$



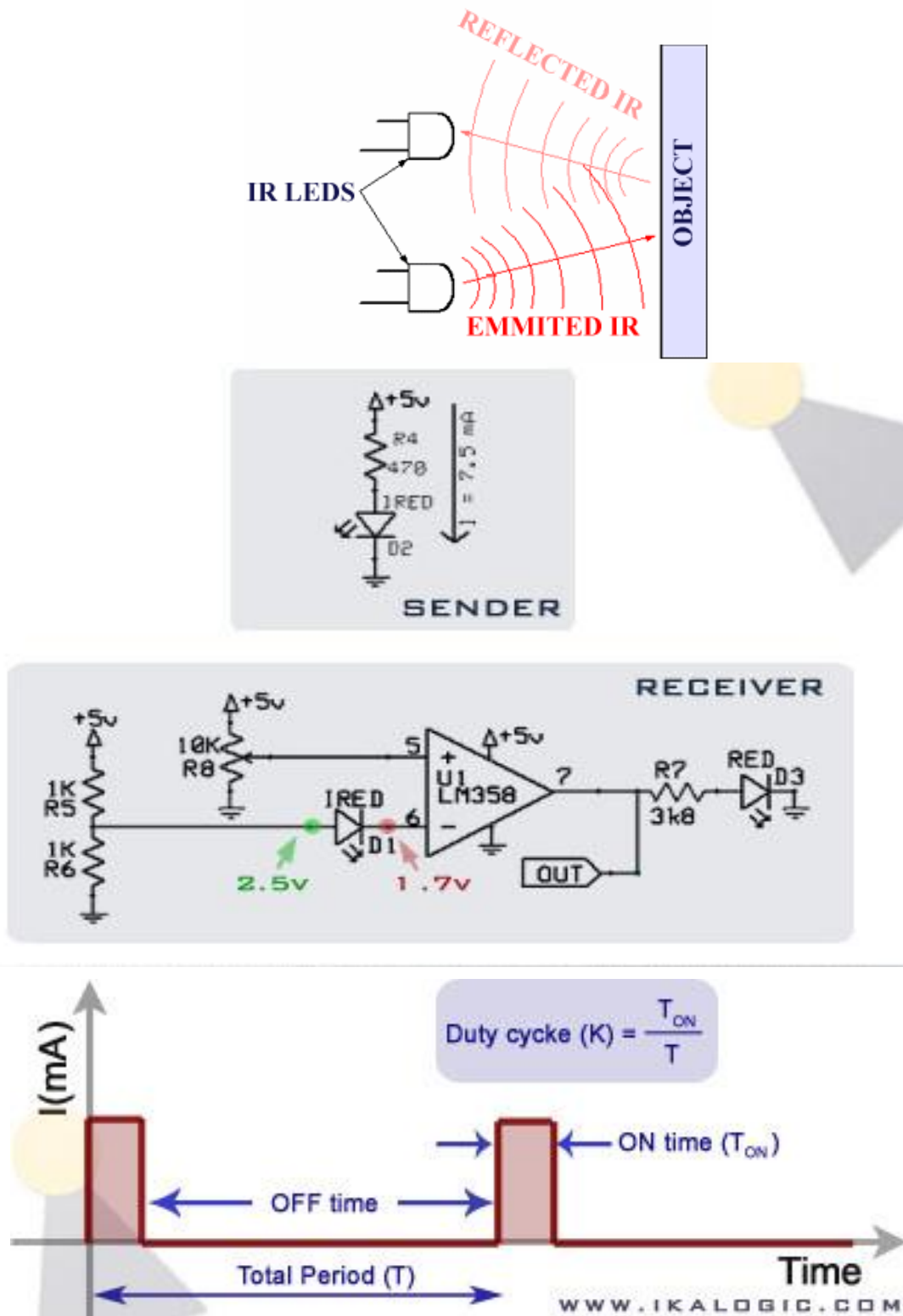
Hình 3.15. Tính chất điện của LD 271



Hình 3.16. Góc phát xạ của LD 271

3.3.6. Ứng dụng

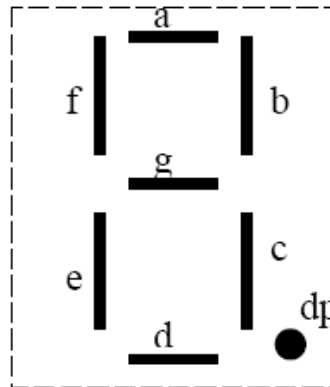
LED hồng ngoại có nhiều ứng dụng trong việc truyền dữ liệu bằng vô tuyến hay cáp quang, mạch điều khiển từ xa (Remote), đo khoảng cách ...



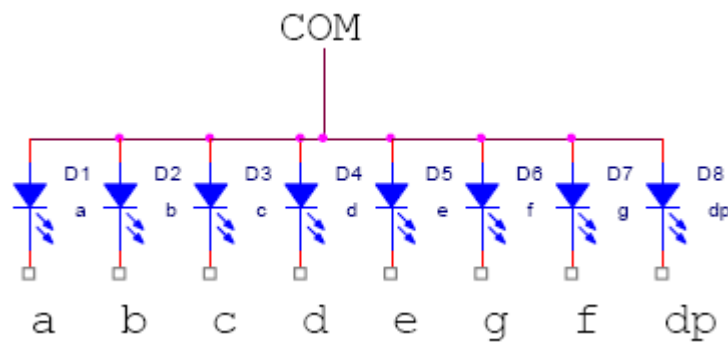
Hình 3.17. Minh họa đo khoảng cách
http://www.ikalogic.com/ir_prox_sensors.php

3.3.7. LED 7 đoạn

1. Cấu trúc và mã hiển thị dữ liệu trên LED 7 đoạn



Hình 3.18. Minh họa Dạng LED 7 đoạn



Hình 3.19. Minh họa Dạng LED 7 đoạn Anode chung

Đối với dạng LED anode chung, chân COM phải có mức logic 1 và muốn sáng LED thì tương ứng các chân a – f, dp sẽ ở mức logic 0.

Số	a	b	c	d	e	f	g	dp	Mã hex
0	0	0	0	0	0	0	1	1	03h
1	1	0	0	1	1	1	1	1	9Fh
2	0	0	1	0	0	1	0	1	25h
3	0	0	0	0	1	1	0	1	0Dh
4	1	0	0	1	1	0	0	1	99h
5	0	1	0	0	1	0	0	1	49h
6	0	1	0	0	0	0	0	1	41h
7	0	0	0	1	1	1	1	1	1Fh
8	0	0	0	0	0	0	0	1	01h
9	0	0	0	0	1	0	0	1	09h

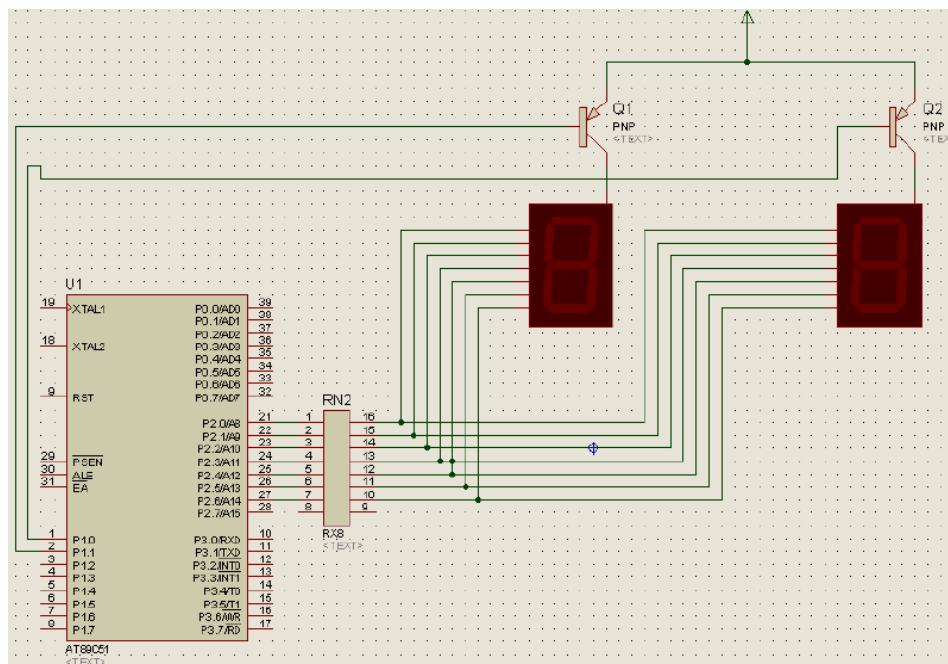
Hình 3.20. Minh họa Bảng mã cho LED Anode chung (a là MSB, dp là LSB)

Số	dp	g	f	e	d	c	b	a	Mã hex
0	1	1	0	0	0	0	0	0	0C0h
1	1	1	1	1	1	0	0	1	0F9h
2	1	0	1	0	0	1	0	0	0A4h
3	1	0	1	1	0	0	0	0	0B0h
4	1	0	0	1	1	0	0	1	99h
5	1	0	0	1	0	0	1	0	92h
6	1	0	0	0	0	0	1	0	82h
7	1	1	1	1	1	0	0	0	0F8h
8	1	0	0	0	0	0	0	0	80h
9	1	0	0	1	0	0	0	0	90h

Hình 3.21. Minh họa Bảng mã cho LED Anode chung (a là LSB, dp là MSB)

2. Hiện thị số liệu dạng số Dùng phương pháp quét

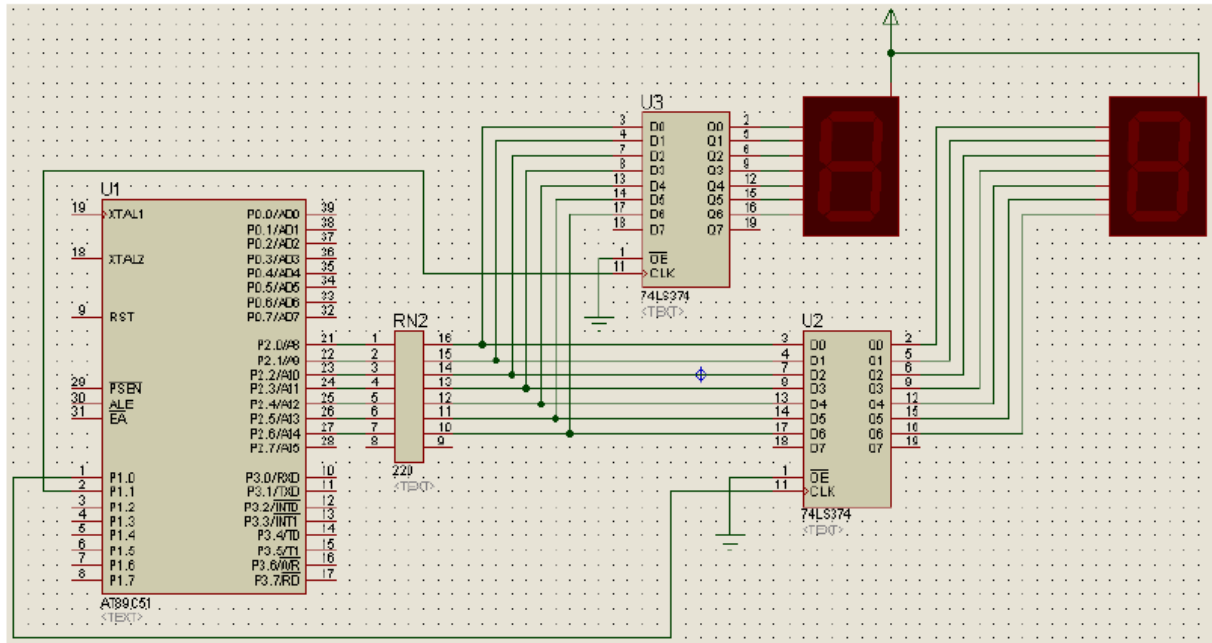
Khi kết nối chung các đường dữ liệu của LED 7 đoạn (hình vẽ), ta không thể cho các LED này sáng đồng thời (do ảnh hưởng lẫn nhau giữa các LED) mà phải thực hiện phương pháp quét, nghĩa là tại mỗi thời điểm chỉ sáng một LED và tắt các LED còn lại. Do hiện tượng lưu ảnh của mắt, ta sẽ thấy các LED sáng đồng thời.



Hình 3.22. Minh họa phương pháp quét

Dùng phương pháp chốt

Khi thực hiện tách riêng các đường dữ liệu của LED, ta có thể cho phép các LED sáng đồng thời mà sẽ không có hiện tượng ảnh hưởng giữa các LED. IC chốt cho phép lưu trữ dữ liệu cho các LED có thể sử dụng là 74LS373, 74LS374.



Hình 3.23. Minh họa phương pháp chốt

3. Hiện thị số liệu dạng tương tự

ICL7106, ICL7107, ICL7107S 3 1/2 Digit, LCD/LED Display, A/D Converters

The Intersil ICL7106 and ICL7107 are high performance, low power, 3 1/2 digit A/D converters. Included are seven segment decoders, display drivers, a reference, and a clock. The ICL7106 is designed to interface with a liquid crystal display (LCD) and includes a multiplexed backplane drive; the ICL7107 will directly drive an instrument size light emitting diode (LED) display. The ICL7106 and ICL7107 bring together a combination of high accuracy, versatility, and true economy. It features autozero to less than 10 μ V, zero drift of less than 1 μ V/oC, input bias current of 10pA (Max), and rollover error of less than one count. True differential inputs and reference are useful in all systems, but give the designer an uncommon advantage when measuring load cells, strain gauges and other bridge type transducers. Finally, the true economy of single power supply operation (ICL7106), enables a high performance panel meter to be built with the addition of only 10 passive components and a display.

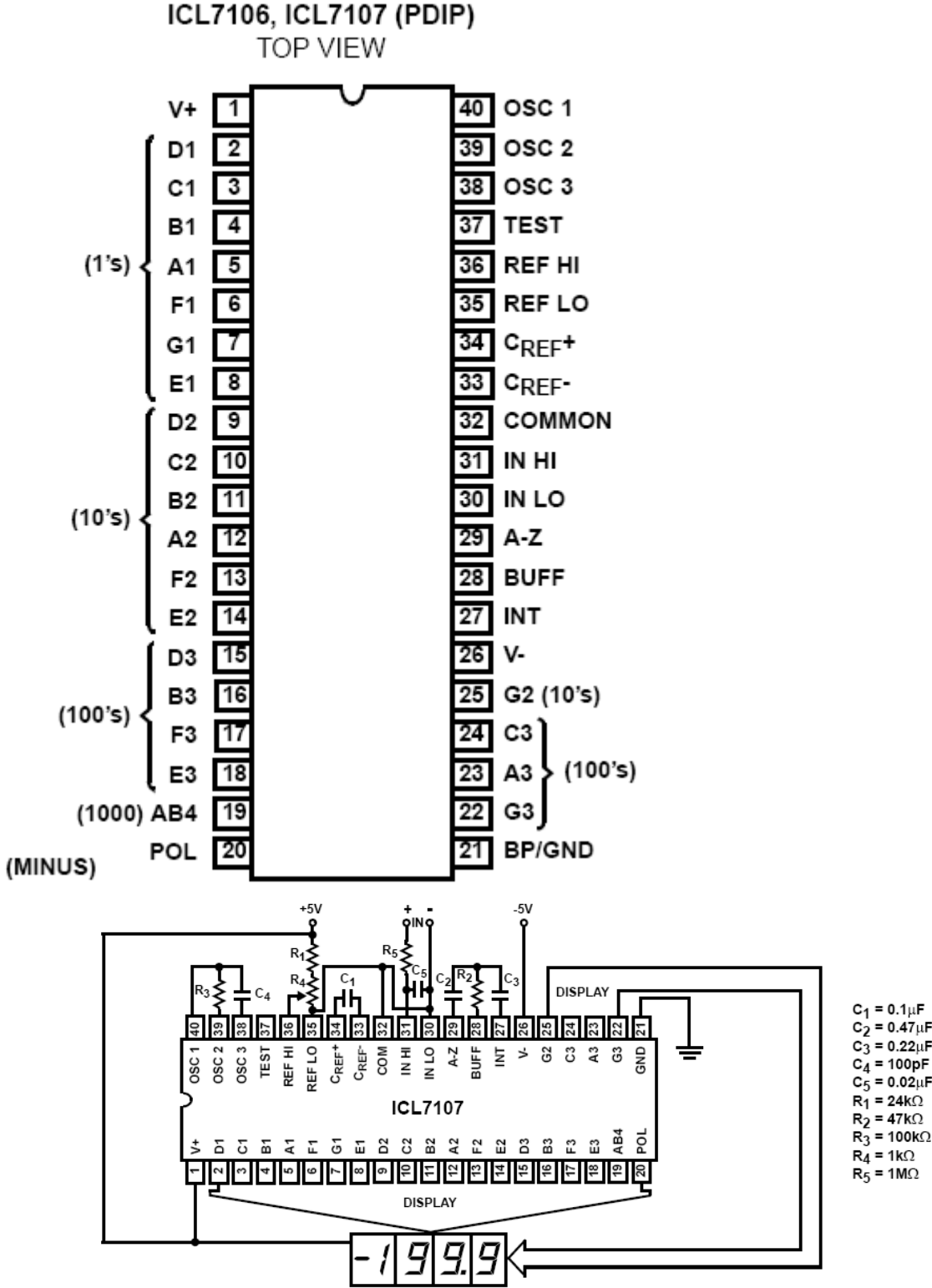


FIGURE 2. ICL7107 TEST CIRCUIT AND TYPICAL APPLICATION WITH LED DISPLAY COMPONENTS SELECTED FOR 200mV FULL SCALE

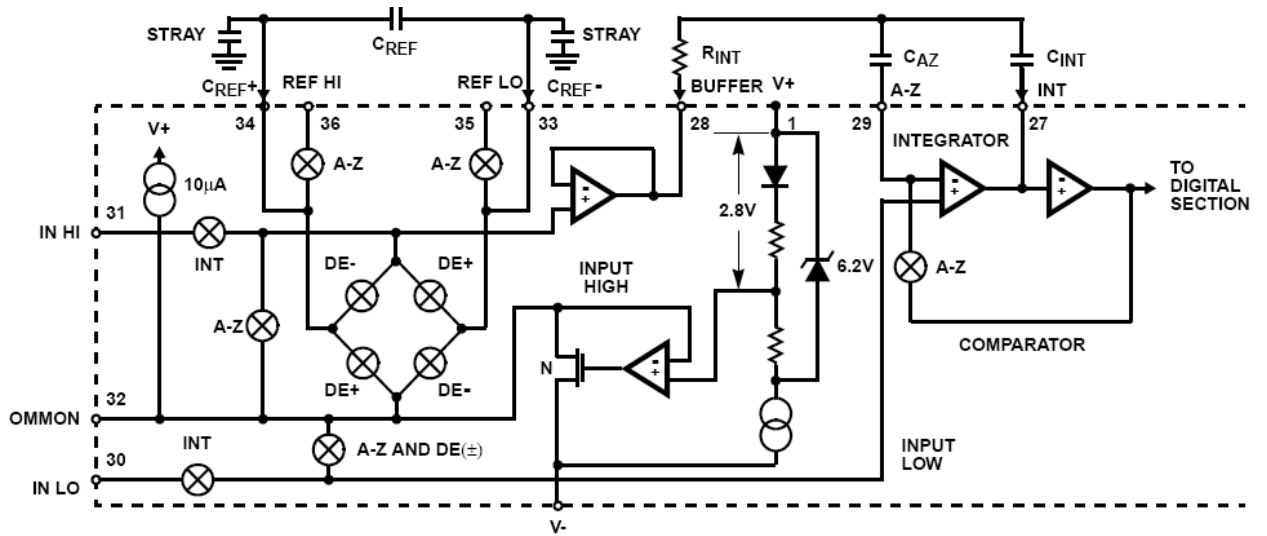


FIGURE 3. ANALOG SECTION OF ICL7106 AND ICL7107

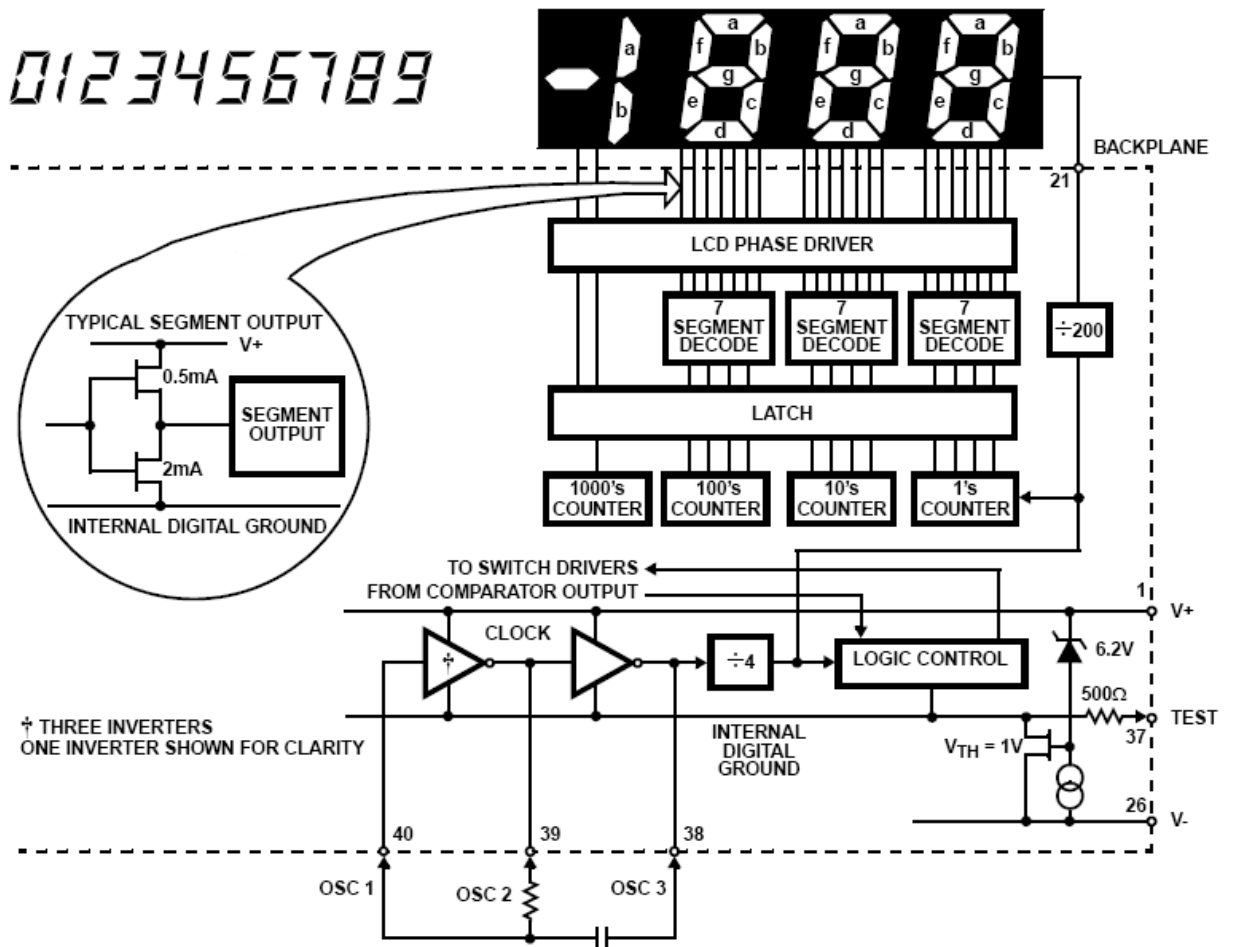


FIGURE 7. ICL7106 DIGITAL SECTION

Chương 4

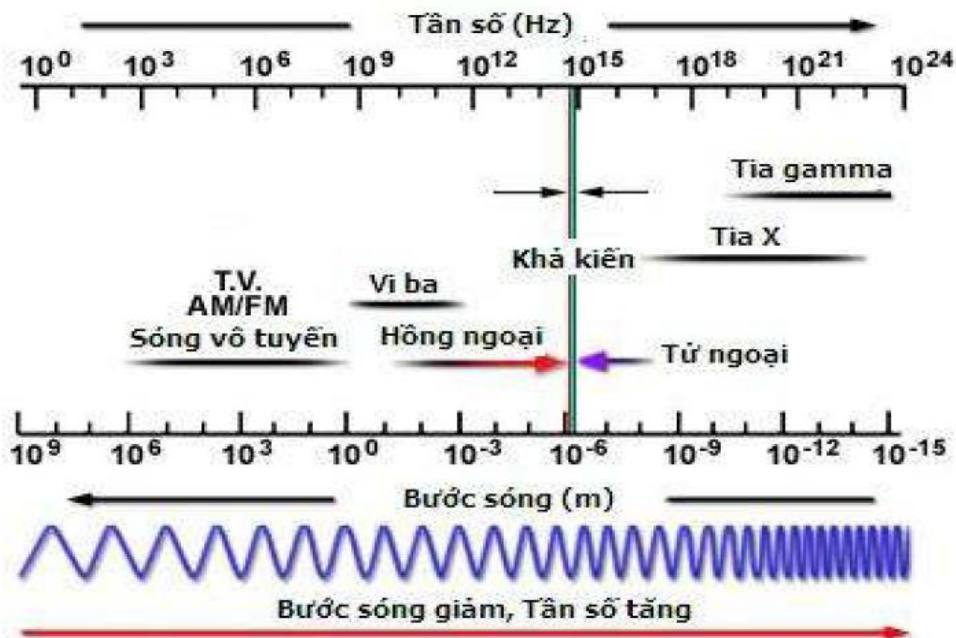
CÁC DỤNG CỤ PHÁT HIỆN BỨC XẠ

4.1. Đặc tính chung

Ánh sáng là 1 dạng của bức xạ điện từ có dải bước sóng từ 0,001 nm đến 1cm hoặc dải tần số rất cao, $10^{14} \rightarrow 10^{15}$ Hz. Sự thay đổi trạng thái năng lượng trong nguyên tử và phân tử là nguồn gốc của các bức xạ ánh sáng đó.

Các ánh sáng được chia thành 3 vùng là

Vùng cực tím	Độ dài bước sóng từ 100 nm - 380 nm
Vùng ánh sáng nhìn thấy	Độ dài bước sóng từ 380 đến 780 nm
Vùng hồng ngoại	Độ dài bước sóng từ 780 nm đến 1 mm



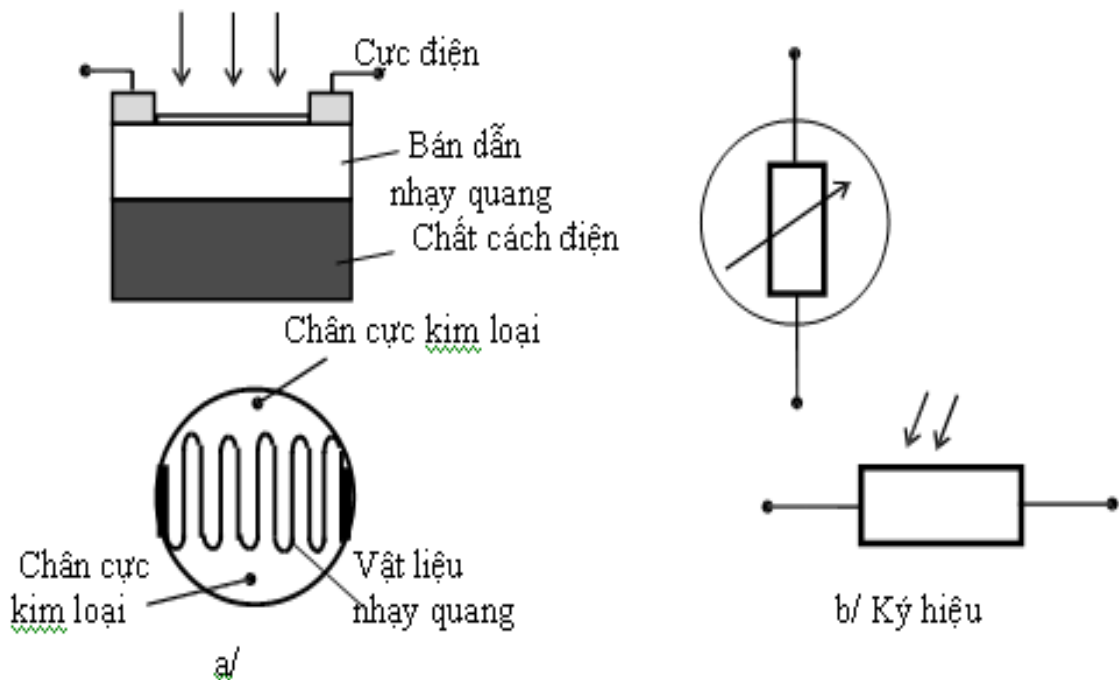
Hình 4.1. Phổ của bức xạ điện từ

Đặc điểm của mắt người là nhìn thấy các sóng điện từ thuộc vùng ánh sáng nhìn thấy. Mắt người không chỉ phân biệt được độ sáng yếu hay mạnh, mà còn phân biệt được từng bước sóng riêng biệt gọi là độ cảm màu của mắt. Nhưng trong kỹ thuật chỉ dùng khái niệm bước sóng chứ không dùng khái niệm màu sắc, và ngay cả tần số cũng ít dùng. Các bước sóng trong thông tin quang hiện nay nằm ở vùng hồng ngoại nên khái niệm màu sắc càng không có ý nghĩa.

4.2. Các linh kiện thu quang (hiệu ứng quang điện bên trong)

Bộ thu quang là phần tử có nhiệm vụ biến đổi tín hiệu quang thành tín hiệu điện dựa trên nguyên lý biến đổi quang → điện. Nghĩa là, biến đổi năng lượng quang thành năng lượng điện. Khi các nguyên tử được cung cấp năng lượng dưới dạng năng lượng quang thích hợp, các điện tử ở lớp ngoài cùng của chúng có thể bật ra thành điện tử tự do. Bằng cách dùng điện trường ngoài để thu nhận các điện tử này ta sẽ có dòng điện ở mạch ngoài gọi là dòng quang điện có độ lớn phụ thuộc vào cường độ ánh sáng chiếu vào. Tùy theo mục đích sử dụng và cấu trúc mà có nhiều loại bộ thu quang khác nhau, vì thế đặc tính của chúng cũng khác nhau.

4.2.1. Điện trở quang



Hình 4.2. Điện trở quang

Điện trở quang là một linh kiện bán dẫn thụ động, không có lớp tiếp xúc P-N.

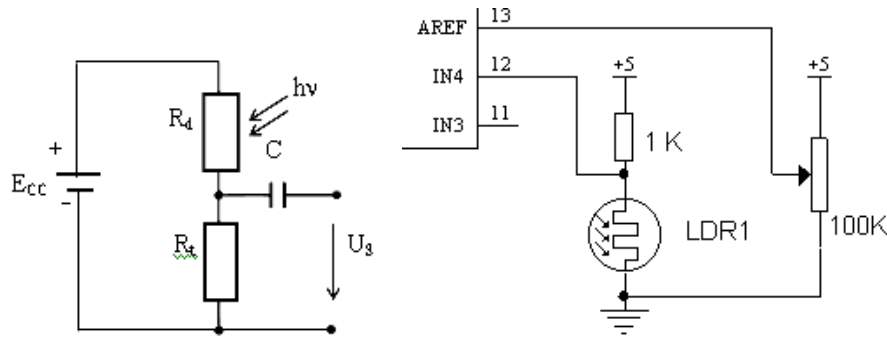
Vật liệu dùng để chế tạo điện trở quang thường là Cadmium Sulfid (CdS), Cadmium Selenid (CdSe), Sulfid kẽm (ZnS) hoặc các tinh thể hỗn hợp khác. Tất cả các vật liệu này được gọi là vật liệu bán dẫn nhạy quang.

1. Cấu tạo

Điện trở quang gồm một lớp vật liệu bán dẫn nhạy quang rải lên một tấm vật liệu cách điện và 2 chân dẫn điện. Để chống ẩm người ta bọc bên ngoài quang trở một lớp sơn chống ẩm trong suốt với vùng ánh sáng hoạt động của nó. Tất cả được bọc trong một vỏ bằng chất dẻo có cửa sổ cho ánh

sáng đi qua.

2. Nguyên lý làm việc



Hình 4.3. Nguyên lý làm việc

Khi chiếu ánh sáng vào vật liệu bán dẫn nhạy quang với năng lượng photon lớn hơn hoặc bằng độ rộng vùng cấm của vật liệu, do quá trình hấp thụ quang năng, từng cặp điện tử- lỗ trống mới xuất hiện. Do vậy, nồng độ hạt dẫn trong chất bán dẫn tăng lên, làm độ dẫn điện của nó tăng, hay nói cách khác là điện trở của chất bán dẫn giảm xuống.

Độ dẫn điện được tạo ra khi được chiếu ánh sáng là

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_F$$

trong đó

- σ_0 - là độ dẫn điện khi chưa chiếu sáng.
- σ_F - độ dẫn điện được tạo ra do ánh sáng

$$\sigma_F = q(\mu_n + \mu_p) \Delta p$$

ở đây $\Delta n = \Delta p$ - nồng độ điện tử bằng nồng độ lỗ trống mới sinh ra.

Dòng điện quang được tính theo công thức:

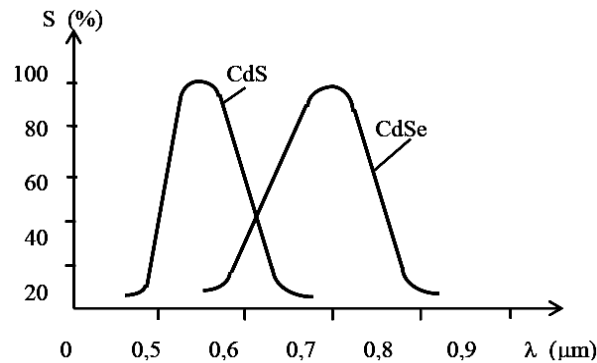
$$I_{ph} = q \Delta p (\mu_n + \mu_p) E w d$$

w.d là tiết diện của lớp bán dẫn nhạy quang, E là cường độ điện trường.

Qua công thức trên ta thấy độ dẫn điện của vật liệu bán dẫn có thể thay đổi được khi ta thay đổi nồng độ hạt dẫn và độ linh động hiệu dụng của điện tử và lỗ trống. Như vậy, khi ta thay đổi cường độ chiếu sáng lên điện trở quang thì cường độ dòng điện trong mạch cũng thay đổi theo.

Các điện trở quang có khả năng khuếch đại dòng điện lên đến 10^5 lần hoặc hơn nữa. Tuy nhiên, các giá trị này chỉ phù hợp khi cường độ ánh sáng không thay đổi theo thời gian hoặc thay đổi chậm. Khi tần số biến điệu, cường độ ánh sáng tăng thì hệ số khuếch đại của điện trở quang giảm. Khả

năng đáp ứng tần số của điện trở quang thấp, thường đạt từ vài chục Hz đến vài KHz.



Hình 4.4. Độ nhạy quang

3. Các tham số chính của điện trở quang

Điện dẫn suất σ_p là hàm số của mật độ năng lượng quang ρ_λ khi độ dài bước sóng không đổi

$$\sigma_p = \sigma_p(\rho_\lambda) \text{ khi } \lambda = \text{const}$$

Độ nhạy tương đối của điện trở quang $S(\lambda)$ là tỉ số giữa điện dẫn suất thay đổi theo bước sóng $\sigma_p(\lambda)$ và điện dẫn suất cực đại $\sigma_{p,\text{max}}$ khi mật độ năng lượng quang ρ_λ không đổi

$$S(\lambda) = \frac{\sigma_p(\lambda)}{\sigma_{p,\text{max}}} \Big|_{\rho_\lambda}$$

Vận tốc làm việc là thời gian hồi đáp của một điện trở quang khi có sự thay đổi từ sáng sang tối hay từ tối sang sáng. Với cường độ ánh sáng mạnh, điện trở quang làm việc nhanh hơn. Điện trở quang làm việc chậm hơn khi trời lạnh và cất giữ trong bóng tối.

Hệ số nhiệt của điện trở quang: Hệ số nhiệt của điện trở quang tỉ lệ nghịch với cường độ chiếu sáng. Do đó, để giảm bớt sự thay đổi trị số của điện trở quang theo nhiệt độ, điện trở quang cần được cho hoạt động ở mức chiếu sáng tối đa.

Điện trở tối R_d : Điện trở tối là điện trở trong bóng tối của điện trở quang. Điện trở tối là tham số quan trọng, nó cho ta biết "dòng điện rò" lớn nhất đối với một điện thế trên điện trở quang.

Điện thế hoạt động: Tùy theo cấu trúc mặt nạ của điện trở quang mà có các điện thế làm việc khác nhau. Điện thế này có thể lên tới 0,5 Kv/mm. Điện thế hoạt động cao nhất đo được khi điện trở quang hoạt động trong bóng tối. Khi sử dụng điện trở quang cần chọn giá trị điện áp cung cấp sao cho tối ưu đối với mạch điện mà không làm hỏng điện trở quang.

Công suất tiêu tán cao nhất: Khi điện trở quang hoạt động cần phải giữ

cho nhiệt độ của nó thấp hơn một nhiệt độ cho phép. Nhiệt độ cho phép của điện trở quang thường giới hạn từ -40°C đến $+75^{\circ}\text{C}$.

4.2.2. Photodiode – Diode quang

1. Khái niệm chung

Khi chiếu sáng một tiếp xúc P-N thì trên nó sẽ xuất hiện một điện áp. Tùy theo chức năng và cấu trúc có thể chia điốt quang thành nhiều loại như sau

- Điốt quang loại tiếp xúc P-N.
- Điốt quang loại PIN.
- Điốt quang thác (APD).

Một số đặc điểm của điốt quang là rất tuyến tính, ít nhiễu, dải tần số làm việc rộng, nhẹ, có độ bền cơ học cao và tuổi thọ cao.

Điốt quang không nhạy bằng điện trở quang loại CdS nhưng nó làm việc nhanh gấp nhiều lần.



Hình 4.5. Diode quang

2. Vật liệu cơ bản

Hiện nay, để truyền dẫn tín hiệu quang theo 3 cửa sổ suy hao nhỏ nhất của sợi quang, người ta chú ý đến các điốt quang làm việc ở hai vùng bước sóng:

Vùng bước sóng từ $0,85$ đến $0,9 \mu\text{m}$.

Vùng bước sóng từ $1,3$ đến $1,6 \mu\text{m}$.

Trong vùng bước sóng thứ nhất từ $0,85$ đến $0,9 \mu\text{m}$, thì vật liệu chế tạo điốt quang được chọn là Silic vì Silic có độ nhạy cao với bước sóng quanh $0,85 \mu\text{m}$. Độ rộng vùng cấm của silic là $E_G = 1,1\text{eV}$ và bằng năng lượng quang cần hấp thụ, ta có

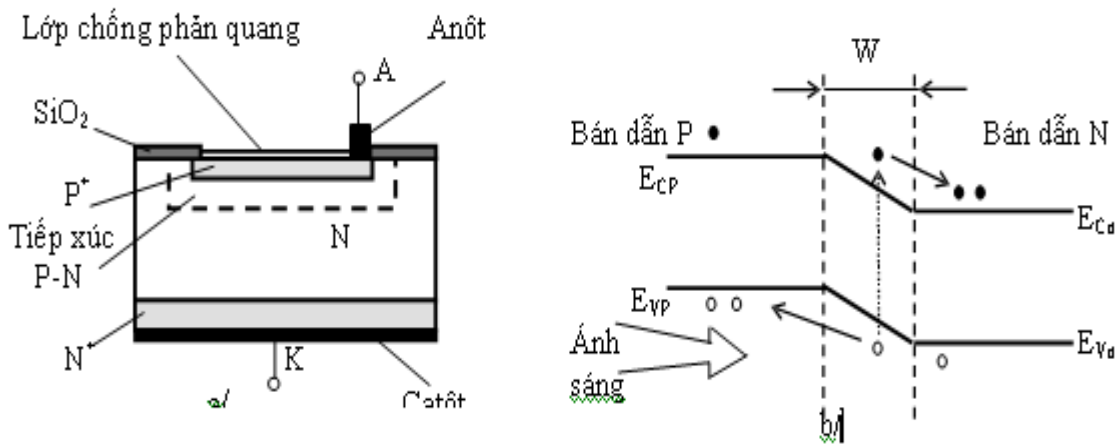
$$E_G = h\nu = h \frac{C}{\lambda}$$

và sẽ có bước sóng cắt là: $\lambda_P = 1,1\mu\text{m}$.

Trong vùng bước sóng thứ hai từ $1,3$ đến $1,6 \mu\text{m}$ cần sử dụng chất bán dẫn có độ rộng vùng cấm hẹp hơn với $E_G < 0,95 \text{ eV}$ người ta thường chọn

vật liệu bán dẫn được chế tạo từ các liên kết III-V như GaAs, InP, InAs và GaSb... Ngoài ra, người ta cũng chú ý đến liên kết II-VI như PbSnSe và CdHgTe. Nhờ thay đổi hàm lượng phù hợp trong cấu trúc $Hg_xCd_{1-x}Te$ có thể chế tạo được các điốt quang làm việc ở bước sóng 1,3 μm đến 1,55 μm . Thực tế đã có loại điốt quang thác APD thử nghiệm chế tạo từ vật liệu $Hg_{0,4}Cd_{0,6}Te$.

2. Điốt quang loại tiếp xúc P-N

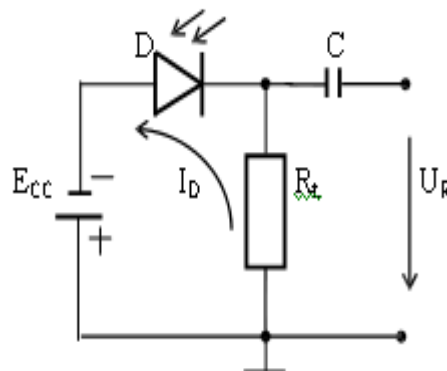


Hình 4.6. Cấu tạo của điốt quang loại tiếp xúc P-N (a) và phân bố dải năng lượng của tiếp xúc P-N (b).

Cấu tạo

Điốt quang gồm có một tiếp xúc P-N. Bề dày của lớp tiếp xúc là w . Hai phần bán dẫn P⁺ và N⁺ có nồng độ tạp chất cao. Điốt có một cửa sổ để chiếu ánh sáng vào. Hai chân anốt A và catốt K là kim loại được nối tới các phần bán dẫn.

Nguyên lý làm việc



Hình 4.7. Sơ đồ nguyên lý đấu nối điốt quang

Điốt quang được cấp nguồn ECC sao cho tiếp xúc P-N *phân cực ngược* để tạo ra một điện trường dịch chuyển các hạt dẫn thiểu số sẽ được sinh ra dưới tác dụng của ánh sáng. Do đó, khi chưa có tác dụng ánh sáng thì trong điốt thu quang chỉ có dòng điện ngược (dòng điện tối hay dòng rò) rất nhỏ.

Khi cho ánh sáng chiếu vào, do quá trình hấp thụ, trong bán dẫn xuất hiện từng cặp điện tử - lỗ trống. Các điện tử và lỗ trống này dưới tác động của điện trường ở tiếp xúc P-N phân cực ngược sẽ chuyển động trôi qua tiếp xúc P-N và tạo nên dòng điện gọi là dòng quang điện.

Linh kiện cần có độ nhạy cao vì nó sẽ cho dòng điện quang cao hơn đối với cùng công suất quang chiếu vào.

Tần số và cường độ của dòng quang điện hoàn toàn do tần số và cường độ của ánh sáng kích thích quyết định.

Điốt quang loại tiếp xúc P-N có vùng điện tích không gian hẹp, ánh sáng được hấp thụ phần lớn ở trong vùng bán dẫn loại P và N. Như vậy hiệu suất lượng tử thấp và tốc độ đáp ứng thấp. Để tăng hiệu suất lượng tử hóa và độ nhạy người ta chế tạo điốt quang có vùng điện tích không gian rộng hơn. Đó là điốt quang loại PIN và điốt quang thác APD.

3. Điốt quang loại PIN:

Cấu tạo

Điốt quang loại PIN gồm một lớp bán dẫn N^+ có nồng độ tạp chất cao làm nền, trên đó phủ một lớp bán dẫn nguyên tính I (Intrinsic), rồi đến lớp bán dẫn loại P^+ có nồng độ tạp chất cao. Do đó điốt có tên gọi là điốt P-I-N. Bên trên bề mặt của lớp bán dẫn P^+ là điện cực vòng Anốt để ánh sáng có thể thâm nhập vào miền bán dẫn I. Trên lớp bán dẫn P có phủ một lớp mỏng chống phản xạ quang để tránh tổn thất ánh sáng chiếu vào.

Nguyên lý hoạt động

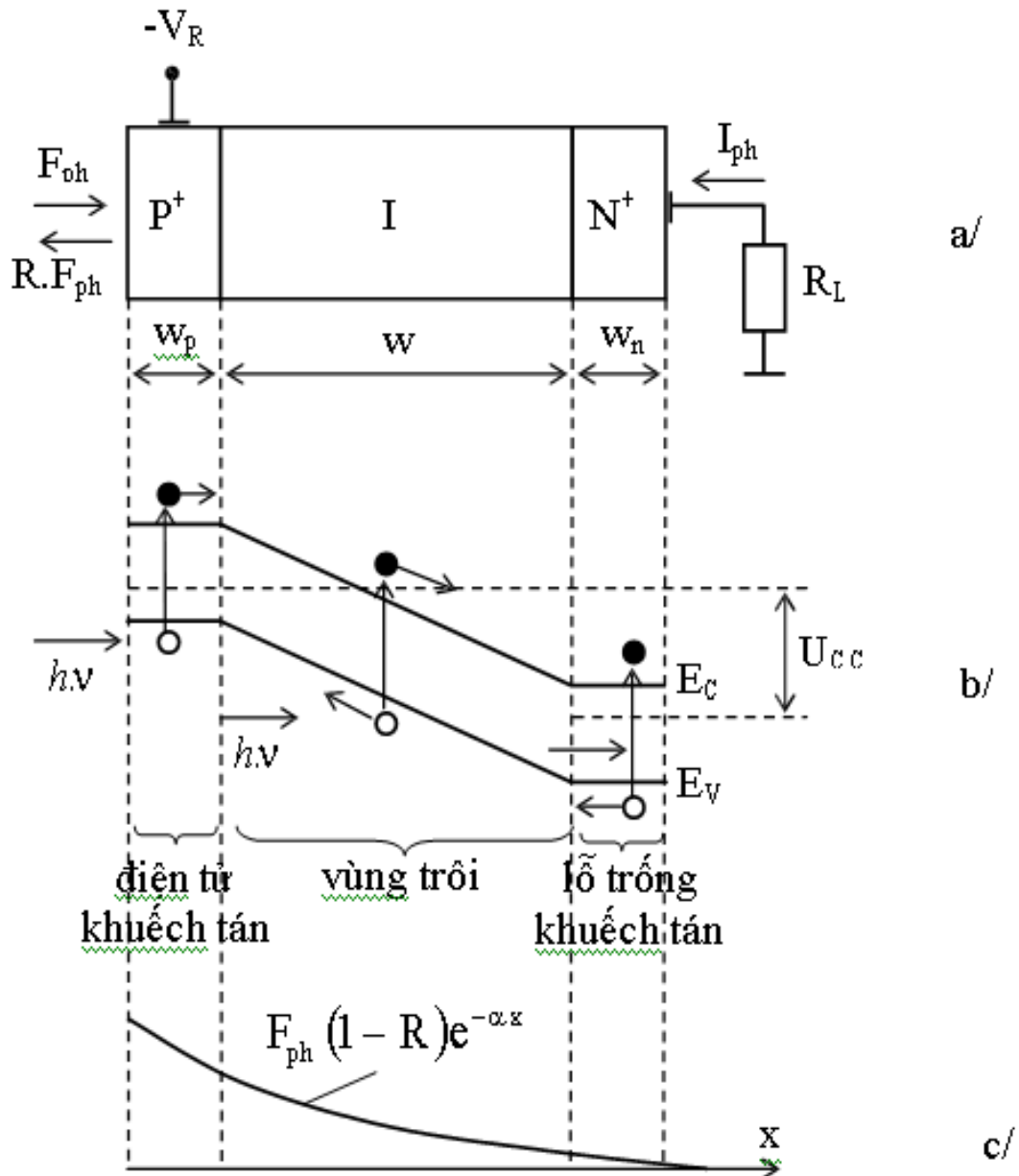
Điện áp cung cấp cho điốt phân cực ngược dọc theo linh kiện, vì vậy lớp I bị nghèo hoàn toàn trong suốt thời gian hoạt động của nó.

Khi ánh sáng đi vào lớp bán dẫn P^+ , trường hợp lý tưởng mỗi photon sẽ sinh ra trong miền P^+ , I hoặc N^+ một cặp điện tử- lỗ trống. Các điện tử và lỗ trống vừa sinh ra sẽ được điện trường mạnh hút về hai phía điện cực, tạo ra một dòng điện ở mạch ngoài và trên tải R_t thu được một điện áp U_{Ra} .

Trên thực tế, một phần ánh sáng vào bị tổn thất do phản xạ. Lớp chống phản xạ tạo cho linh kiện có thể đạt hiệu suất tới 80%.

Đối với silic, hệ số phản xạ ánh sáng R_f hầu như là 30%.

Khả năng thâm nhập ánh sáng vào các lớp bán dẫn thay đổi theo bước sóng. Vì thế lớp bán dẫn P⁺ không được quá dày. Xác suất tạo ra các cặp điện tử - lỗ trống trong miền I tăng lên theo độ dày của miền này, do đó miền I càng dày càng đạt hiệu suất lượng tử hóa cao. Nhưng nếu độ rộng của lớp I tăng lên thì thời gian trôi qua nó chậm hơn và làm chậm tốc độ chuyển mạch.



Hình 4.8. Hoạt động của điốt quang PIN
 a/ Mô hình cấu tạo của điốt PIN
 b/ Giản đồ năng lượng khi phân cực ngược
 c/ Đặc tính phát sinh hạt dẫn

Trong điốt PIN không có khuếch đại và hiệu suất cực đại là đơn vị,

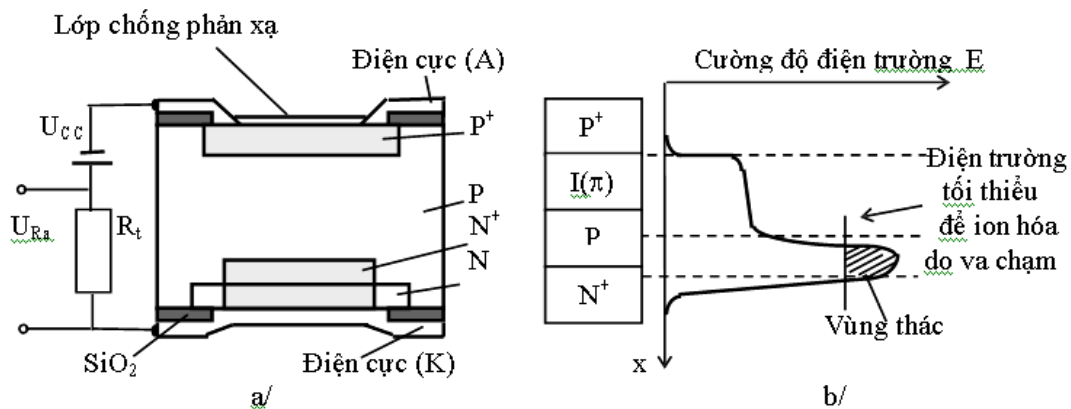
độ rộng băng tần có thể giới hạn bởi hằng số thời gian điện dung - điện trở ngoài. Trên thực tế, độ rộng băng có thể đạt 10 GHz. Điốt quang loại PIN có dòng điện tối rất nhỏ nên tiếng ồn thấp hơn so với điện trở quang. Vì nguyên nhân này, điốt PIN là bộ tách quang thông dụng trong các hệ thống thông tin quang.

4. Điốt quang thác (APD)

Để tăng độ nhạy của điốt quang, người ta có thể sử dụng hiệu ứng giống như hiệu ứng nhân điện tử trong các bộ nhân quang điện. Cấu tạo của điốt quang sẽ có dạng đặc biệt đó là điốt quang với hiệu ứng quang thác APD - Avalanche Photodiodes.

Điốt quang thác giống như điốt PIN trừ điện áp phân cực lớn hơn nhiều để tạo ra sự nhân thác lũ về hạt dẫn và như vậy APD có khuếch đại dòng điện bởi sự ion hoá do va chạm và nhân hạt dẫn.

Cấu tạo



Hình 4.9. Cấu tạo và sự phân bố điện trường trong điốt quang thác APD.

Như hình vẽ, lớp bán dẫn nguyên tính I trong điốt P-I-N được thay bằng một lớp bán dẫn P có nồng độ tạp chất thấp. Như vậy, miền bán dẫn P tạo thành miền trôi và là nơi sinh ra các cặp điện tử- lỗ trống.

Điện trường do điện áp phân cực ngược bên ngoài đặt vào thay đổi theo các lớp bán dẫn dọc theo điốt. Trong vùng trôi điện trường tăng chậm, nhưng trong vùng tiếp xúc P-N⁺ thì tăng nhanh và tạo ra miền thác tại vùng này.

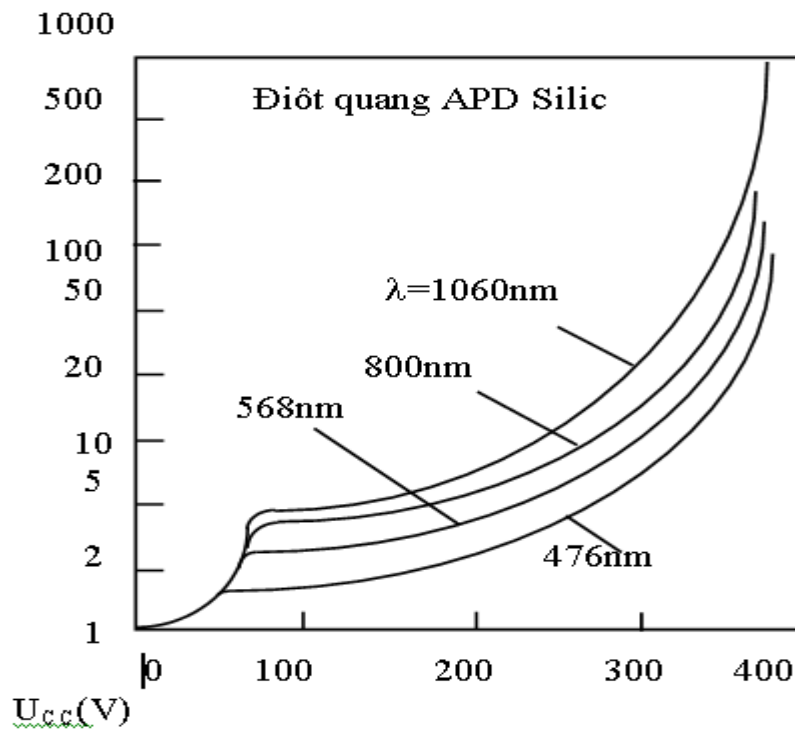
Nguyên lý hoạt động

Nguyên lý hoạt động của APD cơ bản giống như điốt P-I-N.

Sơ đồ nguyên lý được mô tả trong hình trên. Theo sơ đồ này, điốt quang thác được phân cực ngược nhờ nguồn U_{cc}, và tín hiệu điện được lấy ra trên tải R_t.

Khi chiếu ánh sáng vào, sẽ xuất hiện thêm các cặp điện- lỗ trống mới

trong miền trôi (bán dẫn P). Dưới tác động của điện trường, các điện tử trong miền P sẽ dịch chuyển đến vùng thác của tiếp xúc P-N⁺ và rơi vào vùng có điện trường mạnh nên được tăng tốc. Các điện tử có tốc độ lớn này sẽ va chạm vào các nguyên tử khác để tạo ra các cặp điện tử- lỗ trống mới. Hiện tượng này được gọi là hiện tượng ion hóa do va chạm. Do đó, dòng điện qua điốt APD tăng nhanh như được khuếch đại lên với hệ số khuếch đại M. Hệ số khuếch đại (hay còn gọi là hệ số nhân) phụ thuộc vào điện áp phân cực cho điốt và nó có thể đạt tới 200 lần. Xem hình dưới.



Hình 4.10. Sự phụ thuộc của hệ số khuếch đại dòng điện M của điốt quang APD silic vào điện áp phân cực U_{cc} ở các bước sóng khác nhau tại nhiệt độ trong phòng.

Hệ số nhân M cũng có thể tính theo công thức

$$M_{ph} = \frac{I_M}{I_{ph}} = \frac{1}{1 - (V/V_{dt})^n}$$

Trong đó:

- I_M - là giá trị trung bình của dòng điện nhân tổng tại đầu ra.
- I_{ph} - là dòng quang điện sơ cấp chưa được nhân, xác định theo công thức trên.
- V_{dt} - điện áp đánh thủng tại giá trị M xác định.
- n - lũy thừa, là hằng số vật liệu có giá trị từ 2,5 đến 7.
- $V = V_0 - IMRM$

- V_0 là điện áp phân cực ngược cho điốt;
- R_M là điện trở nối tiếp của điốt quang và điện trở tải của mạch tách quang
- I_M là dòng điện nhân ở đầu ra của APD.

Ta thấy điốt APD cần có điện áp phân cực lớn hơn nhiều so với điốt loại P-I-N. Nếu thời gian cho quá trình ion hóa trong miền thác càng dài thì hệ số khuếch đại M càng lớn, song tốc độ trôi qua miền thác sẽ chậm đi. Các xung cũng sẽ bị giãn rộng ra và hạn chế độ rộng băng tần B . Để đánh giá khả năng làm việc của APD, người ta định nghĩa tích số độ khuếch đại và độ rộng băng do quá trình thác là

$$M_{ph}B = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (27)$$

Trong đó: τ là thời gian giữa 2 quá trình va chạm của điện tử với các nguyên tử.

Sự tăng hệ số khuếch đại có thể đạt được khi tích hệ số khuếch đại - độ rộng băng tần đạt 100 GHz hoặc hơn. Thông thường, các APD cho phép đạt độ rộng băng trên 1GHz với giá trị M_{ph} lớn. Để ổn định giá trị M_{ph} , ta cần cấp một điện áp nguồn lớn và ổn định về nhiệt do đó chi phí để đảm bảo chế độ làm việc cho APD lớn hơn nhiều so với điốt loại P-I-N.

Trong điốt APD silic, ion hoá do va chạm bởi điện tử khoảng 50 lần lớn hơn lỗ trống và do đó nó cho tỉ lệ tín hiệu / tiếng ồn tốt nhất.

5. Các đặc tính và tham số của điốt quang

Hiệu suất lượng tử hóa η là tỉ số giữa số lượng các đôi điện tử- lỗ trống sinh ra trên số photon có năng lượng $h\nu$ đi đến và nó được tính theo công thức sau

$$\eta = \frac{I_{ph}/q}{P_0/h\nu}$$

Trong đó

I_{ph} là dòng quang điện trung bình sinh ra do công suất quang trung bình P_0 đi tới điốt quang.

Trên điốt thực tế hiệu suất lượng tử hóa $\eta = (30 - 95)\%$.

Độ nhạy của điốt quang S : (hay hệ số chuyển đổi)

Độ nhạy chỉ rõ giá trị dòng quang điện sinh ra trên đơn vị công suất ánh sáng đi đến điốt. Nó liên hệ với hiệu suất lượng tử hóa theo công thức:

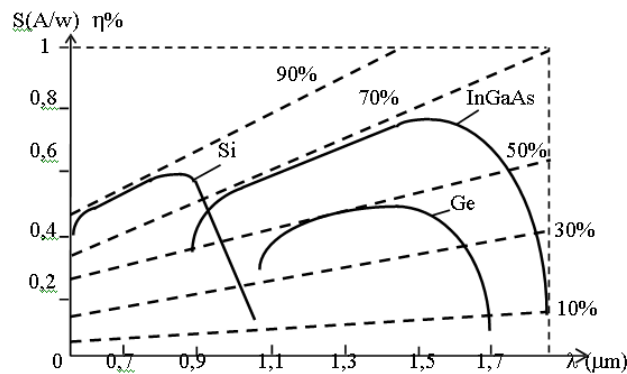
$$S = \frac{I_{ph}}{P_0} = \frac{\eta q}{h\nu}$$

Trong các điốt quang loại P-I-N, độ nhạy là hàm của bước sóng được mô

tả ở hình dưới

Trong hầu hết các photodiôt, độ nhạy là một hàm tuyến tính với công suất quang. Có nghĩa là, dòng quang điện I_{Ph} tỉ lệ thuận trực tiếp với công suất quang P_0 chiếu vào cấu kiện tách quang, cũng như vậy, độ nhạy S là hằng số tại một bước sóng đã cho.

Tuy nhiên, hiệu suất lượng tử hóa không phải là hằng số tại tất cả các bước sóng vì nó thay đổi theo năng lượng photon. Dẫn đến độ nhạy là hàm của bước sóng và vật liệu bán dẫn.



Hình 4.11. So sánh giữa hiệu suất lượng tử và độ nhạy như một hàm của bước sóng cho điôt quang loại P-I-N đối với các vật liệu khác nhau.

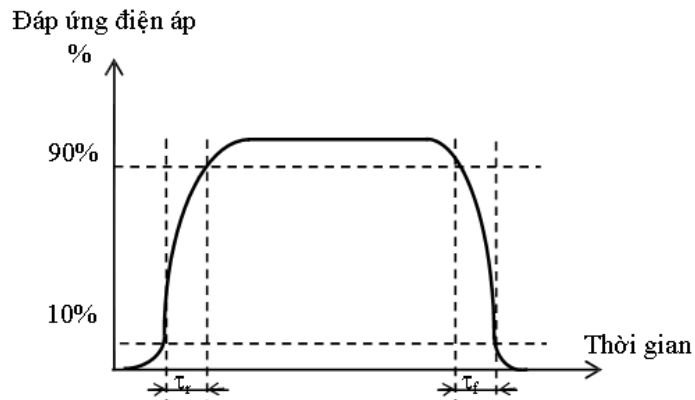
Tạp âm của bộ tách quang

Trong các hệ thống thông tin sợi quang, nhìn chung photodiôt được yêu cầu để tách các tín hiệu quang rất yếu. Việc tách các tín hiệu quang yếu nhất có thể yêu cầu bộ tách quang và mạch khuếch đại tiếp theo của nó phải tối ưu sao cho tỉ số tín hiệu trên tạp âm (S/N) được duy trì. Tỉ số tín hiệu trên tạp âm (S/N) tại đầu ra của một bộ thu quang được xác định như sau

$$S = \frac{\text{Công suất tín hiệu dòng quang điện}}{\text{Công suất tạp âm Diode quang} + \text{Công suất tạp âm mạch khuếch đại}}$$

Thời gian hồi đáp

Thời gian hồi đáp của điôt quang được biểu thị bằng thời gian lên và thời gian xuống của tín hiệu tách quang trên lối ra khi điôt quang được chiếu sáng bằng bức xạ quang đầu vào. Thời gian lên được đo từ 10% đến 90% sườn lên của xung ra và thời gian xuống cũng được đo như vậy.

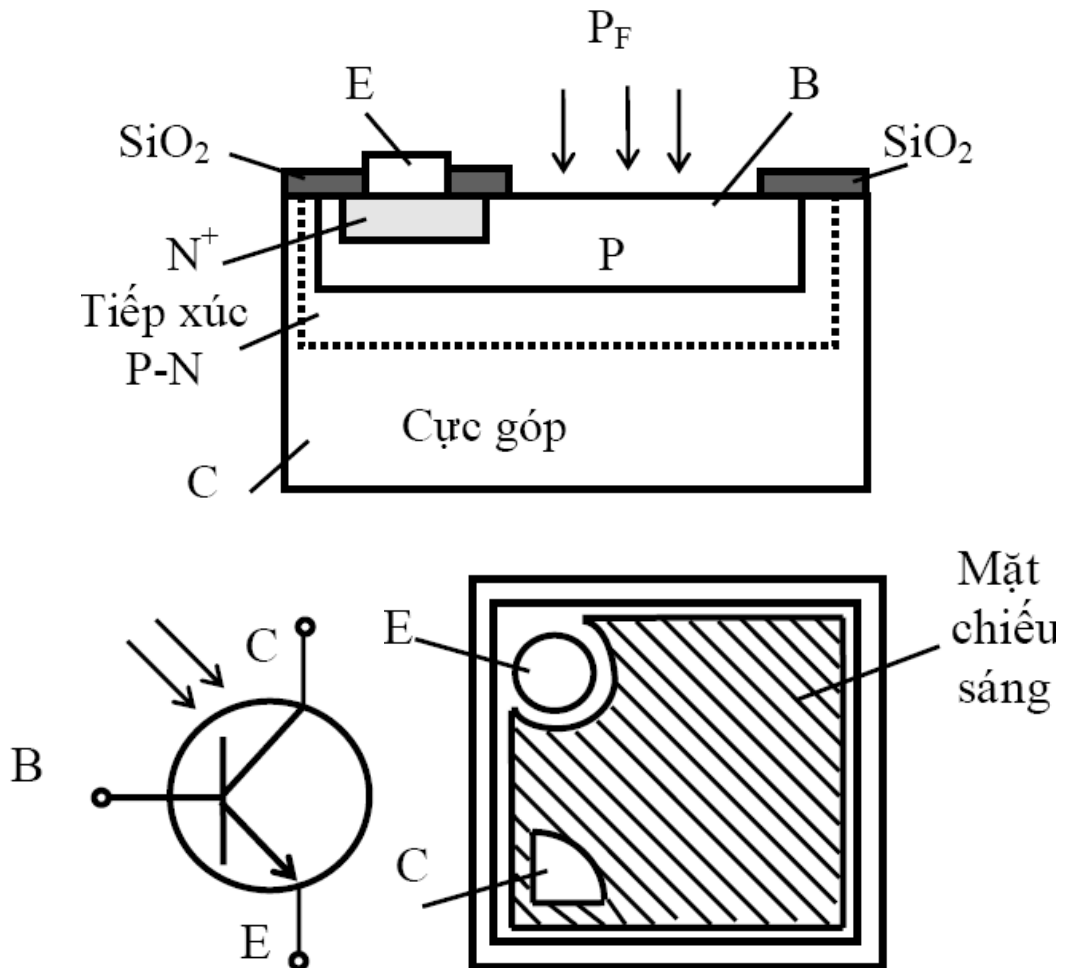


Hình 4.12. Thời gian lên τ_r và thời gian xuống τ_f của đáp ứng điện áp lối ra của điốt quang.

4.2.3. Tranzito quang – Phototransistor

1. Cấu tạo

Tranzito quang có 2 loại PNP và NPN. Ba chân cực: cực phát E, cực gốc B, và cực góp C. Cực gốc là bề mặt được ánh sáng chiếu vào, nó được chế tạo rất mỏng để có điện trở nhỏ.



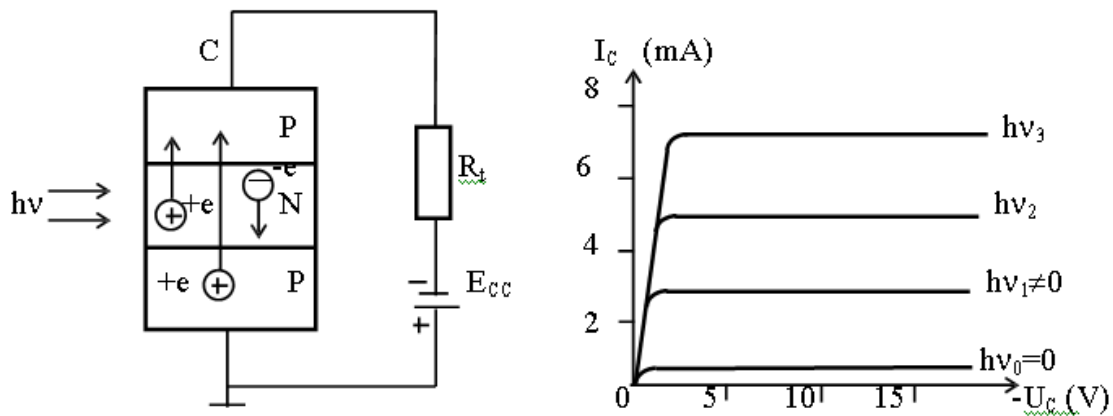
Hình 4.13. Cấu tạo và ký hiệu của tranzito quang

2. Nguyên lý hoạt động

Trong hình, nguồn cung cấp ECC tạo cho tiếp xúc phát phân cực thuận và tiếp xúc góp phân cực ngược. Tải R_t để sụt bớt một phần điện áp phân cực cho tranzito, và lấy tín hiệu điện ra.

- Khi không có tín hiệu quang ($h\nu = 0$ hay $I_B = I_{\text{Phot.}} = 0$) trong mạch chỉ có dòng điện tối I_C tối. Đây là dòng điện do các lỗ trống khuếch tán từ phân phát sang tới cực góp và nó có trị số nhỏ.

- Khi có tín hiệu quang đến ($h\nu \neq 0$ hay $I_B = I_{\text{Phot.}} \neq 0$), ở phần gốc sẽ xuất hiện các cặp điện tử- lỗ trống. Các lỗ trống sẽ di chuyển về cực góp tạo nên thành phần dòng quang điện $I_{\text{Phot.}}$, còn các điện tử chuyển động về phía tiếp xúc phát, kích thích cho sự khuếch tán của các hạt dẫn tại đây dễ dàng hơn..



Hình 4.14. Sơ đồ nguyên lý đầu nối tranzito quang và đặc tuyến Vôn-Ampe của nó

Với sơ đồ mắc cực phát chung như hình vẽ, ta có thể tính gần đúng dòng điện cực góp khi tranzito quang được chiếu sáng I_C s:

- Do cực gốc để hở và có ánh sáng chiếu đến nên dòng điện cực gốc chính là dòng tín hiệu quang $I_{\text{Phot.}}$.
- Hệ số khuếch đại dòng quang chính bằng hệ số khuếch đại của tranzito trong sơ đồ mắc cực phát chung ($M = \beta$).

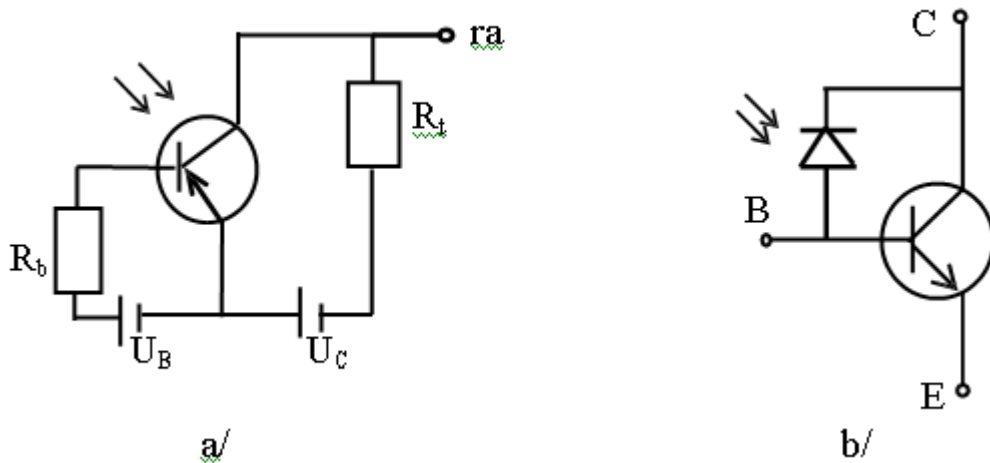
Vậy, tổng dòng điện trong tranzito quang khi được chiếu sáng

$$I_Cs = \beta I_{\text{Phot.}} + I_{\text{Phot.}} + I_C \text{ tối}$$

Thành phần dòng điện tối I_C tối sẽ hạn chế khả năng khuếch đại tín hiệu quang của tranzito. Để khắc phục hạn chế này người ta dùng tranzito quang 3 chân cực để giảm dòng điện tối và tăng trở kháng ra của mạch. Sơ đồ đầu tranzito 3 chân cực như trong hình 28. Với cách mắc này các tham số của mạch phụ thuộc vào dòng điện cực gốc rõ rệt. Tại giá trị dòng cực gốc tối ưu nào đó sẽ cho các thông số tối ưu: dòng điện tối có thể

giảm xuống 10 lần, trở kháng ra tăng lên khoảng 10 lần, và các hệ số khuếch đại dòng điện và điện áp tăng lên đáng kể so với mạch để hở cực gốc. Trong các mạch, tranzito quang cũng có thể mắc theo 3 cách mắc.

Đó là các sơ đồ: cực gốc chung, cực phát chung và cực góp chung như tranzito thường chỉ có khác tín hiệu điều khiển là tín hiệu quang.



Hình 4.15.

a- Sơ đồ mắc tranzito quang 3 chân cực để tối ưu các thông số

b- Sơ đồ tương đương của tranzito quang: điôt quang là tiếp xúc gốc- góp.

Về mặt cấu trúc có thể coi tranzito quang như một mạch tích hợp đơn giản gồm một điôt quang làm nhiệm vụ biến đổi tín hiệu quang sang tín hiệu điện và một tranzito có nhiệm vụ khuếch đại

Để có hệ số khuếch đại dòng quang lớn, người ta dùng sơ đồ Dacling- ton đối với các tranzito quang, xem hình 29. Tranzito quang Dacling-ton được chế tạo như chỉ ra trong hình.



a/ Sơ đồ tranzito quang Dacling ton

b/ Sơ đồ tương đương

Hình 4.16. Sơ đồ tranzito quang Darlington

Từ sơ đồ tương đương ta thấy độ nhạy phổ của tranzito quang cũng giống như đối với các điôt quang tương ứng, tuy nhiên vì tranzito quang có khả năng khuếch đại nên độ nhạy của nó cao hơn điôt quang khoảng vài trăm lần. Tần số làm việc của tranzito quang thấp hơn điôt quang. Tranzito quang làm việc với tần số đến vài trăm KHz (khoảng 300KHz, còn sơ đồ Darling- ton chỉ khoảng 30KHz) trong khi điôt quang làm việc đến vài chục MHz.

BPW 21

Features

- *Especially suitable for applications from 350nm to 820nm*
- *Adapted to human eye sensitivity ($V\lambda$)*
- *Hermetically sealed metal package (similar to TO-5)*

Application

- *Exposure meter for daylight*
- *For artificial light of high color temperature in photographic fields and color analysis*



Characteristics ($T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$, standard light A, $T = 2856\text{ K}$) (cont'd)

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Kurzschlußstrom, $E_v = 1000\text{ lx}$ Short-circuit current	I_{SC}	10	μA
Anstiegs- und Abfallzeit des Fotostromes Rise and fall time of the photocurrent $R_L = 1\text{ k}\Omega$; $V_R = 5\text{ V}$; $\lambda = 550\text{ nm}$; $I_p = 10\text{ }\mu\text{A}$	t_r, t_f	1.5	ns
Durchlaßspannung, $I_F = 100\text{ mA}$, $E = 0$ Forward voltage	V_F	1.2	V
Kapazität, $V_R = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$, $E = 0$ Capacitance	C_0	580	pF
Temperaturkoeffizient von V_O Temperature coefficient of V_O	TC_V	- 2.6	mV/K
Temperaturkoeffizient von I_{SC} Temperature coefficient of I_{SC}	TC_I	- 0.05	%/K
Rauschäquivalente Strahlungsleistung Noise equivalent power $V_R = 5\text{ V}$, $\lambda = 550\text{ nm}$	NEP	7.2×10^{-14}	$\frac{\text{W}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
Nachweisgrenze, $V_R = 5\text{ V}$, $\lambda = 550\text{ nm}$ Detection limit	D^*	1×10^{12}	$\frac{\text{cm} \times \sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}}$

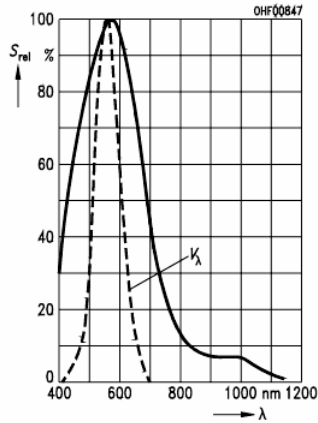
Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Betriebs- und Lagertemperatur Operating and storage temperature range	$T_{op}; T_{stg}$	- 40 ... + 80	°C
Sperrspannung Reverse voltage	V_R	10	V
Verlustleistung, $T_A = 25$ °C Total power dissipation	P_{tot}	250	mW

Kennwerte ($T_A = 25$ °C, Normlicht A, $T = 2856$ K)

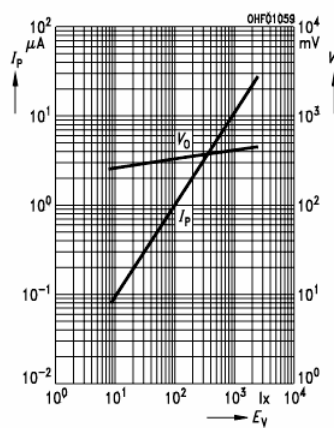
Characteristics ($T_A = 25$ °C, standard light A, $T = 2856$ K)

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Fotoempfindlichkeit, $V_R = 5$ V Spectral sensitivity	S	10 (≥ 5.5)	nA/lx
Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{S\ max}$	550	nm
Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit $S = 10\%$ von S_{max} Spectral range of sensitivity $S = 10\%$ of S_{max}	λ	350 ... 820	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche Radiant sensitive area	A	7.34	mm ²
Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche Dimensions of radiant sensitive area	$L \times B$ $L \times W$	2.73×2.73	mm \times mm
Halbwinkel Half angle	φ	± 55	Grad deg.
Dunkelstrom $V_R = 10$ V Dark current $V_R = 5$ V $V_R = 10$ mV	I_R I_R	2 (≤ 30) 8 (≤ 200)	nA pA
Spektrale Fotoempfindlichkeit, $\lambda = 550$ nm Spectral sensitivity	S_λ	0.34	A/W
Quantenausbeute, $\lambda = 550$ nm Quantum yield	η	0.80	<u>Electrons</u> Photon
Leerlaufspannung, $E_v = 1000$ lx Open-circuit voltage	V_O	400 (≥ 320)	mV

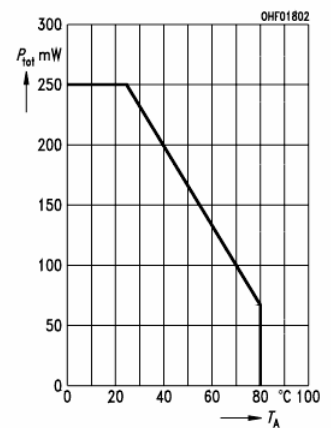
Relative Spectral Sensitivity
 $S_{rel} = f(\lambda)$



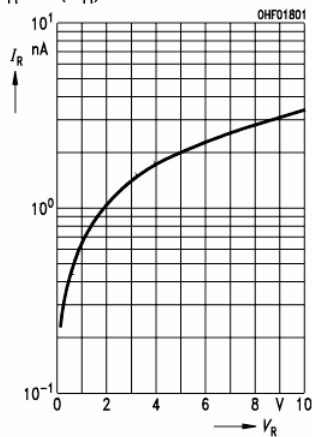
Photocurrent $I_p = f(E_v)$, $V_R = 5$ V
Open-Circuit Voltage $V_O = f(E_v)$



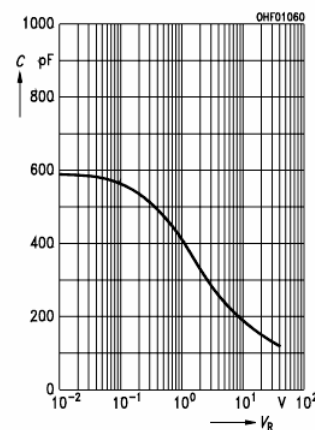
Total Power Dissipation
 $P_{tot} = f(T_A)$



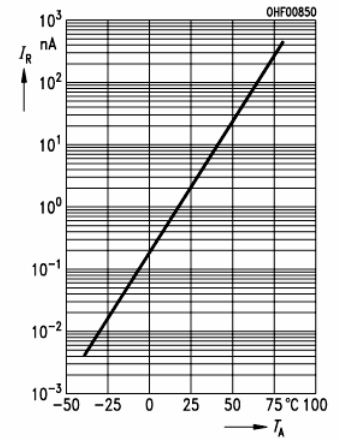
Dark Current
 $I_R = f(V_R)$



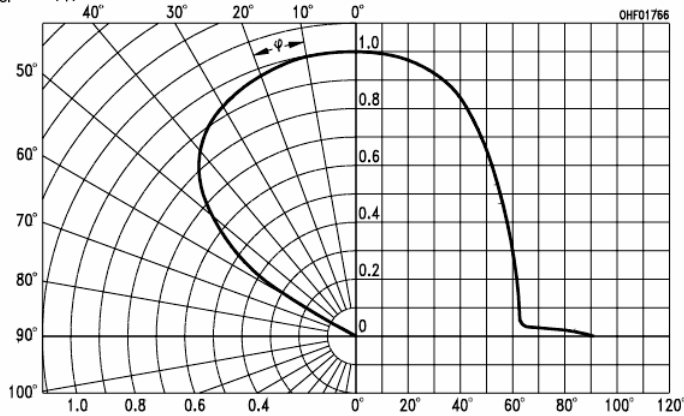
Capacitance
 $C = f(V_R)$, $f = 1$ MHz, $E = 0$



Dark Current
 $I_R = f(T_A)$, $V_R = 5$ V



Directional Characteristics
 $S_{rel} = f(\varphi)$



4.3. Các linh kiện thu quang (hiệu ứng quang điện bên ngoài)

4.3.1. vacuum photodetectors

Dùng hiệu ứng quang điện tạo ra dòng và áp tỷ lệ với mật độ dòng công suất sóng tới.

Độ nhạy cao, đáp ứng nhanh .

Chủ yếu dùng trong phòng thí nghiệm.

1. Nguyên lý

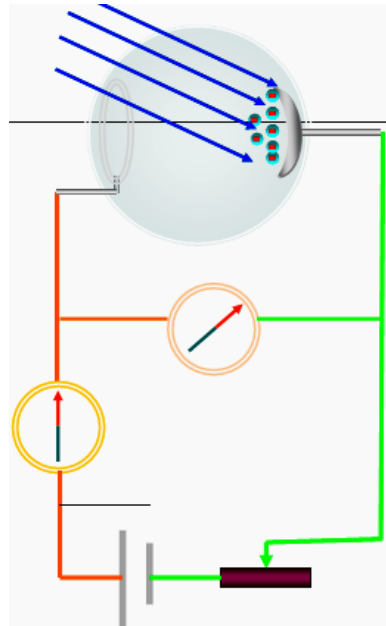
Cathode cấu tạo từ bề mặt kim loại cong có phủ lớp oxide.

Anode: ống mỏng đặt tại tiêu điểm của cathode.

Phát xạ điện tử từ bề mặt cathode đòi hỏi năng lượng photon đến phải đủ để kéo điện tử ra khỏi các lực liên kết của e- với nguyên tử và với bề mặt cathode (do các điện tích dương tạo ra bởi các điện tử rời khỏi bề mặt).

$$E_{kmax} = hf - W$$

- W: công thoát điện tử
- h: hằng số planck
- f: tần số photon



Hình 4.17. vacuum photodetectors

2. Các đặc trưng cơ bản

Stopping voltage thế áp đặt để làm triệt tiêu $E_{k \max}$ độ dẫn = 0

Tần số ngưỡng khi sóng đến có tần số nhỏ hơn tần số ngưỡng sẽ không phát xạ điện tử từ cathode, là tần số ứng với $E_k = 0$.

Đặc trưng thuận

- Tồn tại điện áp “knee voltage” mà trên đó dòng sẽ bão hoà, photodiode hoạt động trong miền này.

- Dòng bão hoà tỷ lệ thuận với mật độ dòng quang tới H.

- Thế stop giống nhau với các mật độ dòng quang tới khác nhau (chỉ là hàm của tần số photon)

Đặc tuyến ra có tải dùng để tính gần đúng dòng qua ống I_T , thế rơi trên ống V_T khi biết tải R và mật độ dòng quang (lm)

Các tính chất cơ bản của vacuum photodetector

1/ Dòng photodiode tăng tuyến tính theo mật độ dòng quang nếu trở tải nhỏ.

2/ Trường hợp lý tưởng, độ nhạy dòng $S_I = \frac{\Delta I}{\Delta F_v} = \text{const.}$ và không phụ thuộc tải

3/ Các mạch thực tế lệch khỏi lý tưởng khi dòng lớn và bé .

4/ Thế anode giảm khi mật độ dòng quang tăng.

5/ Độ nhạy điện áp $S_v = \frac{\Delta V}{\Delta F_v}$ tỷ lệ với trở tải .

6/ Với trở tải R_L nhỏ, độ nhạy điện áp gần không đổi và dòng, thế thay đổi gần tuyến tính theo mật độ dòng quang.

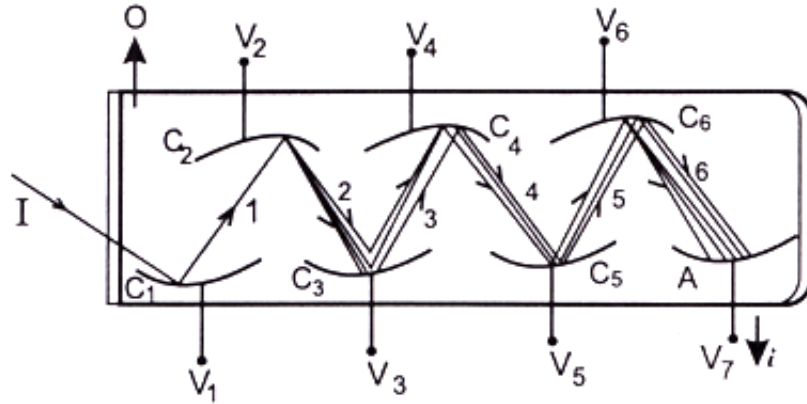
4.3.2. Photomultiplier - Ống nhân quang

Loại đèn điện tử dùng để khuếch đại dòng photon yếu.

Cấu trúc gồm bóng chân không, photocatôt C_1 , các cực trung gian $C_2, C_3...$ (còn gọi là các đinôt) và anôt A.

Dòng photon yếu đập vào photocatôt làm phát xạ dòng electron, giữa các đôi điện cực $C_1C_2, C_2C_3...$ có đặt hiệu thế gia tốc tăng dần, dựa vào hiệu ứng phát xạ thứ cấp của các đinôt, dòng điện tử đến anôt có thể tăng lên $10^5, 10^9$ lần.

Hiện nay có nhiều loại Ống nhân quang khác nhau về cấu tạo catôt quang, phương pháp chiếu sáng, hệ thống các cực phát xạ thứ cấp, hệ thống hội tụ điện tử thứ cấp. Ống nhân quang dùng để khuếch đại những tia sáng yếu, biến thiên nhanh. Được sử dụng trong các hệ truyền hình, truyền ảnh và các ống đếm nhấp nháy



Hình 4.18. Ống nhân quang điện

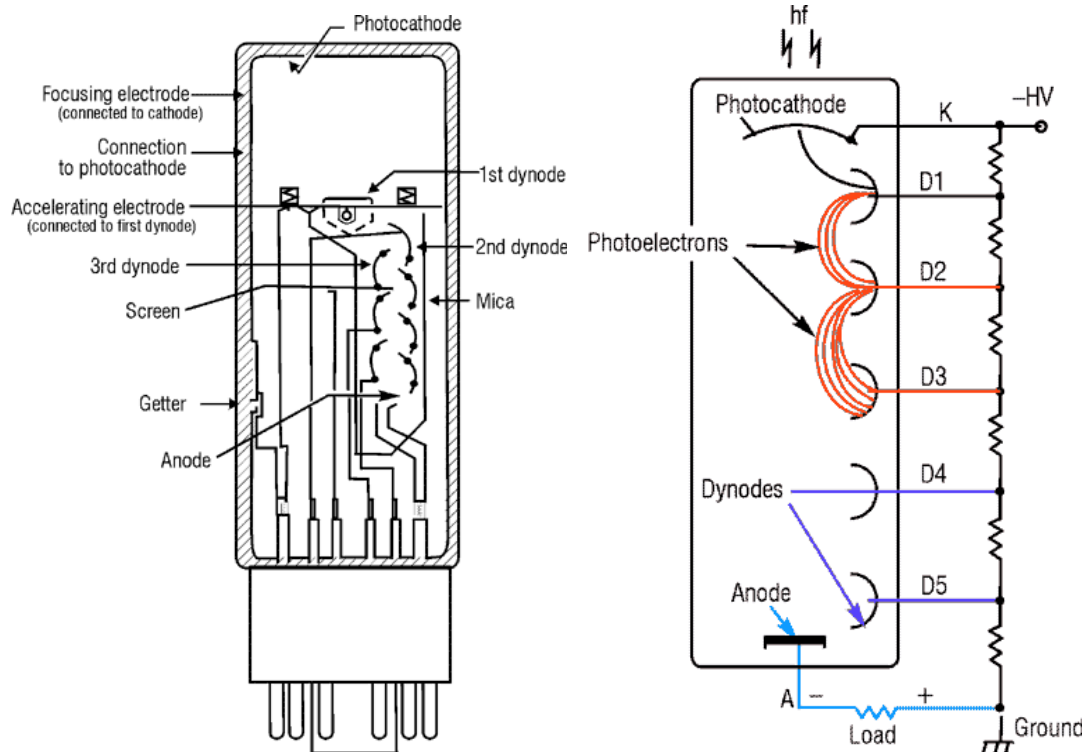
O - Ống chân không;

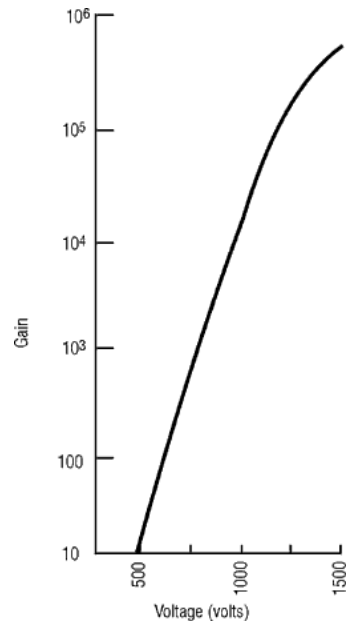
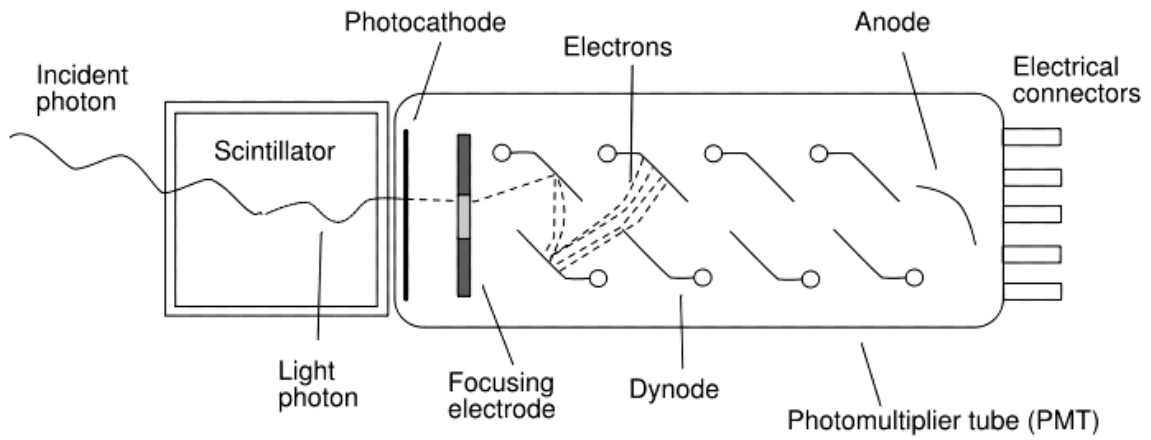
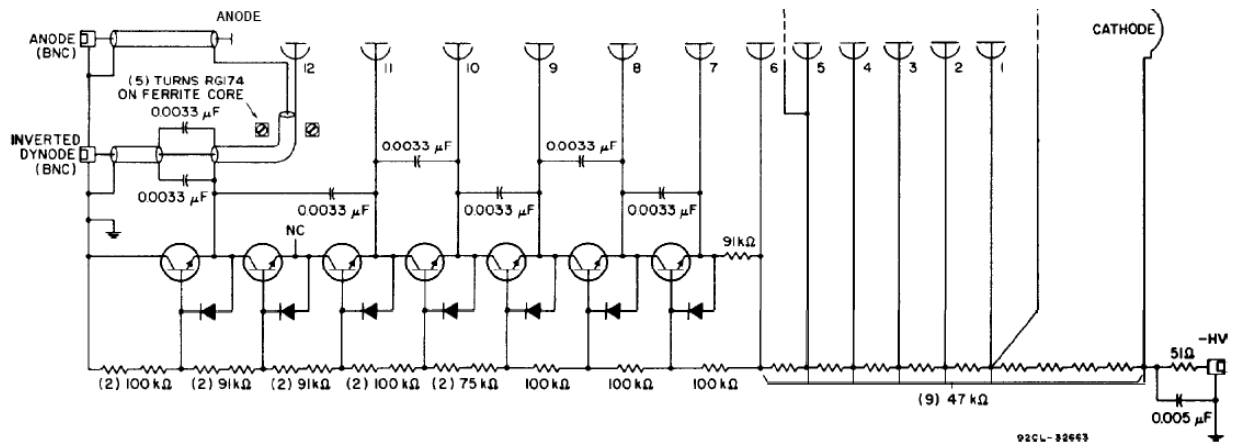
$V_1 < V_2 \dots < V_7$; 1,2,3,4,5,6 – Chùm điện tử;

I - Bức xạ, tia phóng xạ;

$C_1 \dots C_6$ – Catôt. A – Anôt. i – Dòng anôt;

Cặp (C_1, C_2) gọi là đinôt, tương tự như vậy là (C_2, C_3), (C_3, C_4)...





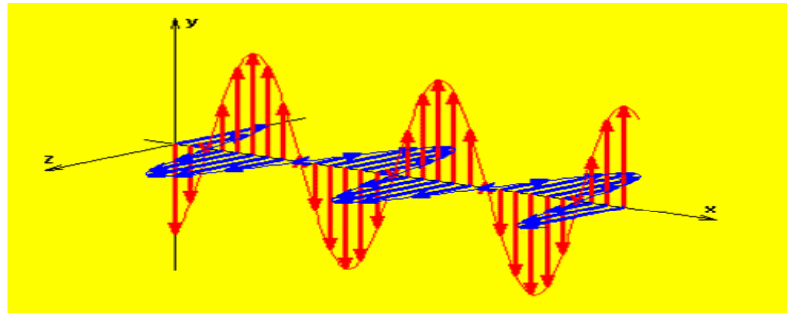
Chương 5

LED-LIGHT EMITTING DIODE

5.1. Nguyên tắc hoạt động và cấu tạo

5.1.1. Hiện tượng phân cực ánh sáng.

Ánh sáng là sóng điện từ có độ dài từ $0.4 \mu\text{m}$ đến $0.75 \mu\text{m}$. Một nguồn sáng như một ngọn đèn, một ngọn lửa gồm vô số các hạt phát ra ánh sáng. Các hạt này là các phân tử, nguyên tử hay ion.



Hình 5.1. Lan truyền sóng điện từ

Các sóng điện từ phát ra bởi các hạt đó có vectơ cường độ điện trường E hướng theo tất cả mọi phương thẳng góc với phương truyền tia sáng. Ánh sáng như vậy được gọi là *ánh sáng tự nhiên*. Vậy ánh sáng tự nhiên được coi là gồm vô số các dao động thẳng, phân bố đều nhau theo tất cả mọi phương thẳng góc với phương truyền của tia sáng. Không có một phương nào được ưu đãi.

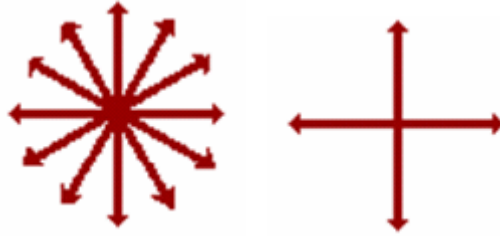
Nếu bằng cách nào đó ta làm mất sự đối xứng này của các phương dao động sáng thì ánh sáng đó được gọi là *ánh sáng phân cực*.

Có thể có ánh sáng phân cực một phần hay ánh sáng phân cực hoàn toàn.

Sự phân cực (Polarization): hiện tượng vector dao động bị giới hạn phương dao động.

Ánh sáng tự nhiên: Vector E dao động theo mọi phương

Ánh sáng phân cực: Phương dao động của vector E không còn tính đối xứng xung quanh phương truyền nữa.



Hình 5.2. Ánh sáng không phân cực hay phân cực một phần

Hiện tượng phân cực do phản xạ

Ánh sáng tự nhiên bị phản xạ qua một bề mặt với một góc thích hợp sẽ bị phân cực.

Định luật Brewster

Để có ánh sáng phân cực hoàn toàn do sự phản xạ trên một bề mặt của một môi trường trong suốt, góc tới i phải có một trị số xác định tùy thuộc vào bản chất của môi trường và được tính bởi công thức

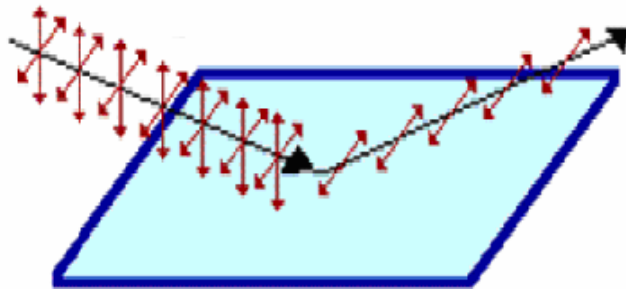
$$\operatorname{tg} i = n$$

n là chiết suất của môi trường

Góc i được gọi là góc Brewster (i_B)

Nếu môi trường tới là thủy tinh có $n = 1,5$

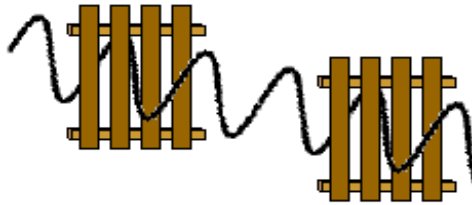
$$\operatorname{tg} i_B = 1,5. \text{ Suy ra } i_B = 57^\circ.$$



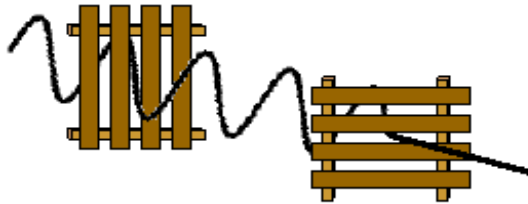
Hình 5.3. Ánh sáng phân cực Brewster

Hiện tượng phân cực do truyền qua môi trường dị hướng

The Picket Fence Analogy



When the pickets of both fences are aligned in the vertical direction, a vertical vibration can make it through both fences.



When the pickets of the second fence are horizontal, vertical vibrations which make it through the first fence will be blocked.

Hình 5.4. *... vòng dị hướng*

(ảnh minh họa)

5.1.2. Mặt chỉ thị tinh thể lỏng (LCD - Liquid Crystal Display)

LCD có những lợi điểm sau

- rất ít tốn điện, khoảng 10Uw
- chữ số hiện rõ ràng dễ đọc ở nơi có nhiều ánh sáng
- cấu trúc phẳng, đẹp, có độ bền cơ học cao
- có thể được điều khiển trực tiếp bằng các linh kiện TTL, hay CMOS
- có thể chỉ thị những dấu hiệu phức tạp

Tuy nhiên, LCD cũng có những bất lợi sau:

- đời sống tương đối ngắn so với LED
- khi trời tối chỉ có thể đọc được với ánh đèn từ bên ngoài hay chiếu từ phía sau
- thời gian tắt và mở tương đối chậm

Với những tính chất như trên, LCD được dùng làm mặt chỉ thị cho đồng hồ, máy tính, máy đo digital, các đồng hồ trong xe hơi, trò chơi trẻ em.... LCD là linh kiện thụ động, nó không phát sáng, càng dễ đọc hơn khi chung quanh càng sáng.

Ngày nay đã có LCD màu. Thời gian tắt mở của LCD loại mới cũng cải tiến nhanh hơn để dùng làm mặt màn hình Tivi, máy tính cá nhân....

Khái niệm

Mặt hiển thị tinh thể lỏng LCD (Liquid Crystal Display) là linh kiện tạo ra ảnh khả kiến nhờ điều khiển sự truyền sáng qua một quá trình phân cực. Các đèn điện phát quang thường được dùng như các nguồn ánh sáng đen cho ứng dụng hiển thị tinh thể lỏng.

Mặt chỉ thị tinh thể lỏng – LCD – không phải là linh kiện bán dẫn quang điện tử. LCD được chế tạo dưới dạng thanh và chấm – ma trận. LCD có tuổi thọ khá cao từ 10000 giờ đến 100 000 giờ và ngày nay nó thay thế dần các mặt chỉ thị loại LED, Plasma hay huỳnh quang.

Vật liệu

Tinh thể lỏng sử dụng trong LCD là những hợp chất hữu cơ. Các phân tử của tinh thể lỏng này được phân bố sao cho các trục dọc của chúng nằm song song với nhau.

Hiệu ứng quang học dùng cho LCD chỉ hạn chế trong khoảng "không đẳng hướng", do vậy dải nhiệt độ làm việc của LCD bị hạn chế và xác định bởi hai điểm nhiệt độ nóng chảy và nhiệt độ trong suốt.

Hiện nay, có nhiều hãng điện tử chế tạo các loại LCD như Hitachi, Sharp, Seiko, Samsung, Hantronic, Optex, Phillip, Powertip,... Thông dụng nhất là LCD của hãng Hitachi

Các LCD trên có khác nhau về

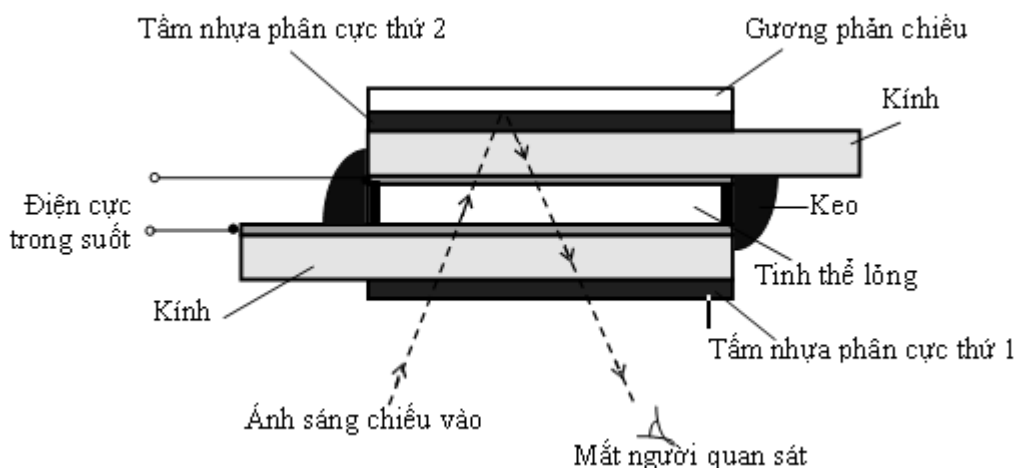
- Kích thước: có loại kích thước nhỏ, trung bình và lớn. Loại kích thước nhỏ cho các thiết bị điện tử số dùng trong gia đình. Loại kích thước trung bình cho các thiết bị điện tử số dùng trong công nghiệp và ti vi. Loại kích thước lớn dành cho màn hình đồ họa và các biển quảng cáo.
- Cách trao đổi tin: song song (cho các thiết bị ở gần) và nối tiếp (cho các thiết bị ở xa)..
- Hiển thị: Chữ/ số hay hình ảnh (đồ họa).

Hãng	Ký hiệu	Ma trận	Công dụng	Loại
Optex	DMC	5x7, 1 hay 2 dòng	Cho thiết bị số	Chữ/số, song song
Sharp	LM	5x7, 1 hay 2 dòng	Cho thiết bị số	Chữ/số, song song
Hitachi	HD 44780	5x7, 1 hay 2 dòng	Cho thiết bị số	Chữ/số, song song
Seiko	KS0066	5x7, 1 hay 2 dòng	Cho thiết bị số	Chữ/số, song song
Hanntronic	LCM1	5x7, 1 hay 2 dòng	Cho thiết bị số	Chữ/số, song song
Matrix Orbital	LCD4021	124x64	Cho quảng cáo	Chữ/số, nối tiếp
Matrix Orbital	LCD4021	240x64	Cho quảng cáo	Chữ/số, nối tiếp
Hanntronic		128x240	Cho quảng cáo	Đồ họa
Hanntronic		240x64	Cho quảng cáo	Đồ họa
Hanntronic		320x240	Cho quảng cáo	Đồ họa
Powertip	NCL	128x64	Cho quảng cáo	Đồ họa
Powertip	NCL	240x128	Cho quảng cáo	Đồ họa

Hình 5.5. Các loại màn hình tinh thể lỏng (LCD)

Cấu tạo của thanh LCD:

Cấu tạo của LCD gồm có 2 tấm kính đặt cách nhau khoảng $10\mu\text{m}$. Mặt phía trong của 2 tấm kính tráng một lớp oxit kẽm (ZnO) trong suốt làm hai điện cực. Xung quanh bên cạnh hai tấm kính được hàn kín, sau đó đổ tinh thể lỏng vào khoảng giữa 2 tấm kính và gắn kín lại. Hai tấm nhựa có tính phân cực ánh sáng được dán bên ngoài hai tấm kính sao cho hình ảnh phản chiếu của mặt chỉ thị được nhìn từ một phía nhờ gương phản chiếu.



Hình 5.6. Cấu tạo của một thanh LCD

Nguyên lý làm việc

Chế độ phản chiếu:

- Khi chưa có điện áp đặt vào, các thanh LCD không làm việc thì ánh sáng sẽ đi qua tấm nhựa phân cực thứ nhất, qua chất tinh thể lỏng, qua tấm nhựa phân cực thứ 2 đến gương phản chiếu và phản chiếu trở về phía người quan sát và thanh LCD không nhìn thấy - Mặt chỉ thị trong suốt.
- Khi có điện áp cung cấp cho thanh LCD, trục dài của các phân tử chất tinh thể lỏng được định hướng theo hướng của điện trường. Như vậy, ánh sáng đi qua tấm nhựa phân cực thứ nhất sẽ bị thay đổi do chất tinh thể đã hoạt hóa, do đó, ánh sáng không thể đi qua tấm phân cực thứ 2 để phản chiếu lại bằng gương phản chiếu. Như thế thanh tinh thể lỏng chịu tác động của điện trường sẽ bị tối đi.

Với 2 màng lọc phân cực 90^0 ta có nền của mặt chỉ thị trong suốt và những chữ, số, dấu hiệu tối đen. Đây là mặt chỉ thị hoạt động ở chế độ phản chiếu.

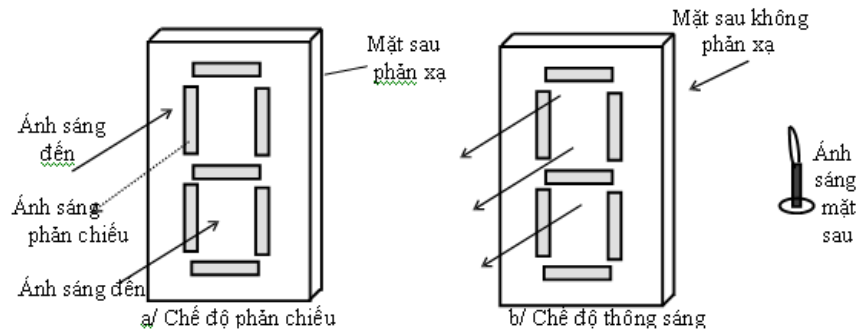
Nhược điểm của chế độ phản chiếu là mặt chỉ thị phải dựa vào một nguồn sáng từ bên ngoài. Nếu không có ánh sáng ngoài hay trong một phòng tối thì mặt chỉ thị sẽ không nhìn thấy.

Chế độ thông sáng:

- Nếu 2 màng lọc phân cực song song thì ta có mặt chỉ thị có nền tối và các chữ, số và dấu hiệu sẽ trong suốt. Loại này thích hợp với việc chiếu sáng từ phía sau mặt chỉ thị và ta gọi là chế độ thông sáng.

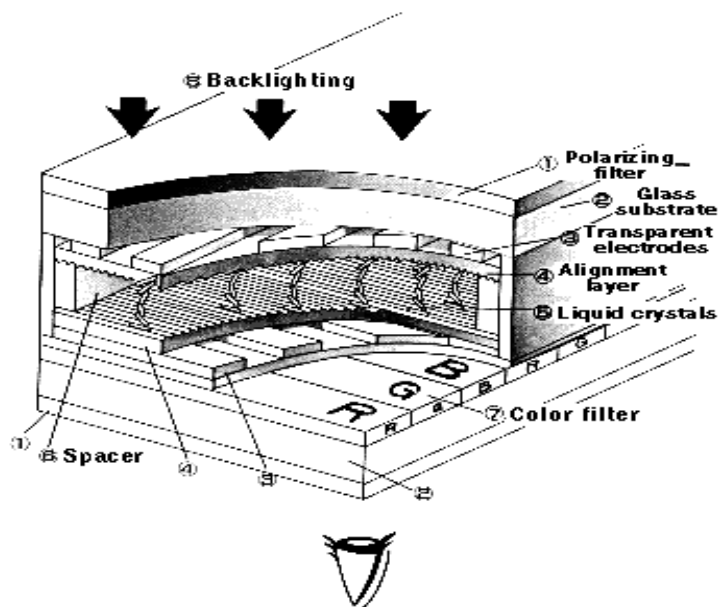
Ở chế độ này, ánh sáng đi qua các phân tử không hoạt hóa nhưng được đưa vào khuôn bằng các thanh hoạt hóa. Vì vậy chữ số đã chọn sẽ nhìn thấy. Để ánh sáng chiếu đều, cần có một tấm kính tán xạ đặt giữa LCD và nguồn sáng.

LCD này dùng điện áp xoay chiều từ 3V đến 8V, thời gian hiện số là 100 msec và thời gian tắt từ 200 msec đến 300 msec.



Hình 5.7. Chế độ làm việc của LCD

Cấu tạo LCD màu



Hình 5.8. Cấu tạo LCD màu

1. **Polarizing filter (Bộ lọc phân cực)** Điều khiển ánh sáng đi vào và thoát ra.
2. **Glass substrate (Hợp chất thủy tinh đặc biệt)** Lọc chặn điện từ các điện cực
3. **Transparent electrodes (Điện cực trong suốt)** Là các thanh dẫn điện trong suốt cho phép ánh sáng xuyên qua.
4. **Alignment layer (Sắp xếp lớp)** Là hai bề mặt có rãnh, ở giữa là các phân tử tinh thể lỏng, Các phân tử được sắp xếp theo hình xoắn ốc 90° .
5. **Liquid crystals (Các tinh thể lỏng).**
6. **Spacer (Khoảng trống)** Duy trì khoảng cách đều giữa các tấm kính.

7. **Color filter (Bộ lọc màu)** Màu được lọc và thể hiện khi dùng các bộ lọc R, G và B.
8. **Backlighting (Ánh sáng phía sau)** Ánh sáng được chiếu từ phía sau màn hình xuyên qua các lớp trên, ở màn hình điện thoại, người ta sử dụng ánh sáng chiếu từ xung quanh sau đó dùng lớp phản xạ để hướng ánh sáng chiếu thẳng góc với màn hình từ sau về phía trước.

Màu được hiển thị nhờ các bộ lọc màu dành cho mỗi thành phần hiển thị, trong hệ thống ma trận điểm, các điểm màu đỏ (R), xanh lá (G), xanh dương (B) nhận được do sử dụng các bộ lọc màu, ba màu cơ bản trên kết hợp lại cho ta một điểm ảnh, mỗi điểm màu sẽ cho một màu có cường độ sáng khác nhau, một điểm ảnh có thể cho vô số màu và là màu tổng hợp được từ ba màu cơ bản trên.

LCD với hiệu ứng trường

Màn ảnh LCD dùng cho máy tính và tivi được chế tạo với kỹ thuật màng mỏng transistor TFT – (thin film transistor) hay kỹ thuật cấu trúc hình sợi chỉ xoắn STN (super twisted nematic)

Với kỹ thuật STN, giữa hai tấm kính là một lớp mỏng chất lỏng hữu cơ đặc biệt có phân tử với kích thước khá dài. Chất lỏng này là tinh thể lỏng dùng để ngắt mở ánh sáng. Với lớp phủ trên hai tấm kính, người ta tạo những khe cực bé với kỹ thuật mài đặc biệt.

Các khe này chạy dọc theo cùng một hướng và được dùng để định hướng các phân tử tinh thể lỏng theo cách cơ học. Các phân tử tinh thể lỏng sắp xếp theo hướng các khe này. Vì những lực giữa các phân tử tác dụng lẫn nhau, các phân tử luôn định hướng theo phân tử kế bên. Sự định hướng này được bắt đầu và tiếp diễn từ các khe cực nhỏ trên tấm kính. Vì hướng của các khe tấm kính trên thẳng góc với hướng các khe của tấm kính dưới, do đó các phân tử bị căng bức theo hai hướng này. Hướng của trục các phân tử theo từng lớp bị làm lệch tuần tự từ tấm kính này sang tấm kính kia. Bên ngoài hai tấm kính được phủ hai màng lọc phân cực chỉ cho ánh sáng xuyên qua theo một mặt phẳng định hướng. Vì định hướng của kính lọc phân cực trùng với hướng của các khe cho mỗi tấm kính, cho nên hai hướng của kính lọc phân cực xoay nhau một góc 90° . Vì rằng mặt phẳng của ánh sáng xuyên qua một kính lọc phân cực sẽ xoay theo hướng của các trục của các phân tử tinh thể lỏng, cho nên mặt phẳng dao động của ánh sáng cũng được xoay đi một góc 90° và như thế ánh sáng có thể xuyên qua kính lọc phân cực thứ hai. Ở trạng thái không có điện áp màn ảnh sẽ trong suốt và cho ánh sáng đi qua.

Dưới tác dụng của điện trường các phân tử tinh thể lỏng định hướng theo chiều điện trường – một đường thẳng. Khi mặt kính được phủ một lớp dẫn điện và được dùng như điện cực, khi có điện áp, các phân tử xoay đi và nằm theo trục thẳng góc với hai tấm kính.

Như thế mặt phẳng ánh sáng không bị xoay, hai kính lọc có chiều phân cực thẳng góc nhau sẽ không cho ánh sáng xuyên qua. Ở điểm nào trên hai tấm kính có sự chồng lấp hai điện cực, ở đây cho ta một điểm tối theo hình thù và độ lớn của sự chồng lấp của hai điện cực. Trong những màn ảnh LCD, điện cực là các phân đoạn hay những điểm của một ma trận. Cho màn ảnh LCD màu, trước mỗi điểm ảnh là một kính lọc màu. Ba điểm màu đỏ, xanh lá cây, xanh da trời tạo nên một điểm ảnh màu.

Như thế một màn ảnh LCD màu với cùng độ phân giải như màn ảnh một màu có số điểm Pixel nhiều gấp 3 lần.

Các màn ảnh LCD hiện nay đều cần được chiếu sáng từ phía sau bởi các đèn huỳnh quang, tấm dẫn quang, sợi dẫn quang bằng chất dẻo hay màng nhựa điện phát quang.

Để cho ánh sáng chiếu đều, cần có 1 tấm kính tán xạ đặt giữa LCD và nguồn sáng. Chỉ có khoảng 3% đến 5% ánh sáng đến mắt người xem. 50% ánh sáng bị hấp thụ bởi kính lọc phân cực và 30% bởi kính lọc màu. Hãng 3M đã chế tạo một màng nhựa. trên đây có hàng triệu lăng kính cực nhỏ đưa ánh sáng từ nguồn sáng chiếu thẳng góc với màn ảnh. Điều này rất quan trọng cho các thiết bị cầm tay cần tiết kiệm điện. Màn ảnh LCD nêu trên là loại thụ động STN. Nó được điều khiển bởi một ma trận hai chiều gồm các đường dẫn điện trong suốt. Ở các vị trí cắt nhau của các đường dẫn điện trên hai tấm kính cho ta một điểm ảnh. Ma trận được vận động theo phương pháp quét cho nên vận tốc chậm. Nếu hình ảnh thay đổi nhanh, những bóng hình ảnh sẽ được tạo ra. Để tránh những nhược điểm này, loại màn ảnh LCD tích cực TFT được phát triển. Mỗi điểm ảnh là một transistor riêng biệt trên một trong hai tấm kính được tạo nên với kỹ thuật màng mỏng. Với kỹ thuật này người ta đạt độ phân giải cao, hình ảnh có thể thay đổi nhanh hơn và với điện trường cao hơn cho ta hình ảnh có độ tương phản rõ nét hơn.

Với kỹ thuật TFT có hàng triệu transistor được hình thành trên tấm kính.

Một trong những nhược điểm của màn ảnh LCD là góc nhìn khá bé (15 đến 40 grad, vòng tròn = 400 grad = 360⁰). Với kỹ thuật IPS (in – Plane Switching – Mode) hay Super – TFT ta đạt góc nhìn đến 140 grad. Với kỹ thuật này 2 điện cực và transistor cho một điểm ảnh được chế tạo trên cùng một tấm kính. Điện trường được hình thành không ở giữa hai tấm kính mà giữa hai điện cực trên cùng một tấm kính. Nếu không có điện cực các phân tử nằm song song với các khe cực nhỏ trên mặt tấm kính. Sự xoay theo hình xoắn ốc của các phân tử trong tinh thể lỏng không được tạo ra theo phương pháp mới này. Vì màng lọc phân cực có định hướng 90⁰ cho nên khi không có điện áp điểm ảnh tối đi.

Khi có điện áp, các phân tử tinh thể lỏng vẫn nằm song song với mặt kính nhưng xoay đi một góc 90⁰ trong mặt phẳng nằm ngang vì điện trường

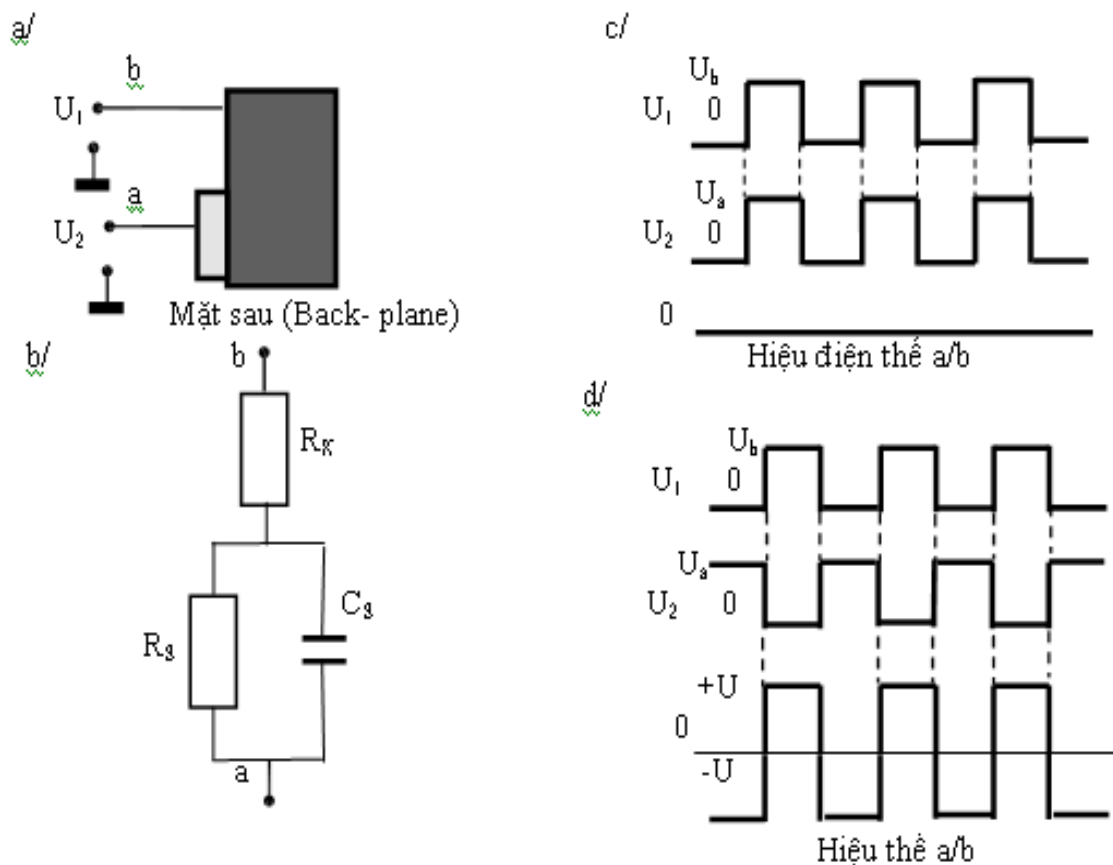
giữa hai điện cực nằm thẳng góc với các khe trên tấm kính. Điện trường càng lớn, sự xoay các phân tử càng mạnh và ánh sáng lọt qua càng nhiều.

5.2. Mạch điện điều khiển LCD

Phân đoạn tinh thể lỏng và mạch điện tương đương của nó được mô tả trong hình 8- 21a,b. Trong hình vẽ có

- a: là điện cực của một phân đoạn
- b: là điện cực chung.
- R_K : là điện trở của các vật liệu giữa nguồn điện và phân đoạn tinh thể lỏng (khoảng vài $K\Omega$).
- R_S : là điện trở của tinh thể lỏng (khoảng vài $M\Omega$)
- C_S : là điện dung giữa hai cực điện của một phân đoạn tinh thể lỏng. (khoảng từ $100pF \rightarrow 200pF$, $300pF$ cho LCD loại lớn).

Điện dung C_S không gây ảnh hưởng ở tần số làm việc từ 30 Hz đến 150 Hz, hoặc 200 Hz.



Hình 5.9. Mạch điện điều khiển LCD

a- Phân đoạn LCD với các chân điện cực.

b- Mạch điện tương đương của một phân đoạn LCD.

c- Hai điện cực a và b có điện áp cùng pha.

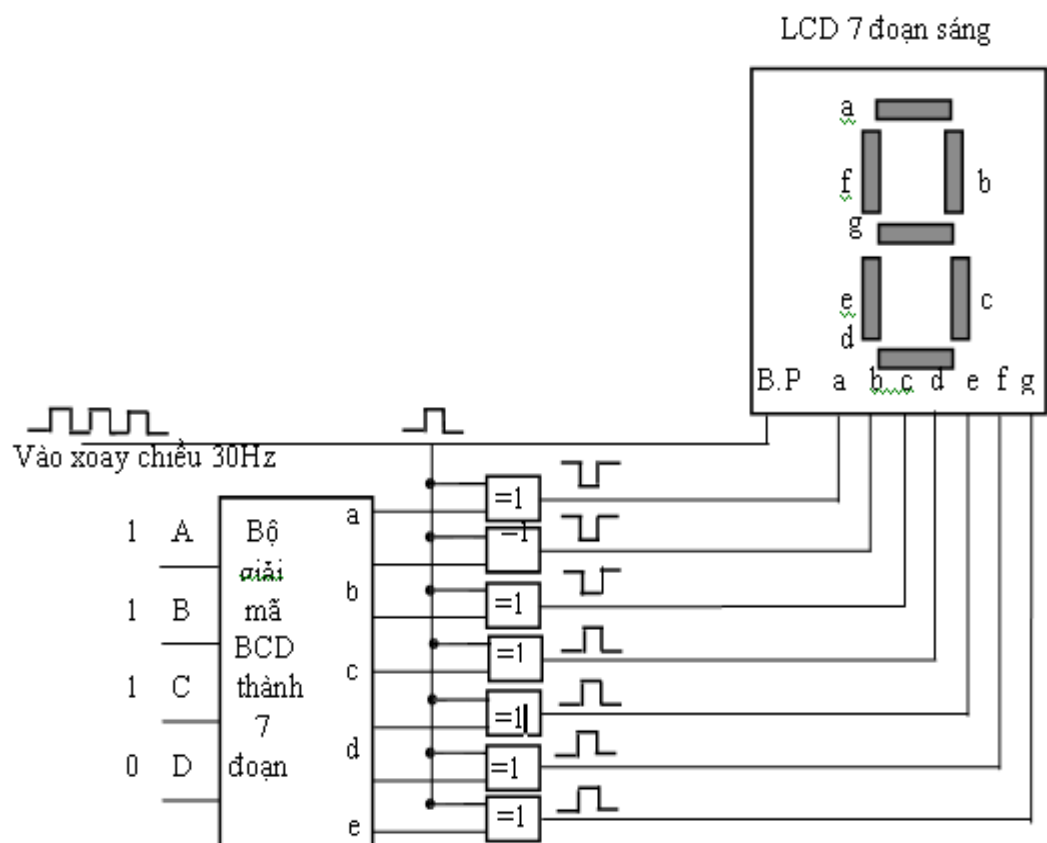
d- Hai điện cực a và b có điện áp ngược nhau.

Với các tần số < 30 Hz các chữ số bị chậm chạp; và với tần số > 100 Hz và với điện áp khá cao các phân đoạn không có điện áp cũng bị chậm chạp. Để hạn chế hiện tượng này, các phân đoạn không sử dụng phải nối với điện cực mặt sau (Back -plane).

Trong hình (c) cho ta thấy, khi điện áp trên hai điện cực a và b của phân đoạn LCD cùng pha thì hiệu thế của phân đoạn là 0V nên nó không có kích hoạt.

Trong hình (d) Khi hai điện cực a và b có điện áp ngược nhau thì hiệu thế giữa điện cực a và điện cực b là một điện áp xoay chiều với biên độ bằng $2U_b$ và phân đoạn LCD được kích thích hoạt động.

Như đã biết, để LCD làm việc ta cần một điện áp xoay chiều không có lần điện áp một chiều. Với điện áp một chiều lớn, màng điện cực trong suốt từ chất Indium/ oxit kẽm bị khử thành Indium/kẽm. Màng điện cực sẽ tối đi và LCD bị mù.



Hình 5.10. Hoạt động của LCD với bộ giải mã 7 đoạn sáng và cổng X-OR (CMOS).

LCD thông thường, yêu cầu điện áp một chiều lần vào phải < 100 mV; còn LCD màu yêu cầu điện áp một chiều lần vào phải < 50 mV. Do vậy, ta

nên dùng mạch điều khiển với IC họ CMOS sẽ cho ta một điện áp ít méo nhất. Vì LCD có công suất thấp nên dùng các cổng CMOS điều khiển là tốt nhất. Hình trên mô tả hoạt động của mặt chỉ thị LCD 7 đoạn với bộ giải mã BCD thành 7 đoạn.

Theo như hình trên, một phân đoạn trên mặt chỉ thị LCD sẽ trở nên đen nếu nó ngược pha với B.P.(điện cực Back plane); nó sẽ trở nên trong suốt nếu điện áp trên nó cùng pha với điện áp trên B.P.

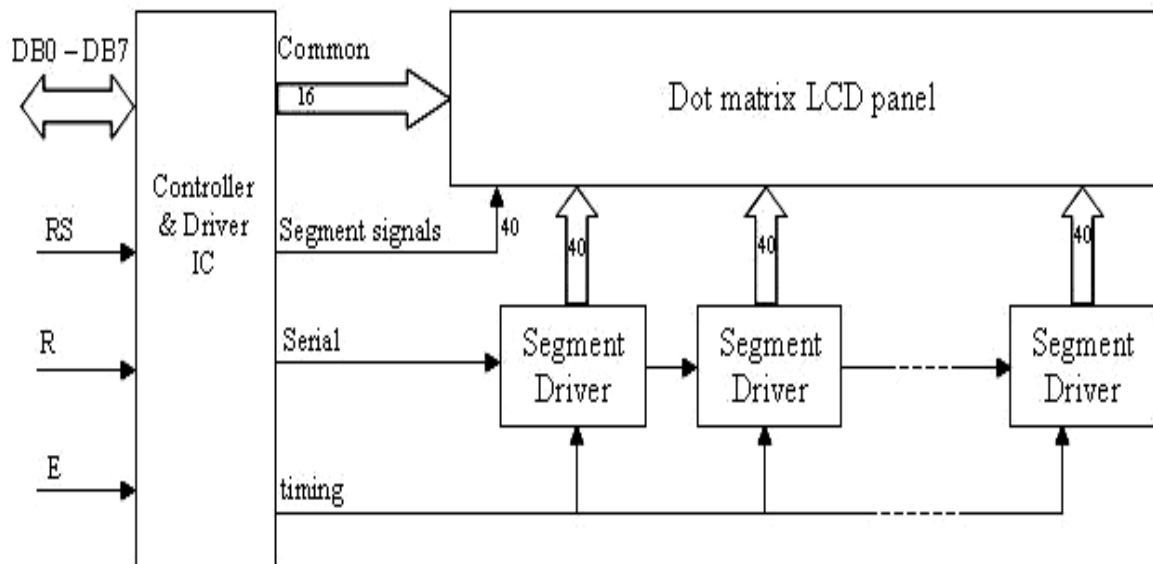
e. Các tham số chính của LCD:

Tham số	Đơn vị	min	Loại tiêu chuẩn	max
Khoảng nhiệt độ làm việc	$^{\circ}\text{C}$	- 10		+60
Khoảng nhiệt độ dự trữ	$^{\circ}\text{C}$	- 25		+70
Điện áp làm việc	V_{T8}	3	4,5	6
Thành phần dc	mV			100
Tần số điều khiển	Hz	30		200
Dòng tiêu thụ năng lượng	nA/mm^2		15	30
Thời gian lên	ms		40	
Thời gian tắt	ms		80	
Thời gian lên + thời gian tắt	ms			250

Hình 5.11. Bảng tham số của LCD.

- Thời gian lên: Thời gian lúc có tín hiệu đến khi LCD hiển thị
- Thời gian xuống: Thời gian từ lúc không còn tín hiệu đến khi LCD không còn hiển thị

Nguyên tắc điều khiển hiển thị LCD



Hình 5.12. Sơ đồ khối nguyên tắc điều khiển hiển thị LCD

Các LCD của các hãng khác nhau nhưng đều có một cấu trúc và tính năng thống nhất về hệ lệnh và cách lập trình

Sơ đồ khối

Trên hình ta thấy LCD có sơ đồ khối gồm

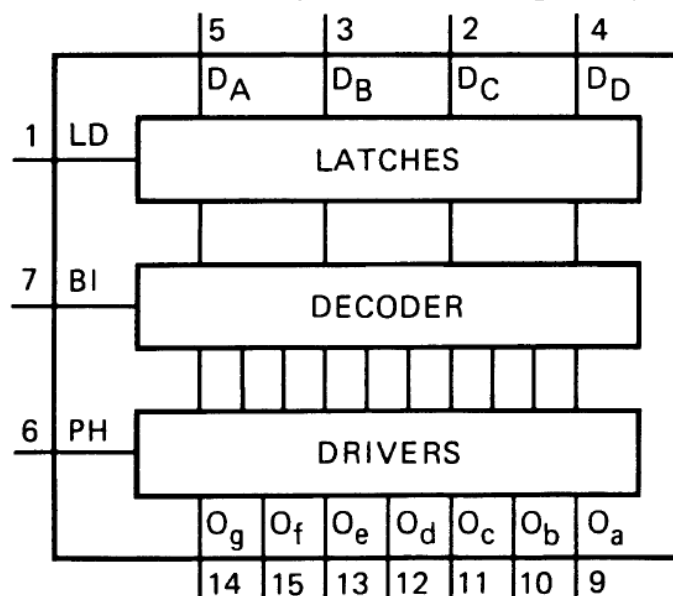
- Màn hình tinh thể lỏng ma trận điểm (dot matrix LCD panel).
- Vi mạch điều khiển (controller & driver IC).
- Các bộ điều khiển các đoạn (segment driver).

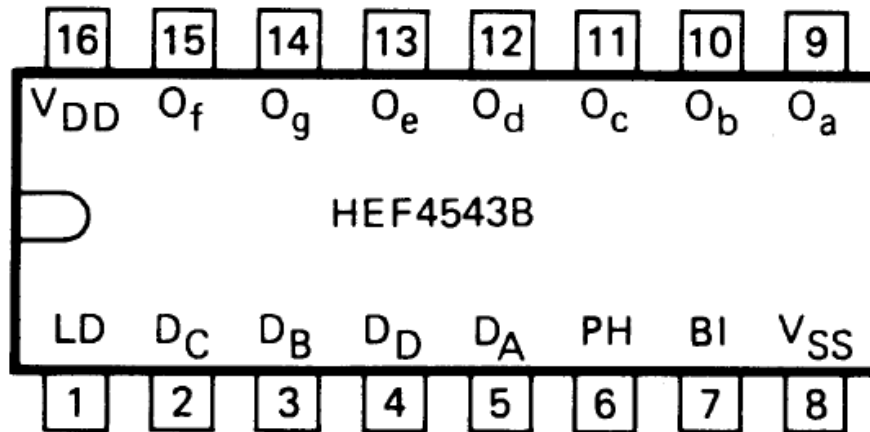
Segment driver dùng IC 4543

BCD to 7-segment latch/decoder/driver HEF4543B

DESCRIPTION

The HEF4543B is a BCD to 7-segment latch/decoder/driver for liquid crystal and LED displays. It has four address inputs (DA to DD), an active HIGH latch disable input (LD), an active HIGH blanking input (BI), an active HIGH phase input (PH) and seven buffered segment outputs (Oa to Og). The circuit provides the function of a 4-bit storage latch and an 8-4-2-1 BCD to 7-segment decoder/driver. It can invert the logic levels of the output combination. The phase (PH), blanking (BI) and latch disable (LD) inputs are used to reverse the function table phase, blank the display and store a BCD code, respectively. For liquid crystal displays a square-wave is applied to PH and the electrical common back-plane of the display. The outputs of the device are directly connected to the segments of the liquid crystal.





FUNCTION TABLE

Notes

1. H = HIGH state (the more positive voltage)
2. L = LOW state (the less positive voltage)
3. X = state is immaterial
4. For liquid crystal displays, apply a square-wave to PH.
For common cathode LED displays, select PH = LOW.
For common anode LED displays, select PH = HIGH.
5. Depends upon the BCD-code previously applied when LD = HIGH.

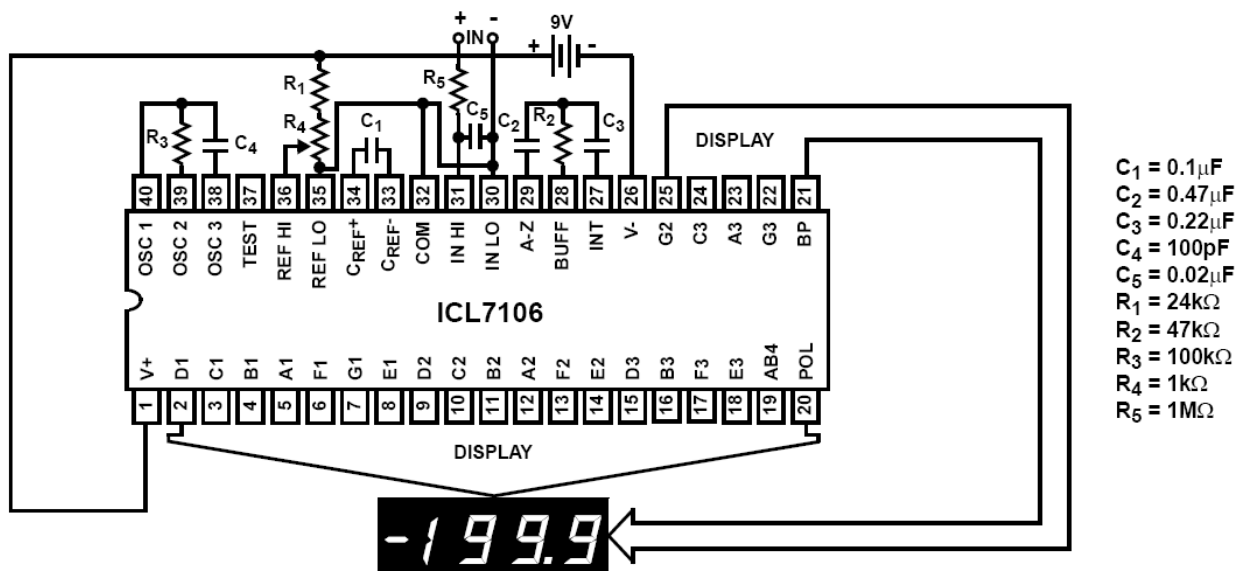
FUNCTION TABLE

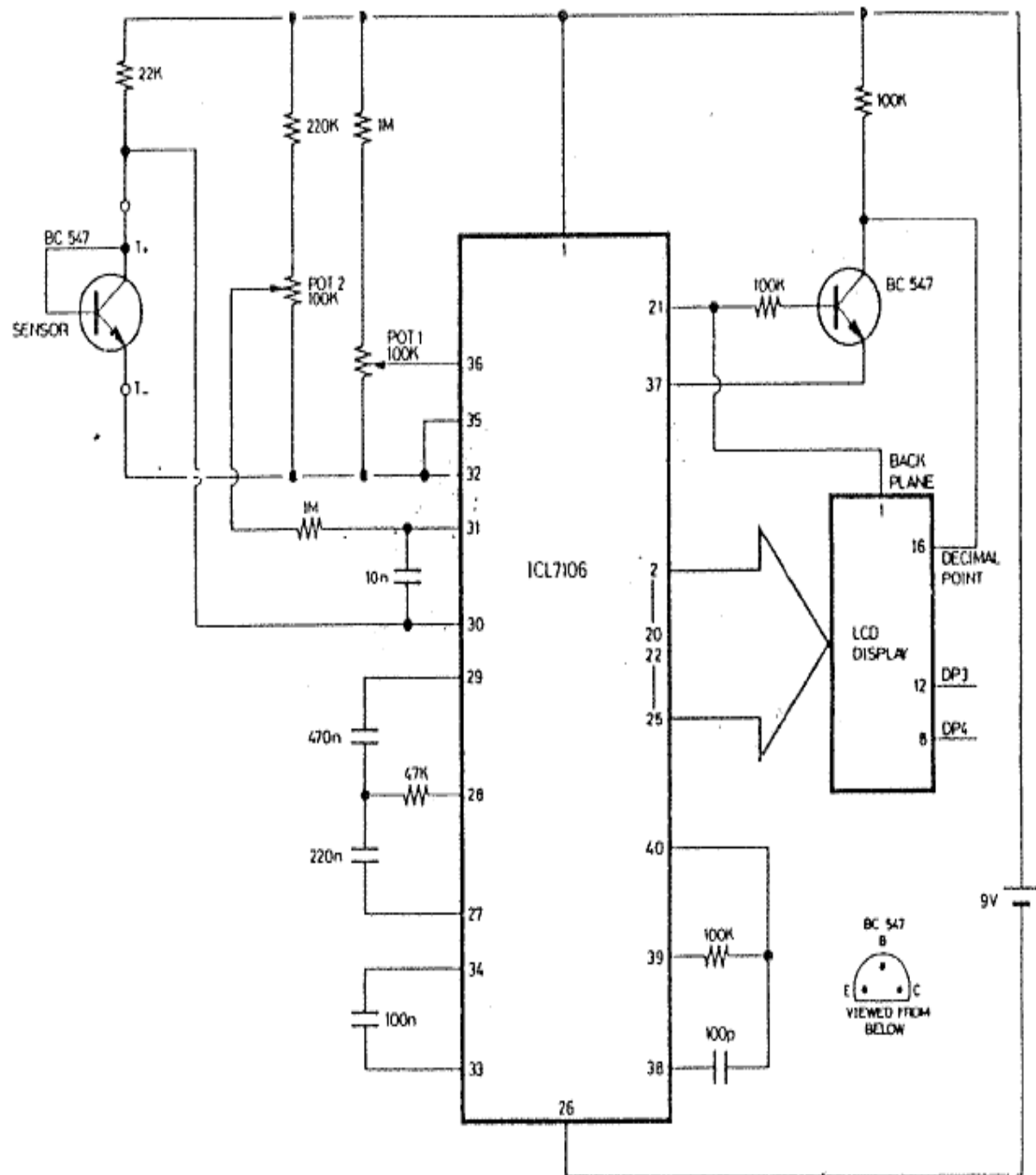
INPUTS							OUTPUTS							
LD	BI	PH ⁽⁴⁾	D _D	D _C	D _B	D _A	O _a	O _b	O _c	O _d	O _e	O _f	O _g	DISPLAY
X	H	L	X	X	X	X	L	L	L	L	L	L	L	blank
H	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	L	0
H	L	L	L	L	L	H	L	H	H	L	L	L	L	1
H	L	L	L	L	H	L	H	H	L	H	H	L	H	2
H	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	L	L	H	3
H	L	L	L	H	L	L	L	H	H	L	L	H	H	4
H	L	L	L	H	L	H	H	L	H	H	L	H	H	5
H	L	L	L	H	H	L	H	L	H	H	H	H	H	6
H	L	L	L	H	H	H	H	H	H	L	L	L	L	7
H	L	L	H	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	8
H	L	L	H	L	L	H	H	H	H	H	L	H	H	9
H	L	L	H	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	blank
H	L	L	H	L	H	H	L	L	L	L	L	L	L	blank
H	L	L	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	blank
H	L	L	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	blank
H	L	L	H	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	blank
L	L	L	X	X	X	X	(5)							(5)
as above		H	as above				inverse of above							as above

5.3. *Hiển thị số đo số liệu dạng tương tự dùng IC 7106*

ICL7106, ICL7107, ICL7107S
3 1/2 Digit, LCD/LED Display, A/D
Converters

The Intersil ICL7106 and ICL7107 are high performance, low power, 3 1/2 digit A/D converters. Included are seven segment decoders, display drivers, a reference, and a clock. The ICL7106 is designed to interface with a liquid crystal display (LCD) and includes a multiplexed backplane drive; the ICL7107 will directly drive an instrument size light emitting diode (LED) display. The ICL7106 and ICL7107 bring together a combination of high accuracy, versatility, and true economy. It features autozero to less than 10 μ V, zero drift of less than 1 μ V/oC, input bias current of 10pA (Max), and rollover error of less than one count. True differential inputs and reference are useful in all systems, but give the designer an uncommon advantage when measuring load cells, strain gauges and other bridge type transducers. Finally, the true economy of single power supply operation (ICL7106), enables a high performance panel meter to be built with the addition of only 10 passive components and a display.





Chương 6

LINH KIỆN CỦA HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG

6.1. Hệ thống truyền dẫn quang.

Sơ đồ khối của các hệ thống thông tin

Sơ đồ khối cơ bản nhất của hệ thống thông tin điện và quang được mô tả trên hình 8-1a,b. Trong hình :

Nguồn tín hiệu: là các dạng thông tin thông thường như tiếng nói, hình ảnh, số liệu, văn bản...

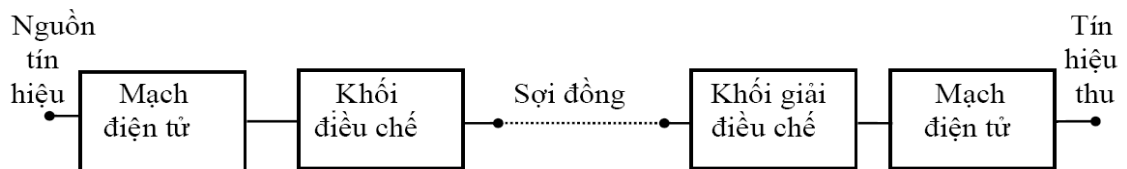
Mạch điện tử : có nhiệm vụ xử lý nguồn thông tin để tạo ra các tín hiệu điện dưới dạng analog hoặc digital.

Khối E/O: là mạch biến đổi điện - quang có nhiệm vụ điều biến tín hiệu điện thành cường độ bức xạ ánh sáng để phát đi (biến đổi tín hiệu điện thành tín hiệu quang).

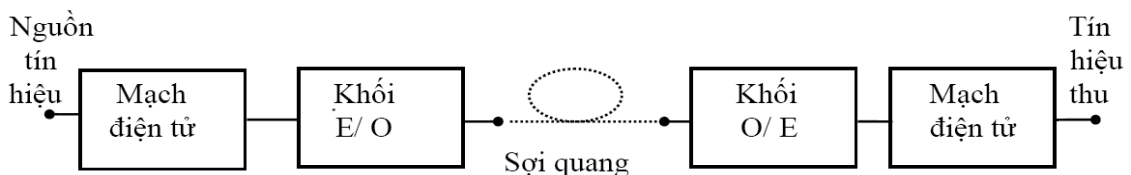
Sợi quang có nhiệm vụ truyền dẫn tín hiệu quang từ nơi phát đến nơi thu.

Khối O/E : mạch biến đổi quang - điện còn gọi là bộ thu quang có nhiệm vụ tiếp nhận ánh sáng từ sợi quang đưa đến và biến đổi trở lại thành tín hiệu điện như tín hiệu điện đã phát đi.

Tải tin : Trong hệ thống điện thì tải tin là các sóng điện từ cao tần, trong hệ thống quang tải tin là ánh sáng và cũng là sóng điện từ song có tần số rất cao ($10^{14} \div 10^{15}$ Hz) do vậy tải tin quang rất thuận lợi cho tải các tín hiệu băng rộng.



a. Hệ thống thông tin điện



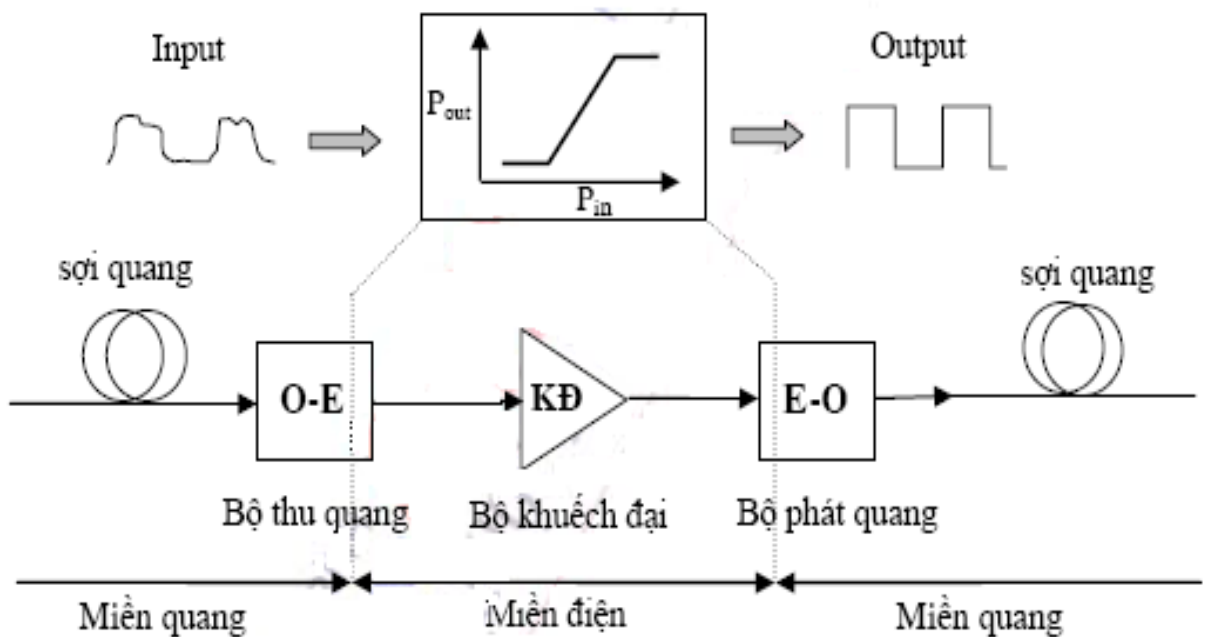
b. Hệ thống thông tin quang

Hình 6.1. Hệ thống truyền dẫn quang.

Trạm lặp quang điện (optoelectronic repeater)

Suy hao của sợi quang là nguyên nhân giới hạn cự ly truyền của các hệ thống thông tin quang. Đối với các hệ thống truyền dẫn quang cự ly dài, giới hạn về suy hao được khắc phục bằng cách sử dụng các trạm lặp quang điện (optoelectronic repeater). Trong các trạm lặp quang điện này (xem hình 1.1), quá trình khuếch đại tín hiệu quang được thực hiện qua nhiều bước. Đầu tiên, tín hiệu quang sẽ được biến đổi thành dòng điện bởi các bộ thu quang (optical receiver) sử dụng linh kiện tách sóng quang như PIN hay APD. Dòng quang điện thu được sẽ được tái tạo lại dạng xung, định thời và khuếch đại bởi các mạch phục hồi tín hiệu và mạch khuếch đại. Sau đó, tín hiệu điện sẽ được biến đổi thành tín hiệu quang thông qua các nguồn quang trong bộ phát quang (optical transmitter) và được truyền đi trong sợi quang.

Như vậy, quá trình khuếch đại tín hiệu được thực hiện trên miền điện.



Hình 6.2. Cấu trúc của một trạm lặp quang điện (optoelectronic repeater)

Các trạm lặp quang điện đã được sử dụng phổ biến trong các hệ thống truyền dẫn quang một bước sóng như hệ thống truyền dẫn quang SDH. Tuy nhiên, khi sử dụng cho các hệ thống truyền dẫn quang đa bước sóng như hệ thống WDM, rất nhiều trạm lặp quang điện cần được sử dụng để khuếch đại và tái tạo các kênh quang có bước sóng khác nhau. Điều này làm tăng độ phức tạp cũng như tăng giá thành của hệ thống truyền dẫn quang WDM.

Ưu điểm của hệ thống truyền dẫn quang

So với hệ thống thông tin điện, hệ thống thông tin quang có một số ưu điểm sau:

- + Sợi quang nhỏ, nhẹ hơn dây kim loại, dễ uốn cong, tốn ít vật liệu.
- + Sợi quang chế tạo từ thủy tinh thạch anh không bị ảnh hưởng của nước, axit, kiềm nên không bị ăn mòn. Đồng thời, sợi là chất điện môi nên cách điện hoàn toàn, tín hiệu truyền trong sợi quang không bị ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài tới và cũng không gây nhiễu ra môi trường xung quanh.
- + Đảm bảo bí mật thông tin, không sợ bị nghe trộm.
- + Khả năng truyền được rất nhiều kênh trong một sợi quang có đường kính rất nhỏ. Tiêu hao nhỏ và không phụ thuộc tần số nên cho phép truyền dẫn băng rộng và tốc độ truyền lớn hơn nhiều so với sợi kim loại.
- + Giá thành rất rẻ.

8.2. Khái niệm về kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng -WDM.

Sự tương tác giữa ánh sáng và vật chất.

Như đã biết, theo lý thuyết dải năng lượng của vật chất, thì thông thường các hạt đều tồn tại ở mức cơ bản (E_k) vì mức này có năng lượng thấp nhất nên cũng bền vững nhất. Chỉ cần kích thích một năng lượng nào đó, ví dụ như quang năng, điện năng, nhiệt năng... thì các hạt ở mức cơ bản sẽ di chuyển lên mức năng lượng cao hơn, gọi là các mức kích thích (E_i). Các hạt chỉ tồn tại ở các mức kích thích một thời gian rất ngắn khoảng 10^{-8} giây rồi nó lại dịch chuyển về các mức năng lượng thấp hơn và phát ra ánh sáng, hay còn gọi là các photon. Photon phát ra theo định luật bảo toàn năng lượng:

$$h\nu = E_i - E_k$$

và ta có tần số bức xạ của ánh sáng tính theo công thức

$$\nu = \frac{E_i - E_k}{h}$$

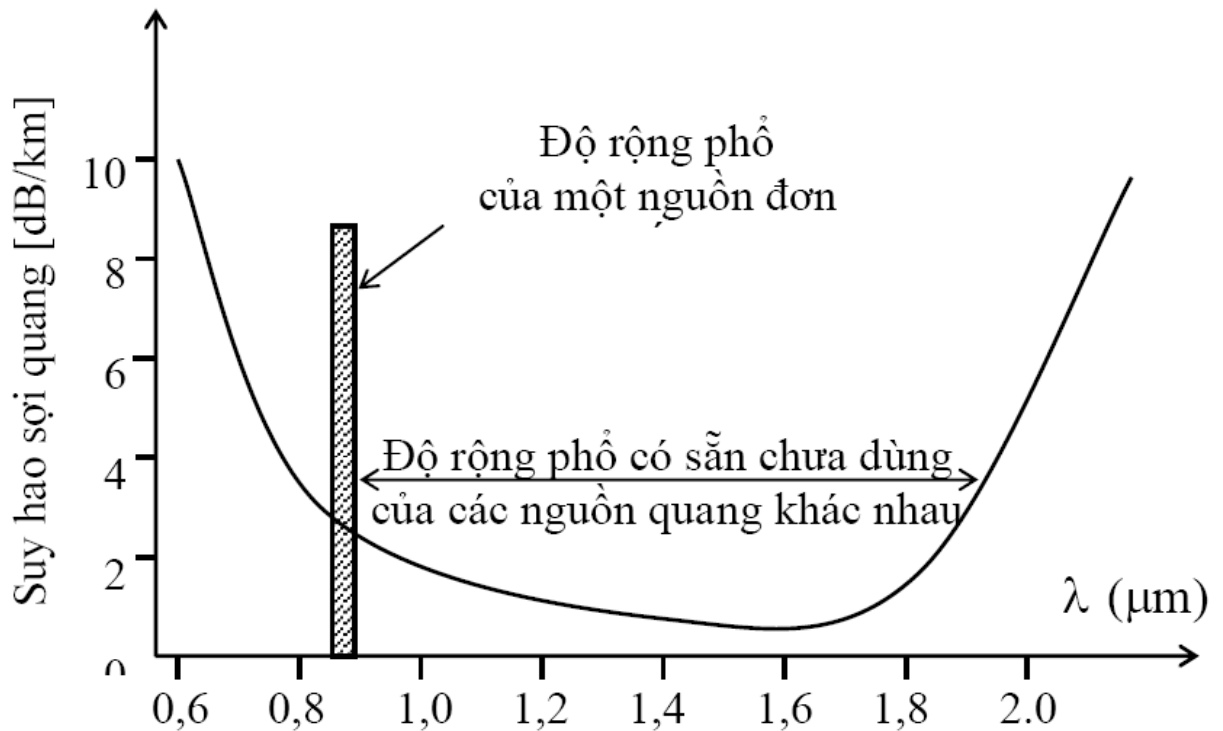
trong đó

- ν - tần số bức xạ của ánh sáng ($\nu = c/\lambda$).
- h - hằng số Plank ($h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} = 4,16 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$).
- c - vận tốc của ánh sáng ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).
- λ - độ dài bước sóng của bức xạ ánh sáng phát ra.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c}{\frac{E_i - E_k}{h}} = \frac{1240}{(E_i - E_k)} \left[\frac{\text{eV.nm}}{\text{eV}} \right] = \frac{1240}{E_G} \left[\frac{\text{eV.nm}}{\text{eV}} \right]$$

Khái niệm về kỹ thuật thông tin quang WDM.

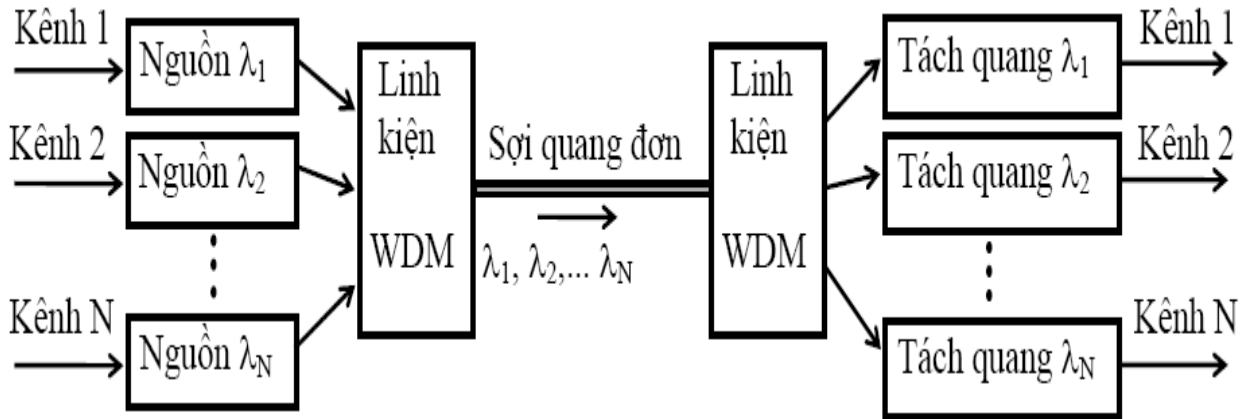
Bộ lọc quang liên quan đến kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng -WDM. Vì mỗi một nguồn sáng đơn sắc có độ rộng phổ hẹp, nên trong truyền dẫn nó chỉ sử dụng một phần rất nhỏ băng truyền dẫn của một sợi quang. Ghép kênh phân chia theo bước sóng sẽ tạo ra rất nhiều kênh phổ sử dụng đồng thời.



Hình 6.3. Một nguồn quang đơn sử dụng một phần rất nhỏ băng truyền dẫn của phổ có sẵn của sợi quang ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM) tạo ra rất nhiều kênh phổ sử dụng đồng thời.

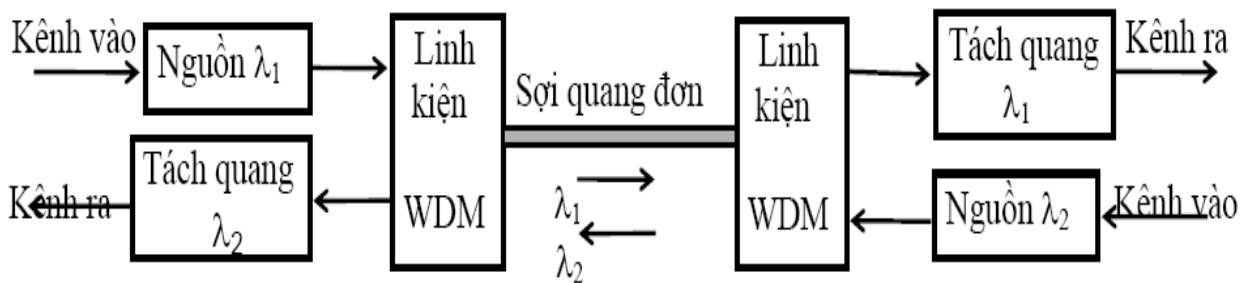
Ta thấy có rất nhiều vùng hoạt động phổ có thể thêm vào. Một cách lý tưởng, sự tăng đột biến dung lượng thông tin của một sợi quang có thể đạt được bằng việc truyền dẫn đồng thời các tín hiệu quang trên cùng một sợi quang từ nhiều nguồn ánh sáng khác nhau có các bước sóng định bức xạ đặt cách nhau một cách chính xác. Bởi mỗi nguồn sáng hoạt động tại một bước sóng định khác nhau, tính toàn vẹn của các tín tức độc lập từ mỗi nguồn được duy trì để việc chuyển đổi tuần tự sang tín hiệu điện ở đầu thu. Đây là cơ sở của ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM).

Hai cơ cấu WDM khác nhau mô tả trong hình sau.



Hình 6.4. Hệ thống WDM đơn hướng kết hợp N tín hiệu độc lập để truyền trên 1 sợi quang đơn.

Trong hình trên, linh kiện WDM đơn hướng được sử dụng để kết hợp các bước sóng mang tín hiệu khác nhau trên một sợi quang đơn tại một đầu và để tách chúng vào bộ tách quang thích hợp tại đầu kia.



Hình 6.5. Hệ thống WDM hai hướng, trong đó, hai bước sóng hoặc nhiều hơn được truyền đồng thời trong các hướng ngược nhau trên cùng một sợi quang.

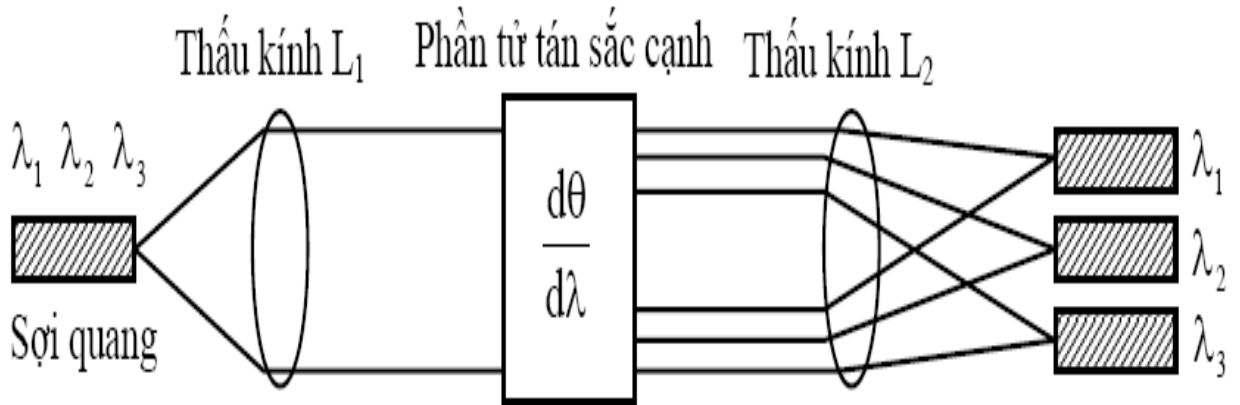
Sơ đồ hệ thống WDM hai hướng được mô tả trong hình trên.

Sơ đồ này gồm việc gửi tin tức trong một hướng tại một bước sóng λ_1 và đồng thời trong hướng ngược lại tại bước sóng λ_2 .

Trong các hệ thống thông tin quang trong hai hình trên, các bộ ghép kênh phân chia theo bước sóng có hai loại được sử dụng rộng rãi nhất là các linh kiện tán sắc cạnh như các lăng kính hoặc các cách tử, và các bộ lọc màng mỏng hoặc các linh kiện tích hợp quang đơn một.

Bộ lọc quang bằng các linh kiện tán sắc (hay bộ ghép kênh tán sắc cạnh).

Sơ đồ của một bộ ghép kênh tán sắc cạnh được mô tả trong hình 8- 51 đối với hệ thống 3 bước sóng sử dụng, ở đó $d\theta / d\lambda$ là độ tán sắc cạnh của linh kiện.



Hình 6.6. Sơ đồ biểu diễn một phần tử WDM tán sắc cạnh cho 3 bước sóng. Nhiều bước sóng có thể kết hợp hoặc phân chia với loại linh kiện này.

Khi linh kiện sử dụng như một bộ phận kênh, ánh sáng từ sợi quang đi ra được chuẩn trực bằng thấu kính L1 (gọi là thấu kính chuẩn trực) và đi qua phần tử tán sắc cạnh và nó được phân chia thành các kênh có bước sóng đi vào các chùm tia có định hướng không gian khác nhau. Thấu kính L2 (thấu kính hội tụ) sẽ hội tụ các tia đầu ra vào các sợi quang thu thích hợp hoặc các bộ tách quang thích hợp.

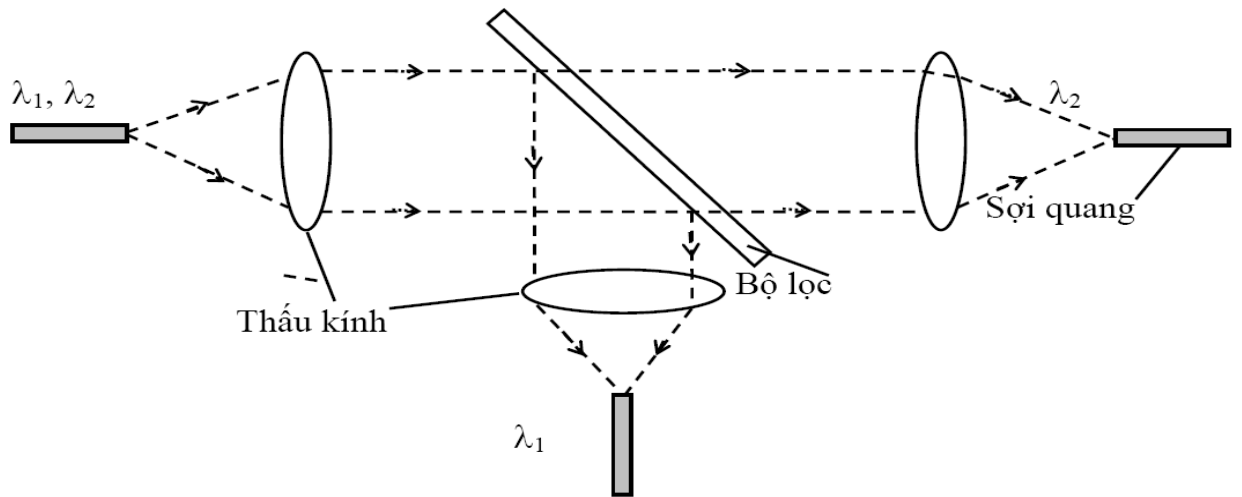
8.5.3. Bộ lọc quang màng mỏng .

Trong phần này chúng ta sẽ nghiên cứu về bộ lọc quang màng mỏng. Hoạt động của một phần tử ghép kênh loại bộ lọc được mô tả trong hình 8- 52 cho hoạt động của hai bước sóng.

Các bộ lọc được thiết kế để truyền ánh sáng cho một bước sóng cụ thể và để hoặc hấp thụ, hoặc phản xạ tất cả các bước sóng khác.

Các bộ lọc loại phản xạ thường được sử dụng vì tổn hao của các bộ lọc loại hấp thụ có xu hướng tăng cao hơn (cao hơn 1dB).

Bộ lọc phản xạ gồm một tấm kính phẳng, bên trên nó nhiều lớp màng mỏng chất cách điện khác nhau được lắng đọng tùy theo tính chọn lọc của bước sóng. Các bộ lọc này có thể sử dụng nối tiếp thành chuỗi để phân chia thêm các kênh bước sóng. Sự phức tạp cũng tăng theo số lượng các bộ lọc nối tiếp và sự tăng tổn hao tín hiệu cũng xảy ra với việc tăng thêm các bộ ghép kênh nối tiếp. Nhìn chung chỉ nên hạn chế hoạt động đến 2 hoặc 3 bộ lọc (có nghĩa là hoạt động 3 hoặc 4 kênh).

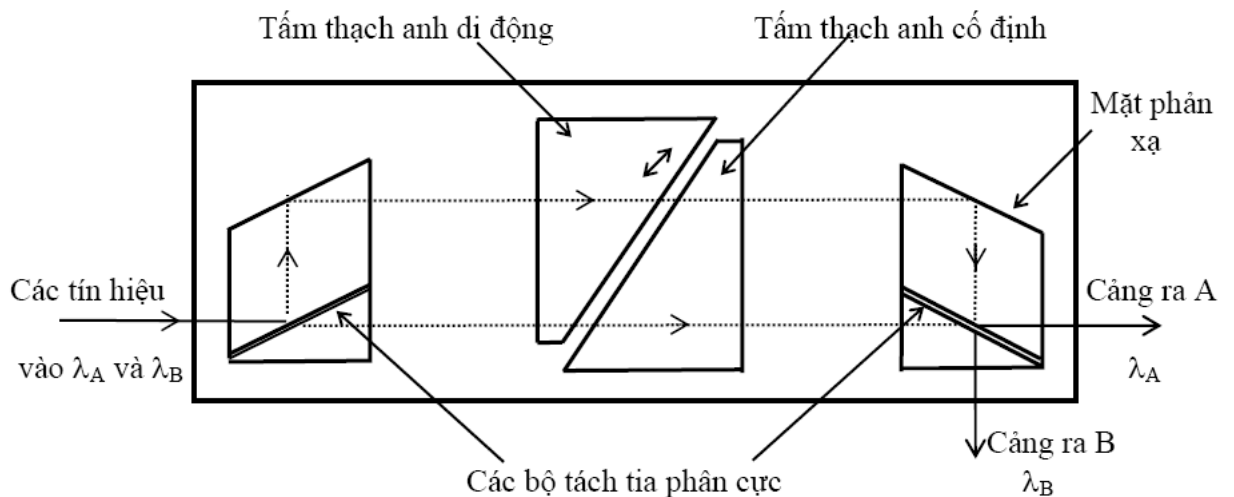


Hình 6.7. Bộ lọc màng mỏng nhiều lớp phản xạ sử dụng cho WDM.

Linh kiện này trong suốt tại bước sóng λ_2 và phản xạ tại bước sóng λ_1 .

Trong thiết kế các hệ thống WDM, cần phải chú ý làm giảm đến mức thấp nhất các yếu tố gây ra sự giảm sút phẩm chất ngoài biên của đường truyền. Trên đây là các linh kiện WDM thụ động, độ chọn lọc bước sóng của chúng được cố định. Người ta cũng phát minh ra các phần tử WDM tích cực, các phần tử này được chuyển một cách tích cực hoặc được điều chỉnh theo bước sóng. Giữa các phần tử WDM tích cực là nguồn đa bước sóng và các tổ hợp tách quang, các laser có khả năng điều chỉnh bước sóng, và các bộ lọc có thể điều chỉnh bước sóng.

Bộ lọc có thể điều chỉnh bước sóng (a wavelength-tunable-filter).



Hình 6.8. Ví dụ về bộ lọc điều chỉnh bước sóng. Một tấm thạch anh di động thay đổi độ dài tuyến đường đi qua tinh thể để thay đổi phổ ra hình sin.

Trong phương pháp này, các tín hiệu tin tức khác nhau được gửi vào các kênh tần số riêng của độ rộng băng B. Bằng việc sử dụng một bộ lọc với

dải thông có độ rộng B mà nó có thể điều chỉnh trên khoảng tần số của các kênh này, người ta có thể chọn được kênh theo yêu cầu.

Ở đây, một phần tử đa cấp lưỡng chiết suất cấu tạo từ hai ống dẫn sóng bằng thạch anh (a birefringent multiple - order element) được đặt giữa hai bộ tách tia phân cực (polarizing beam splitters).

Công suất ra P của ánh sáng tại các cổng ra A và B liên hệ với công suất vào P₀ bằng công thức

$$P = \frac{P_0}{2} \left(1 \pm \cos \frac{2\pi\Delta n L}{\lambda} \right)$$

Trong đó:

- Δn : độ chênh lệch giữa chiết suất thông thường và chiết suất khác thường của vật liệu lưỡng chiết.

- λ : độ dài bước sóng.

- dấu \pm liên quan đến các cổng A (dấu +) và cổng B (dấu -).

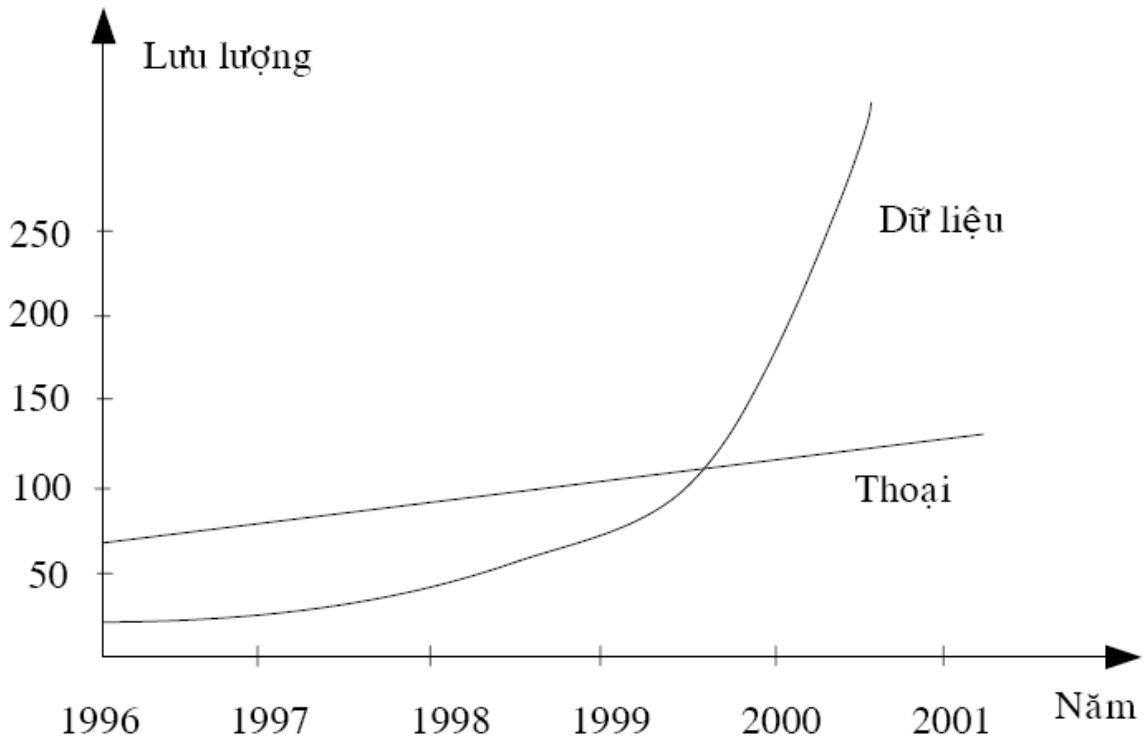
Sự biến đổi hình sin của phổ ra có thể được thay đổi bằng cách thay đổi độ dài đường truyền L đi qua tinh thể. Điều này đạt được bằng cách di chuyển một trong các tấm thạch anh lên trên hoặc xuống dưới. Sự thay đổi chiều dài theo cấp bậc chu kỳ quay phân cực sẽ xác định vị trí của kênh.

Vì tuyến quang là thuận nghịch, linh kiện này có thể được sử dụng như là bộ ghép kênh và hoặc như là bộ phân kênh đều được.

6.3. Nguyên lý ghép kênh theo bước sóng quang (WDM)

6.3.1. Giới thiệu chung

Sự phát triển nhanh chóng của các mô hình truyền số liệu, đặc biệt là Internet đã làm bùng nổ nhu cầu tăng băng thông. Trong bối cảnh IP (Internet Protocol) đang nổi lên như là nền tảng chung của mọi loại hình dịch vụ trong tương lai, các nhà cung cấp dịch vụ truyền dẫn bắt buộc phải xem xét lại phương thức truyền dẫn TDM truyền thống, vốn tối ưu cho truyền thoại nhưng lại kém hiệu quả trong việc tận dụng băng thông.



Hình 6.9. Tương quan giữa nhu cầu truyền thoại và truyền số liệu

Tóm lại, ta phải giải quyết bài toán tăng băng thông cho viễn thông tương lai. Các nhà cung cấp dịch vụ truyền dẫn bắt đầu xét đến ba phương thức truyền dẫn sau:

1. Truyền dẫn ghép phân không gian SDM (Space Division Multiplexing): đơn giản và không cần sự phát triển công nghệ, chỉ đơn thuần là tăng số lượng sợi quang, tốc độ truyền dẫn vẫn giữ nguyên. Ta có thể chọn SDM nếu trên tuyến truyền dẫn cần tăng băng thông đã có sẵn số lượng sợi quang chưa dùng và khoảng cách tuyến truyền dẫn là đủ ngắn để không cần dùng các bộ lặp, bộ khuếch đại. Nếu khoảng cách là xa, khi đó chi phí sẽ vụt tăng do mỗi hệ thống lắp thêm đều cần một số lượng bộ lặp, bộ khuếch đại... như hệ thống cũ.

2. Truyền dẫn ghép phân theo thời gian TDM (Time Division Multiplexing):

Tăng tốc độ truyền dẫn lên trên sợi quang. Khi tiếp tục dùng phương thức truyền thống này, ta phải xem xét đến hai vấn đề:

Trước và khi truyền trên sợi quang. Trước khi chuyển thành tín hiệu quang để truyền đi, các linh kiện điện tử có khả năng xử lý với tốc độ bit tối đa là bao nhiêu?

Thực tế hiện nay cho thấy, ở đa số các mạng truyền dẫn, linh kiện điện tử có khả năng đáp ứng tốt đối với các dòng tín hiệu ở tốc độ 2.5 Gbps hoặc 10 Gbps. Như vậy thì chưa giải quyết trọn vẹn bài toán tăng băng thông.

Trong phòng thí nghiệm đã cho các linh kiện hoạt động ở tốc độ 40 Gbps hoặc 80 Gbps. Để TDM có thể đạt được những tốc độ cao hơn, các phương pháp thực hiện tách/ghép kênh trong miền quang, được gọi là phân kênh thời gian trong miền quang (Optical time Division Multiplexing - OTDM) đang được tích cực triển khai.

Các kết quả nghiên cứu trong phòng thí nghiệm cho thấy OTDM có thể ghép được các luồng 10Gbit/s thành luồng 250Gbit/s. Nhưng khi đó, truyền trên sợi quang sẽ vấp phải các vấn đề nghiêm trọng ảnh hưởng đến chất lượng truyền dẫn: tán sắc sắc thể, tán sắc phân cực, phi tuyến tính.

3. Ghép phân theo bước sóng WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Ghép thêm nhiều bước sóng để có thể truyền trên một sợi quang, không cần tăng tốc độ truyền dẫn trên một bước sóng. Công nghệ WDM có thể mang đến giải pháp hoàn thiện nhất trong điều kiện công nghệ hiện tại.

Thứ nhất nó vẫn giữ tốc độ xử lý của các linh kiện điện tử ở mức 10 Gbps, bảo đảm thích hợp với sợi quang hiện tại. Thay vào đó, công nghệ WDM tăng băng thông bằng cách tận dụng cửa sổ làm việc của sợi quang trong khoảng bước sóng 1260 nm đến 1675 nm. Khoảng bước sóng này được chia làm nhiều băng sóng hoạt động như minh họa trên bảng 1.1.

Thoạt tiên, hệ thống WDM hoạt động ở băng C (do EDFA hoạt động trong khoảng băng sóng này). Về sau, EDFA có khả năng hoạt động ở cả băng C và băng L nên hệ thống WDM hiện tại dùng EDFA có thể hoạt động ở cả băng C và băng L.

Nếu theo chuẩn ITU-T, xét khoảng cách giữa các kênh bước sóng là 100 GHz (đảm bảo khả năng chống xuyên nhiễu kênh trong điều kiện công nghệ hiện tại), sẽ có 32 kênh bước sóng hoạt động trên mỗi băng. Như vậy, nếu vẫn giữ nguyên tốc độ bit trên mỗi kênh truyền, dùng công nghệ WDM cũng đủ làm tăng băng thông truyền trên một sợi quang lên 64 lần

Bảng 1.1 Sự phân chia các băng sóng

Băng sóng	Mô tả	Phạm vi bước sóng (nm)
Băng O	Original	1260 đến 1360
Băng E	Extended	1360 đến 1460
Băng S	Short	1460 đến 1530
Băng C	Conventional	1530 đến 1565
Băng L	Long	1565 đến 1625
Băng U	Ultra-long	1625 đến 1675

6.3.2. Sơ đồ khối tổng quát

a) Định nghĩa

Ghép kênh theo bước sóng WDM (Wavelength Division Multiplexing) là công nghệ “trong một sợi quang đồng thời truyền dẫn nhiều bước sóng tín hiệu quang”. Ở đầu phát, nhiều tín hiệu quang có bước sóng khác nhau được tổ hợp lại (ghép kênh) để truyền đi trên một sợi quang. Ở đầu thu, tín hiệu tổ hợp đó được phân giải ra (tách kênh), khôi phục lại tín hiệu gốc rồi đưa vào các đầu cuối khác nhau.

b) Sơ đồ chức năng

Để đảm bảo việc truyền nhận nhiều bước sóng trên một sợi quang, hệ thống WDM phải thực hiện các chức năng sau:

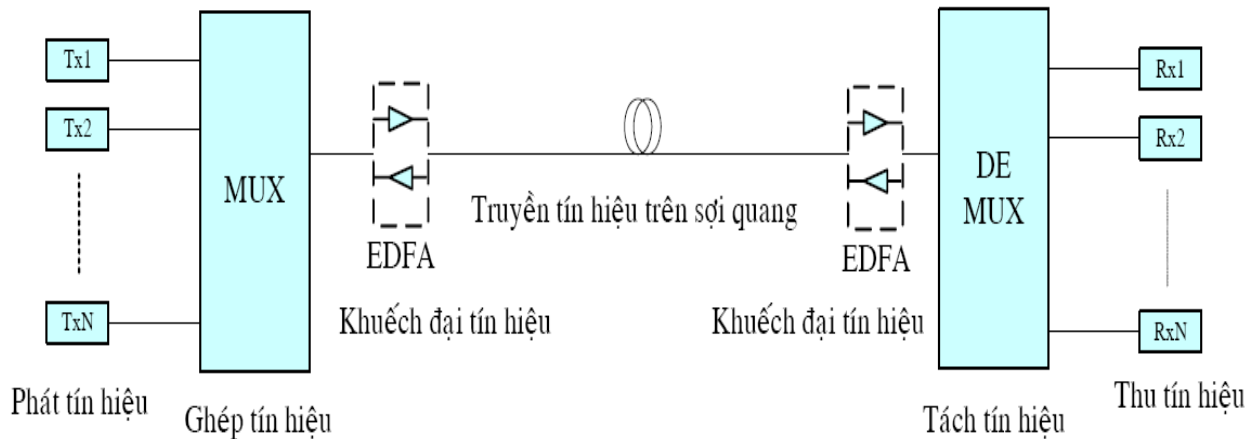
Phát tín hiệu

Trong hệ thống WDM, nguồn phát quang được dùng là laser. Hiện tại đã có một số loại nguồn phát như: Laser điều chỉnh được bước sóng (Tunable Laser), Laser đa bước sóng (Multiwavelength Laser)... Yêu cầu đối với nguồn phát laser là phải có độ rộng phổ hẹp, bước sóng phát ra ổn định, mức công suất phát đỉnh, bước sóng trung tâm, độ rộng phổ.

Ghép/tách tín hiệu

Ghép tín hiệu WDM là sự kết hợp một số nguồn sáng khác nhau thành một luồng tín hiệu ánh sáng tổng hợp để truyền dẫn qua sợi quang. Tách tín hiệu WDM là sự phân chia luồng ánh sáng tổng hợp đó thành các tín hiệu ánh sáng riêng rẽ tại mỗi cổng đầu ra bộ tách. Hiện tại đã có các bộ tách/ghép tín hiệu WDM như: bộ lọc màng mỏng điện môi, cách tử Bragg sợi, cách tử nhiễu xạ, linh kiện quang tổ hợp AWG, bộ lọc Fabry-Perot...

Khi xét đến các bộ tách/ghép WDM, ta phải xét các tham số như: khoảng cách giữa các kênh, độ rộng băng tần của các kênh bước sóng, bước sóng trung tâm của kênh, mức xuyên âm giữa các kênh, tính đồng đều của kênh, suy hao xen, suy hao phản xạ Bragg, xuyên âm đầu gần đầu xa...



Hình 6.10. Sơ đồ chức năng hệ thống WDM

Truyền dẫn tín hiệu

Quá trình truyền dẫn tín hiệu trong sợi quang chịu sự ảnh hưởng của nhiều yếu tố: suy hao sợi quang, tán sắc, các hiệu ứng phi tuyến, vấn đề liên quan đến khuếch đại tín hiệu ... Mỗi vấn đề kể trên đều phụ thuộc rất nhiều vào yếu tố sợi quang (loại sợi quang, chất lượng sợi...)

Khuếch đại tín hiệu

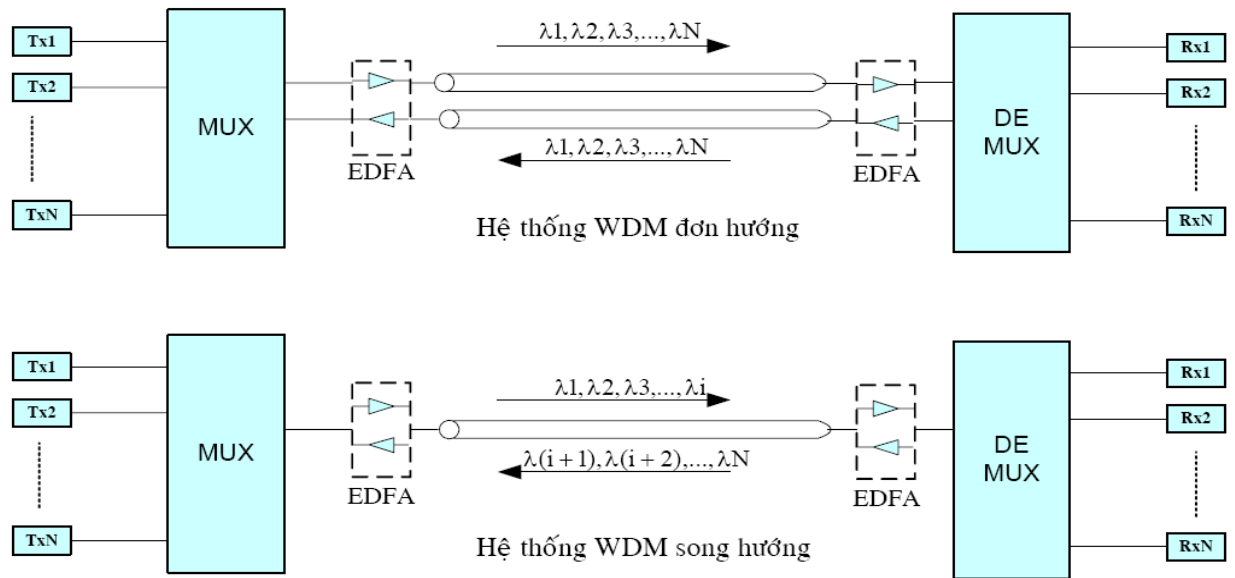
Hệ thống WDM hiện tại chủ yếu sử dụng bộ khuếch đại quang sợi EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier). Tuy nhiên bộ khuếch đại Raman hiện nay cũng đã được sử dụng trên thực tế. Có ba chế độ khuếch đại: khuếch đại công suất, khuếch đại đường và tiền khuếch đại. Khi dùng bộ khuếch đại EDFA cho hệ thống WDM phải đảm bảo các yêu cầu sau:

- Độ lợi khuếch đại đồng đều đối với tất cả các kênh bước sóng (mức chênh lệch không quá 1 dB).
- Sự thay đổi số lượng kênh bước sóng làm việc không được gây ảnh hưởng đến mức công suất đầu ra của các kênh.
- Có khả năng phát hiện sự chênh lệch mức công suất đầu vào để điều chỉnh lại các hệ số khuếch đại nhằm đảm bảo đặc tuyến khuếch đại là bằng phẳng đối với tất cả các kênh.

Thu tín hiệu

Thu tín hiệu trong các hệ thống WDM cũng sử dụng các bộ tách sóng quang như trong hệ thống thông tin quang thông thường: PIN, APD.

c) Phân loại hệ thống WDM



Hình 6.11. Hệ thống ghép bước sóng đơn hướng và song hướng

Hệ thống WDM về cơ bản chia làm hai loại: hệ thống đơn hướng và song hướng như minh họa trên hình trên. Hệ thống đơn hướng chỉ truyền theo một chiều trên sợi quang. Do vậy, để truyền thông tin giữa hai điểm cần hai sợi quang. Hệ thống WDM song hướng, ngược lại, truyền hai chiều trên một sợi quang nên chỉ cần 1 sợi quang để có thể trao đổi thông tin giữa 2 điểm.

Cả hai hệ thống đều có những ưu nhược điểm riêng. Giả sử rằng công nghệ hiện tại chỉ cho phép truyền N bước sóng trên một sợi quang, so sánh hai hệ thống ta thấy:

Xét về dung lượng, hệ thống đơn hướng có khả năng cung cấp dung lượng cao gấp đôi so với hệ thống song hướng. Ngược lại, số sợi quang cần dùng gấp đôi so với hệ thống song hướng.

Khi sự cố đứt cáp xảy ra, hệ thống song hướng không cần đến cơ chế chuyển mạch bảo vệ tự động APS (Automatic Protection-Switching) vì cả hai đầu của liên kết đều có khả năng nhận biết sự cố một cách tức thời.

Đứng về khía cạnh thiết kế mạng, hệ thống song hướng khó thiết kế hơn vì còn phải xét thêm các yếu tố như: vấn đề xuyên nhiễu do có nhiều bước sóng hơn trên một sợi quang, đảm bảo định tuyến và phân bố bước sóng sao cho hai chiều trên sợi quang không dùng chung một bước sóng.

Các bộ khuếch đại trong hệ thống song hướng thường có cấu trúc phức tạp hơn trong hệ thống đơn hướng. Tuy nhiên, do số bước sóng khuếch đại trong hệ thống song hướng giảm $\frac{1}{2}$ theo mỗi chiều nên ở hệ thống song hướng, các bộ khuếch đại sẽ cho công suất quang ngõ ra lớn hơn so với ở hệ thống đơn hướng.

6.3.3. Đặc điểm của hệ thống WDM

Thực tế nghiên cứu và triển khai WDM đã rút ra được những ưu nhược điểm của công nghệ WDM như sau:

Ưu điểm của công nghệ WDM

- Tăng băng thông truyền trên sợi quang số lần tương ứng số bước sóng được ghép vào để truyền trên một sợi quang.
- Tính trong suốt: Do công nghệ WDM thuộc kiến trúc lớp mạng vật lý nên nó có thể hỗ trợ các định dạng số liệu và thoại như: ATM, Gigabit Ethernet, ESCON, chuyên mạch kênh, IP ...
- Khả năng mở rộng: Những tiến bộ trong công nghệ WDM hứa hẹn tăng băng thông truyền trên sợi quang lên đến hàng Tbps, đáp ứng nhu cầu mở rộng mạng ở nhiều cấp độ khác nhau.
- Hiện tại, chỉ có duy nhất công nghệ WDM là cho phép xây dựng mô hình mạng truyền tải quang OTN (Optical Transport Network) giúp truyền tải trong suốt nhiều loại hình dịch vụ, quản lý mạng hiệu quả, định tuyến linh động ...

Nhược điểm của công nghệ WDM

- Vẫn chưa khai thác hết băng tần hoạt động có thể của sợi quang (chỉ mới tận dụng được băng C và băng L).
- Quá trình khai thác, bảo dưỡng phức tạp hơn gấp nhiều lần.
- Nếu hệ thống sợi quang đang sử dụng là sợi DSF theo chuẩn G.653 thì rất khó triển khai WDM vì xuất hiện hiện tượng trộn bốn bước sóng khá gay gắt.

6.3.4. Lưới ITU

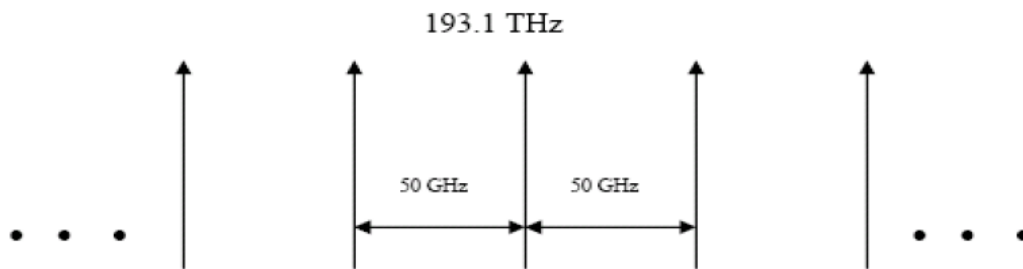
Việc chuẩn hoá các bộ bước sóng dùng cho các mạng WDM là hết sức cần thiết vì nó bảo đảm cho các thiết bị của các nhà cung cấp khác nhau đều được sản xuất theo cùng một tiêu chuẩn, và đều làm việc tương thích với nhau.

Khi chuẩn hoá bước sóng, vấn đề cần phải xem xét đầu tiên là là khoảng cách giữa các kênh phải dựa theo tần số hay bước sóng. Khoảng cách tần số bằng nhau sẽ làm cho khoảng cách bước sóng hơi khác nhau. Không có một tiêu chuẩn kỹ thuật nào được ưu tiên để lựa chọn trong trường hợp này. Trong khuyến cáo ITU-G.692 các kênh cách nhau một khoảng 50 GHz (tương đương với khoảng cách bước sóng là 0.4nm) với tần số trung tâm danh định là 193.1THz (1552.52 nm). Tần số này ở giữa dải thông của sợi quang 1.55 μ m và bộ khuếch đại quang sợi EDFA (xem hình 1.4). Khoảng cách này phù hợp với khả năng phân giải của các bộ MUX/DEMUX hiện nay, độ ổn định tần số

của các bộ laser, MUX/DEMUX,... Khi công nghệ hoàn thiện hơn khoảng cách này sẽ phải giảm đi.

Một vấn đề khác, khó khăn hơn là chọn lựa một bộ bước sóng tiêu chuẩn bảo đảm cho các hệ thống cho 4, 8, 16, và 32 bước sóng hoạt động tương thích với nhau bởi vì các nhà sản xuất đều có các cấu hình kênh tối ưu riêng và các kế hoạch nâng cấp hệ thống từ ít kênh lên nhiều kênh khác nhau. ITU đã chuẩn hoá (ITU G.959) bộ 16 bước sóng bắt đầu từ tần số 192.1 THz, rộng 200GHz mỗi bên cho giao diện đa kênh giữa các thiết bị WDM.

Cuối cùng là phải lưu ý không chỉ bảo đảm các tần số trung tâm mà còn phải bảo đảm độ lệch tần số tối đa cho phép. Đối với $\Delta f \geq 200$ GHz, ITU quy định độ lệch tần số là không vượt quá $\pm \Delta f / 5$ GHz. Với $\Delta f = 50$ GHz và $\Delta f = 100$ GHz thì đến thời điểm này ITU vẫn chưa chuẩn hoá.



Hình 6.12. Lưới bước sóng theo ITU

6.3.5. Các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống WDM

Có 3 yếu tố cơ bản của sợi quang ảnh hưởng đến khả năng của các hệ thống thông tin quang, bao gồm:

- Suy hao
- Tán sắc
- Hiện tượng phi tuyến xảy ra trong sợi quang.

Tuy nhiên, đối với các hệ thống khác nhau thì mức độ ảnh hưởng của các yếu tố này cũng khác nhau.

Đối với các hệ thống cự ly ngắn, dung lượng thấp thì yếu tố chủ yếu cần quan tâm là suy hao.

Đối với các hệ thống tốc độ cao, cự ly tương đối lớn thì yếu tố chủ yếu cần quan tâm là suy hao và tán sắc.

Đối với các hệ thống cự ly dài và dung lượng rất lớn thì ngoài 2 yếu tố trên cần phải xem xét đến cả các hiệu ứng phi tuyến.

6.4. Các linh kiện trong hệ thống WDM

Các linh kiện được sử dụng trong các mạng quang hiện đại bao gồm

- các bộ ghép/tách (couplers)
- bộ phát laser (lasers)
- bộ tách quang (photodetectors)

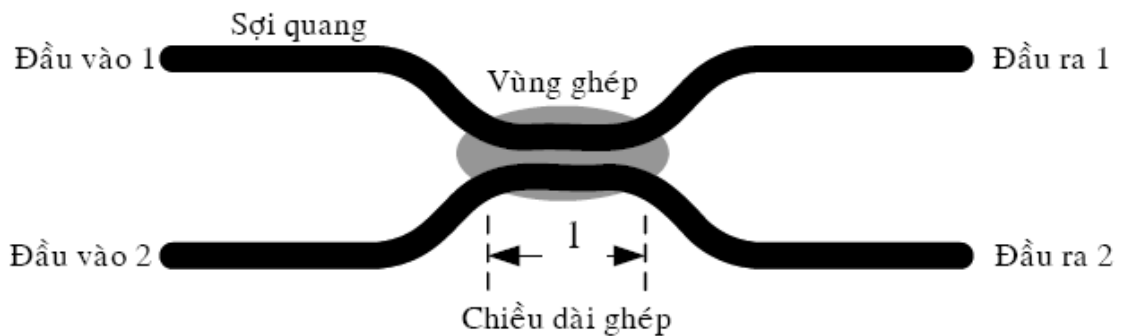
- bộ khuếch đại quang (optical amplifiers)
- bộ chuyển mạch quang (optical switches)
- bộ lọc (filters)
- bộ ghép/tách kênh (multiplexers).

6.4.1. Bộ ghép/tách tín hiệu (Coupler)

a) Định nghĩa

Bộ ghép/tách tín hiệu (Coupler) là thiết bị quang dùng để kết hợp các tín hiệu truyền đến từ các sợi quang khác nhau. Nếu coupler chỉ cho phép ánh sáng truyền qua nó theo một chiều, ta gọi là coupler có hướng (directional coupler). Nếu nó cho phép ánh sáng đi theo 2 chiều, ta gọi là coupler song hướng (bidirectional coupler).

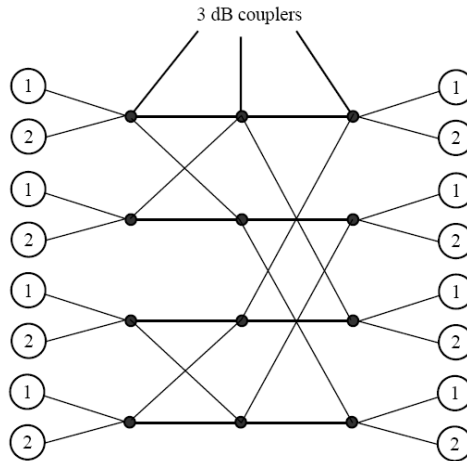
Coupler thông dụng nhất là coupler FBT (Fused Biconical Taper). Coupler này được chế tạo bằng cách đặt 2 sợi quang cạnh nhau, sau đó vừa nung chảy để chúng kết hợp với nhau vừa kéo giãn ra để tạo thành một vùng ghép (coupling region). Một coupler 2 x 2 đặc trưng bởi tỉ số ghép α ($0 < \alpha < 1$). α là tỉ lệ công suất ánh sáng ngõ vào 1 đến ngõ ra 1 so với tổng công suất ánh sáng vào ngõ vào 1. Phần tỉ lệ $1 - \alpha$ công suất ánh sáng còn lại của ngõ vào 1 sẽ được truyền đến ngõ ra 2. Hình 1.9 là một coupler FBT 2 x 2 có hướng.



Hình 6.13. Cấu tạo coupler FBT 2 x 2

Coupler có thể là chọn lựa bước sóng (wavelength selective) hay không phụ thuộc vào bước sóng, tương ứng với α phụ thuộc hay không phụ thuộc vào bước sóng.

Trường hợp $\alpha = 1/2$, coupler được dùng để chia công suất tín hiệu ngõ vào thành hai phần bằng nhau ở hai ngõ ra. Coupler trong trường hợp này được gọi là coupler 3 dB. Coupler hình sao nxn có thể được tạo bằng cách kết nối các coupler 3dB như trên hình sau.



Hình 6.14. Coupler hình sao với 8 ngõ vào và 8 ngõ ra được hình thành từ các

coupler 3dB. Công suất từ một ngõ vào được chia đều cho các ngõ ra

b) Nguyên lý hoạt động

Khi hai sợi quang được đặt cạnh nhau, ánh sáng sẽ được ghép từ sợi này sang sợi kia và ngược lại. Đó là do quá trình truyền một ánh sáng trên sợi quang qua vùng ghép sẽ khác so với truyền trên sợi quang đơn. Khi đó, toàn bộ ánh sáng thuộc một sợi quang sẽ được ghép hoàn toàn sang sợi quang ghép với nó, phần ánh sáng này lại tiếp tục được ghép ngược trở lại sang sợi quang ban đầu theo một chu kỳ tuần hoàn khép kín. Kết quả ta có cường độ trường điện từ ở đầu ra của bộ ghép E_{o1} , E_{o2} được tính theo cường độ trường điện từ đầu vào E_{i1} , E_{i2} theo công thức

$$\begin{pmatrix} E_{o1}(f) \\ E_{o2}(f) \end{pmatrix} = e^{-i\beta l} \begin{pmatrix} \cos(\kappa l) & i \sin(\kappa l) \\ i \sin(\kappa l) & \cos(\kappa l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i1}(f) \\ E_{i2}(f) \end{pmatrix}$$

Trong đó:

- β là hệ số pha của sự truyền ánh sáng trong sợi quang.
- κ là Hệ số ghép. κ phụ thuộc vào chiều rộng của sợi quang, chiết suất của lõi sợi và đến khoảng cách gần nhau của hai sợi quang khi thực hiện nung chảy.

Nếu chỉ cho ánh sáng vào ngõ 1 (cho $E_{i2}=0$), khi đó công thức (1.32) được viết lại là:

$$E_{01}(f) = e^{-i\beta l} \cos(\kappa l) E_{i1}(f)$$

$$E_{02}(f) = e^{-i\beta l} e^{i(\pi/2)} \sin(\kappa l) E_{i1}(f)$$

Ta nhận xét rằng ở 2 đầu ngõ ra có sự lệch pha $\pi/2$.

d) Ứng dụng

Coupler là linh kiện quang linh hoạt và có thể cho nhiều ứng dụng khác nhau. Bộ coupler với tỉ số ghép $\alpha \approx 1$ được dùng để trích một phần nhỏ tín hiệu quang, phục vụ cho mục đích giám sát.

Coupler còn là bộ phận cơ bản để tạo nên các thành phần quang khác, chẳng hạn như: các bộ chuyển mạch tĩnh, các bộ điều chế, bộ giao thoa Mach-Zehnder MZI... MZI có thể được chế tạo hoạt động như bộ lọc, MUX/DEMUX, chuyển mạch và bộ chuyển đổi bước sóng.

Thực hiện ghép/tách bước sóng trên sợi quang. Nhờ điều chỉnh chiều dài ghép thích hợp khi chế tạo, coupler 2 x 2 ghép 50:50 phân bố công suất ánh sáng từ một đầu vào ra làm 2 phần bằng nhau ở 2 ngõ ra. Coupler này còn được gọi là coupler 3 dB, ứng dụng phổ biến nhất. Từ coupler 3 dB, có thể tạo nên bộ coupler n x n ghép n tín hiệu khác nhau vào một sợi quang.

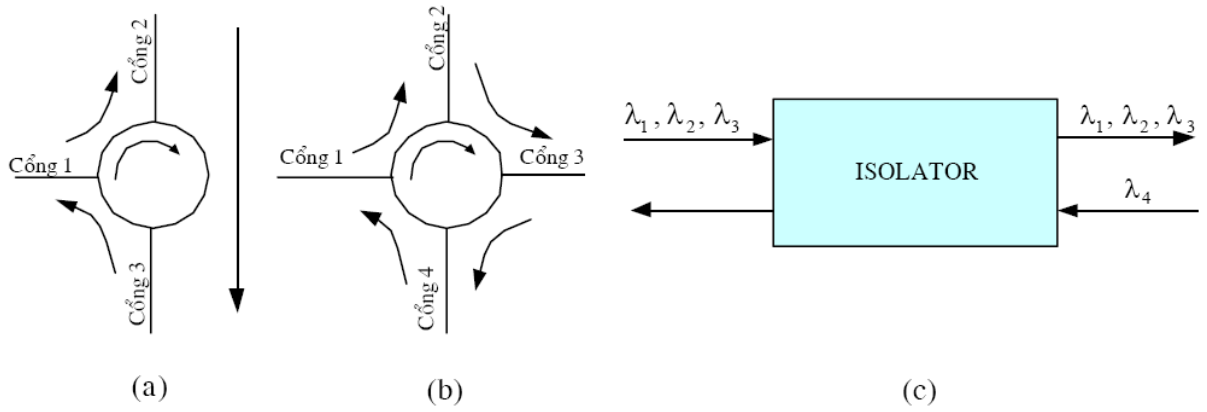
6.4.2. Bộ isolator/circulator

a) Định nghĩa

Coupler và phần lớn các linh kiện quang thụ động khác là các thiết bị thuận ngược (reciprocal) theo nghĩa thiết bị sẽ hoạt động cùng một kiểu nếu đảo ngõ vào và ngõ ra với nhau.

Isolator là thiết bị không thuận ngược (nonreciprocal). Nó chỉ truyền ánh sáng qua nó theo một chiều và ngăn không cho truyền theo chiều ngược lại. Nó được dùng tại đầu ra của các thiết bị quang (bộ khuếch đại, nguồn phát laser) để ngăn quá trình phản xạ ngược trở lại các thiết bị đó, gây nhiễu và hư hại thiết bị. Hai tham số chính của Isolator là suy hao xen và độ cách ly.

Circulator cũng thực hiện chức năng tương tự như bộ Isolator nhưng nó thường có nhiều cổng, thường là 3 hoặc 4 cửa. Chính vì sự tương đồng giữa hai loại thiết bị, ta sẽ chỉ trình bày hoạt động của bộ Isolator mà thôi.



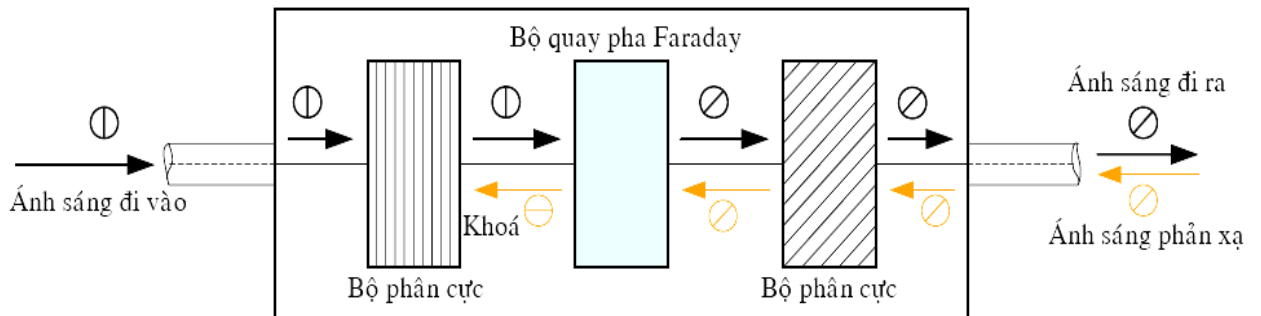
Hình 6.15.

(a) Sơ đồ khối của bộ Circulator 3 cửa.

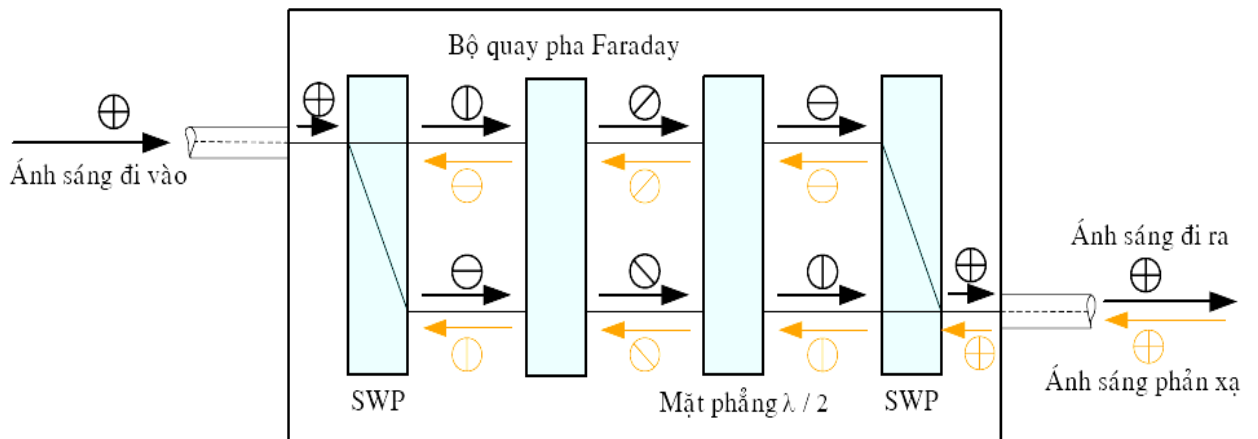
(b) Sơ đồ khối của bộ Circulator 4 cửa.

(c) Sơ đồ khối của bộ Isolator.

b) Nguyên lý hoạt động



(a)



Hình 6.16.

(a) Cấu tạo bộ Isolator khi ánh sáng vào phân cực dọc.

(b) Cấu tạo bộ Isolator khi ánh sáng vào phân cực bất kỳ.

Trạng thái phân cực của ánh sáng truyền trong sợi quang được định nghĩa là chiều phân cực của vector cường độ trường E nằm trên mặt phẳng

vuông góc với phương truyền ánh sáng trong sợi. Ta gọi là phân cực ngang và phân cực dọc. Quá trình truyền ánh sáng trong sợi quang là sự kết hợp tuyến tính truyền các sóng phân cực ngang và phân cực dọc.

Mô hình đơn giản của bộ Isolator được minh họa như trong Hình 6.16. (a). Giả sử ánh sáng truyền là phân cực dọc, truyền đến bộ phân cực (Polarizer), bộ này thực hiện chức năng chỉ cho sóng phân cực dọc đi qua, không cho sóng phân cực ngang đi qua. Sau bộ phân cực là bộ quay pha Faraday, thực hiện quay pha 45° theo chiều kim đồng hồ không phân biệt chiều ánh sáng đến.

Tiếp theo là bộ phân cực, bộ này thực hiện chức năng chỉ cho sóng phân cực 45° đi qua. Như vậy, bộ Isolator ta xét chỉ cho phép sóng phân cực dọc đi qua theo chiều từ trái sang phải. Trong trường hợp sóng phản xạ theo chiều ngược lại, nếu sóng qua được bộ phân cực thứ hai, qua tiếp theo bộ quay pha Faraday, thì cũng không thể qua được bộ phân cực thứ nhất (do lúc này sóng phân cực ngang).

Trên thực tế thì sóng truyền trong sợi quang luôn là sự kết hợp tuyến tính của các trạng thái phân cực ngang và dọc nên thiết kế bộ Isolator phức tạp hơn. Mô hình thu nhỏ được trình bày trong Hình 6.16. (b).

Ánh sáng truyền trong sợi quang với trạng thái phân cực bất kì được đưa đến bộ tách/ghép trạng thái phân cực SWP (Spatial Walk-off Polarizer), tách thành hai dòng tín hiệu phân cực dọc và ngang theo hai đường độc lập nhau. Tiếp theo, đến bộ quay pha Faraday, quay pha 45° theo chiều kim đồng hồ. Mặt phẳng $\lambda/2$ (Half-wave plate) thực hiện quay pha 45° theo chiều kim đồng hồ đối với tín hiệu truyền từ trái sang phải, quay pha 45° theo chiều ngược kim đồng hồ theo chiều truyền ngược lại. Cuối cùng, tín hiệu ở hai nhánh được kết hợp lại nhờ bộ SWP thứ hai. Nếu theo chiều ngược lại, hai bộ SWP sẽ khử lẫn nhau. Ánh sáng truyền qua bộ SWP thứ hai, qua bộ quay pha Faraday sẽ không thể kết hợp lại được tại bộ SWP thứ nhất như minh họa trên Hình 6.16. .

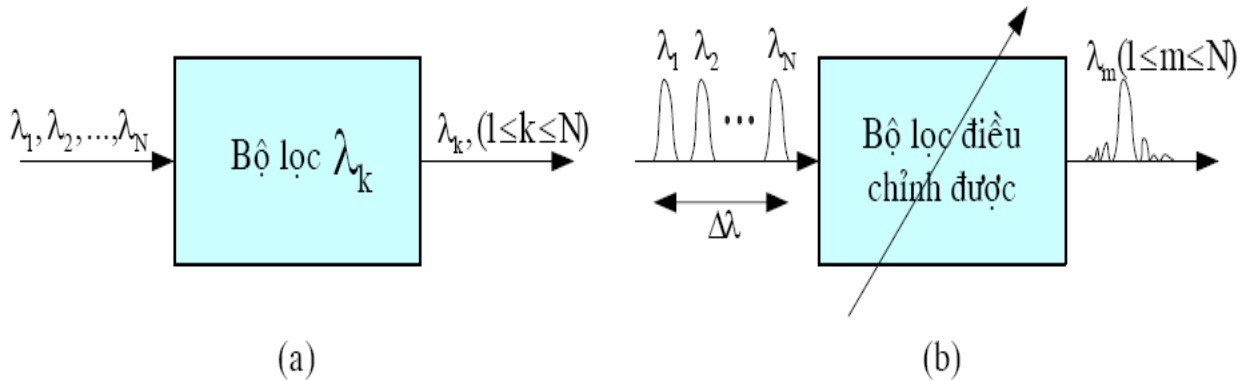
c) Ứng dụng

Bộ Isolator và Circulator có những ứng dụng sau:

- Bộ Isolator thường đứng trước đầu ra bộ khuếch đại quang hoặc nguồn phát laser để ngăn ánh sáng phản xạ ngược trở lại thiết bị gây nhiễu và có thể làm hư thiết bị.
- Bộ Circulator được dùng như một bộ phận để chế tạo phần tử xen rớt quang OADM.

6.4.3. Bộ lọc quang

a) Tổng quan



Hình 6.17. Sơ đồ khối của bộ lọc.

(a) Bộ lọc cố định bước sóng λ_k .

(b) Bộ lọc có thể điều chỉnh bước sóng được trong khoảng $\Delta\lambda$.

Định nghĩa

Bộ lọc là thiết bị chỉ cho phép một kênh bước sóng đi qua, khoá đối với tất cả các kênh bước sóng khác. Nguyên lý cơ bản nhất của bộ lọc là sự giao thoa giữa các tín hiệu, bước sóng hoạt động của bộ lọc sẽ được cộng pha nhiều lần khi đi qua nó, các kênh bước sóng khác, ngược lại, sẽ bị triệt tiêu về pha.

Tùy thuộc vào khả năng điều chỉnh kênh bước sóng hoạt động, người ta chia bộ lọc làm hai loại: bộ lọc cố định (fixed filter) và bộ lọc điều chỉnh được (tunable filter).

Yêu cầu đối với bộ lọc

Hiện nay, có rất nhiều công nghệ chế tạo bộ lọc. Tuy nhiên, yêu cầu chung đối với tất cả các công nghệ là:

- Bộ lọc tốt phải có giá trị suy hao xen IL thấp.
- Bộ lọc phải không phụ thuộc nhiều vào trạng thái phân cực của tín hiệu đưa vào.
- Dải thông hoạt động của bộ lọc phải không nhạy cảm với sự thay đổi nhiệt độ của môi trường.
- Bộ lọc phải đảm bảo trong khoảng nhiệt độ hoạt động (thường là khoảng 100°C), độ dịch dải thông hoạt động phải không vượt quá khoảng cách giữa hai kênh bước sóng hoạt động gần nhất.
- Khi ứng dụng ghép nối tiếp nhiều bộ lọc trong hệ thống WDM, băng thông hoạt động sẽ bị thu hẹp lại. Để hạn chế tối đa điều này, các bộ lọc phải có hàm truyền đạt trong khoảng bước sóng hoạt động là bằng phẳng.

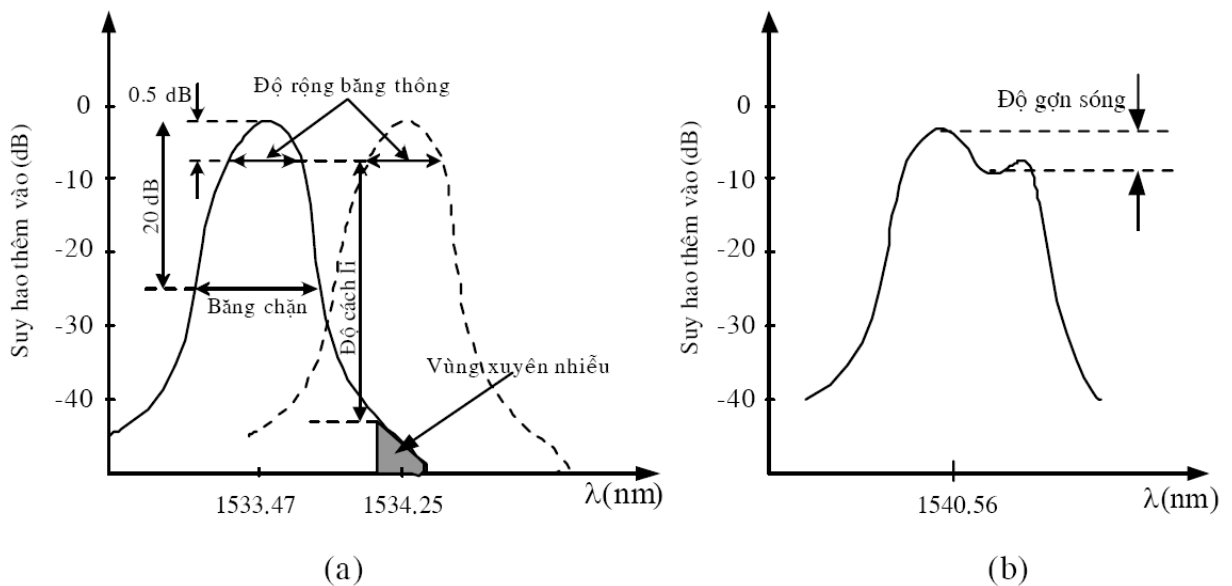
- Hàm truyền đạt của bộ lọc phải có độ dốc lớn để tránh giao nhau ở phần vạt của hai bước sóng lân cận, gây xuyên nhiễu giữa các kênh.
- Giảm chi phí sản xuất.

Vấn đề này lại phụ thuộc vào công nghệ chế tạo. Tuy nhiên, khi vấn đề này đặt lên hàng đầu thì ta sẽ có hai lựa chọn.

Thứ nhất là dùng công nghệ ống dẫn sóng, cho phép sản xuất trên những vi mạch tích hợp quang (bù lại hoạt động phụ thuộc vào trạng thái phân cực của sóng quang).

Thứ hai là dùng công nghệ sản xuất các thiết bị thuần quang, tuy khó khăn trong tích hợp mạch nhưng có nhiều ưu điểm là: không phụ thuộc vào trạng thái phân cực của sóng quang, ghép sóng từ sợi quang vào thiết bị dễ dàng.

b) Thông số cơ bản



Hình 6.18. (a) Các thông số đặc trưng của bộ lọc. (b) Độ gọn sóng của bộ lọc.

Hình trên minh họa các đặc tính đặc trưng cho một bộ lọc, các đặc tính đó được định nghĩa như sau:

- Bước sóng trung tâm: phải là bước sóng tuân theo tiêu chuẩn ITU-T
- Độ rộng băng thông (Pass Bandwidth): là độ rộng của hàm truyền đạt tại mức suy hao xen cách đỉnh 0.5 dB. Trong một số trường hợp, người ta còn có thể xét băng thông đi qua 1 dB, 3 dB. Đặc tính này rất quan trọng vì laser trong trường hợp không lý tưởng chỉ phát tín hiệu có bước sóng dao động nhất định so với bước sóng trung tâm được qui định theo chuẩn ITU-T.

- Độ rộng băng chặn (Stop Bandwidth): là độ rộng của hàm truyền đạt tại mức suy hao xen cách đỉnh 20 dB. Dải chặn của bộ lọc phải càng nhỏ càng tốt để tránh hiện tượng xuyên nhiễu giữa các kênh.
- Độ cách ly (Isolation): để chỉ công suất của một kênh bước sóng xuyên nhiễu sang các kênh bước sóng lân cận.
- Độ gợn sóng (Ripple): là độ chênh lệch đỉnh-đỉnh trong phạm vi một kênh bước sóng.
- Hệ số sử dụng băng thông BUF (Bandwidth-utilization Factor): là tỉ số của độ rộng kênh truyền LW (Linewidth) của ánh sáng được truyền đi so với ánh sáng phản xạ tại một mức suy hao xác định. Bộ lọc lý tưởng phải có BUF = 1. Trên thực tế, khi IL = -25 dB thì BUF \approx 0.4.

Nếu bộ lọc thuộc loại có thể điều chỉnh bước sóng được, nó còn có thêm các đặc tính nữa như là:

- Khoảng điều chỉnh bước sóng động: là khoảng bước sóng mà trong phạm vi hoạt động của bộ lọc.
- Số kênh bước sóng có thể xử lý: là tỉ lệ khoảng điều chỉnh bước sóng động trên khoảng cách giữa các kênh bước sóng.
- Thời gian điều chỉnh: Thời gian điều chỉnh giữa các kênh bước sóng hoạt động khác nhau.
- Tỉ lệ nén biên SSR (Sidelobe Suppression Ratio): là khoảng cách giữa giá trị công suất đỉnh so với giá trị công suất lớn nhất ở biên.
- Độ phân giải: là độ dịch bước sóng nhỏ nhất bộ lọc có thể nhận biết được.

c) Cách tử

Cách tử dùng để mô tả các thiết bị mà hoạt động của nó dựa trên hiện tượng giao thoa giữa các tín hiệu quang xuất phát từ cùng một nguồn quang nhưng có độ lệch pha tương đối với nhau.

Phân biệt với cách tử là vật chuẩn (etalon) là thiết bị ở đó nhiều tín hiệu quang được tạo ra nhờ một hốc cộng hưởng (single cavity) lặp lại các tia đi ngang qua nó.

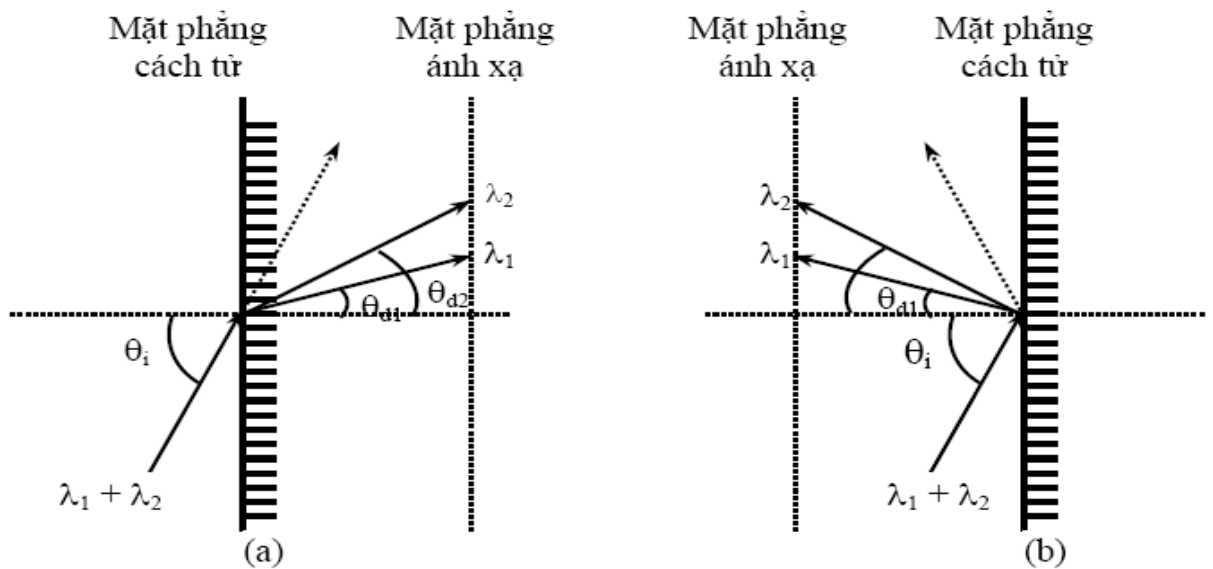
Sóng ánh sáng có lan truyền theo hướng z với tần số góc là ω và hằng số pha là β sẽ có độ dịch pha là $(\omega t - \beta z)$. Do đó độ dịch pha tương đối giữa hai sóng phát sinh từ một nguồn có thể được tạo ra bằng cách cho chúng truyền qua hai đường khác nhau.

Trong WDM cách tử được dùng như là một bộ tách kênh để tách các bước sóng hoặc như là một bộ ghép kênh để kết hợp các bước sóng.

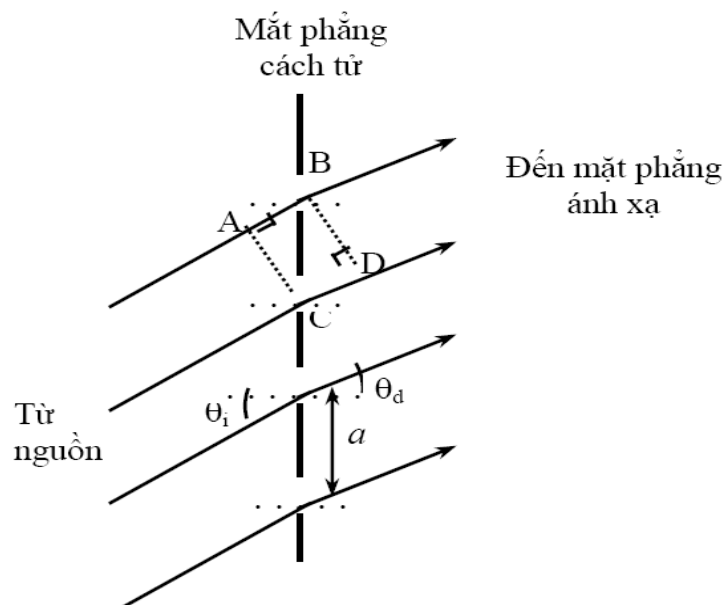
Hình 6.18. là hai ví dụ về cách tử: trên mặt phẳng cách tử (grating plane), các khe (slit) được cách đều nhau. Khoảng cách giữa hai khe kế cận gọi là pitch. Do các khe nhỏ nên theo hiện tượng nhiễu xạ (diffraction) ánh sáng truyền qua các khe này sẽ lan toả ra mọi hướng. Trên mặt phẳng ánh xạ (imaging plane) sẽ quan sát được hiện tượng giao thoa cộng hưởng (constructive interference) và triệt tiêu các bước sóng tại các điểm khác nhau, cách tử này được gọi là cách tử nhiễu xạ (diffraction grating).

Hình 6.18. (a) là cách tử truyền dẫn (transmission gratings),

Hình 6.18. (b) là cách tử phản xạ (reflection gratings).



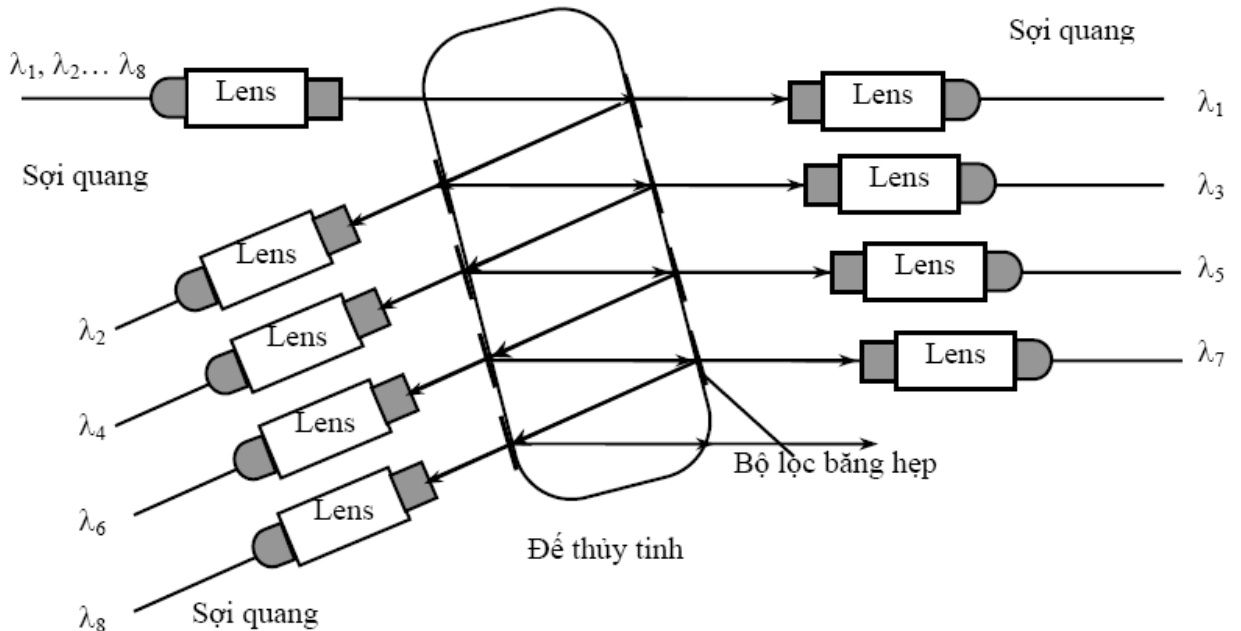
Hình 6.18. (a) Cách tử truyền dẫn và (b) Cách tử phản xạ



Hình 6.19. Nguyên tắc hoạt động của cách tử truyền dẫn.
Cách tử phản xạ hoạt động tương tự



Hình 6.20. Cách tử blazing với góc blaze α .



Hình 6.21. Bộ lọc ghép/tách kênh được tạo từ các bộ lọc màng mỏng điện môi

6.4.4. Bộ ghép/tách kênh bước sóng

Bộ ghép/tách kênh bước sóng, cùng với bộ kết nối chéo quang, là thiết bị quan trọng nhất cấu thành nên hệ thống WDM.

Khi dùng kết hợp với bộ kết nối chéo quang OXC (Optical Crossconnect) sẽ hình thành nên mạng truyền tải quang, có khả năng truyền tải đồng thời và trong suốt mọi loại hình dịch vụ, mà công nghệ hiện nay đang hướng tới.

Tuy nhiên, trong khi thiết bị và công nghệ chuyển mạch quang, nhìn chung vẫn còn đang ở mức nghiên cứu tại các phòng thí nghiệm thì các thiết bị ghép/tách kênh bước sóng đã được thương mại hoá rộng rãi.

Về công nghệ chế tạo, công nghệ chế tạo bộ lọc (mà đã được trình bày chi tiết ở phần 6.4.3.) và công nghệ chế tạo bộ tách/ghép kênh hoàn toàn giống nhau. Chỉ khác là bộ lọc thường chỉ có một bước sóng hoạt động, còn bộ tách/ghép kênh hoạt động trên nhiều kênh bước sóng liên tục. Bộ lọc chính là phần tử cơ bản cấu tạo nên bộ ghép/tách kênh

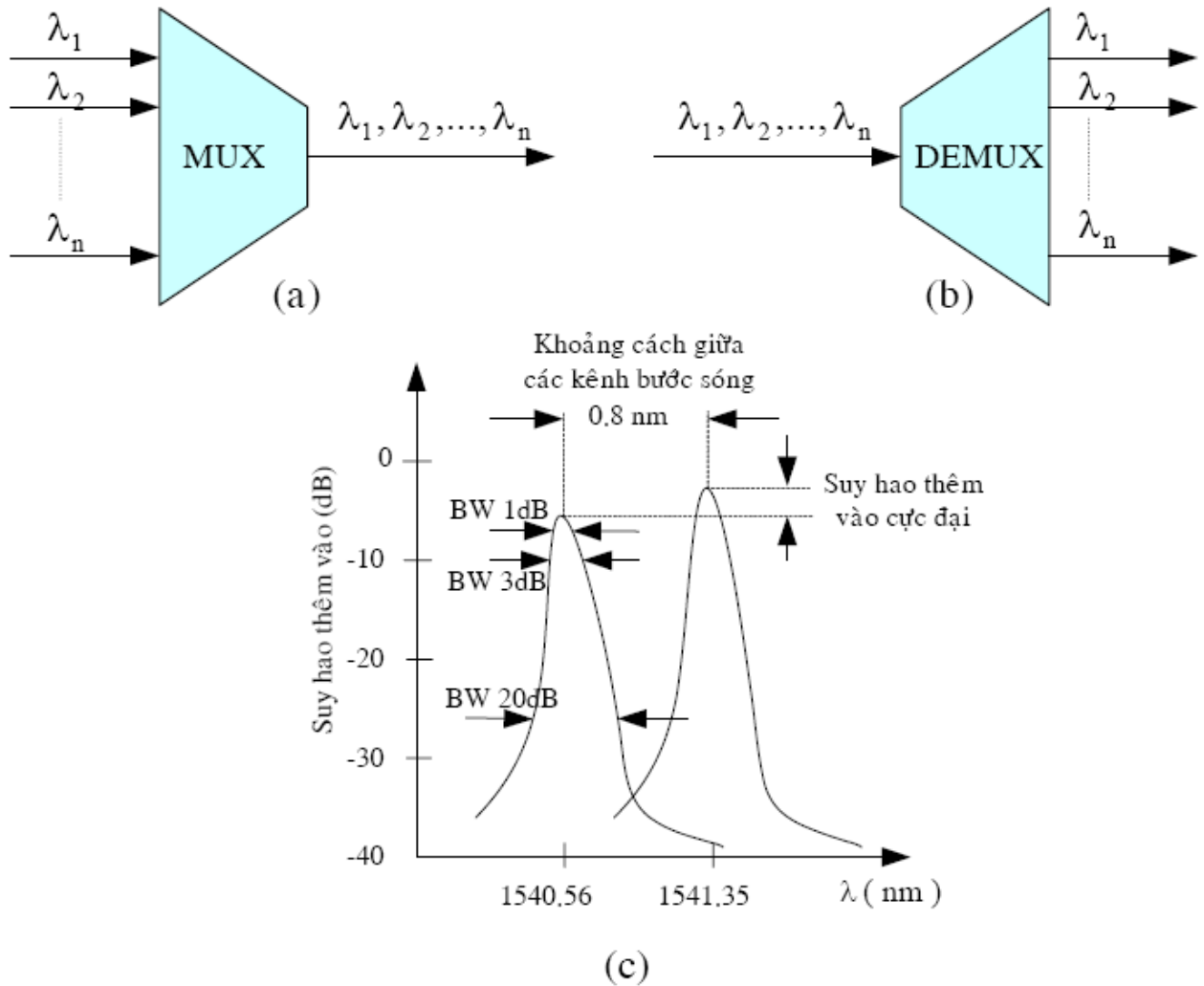
a) Định nghĩa

Nguyên lý hoạt động của bộ MUX/DEMUX cũng tương tự như bộ Coupler. Tuy nhiên, bộ Coupler/Splitter thực hiện ghép tách tín hiệu có cùng bước sóng, còn bộ MUX/DEMUX thực hiện ghép tách tín hiệu ở các bước sóng khác nhau. Sơ đồ khối bộ MUX/DEMUX cho trong hình 6.22. (a) và (b).

b) Đặc tính

Bộ MUX/DEMUX thường được mô tả theo những thông số sau:

- Suy hao xen (Insertion Loss): đã mô tả ở phần coupler.
- Số lượng kênh xử lý: là số lượng kênh bước sóng ở đầu vào và đầu ra của bộ ghép/tách kênh. Thông số này đặc trưng cho dung lượng của thiết bị.
- Bước sóng trung tâm: Các bước sóng trung tâm phải tuân theo chuẩn của ITU-T để đảm bảo vấn đề tương thích.
- Băng thông: là độ rộng phổ (linewidth) của kênh bước sóng trên thực tế. Băng thông thường được tính là độ rộng của hàm truyền đạt công suất ở các mức cách đỉnh 1dB, 3dB, 20dB.
- Giá trị lớn nhất suy hao xen: được tính là khoảng cách nhỏ nhất giữa đỉnh của hàm truyền đạt công suất của một kênh bước sóng nào đó so với mức $IL=0$ (dB) (minh hoạ trên 6.22. (c)).
- Độ chênh lệch suy hao xen vào giữa các kênh: được tính là hiệu của giá trị lớn nhất và nhỏ nhất suy hao xen vào giữa các kênh bước sóng.



Hình 6.22. Bộ tách/ghép kênh bước sóng quang.

(a) Sơ đồ khối bộ ghép kênh bước sóng (MUX).

(b) Sơ đồ khối bộ tách kênh bước sóng (DEMUX).

(c) Các thông số đặc trưng của bộ MUX/DEMUX.

c) Ghép tầng để tạo bộ ghép kênh dung lượng cao

Nhu cầu về dung lượng ngày càng cao trong khi công nghệ chế tạo sợi quang vẫn còn những giới hạn nhất định, làm hạn chế tốc độ truyền dẫn một kênh bước sóng. Điều đó đòi hỏi phải tăng số lượng kênh bước sóng truyền trên một sợi quang, có nghĩa là số lượng kênh mà bộ MUX/DEMUX xử lý phải tăng lên.

Trong khi công nghệ chế tạo phần tử cơ bản vẫn còn giới hạn ở một khoảng số lượng kênh bước sóng có thể xử lý nhất định thì giải pháp ghép tầng được xem là giải pháp hợp lý nhất.

Ghép tầng nối tiếp đơn kênh (Serial)

Trong phương pháp này thực hiện ghép n tầng, mỗi tầng chỉ thực hiện ghép/tách một kênh bước sóng. Một ví dụ tiêu biểu là bộ DEMUX 8 kênh bước sóng, chế tạo từ các phần tử cơ bản là bộ lọc TFMF như đã trình bày trong hình (1.25).

Ưu điểm lớn nhất của phương pháp ghép tầng nối tiếp là số bước sóng xử lý có thể thay đổi linh động bằng cách thêm/bớt số bộ lọc ghép vào (“pay as you grow”).

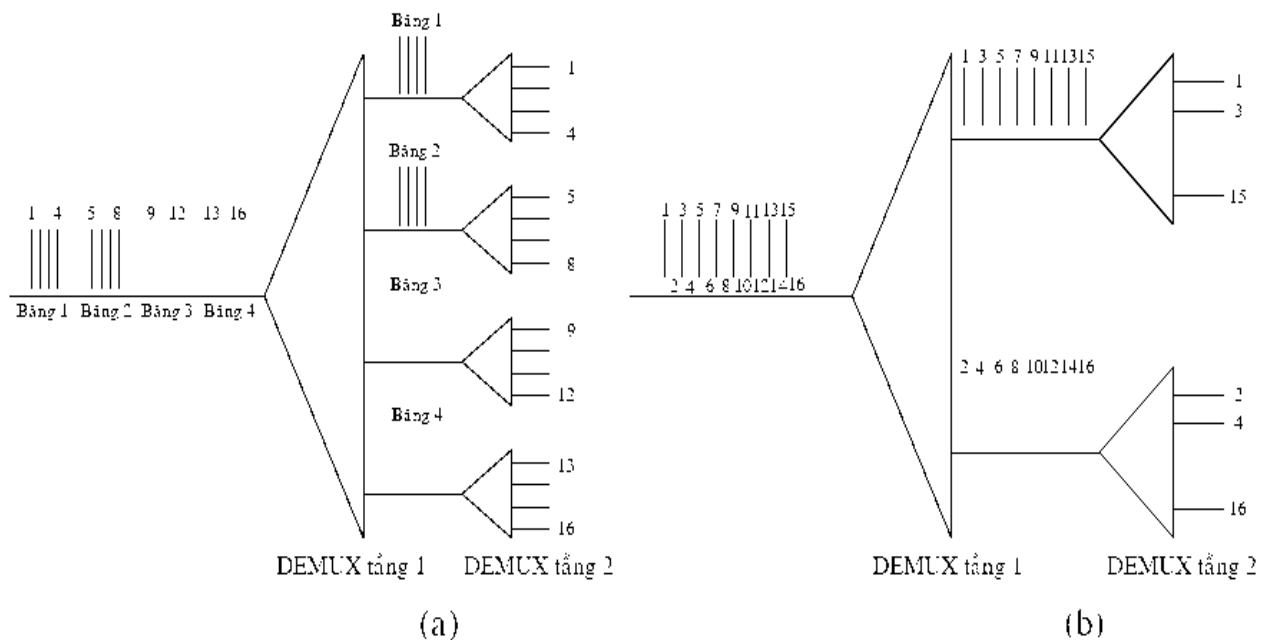
Nhược điểm chính là chỉ có thể tăng lên đến một số lượng bước sóng nào đó mà thôi, do suy hao xen sẽ tăng gần như tuyến tính với số lượng bộ lọc thêm vào.

Ghép một tầng (Single-Stage)

Tất cả các bước sóng đều được tách đồng thời trong một tầng duy nhất. Ví dụ cho cấu trúc này là bộ lọc AWG

Ưu điểm của phương pháp này suy hao xen nhỏ, tính đồng nhất của suy hao tốt hơn.

Nhược điểm là số kênh được tách bị hạn chế do công nghệ sản xuất AWG.



Hình 6.23. Ghép tầng để tăng dung lượng ghép/tách các kênh bước sóng.

(a) Ghép tầng theo từng băng sóng.

(b) Ghép tầng đan xen chẵn lẻ.

Ghép tầng theo từng băng sóng (Multistage Banding)

Phương pháp này thực hiện với n/m tầng, mỗi tầng thực hiện ghép/tách m kênh bước sóng thuộc cùng một băng sóng (thông thường $m=4$ hoặc $m=8$, số lượng kênh bước sóng trong một băng sóng là do nhà sản xuất thiết bị qui định) xem hình (6.23. a). Như vậy, đòi hỏi bộ MUX/DEMUX ở tầng đầu phải có dải bước sóng hoạt động rất rộng.

Ưu điểm: hạn chế được suy hao thêm vào m lần so với phương pháp ghép tầng nối tiếp. Cấu trúc này có thể mở rộng thêm nhiều tầng. Cấu trúc có dạng mô đun nên ở tầng cuối cùng có thể chỉ dùng một băng

Nhược điểm: phí phạm tài nguyên “bước sóng” do phải chừa khoảng cách rộng giữa các băng sóng.

Ghép tầng đan xen chẵn lẻ

Có thể áp dụng với hai tầng hoặc nhiều hơn. Tầng đầu làm nhiệm vụ ghép/tách các kênh bước sóng chẵn, lẻ ra làm thành hai băng, đưa đến tầng hai. Tiếp theo, tầng hai có thể thực hiện chức năng tương tự như tầng một hoặc thực hiện ghép/tách riêng ra thành các kênh riêng lẻ (xem hình 6.23. b).

Ưu điểm của phương pháp này là càng về tầng cuối, không cần phải dùng các bộ lọc có độ chính xác cao do khoảng cách giữa các kênh bước sóng cần xử lý ở tầng sau sẽ càng rộng ra.

6.4.5. Bộ chuyển mạch quang

a) Các bộ chuyển mạch đơn (Single Switch)

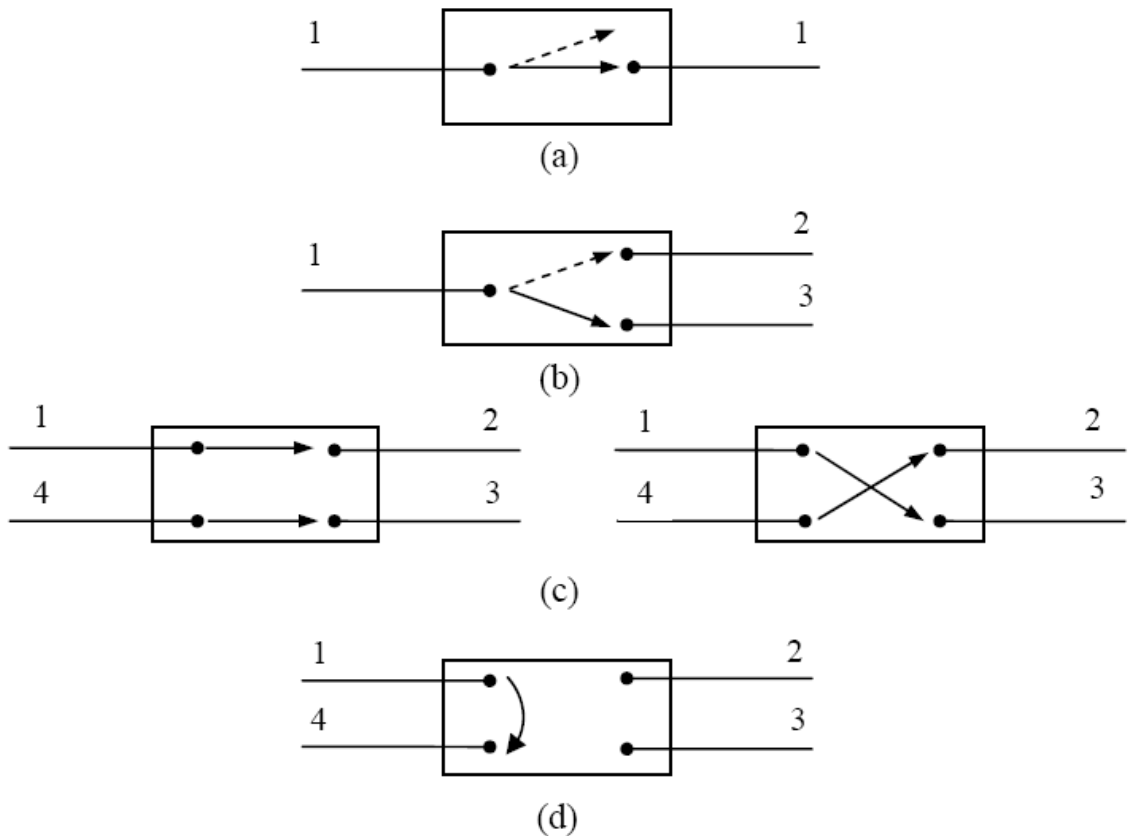
Theo chức năng, các bộ chuyển mạch đơn thường được chia làm hai loại: on/off và chuyển tiếp (passing).

Bộ chuyển mạch on/off (1x1) sẽ cho phép/hoặc không cho phép tín hiệu ánh sáng đi qua (hình 6.24. (a)).

Chuyển mạch chuyển tiếp 1x2 hướng tín hiệu ánh sáng từ sợi quang thứ nhất sang sợi quang thứ hai hoặc sang sợi quang thứ ba (hình 6.24. (b)). Cấu hình chuyển mạch 1x2 trong hình 6.24. (b) là cấu hình chuyển mạch đơn giản nhất. Các bộ chuyển mạch chuyển tiếp 1xN đơn mang tính thương mại cao.

Bộ chuyển mạch chuyển tiếp 2x2 có thể kết nối hai sợi quang này với hai sợi quang khác. Bộ chuyển mạch chuyển tiếp 2x2 có thể có hai trạng thái: trạng thái kết nối thẳng (bypass/bar) và trạng thái kết nối chéo (cross/inserted) (hình 6.24. (c)). Thuật ngữ không nghẽn dùng để chỉ một bộ chuyển mạch có thể kết nối bất kỳ ngõ vào đến bất kỳ ngõ ra.

Hình 6.24. (d) trình bày bộ chuyển mạch 2x2 có nghẽn vì bộ chuyển mạch này chỉ có thể kết nối từ sợi quang 1 đến sợi quang 4.



Hình 6.24. Các loại cấu hình chuyển mạch quang:
 (a) chuyển mạch On/Off (1x1);
 (b) chuyển mạch chuyển tiếp (1x2) (không nghẽn);
 (d) chuyển mạch 2x2 có nghẽn.

Nhiều ví dụ đơn giản về các ứng dụng của bộ chuyển mạch khẳng định tầm quan trọng của các bộ chuyển mạch trong hệ thống thông tin sợi quang như sau:

- Các chuyển mạch on/off được dùng làm các đầu phát và đầu thu cách ly trong thiết bị đo thử. Bộ chuyển mạch 1x2 cho phép lựa chọn kênh và được dùng cho chuyển mạch bảo vệ (để định hướng lại lưu lượng khi sợi quang bị đứt).
- Các chuyển mạch 1xN được dùng để kiểm tra và đo các linh kiện quang, kiểm tra từ xa các hệ thống thông tin sợi quang.
- Các chuyển mạch 2x2 được dùng để kết nối thẳng nút trong các mạng quang. Chuyển mạch 2x2 thường được ứng dụng trong các mạng FDDI. Khi một trạm nào đó bị hư hỏng hoặc bị mất nguồn, bộ chuyển mạch sẽ tự động thay đổi sang trạng thái nghẽn, do đó đảm bảo luồng lưu lượng không bị ảnh hưởng khi nút bị hư hỏng.

Các chuyển mạch đơn được chế tạo theo các kiểu khoá (latching) hoặc không khoá (nonlatching). Loại khoá sẽ giữ nguyên trạng thái (vị trí) của chuyển mạch nếu nguồn bị mất.

Nguyên lý hoạt động của các chuyển mạch đơn

Nguyên lý hoạt động của các chuyển mạch đơn điển hình thường dựa trên: điện-quang, quang cơ học, nhiệt quang. Hình 6.25 trình bày một số nguyên lý hoạt động của bộ chuyển mạch.

Nếu chuyển mạch thiên áp của một bộ khuếch đại quang bán dẫn (SOA- Semiconductor Optical Amplifier) sang hai trạng thái on/off thì tạo ra được một chuyển mạch điện-quang (hình 6.25. (a)) vì một SOA chỉ khuếch đại ánh sáng khi nó được phân cực và hấp thụ ánh sáng khi nó không được phân cực.

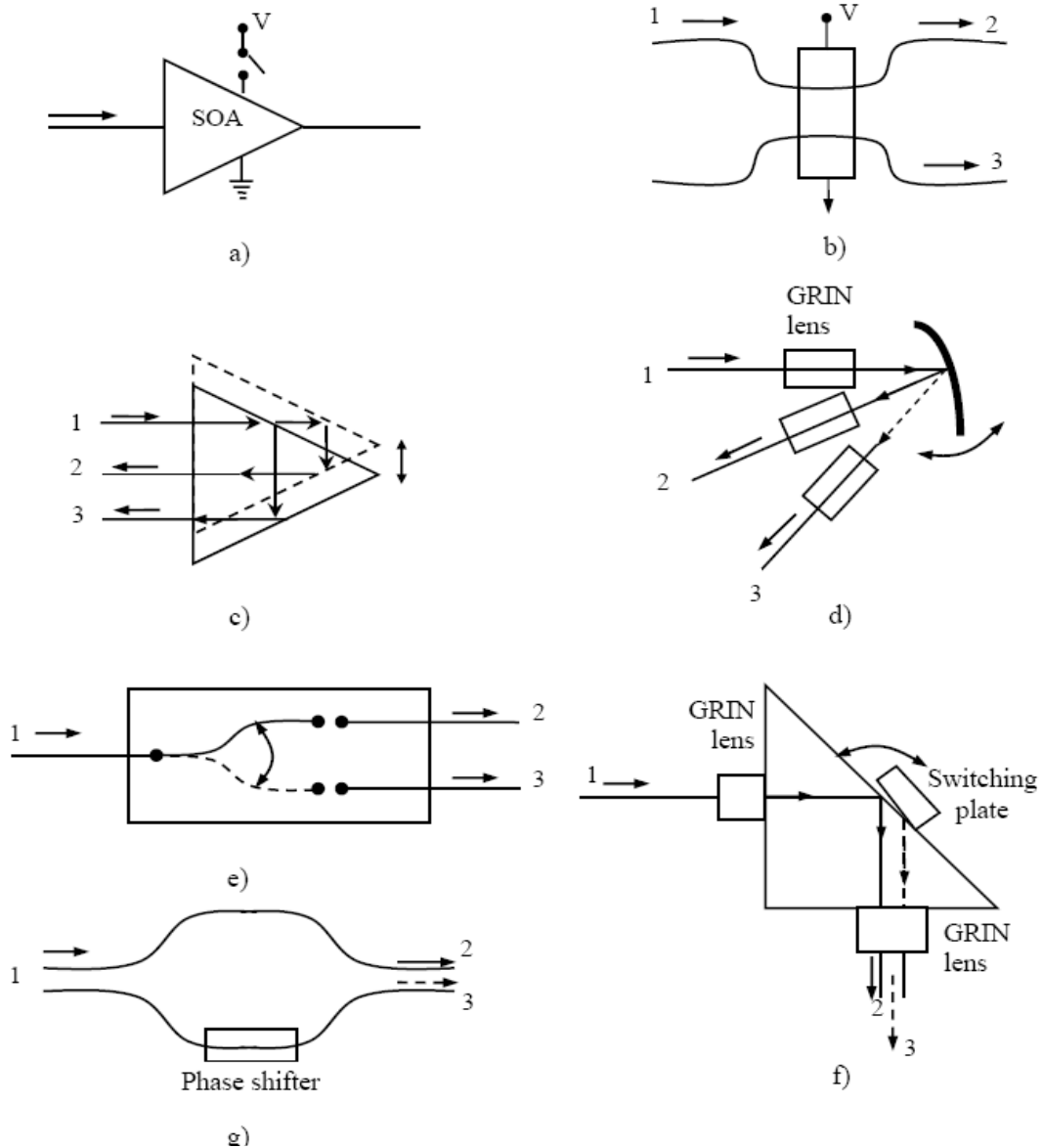
Hình 6.25(b) trình bày một ví dụ khác của chuyển mạch EO, trong đó tỉ số ghép của bộ ghép ống dẫn sóng phụ thuộc vào điện áp áp vào. Thay đổi tỉ số ghép bằng cách dùng LiNbO₃ để chế tạo lớp trên cùng của bộ ghép vì LiNbO₃ là loại nhiên liệu có chỉ số khúc xạ thay đổi theo giá trị của điện áp áp vào.

Chuyển mạch quang cơ học hoạt động dựa trên chuyển động cơ học của các linh kiện quang. Ví dụ, di chuyển lăng kính trong hình 6.25(c) theo chiều dọc sẽ cho phép chuyển mạch một tín hiệu quang từ sợi 2 sang sợi 3.

Ta cũng có thể đạt được kết quả tương tự khi đặt nhẹ lên trụ một gương hình cầu (hình 6.25(d)). Các thấu kính GRIN (graded-index) sẽ làm cho việc chuyển tiếp ánh sáng ghép từ/vào sợi quang được dễ dàng hơn.

Hình 6.25(e) trình bày ví dụ về chuyển mạch quang. Một cặp sợi quang ở ngõ vào chuyển từ vị trí này sang vị trí khác để thực hiện việc chuyển mạch tín hiệu quang.

Nguyên lý của việc làm mất tác dụng của toàn bộ ánh sáng phản xạ bên trong (FTIR Frustration of Total Internal Reflection) được ứng dụng để chế tạo bộ chuyển mạch được trình bày trong hình 6.25(f). Nhắc lại là một phần ánh sáng sẽ truyền qua môi trường khúc xạ khác ngay cả khi không có ánh sáng phản xạ bên trong. Ta gọi ánh sáng được truyền qua này là sóng suy biến (evanescent wave). Nhờ hiệu ứng này, khi lá chuyển mạch được gắn với lăng kính thì sẽ tạo ra ánh sáng phản xạ bên trong. Khi lá chuyển mạch (switching plate) tiến tới gần lăng kính, thì toàn bộ ánh sáng phản xạ bên trong bị mất tác dụng, kết quả là chùm ánh sáng phản xạ sẽ di chuyển dần dần sang hướng khác.



Hình 6.25. Nguyên lý hoạt động của các bộ chuyển mạch quang:

- (a) chuyển mạch on/off dùng SOA;
- (b) bộ ghép ống dẫn sóng chế tạo từ LiNbO₃;
- (c) chuyển mạch dùng lăng kính chuyển động;
- (d) chuyển mạch dùng gương hình cầu;
- (e) chuyển mạch bằng cách di chuyển sợi quang;
- (f) chuyển mạch ứng dụng hiệu ứng FTIR;
- (g) chuyển mạch quang-nhiệt sử dụng bộ giao thoa Mach-Zehnder.

Do đó, bằng cách di chuyển lá chuyển mạch hướng tới lăng kính, ta có thể định hướng tín hiệu ánh sáng sang sợi 3. Khi lá chuyển mạch không tiếp xúc với lăng kính, sẽ xảy ra hiện tượng phản xạ ánh sáng bên trong và tín hiệu

quang đi vào sợi 2. Chú ý là quá trình chuyển động cơ học của các linh kiện quang xảy ra rất nhanh, rất ít và chắc chắn. Nên hiện nay, các bộ chuyển mạch quang cơ học đang được sử dụng phổ biến nhất.

Hình 6.25(g) trình bày ví dụ về chuyển mạch quang nhiệt. Một bộ giao thoa Mach-Zehnder kết hợp với một bộ dịch pha gắn trong mỗi nhánh giao thoa. Bằng hơi nóng, ta có thể điều khiển số lượng bộ dịch pha, nghĩa là có thể định hướng tín hiệu quang sang sợi 2 hoặc sợi 3.

Các chuyển mạch quang nhiệt có tốc độ chuyển mạch nhanh hơn so với các bộ chuyển mạch quang cơ học, và quan trọng nhất là, chúng có thể được thực hiện theo công nghệ trạng thái rắn planar (planar solid-state) như các ma trận chuyển mạch lớn.

Một số tham số chính quy định đặc tính của các bộ chuyển mạch:

- Tỉ số tắt mở (extinction ratio): thể hiện đặc tính của bộ chuyển mạch on/off. Đây là tỉ số giữa năng lượng ánh sáng khi chuyển mạch ở trạng thái on và năng lượng ánh sáng khi chuyển mạch ở trạng thái off. Giá trị này càng cao càng tốt, thường nằm trong khoảng từ 45 đến 50 dB.
- Suy hao xen (insertion loss): là đơn vị đo công suất suy hao do bộ chuyển mạch gây ra thường có giá trị khoảng 0.5 dB.
- Nhiễu xuyên âm (crosstalk): tỉ số giữa công suất ngõ ra được tạo ra bởi ngõ vào mong muốn và công suất ngõ ra được tạo ra bởi ngõ vào không mong muốn. Giá trị này càng cao càng tốt, thường khoảng 80 dB.
- Thời gian chuyển mạch (switching time): là tham số rất quan trọng. Khi sử dụng các bộ lọc hiệu chỉnh được, thời gian chuyển mạch yêu cầu phụ thuộc vào các ứng dụng của chuyển mạch. Đối với các mạng chuyển mạch kênh ngày nay, thời gian chuyển mạch khoảng cỡ μs , thậm chí cỡ ms, nhưng đối với các mạng quang chuyển mạch gói, thời gian chuyển mạch chỉ khoảng vài ns, thậm chí khoảng ps. Các bộ chuyển mạch đơn quang-cơ học và quang-nhiệt có thời gian chuyển mạch nằm trong khoảng từ 2 đến 20 ms, trong khi các bộ chuyển mạch đơn quang-điện có thời gian chuyển mạch cỡ ns.

Ngoài những tham số kể ra trên đây, trong tài liệu tham khảo đặc tính của phần tử chuyển mạch còn có một số tham số như dải bước sóng hoạt động, PDL, và nhiệt độ phòng.

b) Các khối chuyển mạch quang lớn (multistage/large optical switch)

Các khối chuyển mạch quang với số lượng cổng từ vài trăm đến vài ngàn đang được nghiên cứu cho hệ thống mạng quang thế hệ tiếp theo. Khi thiết kế các khối chuyển mạch quang lớn, cần quan tâm đến các vấn đề sau:

- *Số lượng của các phần tử chuyển mạch cần thiết: các bộ chuyển mạch lớn được tạo thành từ các phần tử chuyển mạch theo nhiều cách khác nhau, như sẽ trình bày bên dưới. Chi phí và độ phức tạp của khối chuyển mạch phụ thuộc vào số phần tử chuyển mạch được yêu cầu, cách đóng gói, ghép nối, phương pháp chế tạo và điều khiển.*
- *Tính đồng nhất của suy hao: các bộ chuyển mạch có thể tạo ra suy hao khác nhau cho từng kết nối khác nhau của ngõ vào và ngõ ra. Khối chuyển mạch càng lớn thì sự khác nhau về suy hao càng nhiều. Đánh giá tính đồng nhất của suy hao bằng cách xem xét số phần tử chuyển mạch tối thiểu và tối đa trên đường dẫn quang đối với từng kết nối ngõ vào/ra khác nhau.*
- *Số điểm nối chéo trong khối chuyển mạch: thông số này đặc biệt quan trọng trong việc chế tạo các khối chuyển mạch quang. Một số khối chuyển mạch quang được tích hợp từ nhiều bộ chuyển mạch trên một mạch duy nhất. Không giống như trong các mạch điện tích hợp (IC), ở đó, các kết nối giữa nhiều linh kiện khác nhau có thể nằm trên nhiều lớp, trong các mạch quang tích hợp, tất cả các kết nối đều được tạo ra trên một lớp duy nhất bằng các ống dẫn sóng. Nếu các đường dẫn của hai ống dẫn sóng cắt nhau (tạo ra điểm nối chéo) thì sẽ xảy ra các hiệu ứng không mong muốn như suy hao công suất và hiện tượng nhiễu xuyên âm. Để hiện tượng suy hao công suất và nhiễu xuyên âm không gây ảnh hưởng đến khối chuyển mạch thì phải tối thiểu hoá hoặc hạn chế hoàn toàn các điểm cắt nhau này.*
- *Các đặc tính nghẽn: về chức năng, có thể chia khối chuyển mạch thành hai loại: nghẽn và không nghẽn. Khối chuyển mạch gọi là không nghẽn khi một cổng ngõ vào nào đó đang rỗi có thể kết nối với bất kỳ ngõ ra nào cũng đang rỗi. Ví dụ, một khối chuyển mạch không nghẽn có khả năng thực hiện mọi kết nối từ ngõ vào đến ngõ ra. Nếu trong khối chuyển mạch có một số kết nối không thể thực hiện được, thì khối chuyển mạch này được gọi xem là có nghẽn. Phần lớn các ứng dụng đều yêu cầu chuyển mạch không nghẽn. Với chuyển mạch không nghẽn có thể phân thành hai loại là: chuyển mạch không nghẽn theo nghĩa rộng (wide-sense nonblocking), và chuyển mạch không nghẽn theo nghĩa hẹp (strict-sense non-blocking). Theo nghĩa rộng, bất kỳ ngõ vào nào chưa được sử dụng cũng có thể kết nối với bất kỳ ngõ ra nào cũng chưa được sử dụng mà không cần phải định tuyến lại các kết nối đang tồn tại; khối chuyển mạch dạng này sử dụng các thuật toán định tuyến đặc trưng để định tuyến cho các kết nối hiện có sao cho đảm bảo không xảy ra nghẽn cho các kết nối tiếp sau đó. Theo nghĩa hẹp, bất kỳ ngõ vào nào chưa được sử dụng cũng được kết nối với bất kỳ ngõ ra nào*

cũng chưa được sử dụng mà không cần quan tâm đến trạng thái của các kết nối trước đó trong khối chuyển mạch.

Một khối chuyển mạch không nghẽn yêu cầu việc định tuyến lại cho các kết nối để đảm bảo thuộc tính không nghẽn được gọi là khối chuyển mạch không nghẽn sắp xếp lại (rearrangeably non-blocking switch). Việc định tuyến lại các kết nối có thể hoặc không thể được chấp nhận còn tùy thuộc vào ứng dụng vì chắc chắn các kết nối sẽ bị ngắt trong một khoảng thời gian nào đó khi chúng được chuyển mạch sang đường dẫn khác. So với các cấu trúc chuyển mạch không nghẽn theo nghĩa rộng, ưu điểm của các cấu trúc chuyển mạch không nghẽn sắp xếp lại là sử dụng càng ít các bộ chuyển mạch nhỏ thì kích thước của khối chuyển mạch càng lớn. Tuy nhiên, khi các cấu trúc không nghẽn sắp xếp lại sử dụng càng ít bộ chuyển mạch nhỏ thì thuật toán điều khiển để thiết lập kết nối của chúng càng phức tạp, nhưng nói chung với công nghệ vi xử lý áp dụng trong khối chuyển mạch ngày nay, thì đây là vấn đề nhỏ, không quan trọng. Nhược điểm lớn nhất của các khối chuyển mạch không nghẽn sắp xếp lại là không thể phục vụ cho các ứng dụng không cho phép ngắt các kết nối đang tồn tại, thậm chí trong khoảng thời gian cực ngắn khi cần thiết lập một kết nối mới.

Rõ ràng, tùy thuộc vào ứng dụng của khối chuyển mạch trên thực tế một thông số có thể được ưu tiên hơn các thông số khác.

Bảng sau đây trình bày sự so sánh giữa các cấu trúc chuyển mạch khác nhau, trong đó cấu trúc Spanke dùng các bộ chuyển mạch $1 \times n$, các cấu trúc còn lại đều hình thành từ bộ chuyển mạch 2×2 .

Bảng 1.2 So sánh giữa các cấu trúc chuyển mạch khác nhau.

	Loại không nghẽn	Số bộ chuyển mạch	Suy hao lớn nhất	Suy hao nhỏ nhất
Crossbar	Wide-sense	n^2	$2n-1$	1
Clos	Strict-sense	$4\sqrt{2}n^{1.5}$	$5\sqrt{2n} - 5$	3
Spanke	Strict-sense	$2n$	2	2
Benes	Rearrangeable	$\frac{n}{2}(2\log_2 n - 1)$	$2\log_2 n - 1$	$2\log_2 n - 1$
Spanke-Benes	Rearrangeable	$\frac{n}{2}(n - 1)$	n	$\frac{n}{2}$

6.4.6. Bộ chuyển đổi bước sóng

Bộ chuyển đổi bước sóng là thiết bị chuyển đổi tín hiệu có bước sóng này ở đầu vào ra thành tín hiệu có bước sóng khác ở đầu ra. Đối với hệ thống WDM, bộ chuyển đổi bước sóng cho nhiều ứng dụng hữu ích khác nhau:

- Tín hiệu có thể đi vào mạng với bước sóng không thích hợp khi truyền trong mạng WDM. Chẳng hạn như hiện nay các thiết bị WDM trên thế giới đa số đều chỉ có khả năng hoạt động trên các bước sóng thuộc băng C và băng L, nhưng tín hiệu SDH hoạt động với bước sóng 1310 nm có thể truyền trên hệ thống WDM nhờ các bộ chuyển đổi bước sóng đặt ở biên giới giữa mạng WDM và mạng SDH, chuyển đổi tín hiệu từ bước sóng 1310 nm sang tín hiệu tương thích với bước sóng theo qui định ITU-T hoạt động ở vùng 1550 nm.
- Bộ chuyển đổi khi được trang bị trong các cấu hình nút mạng WDM giúp sử dụng tài nguyên bước sóng hiệu quả hơn, linh động hơn.

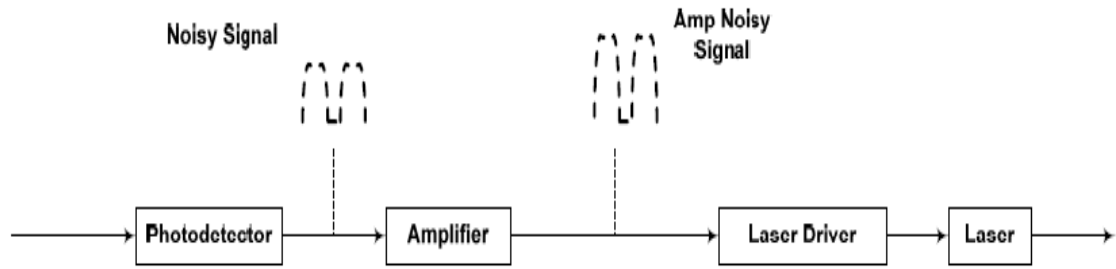
Có bốn phương pháp chế tạo bộ chuyển đổi bước sóng: phương pháp quang-điện, phương pháp cửa quang, phương pháp giao thoa và phương pháp trộn bước sóng. Phương pháp trộn bước sóng là phương pháp toàn quang, hoạt động hoàn toàn không dựa vào tín hiệu điện, tuy nhiên hiện tại công nghệ chế tạo theo phương pháp này vẫn chưa đủ hoàn thiện để có thể thương mại hoá.

a) Tạo bằng phương pháp quang-điện

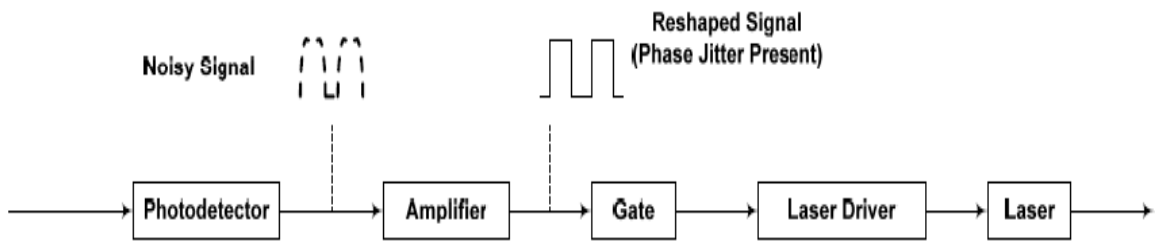
Đây là phương pháp chế tạo bộ chuyển đổi bước sóng đơn giản và phổ biến nhất hiện nay.

Tín hiệu đầu vào trước hết được chuyển sang dạng tín hiệu điện, tái tạo lại và sau đó được một bộ phát laser phát bước sóng khác. Thường các bộ chuyển đổi bước sóng đầu vào biến đổi-đầu ra cố định dùng phương pháp chế tạo này. Tính trong suốt của thiết bị loại này phụ thuộc vào kiểu tái tạo (regeneration) của thiết bị đối với tín hiệu:

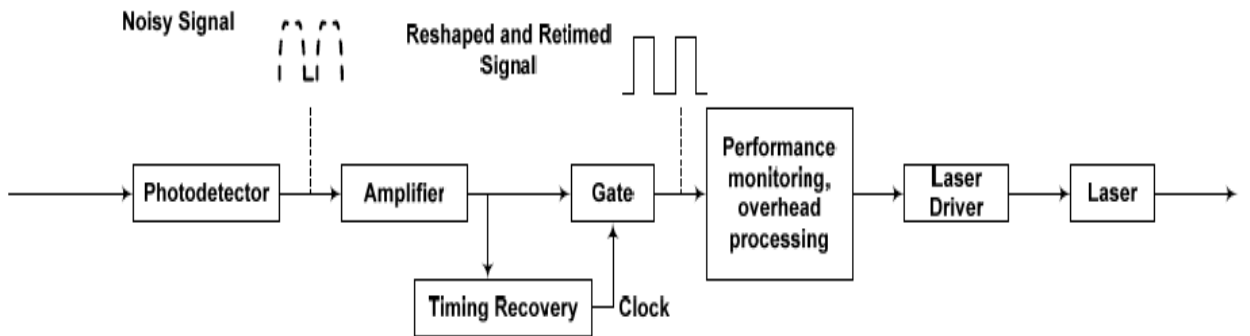
- Tái tạo 1R: đầu thu đơn giản chỉ chuyển đổi tín hiệu đầu vào từ dạng năng lượng các hạt photon ánh sáng sang các hạt điện tử, sau đó các hạt điện tử được khuếch đại bởi một bộ khuếch đại tương tự RF (Radio Frequency) và phát ra tia laser với bước sóng thích hợp.
- Tái tạo 2R: phương pháp tái tạo này chỉ áp dụng được khi tín hiệu đầu vào là tín hiệu số. Tín hiệu được sửa lại dáng xung (reshaped) nhờ cho đi qua cổng logic, không thực hiện đồng bộ lại tín hiệu (retimed) nên phương pháp chế tạo này dễ làm nảy sinh hiện tượng Jitter.
- Tái tạo 3R: thực hiện đồng thời việc sửa dáng xung và đồng bộ lại cho tín hiệu. Phương pháp này giúp xoá bỏ những ảnh hưởng đến dạng của tín hiệu do các yếu tố như: phi tuyến tính, tán sắc trong sợi quang, nhiễu của bộ khuếch đại... Tuy nhiên, để đồng bộ lại tín hiệu mỗi bộ chuyển đổi bước sóng chỉ hoạt động tương ứng với một luồng tín hiệu số có tốc độ bit nhất định, giảm tính trong suốt của thiết bị.



(a)



(b)



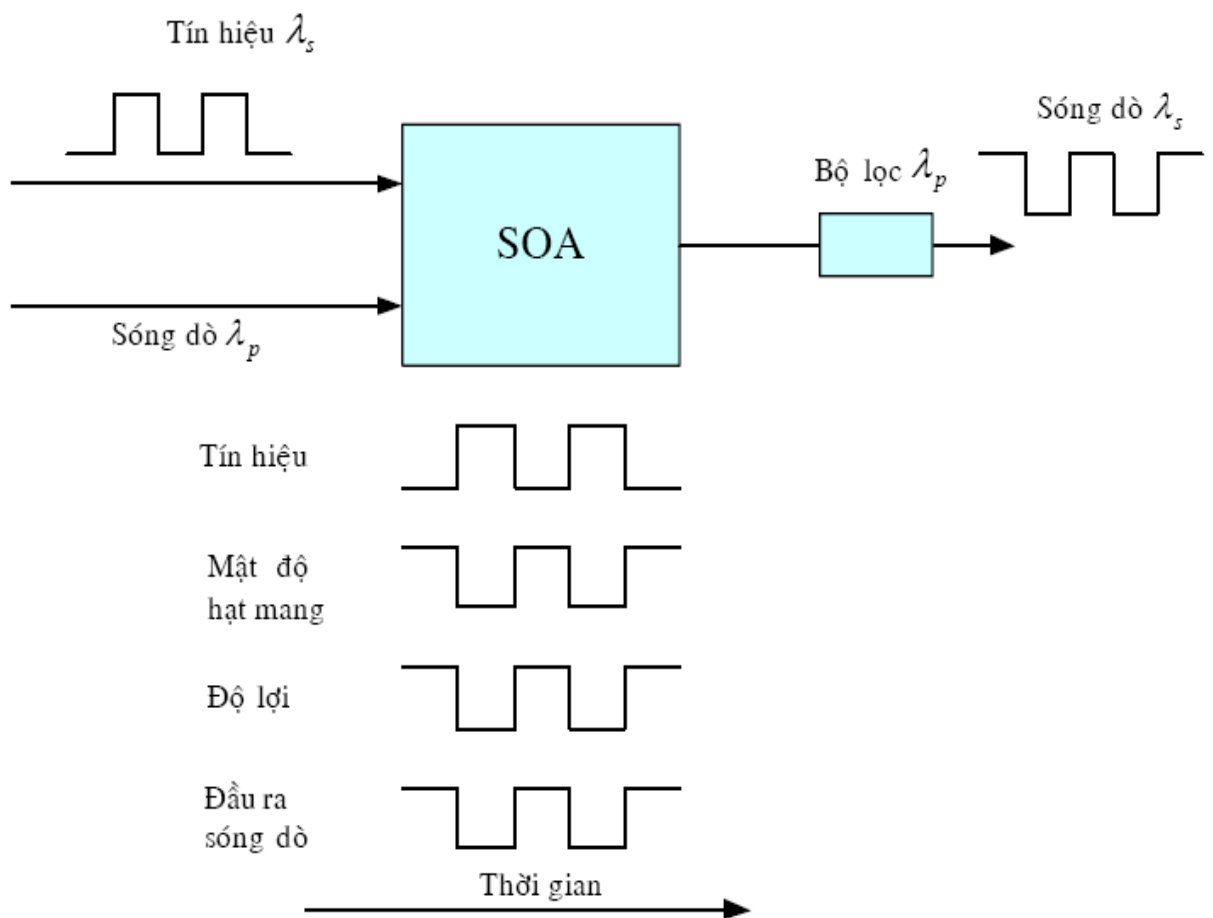
(c)

Hình 6.26. Các loại chuyển đổi bước sóng quang điện: (a) 1R; (b) 2R; (c) 3R

b) Chế tạo bằng phương pháp cửa quang

Phương pháp chế tạo các bộ chuyển đổi bước sóng dùng phương pháp cửa quang tận dụng tính chất của một số thiết bị quang có đặc tính đầu ra thay đổi theo cường độ tín hiệu. Sự thay đổi này được chuyển đến tín hiệu chưa được điều chế, gọi là tín hiệu dò (probe signal) cấu hình cho đi xuyên qua thiết bị. Tại đầu ra, tín hiệu dò mang thông tin chứa trong tín hiệu đầu vào. Các thiết bị chế tạo theo phương pháp này thường thuộc dạng đầu vào thay đổi-đầu ra cố định, hoặc đầu vào thay đổi-đầu ra thay đổi tùy theo tín hiệu dò là cố định hoặc có thể điều chỉnh bước sóng không.

Kỹ thuật chính của phương pháp này là điều chế chéo độ lợi CGM (Cross-Gain Modulation), tận dụng hiệu ứng phi tuyến trong một bộ khuếch đại quang bán dẫn SOA, tận dụng tính chất của SOA là có độ lợi thay đổi theo cường độ tín hiệu đi vào. Nguyên lý hoạt động của một thiết bị SOA được cấu hình làm bộ chuyển đổi bước sóng được minh họa như trên hình sau.



Hình 6.27. Bộ chuyển đổi bước sóng chế tạo theo phương pháp cửa quang.

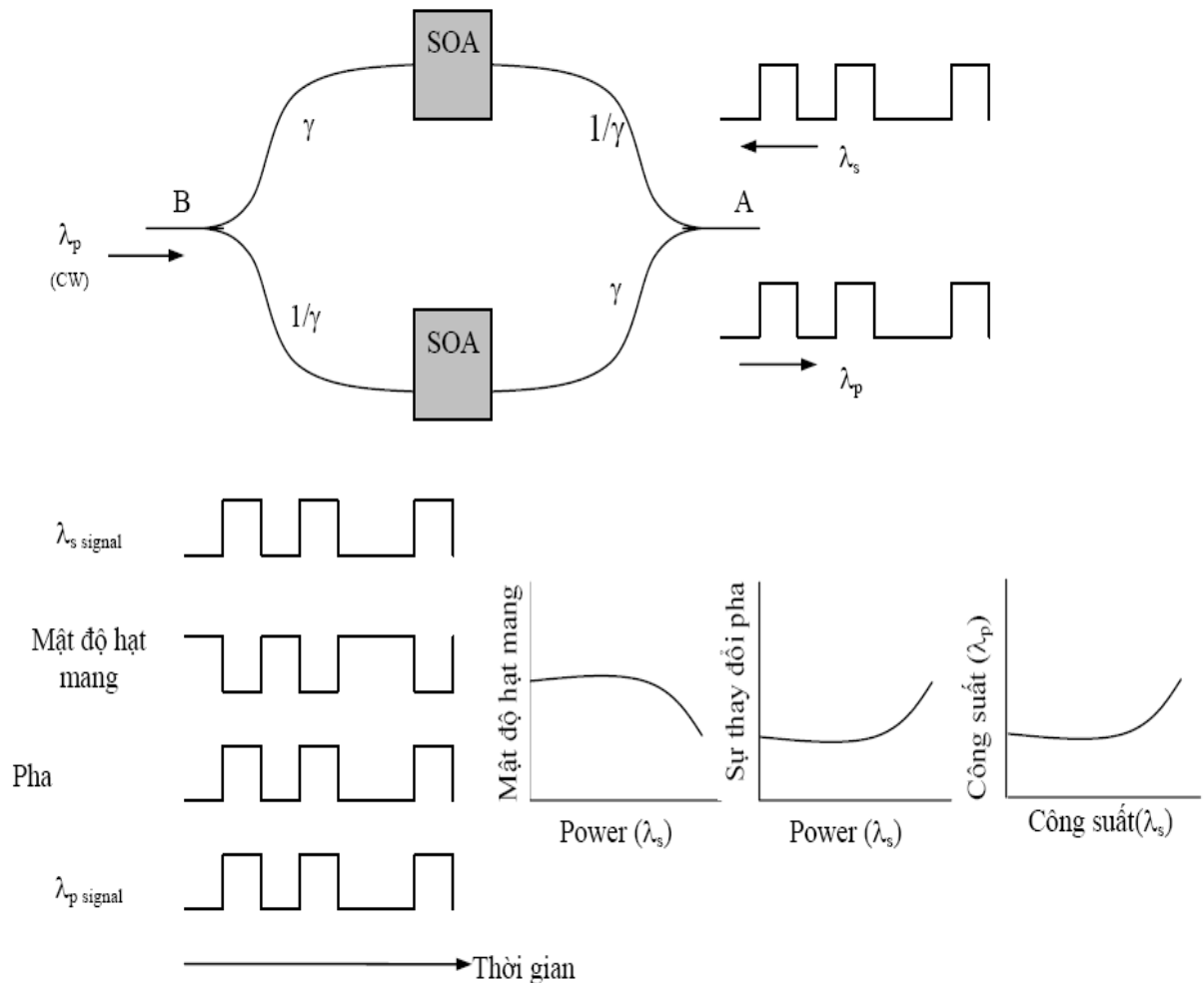
c) Chế tạo bằng phương pháp giao thoa

Kỹ thuật chính của phương pháp này chính là điều chế chéo pha. Khi cường độ sóng mang trong bộ khuếch đại thay đổi cùng với tín hiệu đầu vào,

nó làm thay đổi chiết suất của môi trường độ lợi, dẫn đến thay đổi pha của tín hiệu dò.

Hiện tượng điều chế pha kiểu này có thể chuyển sang điều chế biên độ bằng cách dùng bộ lọc Mach-Zehnder. Trong đó, cả hai nhánh của bộ lọc Mach-Zehnder đều có cùng chiều dài, mỗi nhánh dùng kết hợp thêm với một bộ khuếch đại SOA

Tại đầu vào của bộ lọc Mach-Zehnder dùng bộ Coupler tách tín hiệu đi theo hai nhánh của bộ lọc theo tỉ lệ không đều nhau. Do cường độ tín hiệu đi trên mỗi nhánh không đều nhau nên khi đi qua các bộ SOA sẽ bị dịch pha các lượng không giống nhau. Theo nguyên lý hoạt động của MZI, sự lệch pha giữa hai tín hiệu này được chuyển đến một tín hiệu điều chế biên độ ở đầu ra truyền với bước sóng khác.



Hình 6.28. Biến đổi bước sóng bằng điều chế xuyên pha

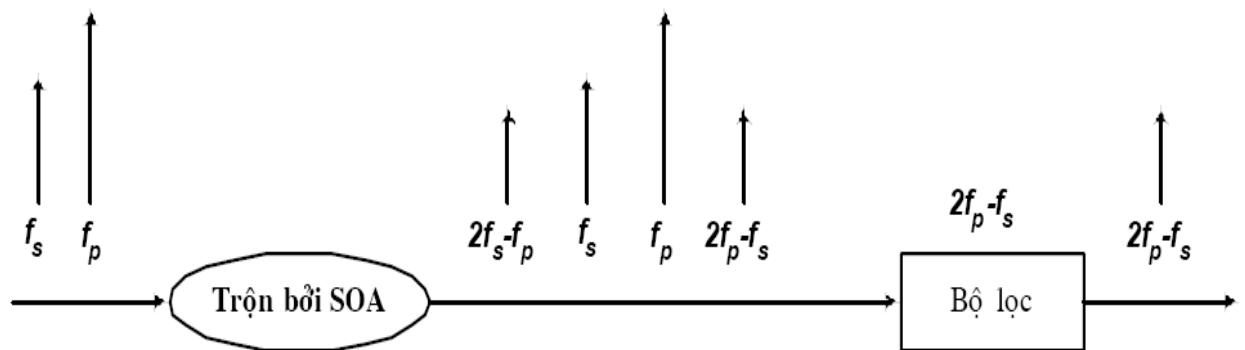
sử dụng bộ khuếch đại quang bán dẫn có gắn bộ lọc Mach-Zehnder bên trong

d) Chế tạo bằng phương pháp trộn bước sóng

Phương pháp chế tạo này dựa trên hiện tượng trộn bốn bước sóng, trong đó nếu có ba bước sóng f_1, f_2, f_3 cùng truyền trong sợi quang thì theo hiện

tương phi tuyến tính sẽ xuất hiện sóng ảnh hưởng do hiệu ứng phi tuyến tính được tính là: $f_1+f_2-f_3$. Ứng dụng cho bộ chuyển đổi bước sóng khi $f_1 = f_2$ và sau đó cho qua bộ khuếch đại SOA. Giả sử sóng vào kí hiệu là f_s và sóng dò là f_p , bộ khuếch đại SOA được cấu hình sao cho một trong hai bước sóng sinh do hiện tượng FWM $2f_p-f_s$ và $2f_s-f_p$ nằm trong băng thông hoạt động của tín hiệu, khi đó ta đã thực hiện được chức năng chuyển đổi bước sóng.

Ưu điểm của phương pháp chế tạo này là tính trong suốt đối với các định dạng tín hiệu, nghĩa là có thể hoạt động với nhiều tốc độ bit khác nhau. Tuy nhiên, nhược điểm là khi khoảng cách giữa bước sóng tín hiệu f_s và bước sóng dò f_p tăng thì hiệu quả chuyển đổi bước sóng sẽ giảm.



Hình 6.29. Chuyển đổi bước sóng bằng cách trộn bốn bước sóng trong bộ khuếch đại quang

Chương 7

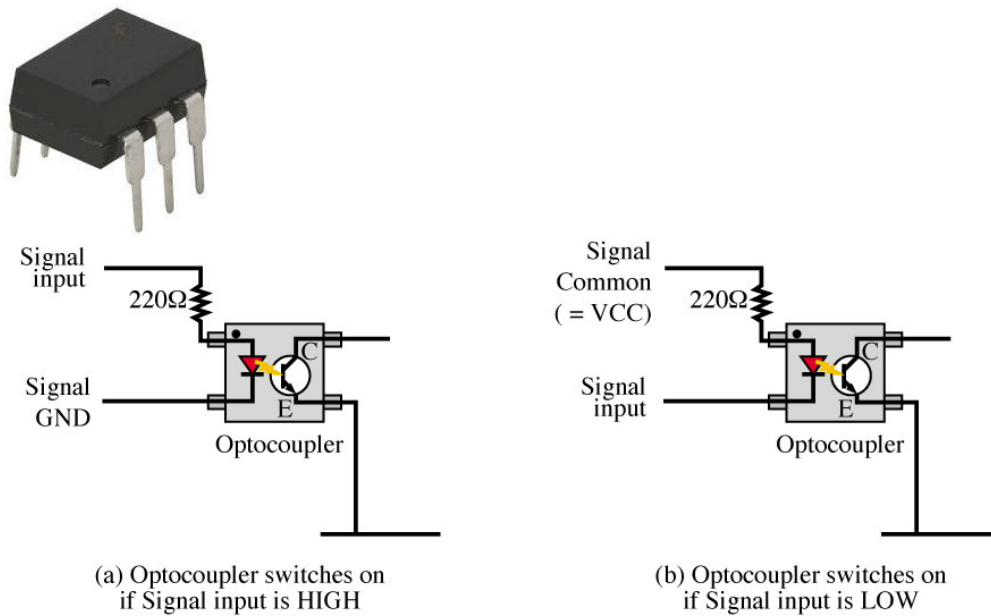
GHÉP QUANG VÀ KHUẾCH ĐẠI QUANG

7.1. Ghép quang

Bộ ghép quang còn gọi là Photo coupled isolator, Photo-couplers, Photo-coupled pairs và Optically Coupled pairs. Từ thông thường nhất cho linh kiện này là Opto-Couplers. Bộ ghép quang dùng để truyền đạt tín hiệu và đồng thời tạo sự cách điện giữa những mạch điện. Ngoài ra nó còn dùng tránh các vòng đất (ground circuit circuit terrestre) gây nhiễu trong mạch điện. Sự truyền đạt tín hiệu được thực hiện qua ánh sáng.

7.1.1. Cơ chế hoạt động

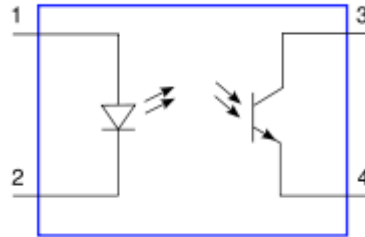
Thông thường bộ ghép quang gồm 1 diot với vật liệu bán dẫn loại III/V (v.d.GaAs) phát ra tia hồng ngoại và 1 phototransistor với vật liệu silic. Với dòng điện thuận, diot phát ra bức xạ hồng ngoại với chiều dài sóng khoảng 650-950nm. Dòng điện thuận I_F có cường độ khoảng 1-30mA.



Hình 7.1. Opto-Couplers

Năng lượng bức xạ này được chiếu lên trên bề mặt của phototransistor (face to face) hay chiếu gián tiếp qua một môi trường dẫn quang. Bộ ghép quang face to face thường được dùng nhất.

Đầu tín hiệu được phân phát (LED hồng ngoại) trong bộ ghép quang biến thành tín hiệu ánh sáng. Sau đó tín hiệu ánh sáng được phân nhận (photodiode, phototransistor, IC có tổ hợp diode) biến lại thành tín hiệu điện



Hình 7.2. Nguyên lý làm việc của Opto-Couplers

Tùy theo loại bộ ghép quang tần số truyền đạt tín hiệu có thể từ DC đến 20MHz. Bộ ghép quang được 1 vỏ nhựa loại DIP (Dual-In-Line-Plastic) bảo vệ. Vỏ nhựa này chắn sáng và cách điện. Phân phát và phân thu được ghép bằng 1 loại nhựa trong suốt và cách điện.

7.1.2. Các tính chất quan trọng

1. Tính cách điện

Như đã nói bộ ghép quang thường được dùng để cách điện giữa 2 mạch điện có điện thế cách biệt khá lớn. Bộ ghép quang có thể làm việc với dòng điện 1 chiều hay tín hiệu điện có tần số khá cao. Đặc biệt với thể tích nhỏ bé, bộ ghép quang tỏ ra ưu việt hơn so với biến thế.

2. Điện trở cách điện

Đó là điện trở với dòng điện 1 chiều giữa ngõ vào và ngõ ra của bộ ghép quang. Nó có trị số bé nhất là $10^{11}\Omega$, như thế đủ đáp ứng yêu cầu thông thường. Như thế chúng ta cần chú ý, với dòng điện rò trong khoảng nA có thể ảnh hưởng đến hoạt động của mạch điện, ví dụ khi dòng điện rò chạy vào cực gốc của phototransistor còn để trống. Gặp trường hợp này ta có thể tạo những khe trống trên mạch in hay 1 đường mạch in nối với điện thế đất giữa ngõ ra và ngõ vào. Với bộ ghép quang ta cần có mạch in loại tốt.

3. Điện dung ghép nối

Sự miễn nhiễm tín hiệu đồng hành (common mode transient immunity)

Cấu trúc của bộ ghép quang gồm có phototransistor, LED, phần cơ. Giữa các phần tử này có thể tạo ra 1 điện dung từ 0.3...2pF. Điện dung này được đo khi chân ở ngõ vào cũng như chân ở ngõ ra được nối tắt. Với sự thay đổi cao áp khá nhanh ($500V/\mu s$ – ví dụ do những xung điện nhiễu trong lưới điện) giữa ngõ ra và ngõ vào, điện dung ký sinh có thể truyền đi sự thay đổi này và xung điện ở ngõ ra có những gai nhọn. Trong trường hợp này, nên sử dụng bộ

ghép quang không có chân nối với cực gốc, và giữa cực thu và cực phát nên nối 1 tụ điện để làm giảm gai nhiễu xung ra. Để không tạo thêm điện dung ký sinh, với bộ ghép quang ta không nên dùng chân để cắm IC. Với trị số điện dung ghép nối càng bé ta có sự miễn nhiễu đồng hành càng tốt.

4. Điện thế cách ly:

Điện thế cách ly là điện thế cao nhất giữa ngõ vào và ra mà bộ ghép quang có thể chịu đựng nổi. Điện thế cách ly còn tùy thuộc vào cấu trúc của bộ ghép quang, không khí...

5. Hiệu ứng trường

Dưới 1 một thế khá cao giữa LED và phototransistor có khoảng cách khá gần, ta có 1 điện trường khá lớn. Nếu bộ ghép quang làm việc với điều kiện như thế liên tục vài ngày, các thông số của bộ ghép quang (đặc biệt là phototransistor) bị thay đổi.

Hiệu ứng trường càng rõ ràng hơn với nhiệt độ cao (100°) và 1 điện thế 1 chiều khá cao (1kV). Các thông số như độ khuếch đại, điện áp và dòng điện ngược có thể bị thay đổi, với 1 điện trường khá lớn

So với transistor, các thông số của LED rất ổn định dưới tác dụng của điện trường. Người ta có thể bảo vệ lớp chuyển tiếp pn của transistor silic bằng 1 màng ion trong suốt để chống lại ảnh hưởng của điện trường (Transparent Ion Shield – Trios)

6. Sự lão hoá

Với thời gian, công suất phát sáng của LED bị giảm đi, do đó ta có hệ số truyền đạt của 1 bộ ghép quang bé đi. Người ta tránh sự lão hoá của 1 bộ ghép quang bằng phương pháp “Burn in”. Sau khi sản xuất, các bộ ghép quang được cho làm việc với dòng điện và với nhiệt độ xung quanh khá lớn trong 1 thời gian (ví dụ 24 giờ). Do đó bộ ghép quang bị lão hoá trước và nó không bị lão hoá nhanh như các bộ ghép quang chưa qua “Burn in”. Để cho bộ ghép quang làm việc lâu dài không bị lão hoá nhanh, nhiệt độ xung quanh và dòng điện làm việc càng thấp càng tốt.

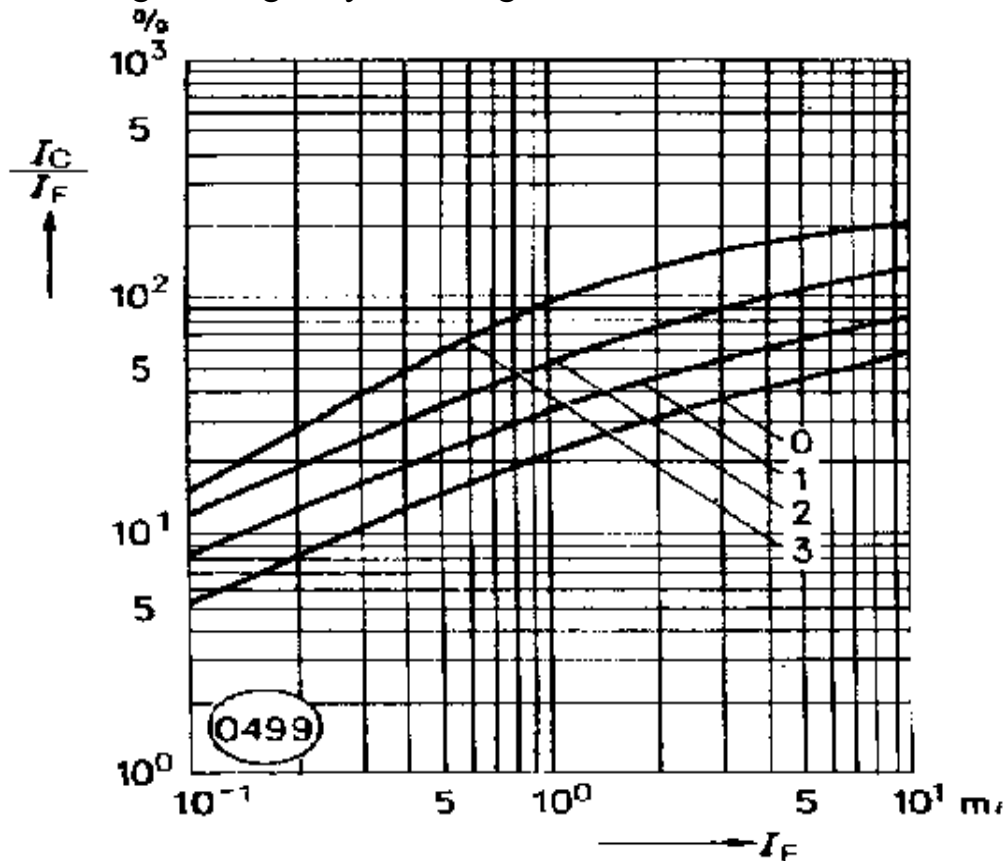
7. Hệ số truyền đạt

Hệ số truyền đạt (current transfer ratio-CTR) giống như độ khuếch đại dòng điện của 1 transistor. Hệ số truyền đạt là hệ số tính theo phần trăm cho biết dòng điện đi ra (ví dụ của 1 phototransistor) lớn hơn so với dòng điện vào của LED hồng ngoại trong 1 bộ ghép quang ($CTR = (I_C/I_F) \times 100\%$)

Theo sơ đồ mạch dưới, ta có thể đo được hệ số truyền đạt. Nguồn dòng I_F có thể tạo bằng 1 điện áp ổn định nối tiếp với 1 điện trở. Trong đặc trưng kỹ thuật của 4 loại bộ ghép quang CNY17...ta có sự liên hệ giữa dòng điện I_F qua LED và hệ số truyền đạt. Sự liên hệ này không tuyến tính. Cả cường độ chiếu sáng của LED hồng ngoại và độ khuếch đại của phototransistor cũng đều

gia tăng nhanh khi I_F tăng. Với dòng I_F khá lớn, đặt tuyến không còn dốc nhiều nữa. Cường độ chiếu sáng của LED không còn tăng theo I_F và phototransistor cũng bão hòa. Như thế bộ ghép quang chỉ hoạt động với tín hiệu tương đối bé.

Trong bộ ghép quang digital phần nhận là 1 mạch tổ hợp, trị số CTR không còn ý nghĩa. Ở đây người ta chỉ cần biết với cường độ dòng điện ở ngõ vào để có trạng thái High hay Low ở ngõ ra.



Hình 7.3. Hệ số truyền đạt

8. Độ rộng dải tần số - Tần số truyền đạt:

Các bộ ghép quang hiện nay có thể đạt đến tần số

- Bộ ghép quang loại transistor đến 250kHz.
- Bộ ghép quang với bộ nhận tổ hợp đơn giản (photodiode, transistor nhanh) đến 2MHz.
- Bộ ghép quang với bộ nhận là mạch tổ hợp (IC) đến 20 MHz.

7.1.3. Các sự lựa chọn khi dùng bộ ghép quang

Để đáp ứng các đòi hỏi cho từng ứng dụng các bộ ghép quang được chọn và thử nghiệm đặc biệt.

1/ Đảm bảo sự cách điện:

Với điện thế $V_{IO} = 500V$ và ở nhiệt độ $175^{\circ}C$ điện trở cách nhiệt phải $\geq 10^9 \Omega$. để đảm bảo sự cách điện này bộ ghép quang phải làm việc với các thông số giới hạn bằng những mạch điện bảo vệ.

2/Bộ ghép quang được thử nghiệm 100% để đảm bảo thời gian chuyển tiếp ngắn.

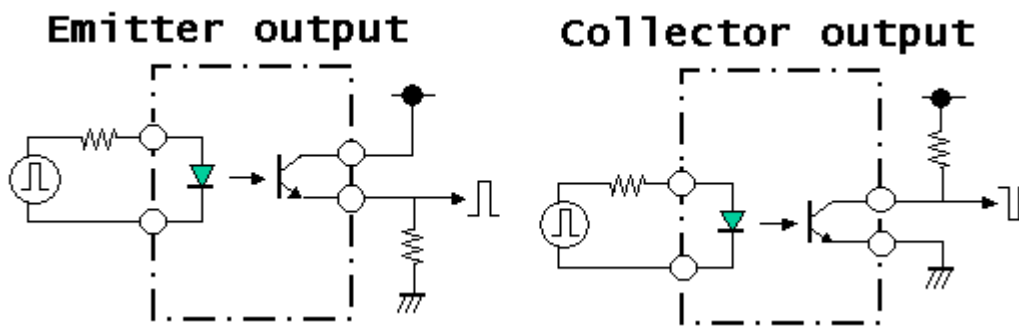
$$t_{on} \leq 4,5 \mu s \quad (I_F = 10mA)$$

$$t_{off} \leq 4,5 \mu s \quad (I_F = 10mA)$$

3/ Có độ ổn định cao hơn với ảnh hưởng môi trường:

Vì lý do kinh tế vỏ bọc bộ ghép quang không được làm bằng kim loại hay gốm mà làm bằng plastic dù phẩm chất tồi hơn. Trong những điều kiện nóng ($25-55^{\circ}C$) và ẩm (trên 90% độ ẩm tương đối, hàm ẩm trong không khí có thể thấm vào bên trong linh kiện và làm độc cách điện giảm đi. Người ta có thể dùng silicon bọc bên ngoài.

7.1.4. Bộ ghép quang với phototransistor

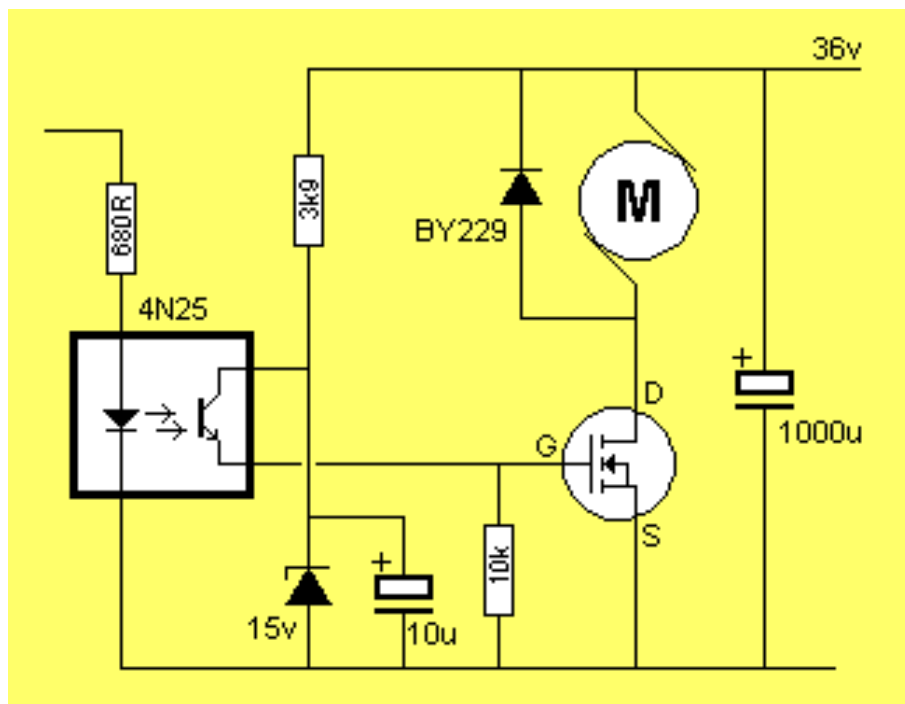
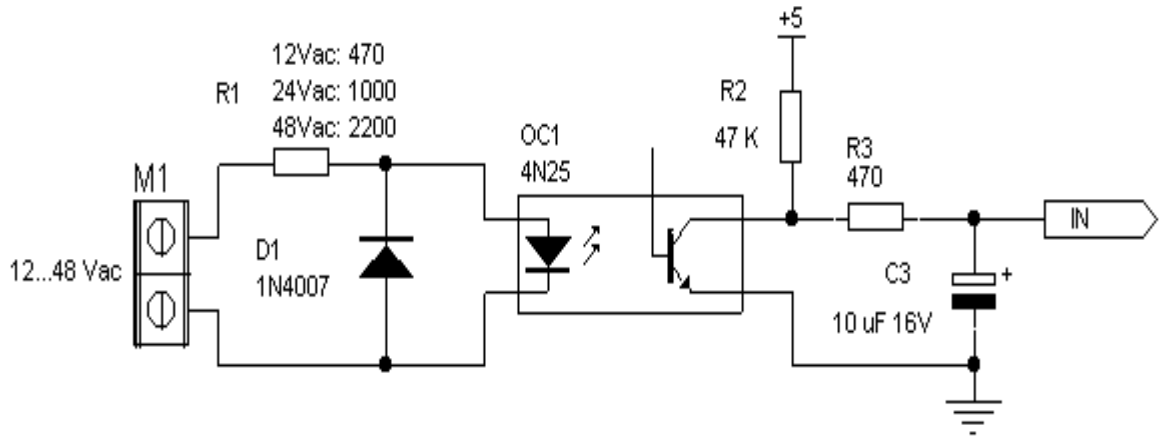


Hình 7.4.

Thông thường cực gốc của phototransistor được nối ra ngoài (ví dụ trong trường hợp với mạch phản hồi). Tuy nhiên bộ ghép quang vẫn làm việc trong trường hợp không có cực gốc. trong trường hợp không có cực gốc, bộ ghép quang có hệ số truyền đạt giữa LED và phototransistor lớn hơn, vì bề mặt cực gốc không bị che lấp 1 phần bởi công tắc của cực gốc. Tuy nhiên không có cực gốc bộ ghép quang vẫn có những bất lợi

- Bộ ghép quang làm việc không ổn định với nhiệt độ cao (vì dòng điện ngược tăng cao với nhiệt độ).
- Bộ ghép quang làm việc chậm hơn. Nếu ta nối giữa cực gốc và cực phát 1 điện trở bộ ghép quang làm việc nhanh hơn, dòng điện ngược bé hơn. Tuy nhiên hệ số truyền đạt cũng bé đi vì 1 phần dòng điện của cực gốc bị dẫn đi mất.

- Cường độ sáng của LED bị giảm đi, nhưng dòng quang điện của phototransistor gia tăng khi nhiệt độ tăng cao. Do đó bộ ghép quang làm việc khá ổn định với nhiệt độ.



Hình 7.5.

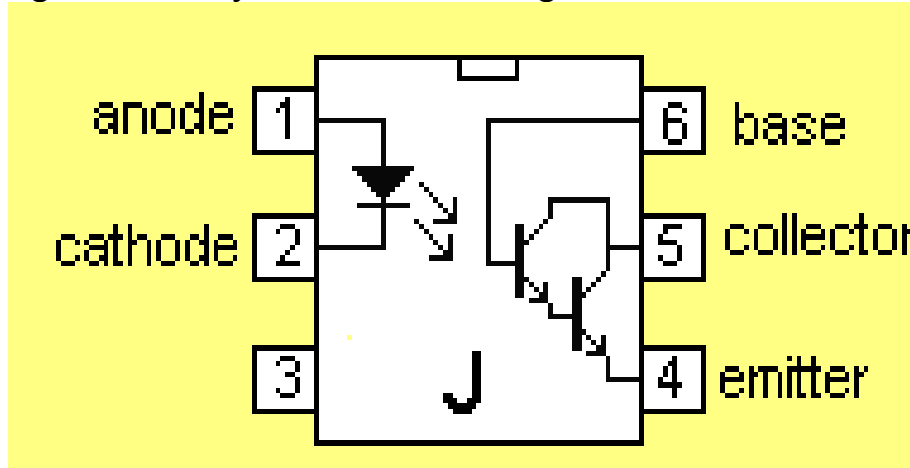
7.1.5. Bộ ghép quang với photo-darlingtontransistor

Hoạt động của một bộ ghép quang với photo-darlingtontransistor giống như với 1 phototransistor, nhưng với hệ số truyền đạt lớn hơn (từ 200...1500) nhờ sự khuếch đại khá lớn của darlington-transistor. Tuy nhiên với photo darlington-transistor ta có một số nhược điểm

- Thời gian đóng mở chậm
- Dòng tối tăng.

- Tùy thuộc nhiều vào nhiệt độ.

Với mạch điện không có điện trở ở giữa cực phát và cực gốc. Không có điện trở, bộ ghép quang có hệ số truyền đạt lớn với dòng điện qua diot nhỏ, nhưng bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ rất lớn. Với điện trở (trong khoảng $M\Omega$) bộ ghép quang có hệ số truyền đạt bé hơn nhưng làm việc tốt với nhiệt độ cao.

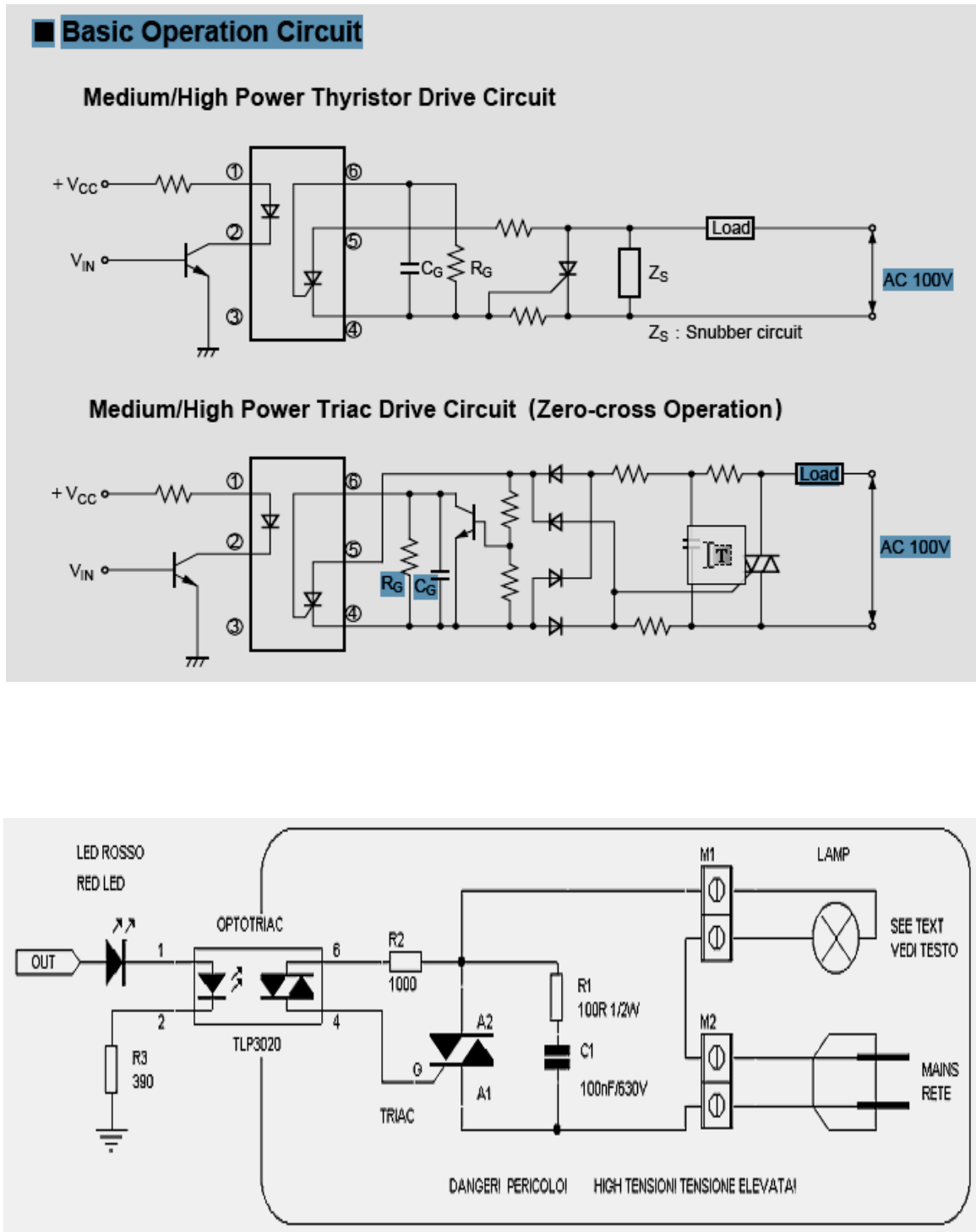


Hình 7.6.

7.1.6. Bộ ghép quang với photothyristor và phototriac

Với ánh sáng, ta có dòng điện I_B làm thông photothyristor dẫn điện. Để cho photoristor nhạy với ánh sáng nó chỉ có thể làm việc với điện áp và dòng điện bé vì cấu trúc của nó bé và mỏng.

Khi điện thế và cường độ dòng điện thay đổi nhanh theo thời gian, trị số dV/dt và di/dt khá lớn, thyristor có thể tự kích và dẫn điện ngoài ý muốn. Để chống lại hiệu ứng này, ta có thể nối 1 điện trở R_{gk} giữa catôt và Gate. Với trị số R_{gk} bé, chống nhiễu dV/dt tốt, nhưng cần dòng điện I_f qua LED lớn, ngược lại với trị số R_{gk} lớn (từ 10k đến 100k), dòng I_f bé nhưng chống nhiễu dV/dt tồi.



Hình 7.7.

**7.1.7. Một số lưu ý cơ bản với bộ ghép quang
Với mạch điều khiển**

- Để điều khiển các bộ ghép quang ,ta cần dòng vào cho LED hồng ngoại là 10mA và dòng ra cho phototransistor khoảng 2mA là bé nhất .Để giảm thời gian lên (rise time) và thời gian trễ (propagation delay),dòng diốt hồng ngoại có thể giảm còn 1mA nhưng chống nhiễu tồi.
- Với các mạch điện trên ,bộ ghép quang có thể thay thế các rơ-le.Bộ ghép quang làm việc nhanh hơn,không có hiện tượng nảy (contact bounce), an toàn hơn và cách điện tốt hơn.Tuy nhiên rơ-le làm việc với dòng điện lớn hơn ,điện thế ở ngõ ra lớn hơn,điện trở khi rơ-le nối điện nhỏ hơn và điện trở ngắt điện cao hơn.
- Bộ ghép quang có thể thay thế các biến thể xung.Nó có thể truyền các tín hiệu 1 chiều hay tín hiệu có tần số thấp.Trong khi đó biến thể xung chỉ có thể làm việc tốt với tần số cao và một bộ đệm (latch) để lưu giữ tín hiệu 1 chiều. Biến thể xung có thời gian lên nhanh hơn bộ ghép quang với phototransistor.
- Các IC tải và nhận tín hiệu được dùng trong việc truyền các tín hiệu digital qua các đường truyền dữ liệu rất dài trong sự hiện diện các tín hiệu nhiễu.Biên độ tín hiệu nhiễu cao nhất cho phép là không 30V.Trong nhiều trường hợp thực tế ,tín hiệu nhiễu có thể lên đến vài trăm Volt trên các đường truyền.Bộ ghép quang với độ cách điện hàng nghìn Volt tỏ ra rất hữu dụng trong trường hợp này.

Với mạch tuyến tính

Dòng điện thuận của diốt hồng ngoại phải có cường độ khoảng từ 5mA đến 20mA.Tín hiệu biến điệu (modulating signal) được ghép vào nền của điện thế 1 chiều này.

Với tần số cao phototransistor phải làm việc với 1 khuếch đại có tổng trở vào thấp,thường là khuếch đại có cực gốc nối đất

Tóm tắt đặc tính các linh kiện ghép tín hiệu

Linh kiện	Ưu điểm	Khuyết điểm
Bộ ghép quang	- Kinh tế , rẻ tiền - Có thể chế tạo với vật liệu bán dẫn	- Khi ngắt điện hay dẫn điện đều có một điện trở giới hạn (điện trở không thể bằng

	<ul style="list-style-type: none"> - Làm việc từ tín hiệu 1 chiều đến tín hiệu xoay chiều với tần số cao - Cách điện tốt đến vài KV - Tổng trở cách điện cao - Kích thước nhỏ - Không có công tắc nên không bị nảy - Công suất tiêu thụ ít 	<ul style="list-style-type: none"> zero hay vô cực) - Dòng điện khi dẫn điện và điện áp khi ngắt điện đều có trị số giới hạn - Hệ số truyền đạt CTR thấp.
Rơ-le	<ul style="list-style-type: none"> - Làm việc với công suất lớn - Khi dẫn điện có điện trở rất thấp - Có thể truyền tín hiệu 1 chiều - Cách điện tốt 	<ul style="list-style-type: none"> -Đắt tiền vì má rơ-le làm bằng kim loại quý -Công suất tiêu thụ cao -Vận tốc làm việc rất chậm -Kích thước lớn
Biến thế xung	<ul style="list-style-type: none"> -Truyền tín hiệu với vận tốc cao. -Kích thước trung bình -Có hệ số truyền đạt tốt 	<ul style="list-style-type: none"> -Không thể truyền tín hiệu 1 chiều hay xoay chiều có tần số thấp -Để cách điện(có tổng trở cao hay điện thế cao)rất đắt tiền .
IC phát và nhận tín hiệu đường dài	<ul style="list-style-type: none"> -Có thể chế tạo với vật liệu bán dẫn -Kích thước bé (Dip)/Truyền tin với vận tốc cao -Có thể truyền tín hiệu DC rẻ tiền. 	<ul style="list-style-type: none"> -Tổng trở cách điện bé -Điện thế đánh thủng rất thấp $\leq 30v$.

7.2. Khuếch đại quang

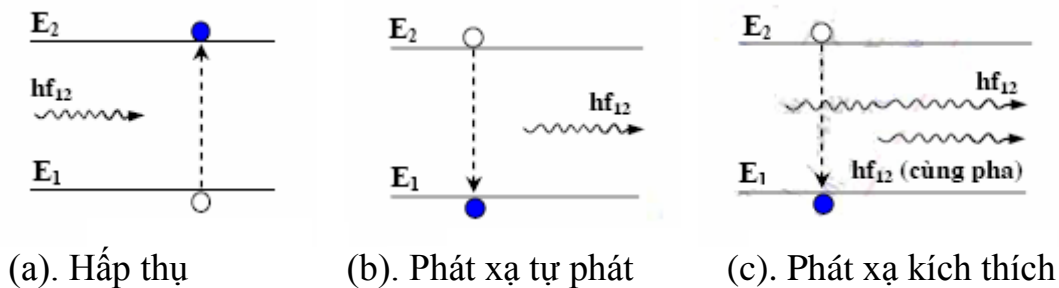
Trong các bộ khuếch đại quang (Optical Amplifier) tín hiệu ánh sáng được khuếch đại trực tiếp trong miền quang mà không thông qua việc biến đổi sang miền điện. Các bộ khuếch đại quang có các ưu điểm sau:

- Không phụ thuộc vào tốc độ bit và phương thức điều chế tín hiệu nên nâng cấp hệ thống
- Khuếch đại nhiều tín hiệu có bước sóng khác nhau cùng truyền trên một sợi quang.

7.2.1. Nguyên lý khuếch đại quang

Nguyên lý khuếch đại quang trong các bộ khuếch đại quang được thực hiện dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích và không có sự cộng hưởng xảy ra trong quá trình khuếch đại.

a. **Hiện tượng phát xạ kích thích (stimulated emission)** là một trong ba hiện tượng biến đổi quang điện được ứng dụng trong thông tin quang. Các hiện tượng này được minh họa trên hình sau



Hình 7.8. Các hiện tượng biến đổi quang điện

➤ Hiện tượng phát xạ kích thích, **hình c**, xảy ra khi một điện tử đang ở trạng thái năng lượng cao E_2 bị kích thích bởi một photon có năng lượng $h\nu_{12}$ bằng với độ chênh lệch năng lượng giữa trạng thái năng lượng cao và trạng thái năng lượng thấp của điện tử ($E_g = E_2 - E_1$). Khi đó, điện tử sẽ chuyển từ trạng thái năng lượng cao xuống trạng thái năng lượng thấp hơn và tạo ra một photon có năng lượng bằng với năng lượng của photon kích thích ban đầu.

➤ Như vậy, từ một photon ban đầu sau khi xảy ra hiện tượng phát xạ kích thích sẽ tạo ra hai photon (photon ban đầu và photon mới được tạo ra) có cùng phương truyền, cùng phân cực, cùng pha và cùng tần số (tính kết hợp, coherent, của ánh sáng). Hay nói cách khác, quá trình khuếch đại ánh sáng được thực hiện.

➤ Hiện tượng này được ứng dụng trong các bộ khuếch đại quang bán dẫn (OSA) và khuếch đại quang sợi (OFA). Hiện tượng phát xạ kích thích cũng được ứng dụng trong việc chế tạo laser.

➤ Tuy nhiên, điểm khác biệt chính giữa laser và các bộ khuếch đại quang là trong các bộ khuếch đại quang không xảy hiện tượng hồi tiếp và cộng hưởng. Vì nếu xảy ra quá trình hồi tiếp và cộng hưởng như trong laser, bộ khuếch đại quang sẽ tạo ra các ánh sáng kết hợp của riêng nó cho dù không có tín hiệu quang ở ngõ vào. Nguồn ánh sáng này được xem là nhiễu xảy ra trong bộ khuếch đại. Do vậy, khuếch đại quang có thể làm tăng công suất tín hiệu ánh sáng được đưa vào ngõ vào bộ khuếch đại nhưng không tạo ra tín hiệu quang kết hợp của riêng nó ở ngõ ra.

b. Hiện tượng hấp thụ (*absorption*)

▪ Hiện tượng hấp thụ, **hình (a)**, xảy ra khi một photon có năng lượng hf_{12} bị hấp thụ bởi một điện tử ở trạng thái năng lượng thấp. Quá trình này chỉ xảy ra khi năng lượng hf_{12} của photon bằng với độ chênh lệch năng lượng giữa trạng thái năng lượng cao và trạng thái năng lượng thấp của điện tử ($E_g = E_2 - E_1$). Khi xảy ra hiện tượng hấp thụ, điện tử sẽ nhận năng lượng từ photon và chuyển lên trạng thái năng lượng cao. Hay nói cách khác, hiện tượng hấp thụ là nguyên nhân gây suy hao cho tín hiệu quang khi đi qua bộ khuếch đại quang. Quá trình này xảy ra đồng thời với hai hiện tượng phát xạ tự phát và phát xạ kích thích trong môi trường tích cực (active medium) của bộ khuếch đại.

c. Hiện tượng phát xạ tự phát (*spontaneous emission*)

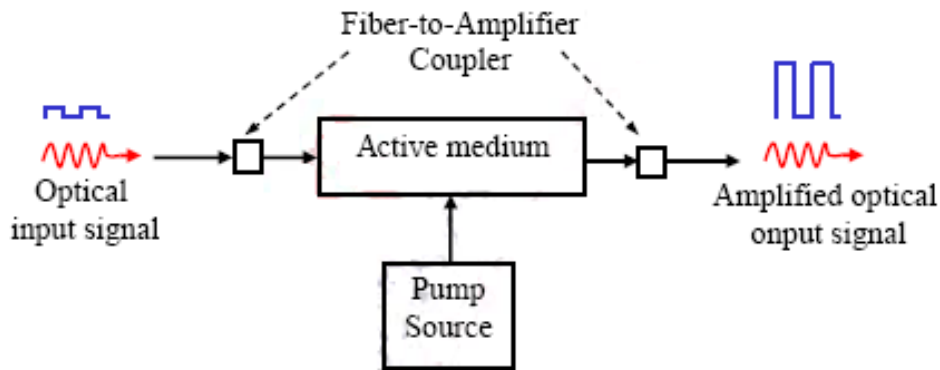
▪ Hiện tượng phát xạ tự phát, **hình (b)**, xảy ra khi một điện tử chuyển trạng thái năng lượng từ mức năng lượng cao E_2 xuống mức năng lượng thấp E_1 và phát ra một năng lượng $E_g = E_2 - E_1$ dưới dạng một photon ánh sáng. Quá trình này xảy ra một cách tự nhiên vì trạng thái năng lượng cao E_2 không phải là trạng thái năng lượng bền vững của điện tử. Sau một khoảng thời gian được gọi là thời gian sống (life time) của điện tử ở mức năng lượng cao, các điện tử sẽ tự động chuyển về trạng thái năng lượng thấp hơn (trạng thái năng lượng bền vững). Tùy theo loại vật liệu khác nhau, thời gian sống của điện tử sẽ khác nhau.

▪ Cho dù hiện tượng phát xạ tự phát tạo ra photon ánh sáng, nhưng trong khuếch đại quang, phát xạ tự phát không tạo ra độ lợi khuếch đại. Nguyên nhân là do hiện tượng này xảy ra một cách tự phát không phụ thuộc vào tín hiệu ánh sáng đưa vào bộ khuếch đại. Nếu không có ánh sáng tín hiệu đưa vào, vẫn có năng lượng ánh sáng được tạo ra ở ngõ ra của bộ khuếch đại. Ngoài ra, ánh sáng do phát xạ tự phát tạo ra không có tính kết hợp như hiện tượng phát xạ kích thích.

- Do vậy, phát xạ tự phát được xem là nguyên nhân chính gây nhiễu trong các bộ khuếch đại quang. Loại nhiễu này được gọi là nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại ASE (Amplified Spontaneous Emission noise).

7.2.2. Phân loại khuếch đại quang

Tổng quát, cấu tạo của một bộ khuếch đại quang có thể được biểu diễn như hình sau



Hình 7.9. Mô hình tổng quát của một bộ khuếch đại quang

- Trong một bộ khuếch đại quang, quá trình khuếch đại ánh sáng được diễn ra trong một môi trường được gọi vùng tích cực (active medium). Các tín hiệu quang được khuếch đại trong vùng tích cực với độ lợi lớn hay nhỏ tùy thuộc vào năng lượng được cung cấp từ một nguồn bên ngoài gọi chung là nguồn bơm (Pump Source). Các nguồn bơm này có tính chất như thế nào tùy thuộc vào loại khuếch đại quang hay nói cách khác phụ thuộc vào cấu tạo của vùng tích cực.
- Tùy theo cấu tạo của vùng tích cực, có thể chia khuếch đại quang thành hai loại chính:
 - ✓ Khuếch đại quang bán dẫn SOA (Semiconductor Optical Amplifier)
 - Vùng tích cực được cấu tạo bằng vật liệu bán dẫn.
 - Cấu trúc của vùng tích cực của SOA tương tự như vùng tích cực của laser bán dẫn. Điểm khác biệt chính giữa SOA và laser là SOA hoạt động ở trạng thái dưới mức ngưỡng phát xạ.
 - Nguồn cung cấp năng lượng để khuếch đại tín hiệu quang là dòng điện
 - ✓ Khuếch đại quang sợi OFA (Optical Fiber Amplifier)
 - Vùng tích cực là sợi quang được pha đất hiếm. Do đó, OFA còn được gọi là DFA (Doped-Fiber Amplifier)

- Nguồn bơm là năng lượng ánh sáng được cung cấp bởi các laser có bước sóng phát quang nhỏ hơn bước sóng của tín hiệu cần khuếch đại.

- Tùy theo loại đất hiếm được pha trong lõi của sợi quang, bước sóng bơm của nguồn bơm và vùng ánh sáng được khuếch đại của OFA sẽ thay đổi. Một số loại OFA tiêu biểu:

+ EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier): 1530nm – 1565nm

+ PDFA (Praseodymium-Doped Fiber Amplifier): 1280nm – 1340nm

+ TDFA (Thulium-Doped Fiber Amplifier): 1440nm -1520nm

+ NDFA (Neodymium-Doped Fiber Amplifier): 900nm, 1065nm hoặc 1400nm

⊕ Trong các loại OFA này, EDFA được sử dụng phổ biến hiện nay vì có nhiều ưu điểm về đặc tính kỹ thuật so với SOA và có vùng ánh sáng khuếch đại (1530nm-1565nm) thích hợp với dải tần hoạt động của hệ thống ghép kênh theo bước sóng mật độ cao DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

⊕ Cả hai loại khuếch đại quang SOA và EDFA đều hoạt động dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích. Ngoài ra, một loại khuếch đại quang khác cũng được sử dụng nhiều trong các hệ thống WDM hiện nay là khuếch đại Raman. Loại khuếch đại này cũng sử dụng sợi quang làm vùng tích cực để khuếch đại ánh sáng. Tuy nhiên, nguyên lý khuếch đại của khuếch đại Raman dựa trên ảnh hưởng phi tuyến của sợi quang (hiện tượng tán xạ Raman được kích thích SRS, Stimulated Raman Scattering) hơn là hiện tượng phát xạ kích thích.

7.2.3. Các thông số kỹ thuật của khuếch đại quang:

a) Độ lợi (Gain)

- Độ lợi của một bộ khuếch đại quang là tỷ số giữa công suất quang ở ngõ ra chia cho công suất quang ở ngõ vào.

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.1)$$

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log\left[\frac{P_{out}}{P_{in}}\right] \quad (1.2)$$

- G: Độ lợi tín hiệu của bộ khuếch đại quang
- P_{in} , P_{out} công suất tín hiệu ánh sáng ở ngõ vào và ngõ ra của bộ khuếch đại quang (mW).
- Độ lợi là một thông số quan trọng của bộ khuếch đại. Nó đặc trưng cho khả năng khuếch đại công suất ánh sáng của bộ khuếch đại. Tuy vậy, độ lợi của

một bộ khuếch đại bị giới hạn bởi các cơ chế bão hòa độ lợi. Điều này làm giới hạn công suất quang ra cực đại của bộ khuếch đại.

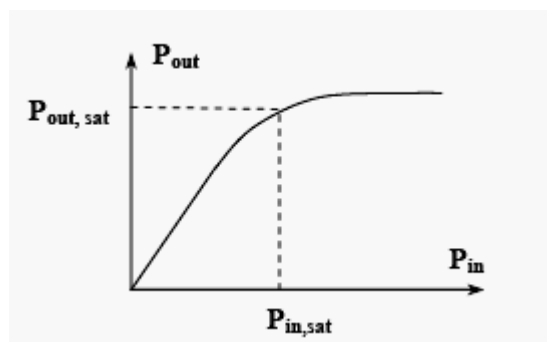
b) Băng thông độ lợi (Gain Bandwidth)

- Độ lợi của bộ khuếch đại quang không bằng nhau cho tất cả các tần số của tín hiệu quang vào. Nếu đo độ lợi G của các tín hiệu quang với các tần số khác nhau, một đáp ứng tần số quang của bộ khuếch đại $G(f)$ sẽ đạt được. Đây chính là phổ độ lợi của bộ khuếch đại quang.

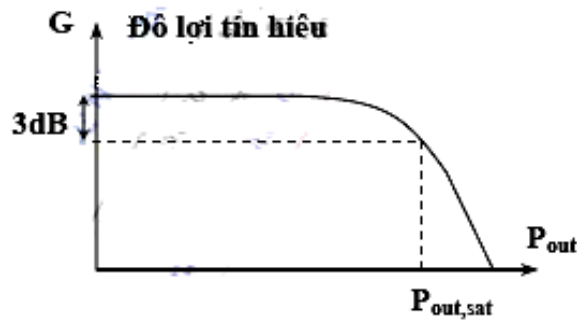
- Băng thông độ lợi của bộ khuếch đại quang B_0 được xác định bởi điểm -3dB so với độ lợi đỉnh của bộ khuếch đại. Giá trị B_0 xác định băng thông của các tín hiệu có thể được truyền bởi một bộ khuếch đại quang. Do đó, ảnh hưởng đến hoạt động của các hệ thống thông tin quang khi sử dụng chúng như các bộ lặp hay bộ tiền khuếch đại.

c) Công suất ngõ ra bão hòa (Saturation Output Power)

- Khi hoạt động ở chế độ tín hiệu nhỏ, công suất quang ở ngõ ra sẽ tăng tuyến tính với công suất quang ở ngõ vào theo hệ số độ lợi G : $P_{out} = G.P_{in}$. Tuy nhiên, công suất ngõ ra không thể tăng mãi được. Bằng thực nghiệm, người ta thấy rằng trong tất cả các bộ khuếch đại quang, khi công suất ngõ vào P_{in} tăng đến một mức nào đó, độ lợi G bắt đầu giảm. Kết quả là công suất ở ngõ ra không còn tăng tuyến tính với tín hiệu ngõ ra nữa mà đạt trạng thái bão hòa. Sự thay đổi của tín hiệu quang ngõ ra so với công suất quang ngõ vào ở được minh họa trong hình sau



Hình 7.10. Công suất ngõ ra theo công suất ngõ vào



Hình 7.11. Độ lợi khuếch đại theo công suất quang ngõ ra

Hình trên biểu diễn sự biến đổi của độ lợi tín hiệu G theo công suất quang ngõ ra P_{out} . Công suất ở ngõ ra tại điểm độ lợi giảm đi 3 dB được gọi là công suất ra bão hòa $P_{sat, out}$.

- Công suất ra bão hòa $P_{sat, out}$ của một bộ khuếch đại quang cho biết công suất ngõ ra lớn nhất mà bộ khuếch đại quang đó có thể hoạt động được. Thông thường, một bộ khuếch đại quang có độ lợi cao sẽ có công suất ra bão hòa cao bởi vì sự nghịch đảo nồng độ cao có thể được duy trì trong một dải công suất vào và ra rộng.

d) Hệ số nhiễu (Noise Figure)

- Giống như các bộ khuếch đại điện, các bộ khuếch đại quang đều tạo ra nhiễu. Nguồn nhiễu chính trong các bộ khuếch đại quang là do phát xạ tự phát. Vì sự phát xạ tự phát là các sự kiện ngẫu nhiên, pha của các photon phát xạ tự phát cũng ngẫu nhiên. Nếu photon phát xạ tự phát có hướng gần với hướng truyền của các photon tín hiệu, chúng sẽ tương tác với các photon tín hiệu gây nên sự dao động về pha và biên độ. Bên cạnh đó, năng lượng do phát xạ tự phát tạo ra cũng sẽ được khuếch đại khi chúng truyền qua bộ khuếch đại về phía ngõ ra. Do đó, tại ngõ ra của bộ khuếch đại công suất quang thu được P_{out} bao gồm cả công suất tín hiệu được khuếch đại và công suất nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại ASE (Amplified Spontaneous Emission).

$$P_{out} = G.P_{in} + P_{ASE} \quad (1.3)$$

- Ảnh hưởng của nhiễu đối với bộ khuếch đại quang được biểu diễn bởi hệ số nhiễu NF (Noise Figure), mô tả sự suy giảm tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR (Signal to Noise Ratio) do nhiễu của bộ khuếch đại thêm vào. Hệ số NF được cho bởi công thức sau

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad (1.4)$$

SNR_{in} , SNR_{out} là tỷ số tín hiệu trên nhiễu tại ngõ vào và ngõ ra của bộ khuếch đại

Hệ số nhiễu NF của bộ khuếch đại càng nhỏ thì càng tốt. Giá trị nhỏ nhất của NF có thể đạt được là 3dB. Những bộ khuếch đại thỏa mãn hệ số nhiễu tối thiểu này được gọi là đang hoạt động ở giới hạn lượng tử.

Ngoài bốn thông số kỹ thuật chính được nêu ở trên, các bộ khuếch đại quang còn được đánh giá dựa trên các thông số sau

- Độ nhạy phân cực (Polarization sensitivity) là sự phụ thuộc của độ lợi của bộ khuếch đại vào phân cực của tín hiệu
- Ảnh hưởng của nhiệt độ đối với độ lợi và băng thông độ lợi,
- Xuyên nhiễu (crosstalk)

7.2.4. Ứng dụng của khuếch đại quang

Khuếch đại quang được ứng dụng trong các các hệ thống truyền dẫn quang như các bộ khuếch đại nhằm làm tăng công suất của tín hiệu quang trên đường truyền, khắc phục suy hao do sợi quang và các mối hàn, nối xảy ra trên đường truyền. Tùy theo vị trí lắp đặt, các bộ khuếch đại trên tuyến truyền dẫn quang được chia làm ba loại

a. **Khuếch đại công suất (Booster Amplifier)**: là bộ khuếch đại quang được đặt ngay sau thiết bị phát nhằm mục đích làm tăng công suất tín hiệu quang đến mức cao nhất để làm cho khoảng cách truyền cực đại. Yêu cầu của các bộ khuếch đại công suất là tạo ra công suất đầu ra cực đại chứ không phải độ lợi cực đại vì công suất tín hiệu ngõ vào lớn.

b. **Khuếch đại đường dây (In-line Amplifier)**: là các bộ khuếch đại quang được đặt trên tuyến quang nhằm mục đích bù mất mát công suất gây ra bởi suy hao sợi, suy hao do kết nối và suy hao do việc phân phối tín hiệu quang trong mạng. Các bộ khuếch đại đường dây có thể được lắp đặt nối tiếp nhau trên đường truyền để gia tăng khoảng cách lắp đặt. Tuy nhiên, việc lắp đặt nối tiếp các bộ khuếch đại quang sẽ làm giảm hệ số SNR ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống truyền dẫn quang. Yêu cầu của bộ khuếch đại đường dây là độ ổn định trên toàn bộ dải thông của hệ thống WDM, giữ nhiễu ở mức cực tiểu và thực hiện việc trao đổi tốt tín hiệu quang với sợi quang truyền dẫn.

c. **Tiền khuếch đại (Preamplifier)**: là các bộ khuếch đại quang được đặt ngay trước thiết bị thu quang nhằm khuếch đại tín hiệu ngay trước khi tín hiệu được đưa vào thiết bị. Điều này làm giảm yêu cầu nghiêm ngặt của độ nhạy thiết bị thu và cho phép hệ thống truyền dẫn quang hoạt động với tốc độ bit cao hơn. Do vị trí lắp đặt, các bộ tiền khuếch đại hoạt động với công suất tín

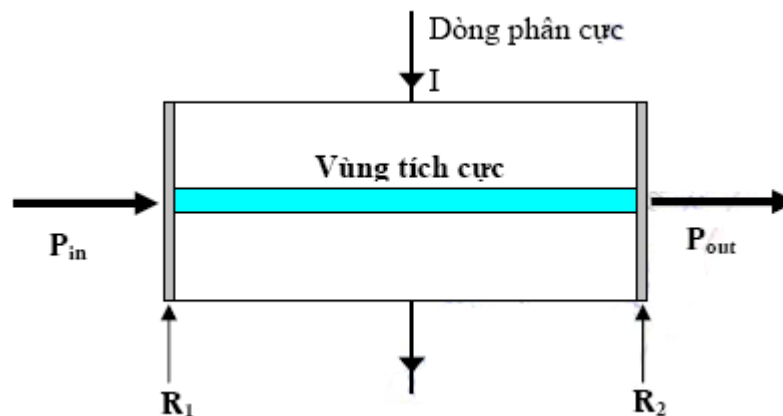
hiệu vào yếu và mức nhiễu ở đầu thu cao. Do vậy, yêu cầu của một bộ tiền khuếch đại là độ nhạy lớn, độ lợi lớn và nhiễu thấp.

✓ Ngoài các ứng dụng chính làm các bộ khuếch đại trên đường truyền quang, các bộ khuếch đại quang SOA và OFA còn được sử dụng trong các bộ chuyển đổi bước sóng. Việc chuyển đổi bước sóng được thực hiện dựa trên hiện tượng bảo hòa độ lợi và hiện tượng trộn bốn bước sóng FWM (Four-Wave Mixing) xảy ra trong các bộ khuếch đại quang.

7.3. Bộ khuếch đại quang bán dẫn (SOA)

7.3.1. Cấu trúc và nguyên lý hoạt động

Cấu trúc và nguyên lý hoạt động của khuếch đại quang bán dẫn SOA (Semiconductor Optical Amplifier) tương tự như laser bán dẫn. Nghĩa là cũng dựa vào hệ thống hai dải năng lượng của chất bán dẫn và các quá trình biến đổi quang điện: hấp thụ (absorption), phát xạ tự phát (spontaneous emission) và phát xạ kích thích (stimulated emission). Trong đó, tín hiệu quang được khuếch đại dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích xảy ra trong vùng tích cực của SOA. Vùng tích cực này được đặt giữa hai lớp bán dẫn loại n và p. Nguồn bơm bên ngoài được cung cấp bởi dòng điện phân cực.



Hình 7.12. Cấu trúc của một bộ khuếch đại quang bán dẫn SOA

Do có cấu trúc và nguyên lý hoạt động tương tự với laser bán dẫn nên SOA còn được gọi là khuếch đại laser bán dẫn SLA (Semiconductor Laser Amplifier).

Sự khác nhau chính giữa SOA và laser bán dẫn là SOA hoạt động dưới mức ngưỡng dao động. Điều kiện này xảy ra khi dòng điện phân cực $I_{bias} < I_{th}$ của laser và hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ của vùng tích cực nhỏ. Khi đó, quá trình phản xạ, cộng hưởng và tự phát xạ ánh sáng sẽ không xảy ra.

SOA có thể được phân thành hai loại chính dựa vào hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ của lớp tích cực.

Loại thứ nhất, khuếch đại Fabry-Perot **FPA (Fabry-Perot Amplifier)** có hệ số phản xạ cao (có thể lên tới 32%). Cấu trúc của FPA cũng tương tự như laser Fabry-Perot nhưng hoạt động với dòng phân cực $I_{bias} < I_{th}$. Với cấu trúc hốc cộng hưởng có hệ số phản xạ cao, quá trình hồi tiếp, chọn lọc tần số xảy ra. Kết quả là, FPA có độ lợi cao nhưng phổ độ lợi khuếch đại nhấp nhô, không đều. Điều này làm giảm băng thông khuếch đại của FPA.

Để khắc phục hạn chế trên của FPA, hai lớp chống phản xạ AR (anti-reflection) có hệ số phản xạ $R = 0$, được đặt tại hai đầu của vùng tích cực để không cho quá trình phản xạ xảy ra bên trong bộ khuếch đại. Khi đó, tín hiệu vào SOA sẽ được khuếch đại khi chỉ đi qua một lần (được gọi là single pass) xuyên qua vùng tích cực của bộ khuếch đại mà không có hồi tiếp về. Đây là cấu trúc của loại SOA thứ hai: khuếch đại sóng chạy **TWA (Traveling Wave Amplifier)**. Trên thực tế, hệ số phản xạ ở hai đầu của vùng tích cực của TWA không hoàn toàn bằng 0 mà có giá trị rất nhỏ từ 0.1% đến 0.01%.

7.3.2. Đặc tính của bộ khuếch đại FPA và TWA

- ⊕ Xét một bộ khuếch đại FPA có hệ số phản xạ công suất ở hai mặt phản xạ của lớp tích cực là R_1 và R_2 như hình 7.12. Bộ khuếch đại này cũng có thể TWA nếu cho $R_1 = R_2 = 0$. Do đó, quá trình phân tích sau, đều có thể áp dụng cho FPA và TWA.
- ⊕ Bỏ qua suy hao khi ánh sáng truyền qua mỗi mặt phản xạ, ta có hệ số xuyên qua của công suất ánh sáng đi qua mỗi mặt phản xạ tương ứng là $(1-R_1)$ và $(1-R_2)$.
- ⊕ Tương ứng, ta có hệ phản xạ và hệ số xuyên qua của cường độ điện trường tại hai mặt phản xạ là:

$$\sqrt{R_1}, \sqrt{R_2} \text{ và } t_1 = \sqrt{1-R_1}, t_2 = \sqrt{1-R_2}$$

- ⊕ Gọi G_s là rằng độ lợi đơn thông (single-pass gain) của SOA khi tín hiệu quang đi qua vùng tích cực mà không có sự hồi tiếp (hệ số phản xạ $R=0$).

Ta có

$$G_s = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp[(\Gamma g - \alpha)L] \quad (1.5)$$

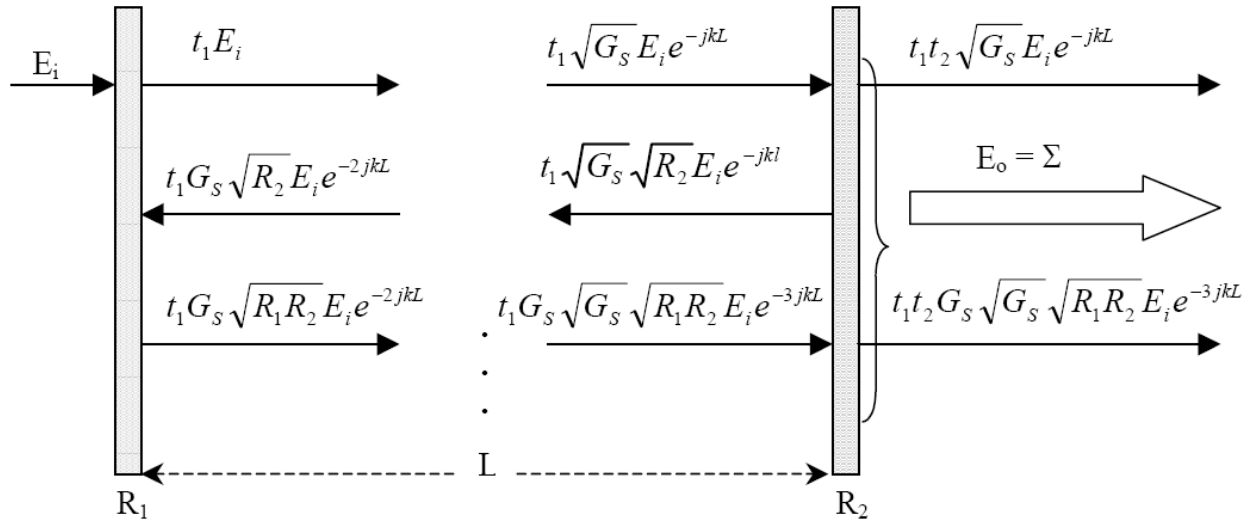
- Trong đó

- g : độ lợi trên một đơn vị chiều dài của vùng tích cực
- α : suy hao trên một đơn vị chiều dài của vùng tích cực

- Γ : hệ số tập trung (confinement factor) biểu diễn mức độ tập trung của luồng ánh sáng bên trong vùng tích cực

- L : chiều dài của vùng tích cực

- P_{in} , P_{out} : công suất tín hiệu ở ngõ vào và ngõ ra của bộ khuếch đại



Hình 7.12. Quá trình khuếch đại tín hiệu xảy ra trong FPA

Quá trình khuếch đại tín hiệu ánh sáng trong FPA (xem Hình 7.12.) có thể được dẫn giải như sau:

Điện trường của tín hiệu quang vào E_i được đưa vào hốc cộng hưởng của FPA có chiều dài L tại mặt phản xạ R_1 . Sau khi xuyên qua mặt phản xạ R_1 , tín hiệu ban đầu sẽ được khuếch đại bởi vùng tích cực và đạt cường độ $t_1\sqrt{G_S}E_i e^{-jkl}$ tại mặt phản xạ R_2 (k là hệ số truyền dẫn của môi trường khuếch đại).

Tại đây, một phần năng lượng ánh sáng sẽ truyền ra ngoài với cường độ $t_1 t_2 \sqrt{G_S} E_i e^{-jkl}$. Phần còn lại sẽ phản xạ ngược trở lại về phía R_1 với cường độ $t_1 \sqrt{G_S} \sqrt{R_2} E_i e^{-jkl}$.

✓ Tại R_1 , điện trường thu được là $t_1 G_S \sqrt{R_2} E_i e^{-2jkl}$. Tương tự như tại R_2 , một phần điện trường $t_1 G_S \sqrt{R_1 R_2} E_i e^{-2jkl}$ sẽ phản xạ ngược về phía R_2 , phần còn lại sẽ đi ra ngoài hốc cộng hưởng.

✓ Sau khi đi qua khoảng cách L của vùng tích cực, tín hiệu thu được tại R_1 đạt giá trị $t_1 G_S \sqrt{G_S} \sqrt{R_1 R_2} E_i e^{-3jkl}$. Quá trình phản xạ và truyền xuyên qua mặt phản xạ R_2 tiếp tục diễn ra. Phần tín hiệu xuyên qua có điện trường $t_1 t_2 G_S \sqrt{G_S} \sqrt{R_1 R_2} E_i e^{-3jkl}$. Phần còn lại sẽ phản xạ ngược về phía R_1 . Cứ như vậy quá trình phản xạ trong vùng tích cực tiếp tục tiếp diễn.

✓ Điện trường tổng cộng thu được tại ngõ ra của bộ khuếch đại sẽ bằng tổng của các thành phần điện trường đi xuyên qua R2. Nếu giả sử rằng thời gian truyền trong hốc cộng hưởng nhỏ hơn chu kỳ của điện trường tới E_i , ta có điện trường thu được tại ngõ ra

$$E_o = E_i e^{-j\omega t_1 t_2} \sum_{m=0}^{\infty} (\sqrt{R_1 R_2} G_s)^m e^{-2m\pi kL}$$

Với $|\sqrt{R_1 R_2} G_s| < 1$, biểu thức (2.6) có thể biến đổi thành

$$E_o = E_i \frac{\sqrt{G_s} t_1 t_2 e^{-j\omega L}}{1 - \sqrt{R_1 R_2} G_s e^{-2j\omega L}}$$

Hàm truyền công suất của bộ khuếch đại FPA

$$G_{FPA}(\omega) = \left| \frac{E_o}{E_i} \right|^2 = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)G_s(\omega)}{(1 - G_s\sqrt{R_1 R_2})^2 + 4G_s\sqrt{R_1 R_2} \sin^2 kL}$$

Do

$$\sin^2(kL) = \sin^2\left(\frac{\omega}{v}L\right) = \sin^2\left(\frac{(\omega - \omega_0)}{v}L\right)$$

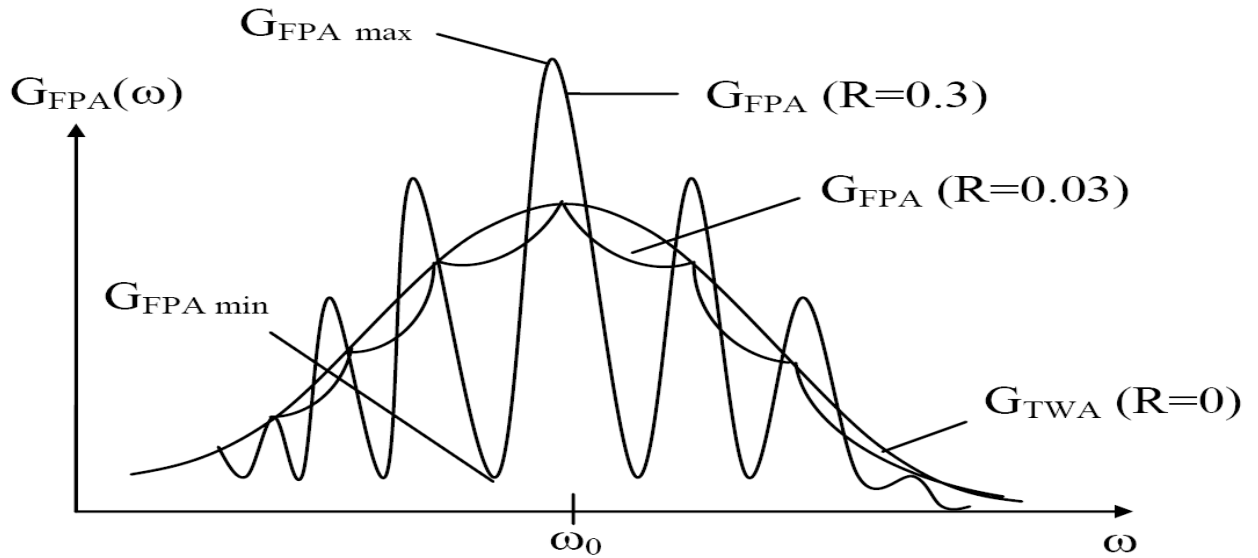
với v là vận tốc ánh sáng truyền trong môi trường khuếch đại, ω là tần số góc đang xét, ω_0 là tần số góc cộng hưởng mà tại đó độ lợi đạt giá trị lớn nhất. Biểu thức trên được viết lại như sau

$$G_{FPA}(\omega) = \left| \frac{E_o}{E_i} \right|^2 = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2)G_s(\omega)}{(1 - G_s\sqrt{R_1 R_2})^2 + 4G_s\sqrt{R_1 R_2} \sin^2[(\omega - \omega_0)L/v]}$$

Nếu hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ của FPA bằng nhau $R_1=R_2=R$

$$G_{FPA}(\omega) = \left| \frac{E_o}{E_i} \right|^2 = \frac{(1 - R)^2 G_s(\omega)}{(1 - G_s R)^2 + 4G_s R \sin^2[(\omega - \omega_0)L/v]}$$

- v là vận tốc ánh sáng truyền trong môi trường khuếch đại
- ω là tần số góc đang xét
- ω_0 là tần số góc cộng hưởng mà tại đó độ lợi đạt giá trị lớn nhất
- L chiều dài FPA
- R hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ
- G_s là rằng độ lợi đơn thông (single-pass gain) của SOA



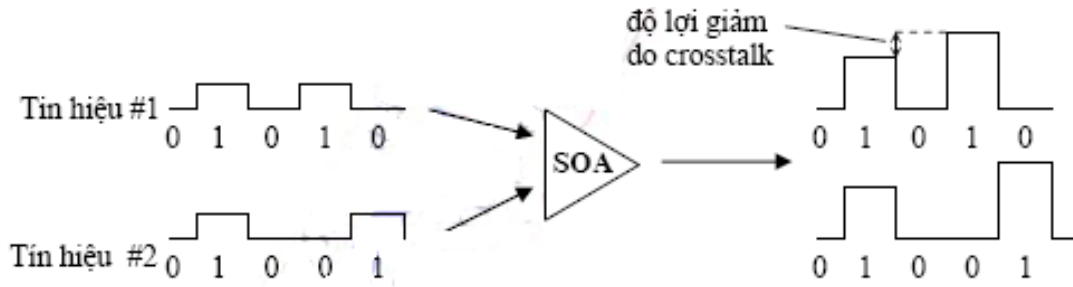
Hình 7.13. Độ lợi $G(f)$ của FPA thay đổi theo tần số với $R = 0.3; R=0.03$ và $R=0$

- ✓ Giả sử độ lợi đơn thông G_s , tương ứng với $R=0$ (TWA), có dạng Gauss. Khi hệ số phản xạ của hai lớp phản xạ của vùng tích cực lớn $R=0.3$, độ lợi $G(\omega)$ không bằng phẳng theo tần số mà có dạng gợn sóng lớn do chức năng lọc tần số của hốc cộng hưởng.
- ✓ Tại các tần số cộng hưởng $\omega=(2\pi fN)/(2L)$ với N là số nguyên, độ lợi của FPA đạt giá trị cực đại. Giữa các tần số cộng hưởng, độ lợi của FPA giảm nhanh chóng. Do đó, băng thông độ lợi (được xác định tại vị trí -3dB so với độ lợi đỉnh) của FPA nhỏ so với băng thông độ lợi của TWA.
- ✓ Vì vậy, FPA không thích hợp với các ứng dụng khuếch đại trong hệ thống thông tin quang.
- ✓ Khi hệ số phản xạ $R=0.03$, $G(\omega)$ tiến gần tới G_s nhưng vẫn còn gợn sóng nhỏ. Độ gợn sóng này có thể được loại bỏ bằng cách giảm hệ số phản xạ hơn nữa để bộ khuếch đại trở thành TWA.

7.3.3. Nhiễu xuyên âm (Crosstalk) trong SOA:

Nhiễu xuyên âm xảy ra khi các tín hiệu quang khác nhau được khuếch đại đồng thời trong cùng một bộ khuếch đại. Có hai loại nhiễu xuyên âm xảy ra trong SOA: nhiễu xuyên kênh (interchannel crosstalk) và bão hòa độ lợi (cross saturation).

Nhiễu xuyên kênh xảy ra là do hiệu ứng trộn bốn bước sóng FWM (Four Wave Mixing). Bản chất và ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến này đối hệ thống thông tin quang WDM không được trình bày trong chương này.



Hình 7.14. Ảnh hưởng của nhiễu xuyên kênh trong SOA khi khuếch đại hai tín hiệu

Nhiễu xuyên kênh gây nên do hiện tượng bảo hòa độ lợi xảy ra trong SOA được minh họa trên. Xem xét đầu vào bộ SOA là tổng của hai tín hiệu quang ở các bước sóng khác nhau. Giả thiết rằng cả 2 bước sóng nằm trong băng thông của SOA. Sự có mặt của tín hiệu thứ hai sẽ làm suy giảm mật độ điện tử ở vùng năng lượng cao do quá trình bức xạ kích thích làm dẫn đến sự nghịch đảo nồng độ được quan sát ở tín hiệu thứ nhất giảm xuống. Do đó, tín hiệu thứ nhất sẽ không được khuếch đại giống như tín hiệu thứ hai, và nếu mật độ điện tử ở vùng năng lượng cao không đủ lớn thì tín hiệu thứ nhất có thể bị hấp thụ. Quá trình này xảy ra đồng thời đối với cả hai tín hiệu. Do đó, trên hình 2.8 ta thấy, khi mức 1 của hai tín hiệu 1 và 2 xảy ra đồng thời, độ lợi của mỗi tín hiệu sẽ nhỏ hơn so với bình thường.

Hiện tượng xuyên âm phụ thuộc vào thời gian sống của điện tử ở trạng thái năng lượng cao. Nếu thời gian sống đủ lớn so với tốc độ dao động của công suất trong các tín hiệu vào, các điện tử không thể chuyển từ trạng thái năng lượng cao xuống trạng thái năng lượng thấp do sự dao động này. Do đó, không có xuyên âm xảy ra.

Đối với các SOA, thời gian sống này ở mức ns. Do đó, các điện tử dễ dàng phản ứng lại sự dao động trong công suất của các tín hiệu được điều chế ở tốc độ Gb/s, dẫn đến một sự suy yếu hệ thống chính do xuyên âm. Ngược lại, thời gian sống phát xạ tự phát trong EDFA là khoảng 10ms. Do đó, xuyên âm chỉ có mặt nếu tốc độ điều chế của các tín hiệu vào ít hơn vài kiloHertz, điều này thường ít gặp trong thực tế. Do đó, EDFA phù hợp hơn khi được sử dụng trong các hệ thống WDM hơn SOA.

7.3.4. Ưu khuyết điểm và ứng dụng của SOA:

➤ *Ưu điểm:*

- Độ lợi cao (25-30dB).
- Kích thước nhỏ, có thể tích hợp với các linh kiện quang bán dẫn khác.
- Dải thông lớn, có thể lên tới 100 nm, rộng hơn so với EDFA.

- Có thể thực hiện khuếch đại tín hiệu ở cả hai cửa sổ ánh sáng 1300nm và 1550nm.

➤ *Khuyết điểm:*

- Công suất ra bảo hòa thấp (khoảng 5mW) hạn chế khả năng của SOA khi được sử dụng làm bộ khuếch đại công suất.

- Hệ số nhiễu cao (5-7 dB) ảnh hưởng đến chất lượng của SOA khi được sử dụng làm bộ tiền khuếch đại và khuếch đại đường dây.

- Phụ thuộc vào phân cực của tín hiệu quang tới

- Nhiễu xuyên kênh lớn do các hiệu ứng phi tuyến: hiệu ứng trộn 4 bước sóng FWM (four wave mixing) và hiệu ứng bão hòa độ lợi chéo (cross-gain saturation)

- Phổ độ lợi có dạng gọn sóng do sự không hoàn hảo của lớp chống phản xạ tạo

- Kém ổn định do độ lợi chịu ảnh hưởng của nhiệt độ

➤ *Ứng dụng:*

Với các đặc tính kỹ thuật trên, SOA có nhiều khuyết điểm so với EDFA khi được dùng làm khuếch đại quang. Do đó, cho dù SOA được nghiên cứu và chế tạo từ trước EDFA, nhưng SOA không được sử dụng làm bộ khuếch đại quang trong hệ thống WDM cũng như các hệ thống truyền dẫn quang khác hiện nay. Thay vào đó, dựa trên các hiệu ứng phi tuyến đáp ứng nhanh của SOA, SOA được dùng trong các ứng dụng khác của hệ thống thông tin quang như: bộ biến đổi bước sóng (wavelength convertor), phục hồi xung clock (clock recovery) và các ứng dụng xử lý tín hiệu quang (optical signal processing applications).

7.4. Bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium (EDFA)

Thông tin quang sợi đã phát triển mạnh trong các hệ thống viễn thông trên thế giới cũng như tại Việt Nam. Việc tăng khả năng truyền dẫn và mở rộng khoảng cách truyền dẫn chỉ có thể giải quyết hiệu quả bằng các hệ thống truyền dẫn mới sử dụng các công nghệ như SDH hoặc ATM kết hợp với các linh kiện truyền thu kiểu mới như các bộ khuếch đại quang học. Khuếch đại tín hiệu quang bằng cách sử dụng các sợi quang pha đất hiếm đã mở ra những khả năng giảm giá thành tuyến truyền dẫn trong các mạng vùng hoặc các mạng đường trục bằng việc tăng khoảng cách các trạm lặp hoặc đa kênh truyền trên các mạng địa phương có sẵn. Các bộ khuếch đại quang sợi bằng sợi dẫn quang pha tạp erbium (EDFA) ở bước sóng 1550nm đã được sử dụng

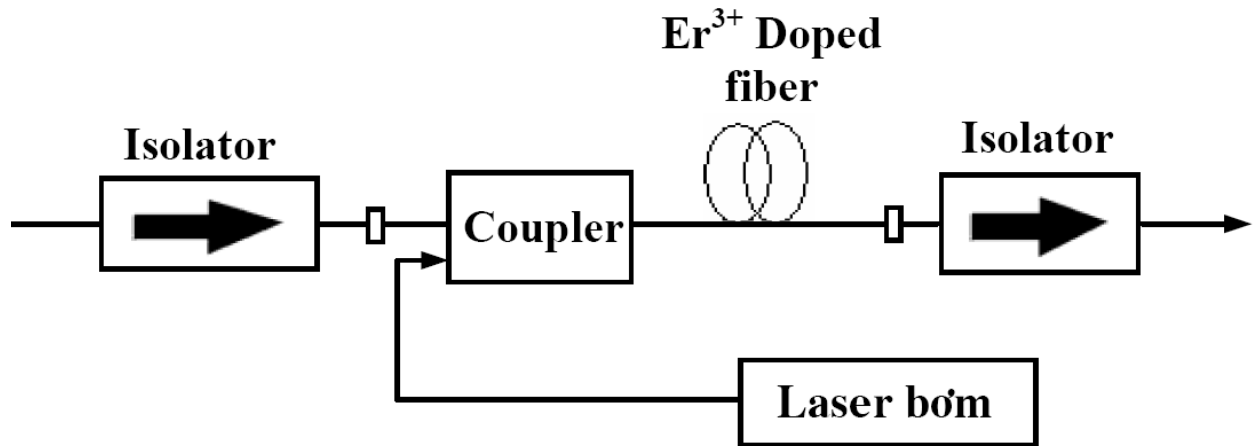
rộng rãi trong các tuyến thông tin cáp quang đường dài hoặc các mạng vòng lớn.

Nguyên tắc hoạt động của các khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium là phát xạ cưỡng bức. Các ion Er^{3+} hấp thụ các photon từ chùm sáng bơm với bước sóng nhỏ hơn 1,5 μm , rồi lại tái phát xạ một phần năng lượng dưới dạng các photon với bước sóng của signal. Các ion Er^{3+} đã được chọn bởi vì nó phát xạ huỳnh quang tại bước sóng $\sim 1.5 \mu m$, bước sóng này sinh ra bởi dịch chuyển phát xạ giữa trạng thái điện tử bị kích thích và mức cơ bản $4I_{15/2}$. Các công trình nghiên cứu về laser và các khuếch đại quang pha tạp với các ion đất hiếm và với Erbium, khi so sánh với các phương pháp chế tạo khác, cho thấy rằng bằng phương pháp sol-gel, đã chế tạo các khuếch đại quang, trên đế thủy tinh, với nồng độ erbi 0.25 at.% và với chiều dài khuếch đại là 5,7 cm, thời gian sống là 6 ms với Gain (dB/mW) cỡ 2,7 tại bước sóng bơm 980 nm.

Trong công nghệ viễn thông quang học toàn bộ (all-optical telecommunications) thì các laser pha tạp đất hiếm và khuếch đại quang là một vài trong số các linh kiện cơ bản, và bởi sự cần giảm giá thành và kích thước linh kiện nên nó cần phải được tích hợp lại. Sự nhỏ gọn và công suất của laser và khuếch đại quang chủ yếu liên quan tới mức độ ion đất hiếm pha tạp càng nhiều càng tốt và phải giảm thấp nhất mất mát trong quá trình truyền sóng.

Trong bài này sẽ trình bày vài nét sơ lược về các bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium và các ứng dụng của nó trong thông tin quang. Sử dụng các bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium (EDFA) để kéo dài cự ly và tăng tốc độ bit truyền dẫn đang được xem như là một trong những giải pháp tốt nhất để xây dựng các hệ thống thông tin quang sợi. Trong những ứng dụng đó, EDFA được dùng làm tiền khuếch đại quang để cải thiện độ nhạy thu có sức hấp dẫn đặc biệt. Sự có mặt của bộ khuếch đại quang trong hệ thống thông tin quang nói chung và trong bộ thu khuếch đại quang (OAR) nói riêng đã làm tăng công suất tín hiệu quang là do EDFA đã khuếch đại tín hiệu trước khi tiến hành tách sóng tại bộ thu quang.

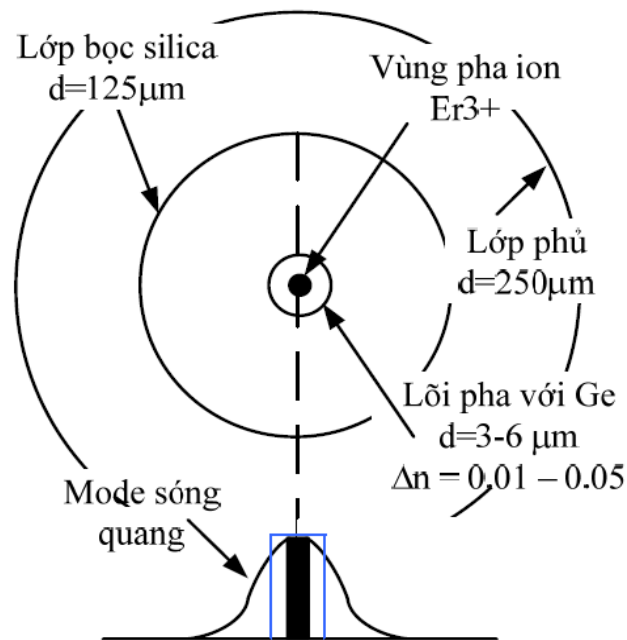
7.4.1. Các cấu trúc EDFA



Hình 7.15. Cấu trúc tổng quát của một bộ khuếch đại EDFA

Cấu trúc của một bộ khuếch đại quang sợi pha trộn Erbium EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) bao gồm

Sợi quang pha ion đất hiếm Erbium EDF (Erbium-Doped Fiber): là nơi xảy ra quá trình khuếch đại (vùng tích cực) của EDFA. Cấu tạo của sợi quang pha ion Er^{3+} được minh họa như sau.



Hình 7.16. Mặt cắt ngang của một loại sợi quang pha ion Erbium

Trong đó:

+ Vùng lõi trung tâm (có đường kính từ 3 -6 μm) của EDF được pha trộn ion Er^{3+} là nơi có cường độ sóng bơm và tín hiệu cao nhất. Việc pha

các ion Er^{3+} trong vùng này cung cấp sự chông lấp của năng lượng bơm và tín hiệu với các ion erbium lớn nhất dẫn đến sự khuếch đại tốt hơn.

- + Lớp bọc (cladding) có chiết suất thấp hơn bao quanh vùng lõi.
- + Lớp phủ (coating) bảo vệ bao quanh sợi quang tạo bán kính sợi quang tổng cộng là 250 μm . Lớp phủ này có chiết suất lớn hơn so với lớp bọc dung để loại bỏ bất kỳ ánh sáng không mong muốn nào lan truyền trong sợi quang.

Nếu không kể đến chất pha erbium, cấu trúc EDF giống như sợi đơn mode chuẩn trong viễn thông. Ngoài ra, EDF còn được chế tạo bằng các loại vật liệu khác như sợi thủy tinh flouride (flouride-based glass fiber) hoặc sợi quang thủy tinh đa vật liệu (multicomponent glass fiber).

- Laser bơm (pumping laser): Cung cấp năng lượng ánh sáng để tạo ra trạng thái nghịch đảo nồng độ trong vùng tích cực. Laser bơm phát ra ánh sáng có bước sóng 980nm hoặc 1480nm.

- WDM Coupler: Ghép tín hiệu quang cần khuếch đại và ánh sáng từ laser bơm vào trong sợi quang. Loại coupler được sử dụng là WDM coupler cho phép ghép các tín hiệu có bước sóng 980/1550nm hoặc 1480/1550nm.

- Bộ cách ly quang (Optical isolator): Ngăn không cho tín hiệu quang được khuếch đại phản xạ ngược về phía đầu phát hoặc các tín hiệu quang trên đường truyền phản xạ ngược về EDFA.

7.4.2. Lý thuyết khuếch đại trong EDFA

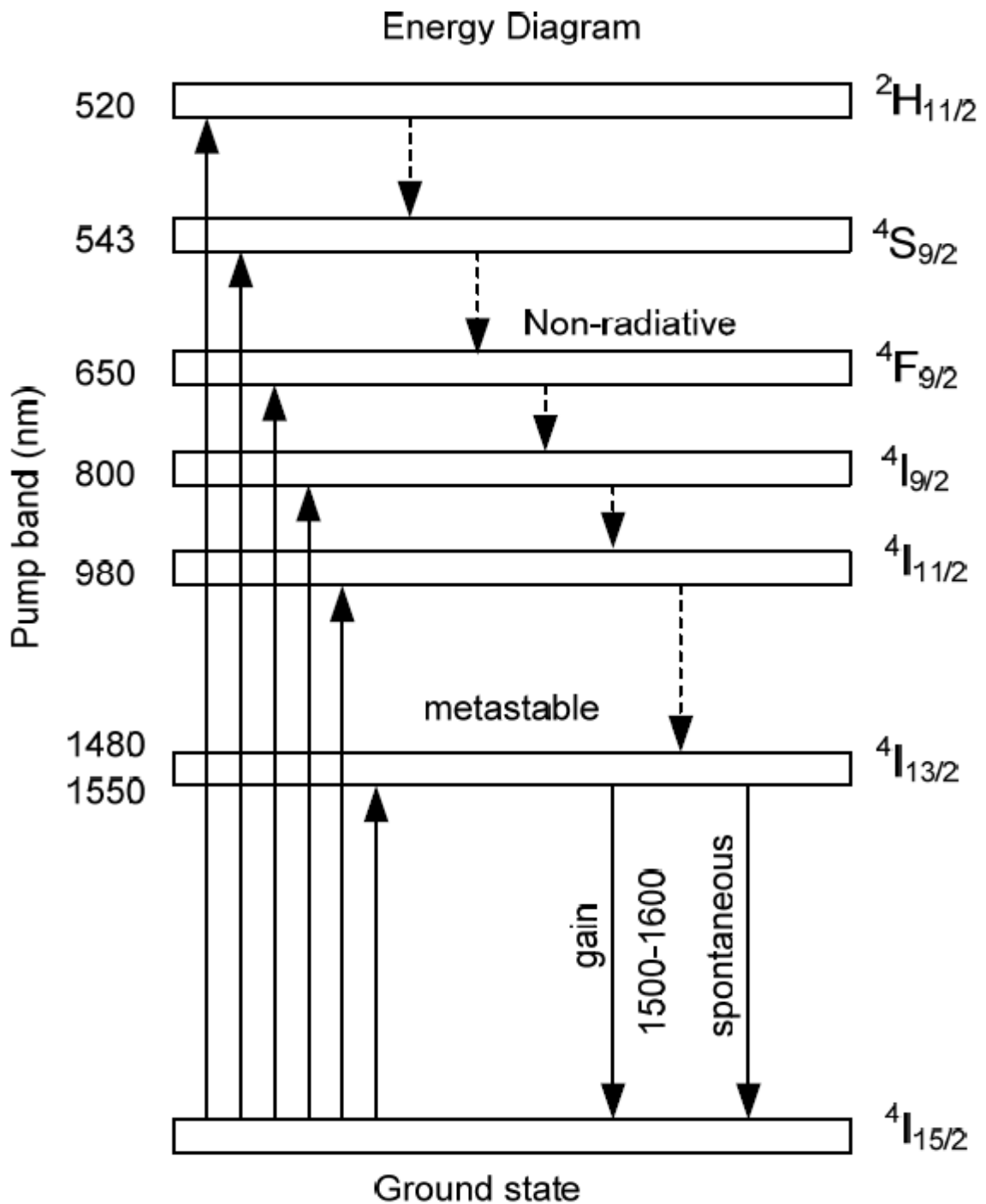
a) Giảm độ phân bố năng lượng của Er^{3+}

Giảm độ phân bố năng lượng của Er^{3+} trong sợi silica được minh họa trong hình vẽ. Theo đó, các ion Er^{3+} có thể tồn tại ở nhiều vùng năng lượng khác nhau được ký hiệu: $^4I_{15/2}$, $^4I_{13/2}$, $^4I_{11/2}$, $^4I_{9/2}$, $^4F_{9/2}$, $^4S_{9/2}$, $^2H_{11/2}$. Trong đó

- Vùng $^4I_{15/2}$ có mức năng lượng thấp nhất, được gọi là vùng nền (ground-state band)

- Vùng $^4I_{13/2}$ được gọi là vùng giả bền (metastable band) vì các ion Er^{3+} có thời gian sống (lifetime) tại vùng này lâu (khoảng 10ms) trước khi chuyển xuống vùng nền. Thời gian sống này thay đổi tùy theo loại tạp chất được pha trong lõi của EDF.

- Vùng $^4I_{11/2}$, $^4I_{9/2}$, $^4F_{9/2}$, $^4S_{9/2}$, $^2H_{11/2}$ là các vùng năng lượng cao, được gọi là vùng kích thích hay vùng bơm (pumping band). Thời gian các ion Er^{3+} có trạng thái năng lượng trong các vùng này rất ngắn (khoảng 1 μs)



Hình 7.17. Giản đồ phân bố năng lượng của ion Er^{3+} trong sợi silica.

Sự chuyển đổi năng lượng của các ion Er^{3+} có thể xảy ra trong các trường hợp sau:

- Khi các ion Er^{3+} ở vùng nền nhận một mức năng lượng bằng độ chênh lệch năng lượng giữa vùng nền và vùng năng lượng cao hơn, chúng sẽ chuyển lên vùng có mức năng lượng cao hơn (sự hấp thụ năng lượng)

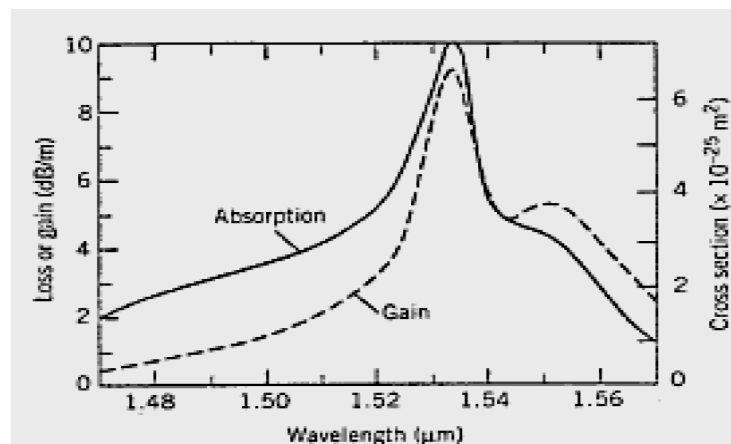
- Khi các ion Er^{3+} chuyển từ các vùng năng lượng cao xuống vùng năng lượng thấp hơn sẽ xảy ra hai trường hợp sau:

- Phân rã không bức xạ (nonradiative decay): năng lượng được giải phóng dưới dạng photon tạo ra sự dao động phân tử trong sợi quang
- Phát xạ ánh sáng (radiation): năng lượng được giải phóng dưới dạng photon

Độ chênh lệch năng lượng giữa vùng giả bền (${}^4I_{13/2}$) và vùng nền (${}^4I_{15/2}$)

- 0.775eV (tương ứng với năng lượng của photon có bước sóng 1600nm) tính từ đáy vùng giả bền đến đỉnh của vùng nền
- 0.814eV (1527 nm) tính từ đáy vùng giả bền đến đáy của vùng nền
- 0.841 eV (1477nm) tính từ đỉnh vùng giả bền đến đáy của vùng nền

Mật độ phân bố năng lượng của các ion Er^{3+} trong vùng giả bền không đều nhau: các ion Er^{3+} có khuynh hướng tập trung nhiều ở các mức năng lượng thấp. Điều này dẫn đến khả năng hấp thụ và phát xạ photon của ion Erbium thay đổi theo bước sóng. Phổ hấp thụ (absorption spectrum) và phổ độ lợi (gain spectrum) của EDFA có lõi pha Ge được biểu diễn trên hình dưới



Hình 7.18. Phổ hấp thụ (absorption spectrum) và phổ độ lợi (gain spectrum) của EDFA có lõi pha Ge

b) Nguyên lý hoạt động của EDFA

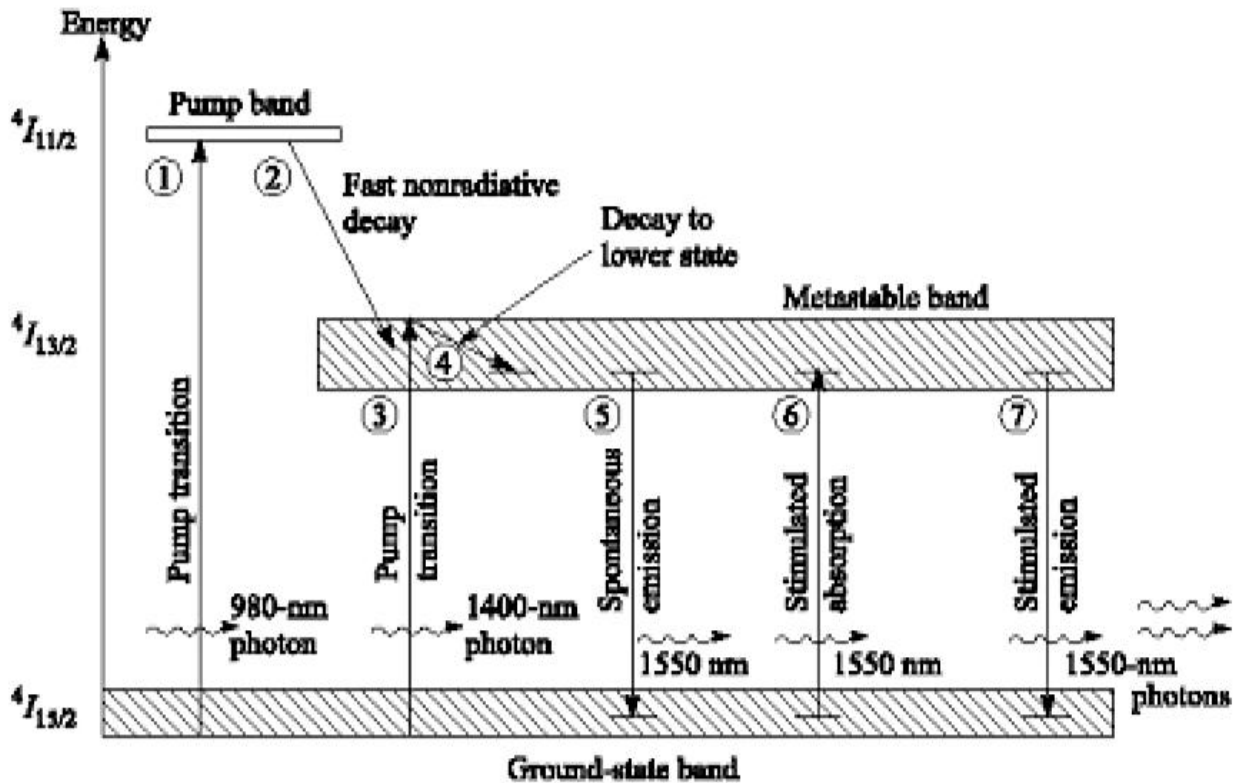
Nguyên lý khuếch đại của EDFA được dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích.

Quá trình khuếch đại tín hiệu quang trong EDFA có thể được thực hiện theo các bước như sau

Khi sử dụng nguồn bơm laser 980nm, các ion Er^{3+} ở vùng nền sẽ hấp thụ năng lượng từ các photon (có năng lượng $E_{\text{photon}} = 1.27\text{eV}$) và chuyển lên trạng thái năng lượng cao hơn ở vùng bơm (pumping band) (1)

Tại vùng bơm, các ion Er^{3+} phân rã không bức xạ rất nhanh (khoảng $1\mu\text{s}$) và chuyển xuống vùng giả bền (2)

Khi sử dụng nguồn bơm laser 1480nm, các ion Er^{3+} ở vùng nền sẽ hấp thụ năng lượng từ các photon (có năng lượng $E_{\text{photon}} = 0.841\text{eV}$) và chuyển sang trạng thái năng lượng cao hơn ở đỉnh của vùng giả bền (3)



Hình 7.19. Quá trình khuếch đại tín hiệu xảy ra EDFA với hai bước sóng bơm 980 nm và 1480nm

Các ion Er^{3+} trong vùng giả bền luôn có khuynh hướng chuyển xuống vùng năng lượng thấp (vùng có mật độ điện tử cao) (4)

Sau khoảng thời gian sống (khoảng 10ms), nếu không được kích thích bởi các photon có năng lượng thích hợp (phát xạ kích thích) các ion Er^{3+} sẽ chuyển sang trạng thái năng lượng thấp hơn ở vùng nền và phát xạ ra photon (phát xạ tự phát) (5).

Khi cho tín hiệu ánh sáng đi vào EDFA, sẽ xảy ra đồng thời hai hiện tượng sau:

- Các photon tín hiệu bị hấp thụ bởi các ion Er^{3+} ở vùng nền (6). Tín hiệu ánh sáng bị suy hao

- Các photon tín hiệu kích thích các ion Er^{3+} ở vùng giả bền (7). Hiện tượng phát xạ kích thích xảy ra. Khi đó, các ion Er^{3+} bị kích thích sẽ chuyển trạng thái năng lượng từ mức năng lượng cao ở vùng giả bền xuống mức năng lượng thấp ở vùng nền và phát xạ ra photon mới có cùng hướng truyền, cùng phân cực, cùng pha và cùng bước sóng. Tín hiệu ánh sáng được khuếch đại.

Độ rộng giữa vùng giả bền và vùng nền cho phép sự phát xạ kích thích (khuếch đại) xảy ra trong khoảng bước sóng 1530 nm – 1565nm. Đây cũng là vùng bước sóng hoạt động của EDFA. Độ lợi khuếch đại giảm nhanh chóng tại các bước sóng lớn hơn 1565 nm và bằng 0 dB tại bước sóng 1616nm.

7.4.3. Yêu cầu đối với nguồn bơm

a) Bước sóng bơm

Với các vùng năng lượng được nêu trong phần trên, ánh sáng bơm có thể được sử dụng tại các bước sóng khác nhau 650 nm (${}^4F_{9/2}$), 800 nm (${}^4I_{9/2}$), 980 nm (${}^4I_{11/2}$), 1480 nm (${}^4I_{13/2}$). Tuy nhiên, khi bước sóng bơm càng ngắn thì các ion Er^{3+} phải trải qua nhiều giai đoạn chuyển đổi năng lượng trước khi trở về vùng nền và phát xạ ra photon ánh sáng. Do đó, hiệu suất bơm không cao, năng lượng bơm sẽ bị hao phí qua việc tạo ra các phonon thay vì photon. Vì vậy, trên thực tế, ánh sáng bơm sử dụng cho EDFA chỉ được sử dụng tại hai bước sóng 980nm và 1480nm.

Trong EDFA, điều kiện để có khuếch đại tín hiệu là đạt được sự nghịch đảo nồng độ bằng cách sử dụng nguồn bơm để bơm các ion erbium lên trạng thái kích thích. Có hai cách thực hiện quá trình này: bơm trực tiếp tại bước sóng 1480 nm hoặc bơm gián tiếp ở bước sóng 980 nm.

- Phương pháp bơm gián tiếp (bơm ở 980 nm): Trong trường hợp này, ion erbium liên tục được chuyển tiếp từ vùng năng lượng ${}^4I_{15/2}$ thấp lên vùng năng lượng cao ${}^4I_{11/2}$, sau đó các ion sẽ phân rã xuống vùng ${}^4I_{13/2}$ nhưng không phát xạ. Từ vùng này, khi có ánh sáng kích thích thì các ion sẽ phát xạ bước sóng mong muốn (từ 1550 đến 1600 nm) khi chuyển từ vùng năng lượng ${}^4I_{13/2}$ xuống vùng ${}^4I_{15/2}$. Đây chính là hệ thống ba mức. Thời gian sống của ion erbium ở mức ${}^4I_{11/2}$ khoảng 1 μ s trong khi ở ${}^4I_{13/2}$ thì tới 10ms. Với thời gian sống dài, vùng ${}^4I_{15/2}$ được gọi là vùng ổn định. Vì vậy, các ion được bơm lên mức cao, sau đó nhanh chóng rơi xuống vùng ${}^4I_{13/2}$ và tồn tại ở đó trong một khoảng thời gian tương đối dài tạo nên sự nghịch đảo về nồng độ.

- Với phương pháp bơm trực tiếp (1480 nm): các ion erbium chỉ hoạt động trong hai vùng năng lượng và ${}^4I_{15/2}$. Đây là hệ thống 2 mức. Các ion erbium

liên tục được chuyển từ vùng năng lượng nền $^4I_{15/2}$ lên vùng năng lượng kích thích $^4I_{13/2}$ nhờ năng lượng bơm. Vì thời gian tồn tại ở mức này dài nên chúng tích lũy tại đây tạo ra sự nghịch đảo nồng độ.

Nguồn bơm có hiệu quả cao ở cả hai bước sóng 980 và 1480 nm. Để có hệ số khuếch đại hơn 20 dB thì chỉ cần tạo ra nguồn bơm có công suất nhỏ hơn 5 mW, nhưng vẫn cần phải có nguồn bơm từ 10 đến 100 mW để đảm bảo cho công suất ra đủ lớn.

Chỉ số nhiễu lượng tử giới hạn là 3 dB đạt được ở bước sóng 980 nm. Đối với bước sóng 1480 nm thì chỉ số nhiễu là vào khoảng 4 dB vì tiết diện ngang phát xạ tại 1480 nm cao hơn tại 980 nm và sự bức xạ kích thích do nguồn bơm đã giới hạn sự nghịch đảo tích lũy tại 1480nm. Do đó, bước sóng bơm 980 nm được ứng dụng cho các bộ khuếch đại tạp âm thấp. Hệ số độ lợi tại bước sóng bơm 980 nm cao hơn tại 1480 nm tại cùng công suất bơm. Do đó, để đạt được cùng một hệ số độ lợi thì công suất bơm tại 1480 nm phải cao hơn tại 980 nm. Vì công suất bơm ở 1480 nm lớn hơn nên công suất ngõ ra lớn hơn, do đó bơm ở bước sóng 1480nm được ứng dụng cho các bộ khuếch đại công suất. Ngoài ra, bước sóng bơm 1480 nm được truyền trong sợi quang với suy hao thấp. Do đó, nguồn bơm laser có thể đặt xa bộ khuếch đại.

Hiện nay, bơm bước sóng 1480 nm được sử dụng rộng rãi hơn vì chúng sẵn có hơn và độ tin cậy cao hơn. Độ tin cậy là đặc điểm quan trọng đối với laser bơm vì nó dùng để bơm cho khoảng cách dài và để tránh làm nhiễu tín hiệu. Các thiết bị khuếch đại công suất đòi hỏi công suất bơm cao nhất và độ ổn định của chúng là mấu chốt trong quá trình nghiên cứu phát triển chúng. Nếu tăng được độ ổn định của laser có bước sóng 980 nm thì có thể chúng sẽ được chọn làm nguồn bơm. Một số EDFA được bơm tại cả hai bước sóng để tận dụng ưu điểm của cả hai bước sóng.

Bảng 1 So sánh hai bước sóng bơm 980nm và 1480nm

Bước sóng bơm	980 nm	1480 nm
Tính chất:		
Độ lợi	Cao hơn	Thấp hơn
Độ lợi công suất bơm	Thấp hơn	Cao hơn
Suy hao công suất bơm	Cao hơn	Thấp hơn
Hệ số nhiễu	Thấp hơn	Cao hơn
Ứng dụng	Tiền khuếch đại	Khuếch đại công suất

b) Công suất bơm

Công suất bơm càng lớn thì sẽ có nhiều ion erbium bị kích thích để trao đổi năng lượng với tín hiệu cần khuếch đại và sẽ làm cho hệ số khuếch đại tăng lên. Tuy nhiên, hệ số khuếch đại không thể tăng mãi theo công suất bơm

vì số lượng các ion erbium được cấy vào sợi là có giới hạn. Ngoài ra, khi công suất bơm tăng lên thì hệ số nhiễu sẽ giảm. Điều này sẽ được trình bày trong phần tính hệ số nhiễu của EDFA.

c) Hướng bơm

Bộ khuếch đại EDFA có thể được bơm theo ba cách:

Bơm thuận (codirectional pumping): nguồn bơm được bơm cùng chiều với hướng truyền tín hiệu.

Bơm ngược (counterdirectional pumping): nguồn bơm được bơm ngược chiều với hướng truyền tín hiệu.

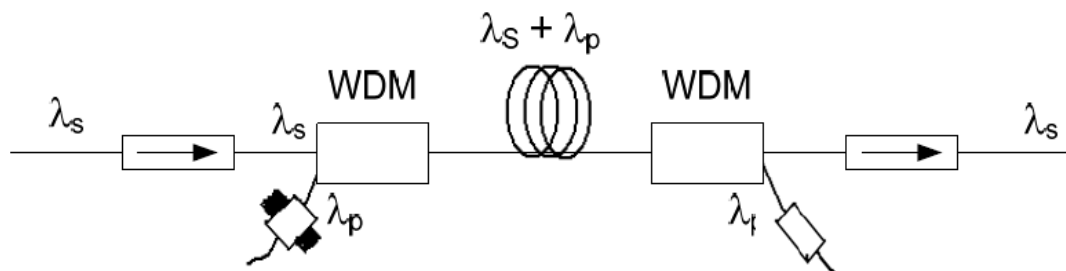
Bơm hai chiều (dual pumping): sử dụng hai nguồn bơm và được theo hai chiều ngược nhau.

Hướng bơm thuận có ưu điểm nhiễu thấp vì nhiễu khá nhạy cảm với độ lợi mà độ lợi tín hiệu cao nhất khi công suất tín hiệu vào thấp nhất. Trong khi đó, hướng bơm ngược cung cấp công suất ra bão hoà cao nhưng có hệ số nhiễu cao hơn bơm thuận.

Do vậy, người ta đề nghị sử dụng cả hai laser bơm có bước sóng bơm khác nhau. Việc bơm tại bước sóng 1480 nm thường được sử dụng theo chiều ngược với hướng truyền tín hiệu và bơm tại 980 nm theo hướng thuận để sử dụng tốt nhất ưu điểm của mỗi loại bơm. Bơm tại 1480 nm có hiệu suất lượng tử cao hơn nhưng có hệ số nhiễu cao hơn, trong khi bơm tại bước sóng 980 nm có thể cung cấp một hệ số nhiễu gần mức giới hạn lượng tử. Hệ số nhiễu thấp phù hợp cho các ứng dụng tiền khuếch đại.

Một EDFA được bơm bằng một nguồn bơm có thể cung cấp công suất đầu ra cực đại khoảng +16 dBm trong vùng bão hoà hoặc hệ số nhiễu từ 5-6 dB trong vùng tín hiệu nhỏ. Cả hai bước sóng bơm được sử dụng đồng thời có thể cung cấp công suất đầu ra cao hơn; một EDFA được bơm kép có thể cung cấp công suất ra tới +26 dBm trong vùng công suất bơm cao nhất có thể đạt được. Hình 6 thể hiện một EDFA được bơm kép.

Giá trị các đặc tính của bộ khuếch đại EDFA được trình bày trong bảng 2.



Hình 7.20. Cấu hình bộ khuếch đại EDFA được bơm kép.

7.4.4. Phổ khuếch đại

Phổ độ lợi của EDFA được trình bày trong hình *Hình 7.18*. là tính chất quan trọng nhất của EDFA khi xác định các kênh tín hiệu được khuếch đại trong hệ thống WDM. Hình dạng của phổ khuếch đại phụ thuộc vào bản chất của sợi quang, loại tạp chất (Ge, Al) và nồng độ tạp chất được pha trong lõi của sợi quang.

Hình *Hình 7.18*. cho thấy phổ độ lợi của EDFA có lõi pha Ge khá rộng. Tuy nhiên, phổ độ lợi này không bằng phẳng. Điều này sẽ dẫn đến việc hệ số khuếch đại khác nhau đối với các bước sóng khác nhau. Nếu độ lợi của các kênh tín hiệu không đồng nhất, nhất là sau khi qua nhiều tầng EDFA, sai số độ lợi này sẽ tích lũy tuyến tính đến mức khi tới đầu thu kênh bước sóng có độ lợi cao làm cho đầu vào máy thu quá tải. Ngược lại, kênh tín hiệu có độ lợi nhỏ thì tỉ số SNR không đạt yêu cầu. Sự làm phẳng độ lợi là cần thiết để loại bỏ sự khuếch đại méo các tín hiệu qua các EDFA đường truyền ghép tầng.

Một số biện pháp được sử dụng để khắc phục sự không bằng phẳng của phổ độ lợi:

- Chọn lựa các bước sóng có độ lợi gần bằng nhau. WDM làm việc ở dải sóng băng C (1530 – 1565 nm). Trong dải bước sóng này chọn 40 bước sóng làm bước sóng công tác của WDM. Các bước sóng này có độ lợi gần bằng nhau.
- Công nghệ cân bằng độ lợi: dùng bộ cân bằng (equalizer) hấp thụ bớt công suất ở bước sóng có độ lợi lớn và bộ khuếch đại để tăng công suất của bước sóng có độ lợi nhỏ.
- Thay đổi thành phần trộn trong sợi quang: dùng sợi quang trộn thêm nhôm, photpho nhôm hay flo cùng với erbium sẽ tạo nên bộ khuếch đại có băng tần được mở rộng và phổ khuếch đại bằng phẳng hơn.

Ngoài ra, phổ độ lợi của EDFA còn phụ thuộc vào chiều dài của sợi EDF. Lý do là vì trạng thái nghịch đảo nồng độ thay đổi dọc theo chiều dài của sợi quang khi công suất bơm thay đổi.

Bộ khuếch đại EDFA hoạt động ở **băng C (1530-1565 nm)**. Tuy nhiên, độ lợi của sợi pha tạp có đuôi trải rộng đến khoảng 1605 nm. Điều này kích thích sự phát triển của các hệ thống hoạt động ở **băng L từ 1565 đến 1625 nm**. Nguyên lý hoạt động của EDFA băng L giống như EDFA băng C. Tuy nhiên, có sự khác nhau trong việc thiết kế EDFA cho băng C và băng L. Các phần tử bên trong bộ khuếch đại quang như bộ cách ly (isolator) và bộ ghép (coupler) phụ thuộc vào bước sóng nên chúng sẽ khác nhau trong băng C và

băng L. Sự so sánh các tính chất của EDFA trong băng C và băng L được thể hiện trong bảng 2.

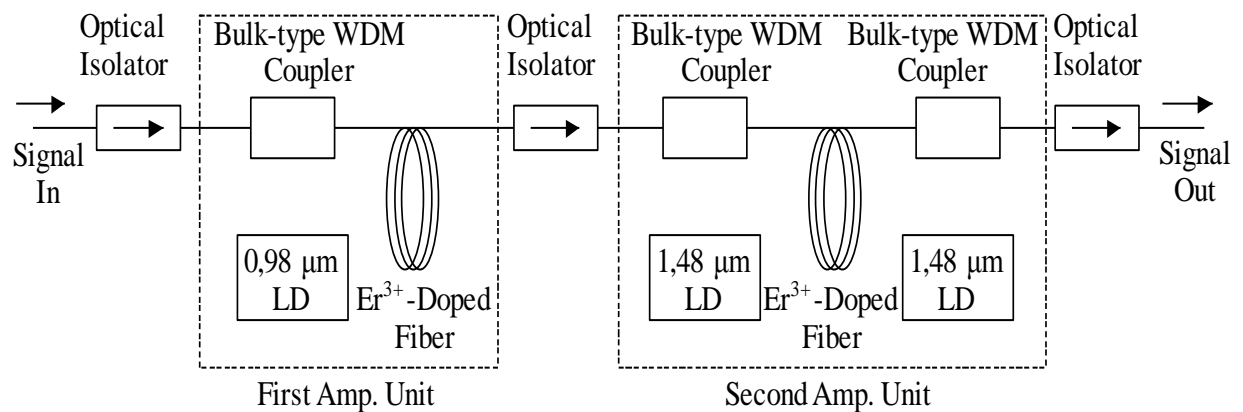
Bảng 2 Bảng so sánh EDFA hoạt động trong băng C và băng L

Tính chất	Băng C	Băng L
Độ lợi	Cao hơn	Nhỏ hơn khoảng 3 lần
Phổ độ lợi	Ít bằng phẳng hơn	Bằng phẳng hơn
Nhiều ASE	Thấp hơn	Cao hơn

Hình dưới trình bày cấu trúc của một bộ khuếch đại băng L làm bằng phẳng độ lợi trong khoảng bước sóng 1570nm – 1610nm với thiết kế hai tầng

Tầng đầu tiên được bơm ở bước sóng 980nm và hoạt động như một bộ EDFA truyền thống (sợi quang dài 20-30nm) có khả năng cung cấp độ lợi trong khoảng bước sóng 1530-1570 nm.

Ngược lại, tầng thứ hai có sợi quang dài 200m và được bơm hai chiều sử dụng laser 1480nm. Một bộ isolator được đặt giữa hai tầng này cho phép nhiễu ASE truyền từ tầng thứ 1 sang tầng thứ 2 nhưng ngăn ASE truyền ngược về tầng thứ nhất. Với cấu trúc nối tiếp như vậy, khuếch đại hai tầng có thể cung cấp độ lợi phẳng trên một vùng băng thông rộng trong khi vẫn duy trì mức nhiễu thấp.



Hình 7.21. Cấu hình của một bộ khuếch đại băng L làm bằng phẳng độ lợi trong khoảng bước sóng 1570nm – 1610nm với thiết kế hai tầng

7.4.5. Các tính chất của EDFA

a) Độ lợi (Gain)

Độ lợi của một bộ EDFA có thể được tính theo phương trình sau:

$$G = \exp\left[\int_0^L (N_2(z)\sigma_s^{(e)} - N_1(z)\sigma_s^{(a)})\Gamma_s dz\right] \quad (2.11)$$

Trong đó:

- $N_2(z)$, $N_1(z)$: mật độ ion erbium ở trạng thái kích thích và ở trạng thái nền tại vị trí z trong đoạn sợi quang pha erbium
- L : chiều dài sợi pha erbium.
- $\sigma_s^{(e)}$, $\sigma_s^{(a)}$: tiết diện ngang hấp thụ và phát xạ của ion erbium tại bước sóng tín hiệu.
- Phương trình (2.11) cho thấy độ lợi liên quan đến sự nghịch đảo nồng độ trung bình. Gọi $\overline{N_1}$, $\overline{N_2}$ lần lượt là nồng độ ion Erbium ở mức năng lượng nền và mức năng lượng kích thích trung bình. Khi đó $\overline{N_1}$, $\overline{N_2}$ sẽ được tính theo công thức sau:

$$\overline{N_1} = \frac{1}{L} \int_0^L N_1(z) ds \quad (2.12)$$

$$\overline{N_2} = \frac{1}{L} \int_0^L N_2(z) ds \quad (2.13)$$

Phương trình (2.11) có thể được viết lại một cách đơn giản hơn như sau:

$$G = \exp[\overline{N_2}\sigma_s^{(e)} - \overline{N_1}\sigma_s^{(a)}]\Gamma_s L \quad (2.14)$$

Từ phương trình trên ta thấy độ lợi tín hiệu sau khi đi qua sợi quang chỉ phụ thuộc vào sự nghịch đảo nồng độ các ion erbium trung bình trong sợi quang mà không phụ thuộc vào chi tiết về dạng nghịch đảo như một hàm đối với vị trí dọc theo chiều dài sợi quang. Trong phương trình (2.12), (2.13) có hai tham số $N_1(z)$ và $N_2(z)$ là hàm theo vị trí z dọc theo sợi quang được cho bởi

$$N_2(z) = \frac{\frac{\tau\sigma_s^{(a)}\Gamma_s}{hf_s A} P_s(z) + \frac{\tau\sigma_p^{(a)}\Gamma_p}{hf_s A} P_p(z)}{\frac{\tau(\sigma_s^{(a)} + \sigma_s^{(e)})\Gamma_s}{hf_s A} P_s(z) + \frac{\tau(\sigma_p^{(a)} + \sigma_p^{(e)})\Gamma_p}{hf_s A} P_p(z)} N \quad (2.15)$$

$$N_1(z) = N - N_2(z) \quad (2.16)$$

Trong đó:

- τ : thời gian sống của ion erbium ở trạng thái kích thích ${}^4I_{13/2}$.
- $P_s(z)$: công suất của tín hiệu tại vị trí z trong sợi quang.
- $P_p(z)$: công suất bơm tại vị trí z trong sợi quang.
- Γ_s : hệ số chồng lấp tại bước sóng tín hiệu.
- Γ_p : hệ số chồng lấp tại bước sóng bơm.
- f_p : tần số tín hiệu.
- f_p : tần số bơm.
- N : mật độ ion erbium tổng cộng.
- $\sigma_s^{(a)}, \sigma_s^{(e)}$: là tiết diện ngang hấp thụ và phát xạ tại bước sóng tín hiệu.
- $\sigma_p^{(a)}, \sigma_p^{(e)}$: là tiết diện ngang hấp thụ và phát xạ tại bước sóng bơm.
- h : hằng số Planck; $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{J.s}$.

Từ công thức (2.15) ta thấy hệ số khuếch đại của EDFA phụ thuộc vào các yếu tố sau:

- Phụ thuộc vào nồng độ ion Er^{+3} : Khi nồng độ Er^{+3} trong sợi quang của bộ EDFA tăng thì khả năng chúng được chuyển lên mức năng lượng cao hơn càng nhiều, do đó hệ số khuếch đại tăng. Nhưng nếu nồng độ Er^{+3} tăng quá cao sẽ gây tích tụ dẫn đến hiện tượng tiêu hao quang làm cho hệ số khuếch đại giảm.
- Phụ thuộc vào công suất tín hiệu đến và công suất bơm quang: Khi công suất vào tăng, bức xạ bị kích tăng nhanh, nghĩa là ion Er^{+3} ở mức năng lượng cao trở về mức năng lượng cơ bản càng nhiều làm giảm nồng độ số ion Er^{+3} ở mức năng lượng cao, làm yếu đi khả năng bức xạ của ion Er^{+3} khi tín hiệu quang được đưa tới, do đó hệ số khuếch đại giảm. Sẽ có một mức giới hạn mà công suất tín hiệu vào tăng nhưng công suất ra không tăng nữa gọi là công suất bão hoà.
- Phụ thuộc vào chiều dài sợi: Khi chiều dài sợi ngắn thì tín hiệu không được khuếch đại nhiều do đó độ lợi tín hiệu nhỏ. Ngược lại, khi chiều dài tăng lên thì tín hiệu được khuếch đại nhiều hơn, do đó độ lợi lớn hơn. Tuy nhiên, khi chiều dài quá dài so với công suất bơm thì độ lợi tín hiệu sẽ bị giảm do chiều dài quá lớn mà công suất bơm lại không

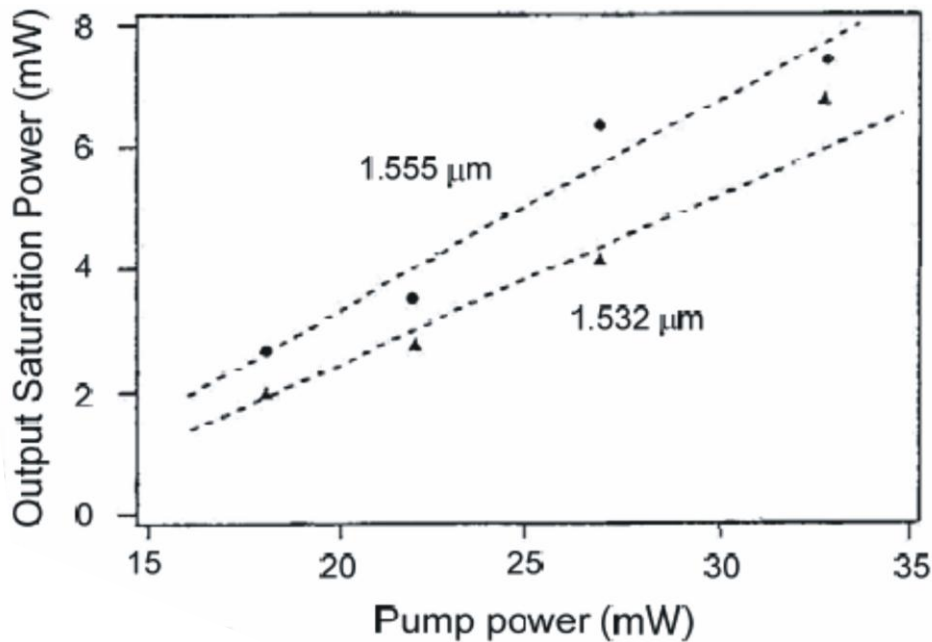
đáp ứng hết chiều dài sợi thì tín hiệu sẽ bị suy hao dần và do đó làm giảm độ lợi.

- Phụ thuộc vào công suất bơm: Công suất bơm càng lớn thì sẽ có nhiều ion erbium bị kích thích để trao đổi năng lượng với tín hiệu cần khuếch đại và sẽ làm cho hệ số khuếch đại tăng lên. Tuy nhiên, hệ số khuếch đại không thể tăng mãi theo công suất bơm vì số lượng các ion erbium được cấy vào sợi là có giới hạn.

Do vậy, tùy theo ứng dụng của EDFA, các yếu tố trên sẽ được hiệu chỉnh sau cho độ lợi của EDFA đạt giá trị yêu cầu với hiệu suất cao nhất. Thông thường, độ lợi của EDFA vào khoảng 20-40 dB tùy theo ứng dụng của EDFA là bộ khuếch đại công suất, khuếch đại đường truyền hay tiền khuếch đại.

b) Công suất ra bão hoà (Output saturation power)

Sự bão hoà xảy ra khi công suất tín hiệu vào EDFA lớn gây ra sự giảm hệ số khuếch đại. Vì vậy, nó giới hạn công suất ra của bộ khuếch đại. Sự bão hoà hệ số khuếch đại này xuất hiện khi công suất tín hiệu tăng cao và gây ra sự phát xạ kích thích ở một tỷ lệ cao và do đó làm giảm sự nghịch đảo nồng độ. Điều đó có nghĩa là số các ion erbium ở trạng thái kích thích giảm một cách đáng kể. Hệ quả là, công suất tín hiệu ở ngõ ra bị hạn chế bởi sự bão hoà công suất. Công suất ra bão hoà $P_{out,sat}$ được định nghĩa là tín hiệu ra mà ở đó hệ số khuếch đại bị giảm đi 3 dB so với khi khuếch đại tín hiệu nhỏ.



Hình 7.22. Công suất ra bão hoà tăng tuyến tính theo công suất bơm vào tại bước sóng bơm 975 nm đối với bước sóng tín hiệu là 1555 nm và 1532 nm.

Công suất ra bão hoà không phải là một hằng số mà tăng lên tuyến tính với công suất bơm (xem hình 8). Công suất bão hoà có thể được xác định bằng công suất tín hiệu ngõ ra mà tại đó độ lợi bằng độ lợi tín hiệu nhỏ trừ 3 dB. Như vậy bằng cách xác định độ lợi tín hiệu nhỏ ta có thể suy ra điểm bão hoà và từ đó xác định công suất bão hoà.

Công suất ra bão hoà cũng thay đổi tùy theo bước sóng của tín hiệu vì mật độ các ion Er^{3+} phân bố tại vùng năng lượng giả bên không bằng nhau. Hình 2.16 cho thấy công suất ra bão hoà tại 1.55 μm cao hơn tại 1.53 μm với cùng công suất bơm.

7.4.6. Ưu khuyết điểm của EDFA

a) Ưu điểm:

- Nguồn laser bơm bán dẫn có độ tin cậy cao, gọn và công suất cao.
- Cấu hình đơn giản: hạ giá thành của hệ thống.
- Cấu trúc nhỏ gọn: có thể lắp đặt nhiều EDFA trong cùng một trạm, dễ vận chuyển và thay thế.
- Công suất nguồn nuôi nhỏ: thuận lợi khi áp dụng cho các tuyến thông tin quang vượt biển.
- Không có nhiễu xuyên kênh khi khuếch đại các tín hiệu WDM như bộ khuếch đại quang bán dẫn.
- Hầu như không phụ thuộc vào phân cực của tín hiệu.

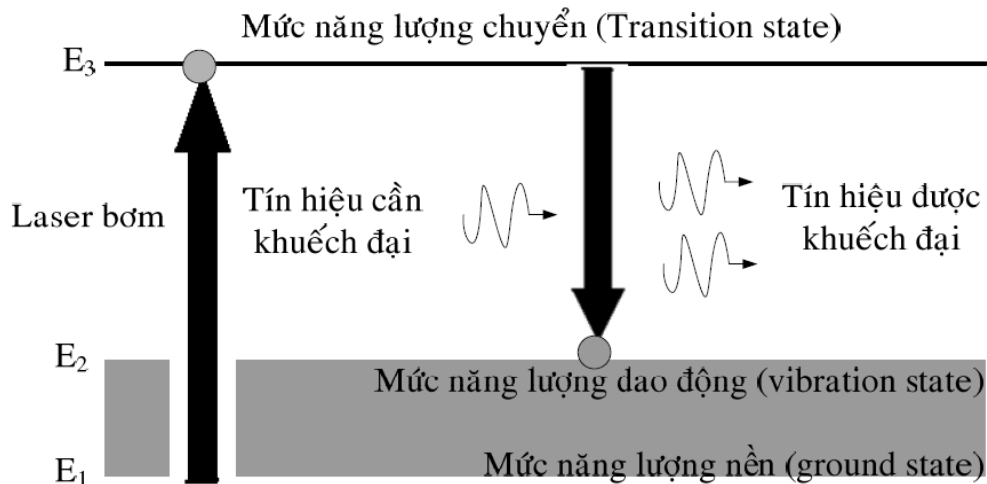
b) Khuyết điểm:

- Phổ độ lợi của EDFA không bằng phẳng.
- Băng tần hiện nay bị giới hạn trong băng C và băng L.
- Nhiễu được tích lũy qua nhiều chặng khuếch đại gây hạn chế cự ly truyền dẫn.

2.4 Bộ khuếch đại quang RAMAN (RA)

2.4.1 Nguyên lý hoạt động

Khuếch đại Raman dựa trên hiện tượng tán xạ Raman kích thích (Stimulated Raman Scattering). Tán xạ Raman kích thích là hiện tượng một nguyên tử hấp thụ năng lượng của một photon, sau đó tạo ra một photon có năng lượng khác. Vì vậy, tán xạ Raman kích thích được định nghĩa là hiện tượng photon thứ cấp được sinh ra do kích thích từ nguồn bên ngoài.



Hình 7.23. Sơ đồ chuyển năng lượng trong khuếch đại Raman

Để có khuếch đại Raman thì phải tạo ra sự nghịch đảo nồng độ. Điều này đạt được bằng cách cung cấp năng lượng cho các nguyên tử của sợi quang từ một laser bơm có bước sóng thấp hơn bước sóng của tín hiệu. Khi đó, các nguyên tử của sợi quang sẽ hấp thụ năng lượng bơm có năng lượng cao (bước sóng ngắn) và chuyển lên mức năng lượng cao hơn. Khi có tín hiệu đến, nó sẽ kích thích các nguyên tử đang ở mức năng lượng cao chuyển sang trạng thái năng lượng thấp hơn và giải phóng ra một năng lượng dưới dạng photon ánh sáng có cùng bước sóng (dài hơn

bước sóng bơm) và cùng pha với tín hiệu đến. Do đó, tín hiệu đã được khuếch đại

Dựa trên giản đồ năng lượng trên, tần số ánh sáng bơm $f_{\text{bơm}}$ và tần số ánh sáng được khuếch đại $f_{\text{khuếch đại}}$ được xác định như sau

$$f_{\text{bơm}} = (E_3 - E_1)/h$$

$$f_{\text{khuếch đại}} = (E_2 - E_1)/h$$

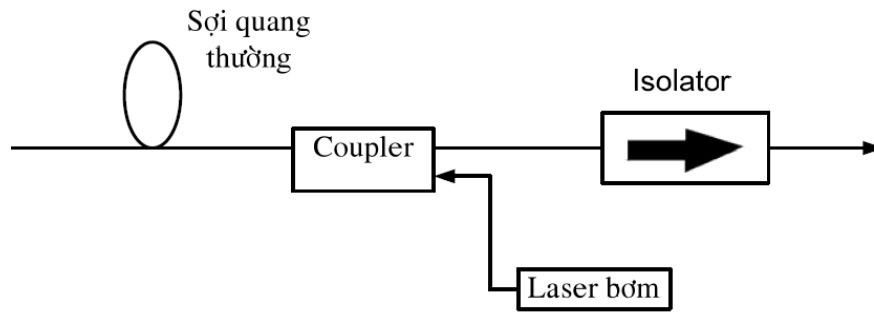
Trong đó

- h là hằng số Plank;
- E_1, E_2, E_3 là năng lượng của các trạng thái năng lượng cao (transition state), trạng thái năng lượng trung gian (vibration state) và trạng thái năng lượng thấp (ground state) của các nguyên tử trong sợi quang.

Không giống như nguyên lý khuếch đại của EDFA, khuếch đại Raman không cần một sợi quang riêng và đặc biệt (pha trộn ion Er^{3+}).

Trong khuếch đại Raman, tín hiệu quang được khuếch đại dọc theo toàn bộ chiều dài của sợi quang silic bình thường.

Cấu trúc của một bộ khuếch đại Raman được minh họa trong hình 2.19.



Hình 7.24. Cấu trúc của bộ khuếch đại Raman

Sợi quang: là nơi xảy ra quá trình khuếch đại. Sợi quang này cũng là sợi quang truyền tín hiệu như sợi SMF, DSF, ...

Trong khuếch đại quang không cần sử dụng sợi quang đặc biệt (pha ion Erbium) như bộ khuếch đại EFDA.

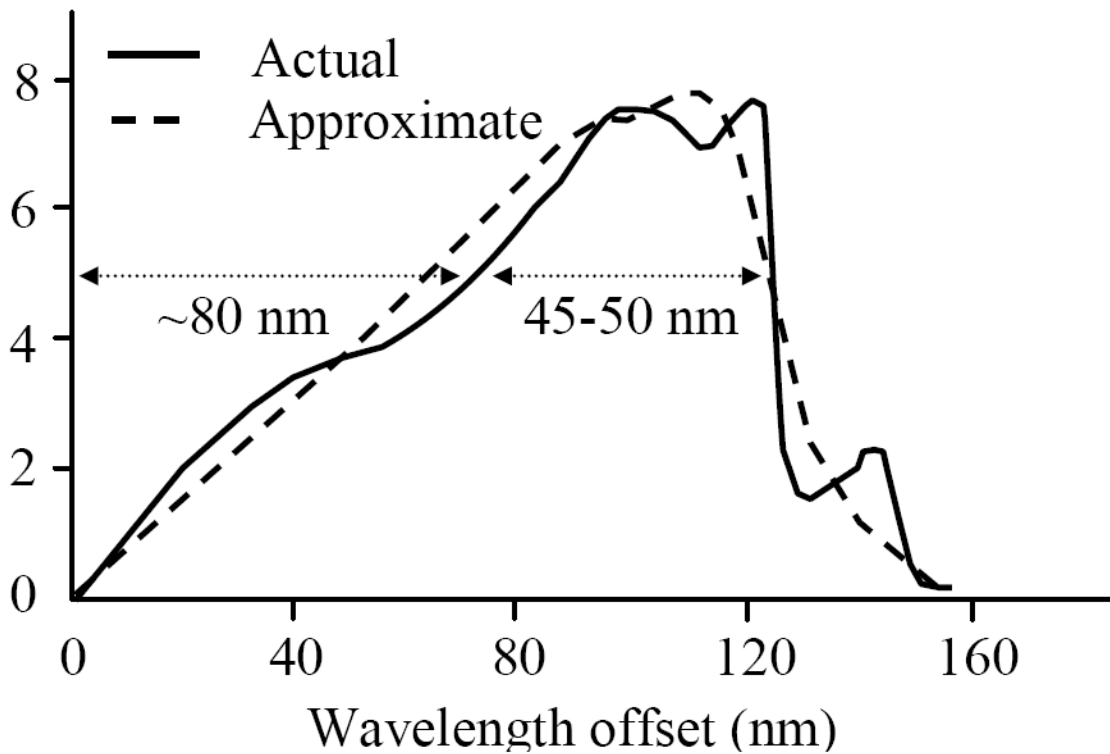
Bộ ghép (Coupler): dùng để ghép bước sóng tín hiệu vào với sóng bơm.

Laser bơm (Pump laser): dùng để cung cấp năng lượng cho các nguyên tử của sợi quang chuyển lên trạng thái kích thích, giúp tạo ra sự nghịch đảo nồng độ.

Bộ cách ly (Isolator): đặt ở hai đầu của bộ khuếch đại quang để ngăn chặn tín hiệu phản xạ ở hai đầu bộ khuếch đại. Đồng thời nó cũng giúp loại trừ nhiễu ASE theo hướng ngược về phía đầu vào có thể gây ảnh hưởng đến tín hiệu đầu vào.

2.4.2 Độ rộng băng tần và hệ số khuếch đại

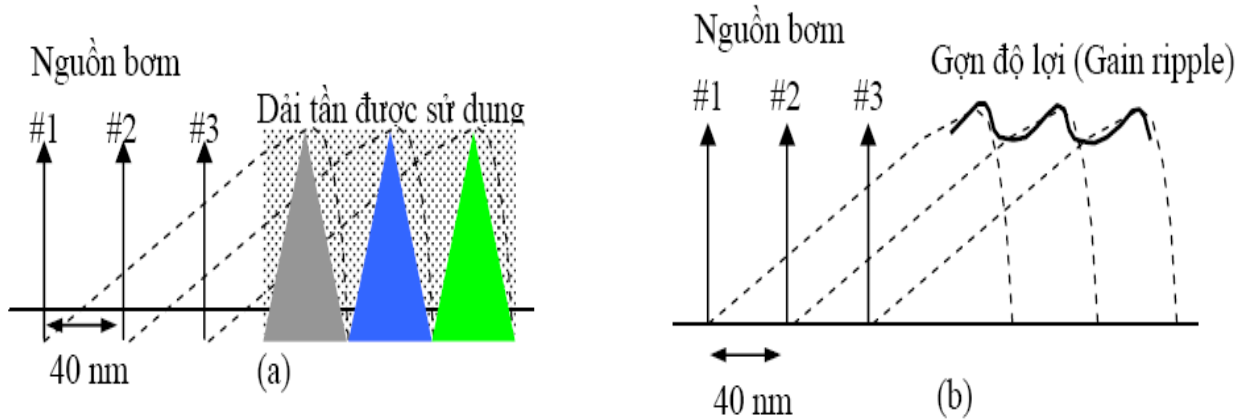
Hệ số khuếch đại Raman tăng hầu như tuyến tính với độ chênh lệch bước sóng giữa tín hiệu và nguồn bơm (wavelength offset), đạt giá trị đỉnh tại 100 nm và giảm nhanh chóng sau đó. Trong hình cũng cho thấy, băng thông độ lợi của khuếch đại Raman có thể đạt được từ 45-50nm.



Hình 7.25. Hệ số độ lợi Raman thay đổi theo độ chênh lệch bước sóng của tín hiệu và nguồn bơm (wavelength offset)

Nếu dải tần của các tín hiệu cần khuếch đại Raman lớn hơn băng thông độ lợi của khuếch đại Raman (giả sử 40nm), cần phải sử dụng nhiều nguồn bơm khác nhau. Mỗi nguồn bơm có bước sóng cách nhau khoảng 40nm (bằng với băng thông độ lợi). Khi đó, dải tần lớn của các tín hiệu có thể được khuếch đại một cách hiệu quả (xem Hình 7.26.-a). Tuy nhiên, do đặc tính khuếch đại của khuếch đại Raman và do khoảng của các bước sóng bơm, băng thông độ lợi tổng cộng có dạng gợn sóng như hình Hình 7.26.-b.

Với ưu điểm băng thông độ lợi lớn, khuếch đại Raman được quan tâm đến trong các ứng dụng thông tin quang. Tuy nhiên hiệu suất độ lợi của khuếch đại Raman không cao. Để đạt được hệ số khuếch đại lớn, cần phải sử dụng công suất bơm tương đối cao.



Hình 7.26.

(a) Với khoảng cách các nguồn bơm 40nm, các kênh nằm trong dải tần rộng được khuếch đại

(b) Gợn độ lợi do khuếch đại Raman và do khoảng cách các nguồn bơm

2.4.3 Ưu khuyết điểm của khuếch đại Raman:

So với các loại khuếch đại quang khác, khuếch đại Raman có những ưu điểm sau:

- Tạp âm nhiễu thấp
- Cấu trúc đơn giản, không cần sợi đặc biệt.
- Dễ chọn băng tần.
- Có thể đạt được băng thông rộng nhờ kết hợp vài laser bơm.

Tuy nhiên, bên cạnh những ưu điểm đó bộ khuếch đại Raman cũng có những nhược điểm như sau:

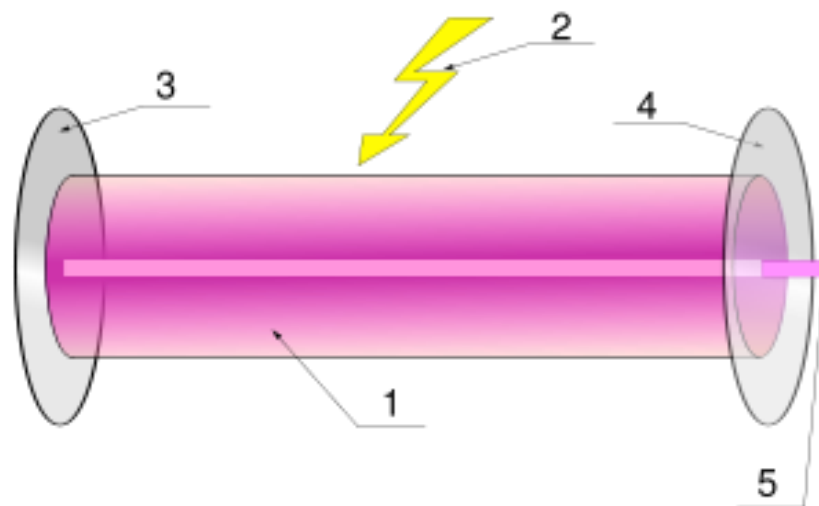
- Xuyên âm giữa các kênh tín hiệu do hiện tượng tán xạ Raman kích thích SRS. Đây là một trong các hiệu ứng phi tuyến của sợi quang có thể gây ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống ghép kênh theo bước sóng WDM.
- Hệ số khuếch đại thấp.
- Hiệu suất khuếch đại thấp hơn so với EDFA: khuếch đại Raman cần một công suất bơm lớn hơn để đạt cùng một giá trị độ lợi

Chương 8 LASER

Giới thiệu chung

Laser là tên viết tắt của cụm từ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation có nghĩa là "khuếch đại ánh sáng bằng phát xạ cưỡng bức". Laser được phỏng theo maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation-Sự khuếch đại sóng viba do Sự phát xạ cưỡng bức), một thiết bị có cơ chế tương tự nhưng tạo ra tia vi sóng hơn là các bức xạ ánh sáng. Maser đầu tiên được tạo ra bởi Charles H. Townes và sinh viên tốt nghiệp J.P. Gordon và H.J. Zeiger vào năm 1953. Maser đầu tiên đó không tạo ra tia sóng một cách liên tục. Nikolay Gennadiyevich Basov và Aleksandr Mikhailovich Prokhorov của Liên bang Xô Viết đã làm việc độc lập trên lĩnh vực lượng tử dao động và tạo ra hệ thống phóng tia liên tục bằng cách dùng nhiều hơn 2 mức năng lượng. Hệ thống đó có thể phóng ra tia liên tục mà không cho các hạt xuống mức năng lượng bình thường. Năm 1964, Charles Townes, Nikolai Basov và Aleksandr Prokhorov cùng nhận giải thưởng Nobel vật lý về nền tảng cho lĩnh vực điện tử lượng tử, dẫn đến việc tạo ra máy dao động và phóng đại dựa trên thuyết maser-laser.

8.1 Các phần tử của quang laser



Hình 8.1. Các phần tử của quang laser

- (1) Buồng cộng hưởng (vùng bị kích thích)
- (2) Nguồn nuôi (năng lượng bơm vào vùng bị kích thích)
- (3) gương phản xạ toàn phần
- (4) gương bán mạ
- (5) tia laser

Buồng cộng hưởng chứa hoạt chất laser, đó là một chất đặc biệt có khả năng khuếch đại ánh sáng bằng phát xạ cưỡng bức để tạo ra laser. Tính chất của laser phụ thuộc vào hoạt chất đó, do đó người ta căn cứ vào hoạt chất để phân loại laser.

Nguồn nuôi là phần cung cấp năng lượng cho hệ thống laser. Bao gồm cực phóng điện, đèn nháy, đèn hồ quang, ánh sáng từ laser khác. Việc lựa chọn loại nguồn nuôi nào để sử dụng dựa chủ yếu vào môi trường kích thích là loại gì, và điều này là yếu tố chủ chốt quyết định làm sao mà năng lượng truyền vào trong môi trường.

Ví dụ: Laser He-Ne dùng cực phóng điện trong hỗn hợp khí Heli Neon. Laser Nd:YAG dùng ánh sáng hội tụ từ đèn nháy Xenon.

Môi trường kích thích là yếu tố chính quyết định bước sóng, và các tính chất khác của tia laser. Có hàng trăm môi trường kích thích có thể làm được. Môi trường kích thích bị kích thích bằng nguồn bơm tạo ra sự kích thích đồng đều giữa các electron, cần thiết cho sự phát xạ cưỡng bức các hạt photon, dẫn đến hiện tượng khuếch đại ánh sáng.

Một ví dụ về cơ chế hoạt động của laser có thể được miêu tả cho laser thạch anh. Dưới sự tác động của hiệu điện thế cao, các electron của thạch anh di chuyển từ mức năng lượng thấp lên mức năng lượng cao tạo nên trạng thái đảo nghịch mật độ của electron.

Ở mức năng lượng cao, một số electron sẽ rơi ngẫu nhiên xuống mức năng lượng thấp, giải phóng hạt ánh sáng được gọi là photon. Các hạt photon này sẽ toả ra nhiều hướng khác nhau từ một nguyên tử, và phải các nguyên tử khác, kích thích electron ở các nguyên tử này rơi xuống tiếp, sinh thêm các photon cùng tần số, cùng pha và cùng hướng bay, tạo nên một phản ứng dây chuyền khuếch đại dòng ánh sáng.

Các hạt photon bị phản xạ qua lại nhiều lần trong vật liệu, nhờ các gương để tăng hiệu suất khuếch đại ánh sáng. Một số photon ra ngoài nhờ có gương phản xạ tại một đầu của vật liệu. Tia sáng đi ra chính là tia laser.

8.2 Nguyên tắc hoạt động laser

8.2.1 Sự phát xạ cưỡng bức

Ta đã biết rằng sự phát xạ bởi các hạt (nguyên tử, phân tử, ion) trong các nguồn sáng thông thường là các quá trình xảy ra một cách tự phát, hoàn toàn ngẫu nhiên. Khi nhận được một năng lượng thích hợp, hạt sẽ từ trạng thái bền nhảy lên trạng thái kích thích có mức năng lượng cao hơn. Sau một thời gian, hạt sẽ rơi trở về trạng thái bền và phóng thích năng lượng (đã hấp thụ) dưới dạng ánh sáng, nghĩa là phát ra photon.

Năm 1917, khi nghiên cứu quá trình tương tác giữa ánh sáng và vật chất, Einstein cho rằng : Không những các hạt phát xạ một cách ngẫu nhiên như trên mà còn có thể phát xạ do tác động của bên ngoài. Khi ta chiếu vào hệ

một bức xạ, thì các hạt đang ở mức năng lượng kích thích E2 sẽ rơi trở về trạng thái căn bản E1 và phát ra bức xạ : Đó là hiện tượng bức xạ kích thích động (hay bức xạ cảm ứng, bức xạ cưỡng bức). Đây là cơ sở hoạt động của máy Laser.

Các hạt thay đổi giữa hai mức năng lượng E1 (căn bản) và E2 (kích thích). Khi ta kích thích bằng quang tử (photon) có năng lượng.

$$h\nu = E_2 - E_1$$

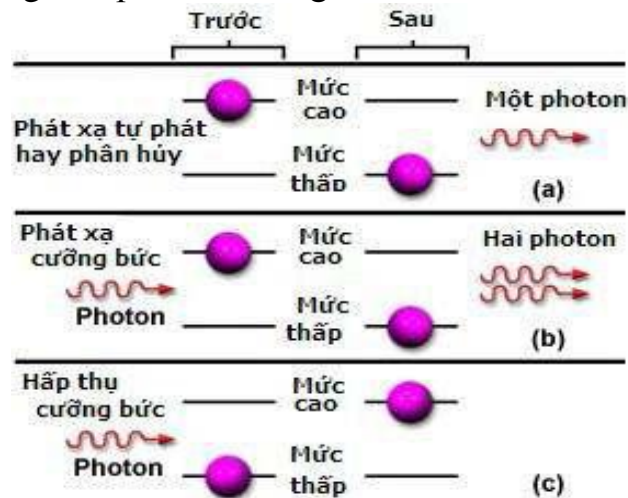
Thì các hạt từ mức E1 sẽ nhảy lên mức E2.

Số hạt ở mức năng lượng kích thích E2 (cao hơn) bình thường ít hơn ở mức năng lượng căn bản E1 (thấp hơn).

❖ Tóm lại, khi ta chiếu vào hệ một chùm tia sáng kích thích có năng lượng photon là $h\nu$ (thì trong một thời gian đó sẽ làm cho một số hạt từ trạng thái cơ bản E1 nhảy lên trạng thái kích thích E2 (sự hấp thụ), trong thời gian đó, một số hạt từ mức E2 tự phát rơi trở về E1, một số hạt khác bị đụng với photon kích thích cũng rơi trở về E1 (sự phát xạ ngẫu nhiên và phát xạ cưỡng bức). Nhưng luôn luôn $n_2 < n_1$. Do đó, các photon kích thích $h\nu$ (gặp các hạt ở mức E1 nhiều hơn gặp các hạt ở mức E2, nghĩa là hiện tượng hấp thụ mạnh hơn hiện tượng phát xạ ánh sáng. Vì vậy, ở điều kiện bình thường, khi đi qua một môi trường vật chất bao giờ ánh sáng cũng bị yếu đi.

Khi một photon hạt gặp một hạt ở trạng thái kích thích và làm hạt này rơi trở về mức căn bản thì photon được hạt phóng thích cũng là $h\nu$ (năng lượng do hạt hấp thụ khi đi từ E1 lên E2), photon mới sinh ra này hoàn toàn giống photon.

Như vậy kết quả của sự kích thích là từ một photon tới hạt, ta được hai photon phát xạ. Ta gọi là phát xạ cưỡng bức



Hình 8.2. Các quá trình phát xạ tự phát và phát xạ cưỡng bức

8.2.2 Sự khuếch đại ánh sáng đi qua một môi trường

Bây giờ ta thử giả thuyết có một trường hợp: Trong một môi trường số hạt ở trạng thái kích thích lớn hơn số hạt ở trạng thái căn bản : $n_2 > n_1$. Trong trường hợp này, photon kích thích sẽ gặp các hạt ở trạng thái kích thích nhiều

hơn ở trạng thái căn bản. Khi đó hiện tượng bức xạ sẽ mạnh hơn hiện tượng hấp thụ và kết quả ngược với trường hợp trên, khi truyền qua môi trường, ánh sáng mạnh hơn lên.

Thực vậy, khi một photon kích thích gặp một hạt ở trạng thái kích thích và gây ra sự phát xạ thì một photon thành hai. Cứ như thế số photon tăng lên rất nhanh, và khi truyền qua môi trường, ta được một chùm tia sáng có cường độ mạnh.

Như vậy, vấn đề 1à: Muốn có một chùm tia sáng cực mạnh bằng cách được khuếch đại lên như trên, ta phải làm cách nào có $n_2 > n_1$. Đó là sự “đảo ngược mật độ (nồng độ)”. Môi trường khi bị đảo ngược mật độ (nồng độ) như vậy được gọi là môi trường hoạt tính.

Để số hạt có năng lượng cao nhiều hơn hạt số hạt có năng lượng thấp, người ta phải cung cấp năng lượng cho môi trường, phải “bơm” năng lượng cho nó. Một trong các cách làm nghịch đảo mật độ (nồng độ) là phương pháp “bơm” quang học. Kỹ thuật này đưa đến giải Nobel về vật lý cho nhà bác học Pháp Kastler năm 1966 (công trình này của Kastler được thực hiện từ năm 1950). Kastler dùng một chùm tia sáng có cường độ mạnh làm bơm để bơm năng lượng cho môi trường khiến nó trở thành hoạt tính. Phương pháp bơm quang học thường được dùng với các chất rắn và chất lỏng. Với laser khí, người ta thường nghịch đảo mật độ (nồng độ) bằng cách phóng điện trong khí kém.

8.2.3 Bộ cộng hưởng

Với điều kiện $n_2 > n_1$, môi trường cho khả năng có thể thực hiện sự khuếch đại cường độ ánh sáng, nhưng muốn có được một chùm tia Laser có đặc tính định hướng cao độ thì chỉ có môi trường hoạt tính thì chưa đủ, mà còn cần một bộ phận gọi là bộ cộng hưởng. Bộ phận này vừa có tác dụng tăng cường cường độ ánh sáng, vừa có tác dụng định hướng chùm tia laser khi nó phóng ra khỏi máy. Trong trường hợp đơn giản nhất, bộ phận cộng hưởng gồm hai gương phẳng M1 và M2, đặt ở hai đầu máy.

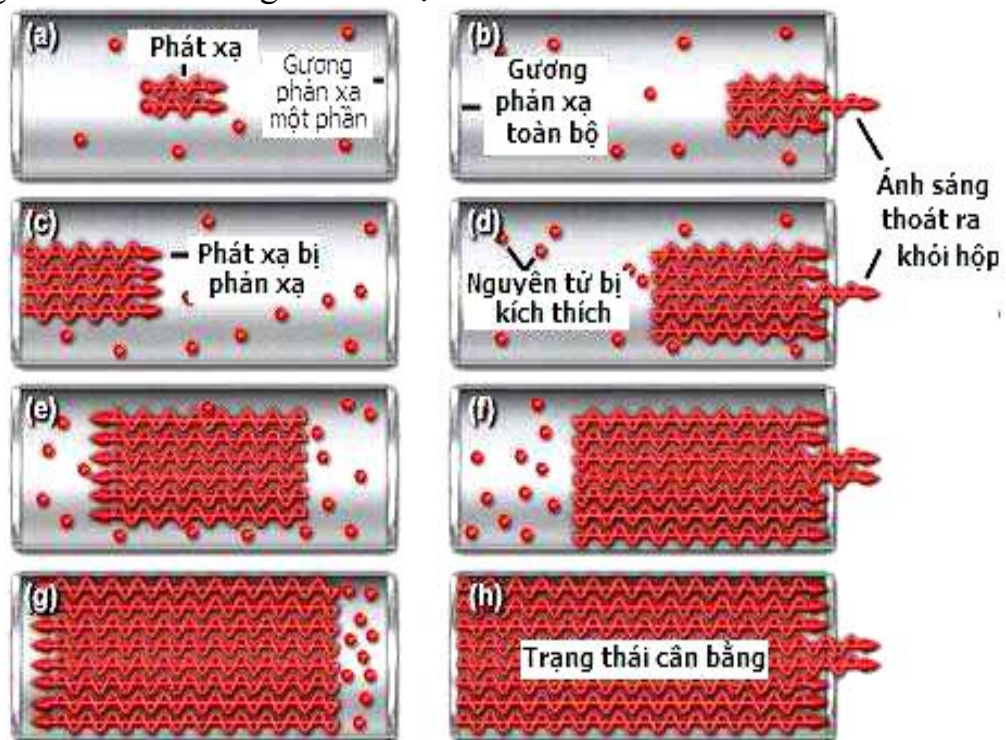
Các photon có phương di chuyển thẳng góc với hai gương sẽ dội đi, dội lại nhiều lần trong môi trường hoạt tính. Như vậy bộ phận cộng hưởng đóng vai trò như một cái bẫy ánh sáng. Trong khi phản chiếu qua lại như thế, các photon đập vào các hạt ở trạng thái kích thích, làm phóng thích các photon khác. Các photon này lại phản chiếu qua lại giữa M1 và M2, đập vào các hạt ở trạng thái kích thích và lại làm bật ra các photon mới nữa, cứ như thế cường độ ánh sáng tăng lên rất mạnh.

Với các photon này không di chuyển thẳng góc với hai gương thì sau một hồi di chuyển, chúng bị lọt ra ngoài máy.

8.2.4 Thêm phát xạ cưỡng bức

Ta nhận thấy trong cách cấu tạo trên của máy laser, có thể một phần năng lượng sẽ bị mất đi do sự phản chiếu trên hai gương M1, M2 và do sự

nhiều xạ làm lệch phương di chuyển của các photon. Do đó, ta chỉ thực sự có hiện tượng khuếch đại cường độ ánh sáng nếu công suất P sinh ra do sự phát xạ cưỡng bức lớn hơn công suất P' bị mất đi



Hình 8.3. Sự phát xạ cưỡng bức trong buồng cộng hưởng laser

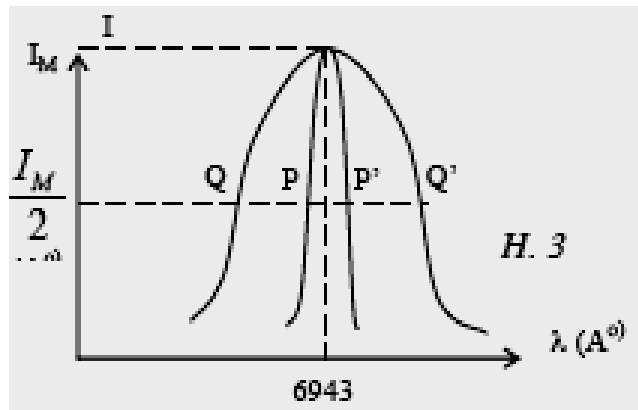
Như vậy muốn có được sự khuếch đại cường độ ánh sáng, không những ta phải có điều kiện đầu tiên $n_2 > n_1$ mà $n_2 - n_1$ phải lớn hơn một trị số (dương) xác định. Trị số này được gọi là thêm phát xạ cưỡng bức. Ta có trị số càng lớn thì thêm phát xạ cưỡng bức càng thấp.

Chỉ khi vào $n_2 - n_1$ vượt qua thêm, thì mới có ánh sáng laser phát ra.

8.2.5. Các đặc tính của tia laser

1. Tính đơn sắc

Các photon phát xạ cưỡng bức mang cùng một năng lượng hạt nên ánh sáng rất đơn sắc. Nếu xét ánh sáng phát ra bởi ngọc hồng tảo thì trong trường hợp laser, bề rộng PP' của vạch 6943A⁰ hẹp khoảng 10^{-4} lần so với bề rộng QQ' của vạch này trong trường hợp phát xạ thông thường.



Hình 8.4. Tính đơn sắc

2. Tính đồng pha

Với một nguồn sáng thông thường, ánh sáng phát ra bởi các hạt là ánh sáng không đồng pha nhau, nghĩa là không có một sự liên hệ nào về pha giữa các dao động phát ra bởi các hạt. Trong trường hợp nguồn sáng laser, các photon phát ra đều đồng pha nên ánh sáng laser là 1 chùm ánh sáng điều hợp. Chính vì vậy, chùm tia laser có thể gây ra các tác dụng rất mạnh (tổng hợp các dao động đồng pha).

3. Tính song song

Chùm tia laser phát ra song song với trục, với một góc loe rất nhỏ.

Năm 1962, người ta tạo ra một chùm tia laser có góc loe là 3×10^{-5} rad.

8.2.6. Các chế độ hoạt động

1. Chế độ phát liên tục

Trong chế độ phát liên tục, công suất của một laser tương đối không đổi so với thời gian. Sự đảo nghịch mật độ (electron) cần thiết cho hoạt động laser được duy trì liên tục bởi nguồn bơm năng lượng đều đặn.

2. Chế độ phát xung

Trong chế độ phát xung, công suất laser luôn thay đổi so với thời gian, với đặc trưng là các giai đoạn “đóng” và “ngắt” cho phép tập trung năng lượng cao nhất có thể trong một thời gian ngắn nhất có thể.

Các dao laser là một ví dụ, với năng lượng đủ để cung cấp một nhiệt lượng cần thiết, chúng có thể làm bốc hơi một lượng nhỏ vật chất trên bề mặt mẫu vật trong thời gian rất ngắn. Tuy nhiên, nếu cùng năng lượng như vậy nhưng tiếp xúc với mẫu vật trong thời gian dài hơn thì nhiệt lượng sẽ có thời gian để xuyên sâu vào trong mẫu vật do đó phần vật chất bị bốc hơi sẽ ít hơn.

Có rất nhiều phương pháp để đạt được điều này, như

- + Phương pháp chuyển mạch Q (Q-switching)
- + Phương pháp khóa kiểu (modelocking)

+ Phương pháp bơm xung (pulsed pumping)

Dao laser: Thiết bị là sự kết hợp giữa 2 công nghệ: laser femto giây và hiển vi huỳnh quang hai photon, thành một loại máy thăm dò linh hoạt cỡ nhỏ duy nhất. Máy thăm dò có thể xác định các tế bào đơn lẻ trong không gian 3 chiều, đâm xuyên tới 250 micromet vào trong khối mô.

8.2.7. Dạng phổ

Hiện tượng laser xảy ra do sự tương tác của hai hệ thống

+ Hệ nguyên tử có chuyển mức năng lượng của điện tử làm phát sinh photon.

+ Hốc cộng hưởng tạo bởi các gương đầu cuối.

1. Tương tác giữa bức xạ với hệ nguyên tử

Một photon sẽ phát sinh khi 1 điện tử chuyển từ 1 mức năng lượng cao xuống 1

mức năng lượng thấp hơn:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

Trong thực tế có sự mở rộng vạch phổ do 2 quá trình sau:

- Homogeneous broadening: đặc trưng cho tất cả các nguyên tử trong hệ,
- Inhomogeneous broadening: vạch phổ bị mở rộng do các hiệu ứng nguyên tử riêng biệt. Trong tinh thể các nguyên tử khác nhau có thể có các chuyển mức năng lượng khác nhau ít do các nguyên tử lân cận. Các nguyên tử trong khi chuyển động theo các hướng khác nhau với các vận tốc khác nhau, do đó gây ra các dịch chuyển Doppler khác nhau lên tần số

* Quá trình này chiếm ưu thế với laser khí; laser Helium-neon có độ rộng bán phổ $\approx 1.1 \times 10^9$ Hz đến 1.4×10^9 Hz

* Phổ của laser thực có thể bị ảnh hưởng do tổn hao phản xạ bởi gương và tán xạ không khí

2. Hốc cộng hưởng tạo bởi các gương đầu cuối

Điều kiện cộng hưởng: hành trình qua hốc $2L =$ số nguyên m lần bước sóng

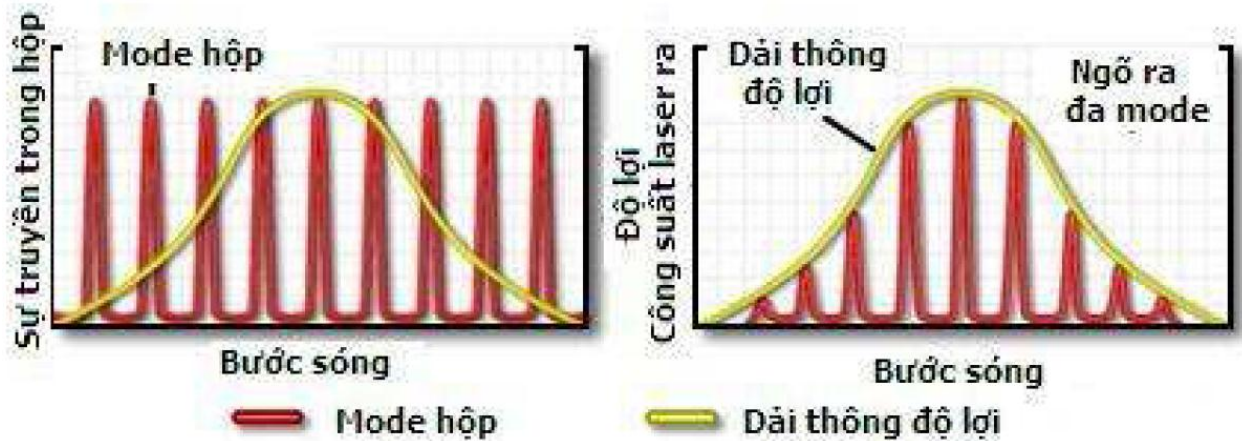
$$2L = m\lambda$$

Có rất nhiều tần số laser được phép, cách nhau các khoảng

$$\Delta f = \frac{c}{2L}$$

gọi là các mode hốc cộng hưởng (cavity modes) hay mode dọc (longitudinal modes)

Người thiết kế laser phải tối ưu hoá thiết kế cho tần số mong muốn nhờ việc điều khiển hỗn hợp khí, các đặc trưng kích thích và phản xạ của hốc và có thể dùng bộ lọc, hoặc tăng khoảng cách giữa các gương (tăng L).



Hình 8.5. mode dọc (longitudinal modes)

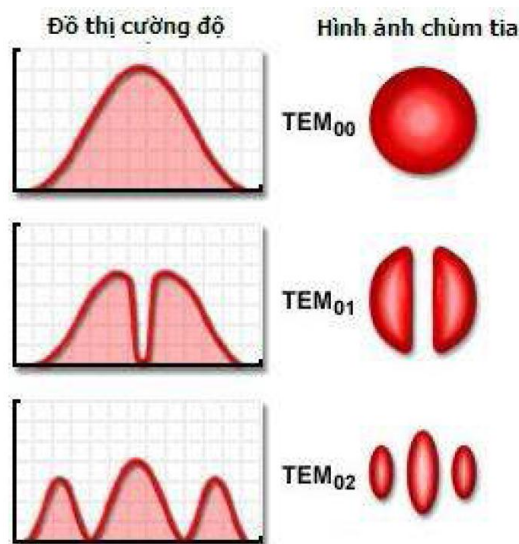
Trong thực tế chỉ có những chuyển mức năng lượng với thời gian sống tương đối lớn mới có thể tạo ra các vạch phổ có thể sử dụng được.

Năng lượng laser khả dụng nhận được khi độ lợi của hốc được điều chỉnh để chọn 1 trong các vạch laser khả dĩ.

Sự Phát xạ đồng thời này được gọi là longitudinal modes.

Ngoài ra, hốc laser có thể tạo ra một số mode không gian hay TEM modes (mode ngang Transverse Electric Magnetic). Các mode này hình thành do các tia hơi lệch so với trục chính.

Trong thực tế, mode mong muốn là TEM₀₀, là tia đơn với phân bố năng lượng theo phân bố Gauss.



Hình 8.6. mode ngang

8.2.8. Điều khiển Laser

Công suất bức xạ, bước sóng, dòng hoạt động và thời gian sử dụng của Laser đều thay đổi theo nhiệt độ, do đó cần có các vòng điều khiển điện và điều khiển nhiệt.

+ Vòng điều khiển điện:

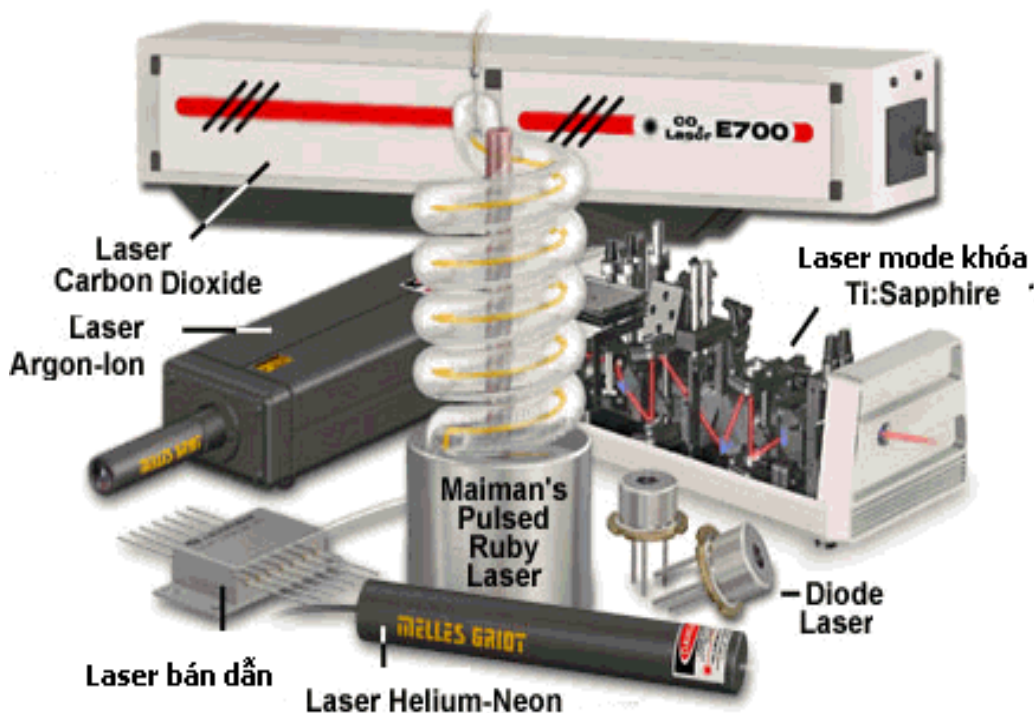
- Chống các xung dòng và thể phá hủy.
- Điều chế dòng laser
- Điều chỉnh dòng ngưỡng

+ Vòng điều khiển nhiệt:

- Tiếp xúc nhiệt với vỏ laser.
- Thường chứa linh kiện bơm nhiệt bán dẫn gọi là thermoelectric cooler hoặc Peltier device có tác dụng thu nhiệt (bơm nhiệt từ laser ra vỏ ngoài của đầu laser).

- Bơm nhiệt điện: dùng điện tử chuyển nhiệt lượng từ mặt hấp thụ nhiệt ra mặt truyền nhiệt thông qua dây các bán dẫn BiTe (Bismuth Telluride) loại N và P ghép luân phiên với kim loại tiếp xúc với các mặt truyền nhiệt và mặt hấp thụ nhiệt.

8.3. Các kiểu laser



Hình 8.7. Các loại laser thông dụng

8.3.1. Laser chất rắn

Có khoảng 200 chất rắn có khả năng dùng làm môi trường hoạt chất laser. Một số loại laser chất rắn thông dụng:

+ YAG-Neodym: hoạt chất là Yttrium Aluminium Garnet (YAG) cộng thêm 2-5% Neodym, có bước sóng 1060nm thuộc phổ hồng ngoại gần. Có thể phát liên tục tới 100W hoặc phát xung với tần số 1000-10 000Hz.

+ Hồng ngọc (Rubi): hoạt chất là tinh thể Alluminium có gắn những ion chrom, có bước sóng 694,3nm thuộc vùng đỏ của ánh sáng trắng.

+ Bán dẫn: loại thông dụng nhất là diot Gallium Arsen có bước sóng 890nm thuộc phổ hồng ngoại gần. (trình bày kỹ ở phần 8.4.)

8.3.2. Laser chất khí

- He-Ne: hoạt chất là khí Heli và Neon, có bước sóng 632,8nm thuộc phổ ánh sáng đỏ trong vùng nhìn thấy, công suất nhỏ từ một đến vài chục mW.

- Argon: hoạt chất là khí argon, bước sóng 488 và 514,5nm.

CO₂: bước sóng 10 600nm thuộc phổ hồng ngoại xa, công suất phát xạ có thể tới megawatt (MW). Trong y học ứng dụng làm dao mổ.

Môi trường kích thích và loại	Bước sóng	Nguồn kích thích	Ứng dụng và ghi chú
Laser khí He-Ne	632.8 nm (543.5 nm, 593.9 nm, 611.8 nm, 1.1523 μm, 1.52 μm, 3.3913 μm)	Cực phóng điện	Giao thoa kế, holograph, quang phổ học, đọc mã vạch, cân chỉnh, miêu tả quang học.
Laser khí ion Argon	488.0 nm, 514.5 nm, (351 nm, 465.8 nm, 472.7 nm, 528.7 nm)	Cực phóng điện	Chữa trị vông mạc bằng ánh sáng (cho người bệnh tiểu đường), in thạch bản, là nguồn kích thích các laser khác.
Laser khí Ion Kryton	416 nm, 530.9 nm, 568.2 nm, 647.1 nm, 676.4 nm, 752.5 nm, 799.3 nm	Cực phóng điện	Nghiên cứu khoa học, trình diễn ánh sáng.
Laser khí ion Xenon	Nhiều vạch từ cực tím đến hồng ngoại.	Cực phóng điện	Nghiên cứu khoa học.
Laser khí Nitơ	337.1 nm	Cực phóng điện	Là nguồn kích thích cho laser màu, đo độ ô nhiễm, nghiên cứu khoa học, Laser nitơ có khả năng hoạt động ở cường độ yếu.
Laser H-F	2.7 đến 2.9 μm (H-F) 3.6 đến 4.2 μm (D-F)	Phản ứng cháy ethylene và	Dùng cho nghiên cứu vũ khí laser, dùng sóng phát ra liên tục và có tính công phá lớn.

		NF ₃	
Laser hoá học Ôxy-Iốt	1.315 μm	Phản ứng hoá học trong giữa Ô-xy và I-ốt,	Vũ khí laser, nghiên cứu vật liệu và khoa học.
Laser khí CO ₂	10.6 μm, (9.4 μm)	Phóng điện ngang (công suất cao) hay dọc (công suất thấp)	Gia công vật liệu (cắt, hàn), phẫu thuật.
Laser khí CO	2.6 đến 4 μm, 4.8 đến 8.3 μm	Cực phóng điện	Gia công vật liệu (chạm khắc, hàn), phổ học quang-âm.
Excimer laser	193 nm (ArF), 248 nm (KrF), 308 nm (XeCl), 353 nm (XeF)	Excimer tái hợp nhờ phóng điện	Quang thạch bản cực tím cho chế tạo link kiện bán dẫn, phẫu thuật laser, LASIK.

Hình 8.8. Bảng mô tả các loại laser khí

8.3.3. Laser chất lỏng

Môi trường hoạt chất là chất lỏng, thông dụng nhất là laser màu.

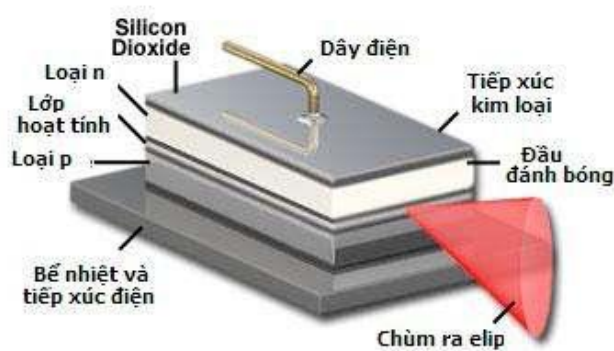
➤ Tính chất:

+ Độ định hướng cao: tia laser phát ra hầu như là chùm song song do đó khả năng chiếu xa hàng nghìn km mà không bị tán xạ.

+ Tính đơn sắc rất cao: chùm sáng chỉ có một màu (hay một bước sóng) duy nhất. Đây là tính chất đặc biệt nhất mà không nguồn sáng nào có.

+ Tính đồng bộ của các photon trong chùm tia laser: Có khả năng phát xung cực ngắn: cỡ mili giây (ms), nano giây, pico giây, cho phép tập trung năng lượng tia laser cực lớn trong thời gian cực ngắn.

8.4. Laser Diode (LD)



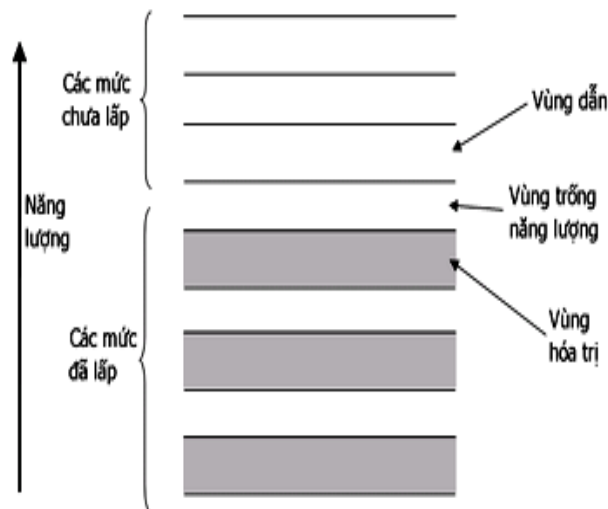
Hình 8.9. Diode laser bán dẫn

Một loại laser có cấu tạo tương tự như một diod. Nó có môi trường kích thích là chất bán dẫn. Diod laser hoạt động gần giống với diod phát quang. Nó cũng được gọi là đèn diode nội xạ và được viết tắt là LD hay ILD.

Chất bán dẫn (Semiconductor) là vật liệu trung gian giữa chất dẫn điện và chất cách điện. Chất bán dẫn hoạt động như một chất cách điện ở nhiệt độ thấp và có tính dẫn điện ở nhiệt độ phòng. Gọi là "bán dẫn" nghĩa là có thể dẫn điện ở một điều kiện nào đó, hoặc ở một điều kiện khác sẽ không dẫn điện.

8.4.1. Vùng năng lượng trong chất bán dẫn

Tính chất dẫn điện của các vật liệu rắn được giải thích nhờ lý thuyết vùng năng lượng. Như ta biết, điện tử tồn tại trong nguyên tử trên những mức năng lượng gián đoạn (các trạng thái dừng). Nhưng trong chất rắn, khi mà các nguyên tử kết hợp lại với nhau thành các khối, thì các mức năng lượng này bị phủ lên nhau, và trở thành các vùng năng lượng và sẽ có ba vùng chính.



Hình 8.10. Vùng năng lượng trong chất bán dẫn

8.4.2. Cấu trúc năng lượng điện tử trong mạng nguyên tử của chất bán dẫn

Vùng hóa trị được lấp đầy, trong khi vùng dẫn trống. Mức năng lượng Fermi nằm ở vùng trống năng lượng.

- Vùng hoá trị (valence band): Là vùng có năng lượng thấp nhất theo thang năng lượng, là vùng mà điện tử bị liên kết mạnh với nguyên tử và không linh động.

- Vùng dẫn (Conduction band): Vùng có mức năng lượng cao nhất, là vùng mà điện tử sẽ linh động (như các điện tử tự do) và điện tử ở vùng này sẽ là điện tử dẫn, có nghĩa là chất sẽ có khả năng dẫn điện khi có điện tử tồn tại trên vùng dẫn. Tính dẫn điện tăng khi mật độ điện tử trên vùng dẫn tăng.

• Vùng cấm (Forbidden band): Là vùng nằm giữa vùng hoá trị và vùng dẫn, không có mức năng lượng nào do đó điện tử không thể tồn tại trên vùng cấm. Nếu bán dẫn pha tạp, có thể xuất hiện các mức năng lượng trong vùng cấm (mức pha tạp). Khoảng cách giữa đáy vùng dẫn và đỉnh vùng hoá trị gọi là độ rộng vùng cấm, hay năng lượng vùng cấm (Band Gap). Tùy theo độ rộng vùng cấm lớn hay nhỏ mà chất có thể là dẫn điện hoặc không dẫn điện.

Như vậy, tính dẫn điện của các chất rắn và tính chất của chất bán dẫn có thể lý giải một cách đơn giản nhờ lý thuyết vùng năng lượng như sau:

• Kim loại có vùng dẫn và vùng hoá trị phủ lên nhau (không có vùng cấm) do đó luôn luôn có điện tử trên vùng dẫn vì thế mà kim loại luôn luôn dẫn điện.

• Các chất bán dẫn có vùng cấm có một độ rộng xác định. Ở không độ tuyệt đối (0 K), mức Fermi nằm giữa vùng cấm, có nghĩa là tất cả các điện tử tồn tại ở vùng hoá trị, do đó chất bán dẫn không dẫn điện. Khi tăng dần nhiệt độ, các điện tử sẽ nhận được năng lượng nhiệt $k_B T$ (với k là hằng số Boltzmann) nhưng năng lượng này chưa đủ để điện tử vượt qua vùng cấm nên điện tử vẫn ở vùng hoá trị. Khi tăng nhiệt độ đến mức đủ cao, sẽ có một số điện tử nhận được năng lượng lớn hơn năng lượng vùng cấm và nó sẽ nhảy lên vùng dẫn và chất rắn trở thành dẫn điện. Khi nhiệt độ càng tăng lên, mật độ điện tử trên vùng dẫn sẽ càng tăng lên, do đó, tính dẫn điện của chất bán dẫn tăng dần theo nhiệt độ (hay điện trở suất giảm dần theo nhiệt độ). Một cách gần đúng, có thể viết sự phụ thuộc của điện trở chất bán dẫn vào nhiệt độ như sau:

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E_g}{2k_B T}\right)$$

Ta có:

R_0 là hằng số,
 ΔE_g là độ rộng vùng cấm.

Ngoài ra, tính dẫn của chất bán dẫn có thể thay đổi nhờ các kích thích năng lượng khác, ví dụ như ánh sáng. Khi chiếu sáng, các điện tử sẽ hấp thụ năng lượng từ photon, và có thể nhảy lên vùng dẫn nếu năng lượng đủ lớn. Đây chính là nguyên nhân dẫn đến sự thay đổi về tính chất của chất bán dẫn dưới tác dụng của ánh sáng (quang-bán dẫn).

8.4.3. Bán dẫn pha tạp

Chất bán dẫn loại p có tạp chất là các nguyên tử thuộc nhóm III, dẫn điện chủ yếu bằng các lỗ trống (viết tắt cho chữ positive, nghĩa là dương). Chất bán dẫn loại n có tạp chất là các nguyên tử thuộc nhóm V, các nguyên tử này dùng 4 electron tạo liên kết và một electron lớp ngoài liên kết lỏng lẻo với nhân, đây chính là các electron dẫn chính. Có thể giải thích một cách đơn giản về bán dẫn pha tạp nhờ vào lý thuyết vùng năng lượng như sau: Khi pha tạp, sẽ xuất hiện các mức pha tạp nằm trong vùng cấm, chính các mức này khiến

cho điện tử dễ dàng chuyển lên vùng dẫn hoặc lỗ trống dễ dàng di chuyển xuống vùng hoá trị để tạo nên tính dẫn của vật liệu. Vì thế, chỉ cần pha tạp với hàm lượng rất nhỏ cũng làm thay đổi lớn tính chất dẫn điện của chất bán dẫn.

8.4.4. Các đặc tính phổ của diode laser

Trong diode Laser chỉ có một số sóng ánh sáng có bước sóng nhất định mới có thể lan truyền được trong Buồng Cộng Hưởng. Điều kiện để truyền lan ánh sáng là sóng phản xạ và sóng tới phải đồng pha với nhau.

Như vậy Laser chỉ khuếch đại những bước sóng λ_0 thoả mãn điều kiện (n, N các số tự nhiên)

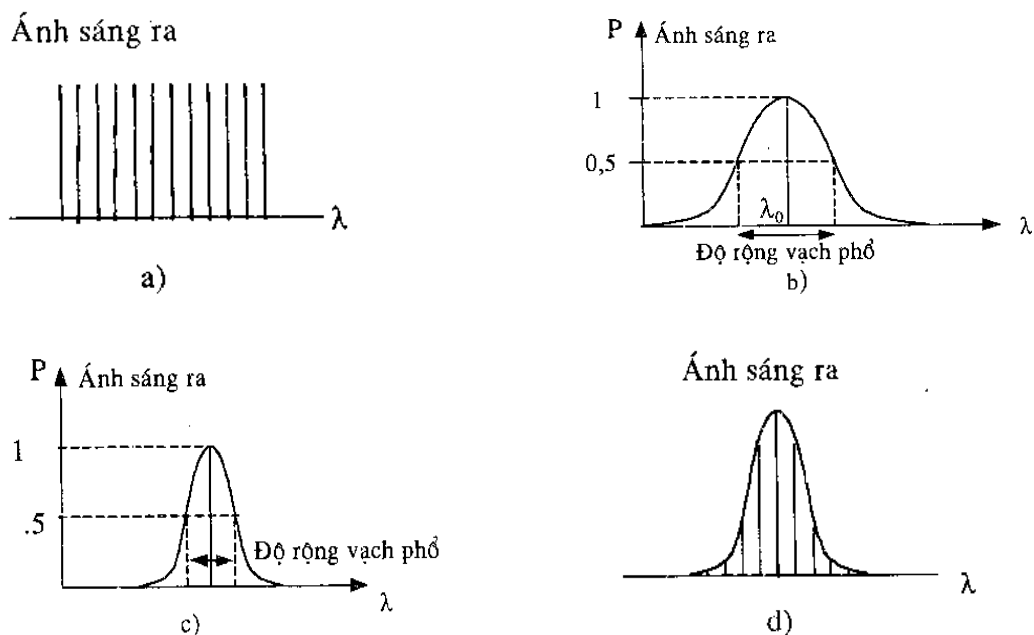
$$\lambda_0 = \frac{2nL}{N}$$

Mỗi bước sóng đó được gọi là mode dọc, hay đơn giản là mode. Tập hợp đỉnh của các mode này sẽ tạo thành đường bao phổ bức xạ của diode Laser.

Ta sẽ tìm được khoảng cách về mặt tần số giữa hai mode liên tiếp nhau.

$$\Delta f = \frac{c}{2L}$$

Phổ bức xạ của Laser phụ thuộc rất nhiều vào dòng điện định thiên. Khi Laser hoạt động ở chế độ dưới ngưỡng, bức xạ tự phát chiếm ưu thế và do đó độ rộng vạch phổ giống với LED. Tuy nhiên, nếu diode Laser hoạt động ở chế độ lớn hơn chế độ ngưỡng thì độ vạch phổ sẽ giảm xuống. Vạch phổ hẹp lại do tác động của buồng cộng hưởng và khuếch đại theo hàm mũ những mode đạt tới mức ngưỡng, đồng thời bỏ qua tất cả các mode khác.



Hình 8.11.

a) Các mode trong Laser bán dẫn;

- b) Đường bao vạch phổ khi Laser hoạt động dưới mức ngưỡng;
- c) Đường bao vạch phổ khi Laser hoạt động trên mức ngưỡng;
- d) Phổ bức xạ.

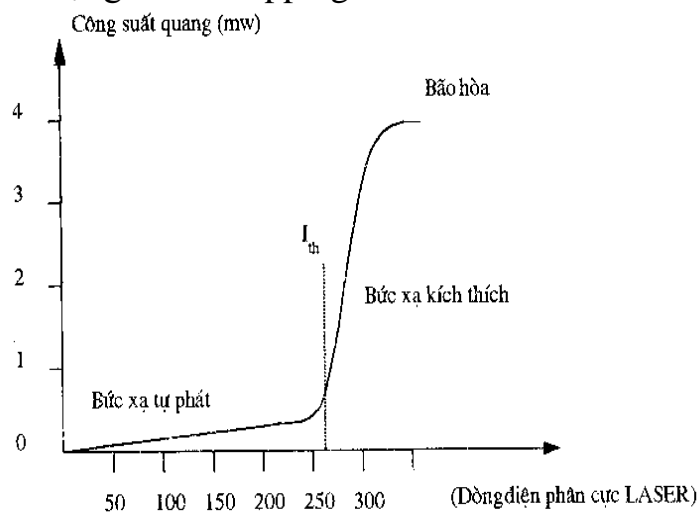
Khi diode Laser hoạt động dưới mức ngưỡng thì tất cả các mode truyền dẫn được khuếch đại như nhau. Nếu tăng dòng điện phân cực diode lên thì hệ số khuếch đại tăng. Tuy nhiên mode có bước sóng gần với bước sóng hoạt động danh định hơn cả sẽ được khuếch đại nhiều nhất. Hiện tượng này được biểu diễn như hình trên. Như vậy có thể thấy rằng, khi diode Laser hoạt động trên mức ngưỡng thì độ rộng vạch phổ sẽ hẹp đáng kể so với LED.

Bên cạnh các mode dọc, còn có các mode ngang và các mode bên (lateral mode). Các mode này có xu hướng làm cho các chùm tia ra phân kì mạnh, kết quả là việc ghép nối với sợi quang sẽ kém hiệu quả. Trạng thái lý tưởng chỉ có một trong các mode ngang cơ bản và mode bên của nó tồn tại (điều này sẽ làm cho chùm sáng ra song song và có đường kính ngang nhỏ).

Với hầu hết các diode Laser, vùng hoạt tính đều có bề dày nhỏ hơn 1 μm

8.4.5. Sự biến thiên công suất quang theo dòng điều khiển

Ta nhận thấy rằng với diode Laser hoạt động trên mức ngưỡng, công suất ra tỉ lệ trực tiếp với dòng điện chênh lệch so với mức ngưỡng. Trong thực tế, diode Laser hoạt động trên mức ngưỡng không thể hiện quan hệ tuyến tính hoàn toàn giữa lượng ánh sáng ra và dòng điện định thiên. Điều này có nguyên nhân từ hiện tượng mode-hopping.



Hình 8.12. Sự biến thiên công suất quang theo dòng điều khiển.

Biểu diễn sự biến thiên của công suất ra theo dòng điện diode đối với một diode Laser phát quang ở bước sóng 850nm. Hình vẽ này cho thấy, ở trên điểm ngưỡng diode Laser mới hoạt động như một Laser. Ta cũng biết rằng

công suất ra sẽ bão hoà khi dòng điện đủ lớn. Bởi vì do dòng điện có cường độ cao làm nóng diode, điều này làm giảm hiệu suất nghịch đảo.

8.4.6. Các yếu tố ảnh hưởng đến tuổi thọ của Laser

- Lắp đặt và thử nghiệm
- Các xung điện từ phát sinh bên ngoài trong thời gian ngắn
- Mức dòng
- Nhiệt độ
- Mức bức xạ cực đại
- Sự già hoá linh kiện

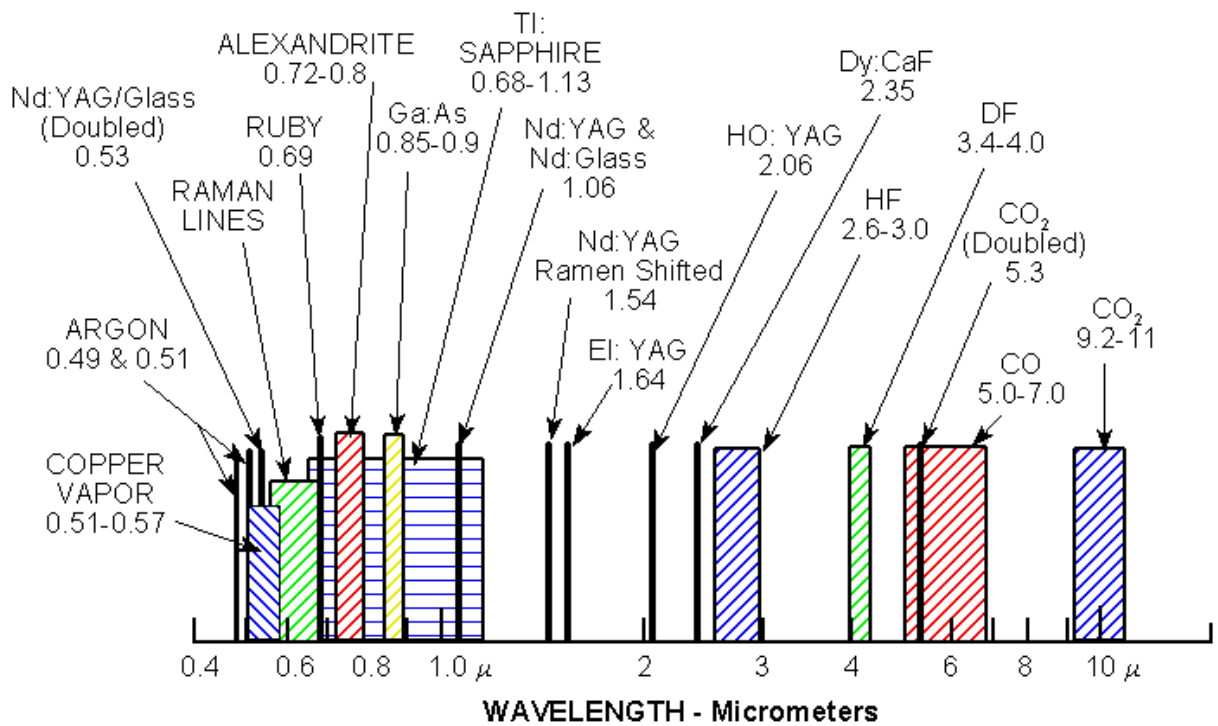
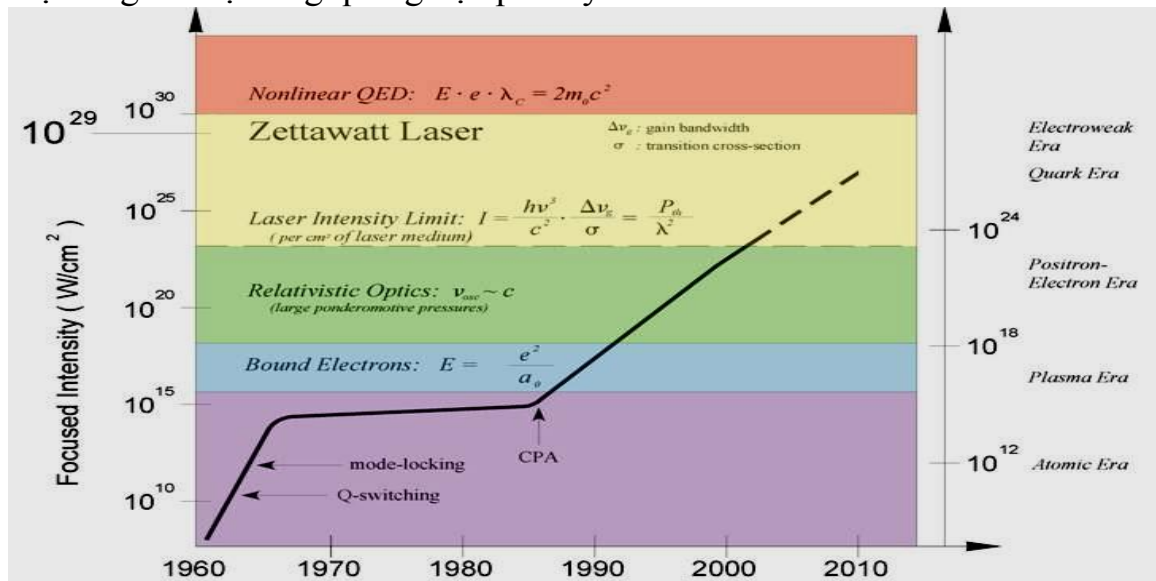
8.5. Các ứng dụng của laser

Vào thời điểm được phát minh năm 1960, laser được gọi là "giải pháp để tìm kiếm các ứng dụng". Từ đó, chúng trở nên phổ biến, tìm thấy hàng ngàn tiện ích trong các ứng dụng khác nhau trên mọi lĩnh vực của xã hội hiện đại, như phẫu thuật mắt, hướng dẫn phương tiện trong tàu không gian, trong các phản ứng hợp nhất hạt nhân... Laser được cho là một trong những phát minh ảnh hưởng nhất trong thế kỷ 20.

Ích lợi của laser đối với các ứng dụng trong khoa học, công nghiệp, kinh doanh nằm ở tính đồng pha, đồng màu cao, khả năng đạt được cường độ sáng cực kỳ cao, hay sự hợp nhất của các yếu tố trên. Ví dụ, sự đồng pha của tia laser cho phép nó hội tụ tại một điểm có kích thước nhỏ nhất cho phép bởi giới hạn nhiễu xạ, chỉ rộng vài nanômét đối với laser dùng ánh sáng. Tính chất này cho phép laser có thể lưu trữ vài gigabyte thông tin trên các rãnh của DVD. Cũng là điều kiện cho phép laser với công suất nhỏ vẫn có thể tập trung cường độ sáng cao và dùng để cắt, đốt và có thể làm bốc hơi vật liệu trong kỹ thuật cắt bằng laser. Ví dụ, một laser Nd:YAG, sau quá trình nhân đôi tần số, phóng ra tia sáng xanh tại bước sóng 523 nm với công suất 10 W có khả năng, trên lý thuyết, đạt đến cường độ sáng hàng triệu W trên một cm vuông. Trong thực tế, thì sự tập trung hoàn toàn của tia laser trong giới hạn nhiễu xạ là rất khó.

Tia sáng laser với cường độ cao có thể cắt thép và các kim loại khác. Tia từ laser thường có độ phân kỳ rất nhỏ, (độ chuẩn trực cao). Độ chuẩn trực tuyệt đối là không thể tạo ra, bởi giới hạn nhiễu xạ. Tuy nhiên, tia laser có độ phân kỳ nhỏ hơn so với các nguồn sáng. Một tia laser được tạo từ laser He-Ne, nếu chiếu từ Trái Đất lên Mặt Trăng, sẽ tạo nên một hình tròn đường kính khoảng 1 dặm (1,6 kilômét). Một vài laser, đặc biệt là với laser bán dẫn, có với kích thước nhỏ dẫn đến hiệu ứng nhiễu xạ mạnh với độ phân kỳ cao. Tuy nhiên, các tia phân kỳ đó có thể chuyển đổi về tia chuẩn trực bằng các thấu kính hội tụ. Trái lại, ánh sáng không phải từ laser không thể làm cho chuẩn trực bằng các thiết bị quang học dễ dàng, vì chiều dài đồng pha ngắn hơn rất

những tia laser. Định luật nhiễu xạ không áp dụng khi laser được truyền trong các thiết bị dẫn sóng như sợi quang. Laser cường độ cao cũng tạo nên các hiệu ứng thú vị trong quang học phi tuyến tính.



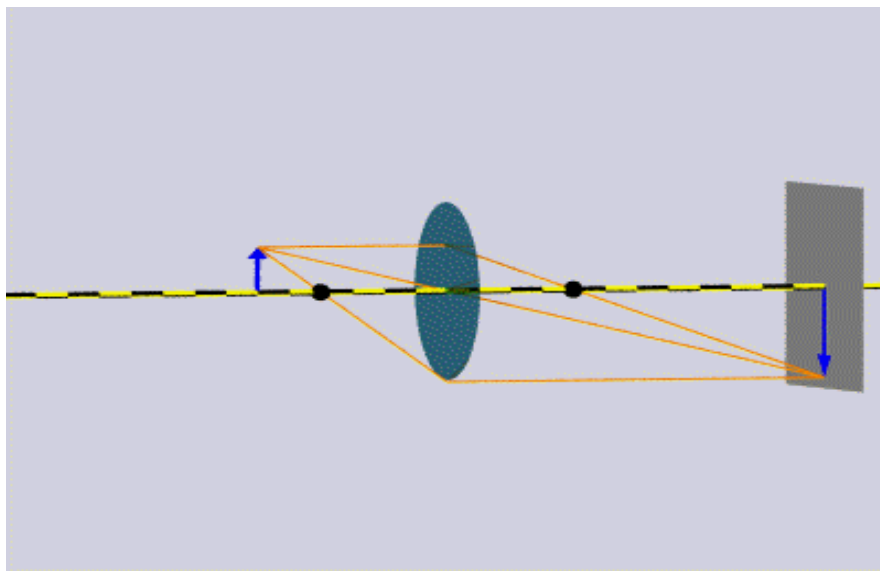


TRƯỜNG ĐẠI HỌC SƯ PHẠM TP. HỒ CHÍ MINH
KHOA VẬT LÝ

NGUYỄN TRẦN TRÁC – DIỆP NGỌC ANH

G
I
Á
O

T
R
Ì
N
H



QUANG HỌC

LƯU HÀNH NỘI BỘ - 2004

LỜI NÓI ĐẦU

Giao trình Quang học này được soạn để dùng cho sinh viên Khoa Vật lý, Trường Đại học Sư phạm, theo chương trình của Bộ Giáo dục và Đào tạo, có được mở rộng để sinh viên có tài liệu tham khảo một cách thấu đáo. Nội dung Giáo trình gồm các phần sau :

- Quang hình học
- Giao thoa ánh sáng
- Nhiễu xạ ánh sáng
- Phân cực ánh sáng
- Quang điện từ
- Các hiệu ứng quang lượng tử
- Laser và quang học phi tuyến

Để giúp sinh viên có điều kiện thuận lợi hơn trong học tập, giáo trình này sẽ được bổ sung bởi một giáo trình toán Quang học. Qua tài liệu thứ hai này các bạn sinh viên sẽ có điều kiện củng cố vững chắc thêm các kiến thức có được từ phần nghiên cứu lý thuyết.

Người soạn hy vọng rằng với bộ Giáo trình này các bạn sinh viên sẽ đạt kết quả tốt trong quá trình học tập, nghiên cứu về Quang học.

Soạn giả

Nguyễn Trần Trác – Diệp Ngọc Anh

Chương I

QUANG HÌNH HỌC

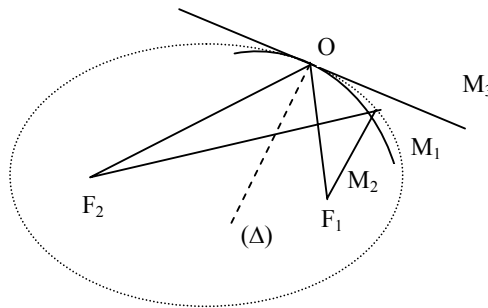
SSI. NHỮNG ĐỊNH LUẬT CƠ BẢN CỦA QUANG HÌNH HỌC.

Chúng ta sẽ sử dụng khái niệm tia sáng để tìm ra các qui luật lan truyền của ánh sáng qua các môi trường, tia sáng biểu thị đường truyền của năng lượng ánh sáng.

I/- NGUYÊN LÝ FERMA.

Ta biết rằng, theo nguyên lý truyền thẳng ánh sáng trong một môi trường đồng tính về quang học (chiết suất của môi trường như nhau tại mọi điểm) ánh sáng truyền theo đường thẳng, nghĩa là khoảng cách ngắn nhất giữa hai điểm cho trước.

Khi truyền từ một môi trường này sang một môi trường khác (có chiết suất khác nhau), ánh sáng sẽ bị phản xạ và khúc xạ ở mặt phân cách hai môi trường, nghĩa là tia sáng bị gãy khúc. Vậy trong trường hợp chung, giữa hai điểm cho trước ánh sáng có thể truyền theo đường ngắn nhất không? Ta hãy khảo sát thí nghiệm sau:



HÌNH 1

Xét một gương êlipôit tròn xoay M_1 có mặt trong là mặt phản xạ. Tại tiêu điểm F_1 của gương, ta đặt một nguồn sáng điểm. Theo tính chất của êlipxôit, các tia sáng phát suất từ F_1 , sau khi phản xạ trên mặt gương, đều qua tiêu điểm F_2 , đồng thời các đường đi của tia sáng giữa hai tiêu điểm đều bằng nhau. Trên hình vẽ ta xét hai đường đi $F_1O'F_2$ và F_1OF_2 .

Bây giờ giả sử ta có thêm hai gương M_2 và M_3 tiếp xúc với gương êlipxôit tại O . Đường (Δ) là pháp tuyến chung của 3 gương tại O (hình 1). Thực tế cho biết F_1OF_2 là đường truyền có thực của ánh sáng đối với cả 3 gương. Ta rút ra các nhận xét sau:

- So với tất cả các con đường đi từ F_1 đến gương M_2 rồi đến F_2 thì con đường truyền thực F_1OF_2 của ánh sáng là con đường dài nhất (mọi con đường khác đều ngắn hơn con đường tương ứng phản xạ trên êlipxôit).
- Đối với gương M_3 , con đường thực F_1OF_2 là con đường ngắn nhất (mọi con đường khác đều dài hơn con đường tương ứng phản xạ trên êlipxôit)
- Đối với gương êlipxôit M_1 , có vô số đường truyền thực của ánh sáng từ F_1 tới M_1 rồi tới F_2 . Các đường truyền này đều bằng nhau.

Vậy đường truyền thực của ánh sáng từ một điểm này tới một điểm khác là một cực trị.

Ta có thể phát biểu một cách tổng quát trên khái niệm quang lộ: khi ánh sáng đi từ một điểm A tới một điểm B trong một môi trường có chiết suất n , thì quang lộ được định nghĩa là :

$$\lambda = n \cdot AB$$

Nguyên lý FERMA được phát biểu như sau :

“Quang lộ từ một điểm này tới một điểm khác phải là một cực trị”.

Ta cũng có thể phát biểu nguyên lý này dựa vào thời gian truyền của ánh sáng.

Thời gian ánh sáng truyền một quang lộ nds là $dt = nds/c$, $c =$ vận tốc ánh sáng trong chân không.

Thời gian truyền từ A tới B là :

$$t = \frac{1}{c} \int_A^B nds$$

Quang lộ $\int_A^B nds$ là một cực trị. Vậy thời gian truyền của ánh sáng từ một điểm này tới một điểm khác cũng là một cực trị.

Ta thấy điều kiện quang lộ cực trị không phụ thuộc chiều truyền của ánh sáng. Vì vậy đường truyền thực của ánh sáng từ A đến B cũng phải là đường truyền thực từ B đến A. đó là tính chất rất chung của ánh sáng, gọi là tính truyền trở lại ngược chiều.

Từ định lý FERMA, ta có thể suy ra các định luật khác về đường truyền của ánh sáng.

2. ĐỊNH LUẬT TRUYỀN THẲNG ÁNH SÁNG.

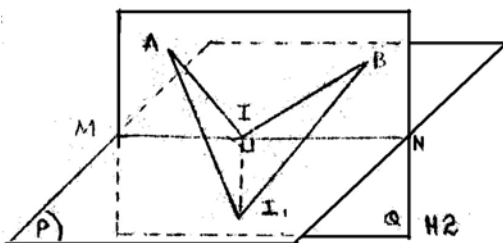
“Trong một môi trường đồng tính, ánh sáng truyền theo đường thẳng”

Thực vậy, trong môi trường đồng tính, chiết suất n bằng nhau tại mọi điểm. Quang lộ cực trị cũng có nghĩa là quãng đường (hình học) cực trị. Mặt khác, trong hình học ta đã biết: đường thẳng là đường ngắn nhất nối liền hai điểm cho trước. Ta tìm lại được định luật truyền thẳng ánh sáng.

3. ĐỊNH LUẬT PHẢN XẠ ÁNH SÁNG.

Xét mặt phản xạ (P) và hai điểm A, B cho trước. Về mặt hình học, ta có vô số đường đi từ A, phản xạ trên (P) tới B. Trong vô số đường đi hình học đó, ta cần xác định đường nào là đường đi của ánh sáng. Theo nguyên lý FERMA, đó là đường đi có quang lộ cực trị.

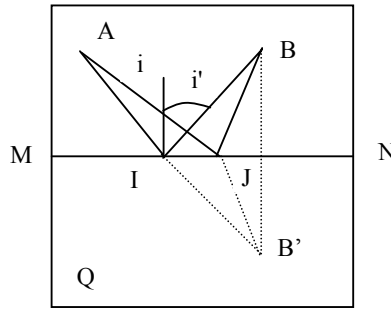
Trước hết, ta chứng tỏ rằng đường đi đó phải ở trong mặt phẳng (Q) chứa A, B và thẳng góc với mặt phản xạ (P)



Thật vậy, nếu tia sáng tới mặt (P) tại một điểm I1 không nằm trong mặt phẳng (Q) thì ta luôn luôn từ I1 kẻ được đường thẳng góc với giao tuyến MN của (P) và (Q), và có

$$AIB < AI_1B$$

Vậy điểm tới của hai tia sáng phải nằm trong mặt phẳng (Q), nghĩa là quang lộ khả dĩ phải nằm trong (Q), tức là phải nằm trong mặt phẳng tới.



HÌNH 3

Tiếp theo, ta cần xác định điểm tới I trên MN. Đó chính là giao điểm của AB' với MN (B' là điểm đối xứng với B qua mặt (P)). Thực vậy, với một điểm J nào khác trên MN, ta luôn có:

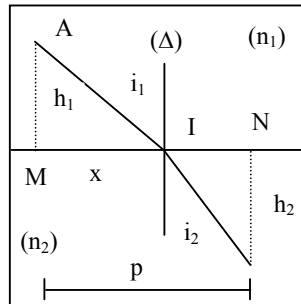
$$AIB < AJB$$

Từ hình 3, ta dễ dàng suy ra : góc tới $i =$ góc phản xạ i'

Vậy tóm lại, từ nguyên lý FERMA, ta tìm lại được định luật phản xạ ánh sáng:

“Tia phản xạ nằm trong mặt phẳng tới. Tia phản xạ và tia tới ở hai bên đường pháp tuyến. Góc phản xạ bằng góc tới”

4. ĐỊNH LUẬT KHÚC XẠ ÁNH SÁNG.



HÌNH 4

Xét mặt phẳng (P) ngăn cách hai môi trường có chiết suất tuyệt đối lần lượt là n_1 và n_2 . Hai điểm A và B nằm ở hai bên của mặt phẳng (P). Ta hãy xác định đường truyền của tia sáng từ A tới B.

Chứng minh tương tự trường hợp phản xạ, ta thấy các tia sáng trong hai môi trường phải nằm trong cùng một mặt phẳng

Đó là mặt phẳng Q chứa A, B và vuông góc với mặt phẳng P (mặt phẳng Q chính là mặt phẳng tới)

Trong mặt phẳng Q, ta hãy xác định đường truyền thực của tia sáng. Trên hình 4, MN là giao tuyến giữa hai mặt phẳng P và Q. Giả sử (AIB) là quang lộ thực. Ta hãy biểu diễn quang lộ (AIB) theo biến số x (x xác định vị trí I trên MN).

$$(AIB) = \lambda = n_1 AI + n_2 IB$$

$$\lambda = n_1 \sqrt{h_1^2 + x^2} + n_2 \sqrt{h_2^2 + (p-x)^2}$$

(λ là quang lộ thực vậy, theo nguyên lý FERMA, ta phải có:

$$\frac{d\lambda}{dx} = n_1 \frac{x}{\sqrt{h_1^2 + x^2}} - n_2 \frac{(p-x)}{\sqrt{h_2^2 + (p-x)^2}} = 0$$

$$\text{hay } n_1 \sin i_1 - n_2 \sin i_2 = 0$$

$$\text{hay } \frac{\sin i_1}{\sin i_2} = \frac{n_2}{n_1} = n_{2,1} (\text{hằng số})$$

Vậy ta đã tìm được định luật khúc xạ ánh sáng. “Tia khúc xạ nằm trong mặt phẳng tới. Tia tới và tia khúc xạ ở hai bên đường pháp tuyến. Tỉ số giữa sin góc tới và sin góc khúc xạ là một hằng số đối với hai môi trường cho trước”

Nhắc lại : $n_{2,1}$ = chiết suất tỉ số đối của môi trường thứ hai với môi trường thứ nhất. Chiết suất tuyệt đối của một môi trường là chiết suất tỉ đối của môi trường đó đối với chân không.

• TRƯỜNG HỢP ĐẶC BIỆT: Sự phản xạ toàn phần

Khi chiết suất của môi trường thứ hai nhỏ hơn môi trường thứ nhất, thí dụ : ánh sáng truyền từ thủy tinh ra ngoài không khí, ta có : $n_{2,1} < 1$. Suy ra góc khúc xạ i_2 lớn hơn góc i_1 . Vậy khi i_2 đạt đến trị số lớn nhất là $\pi/2$ thì i_1 có một trị số xác định bởi $\sin \lambda = n_{2,1}$

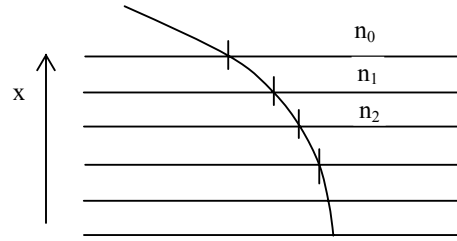
λ được gọi là góc tới giới hạn. Nếu góc tới lớn hơn góc giới hạn này thì toàn bộ năng lượng ánh sáng bị phản xạ trở lại môi trường thứ nhất (không có tia khúc xạ). Đó là sự phản xạ toàn phần.

Trên đây, ta đã thấy, các định luật về quang hình học đã được chứng minh từ nguyên lý FERMA. Ta cũng có thể tìm lại được các định luật này từ nguyên lý Huyghens (*)

Nguyên lý Huyghens là nguyên lý chung cho các quá trình sóng. Điều này trực tiếp chứng minh bản chất sóng của ánh sáng. Tuy nhiên, trong phần quang hình, ta chỉ nhằm xác định đường truyền của ánh sáng qua các môi trường và chưa để ý tới bản chất của ánh sáng.

Các đây hàng ngàn năm, các định luật quang học được tìm ra một cách riêng biệt, độc lập với nhau, bằng các phương pháp thực nghiệm. Tiến thêm một bước, từ các quan sát thực tế, người ta thừa nhận nguyên lý chung. Rồi từ nguyên lý chung, suy ra các định luật. Đó là phương pháp tiên đề để xây dựng một môn khoa học.

KHÚC XẠ THIÊN VẤN

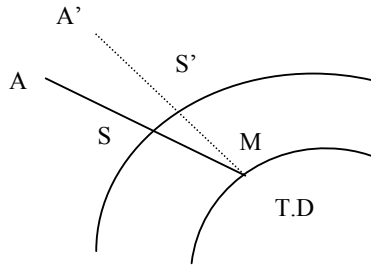


HÌNH 5

Chúng ta hãy quan sát hiện tượng khúc xạ qua một môi trường lớp. Môi trường này có chiết suất thay đổi theo phương x . Giả sử môi trường gồm nhiều lớp có chiết suất biến thiên đều đặn

$$n_0 < n_1 < n_2 < n_3 \dots$$

Các mặt ngăn chia các lớp thẳng góc với trục x (hình 5). Vẽ tia sáng truyền qua các lớp, ta được một đường gãy khúc. Nếu chiết suất biến thiên một cách liên tục, đường gãy khúc trên trở thành đường cong.



HÌNH 6

Lớp khí quyển bao quanh trái đất có mật độ giảm dần theo chiều cao, do đó chiết suất cũng giảm dần theo chiều cao. Đó là một môi trường lớp.

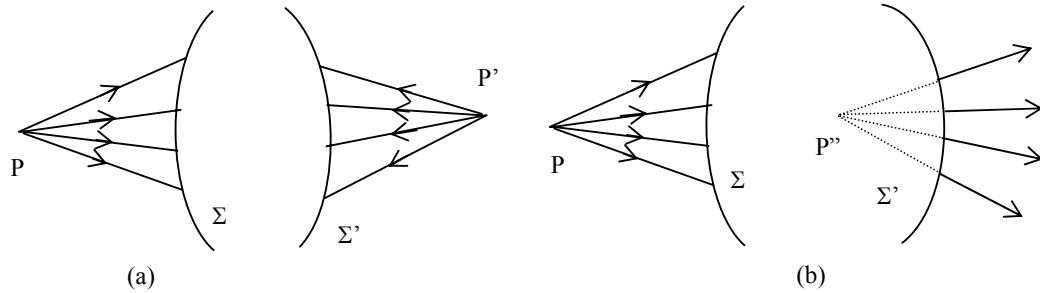
Xét tia sáng từ ngôi sao A tới lớp khí quyển tia sáng bị cong như hình vẽ 6. Người quan sát ở M có cảm giác ánh sáng đến từ phương A'S', tiếp tuyến của tia sáng thực tại M. Đó là sự khúc xạ thiên văn. Góc lệch giữa phương thực AS và phương biểu A'S' được gọi là độ khúc xạ thiên văn.

SS2. GƯƠNG PHẪNG VÀ GƯƠNG CẦU.

Ta sẽ áp dụng các định luật quang học cho các môi trường cụ thể, các hệ quang học thường gặp. Mục đích là để nghiên cứu quy luật tạo ảnh trong các hệ quang học.

1. VẬT VÀ ẢNH.

Xét chùm tia sáng, phát suất từ một điểm P, sau khi qua quang hệ, chùm sáng hội tụ tại điểm P'. Ta gọi P là vật, P' là ảnh đối với quang hệ trên. Các mặt Σ , Σ' trên hình vẽ biểu diễn của mặt khúc xạ đầu và cuối của quang hệ.



HÌNH 7

Ta thấy: ảnh là điểm đồng quy của chùm tia ló. Ta có hai trường hợp : ảnh thực và ảnh ảo.

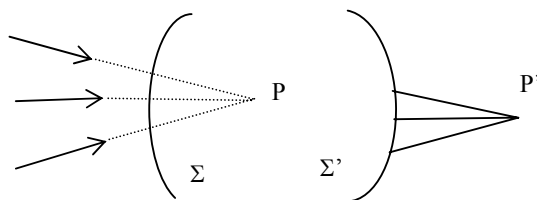
Nếu chùm tia ló hội tụ, ta có ảnh P' thực (P' nằm phía sau Σ' tính theo chiều truyền của ánh sáng tới). Trong trường hợp này, ta có sự tập trung năng lượng ánh sáng thực sự tại điểm P (hình 7a)

Nếu chùm tia ló phân kì, ta có ảnh P'' ảo (P'' nằm phía trước Σ')

Ta cũng có hai trường hợp : vật thực và vật ảo.

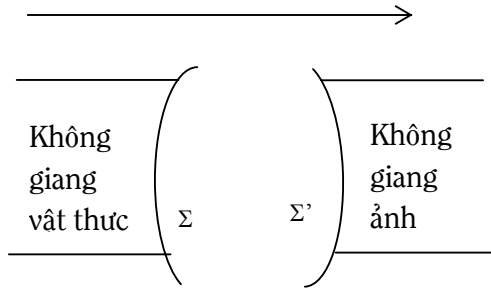
Nếu chùm tia tới quang hệ là chùm phân kì, ta có vật thực (P ở phía trước Σ) (hình 7a)

Nếu chùm tia tới là chùm hội tụ, ta có vật ảo P (điểm đồng quy của các tia tới kéo dài). Trong trường hợp này, P ở phía sau mặt Σ (hình 8)



HÌNH 8

Ta có thể phân biệt dễ dàng tính chất thực hay ảo của vật và ảnh bằng cách phân biệt không gian ảnh thực và không gian vật thực: không gian của các ảnh thực nằm về phía sau mặt khúc xạ (Σ'), không gian của các vật thực nằm phía trước mặt khúc xạ (Σ).



HÌNH 9

Nếu vật nằm ngoài không gian thực thì là vật ảo, tương tự như vật với ảnh ảo.

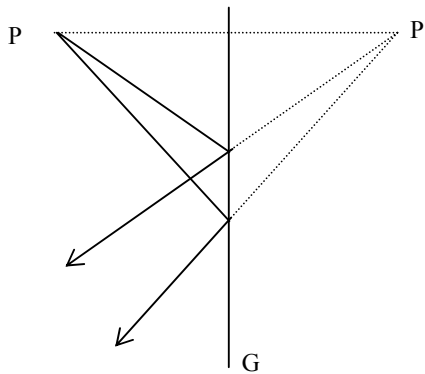
Ta cũng cần lưu ý một điểm là vật đối với quang hệ này nhưng đồng thời có thể là ảnh đối với quang hệ khác. Vậy khi nói vật hay ảnh, thực hay ảo là phải gắn liền với một quang hệ xác định.

2. **GUƠNG PHẪNG.**

Một phần mặt phẳng phản xạ ánh sáng tốt được gọi là gương phẳng. Thí dụ: một mặt thủy tinh được mạ bạc, mặt thoáng của thủy ngân...

Giả sử ta có một điểm vật P đặt trước gương phẳng G. ảnh P' của P cho bởi gương theo thực nghiệm, đối xứng với P qua gương phẳng. Ta có thể dễ dàng chứng minh điều này từ các định luật về phản xạ ánh sáng. Ngoài ra, nếu vật thực thì ảnh ảo, và ngược lại.

Trường hợp vật không phải là một điểm thì ta có ảnh của vật là tập hợp các ảnh của các điểm trên vật. Ảnh và vật đối xứng với nhau qua mặt phẳng của gương, chúng không thể chồng khít lên nhau (như bàn tay trái và bàn tay phải) trừ khi vật có một tính đối xứng đặc biệt nào đó.



HÌNH 10

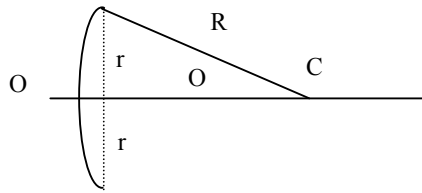
Vật và ảnh còn có tính chất đối chọi cho nhau. Nghĩa là nếu ta hội tụ một chùm tia sáng tới gương G (có đường kéo dài của các tia đồng qui tại P') thì chùm tia phản xạ sẽ hội tụ tại P. (Tính chất truyền trở lại ngược chiều)

Hai điểm P và P' được gọi là hai điểm liên hợp.

Đối với các gương phản xạ, không gian vật thực và không gian ảnh thực trùng nhau và nằm trước mặt phản xạ.

3. GƯƠNG CẦU.

a- Định nghĩa: Một phần mặt cầu phản xạ ánh sáng được gọi là gương cầu

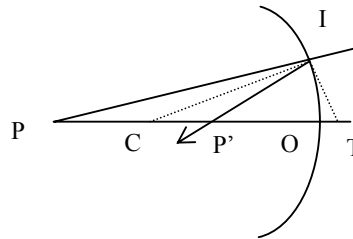


HÌNH 11

O là đỉnh. C là tâm. đường OC là trục chính của gương cầu. Các đường khác đi qua tâm C được gọi là trục phụ $R = OC$ là bán kính chính thực của gương.

r là bán kính mở (hay bán kính khẩu độ). Góc θ được gọi là góc mở (hay góc khẩu độ). Có hai loại gương cầu : gương cầu lõm có mặt phản xạ hướng về tâm, gương cầu lồi có mặt phản xạ hướng ra ngoài tâm

b- Công thức gương cầu:



HÌNH 12

Xét một điểm sáng P nằm trên quang trục của gương. Ta xác định ảnh của P bằng cách tìm giao điểm P' của hai tia phản xạ ứng với hai tia tới nào đó; ví dụ hai tia PO và PI (H. 12). P' là ảnh của P.

Vẽ tiếp tuyến IT của gương tại I. Ta thấy IC và IT là các phân giác trong và ngoài của góc PIP' . Bốn điểm T, C, P', P là bốn điểm liên hợp điều hòa, ta có :

$$\frac{1}{TP'} + \frac{1}{TP} = \frac{2}{TC}$$

$$\text{mà } |TC| = \frac{R}{\cos \varphi} \quad \text{hay} \quad TC = \frac{OC}{\cos \varphi}$$

$$\text{vậy} \quad \frac{1}{TP'} + \frac{1}{TP} = \frac{2 \cos \varphi}{OC} \quad (2.1)$$

Theo công thức trên ta thấy : Các tia sáng phát xuất từ điểm P, tới gương cầu với các góc khác nhau, sẽ không hội tụ ở cùng một điểm ảnh P'. Vậy khác với gương phẳng, ảnh của một điểm cho bởi gương cầu, không phải là một điểm: ảnh P' không rõ.

Tuy nhiên nếu ta xét các gương cầu có góc khẩu độ θ nhỏ thì φ cũng nhỏ, $\cos \varphi \approx 1$, điểm T có thể coi là trùng với O. Công (2.1) trở thành:

$$\frac{1}{OP'} + \frac{1}{OP} = \frac{2}{OC} \quad (2.2)$$

Vậy trong trường hợp này, ta có thể coi như có ảnh điểm P'

Nếu ta kí hiệu $\overline{OP'} = d'$, $\overline{OP} = d$, $\overline{OC} = R$,

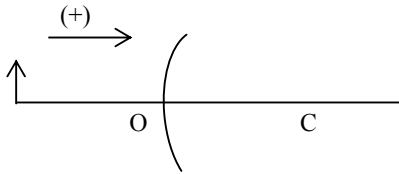
$$\frac{1}{d'} + \frac{1}{d} = \frac{2}{R} \quad (2.3)$$

Vậy muốn có ảnh rõ, góc khẩu độ của gương cầu phải nhỏ.

Công thức trên có thể áp dụng cho gương cầu lõm hay lồi, vật và ảnh thực hay ảo.

Thông thường người ta quy ước chiều dương là chiều truyền của ánh sáng tới.

Thí dụ : Một vật phát sáng đặt cách gương cầu lồi là 7 cm, bán kính chính trục của gương là 5 cm



HÌNH 13

Trong trường hợp này, $d = \overline{OP} = -7$ cm

$R = 5$ cm (chiều dương chọn như trên hình 13)

Vậy ảnh cách gương là $d' = 1,8$ cm. Đó chính là ảnh ảo, ở phía sau gương.

c- Tiêu điểm của gương cầu. Công thức Newton (Niuton)

Chiếu tới gương cầu một chùm tia sáng song song với trục chính. Chùm tia phản xạ hội tụ tại điểm F, điểm F được gọi là tiêu điểm của gương cầu.

Đoạn \overline{OF} được gọi là tiêu cự của gương.

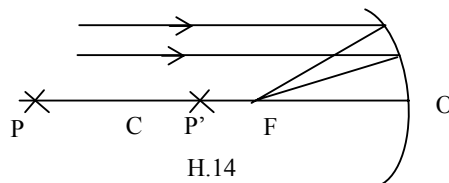
Chùm tia song song ứng với vật ở xa vô cực nên $d = -\infty$, suy ra tiêu cự $f = \overline{OF}$, chính là d' trong công thức (2.3), là $\frac{R}{2}$

$$f = \frac{R}{2} \quad (2.4)$$

Với gương cầu lõm, ta có tiêu điểm thực

Với gương cầu lồi, ta có tiêu điểm ảo

Ta cũng có thể lập công thức gương cầu bằng cách lấy F làm gốc của các khoảng cách.



H.14

Đặt $\overline{FP} = x$, $\overline{FP'} = x'$

Ta có : $d' = \overline{OP'} = \overline{OF} + \overline{FP'} = f + x'$

$$d = \overline{OP} = \overline{OF} + \overline{FP} = f + x$$

Thay vào công thức (2.3), ta được :

$$\frac{1}{f+x'} + \frac{1}{f+x} = \frac{2}{R} = \frac{1}{f}$$

Suy ra: $xx' = f^2$ (2.5)

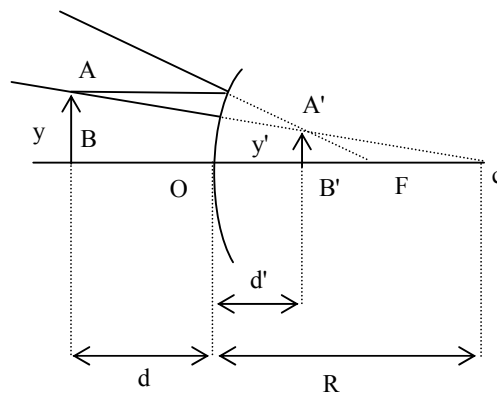
Đó là công thức Newton.

d- Cách vẽ ảnh – Độ phóng đại:

Ta có các tia đặc biệt sau:

- Tia tới song song với trục chính, tia phản xạ qua tiêu điểm F.
- Tia tới qua tiêu điểm F, tia phản xạ song song với trục chính.
- Tia tới qua tâm gương, tia phản xạ đi ngược trở lại.

Để xác định ảnh của một điểm, ta chỉ cần dùng hai trong ba tia trên. Đối với vật không phải là một điểm, ta chỉ cần xác định ảnh của một số điểm đặc biệt.



HÌNH 15

Thí dụ: Có vật AB thẳng, đặt vuông góc với trục chính. Ta chỉ cần vẽ ảnh A' của điểm A (như trên hình vẽ 15), sau đó từ A' hạ đường thẳng góc xuống trục chính, ta được ảnh A'B'.

Gọi y và y' là kích thước của vật và ảnh theo phương vuông góc với trục. độ phóng đại được định nghĩa là:

$$\beta = \frac{y'}{y}$$

Xét các tam giác đồng dạng ABC, A'B'C', ta có:

$$\frac{\overline{B'A'}}{\overline{BA}} = \frac{\overline{B'C'}}{\overline{BC}}$$

$$\text{hay } \frac{y'}{y} = \frac{\overline{B'C}}{\overline{BC}} = \frac{\overline{B'O} + \overline{OC}}{\overline{BO} + \overline{OC}} = \frac{-d'+R}{-d+R}$$

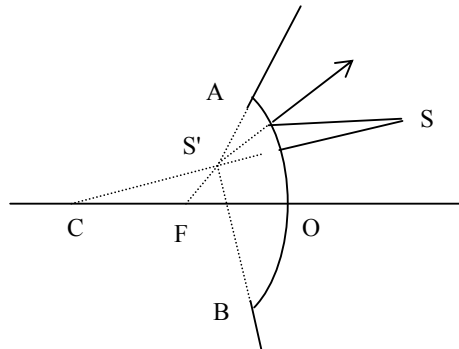
theo công thức (2.3), ta có: G

Từ hai công thức trên, suy ra :

$$\boxed{\beta = \frac{-d'}{d}} \quad (2.6)$$

4. Thị trường của gương.

Thị trường của gương là khoảng không gian ở phía trước gương để nếu vật ở trong khoảng không gian này thì mắt sẽ nhìn thấy ảnh của nó qua gương.



HÌNH 16

Trong hình 16, mắt người quan sát S đặt trước gương cầu lõm AOB. điểm S' là ảnh của S cho bởi gương. Thị trường của gương là khoảng không gian giới hạn bởi hình nón đỉnh S', các đường sinh trạ trên chu vi của gương. Bất kì vật nào nằm trong thị trường đều có thể cho chùm tia sáng tới gương để phản xạ tới mắt S, do đó mắt nhìn thấy vật :

Thị trường của gương cầu lõm lớn hơn so với các loại gương khác (gương phẳng, gương lõm) có cùng kích thước, vì vậy thường được dùng làm gương nhìn sau trên các loại xe.

5. Một số ứng dụng của gương.

Trong kỹ thuật, gương phẳng chủ yếu dùng để đổi phương và chiều truyền của chùm tia sáng. Nhờ vậy có thể thu ngắn kích thước của máy móc hay từ dưới mặt biển có thể quan sát các vật ở trên mặt biển, từ trong lòng đất có thể quan sát các vật ở trên mặt đất.

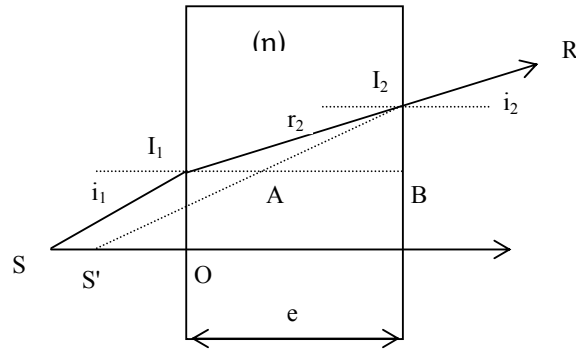
Gương cầu lõm thường được sử dụng với trường hợp chùm tia song song. Khi cần có chùm tia sáng rọi theo một hướng nhất định, thí dụ trong các đèn pha, người ta đặt nguồn sáng tại tiêu điểm của gương cầu lõm. Chùm tia phản xạ từ gương là chùm tia song song định hướng được.

Gương cầu lõm còn dùng để thu ảnh các vật ở xa, như các thiên thể, hiện trên mặt phẳng tiêu của gương. Các gương cầu với bán kính mở (bán kính khẩu độ) lớn cho ảnh với phẩm chất tốt mà việc chế tạo các gương như vậy tương đối không phức tạp bằng việc chế tạo các thấu kính có công dụng tương đương. Vì vậy, trong các kính thiên văn lớn, người ta dùng gương thay cho thấu kính.

Gương cầu lõm còn dùng để tập trung năng lượng của ánh sáng mặt trời trong các pin mặt trời, bếp mặt trời...

SS3. CÁC MẶT PHẪNG KHÚC XẠ.

1. Bản hai mặt song song.



HÌNH 17

Có một môi trường trong suốt chiết suất n , bề dài e , được giới hạn bởi hai mặt phẳng song song. Nếu môi trường được đặt trong không khí chẳng hạn, các mặt giới hạn trở thành các mặt phẳng khúc xạ. Chúng ta hãy xét sự tạo ảnh của vật S ở cách bản một khoảng cách hữu hạn (H - 17). Tia SO đến vuông góc và truyền thẳng qua bản. Tia SI_1 đến bản dưới góc tới i_1 . Các góc i_1, i_2 liên hệ với nhau theo định luật khúc xạ. Dễ dàng thấy rằng $i_1 = i_2$ và do đó $r_1 = r_2$. Để đơn giản ta kí hiệu chung là các góc i và r . Như vậy tia ló I_2R song song với tia tới SI_1 . Giao điểm S' của I_2R và SO là ảnh ảo của S .

Khoảng cách giữa ảnh và vật

Chúng ta hãy xác định đoạn SS'

$$\left. \begin{aligned} SS' &= e - AB \\ AB &= \frac{I_2B}{\operatorname{tg} i} = \frac{e \cdot \operatorname{tg} r}{\operatorname{tg} i} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \boxed{SS' = e \left(1 - \frac{\operatorname{tg} r}{\operatorname{tg} i}\right)} \quad (3.1)$$

Khoảng cách SS' phụ thuộc vào góc tới i . Thành thử, chùm tia phân kì xuất phát từ S đến bản dưới các góc tới khác nhau sẽ ứng với các vị trí của S' khác nhau. Kết quả là ảnh của điểm qua bản hai mặt song song không còn là điểm nữa. Chúng ta xét trường hợp gần đúng khi góc tới i là nhỏ. Khi đó, có thể xem:

$$\frac{\operatorname{tg} r}{\operatorname{tg} i} \approx \frac{\sin r}{\sin i} = \frac{1}{n}$$

Vậy khoảng cách giữa ảnh và vật là:

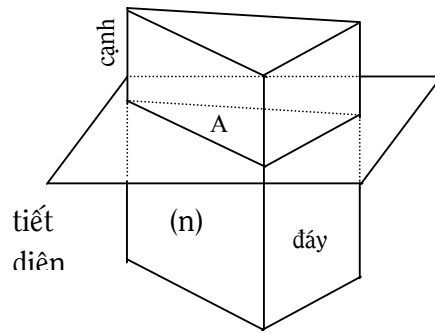
$$\boxed{SS' = e \left(1 - \frac{1}{n}\right)} \quad (3.2)$$

Như vậy để ảnh còn rõ nét, chùm tia tới bản phải là chùm tia hẹp đi gần pháp tuyến

2. Lăng kính.

a- Định nghĩa:

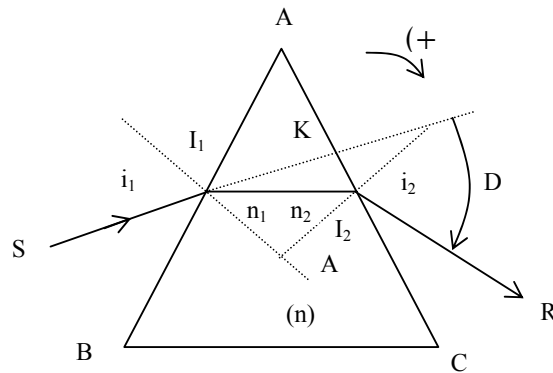
Lăng kính là một môi trường trong suốt được giới hạn bởi hai mặt phẳng không song song



HÌNH 18

Hai mặt phẳng giới hạn này là các mặt khúc xạ. Góc A hợp bởi hai mặt này là góc ở đỉnh của lăng kính. Giao tuyến của hai mặt khúc xạ là cạnh của lăng kính. Mặt đối diện với cạnh là mặt đáy. Mọi mặt phẳng vuông góc với cạnh lăng kính là mặt phẳng thiết diện chính. Chúng ta giới hạn sự khảo sát trong trường hợp đường truyền của chùm tia sáng nằm trong thiết diện chính.

b- Góc lệch của chùm tia sáng qua lăng kính – độ lệch cực tiểu.



HÌNH 19

Cho một chùm tia sáng song song, đơn sắc SI₁, tới mặt khúc xạ thứ nhất của lăng kính. Chùm tia truyền qua lăng kính, khúc xạ ở hai mặt của lăng kính và ló ra theo phương I₂R. Góc D là góc lệch giữa chùm tia ló I₂R và chùm tia tới SI₁.

Xét tam giác KI₁I₂, ta thấy độ lệch D là :

$$D = (-i_1 + r_1) + (i_2 - r_2) = i_2 - i_1 + r_1 - r_2$$

Với qui ước về dấu như sau : các góc được kể là dương nếu chiều quay từ pháp tuyến tới tia cùng chiều quay của kim đồng hồ, được kể là âm nếu chiều quay trên ngược chiều kim đồng hồ.

Xét tam giác HI₁I₂, ta có:

$$A = r_2 - r_1$$

Vậy: $D = i_2 - i_1 - A$

Tóm lại, ta có các công thức về lăng kính :

$$\begin{aligned} \sin i_1 &= n \sin r_1 \\ \sin i_2 &= n \sin r_2 \\ A &= r_2 - r_1 \\ D &= i_2 - i_1 - A \end{aligned}$$

(3.3)

n là chiết suất của lăng kính

$$\begin{aligned} \text{Nếu các góc } i_1 \text{ và } A \text{ nhỏ :} \\ i_1 &= n r_1 ; i_2 = n r_2 \\ A &= r_2 - r_1 ; D = (n-1)A \end{aligned}$$

Bây giờ, ta hãy xác định điều kiện ứng với độ lệch cực tiểu. Góc D có giá trị là một cực trị khi : $\frac{dD}{di_1} = 0$

$$\text{hay } \frac{dD}{di_1} = \frac{di_2}{di_1} - 1 = 0 \quad \Leftrightarrow \quad \frac{di_2}{di_1} = 1$$

mặt khác, từ các công thức lăng kính, ta có :

$$\cos i_1 \cdot d i_1 = n \cos r_1 \cdot d r_1$$

$$\cos i_2 \cdot d i_2 = n \cos r_2 \cdot d r_2$$

$$d r_2 = d r_1$$

$$\text{suy ra: } \frac{di_2}{di_1} = \frac{\cos r_2 \cdot \cos i_1}{\cos r_1 \cdot \cos i_2} = 1$$

$$\text{vậy } \cos r_2 \cdot \cos i_1 = \cos r_1 \cdot \cos i_2$$

$$\text{hay } \cos^2 r_2 \cdot \cos^2 i_1 = \cos^2 r_1 \cdot \cos^2 i_2$$

$$\text{suy ra : } \sin^2 i_1 = \sin^2 i_2$$

$$\text{hay } i_1 = \pm i_2$$

ta lấy $i_1 = -i_2$ vì $i_1 = i_2$ không thích hợp (nếu $i_1 = i_2$ thì $A=0$, $D = 0$, đó là trường hợp bản hai mặt song song). Khảo sát thực nghiệm xác nhận kết quả trên ($i_1 = -i_2$) ứng với độ lệch cực tiểu D_m

$$\text{Vậy } D_m = i_2 - i_1 - A = -2i_1 - A$$

$$\text{suy ra } i_1 = \frac{D_m + A}{2}$$

$$\text{và } A = r_2 - r_1 = -2r_1$$

$$\text{suy ra : } r_1 = \frac{-A}{2}$$

Từ công thức $\sin i_1 = n \sin r_1$, suy ra :

$$\sin \frac{D_m + A}{2} = n \sin \frac{A}{2}$$

Khi có độ lệch cực tiểu ($|i_1| = |i_2|$), đường đi tia sáng qua lăng kính đối xứng qua mặt phẳng phân giác của góc A.

C- Sự biến thiên của góc lệch D theo chiết suất của lăng kính ứng với các đơn sắc – Sự tán sắc

Chiết suất của các môi trường biến thiên theo bước sóng của ánh sáng. Vì vậy, khi ta chiếu một tia sáng tạp (gồm nhiều ánh sáng đơn sắc có các bước sóng khác nhau) qua lăng kính, góc lệch ứng với các đơn sắc sẽ khác nhau. Ta khảo sát sự biến thiên của góc lệch D theo sự biến thiên của chiết suất

Làm phép tính vi phân đối với các công thức (3.3) và nhớ rằng A và i_1 là các trị bất biến trong các phép tính này, ta có :

$$0 = n \cdot \cos r_1 \cdot dr_1 + \sin r_1 \cdot dn \quad (3.5)$$

$$\cos i_2 \cdot di_2 = n \cos r_2 \cdot dr_2 + \sin r_2 \cdot dn \quad (3.6)$$

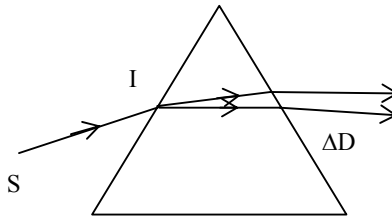
$$0 = dr_2 - dr_1$$

$$dD = di_2 \quad (3.7)$$

Nhân hai vế của (3.5) với $\cos r_2$ và hai vế của (3.6) với $\cos r_1$, đồng thời thay di_2 bằng dD và dr_2 bằng dr_1 , sau đó trừ các kết quả với nhau, ta có :

$$\cos r_1 \cdot \cos i_2 \cdot dD = dn \cdot \sin (r_2 - r_1) = dn \sin A$$

$$\text{Vậy } \frac{dD}{dn} = \frac{\sin A}{\cos r_1 \cos i_2}$$



HÌNH 20

Nếu n và $n + \Delta n$ là chiết suất của lăng kính ứng với các bước sóng λ và $\lambda + \Delta \lambda$ và giả sử lăng kính thỏa mãn điều kiện góc lệch cực tiểu đối với bước sóng λ , ΔD là góc tán sắc giữa hai chùm tia ứng với λ và $\lambda + \Delta \lambda$ được xác định như sau :

$$\frac{\Delta D}{\Delta n} \approx \frac{dD}{dn} = \frac{\sin A}{\cos i_1 \cdot \cos i_2} = \frac{2 \sin \frac{A}{2} \cdot \cos \frac{A}{2}}{\cos \frac{A}{2} \cdot \cos i_{2m}}$$

$$\frac{\Delta D}{\Delta n} \approx - \frac{2 \frac{\sin i_{1m}}{n}}{\cos i_{1m}}$$

trong đó, i_{1m} và i_{2m} là các trị số của góc i_1 và i_2 khi có độ lệch cực tiểu.

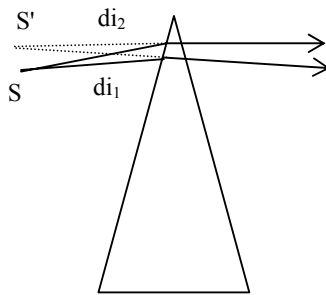
Vậy:

$$\Delta D = -2 \operatorname{tg} i_{1m} \frac{\Delta n}{n} \quad (3.9)$$

Do tính chất này nên lăng kính được dùng để phân tích một chùm ánh sáng tạp thành các chùm tia sáng đơn sắc trong các máy quang phổ.

d. Vài ứng dụng của lăng kính :

* Ảnh cho bởi lăng kính :



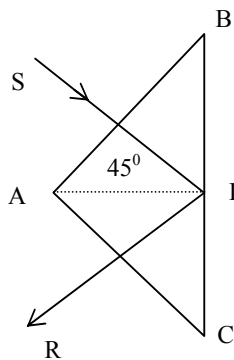
- Nếu vật ở vô cực, chùm tia tới (đơn sắc) song song với lăng kính, chùm tia ló ra cũng song song, ta được một ảnh rõ ở vô cực (trong các máy quang phổ)

Hình 21

- Khi vật cách lăng kính một đoạn hữu hạn, trong trường hợp tổng quát, ảnh của vật không rõ. Ảnh của một điểm không phải là một điểm. Tuy nhiên, người ta chứng minh được: ảnh S' của một điểm S có thể coi là một điểm khi chùm tia sáng phát suất từ S đến lăng kính ở gần cạnh của lăng kính và thỏa mãn gần đúng điều kiện có độ lệch cực tiểu. Khi đó:

$$\frac{dD}{di_1} = \frac{di_2}{di_1} - 1 = 0 \quad \text{hay } di_1 = di_2$$

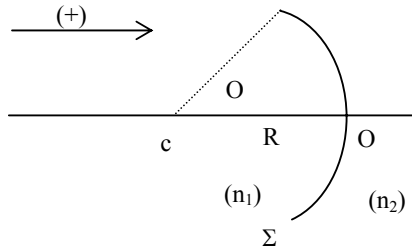
* Lăng kính phản xạ toàn phần :



HÌNH 22

Dùng một lăng kính với tiết diện chính là một tam giác vuông cân ABC . Chiếu một chùm tia sáng song song tới thẳng góc với mặt AB , tới BC tại I với góc tới 45° . Mà ta biết góc giới hạn $\approx 41^\circ 50'$ (với $n \approx 1,5$). Vậy tại I , ánh sáng phản xạ toàn phần, đi ra khỏi lăng kính theo phương IR .

SS4. MẶT CẦU KHÚC XẠ.

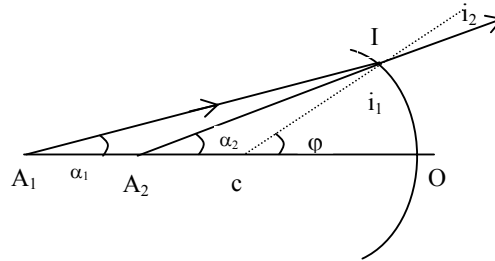


HÌNH 23

Ta gọi mặt cầu khúc xạ là hệ quang học gồm hai môi trường trong suốt có chiết suất khác nhau n_1 và n_2 được ngăn cách bởi một phần mặt cầu Σ . Để nghiên cứu mặt cầu khúc xạ, ta căn cứ vào các yếu tố sau đây: C là tâm của mặt cầu, O là đỉnh – đường thẳng qua CO gọi là quang trục chính. Các đường thẳng khác đi qua tâm C được gọi là các quang trục phụ. Đoạn $OC \approx R$ là bán kính của mặt cầu khúc xạ. Mọi mặt phẳng chứa quang trục chính được gọi là tiết diện chính của hệ, ví dụ như mặt phẳng hình vẽ. Góc θ (hình 23) được gọi là góc mở của mặt cầu.

Nếu chiều của ánh sáng truyền tới được qui ước là chiều dương ghi trên hình vẽ thì môi trường phía sau mặt Σ là môi trường ảnh thực, còn môi trường phía trước là môi trường vật thực.

1. Công thức mặt cầu khúc xạ.



HÌNH 24

Ta xét ảnh của điểm A_1 nằm trên quang trục. Và chỉ xét các tia đi gần trục OC. Chọn tia thứ nhất là tia A_1C , trùng với quang trục. Tia này truyền thẳng qua mặt khúc xạ. Vì vậy ảnh sẽ nằm trên quang trục (H. 24). Tia thứ hai dùng để xác định ảnh là tia A_1I , tới mặt khúc xạ dưới góc tới i_1 . Góc khúc xạ tương ứng trong môi trường thứ hai là i_2 . Vì là tia gần trục, góc i_1 và i_2 là bé, để có thể viết định luật khúc xạ gần đúng dưới dạng :

$$n_1 i_1 \approx n_2 i_2 \quad (4.1)$$

Từ hình vẽ ta có các hệ thức sau :

$$i_1 = \varphi - \alpha_1 \quad \text{và} \quad i_2 = \varphi - \alpha_2$$

$$\varphi = \frac{OI}{OC}, \quad \alpha_1 = \frac{OI}{OA_1}, \quad \alpha_2 = \frac{OI}{OA_2}$$

Như vậy, theo định luật khúc xạ (1.5) ta có :

$$n_1 \left(\frac{\overline{OI}}{\overline{OC}} - \frac{\overline{OI}}{\overline{OA_1}} \right) = n_2 \left(\frac{\overline{OI}}{\overline{OC}} - \frac{\overline{OI}}{\overline{OA_2}} \right)$$

\overline{OC} là bán kính R của mặt cầu, $\overline{OA_1}$ và $\overline{OA_2}$ là khoảng cách đến vật và đến ảnh kể từ đỉnh mặt cầu. Ta đặt $\overline{OA_1} = p_1$ và $\overline{OA_2} = p_2$. Thay vào biểu thức trên ta được công thức mặt cầu khúc xạ :

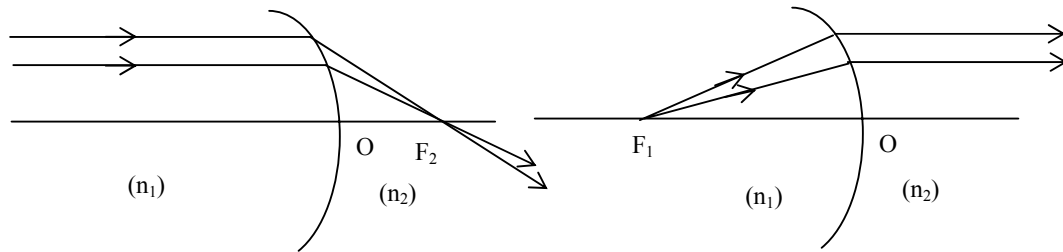
$$\boxed{\frac{n_2}{p_2} - \frac{n_1}{p_1} = \frac{n_2 - n_1}{R}} \quad (4.2)$$

Đại lượng bên vế phải $\phi = \frac{n_2 - n_1}{R}$ được gọi là tụ số của quang hệ. Giá trị của ϕ là giá trị đại số, nó cho biết xu thế đi về gần quang trục hay đi ra xa của các chùm tia khúc xạ. đơn vị đo tụ số là “điốp” nếu chiều dài tính ra mét

Chú ý : đối với mặt cầu khúc xạ, ta chỉ có ảnh rõ khi các tia tới đi gần trục chính.

2. Các tiêu điểm, mặt phẳng liên hợp và mặt phẳng tiêu.

a- Các tiêu điểm:



HÌNH 25

Cho chùm tia sáng song song với quang trục tới quang hệ. sau khi khúc xạ chùm tia hội tụ tại F₂ (H.25). F₂ được gọi là tiêu điểm ảnh. F₂ là thực nếu nó nằm trong không gian ảnh thực. Tương tự, nếu có chùm tia xuất phát từ F₁ trên quang trục, sau khi khúc xạ trở thành chùm song song với quang trục (H.25), thì F₁ được gọi là tiêu điểm vật. Tiêu điểm F₁ là thực nếu nó nằm trong không gian vật thực. Các đoạn thẳng $\overline{OF_2} = f_2$ và $\overline{OF_1} = f_1$ được gọi là các tiêu cự ảnh và tiêu cự vật. Các tiêu cự cũng mang dấu theo qui ước chung.

Dễ dàng dùng công thức (4.2) để xác định các tiêu cự

Kết quả là

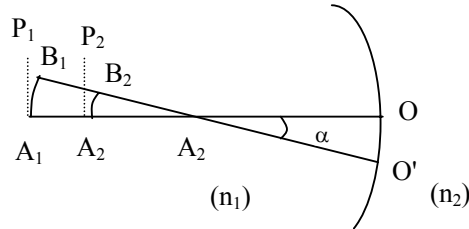
$$\boxed{f_1 = \frac{-n_1 R}{n_2 - n_1} = \frac{-n_1}{\phi}} \quad \text{và} \quad \boxed{f_2 = \frac{n_2 R}{n_2 - n_1} = \frac{n_2}{\phi}} \quad (4.3)$$

Tỉ số giữa hai tiêu cự :

$$\boxed{\frac{f_2}{f_1} = -\frac{n_2}{n_1}} \quad (4.4) \quad \text{hay} \quad \phi = \frac{-n_1}{f_1} = \frac{n_2}{f_2}$$

Biểu thức (4.4) cho thấy độ dài tuyệt đối của các tiêu cự tỉ lệ với chiết suất của môi trường tương ứng và 2 tiêu điểm luôn luôn nằm về hai phía của mặt cầu khúc xạ.

b- Mặt phẳng liên hợp :



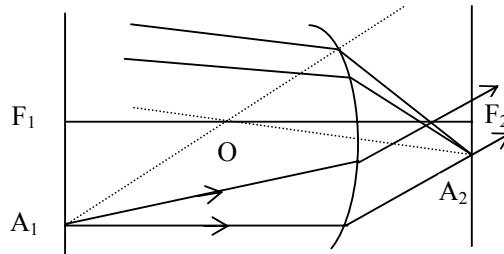
HÌNH 26

Chú ý vào H. 26, chúng ta tiếp tục phân tích như sau :

Điểm A2 là ảnh của điểm A1 nằm trên quang trục A1C. Hai điểm A1 và A2 được gọi là hai điểm liên hợp. Xét quang trục khác, ví dụ CO'. Nếu vật đặt tại B1 sao cho CB1 = CA1 thì ảnh sẽ ở tại B2 (H. 26), với CB2 = CA2. Cặp điểm B1, B2 cũng là cặp điểm liên hợp. Suy rộng ra, các mặt cầu có vết là các cung A1B1 và A2B2 là các mặt liên hợp.

Trong trường hợp gần đúng với góc G nhỏ có thể xem hai mặt phẳng P1 và P2 (H.26) thẳng góc với quang trục qua A1 và A2 là hai mặt liên hợp.

c- Các mặt phẳng tiêu :

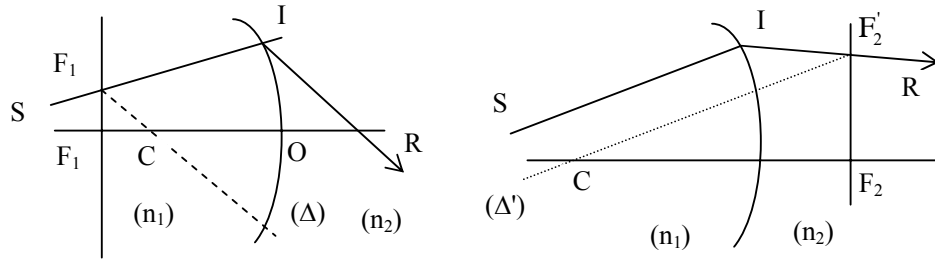


HÌNH 27

Hai mặt phẳng vuông góc với quang trục đi qua F1 và F2 được gọi là mặt phẳng tiêu vật và mặt phẳng tiêu ảnh. Các mặt phẳng tiêu liên hợp với các mặt phẳng ở vô cực. Nếu có chùm tia xuất phát từ điểm A1 trên mặt phẳng tiêu vật, ta thấy A1 nằm trên quang trục A1C tương đương với F1 nằm trên quang trục chính F1C. Vì vậy, có thể suy ra rằng, chùm tia khúc xạ là chùm song song với trục A1C (H.27). Bây giờ, nếu có chùm tia tới song song với phương A2 quang trục CA2, thì chùm tia khúc xạ sẽ hội tụ tại điểm A2 trên mặt phẳng tiêu ảnh. Các điểm A1, A2 trên các mặt phẳng tiêu được gọi là các tiêu điểm phụ. Các tiêu điểm phụ thường được sử dụng để dựng hình.

3. Vẽ tia khúc xạ.

- Các tia đặc biệt :
 - Tia tới song song với trục chính, tia khúc xạ đi qua tiêu điểm ảnh
 - Tia tới qua tiêu điểm vật, tia khúc xạ song song với trục chính
 - Tia tới qua tâm C sẽ truyền thẳng
- Tia tới bất kỳ:

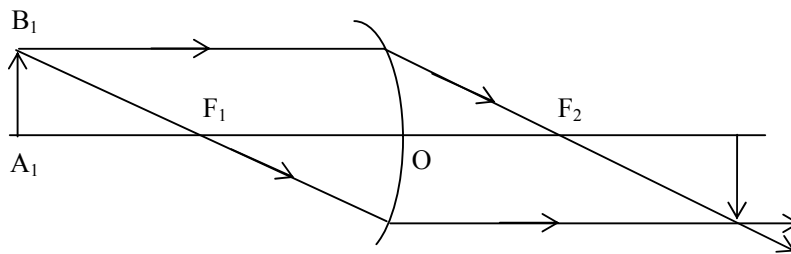


Hình 27bis

Tia khúc xạ song song với trục phụ Δ (Δ đi qua tiêu điểm vật phụ F'_1 , giao điểm của tia tới SI và mặt phẳng tiêu vật)

Tia khúc xạ đi qua tiêu điểm ảnh phụ F'_2 (giao điểm của trục phụ Δ' song song với tia tới SI với mặt phẳng tiêu ảnh)

4- Cách dựng ảnh. Độ phóng đại.



HÌNH 28

Ta dựng ảnh của một vật A_1B_1 có kích thước nhỏ, đặt vuông góc với quang trục. Muốn vậy ta chỉ cần hai trong ba tia đặc biệt phát suất từ B_1 , vẽ hai tia ló tương ứng, ta được ảnh A_2B_2 của B_1 . Hạ đường thẳng góc xuống trục quang học, ta được ảnh A_2B_2

Độ phóng đại được định nghĩa là :

$$\beta = \frac{\overline{A_2B_2}}{\overline{A_1B_1}}$$

Từ hai tam giác có đỉnh F_1 , ta có :

$$\beta = -\frac{\overline{OF_1}}{\overline{F_1A_1}} = -\frac{f_1}{x_1} \quad \text{vôùi} \quad x_1 = \overline{F_1A_1}$$

Từ hai tam giác có đỉnh chung F_2 , ta có:

$$\beta = -\frac{\overline{F_2A_2}}{\overline{OF_2}} = -\frac{x_2}{f_2} \text{ với } x_2 = \overline{F_2A_2}$$

suy ra : $\boxed{x_1x_2 = f_1f_2}$

ta cũng có thể viết như sau :

$$\beta = -\frac{\overline{OF_1}}{\overline{F_1A_1}} = -\frac{\overline{OF_1}}{\overline{F_1O+OA_1}} = -\frac{f_1}{-f_1+p_1} = -\frac{f_1}{f_1-p_1} \quad (4.5 \text{ a})$$

hay từ $\beta = -\frac{\overline{F_2A_2}}{\overline{OF_2}}$ suy ra $\beta = \frac{f_2 - p_2}{f_2} \quad (4.5 \text{ b})$

hay từ :

$$\frac{n_2}{p_2} - \frac{n_1}{p_1} = \phi = -\frac{n_1}{f_1} \quad \Leftrightarrow \quad f_1 = \frac{n_1 p_1 p_2}{n_1 p_2 - n_2 p_1}$$

thế vào (4.5 a), ta được :

$$\beta = \frac{n_1 p_2}{n_2 p_1}$$

Độ phóng đại β thường được gọi là độ phóng đại dài, đó chính là độ phóng đại theo phương vuông góc với quang trục. Chúng ta thử tính độ phóng đại β dọc theo trục, được gọi là độ phóng đại trục.

Nếu vật được đặt tại khoảng cách p_1 có kích thước dọc theo trục là một đại lượng bé $\Delta \overline{p_1}$, ảnh của vật ở tại khoảng cách p_2 và có kích thước dọc theo trục là $\Delta \overline{p_2}$, thì độ phóng đại trục là:

$$\boxed{\gamma = \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1}}$$

Thực hiện phép tính vi phân đối với (4.2), ta được: $\frac{-n_2 dp_2}{p_2^2} + \frac{-n_1 dp_1}{p_1^2} = 0$

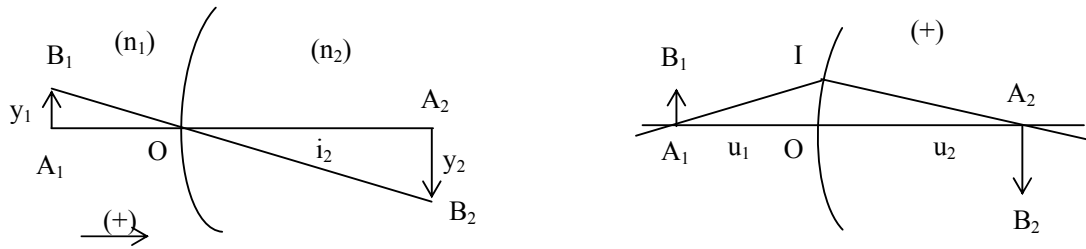
ta có thể lấy $\Delta p_2 \approx dp_2$ và $\Delta p_1 \approx dp_1$

Vậy :

$$\gamma = \frac{\Delta p_2}{\Delta p_1} = \frac{n_1 p_2}{n_2 p_1} = \boxed{\frac{n_2}{n_1} \beta^2 = \gamma}$$

5. Bất biến Lagrăng – Hemhôn (Lagrange - Helmholtz).

Hệ thức Lagrăng – Hemhôn



Hình 29 a và b

O = đỉnh của chỏm cầu

A_1A_2 là trục

B_1O và OB_2 là một cặp tia liên hợp

Ta có : $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$

đối với các tia đi gần trục, ta có :

$$n_1 \frac{y_1}{-p_1} = n_2 \frac{-y_2}{p_2} \quad \Longrightarrow \quad n_1 y_1 \frac{p_2}{p_1} = n_2 y_2 \quad (46)$$

gọi u_1 và u_2 là các góc hợp bởi trục và các tia liên hợp A_1I và IA_2

$$\text{Ta có :} \quad \text{tg}(-u_1) = \frac{\overline{OI}}{-p_1} \approx -u_1$$

$$\text{tg}(u_2) = \frac{\overline{OI}}{p_2} \approx u_2$$

Suy ra : $u_1 p_1 = u_2 p_2$

$$\text{hay } \frac{p_2}{p_1} = \frac{u_1}{u_2}$$

thay kết quả này vào (46), ta có biểu thức :

$$\boxed{n_1 y_1 u_1 = n_2 y_2 u_2} \quad (47)$$

Biểu thức (47) có tên gọi là bất biến La-giăng – Hem-hôn

Biểu thức cho thấy rằng trong hệ mặt cầu khúc xạ tích ba đại lượng $n y u$ không đổi qua các môi trường. Trên đây chúng ta đã thu được một số biểu thức miêu tả qui luật tạo ảnh của hệ mặt cầu khúc xạ – ta nhận thấy có sự tương tự trường hợp gương cầu.

- Một cách hình thức, nếu thay $n_1 = -n_2$, các biểu thức trên sẽ áp dụng đúng với gương cầu.

Ví dụ, từ (42) :

$$\frac{n_2}{p_2} - \frac{n_1}{p_1} = \frac{n_2 - n_1}{R}, \text{ thay } n_1 = -n_2, \text{ ta có : } \frac{1}{p_2} + \frac{1}{p_1} = \frac{2}{R}$$

Đó là công thức của gương cầu.

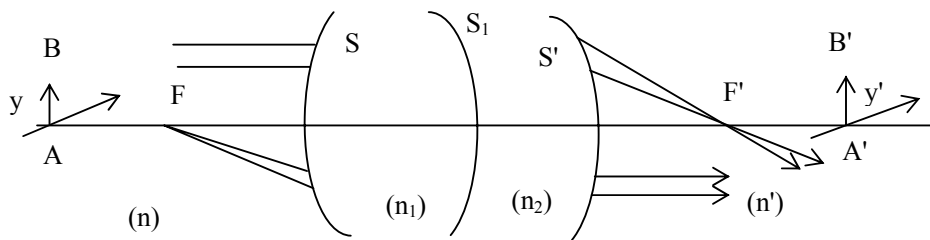
Liên hệ giữa mặt phẳng và mặt cầu, chúng ta thấy rằng mặt phẳng là trường hợp riêng của mặt cầu với $R = \infty$. Vì vậy, tất nhiên các công thức của gương cầu và mặt cầu khúc xạ nếu ta cho $R = \infty$, sẽ áp dụng đúng với trường hợp gương phẳng và mặt phẳng khúc xạ.

SS 5. QUANG HỆ ĐỒNG TRỤC.

Là một quang hệ gồm các mặt phẳng, mặt cầu khúc xạ ngăn cách các môi trường trong suốt có chiết suất khác nhau, tâm của các mặt khúc xạ cùng nằm trên một đường thẳng – đường thẳng đó được gọi là quang trục chính của hệ.

Chúng ta sẽ nghiên cứu qui luật tạo ảnh của quang hệ xuất phát từ tính chất của các điểm đặc biệt của quang hệ.

1. Hai tiêu điểm và hai điểm chính.



HÌNH 30

Cũng như trước đây, chúng ta giới hạn xét các chùm tia gần trục, sao cho sự gần đúng về chỗ đồng quy của chùm tia được bảo toàn. Trong trường hợp này, ta có bất biến Lagrăng Hemhôn đối với mỗi mặt khúc xạ.

Có thể viết dãy đẳng thức :

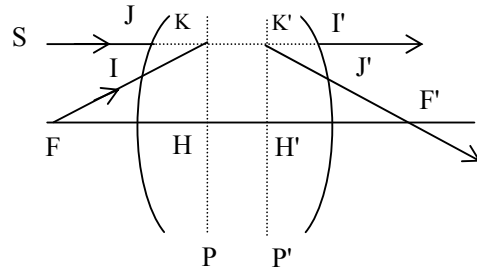
$$nyu = n_1y_1u_1 = n_2y_2u_2 = n'y'u'$$

Nếu chỉ chú ý đến môi trường trước và sau quang hệ, ta có:

$$nyu = n'y'u'$$

Trong trường hợp tính đồng quy của chùm tia được bảo toàn, chùm tia tới song song với quang trục chính, sau khi ra khỏi quang hệ chúng sẽ hội tụ qua F'. F' là ảnh liên hợp với vật ở xa vô cực nằm trên quang trục chính – F' là tiêu điểm ảnh chính. Ta lập luận tương tự để xác định tiêu điểm vật chính F (chùm tia phát xuất từ F ứng với chùm tia ló song song với quang trục chính) (hình 30). Các tiêu điểm F và F' đều có thể thực hay ảo (xác định bằng không gian vật thực và không gian ảnh thực). Tương ứng với hai tiêu điểm F và F', ta có hai mặt phẳng tiêu. Đó là hai mặt phẳng vuông góc với quang trục chính tại F và F'. Các điểm ở trên mặt phẳng tiêu, khác F hay F', được gọi là các tiêu điểm phụ

2. Điểm chính 2 mặt phẳng chính.



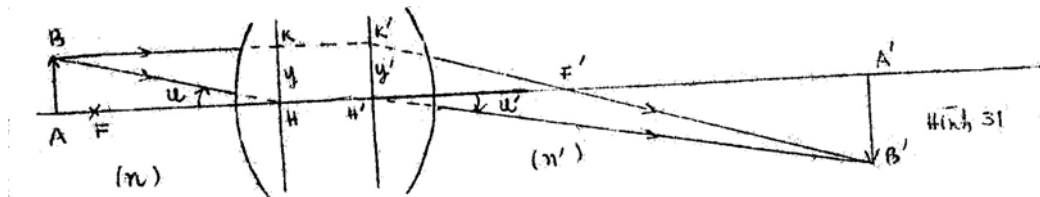
HÌNH 31

Xét tia SJ song song với quang trục, tia ló là J'F'. Trong các tia tới đi qua F, ta chọn một tia FI sao cho tia ló là IR (song song với quang trục) có cùng giá với tia SJ. Các điểm K và K' (giao điểm của SJ với FI và I'R với J'F') là hai điểm liên hợp. Các mặt phẳng p và p' đi qua K và K' và thẳng góc với trục quang học được gọi là hai mặt phẳng chính. p được gọi là mặt phẳng chính vật. p' được gọi là mặt phẳng chính ảnh. Các điểm H và H' (giao điểm của p và p' với quang trục) được gọi là các điểm chính. H và H' là hai điểm liên hợp. Nói chung với các cặp điểm K và K' bất kỳ trên mặt phẳng chính và ở gần quang trục, ta có $\overline{HK} = \overline{H'K'}$, độ phóng đại $\gamma = \frac{\overline{H'K'}}{\overline{HK}} = +1$ (ảnh vật bằng nhau và cùng chiều)

Các khoảng cách $\overline{HF} = f$ và $\overline{H'F'} = f'$ được gọi là các tiêu cự vật và tiêu cự ảnh. Thứ tự về vị trí của các điểm F, H, H', F' trên hình 31 chỉ là một trường hợp có thể mà thôi.

3. Liên hệ giữa hai tia liên hợp qua hai điểm chính.

- Tia BK song song trục chính (tia ló qua F')

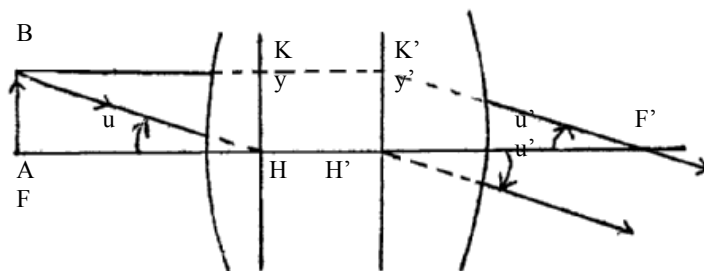


- Tia tới BH qua điểm chính H, tia ló qua H'. Xét hai tia liên hợp qua H và H' (là hai tia BH và H'B'), áp dụng bất biến Lagrange Helmholtz với các điểm H và H' (của vật là HK và ảnh là H'K') : $n y = n' y' u'$

Vì $y = y' \Rightarrow \boxed{n u = n' u'}$

hay $\boxed{\frac{u'}{u} = \frac{n}{n'}}$ (5.2)

4. Hệ thức giữa các tiêu cự.



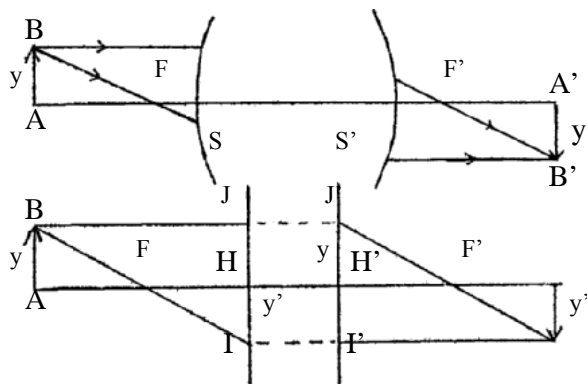
HÌNH 32

Đề ABG' mặt phẳng tiêu : K'F' // H'R
ta có :

$$\begin{aligned} y &= u (-f) \\ y' &= u' f' \\ \Rightarrow -uf &= u' f' \\ \Rightarrow \frac{f'}{f} &= -\frac{u}{u'} \Rightarrow \frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n} \end{aligned} \quad (5.3)$$

5. Cách dựng ảnh và các công thức.

Xét một vật AB nhỏ đặt vuông góc với quang trục (H. 33). Ta sử dụng 2 trong 3 tia đặc biệt để xác định ảnh. Ở đây cần lưu ý rằng chỉ cần biết 4 yếu tố F, F', H và H' (hoặc thêm nữa là n và n') là ta có thể dựng được hình. Các tia sáng thực chỉ có thể xác định đầy đủ nếu có đầy đủ các thông số của hệ đồng trục.



Hình 33

Trong trường hợp biết được các mặt ngăn cách đầu và cuối S và S' thì có thể xác định được các chùm tia liên hợp trước S và sau S' như các hình vẽ 33. Dưới đây khi thành lập các công thức, các khoảng cách được tính trừ các điểm gốc là H và H'.

Từ hai tam giác đồng dạng có đỉnh chung là F và F', ta có :

$$\frac{-y'}{y} = \frac{-f}{x} \quad \text{vậy} \quad \boxed{\beta = \frac{y'}{y} = \frac{-f}{x}}$$

$$\frac{-y'}{y} = \frac{+x'}{+f'} \rightarrow \beta = \frac{y'}{y} = \frac{-x'}{f'}$$

Vậy ta đi đến công thức Niuton :

$$\frac{f}{x} = \frac{x'}{f'} \rightarrow \boxed{xx' = ff'} \quad (5.4)$$

Các khoảng cách x và x' có thể biểu diễn qua P và P' :

$$(-x) = (-p) - (-f) \rightarrow x = p - f \quad (5.5)$$

$$(\overline{FA} = \overline{HA} - \overline{HF} = p - f) \text{ và } x' = p' - f'$$

Thay các giá trị của x và x' theo (5.5) vào (5.4), biến đổi, ta được :

$$\frac{f'}{p'} + \frac{f}{p} = 1 \quad (5.6)$$

Liên hệ với tỉ số của 2 tiêu cự : \hat{G} , từ biểu thức (5.6) có thể dẫn đến biểu thức :

$$\boxed{\frac{n'}{p'} - \frac{n}{p} = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f} = \phi} \quad (5.7)$$

ϕ là tụ số của hệ quang học.

Đó là dạng đã biết trong trường hợp mặt cầu khúc xạ.

Đối với hệ số phóng đại \hat{G} nếu thay giá trị $x' = p' - f'$ vào biểu thức \hat{G} ta được :

$$\beta = 1 - \frac{p'}{f'}$$

Rút giá trị f' từ công thức (5.7) thay vào biểu thức trên, đi đến:

$$\boxed{\beta = -\frac{np'}{n'p}} \quad (5.8)$$

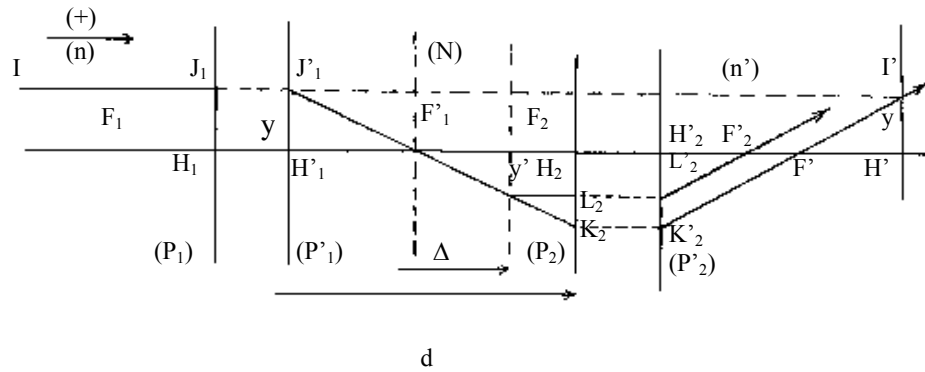
Trong trường hợp các môi trường ở trước và sau quang hệ có chiết suất bằng nhau $n' = n$, các công thức sẽ có dạng đơn giản hơn như sau :

$$\boxed{\begin{aligned} f' &= -f \\ xx' &= -f^2 \\ \frac{1}{p'} - \frac{1}{p} &= \frac{1}{f'} = \frac{\phi}{n} \\ \beta &= \frac{p'}{p} \end{aligned}} \quad (5.9)$$

SS6. SỰ KẾT HỢP CỦA HAI HỆ ĐỒNG TRỤC.

Có hai quang hệ đồng trục (F₁H₁H'₁F'₁) và (F₂H₂H'₂F'₂) được xếp đồng trục với nhau, như vậy hai hệ con – tạo thành một quang hệ đồng trục lớn. Chiết suất môi trường trước và sau hệ lớn là n và n' chiết suất giữa 2 hệ con là N. Khoảng cách giữa hai hệ con có thể xác định bằng khoảng cách :

$$\overline{F'_1 F_2} = \Delta \text{ hay } \overline{H'_1 H_2} = d$$



Hình 34

Các khoảng cách này cũng mang dấu theo qui ước chung. Tiêu cự các hệ con f_1, f'_1, f_2, f'_2 đã biết trước.

1- Xác định 4 đặc điểm đặc biệt của quang hệ lớn bằng cách dựng hình.

Trước tiên chúng ta hãy xác định F' và H' (tiêu điểm ảnh chính và điểm chính thứ hai của hệ lớn).

Vẽ tia IJ_1 song song với quang trục chính (H. 34) đến hệ con thứ nhất. Tia ló qua tiêu điểm F'_1 và đến hệ con thứ hai, cắt mặt phẳng tiêu (F_2) tại C và cắt mặt phẳng chính (P_2) tại K_2 là điểm liên hợp với K'_2 qua hệ con thứ hai. Để dựng tia ló xuất phát từ K_2 , ta sử dụng tính chất của tiêu điểm phụ C.

Từ C kẻ tia song song với quang trục chính, tia này cắt (P_2) và (P'_2) tại L_2 và L'_2 . Tia ló tương ứng sẽ qua tiêu điểm F'_2 .

Tia ló xuất phát từ K'_2 song song với tia $L'_2F'_2$ cắt quang trục tại F' , đó là tiêu điểm ảnh của hệ lớn.

Trở lại việc tìm điểm liên hợp với điểm I. Điểm cần tìm phải nằm trên tia ló H'_2F' và cách quang trục một khoảng $+y = \bar{G}$. Vì vậy, kéo dài đường IJ_1 , đường kéo dài cắt tia ló K'_2F' tại I' . Đó chính là điểm liên hợp với I. Từ I' hạ đường vuông góc xuống quang trục. Chân đường vuông góc là H' , điểm chính thứ hai của hệ lớn. Bằng cách tương tự, nhưng theo chiều ngược lại – từ phải sang trái, ta sẽ xác định được tiêu điểm vật và điểm chính thứ nhất của quang hệ lớn.

2- Tiêu cự của hệ lớn.

Từ hai tam giác vuông đồng dạng có đỉnh là F' và F'_2 , ta có hệ thức :

$$\frac{y}{y'} = \frac{H'F'}{H'_2F'_2} = \frac{f'}{f'_2}$$

$$\Rightarrow f' = \frac{y}{y'} f'_2$$

từ hai tam giác vuông đồng dạng đỉnh chung là F_1 , có :

$$\frac{y}{-y'} = \frac{f'_1}{\Delta}$$

thay tỉ số của biểu thức này vào f' :

$$f' = \frac{-f'_1 f'_2}{\Delta} \quad (6.1)$$

Tương tự có thể suy ra tiêu cự thứ nhất :

$$f = \frac{f_1 f_2}{\Delta}$$

3- Vị trí của các điểm chính của hệ lớn.

Lấy gốc là H'_2 . Ta đi xác định khoảng cách

$$\lambda_{H'} = \overline{H'_2 H'}$$

ta có : $(H' = \hat{G}$

Ta thấy đối với hệ con thứ hai thì $F'1$ và F' là hai điểm liên hợp. Áp dụng công thức Newton vào $F'1$ và F' :

$$\overline{F_2 F'_1} \cdot \overline{F'_2 F} = f_2 \cdot f'_2 \quad \text{vôùi} \quad \overline{F'_1 F_2} = \Delta$$

$$\overline{F'_2 F} = \frac{-f_2 f'_2}{\Delta}$$

vậy

$$l_{H'} = f'_2 - \frac{f_2 f'_2}{\Delta} + \frac{f_1 f'_2}{\Delta} = \frac{f'_2}{\Delta} (\Delta - f_2 + f_1) = \frac{f'_2 \cdot d}{\Delta}$$

$$\boxed{l_{H'} = \frac{f'_2 d}{\Delta}}$$

Tương tự tính được khoảng cách đến điểm chính thứ nhất H từ $H1$:

$$l_H = \overline{H_1 H}$$

là: $\boxed{l_H = \frac{f_1 d}{\Delta}}$ (6.5)

4- Tỷ số hệ lớn .

Ta có : \hat{G}

$$\phi = \frac{n'}{f'} \quad \text{vớì} \quad f' = \frac{-f'_1 f'_2}{\Delta}$$

$$\phi = \frac{-n' \Delta}{f'_1 f'_2} = \frac{-\Delta}{N} \frac{N}{f'_1} \frac{n'}{f'_2} = -\frac{\Delta}{N} \phi_1 \phi_2$$

Mà \hat{G}

Vậy \hat{G}

Trong đó :

$$\frac{f'_1}{N} = \frac{1}{\phi_1} ; \quad \frac{f'_2}{N} = \frac{1}{\phi_2}$$

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - \frac{d}{N} \phi_1 \phi_2 \quad \text{ta có : } l_{H'} = \frac{f'_2}{\Delta} d$$

mà \hat{G} ($\hat{G} = \hat{G}$)

$$\boxed{l_{H'} = \frac{f'_2}{\Delta} d = -\frac{n'}{N} d \frac{\phi_1}{\phi}}$$
 (6.8)

Tương tự :

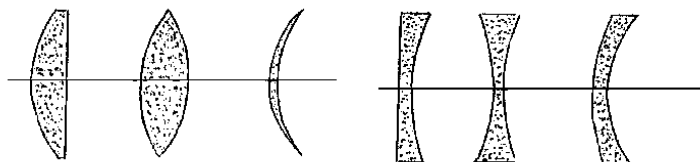
$$\boxed{l_H = \frac{n}{N} d \frac{\phi_2}{\phi}}$$
 (6.9)

Việc nghiên cứu quang hệ đồng trục phức tạp thường được tiến hành bằng cách ghép dần hai quang hệ con.

SS 7. THẤU KÍNH.

Thấu kính là một môi trường trong suốt được giới hạn bởi hai mặt cầu khúc xạ. Đường thẳng qua hai tâm của hai mặt cầu (đồng thời vuông góc với các mặt) là quang trục chính của thấu kính. Sau đây là các dạng của thấu kính.

Trong trường hợp chung, môi trường trước và sau của thấu kính có thể có chiết suất khác nhau (và khác với chiết suất của thấu kính). Như vậy thấu kính chính là trường hợp quang hệ đồng trục gần hai mặt cầu khúc xạ ngăn cách ba môi trường chiết suất khác nhau.



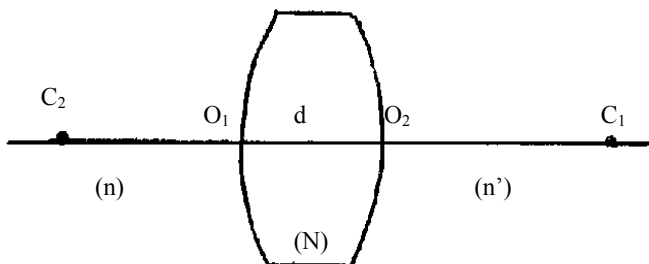
Hình 35

Trên hình vẽ 35, ta sơ bộ phân biệt hai loại thấu kính. Loại thấu kính thứ nhất có phần môi trường ở gần trục dày hơn. Loại thứ hai, môi trường ở gần trục mỏng hơn.

Sau đây, chúng ta sẽ dùng các kết quả của quang hệ đồng trục để khảo sát một số trường hợp thường gặp của thấu kính.

1. Thấu kính dày.

Xét một thấu kính dày chiết suất N , hai mặt giới hạn có đỉnh là O_1 với bán kính \tilde{G} và O_2 với bán kính \tilde{G} . Khoảng cách giữa hai mặt cầu khúc xạ \tilde{G} . Môi trường trước và sau thấu kính có chiết suất là n và n' .



Hình 36

Ta xem thấu kính là một quang hệ đồng trục gồm hai hệ con. Mỗi hệ con là một mặt cầu khúc xạ. Trước tiên, ta tìm hai điểm chính của mỗi hệ con.

Đối với mặt cầu khúc xạ, độ phóng đại \tilde{G}

Hai mặt phẳng chính là hai mặt phẳng liên hợp với \tilde{G} , nghĩa là \tilde{G} . Ngoài ra, ta có công thức :

$$\frac{n_2}{p_2} - \frac{n_1}{p_1} = \frac{n_2 - n_1}{R} \neq 0$$

Như vậy điều kiện \tilde{G} chỉ được thỏa trong trường hợp $p_2 = p_1 = 0$. Nghĩa là các điểm chính H_1, H'_1 trùng với đỉnh O_1 của mặt cầu khúc xạ thứ nhất và các điểm chính H_2, H'_2 trùng với đỉnh O_2 của mặt cầu khúc xạ thứ hai.

Tụ số của các hệ con lần lượt là :

$$\phi_1 = \frac{N - n}{R_1} \quad \text{và} \quad \phi_2 = \frac{n' - N}{R_2} \quad (7.1)$$

Áp dụng công thức (6.7), ta tính được tụ số của hệ lớn.

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - \frac{d}{N} \phi_1 \phi_2 \quad (7.2)$$

(khoảng cách \tilde{G} chính là khoảng cách \tilde{G})

Theo các công thức (6.8) và (6.9) ta có thể tính (H và (H', từ đó suy ra vị trí của H và H'. Từ tụ số, tính các tiêu cự và xác định F và F'.

2. Thấu kính mỏng.

a. Tụ số, tiêu cự và quang tâm của thấu kính mỏng:

Từ công thức (7.1) và (7.2) ta tính tụ số của thấu kính

$$\phi = \frac{N-n}{R_1} + \frac{n'-N}{R_2} - \frac{d}{N} \frac{(N-n)}{R_1} \frac{(n'-N)}{R_2}$$

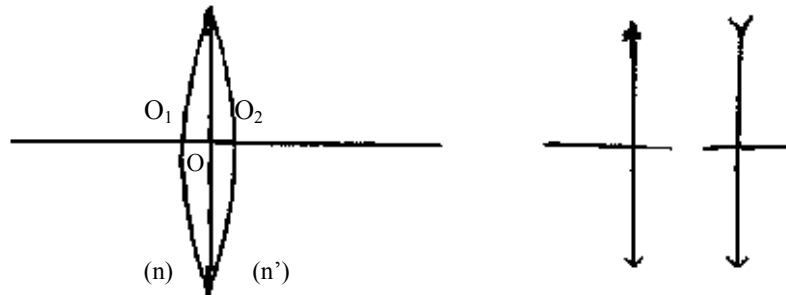
Ta xét trường hợp đơn giản thường gặp nhất là trường hợp thấu kính đ85t trong không khí, khi đó $n' = n = 1$, tụ số sẽ bằng

$$\phi = (N-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) + \frac{d(N-1)^2}{NR_1R_2} \quad (7.3)$$

Bề dày của thấu kính là d. Thấu kính được coi là mỏng, nếu bề dày d của thấu kính bé so với kính thước của bán kính mặt cầu, sao cho số hạng thứ hai trong (7.3) có thể bỏ qua so với số hạng thứ nhất.

Như vậy, tụ số của thấu kính mỏng đặt trong không khí là :

$$\phi = (N-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (7.4)$$



Hình 37

Các tiêu cự của thấu kính l (7.5)

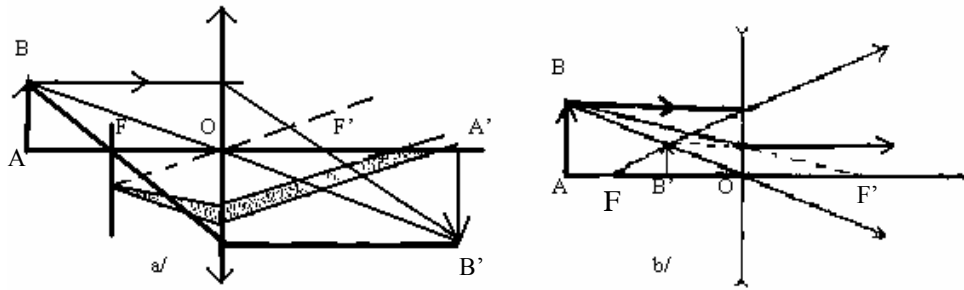
Như trước đây đã phân tích hai điểm chính của mặt cầu khúc xạ trùng với đỉnh của mặt cầu. Trong trường hợp thấu kính mỏng \tilde{T} , đỉnh O1 và O2 xem là trùng nhau và trùng với O (H.37). O gọi là quang tâm của thấu kính. Như vậy các điểm chính H1, H'1 và H2, H'2 đều nằm tại O.

Áp dụng các công thức (6.8) và (6.9) để xác định các điểm chính của hệ lớn, chúng ta tính được (H' = 0 và (H = 0

Như vậy hai mặt phẳng chính của thấu kính mỏng qua quang tâm O (H. 37)

Xét đường truyền của tia sáng với quang tâm O. Áp dụng công thức (5.2). Ta thấy trường hợp chiết suất các môi trường trước và sau thấu kính bằng nhau, $n = n'$, tia truyền qua quang tâm sẽ không bị lệch. đó là một trong các tia đặc biệt được dùng để dựng hình.

b. Cách dựng hình và các công thức:



Hình 38

Trở lại công thức tính tụ số của thấu kính mỏng (7.4). Các đại lượng R_1, R_2 trong công thức có dấu theo qui ước trước đây. Vì vậy tụ số cũng là một đại lượng có dấu.

Nếu $G > 0$, ta có thấu kính hội tụ, hay thấu kính dương. Nếu $G < 0$, ta có thấu kính phân kỳ, hay thấu kính âm. Các thấu kính mỏng hội tụ và phân kỳ được biểu diễn, trên hình vẽ theo H.38a và H.38b. Chú ý rằng, đối với thấu kính phân kỳ, 2 tiêu điểm vật và ảnh đều ảo (H. 38b).

Các thấu kính hội tụ có dạng như hình vẽ 35a. Các thấu kính phân kỳ có dạng như hình 35 b.

Để dựng hình chúng ta cùng sử dụng 2 trong các tia đặc biệt.

1. Tia tới song song với quang trục chính
2. Tia tới qua tiêu điểm vật
3. Tia tới qua quang tâm
4. Tia tới qua tiêu điểm phụ

Các tia liên hợp tương ứng chúng ta đã biết trước đây, nên không nhắc lại.

Các công thức thường sử dụng đối với thấu kính mỏng:

Công thức tính tụ số : (7.4)

Công thức tính các tiêu cự : (7.5)

Các công thức liên hệ vị trí vật và ảnh :

$$xx' = -f^2$$

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'}$$

Công thức tính hệ số phóng đại : $\frac{p'}{p} = \beta$

Trên đây chính là các công thức (9.5) của phần quang hệ đồng trục.

Căn cứ vào dấu của G có thể biết ảnh và vật ở về hai phía hay cùng một phía đối với thấu kính. Còn độ lớn của ảnh so với vật có thể căn cứ vào G lớn hơn hay nhỏ hơn 1.

3. Hệ hai thấu kính mỏng.

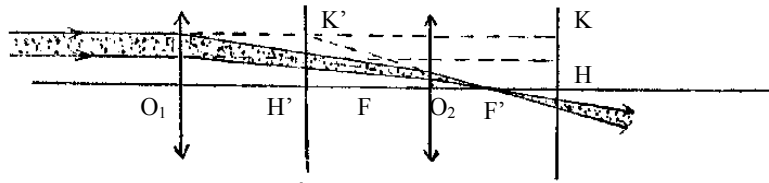
Có hai thấu kính mỏng, hội tụ, tiêu cự là $3a$ và a .

Hai thấu kính được đặt đồng trục trong không khí, cách nhau một khoảng bằng $2a$.

Quang hệ đồng trục gồm hai hệ con là hai thấu kính.

Hệ con thứ nhất có hai điểm chính H_1 và H'_1 trùng với O_1 .

Hệ con thứ hai, có H₂ và H'₂ trùng với O₂
 Khoảng cách giữa hai hệ là d = 2a



HÌNH 39

Tỷ số của các hệ con:

$$\phi_1 = \frac{1}{3a} \quad ; \quad \phi_2 = \frac{1}{a}$$

Tỷ số của hệ lớn :

$$\phi = \phi_1 + \phi_2 - \frac{d}{N} \phi_1 \phi_2 = \frac{1}{3a} + \frac{1}{a} - 2a \frac{1}{3a} \frac{1}{a} = \frac{2}{3a}$$

Các tiêu cự của hệ lớn :

$$f' = \frac{1}{\phi} = \frac{3a}{2}$$

$$f = -f' = -\frac{3a}{2}$$

Các khoảng cách đến hai điểm chính :

$$l_{H'} = \overline{H'_2 H'} = -\frac{n'}{N} d \frac{\phi_1}{\phi} = -2a \frac{\frac{1}{3a}}{\frac{2}{3a}} = -a$$

$$l_H = \overline{H_1 H} = -\frac{n}{N} d \frac{\phi_2}{\phi} = 2a \frac{\frac{1}{a}}{\frac{2}{3a}} = 3a$$

Chúng ta xác định 4 điểm chính trên quang trục (H. 39), trước tiên là H và H', rồi F và F'

Từ các kết quả trên có thể vẽ đường truyền của chùm tia qua quang hệ, ví dụ: chùm tia tới song song với quang trục (H. 39). Các đường chấm chấm dùng để dựng hình. Sau khi dựng hình xong có thể suy ra đường truyền thực của chùm tia là các đường liền nét trên hình vẽ.

Quang hệ chúng ta vừa nghiên cứu là thị kính Huyghen, thường được dùng làm thị kính trong kính hiển vi. Quang hệ này được kí hiệu là 3.2.1. (3a-2a-1a)

SS8. MỘT SỐ KHUYẾT ĐIỂM CỦA THẤU KÍNH TRONG SỰ TẠO HÌNH.

Trong phần trước chúng ta đã thấy: để tạo được ảnh điểm qua quang hệ, chúng ta phải giả thiết :

- Chùm tia qua quang hệ là chùm tia hẹp
- Chùm tia đơn sắc

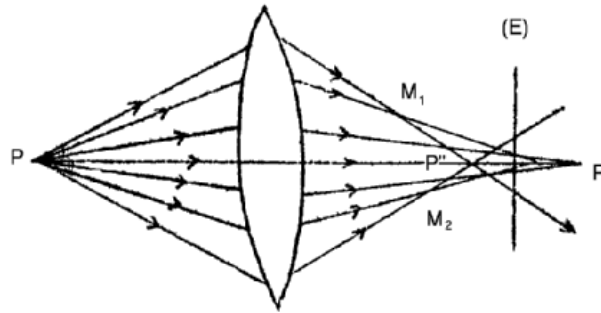
Trong thực tế, ánh sáng không đơn sắc hoàn toàn. Còn nếu chùm tia bị giới hạn để có chùm tia gần trục thì thông lượng ánh sáng bé, độ rọi của ảnh nhỏ, khó quan sát.

Khi hai điều kiện trên không được thỏa mãn thì tính chất ảnh điểm của quang hệ bị mất.

Kết quả là ảnh thu được không sắc nét và không đồng dạng với vật.

Trong phần này, chúng ta phân tích một số sai sót của quang hệ do hai nguyên nhân kể trên và cách khử chúng.

1. Cầu sai dọc.

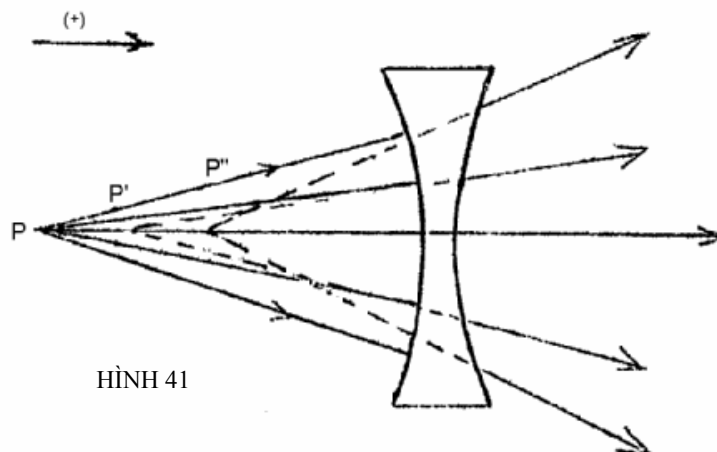


Hình 40

Từ nguồn sáng điểm P trên quang trục có chùm tia rộng đến thấu kính (H. 40). Các tia gần trục sau khi qua thấu kính sẽ hội tụ tại P', các tia ở rìa khúc xạ mạnh hơn, hội tụ tại P'' gần thấu kính hơn. Các tia ở giữa hội tụ tại các điểm tương ứng nằm trong khoảng P'P''. Như vậy chùm tia ló không đồng quy ở một điểm. Trong không gian ảnh, các tia tiếp xúc với mặt tụ quang (qui tích những điểm có mật độ năng lượng sáng lớn) gồm 2 tầng. Một tầng của mặt tụ quang là đoạn thẳng P'P'' nằm trên quang trục. Tầng thứ hai đối xứng tròn xoay quanh quang trục. Giao tuyến của tầng này với hình vẽ là đường cong M1P'M2

Nếu hứng ảnh của điểm P trên E' (hình 40) ta sẽ được một hình tròn có kích thước giới hạn, kích thước của ảnh sẽ bé nhất tại một vị trí xác định giữa hai điểm p' và p''. Hiện tượng mô tả trên được gọi là cầu sai dọc.

Đối với thấu kính phân kỳ, các tia ở rìa khúc xạ ra xa trục mạnh hơn (H. 41) – ảnh tương ứng với các tia ở rìa là P'', ảnh tương ứng với các tia gần trục là p'. Đoạn p'p'' theo chiều dương – còn trong trường hợp thấu kính hội tụ, p'p'' theo chiều âm.



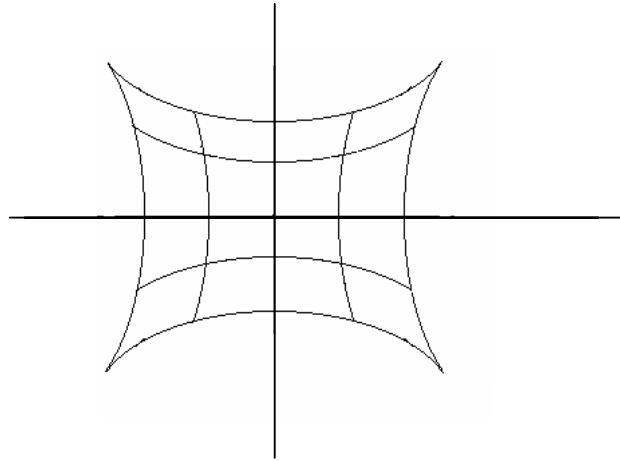
HÌNH 41

Lợi dụng tính chất này, người ta khử hiện tượng cầu sai bằng cách ghép hai thấu kính hội tụ và phân kì có chiết suất khác nhau.

2. Độ cong trường và sự méo ảnh.

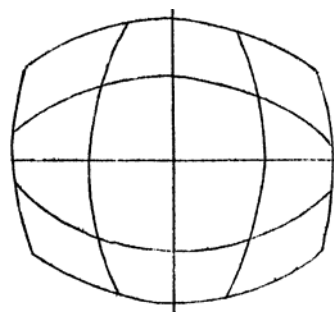
Độ cong trường xảy ra khi vật có dạng một mặt phẳng vuông góc với quang trục, cho ta ảnh có dạng là một phần của mặt cong.

Méo ảnh là sai sót gây nên do độ phóng đại không đều nhau trong phạm vi trường của ảnh – do méo ảnh mà vật và ảnh không còn đồng dạng nữa – Nếu vật là một cái lưới có lỗ hình vuông đặt vuông góc quang trục thì ảnh của nó là cái lưới gồm những đường cong (Hình 42a, 42b)



Hình 42a

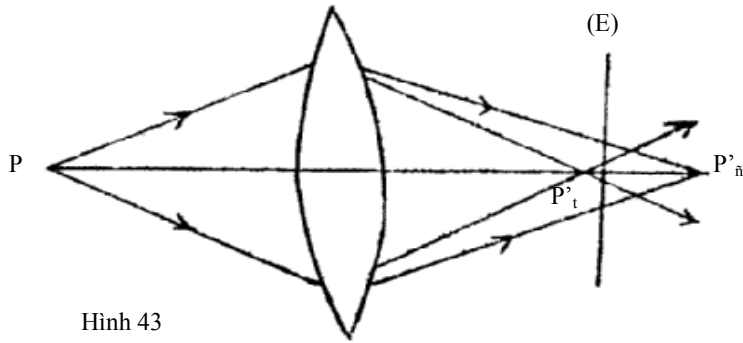
Nếu càng xa xa trục, độ phóng đại càng lớn thì ảnh có dạng 42a. Nếu ngược lại, càng xa trục, độ phóng đại càng nhỏ thì ảnh có dạng 42b.



Hình 42b

3. Sắc sai.

Sự sắc sai xảy ra khi chùm tia tới không phải chùm tia đơn sắc mà gồm nhiều bước sóng khác nhau. Do đó khi chùm tia sáng đi qua một thấu kính nó cũng bị tán sắc tương tự như khi đi qua một lăng kính.

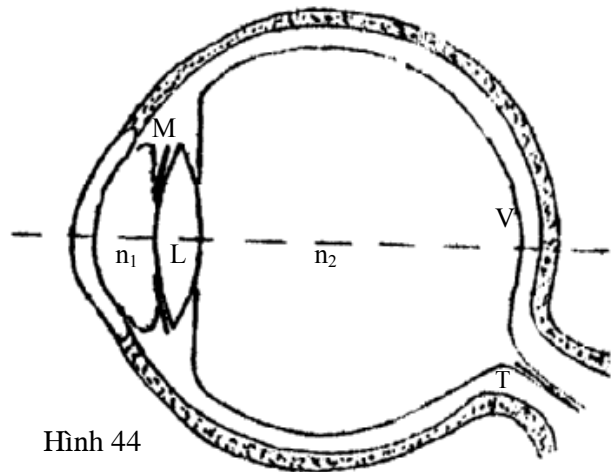


Hình 43

Trong hình vẽ 43, p là nguồn sáng điểm, trắng, nằm trên quang trục. Ánh sáng tím phát suất từ P sẽ cho ảnh P't, ánh sáng đỏ cho ảnh P'd. Các màu trung gian cho các ảnh nằm trong khoảng P't, P'd. Nếu đặt một màn hứng ảnh E tại vị trí P't, ta có những đường tròn màu đồng tâm có màu sắc như một cầu vồng, có tâm tím, mép ngoài đỏ. Ngược lại, nếu đặt E tại P'd thì tâm màu đỏ, mép ngoài màu tím.

SS 9. MẮT.

1. Cấu tạo – sự điều tiết.



Hình 44

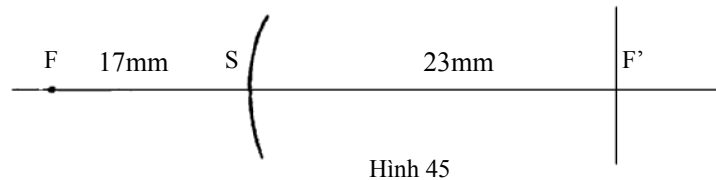
Sự cấu tạo mắt được trình bày theo hình vẽ 44. L là thủy tinh thể có chiết suất biến thiên từ 1,42 (ở gần trục) tới 1,36 (ở ngoài biên). Trước và sau thủy tinh thể là các môi trường trong suốt có chiết suất $n_1 = n_2 = 1,336$. M là một màn chắn ở trước thủy tinh thể. Lỗ tròn ở giữa màn M là con ngươi. Vỡng mô đóng vai trò của màn hứng ảnh. Trên vỡng mô có sự phân nhánh dày đặc của thần kinh thị giác T. Điểm V (đường kính 2 mm) được gọi là điểm vàng. Khí ảnh ở đó thì thị giác nhạy nhất. Chỗ dây thần kinh T đi vào mắt không nhạy sáng được gọi là điểm mù.

Về mặt quang học, mắt là một quang hệ đồng trục gồm một số mặt cong ngăn cách các môi trường có chiết suất khác nhau, tương đương với một lưỡng chất cầu duy nhất có đỉnh S

(vị trí chung của H và H'). Với mắt trung bình, các hằng số quang học đặc trưng cho mắt như sau :

- Tụ số G 60 điốp
- Tiêu cự ảnh G 23 mm
- Tiêu cự vật G 17 mm

Người ta nhìn rõ được vật khi ảnh hiện lên võng mô của mắt. Các cơ của mắt hoạt động làm thay đổi độ cong của các mặt của thủy tinh thể, sao cho ảnh của vật nằm trên võng mô. Đó là sự điều tiết của mắt.

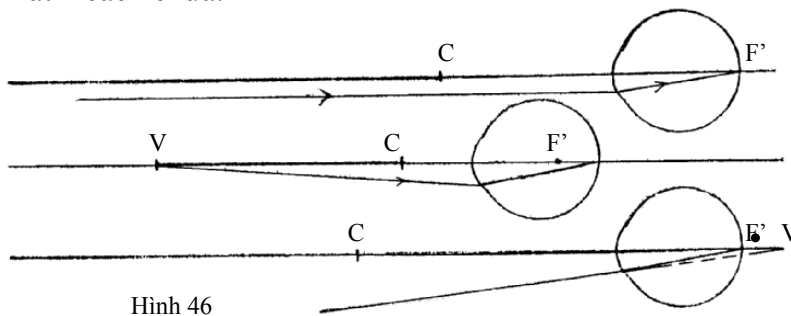


Đối với mắt thường, tiêu điểm F' nằm đúng trên võng mô. Do đó không cần điều tiết, mắt thường nhìn rõ vật ở xa vô cực. Ta nói điểm cực viễn V ở xa vô cực. Khi vật ở gần, mắt phải điều tiết mới thấy rõ vật. Sự điều tiết tối đa khi vật ở cách mắt 15 cm (đối với mắt trung bình). Điểm gần nhất C để mắt vẫn có thể nhìn rõ được vật (sự điều tiết tối đa) được gọi là điểm cực cận.

Trường toàn phần mà mắt nhận được có kích thước góc vào khoảng 130° theo phương thẳng đứng và 160° theo phương nằm ngang. Năng suất phân ly trong vùng điểm vàng đối với mắt bình thường là 1.

Cảm giác sáng mà mắt nhận được không mất ngay và còn kéo dài G 0,1 giây sau khi ánh sáng thôi tác dụng. Vì vậy nếu nguồn sáng nhấp nháy lớn hơn 10 lần/giây thì mắt không thể cảm biết được sự nhấp nháy này, ta có cảm giác sáng liên tục. Kỹ thuật điện ảnh là một lợi dụng tính chất trên của mắt.

2. Các tật của mắt – cách chữa.



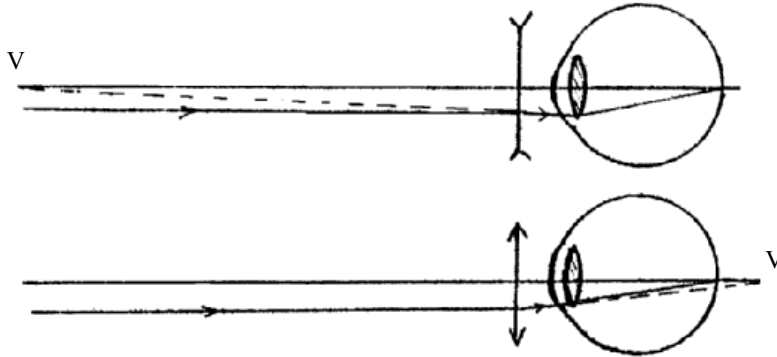
Đối với mắt bình thường, tiêu điểm F' nằm đúng trên võng mô của mắt. điểm cực viễn V ở vô cực, điểm cực cận C cách mắt G 15 cm. Khoảng cách VC được gọi là khoảng cách thấy rõ của mắt (hay phạm vi điều tiết của mắt).

Với một mắt cận thị, tiêu điểm F' nằm ở trước võng mô (do thủy tinh thể quá hội tụ). Phạm vi điều tiết ở gần hơn mắt bình thường (điểm cực cận và cực viễn gần hơn đối với mắt thường).

Đối với mắt viễn thị, tiêu điểm F' nằm ở sau võng mô (do thủy tinh thể kém hội tụ). Điểm cực cận ở xa hơn so với mắt thường. điểm cực viễn là một điểm ảo.

Để chữa các mắt cận và viễn thị, người ta cần mang kính nghĩa là đặt thêm một thấu kính thích hợp trước mắt. Đối với mắt cận, tụ số quá lớn nên cần mang thêm một thấu kính âm (phân kỳ). Ngược lại, mắt viễn thị có tụ số nhỏ hơn bình thường nên cần mang thêm một thấu kính dương (hội tụ)

Tiêu cự của kính mắt được chọn thích hợp sao cho chùm tia tới song song hội tụ đúng trên võng mô. Muốn vậy, chùm tia song song sau khi đi qua kính mắt phải trở thành chùm tia có đường kéo dài đi qua điểm cực viễn V.



Hình 47

Gọi khoảng cách từ kính tới mắt là d , từ điểm cực viễn V tới mắt là v (đối với mắt cận thị : $v < 0$, với viễn thị : $v > 0$). Tiêu cự của kính mắt là : $f = IV + d$

3. Số bội giác của một quang cụ.

Vật có chiều cao là y . Muốn quan sát rõ nhất bằng mắt trần, ta đặt vật ở điểm cực cận.



Hình 48

Góc nhìn là u_0 với : $\text{tg } u_0 = \frac{y}{l_0}$

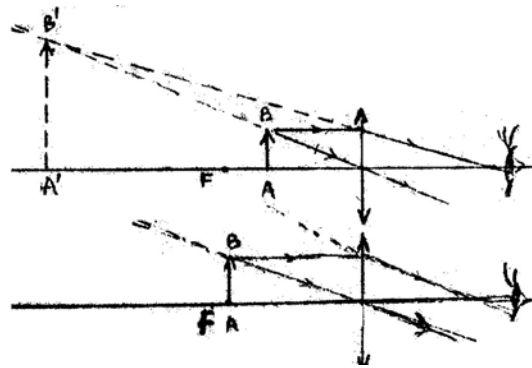
(l_0 là khoảng cách ngắn nhất thấy rõ vật (từ điểm cực cận tới mắt))

Muốn phân biệt được nhiều chi tiết hơn, ta phải tăng góc nhìn bằng cách dùng một quang cụ (kính lúp, kính hiển vi...) khi đó góc nhìn sẽ là u . Số bội giác của quang cụ được định nghĩa là :

$$\gamma = \frac{\text{tg } u}{\text{tg } u_0}$$

SS10. CÁC DỤNG CỤ QUANG HỌC.

1. Kính lúp.



Hình 49

a. Cấu tạo: Kính lúp là một thấu kính dương L có tụ số lớn. Các kính lúp đã khử quang sai gồm hai thấu kính ghép với nhau.

b. Ngắm chừng: Vật AB cần quang sát được đặt trong khoảng cách từ tiêu điểm đến kính lúp. Kính sẽ cho một ảnh ảo A'B' lớn hơn vật. Mắt đặt sau kính sao cho ảnh A'B' nằm trong khoảng điều tiết của mắt. Muốn quan sát đỡ mỏi mắt, người ta ngắm chừng ở vô cực, khi đó vật AB ở tại mặt phẳng tiêu của L, ảnh A'B' ở vô cực. Qua kính lúp, mắt quan sát vật dưới góc u .

c. Số bội giác:

Khi quan sát trực tiếp, ta đặt vật ở điểm cực cận, cách mắt một đoạn (o , góc nhìn là u_0 với $\text{tgu}_0 = \tilde{G}$ (\tilde{G} là độ lớn của vật AB)

Qua kính lúp vật được phóng đại, góc nhìn tăng lên, bây giờ là u . Ta có :

$$\text{tgu} = \tilde{G} \quad \text{với } f' \text{ tiêu cự ảnh của kính lúp}$$

Vậy số bội giác là :

$$\boxed{\gamma = \frac{\text{tgu}}{\text{tgu}_0} = \frac{l_o}{f'}} \quad (10.1)$$

Nếu ta lấy ($o = 25 \text{ cm}$, với kính lúp có tiêu cự 5 cm, số bội giác là 5.

2. Kính hiển vi.

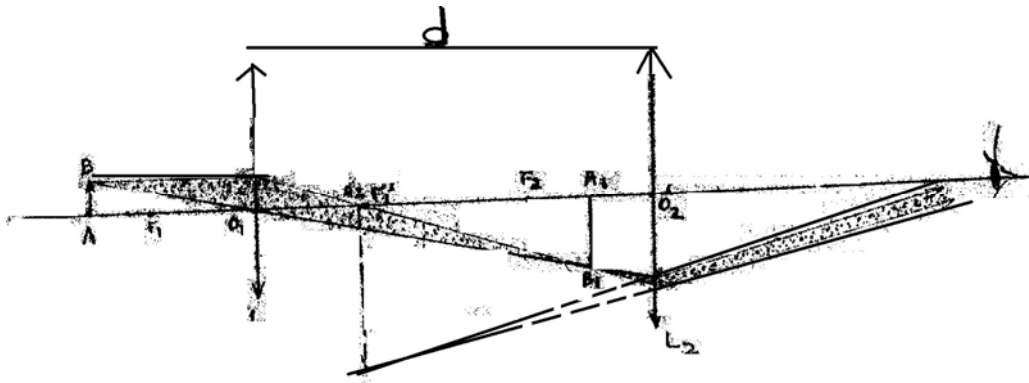
a. Cấu tạo :

Kính hiển vi gồm 3 bộ phận chính vật kính, thị kính và bộ phận chiếu sáng

Vật kính và thị kính là hai hệ thấu kính ghép có tiêu cự f'_1 và f'_2 nhỏ, được xếp đồng trục trong ống kính và cách nhau một khoảng d lớn hơn các tiêu cự f'_1 và f'_2 rất nhiều

b. Ngắm chừng:

Hình 50 trình bày nguyên tắc tạo ảnh trong kính hiển vi. Để đơn giản ta biểu diễn vật kính và thị kính là các thấu kính hội tụ L_1 và L_2 . Các độ dài f'_1, f'_2 so với d được vẽ lớn hơn trong thực tế.



Hình 50

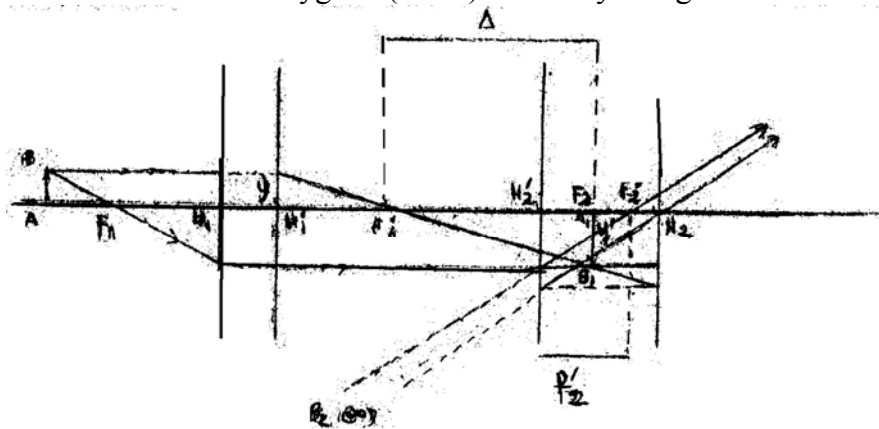
Vật bé AB được đặt ngoài tiêu điểm F_1 của kính vật. Qua kính vật, ta được ảnh thực A1B1 ngược chiều và lớn hơn vật. Xê dịch ống kính sao cho ảnh A1B1 nằm trong tiêu cự của thị kính (Hình 49). Qua thị kính ta được ảnh ảo A2B2 một lần nữa được phóng đại. So sánh, ta thấy thị kính có vai trò như một kính lúp.

Về nguyên tắc có thể đặt mắt ở vị trí bất kì ở sau thị kính để quan sát ảnh A2B2, chỉ cần sao cho A2B2 nằm trong khoảng điều tiết của mắt.

Tốt nhất, mắt phải đặt gần thị kính để đón quang thông lớn, hình ảnh được rõ ràng. Để khỏi mỏi mắt, cần đưa ảnh A2B2 ra xa vô cực, đó là trường hợp ngắm chừng ở vô cực.

c. Số bội giác:

Chúng ta sẽ tính số bội giác của kính hiển vi trong trường hợp ngắm chừng ở vô cực. Trên hình 51, các h kính vật và thị kính được thay thế bằng các yếu tố chính của chúng. Hệ thị kính chính là kính mắt Huyghen (3-2-1) trước đây đã nghiên cứu.



Hình 51

Từ hình 51, ta thấy, qua kính hiển vi ta quan sát vật dưới góc u , mà :

$$\operatorname{tg} u = \frac{y'}{f'_2}$$

Vật được nhìn trực tiếp bằng mắt dưới góc u_0 với $\operatorname{tgu}_0 = G$ (hình 46)

Vậy số bội giác là :

$$\gamma = \frac{\operatorname{tgu}}{\operatorname{tgu}_0} = \frac{y' \ell_0}{y f'_2}$$

$\frac{y'}{y} = \beta_1$ là độ phóng đại dài của của vật kính, còn $\frac{\ell_0}{f_2} = \gamma_2$ là số bội giác của thị kính.

Như vậy : $\gamma = \beta_1 \cdot \gamma_2$ (10.2)

Hệ số phóng đại β_1 có thể tính được từ hai tam giác đồng dạng có đỉnh chung là F_1'

$$\frac{-y'}{y} = \frac{\Delta}{f_1'} \quad \beta_1 = -\frac{\Delta}{f_1'}$$

Với điều kiện $d \gg f_1', f_2'$, có thể xem $\Delta \approx d$. Vậy :

$$\gamma = \frac{-d \ell_0}{f_1' f_2'} \quad (10.3)$$

Với các số liệu : $d = +150 \text{ mm}$

$$f_1' = +1 \text{ mm}$$

$$f_2' = +10 \text{ mm}$$

$$\ell_0 = +250 \text{ mm}$$

Ta tính được : $\gamma = -3750$

Mang dấu âm chứng tỏ ta quan sát được ảnh ngược chiều với vật.

3. Kính thiên văn.

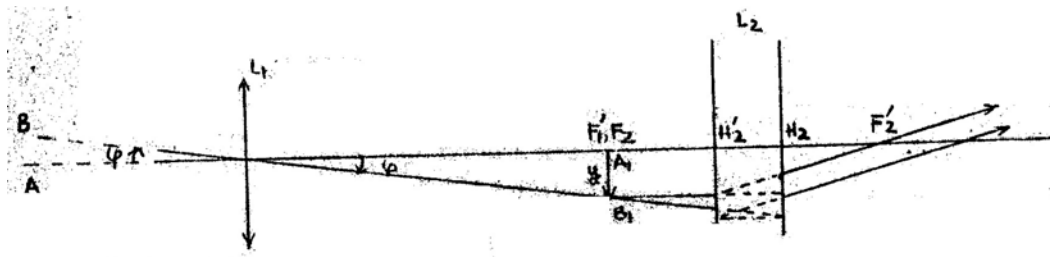
Khi quan sát các vật ở xa, ví dụ như các thiên thể, mắt nhìn vật dưới góc rất bé, nên không thể phân biệt được các chi tiết. Kính thiên văn giúp chúng ta đưa ảnh của vật về gần và làm tăng góc nhìn

a. Cấu tạo :

Ống kính thiên văn gồm có một vật kính L_1 có đường kính D lớn và tiêu cự f_1 dài. Thường kính vật được ghép từ hai thấu kính để khử quang sai.

Thị kính L_2 được ghép đồng trục với L_1 . Thường L_2 là thị kính Ramsden có cấu tạo 3-2-3. Tiêu cự, f_2' của L_2 nhỏ. Khoảng cách giữa kính vật và thị kính được điều chỉnh sao cho F_2' trùng với F_1 . Như vậy chùm tia song song qua hệ vẫn là chùm song song. Quang hệ có tính chất trên gọi là hệ vô tiêu.

b. Số bội giác :



Hình 52

Khi không dùng kính thiên văn, mắt quan sát thiên thể dưới góc $u_0 = \hat{G}$ (hình 52). Từ hình vẽ trên ta tính được :

$$\text{tg} u_0 = \text{tg} \varphi = \frac{-y}{f_1'}$$

Qua kính thiên văn, góc nhìn vật tăng đến giá trị u :

$$\operatorname{tg} u = \frac{y}{f'_2}$$

Vậy số bội giác của kính thiên văn :

$$\gamma = \frac{\operatorname{tgu}}{\operatorname{tgu}_0} = \frac{-f'_1}{f_2}$$

Số bội giác mang giá trị âm chứng tỏ qua kính thiên văn ảnh ngược chiều với vật. để có giá trị γ lớn cần có tiêu cự kính vật lớn hơn tiêu cự thị kính rất nhiều.

4. Đèn chiếu.

Ở phần trên chúng ta đã nghiên cứu một số dụng cụ dùng cho mắt. Các dụng cụ này đã phóng đại và cho ảnh ảo. Chính quang hệ của mắt đã biến ảnh ảo thành ảnh thật trên võng mô và việc quan sát chỉ tiến hành được từng người một.

Đèn chiếu cho ảnh thực có thể hứng được trên màn cho nhiều người quan sát cùng một lúc. Sau đây là sơ đồ của hai loại đèn chiếu : đèn chiếu truyền xạ (hình 53) và đèn chiếu phản xạ (hình 54)

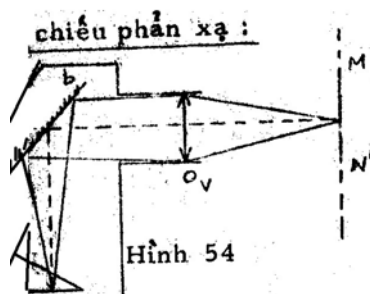
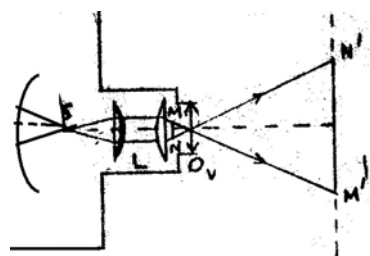
Đèn chiếu truyền xạ :

S : nguồn sáng

G : Gương phản xạ

L : Kính tụ quang dùng tập trung ánh sáng

O_v : là vật kính



Vật kính cho ảnh thực M'N' của vật MN lên màn quan sát. MN là vật trong suốt như phim ảnh hay kính ảnh

Máy phóng dùng trong việc in ảnh cũng có nguyên tắc cấu tạo như đèn chiếu truyền xạ.

Đèn chiếu phản xạ:

MN là vật không trong suốt, (ảnh hoặc là hình vẽ trên giấy) ánh sáng tán xạ từ mỗi điểm trên MN được kính vật O_v hội tụ đến điểm tương ứng trên M'N' (hình 54).

SS 11. CÁC ĐẠI LƯỢNG TRẮC QUANG.

1. Công suất bức xạ – Quang thông.

Xét một chùm ánh sáng đi qua một diện tích S. Công suất bức xạ P là năng lượng mà chùm tia sáng truyền qua diện tích S trong một đơn vị thời gian.

Công suất bức xạ P có đơn vị là Watt

Nếu dòng ánh sáng không thật đơn sắc mà gồm các bước sóng ở trong khoảng \tilde{G} và $\tilde{G} + \tilde{T}$ thì công suất bức xạ \tilde{G} ứng với khoảng bước sóng trên là :

$$dP_{\lambda} = P_{\lambda} d\lambda$$

(11.1)

Đại lượng \tilde{G} được gọi là công suất bức xạ đơn sắc, có đơn vị là watt.m⁻¹. Nếu ánh sáng gồm các bước sóng biến thiên một cách liên tục từ \tilde{G}_1 tới \tilde{G}_2 thì công suất bức xạ là :

$$P = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} dP_{\lambda} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} P_{\lambda} d\lambda \quad (11.2)$$

Công suất bức xạ không phải là đại lượng đặc trưng gây ra cảm giác sáng của mắt, vì ứng với mỗi một đơn sắc, mắt chúng ta có độ nhạy khác nhau. Độ nhạy này lớn nhất với đơn sắc có bước sóng 0,55 μ . Vì vậy người ta đưa vào một đại lượng biểu diễn khả năng gây ra cảm giác sáng đối với mắt, gọi là quang thông. đó là năng lượng gây ra cảm giác sáng đi qua diện tích S trong một đơn vị thời gian (\tilde{T}). Giữa \tilde{T} và \tilde{G} có hệ thức.

$$d\phi_{\lambda} = k_{\lambda} \cdot dP_{\lambda}$$

(11.3)

$k_{\lambda} = \frac{d\phi_{\lambda}}{dP_{\lambda}}$ được gọi là hệ số thị kiến. Hệ số này thay đổi theo bước sóng. Nếu $k_{\lambda} = 0$,

mắt thường không thấy cảm giác sáng dù là công suất bức xạ có trị số lớn bao nhiêu.

Để tiện dụng, người ta thường dùng hàm số thị kiến \tilde{G} được định nghĩa như sau:

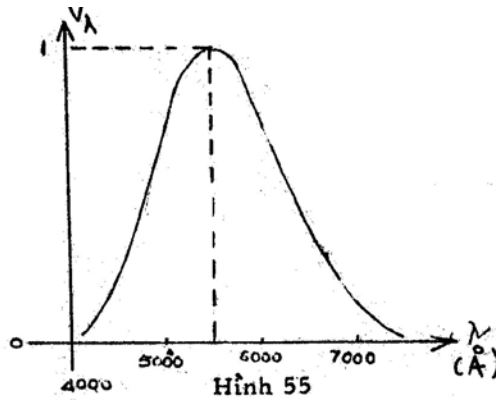
$$V_{\lambda} = \frac{k_{\lambda}}{k_M}$$

(11.4)

k_M là hệ số thị kiến cực đại với $\lambda = 0.555\mu$

$$\text{vậy : } d\phi = k_M \cdot V_{\lambda} \cdot dP_{\lambda} \quad (11.5)$$

Sự biến thiên của \tilde{G} theo bước sóng \tilde{G} có dạng như trong hình vẽ 55.



Ta thấy khi bước sóng ở ngoài khoảng 0,4 μ - 0,7 μ thì $V_\lambda = 0$. Do đó mắt không thấy được các ánh sáng ở ngoài khoảng bước sóng trên. Nếu ánh sáng tới mắt có bước sóng từ λ_1 tới λ_2 thì quang thông là :

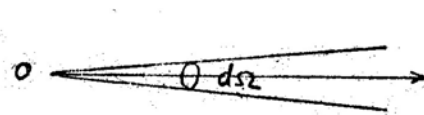
$$\phi = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} d\phi_\lambda = k_M \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V_\lambda dP_\lambda = k_M \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} V_\lambda P_\lambda d\lambda$$

Đơn vị của quang thông là lumen

Với đơn sắc có bước sóng 0,555 μ , hệ số thị kiến cực đại, có trị số là $k_M = 685$ lumen/watt

2. Cường độ sáng.

Xét trường hợp một nguồn sáng điểm đặt tại O và ta quang sát theo phương Ox. Gọi $d\phi$ là quang thông phát ra trong góc khối $d\Omega$ lân cận phương Ox (hình 56). Cường độ sáng của nguồn theo phương Ox được định nghĩa là :



$$I = \frac{d\phi}{d\Omega} \quad (11.6)$$

Hình 56

Ta thấy cường độ sáng I của nguồn tùy phương quan sát.

Trong trường hợp đặc biệt, nếu I không thay đổi theo phương (nguồn đẳng hướng), ta có quang thông phát ra trong toàn không gian là:

$$\phi = I\Omega = 4\pi I$$

Đơn vị đo cường độ sáng của nguồn là đơn vị trắc quang cơ bản. Người ta đo cường độ sáng bằng cách so sánh với mẫu đơn vị cường độ sáng đặt tại viện đo lường quốc tế. – Các đơn vị trắc quang khác được tính từ đơn vị cường độ sáng.

Đơn vị cường độ sáng được gọi là Candela (Cd) – “Candela là cường độ sáng, đo theo phương vuông góc với một mặt nhỏ có diện tích bằng 1/600 000 m², bức xạ như vật bức xạ toàn phần, ở nhiệt độ đông đặc của platin (2046,60K), dưới áp suất 101.325 N/m²”

Mẫu đo cường độ sáng gọi là “nền quốc tế”.

Đèn điện dây tóc với công suất 40 watt có cường độ sáng khoảng 68 Cd.

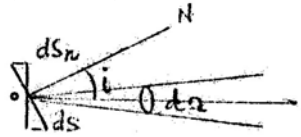
Đơn vị quang thông được tính từ đơn vị cường độ sáng theo công thức :

$$d\phi = I d\Omega$$

Vậy: 1 lumen = 1 Cd x 1sr “1 lumen là độ lớn của quang thông ứng với góc khối 1sr (Steradian) do nguồn sáng điểm có cường độ 1 Cd bức xạ đều”.

3. Độ chói.

Độ chói dùng để đặc trưng khả năng phát sáng của các nguồn sáng có diện tích. Xét diện tích phát sáng ds với pháp tuyến ON (hình 57).



Hình 57

Ta quan sát theo phương Ox . Góc $(ON, OX) = i$ là hình chiếu của ds trên mặt phẳng vuông góc với phương Ox – Quang thông $d\phi$ của ds bức xạ trong góc khối $d\Omega$ lân cận phương Ox thì tỉ lệ đồng thời với ds_n

$$d\phi \approx d\Omega ds_n$$

$$d\phi \approx B_x d\Omega ds_n \quad (11.11)$$

Hệ số tỉ lệ B_x được gọi là độ chói của mặt phát sáng theo phương Ox , nhìn chung B_x là đại lượng phụ thuộc vào phương Ox .

$$B_x = \frac{d\phi}{d\Omega \cdot ds \cdot \cos i}$$

Có thể biểu diễn độ chói theo cường độ sáng:

$$B_x = \frac{I_x}{ds \cdot \cos i} \quad (11.12)$$

Đơn vị đo độ chói là “nít”, từ công thức trên ta viết:

$$1 \text{ nit} = 1 \frac{\text{Cd}}{\text{m}^2}$$

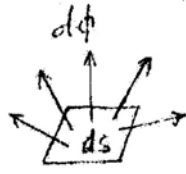
Như vậy, 1 nit là độ chói của một nguồn phẳng phát sáng đều có diện tích 1 m² và có cường độ sáng 1 Cd theo phương vuông góc với nguồn đó.

Độ chói của mặt trời mới mọc vào cỡ 5x10⁶ Cd/m². độ chói của mặt trời giữa trưa vào cỡ 1,5 – 2 x 10⁹ Cd/m²

3. Độ trung.

Cho một nguồn sáng có kích thước giới nội, thí dụ như một vật rắn nung nóng, lấy trên nguồn đó một diện tích ds (hình 58). Gọi Γ là quang thông toàn phần do diện tích đó phát ra theo mọi phương (trong phạm vi góc khối 4πsr) đại lượng sau:

$$R = \frac{d\phi}{ds} \quad (11.13)$$



Hình 58

được gọi là độ trung của mặt phát sáng.

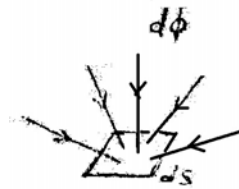
$$1 \text{ đơn vị độ trung} = \frac{1 \text{ lumen}}{1 \text{ m}^2} = \frac{\text{lumen}}{\text{m}^2}$$

đơn vị của độ trung là 1 lumen/m², là độ trung của một nguồn hình cầu có diện tích mặt ngoài 1 m² phát ra quang thông 1 lumen phân bố đều theo mọi phương.

5. Độ rọi.

Cường độ, độ chói, độ trung đặc trưng cho khả năng phát xạ của nguồn. Độ lớn của các đại lượng đó tỉ lệ với dòng quang thông phát ra từ nguồn.

Đối với những mặt được rọi sáng, độ rọi là tỉ số:



Hình 59

$$E = \frac{d\phi}{ds} \quad (11.3)$$

$d\phi$ là quang thông toàn phần đến trên diện tích vi cấp ds của vật. Đơn vị độ rọi cũng là lumen/m². Để khỏi lẫn với độ trung, người ta gọi đơn vị rọi là lux:

$$1 \text{ lux} = 1 \frac{\text{lumen}}{\text{m}^2}$$

Dụng cụ dùng để đo độ rọi là lux kế – độ rọi dưới ánh nắng mặt trời giữa trưa khoảng 100 000 lux, trong phòng thoáng ban ngày cỡ 100 lux. Độ rọi đủ để đọc sách cỡ 30 lux.

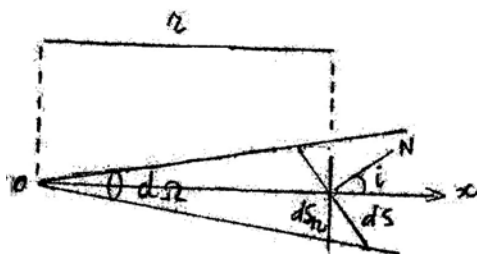
Gọi hệ số tán xạ của mặt ds là k , nghĩa là chiếu quang thông G đến, mặt ds sẽ tán xạ trở ra một quang thông bằng \bar{u} . Độ trung của mặt ds là :

$$R = \frac{k d\phi}{ds} = kE \quad (11.14)$$

Biểu thức trên biểu thị mối liên quan giữa độ trung và độ rọi của các vật không tự phát sáng

Chúng ta thử vận dụng các đại lượng trắc quang vào bài toán sau:

Tính độ rọi của mặt dS đặt cách nguồn sáng điểm có cường độ I một khoảng r . Pháp tuyến N của mặt dS làm với phương quan sát Ox góc i .



Hình 60

Các khối nhìn mặt dS từ nguồn sáng :

$$d\Omega = \frac{dS \cos i}{r^2} = \frac{dS \cos i}{r^2}$$

Quang thông đến dS :

$$d\phi = Id\Omega = \frac{IdS \cos i}{r^2}$$

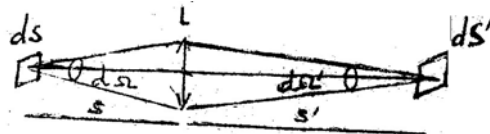
Độ rọi trên mặt dS :

$$E = \frac{d\phi}{dS} = \frac{I \cos i}{r^2}$$

5. Quang thông đi qua một quang hệ.

Chúng ta cần biết độ chói và độ rọi của ảnh mà quang hệ cho. Giả sử vật dS đặt vuông góc với quang trục của thấu kính L , và cách thấu kính một đoạn s . Diện tích dS' là ảnh của dS cho bởi thấu kính với khoảng cách đến thấu kính là s' .

Hình 61



Gọi B là độ chói của vật (theo hình 11.1) quang thông do vật truyền qua thấu kính là :

$$d\phi = BdSd\Omega \quad \text{hay} \quad B = \frac{d\phi}{d\Omega dS}$$

trong đó $d\Omega = \pi r^2 / s^2$ (r bán kính của thấu kính) là góc khối ta nhìn thấu kính từ vật. Vì khi qua thấu kính có một phần quang thông hệ bị hấp thụ nên quang thông truyền tới ảnh dS' là :

$$d\phi = md\phi = mBdSd\Omega \quad (11.15)$$

với $m < 1$

Toàn bộ quang thông $d\phi'$ truyền về ảnh. Độ chói B' của ảnh là:

$$B' = \frac{d\phi'}{d\Omega' ds'} = mB \frac{dS d\Omega}{ds' d\Omega'} \quad (11.16)$$

Trong đó Ω' là góc khối ta nhìn thấu kính từ ảnh.

Chú ý rằng :

$$\frac{d\Omega}{d\Omega'} \frac{dS}{ds'} = \frac{s'^2}{s^2} \frac{dS}{ds'} = \beta^2 \frac{1}{\beta^2} = 1$$

β là độ phóng đại dài của quang hệ : từ (11.15) và (11.16) ta có :

$$\beta' = m\beta$$

Như vậy độ chói của ảnh tỉ lệ với độ chói của vật :

Độ rọi của ảnh :

$$E' = \frac{d\phi}{dS'} = m \frac{Bd S.}{d S'} d\Omega = mB \frac{d\Omega.}{\beta^2}$$

Hay tính theo $d\Omega'$ ta có :

$$E' = mBd\Omega'$$

Độ rọi của ảnh phụ thuộc vào độ chói của vật vào góc khối $d\Omega$ hoặc $d\Omega'$ (các góc khối ta nhìn thấu kính từ vật hoặc từ ảnh).

Chương II

GIAO THOA ÁNH SÁNG

Trong phần quang hình học, chúng ta đã nghiên cứu qui luật truyền của chùm tia sáng qua các môi trường, còn bản chất của ánh sáng chưa được chú trọng tới. Tiếp theo đây, chúng ta sẽ thấy: với các điều kiện chung cho mọi sóng, trong miền chồng chất của hai chùm tia sáng có xảy ra hiện tượng giao thoa, nhiễu xạ,... Các hiện tượng này làm biểu lộ rõ bản chất sóng của ánh sáng.

SS.1. HÀM SỐ SÓNG – CÁC ĐẠI LƯỢNG ĐẶC TRƯNG CỦA SÓNG ÁNH SÁNG.

1. Hàm số sóng.

Sóng ánh sáng phát đi từ nguồn S được biểu diễn bằng hàm số tuần hoàn theo thời gian.

$$s = a \cos (\omega t + \varphi_0). \quad (1.1)$$

s là li độ, a là biên độ, ω là tần số vòng (mạch số). Đại lượng

$\varphi = \omega t + \varphi_0$ được gọi là pha của sóng, φ_0 là pha ban đầu (khi $t = 0$). Hàm (1.1) biểu diễn chấn động tại một điểm xác định trong không gian, nên chỉ có biến số thời gian t.

Tần số ν là số giao động trong một đơn vị thời gian, ta có:

$$\omega = 2 \pi \nu.$$

Thời gian T để thực hiện một giao động, gọi là chu kỳ của sóng.

$$T = \frac{1}{\nu}$$

Hàm (1.1) thường được viết dưới dạng sau:

$$s = a \cos (2 \pi \nu t + \varphi_0) = a \cos \left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi_0 \right)$$

2. Ánh sáng đơn sắc – bề mặt sóng.

Nếu tần số (hay chu kỳ) của ánh sáng chỉ nhận một giá trị xác định thì ánh sáng là đơn sắc.

Biểu thức (1.1) là hàm số sóng đơn sắc. Dưới đây là giá trị bước sóng ứng với các ánh sáng đơn sắc trong miền ánh sáng thấy được.

$\lambda(\mu)$	ánh sáng đơn sắc.
0,4 – 0,43	tím.
0,43 – 0,45	chàm.
0,45 – 0,50	lam.
0,50 – 0,57	lục.
0,57 – 0,60	vàng.
0,60 – 0,63	cam.
0,63 – 0,76	đỏ.

Gọi v là vận tốc tuyến của ánh sáng trong môi trường. Thời gian để chấn động truyền từ nguồn S tới một điểm M cách S một đoạn x là x/v . Như vậy chấn động ở M và thời điểm t chính là chấn động tại nguồn S vào thời điểm t - x/v . Vận chấn động tại M có dạng:

$$s_M = a \cos \left[\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) + \varphi_0 \right]$$

$$\text{Hay } s_M = a \cos \left(\omega t + \varphi_0 - \omega \frac{x}{v} \right) \quad (1.2)$$

(khi viết biểu thức của s_M như trên, ta đã giả thiết là biên độ của sóng không đổi khi truyền từ S tới M). Ta thấy trong pha của biểu thức (1.2) có xuất hiện số hạng $-\omega x/v$, ta bảo chấn động ở M đã chậm pha hơn chấn động ở S một trị số $\omega x/v$.

Phương trình (1.2) có thể viết lại là:

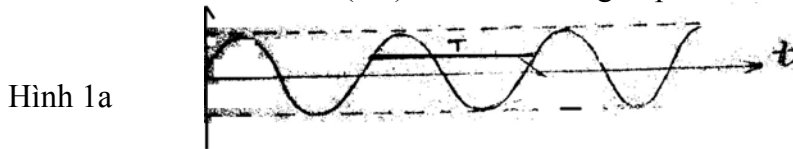
$$s_M = a \cos \left[2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{T \cdot v} \right) + \varphi_0 \right].$$

Tích số $T \cdot v$ là đoạn đường sóng truyền được trong môi trường trong một chu kỳ, được gọi là bước sóng: λ

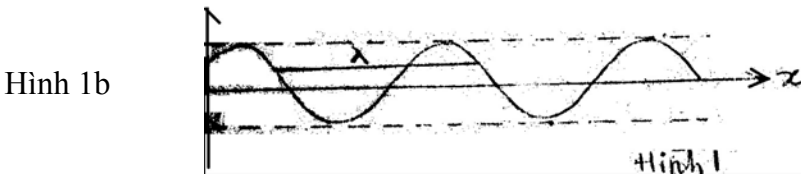
$$\lambda = v \cdot T$$

$$\text{Vậy } s_M = a \cos [2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda} \right) + \varphi_0] \quad (1.3)$$

Ta có thể khảo sát hàm số (1.3) theo hai trường hợp:



Hình 1a



Hình 1b

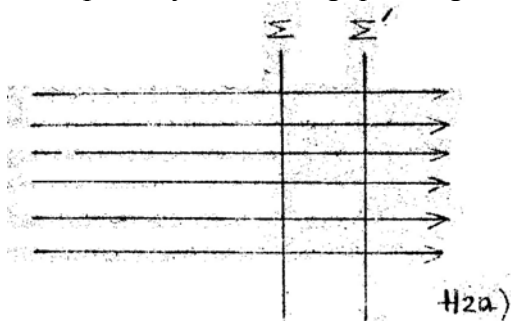
- Cố định điểm quan sát, x được coi là hằng số. Li độ s là một hàm theo thời gian t. T là chu kỳ thời gian. Sau một thời gian bằng T, li độ s nhận lại giá trị cũ (Hình 1a).

- Cố định thời điểm quan sát, t là hằng số. Biến số bây giờ là x. độ dài λ (bước sóng) là chu kỳ không gian (Hình 1b) là hình ảnh tức thời của sóng.

Khi cố định thời điểm quan sát, mỗi điểm trong không gian ứng với một giá trị pha xác định. Quĩ tích những điểm giao động cùng pha được gọi là bề mặt sóng. Giữa hai bề mặt sóng, thời gian truyền theo mọi tia sáng đều bằng nhau, cũng có nghĩa là các quang lộ giữa hai bề mặt sóng thì bằng nhau. Các tia sáng thẳng góc với bề mặt sóng tại mỗi điểm.

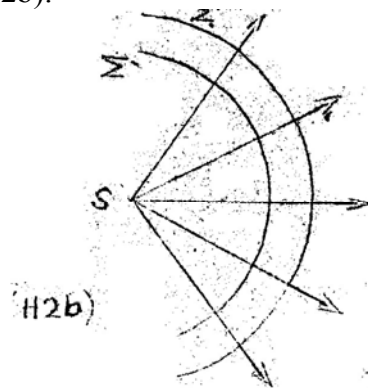
Ứng với chùm tia sáng song song, bề mặt sóng (là một mặt phẳng. Ta có một sóng phẳng (Hình 2a).

Trong một môi trường đẳng hướng, ánh sáng phát ra từ một nguồn điểm S lan đi theo những mặt cầu. Ta có sóng cầu (bề mặt sóng là một mặt cầu). Chùm tia sáng tương ứng là chùm tia phân kỳ, điểm đồng qui là nguồn điểm S (Hình 2b).



H2a)

Hình 2



H2b)

Ở một khoảng cách khá xa nguồn điểm, sóng cầu có thể gọi gần đúng là sóng phẳng.

Lưu ý: Ta nhận xét: Hàm (1.2) có dạng $SM = f(t - \vec{G})$.

Mọi hàm $f(t - \vec{G})$ với f có dạng bất kỳ đều có thể dùng để biểu diễn một quá trình sóng.

Khi viết hàm số (1.1) biểu diễn chấn động sóng đơn sắc, ta đã dùng một hàm có dạng cosin hay sin. Đây chỉ là một dạng đơn giản. Với các chấn động tuần hoàn phức tạp, ta có thể phân tích thành tổng của các chấn động đơn sắc hình cosin hay sin (theo định lý Fourier). Do đó các lý thuyết mà ta khảo sát dựa trên hàm số sóng đơn sắc hình cosin hay sin vẫn có giá trị đối với các chấn động phức tạp hơn.

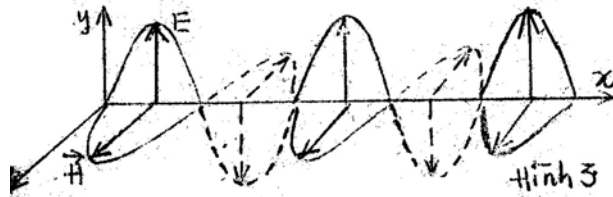
3. Ánh sáng là sóng điện từ – thang sóng điện từ.

Các hiện tượng giao thoa, nhiễu xạ, phân cực... thể hiện bản chất sóng của ánh sáng. Nhưng còn phải tiếp tục trả lời câu hỏi: Đó là sóng gì? Có phải là các giao động cơ học giống như trường hợp sóng âm hay không?

Trong quá trình tìm kiếm các hiện tượng trong tự nhiên có liên quan đến hiện tượng điện từ, vào giữa thế kỷ 19, Faraday đã phát hiện ra hiện tượng quay mặt phẳng phân cực trong từ trường (sẽ nghiên cứu trong giáo trình này). Điều này chứng tỏ ánh sáng chịu tác động của hiện tượng từ.

Tiếp theo đó (năm 1864) Maxuên phát hiện ra vận tốc ánh sáng trong chân không đúng bằng vận tốc của sóng điện từ trong chân không. Ông kết luận: Ánh sáng là sóng điện từ. Kết luận này được thực nghiệm kiểm chứng.

Sóng ánh sáng lan truyền được qua chân không, không cần môi trường vật chất mang sóng (không như trường hợp sóng cơ học).



Kết quả nghiên cứu sóng điện từ cho biết rằng các vectơ điện trường, từ trường và vận tốc truyền sóng $\vec{G}, \vec{G}, \vec{v}$ hợp thành hệ vectơ thuận (Hình 3). Nếu sóng lan truyền theo phương Ox, thì các vectơ điện giao động trong mặt yox, các vectơ từ trường giao động trong mặt zox.

\vec{E} và \vec{H} giao động cùng pha.

Thí nghiệm cho biết vectơ chấn động sáng là vectơ điện trường \vec{G} chứ không phải vectơ từ trường \vec{G} .

Vận tốc truyền sóng trong một môi trường có chiết suất n là:

$$v = \frac{c}{n}$$

c là vận tốc ánh sáng trong chân không. Người ta đo được c (300.000 km/s).

Nếu chấn động sáng tại một điểm có biên độ là a thì cường độ sáng tại điểm này được định nghĩa $I = \bar{s}$. (Ta cần phân biệt cường độ sáng ở đây với khái niệm về cường độ sáng của nguồn trong phần trắc quang).

Ánh sáng mà mắt ta nhìn thấy được chỉ chiếm một khoảng rất hẹp trên thang sóng điện từ. Hình 4 trình bày sơ lược thang sóng điện từ theo tần số và bước sóng với các nguồn phát sóng tương ứng.

SS.2. NGUYÊN LÝ CHỒNG CHẤT.

1. Nguyên lý chồng chất.

Trạng thái giao động tại mỗi điểm trong miền gặp nhau của các sóng tuân theo nguyên lý chồng chất có nội dung như sau:

- Ly độ dao động gây ra bởi một sóng độc lập với tác dụng của các sóng khác.
- Ly độ dao động tổng hợp là tổng hợp vectơ các ly độ thành phần gây ra bởi các sóng.

Nguyên lý chồng chất được nhiều thí nghiệm kiểm chứng. Chỉ đối với các chùm tia mà biên độ chấn động lớn như chùm tia laser, người ta mới nhận thấy có các tác động các chùm tia gặp nhau.

2. Cách cộng các chấn động.

Ta xét các sóng có cùng tần số và dao động cùng phương.

a- Sự tổng hợp hai sóng.

Ta có hai sóng cùng tần số, cùng phương đến một điểm M vào thời điểm t.

$$\vec{s}_1 = \vec{a}_1 \cos(\omega t + \varphi_{01})$$

$$\vec{s}_2 = \vec{a}_2 \cos(\omega t + \varphi_{02})$$

Hiệu số pha giữa hai sóng là $\Delta\varphi = \varphi_{01} - \varphi_{02}$ chấn động tổng hợp là $\Delta\varphi = \varphi_{01} - \varphi_{02}$

Vì hai chấn động có cùng phương, nên tổng vectơ được thay bằng tổng đại số.

$$s = s_1 + s_2 = a_1 \cos(\omega t + \varphi_{01}) + a_2 \cos(\omega t + \varphi_{02})$$

Bằng cách chọn lại gốc thời gian, ta có thể viết lại là:

$$s = a_1 \cos \omega t + a_2 \cos(\omega t - \Delta\varphi)$$

$$s = (a_1 + a_2 \cos \Delta\varphi) \cos \omega t + a_2 \sin \Delta\varphi \cdot \sin \omega t$$

Cường độ sáng tổng hợp :

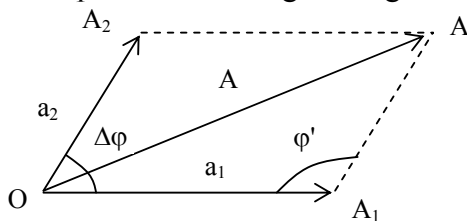
$$I = A^2 = (a_1 + a_2 \cos \Delta\varphi)^2 + (a_2 \sin \Delta\varphi)^2$$

A là biên độ sóng tổng hợp

$$\text{Vậy } \boxed{I = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos \Delta\varphi}$$

Ta có thể giải lại bài toán trên bằng cách vẽ Fresnel.

Các chấn động thành phần s_1 và s_2 được biểu diễn bởi các vectơ \vec{G} có độ dài là các biên độ a_1 và a_2 và hợp với nhau một góc bằng độ lệch pha.

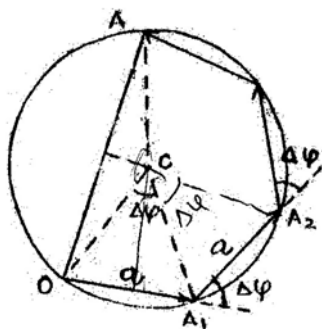


Hình 5

$$\text{Ta có: } A = a_1^2 + a_2^2 - 2a_1 a_2 \cos \varphi'$$

$$\text{Hay } I = A^2 = a_1^2 + a_2^2 + 2a_1 a_2 \cos \Delta \varphi .$$

b. Tổng hợp N sóng:



Hình 6

Ta giới hạn trong trường hợp N sóng có biên độ bằng nhau là a và độ lệch pha của hai chấn động kế tiếp nhau không đổi là $\Delta\varphi$.

Ta thực hiện phép cộng N vectơ như hình 6. Các chấn động thành phần được biểu diễn bởi các vectơ có độ dài bằng nhau là a, hai vectơ liên tiếp hợp với nhau một góc là $\Delta\varphi$.

Độ dài A của vectơ tổng biểu diễn biên độ của chấn động tổng hợp.

Xét tam giác OCL, ta có:

$$OC = \frac{a}{2 \sin \frac{\Delta\varphi}{2}}$$

Ta còn có góc $\widehat{OCA} = 2\pi - N \cdot \Delta\varphi$

$$A = 2 OC \sin \left(\frac{2\pi - N\Delta\varphi}{2} \right)$$

$$A = 2 OC \sin \frac{N\Delta\varphi}{2} = a \frac{\sin \frac{N\Delta\varphi}{2}}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}} \quad (2.2)$$

Cường độ của sóng tổng hợp:

$$I = A^2 = a^2 \sin^2 \frac{N\Delta\varphi}{2} / \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2} \quad (2.3)$$

SS. 3. NGUỒN KẾT HỢP – HIỆN TƯỢNG GIAO THOA.

1. Điều kiện của các nguồn kết hợp.

Xét trường hợp chồng chất của 2 sóng cùng tần số và cùng phương giao động. Cường độ sóng tổng hợp tính theo biểu thức (2.1)

$$I = a_1^2 + a_2^2 + 2 a_1 a_2 \cos \Delta\varphi \text{ hay}$$

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \Delta\varphi$$

Ta thấy cường độ ánh sáng tổng hợp không phải là sự cộng đơn giản các cường độ sáng thành phần I_1 và I_2 . Xét các trường hợp sau:

a. Độ lệch pha thay đổi theo thời gian và tần số lớn:

Nếu pha ban đầu của các sóng tại điểm quan sát M không có liên hệ với nhau mà thay đổi một cách ngẫu nhiên với tần số lớn thì hiệu số pha $\Delta\varphi = \varphi_{01} - \varphi_{02}$ cũng thay đổi một cách

ngẫu nhiên với tần số lớn theo thời gian. Khi đó $\cos \Delta\varphi$ nhận mọi giá trị có thể trong khoảng $[-1, +1]$ và giá trị trung bình $\cos \Delta\varphi = 0$.

Kết quả là cường độ sóng tổng hợp trung bình: $I = I_1 + I_2$, bằng tổng các cường độ sáng thành phần. Trong trường hợp này cường độ sáng trong miền chồng chất của hai sóng là như nhau tại mọi điểm, không phải trường hợp cần quan tâm.

b. Độ lệch pha không đổi theo thời gian:

Pha ban đầu của các sóng thành phần có thể thay đổi đồng bộ theo thời gian sao cho độ lệch pha $\Delta\varphi = \varphi_{01} - \varphi_{02}$ không đổi theo thời gian. Khi đó chỉ có thể thay đổi theo điểm quan sát M.

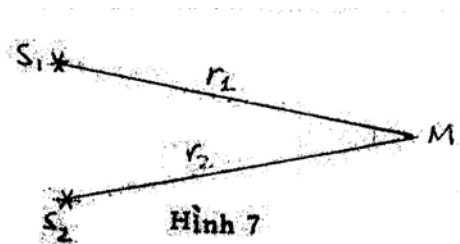
Cường độ sáng I cực đại tại các điểm M ứng với $\cos\tilde{G} = +1$, $I_M = (a_1 + a_2)^2$, và cực tiểu tại các điểm M ứng với $\cos\tilde{G} = -1$, $I_M = (a_1 - a_2)^2$.

Kết quả là trong miền chồng chập có các vân sáng và vân tối. Đó là hiện tượng giao thoa. Các vân sáng và vân tối được gọi là các vân giao thoa hay các cực đại, cực tiểu giao thoa. Các nguồn sáng có thể tạo nên hiện tượng giao thoa gọi là các nguồn kết hợp (hay điều hợp).

Điều kiện của các nguồn kết hợp là:

- Có cùng tần số.
- Có cùng phương giao động.
- Có hiệu số pha không đổi theo thời gian.

2. Điều kiện cho các cực đại và các cực tiểu giao thoa.



S_1 và S_2 là nguồn kết hợp. Chúng ta thường gặp hai nguồn kết hợp có pha ban đầu như nhau, các chấn động phát đi là:

$$s_1 = a_1 \cos(\omega t + \alpha_0) \quad (3.1)$$

$$s_2 = a_2 \cos(\omega t + \alpha_0)$$

Hai chấn động trên truyền đến điểm quan sát M, với biểu thức sóng tương ứng lần lượt là:

$$s_{1M} = a_1 \cos\left[\omega\left(t - \frac{r_1}{v}\right) + \alpha_0\right]$$

$$s_{2M} = a_2 \cos\left[\omega\left(t - \frac{r_2}{v}\right) + \alpha_0\right]$$

Nếu chiết suất của môi trường là n, thì vận tốc $v = \frac{c}{n}$

Pha ban đầu của sóng tại M:

$$\varphi_{01} = \alpha_0 - \omega \frac{r_1}{v}$$

$$\alpha_{02} = \alpha_0 - \omega \frac{r_2}{v}$$

Độ lệch pha của hai sóng:

$$\Delta\varphi = \varphi_{01} - \varphi_{02} = \omega \frac{r_1 - r_2}{v} = \frac{2\pi(r_1 - r_2)n}{T.C} = \frac{2\pi\delta}{\lambda}.$$

$\delta = (r_2 - r_1) n$ là hiệu quang lộ của hai sóng đến M.

λ là bước sóng trong chân không.

Độ lệch pha liên quan với hiệu quang lộ như sau:

$$\boxed{\Delta\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda}} \quad (3.2)$$

Hay có thể viết dưới dạng đối xứng:

$$\frac{\Delta\varphi}{2\pi} = \frac{\delta}{\lambda}. \quad (3.2)$$

a. Điều kiện cho các cực đại.

Như trên đã phân tích, các cực đại ứng với $\cos\varphi = +1$ (2.1)

Vậy hiệu số pha ứng với các cực đại là:

$$\Delta\varphi = \pm k 2 \pi \text{ với } k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.3)$$

Hay ứng với hiệu quang lộ:

$$\boxed{\delta = \pm k \lambda} \quad (3.4)$$

Như vậy tại các cực đại sáng, hai sóng cùng pha với nhau (3.3), hay hiệu quang lộ tương ứng bằng số nguyên lần bước sóng (trong chân không).

Các vân sáng ứng với giá trị $k = 1$ chẳng hạn, được gọi là các vân sáng bậc 1 và bậc -1 , vân vân.

b. Điều kiện cho các cực tiểu.

Các cực tiểu ứng với điều kiện $\cos\Delta\varphi = -1$, nghĩa là:

$$\Delta\varphi = \pm (2k + 1) \pi \text{ với } k = 0, 1, 2, \dots \quad (3.5)$$

$$\text{hay } \boxed{\delta = \pm (2k + 1) \frac{\lambda}{2}} \quad (3.6)$$

Như vậy tại các cực tiểu, hai sóng ngược pha nhau (3.5) và hiệu quang lộ tương ứng bằng số lẻ lần nửa bước sóng $\frac{\lambda}{2}$.

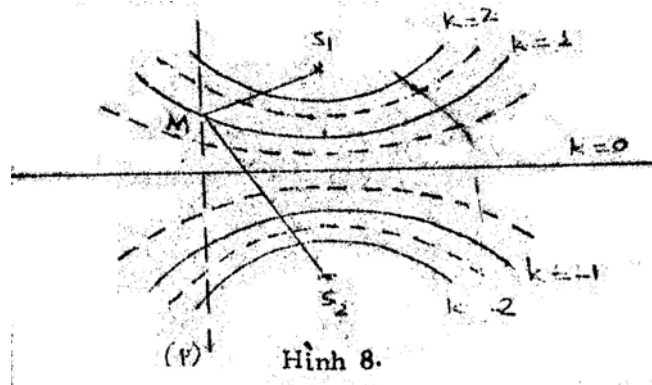
Cường độ tương ứng của các vân sáng và vân tối là;

$$I_M = (a_1 + a_2)^2 \text{ và } I_m = (a_1 - a_2)^2.$$

Từ đó ta thấy rằng để độ tương phản của hệ vân giao thoa lớn, phải có I_M lớn và $I_m \approx 0$, biên độ của hai chấn động phải gần bằng nhau.

$$a_1 \approx a_2.$$

SS.4. GIAO THOA KHÔNG ĐỊNH XỬ CỦA HAI NGUỒN SÁNG ĐIỂM.



Có hai nguồn điểm kết hợp đồng pha S_1 và S_2 . Biểu thức sóng tương ứng là các biểu thức (3.1). Vị trí các cực đại và các cực tiểu thỏa mãn điều kiện (3.4) và (3.6) đối với hiệu quang lộ.

1. Ảnh giao thoa trong không gian.

Giả sử trường giao thoa là chân không ($n = 1$), vậy hiệu quang lộ cũng là hiệu đường đi. Ta xét vị trí các cực đại.

Trong mặt phẳng hình vẽ 8, quỹ tích những điểm M có hiệu khoảng cách ($r_1 - r_2$) đến S_2 và S_1 bằng $0, \pm \lambda, \pm 2\lambda, \dots$ là hệ các đường hyperbol với hai tiêu điểm S_1 và S_2 (H.8). Vân sáng bậc 0 được gọi là vân sáng trung tâm, là dải sáng lân cận đường trung trực của đoạn S_1S_2 . Xen kẽ giữa các vân sáng là các vân tối.

Hình ảnh giao thoa trong không gian được suy ra bằng cách quay hình 8 một góc 360° quanh trục đối xứng S_1S_2 . Như vậy ta thu được các mặt hyperboloid tròn xoay sáng và tối xen kẽ nhau.

Chú ý: Chúng ta làm như trên là căn cứ từ nhận xét: Khi đặt vào không gian hai nguồn sáng S_1 và S_2 , trục S_1S_2 trở thành trục đối xứng. Quay hệ vật lý (gồm hai nguồn sáng) quanh trục đối xứng S_1S_2 một góc bất kỳ, hệ vẫn trùng với chính nó. Ta nói hệ vật lý có tính đối xứng tròn xoay quanh trục S_1S_2 . Như thế mọi tính chất vật lý của hệ đều nhận tính chất đối xứng trên.

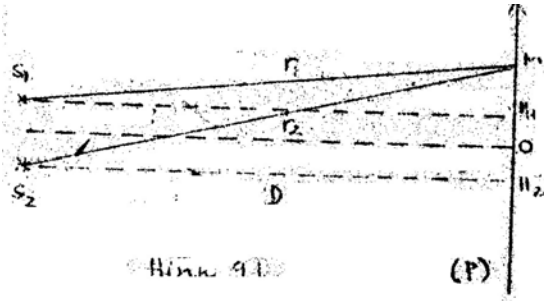
Biết được tính đối xứng của hệ, ta chỉ cần khảo sát hiện tượng trong phạm vi hẹp (theo một đường, trong một mặt...) rồi suy rộng ra cho toàn không gian.

2. Hình ảnh giao thoa trong mặt phẳng - Khoảng cách vân.

Thông thường hình ảnh giao thoa được hứng trên màn phẳng P để quan sát. Ta thấy hệ vân giao thoa không định xứ tại một vị trí đặc biệt nào, nên được gọi là giao thoa không định xứ, vì vậy có nhiều cách để đặt màn quan sát.

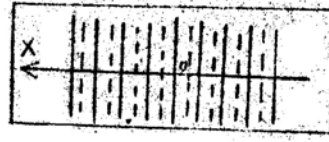
- Nếu mặt phẳng P song song với S_1S_2 ta thu được các vân hình hyper-bol (tương tự như trong mặt phẳng hình vẽ 8).

- Nếu mặt phẳng P cắt vuông góc với S_1S_2 , ta thu được các vân hình tròn. Chúng ta chỉ xét trường hợp đầu tiên, vì trường hợp này tiện lợi trong đo đạc và nghiên cứu.



Hình 9.9

(P)



Hình 10

Gọi Ox là giao tuyến giữa mặt phẳng P và mặt phẳng qua S1 và S2 đồng thời vuông góc với P (mặt phẳng hình vẽ).

Như trên đã nói, trên màn P sẽ quan sát thấy các vân hình hyperbol. Tuy nhiên nếu chỉ giới hạn một miền hẹp gần giao tuyến Ox, thì hệ vân giao thoa có dạng các đoạn thẳng song song (H.10).

Trên trục Ox, ta xét trạng thái sáng tại điểm M cách O một đoạn X. Gọi khoảng cách giữa S1 và S2 là l , khoảng cách từ các nguồn đến màn quan sát là D. Hiệu quang lộ từ các nguồn đến M là $(r_1 - r_2)$ (H.9).

Hạ các đường vuông góc S1H1 và S2H2 ta có:

$$r_2^2 = D^2 + \left(x + \frac{l}{2}\right)^2.$$

$$r_1^2 = D^2 + \left(x - \frac{l}{2}\right)^2.$$

$$r_2^2 - r_1^2 = 2\lambda x.$$

$$(r_2 - r_1)(r_2 + r_1) = 2\lambda x.$$

Khoảng cách D rất lớn so với l và x , cho nên gần đúng có thể xem:

$$(r_1 + r_2) \approx 2D.$$

Vậy hiệu quang lộ: $\delta = \frac{dx}{D}$. (4.1)

Hay suy ra: $x = \frac{\delta \cdot D}{l}$. (4.2).

Áp dụng điều kiện các cực đại và cực tiểu giao thoa, ta có tọa độ của vân sáng:

$$x_s = \pm k \frac{\lambda \cdot D}{l} \quad (4.3)$$

tọa độ của vân tối:

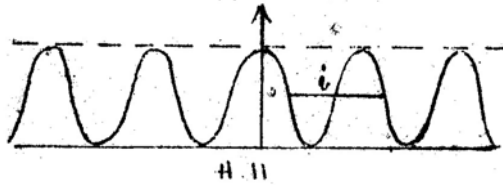
$$x_t = \pm (2k + 1) \frac{\lambda \cdot D}{2l} \quad (4.4)$$

Khoảng cách giữa 2 vân sáng liên tiếp bằng:

$$i = \frac{\lambda D}{\ell} \quad (4.5)$$

Khoảng cách giữa hai vân tối liên tiếp cũng có giá trị như trên, i được gọi là khoảng cách vân.

Như vậy trên màn quan sát hệ các vân sáng và vân tối xen kẽ nhau, cách đều nhau. Màu của các vân sáng là màu của ánh sáng đơn sắc phát đi từ các nguồn. Các vân tối đen hoàn toàn (trường hợp $a_1 = a_2$). Từ vân sáng tới vân tối cường độ sáng biến thiên liên tục theo hàm số $\cos^2 \beta x$ (ta chứng minh dễ dàng với giả thiết $a_1 = a_2$)



Chú ý: Đo được khoảng vân i rồi dùng công thức (4.5) có thể tính được bước sóng ánh sáng. Để cho khoảng vân i đủ lớn (cỡ 10^3 lần λ) thì D phải lớn. D có độ lớn cỡ m, còn ℓ có độ lớn cỡ mm.

Tần số ánh sáng rất lớn, thí nghiệm chưa đo trực tiếp được; ta phải đo bước sóng λ , rồi từ đó tính ra tần số ν của ánh sáng.

SS.5. CÁC THÍ NGHIỆM GIAO THOA KHÔNG ĐỊNH XỬ.

1. Tính không kết hợp của hai nguồn sáng thông thường.

Trong các nguồn sáng thường gặp như ngọn lửa, đèn điện, mặt trời... tâm phát sáng là các phân tử, nguyên tử, hoặc ion. Theo lý thuyết cổ điển, trong các tâm đó, bình thường điện tử ở tại các trạng thái dừng quanh hạt nhân. Khi nhân được năng lượng kích thích (nhiệt năng, điện năng...), các điện tử nhảy lên các trạng thái kích thích ứng với các mức năng lượng cao hơn. Các trạng thái kích thích không bền, điện tử lại rơi trở về các quỹ đạo bền, kèm theo việc phát ra năng lượng dưới dạng sóng điện từ.

Đó là quá trình phát sáng được mô tả vắn tắt. Quá trình đó có các đặc điểm như sau:

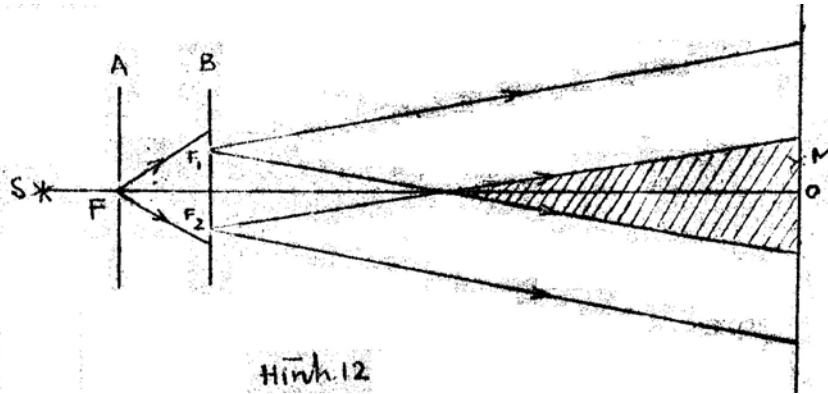
- Số tâm phát sáng rất lớn và độc lập với nhau.
- Quá trình phát sáng có tính ngẫu nhiên, các đoàn sóng phát đi từ các tâm riêng biệt, hay các đoàn sóng trước sau của cùng một tâm phát sáng cũng không có mối liên hệ gì với nhau về pha ban đầu, phương giao động và tần số, biên độ (Tuy nhiên một loại tâm phát sáng trong cùng các điều kiện chỉ có thể phát ra một bộ tần số đặc trưng nhất định).
- Các đoàn sóng trong các nguồn sáng thông thường không kéo dài vô tận trong không gian và thời gian (như các hàm số sóng đơn sắc đã mô tả). Nếu thời gian cho mỗi lần phát sáng vào cỡ 10^{-8} s thì độ dài của mỗi đoàn sóng vào cỡ mét.

Xét các đặc trưng trên chúng ta thấy các tâm phát sáng riêng biệt trong nguồn sáng không có tính kết hợp, các phần riêng biệt của một nguồn sáng cũng không kết hợp – hai nguồn sáng độc lập không thể nào có tính kết hợp. Vì vậy thông thường chúng ta chỉ quan sát thấy sự cộng đơn giản của cường độ ánh sáng ($I = I_1 + I_2$) mà không quan sát thấy hiện tượng giao thoa.

Ngày nay, từ năm 1960 người ta đã chế tạo được các nguồn sáng riêng rẽ nhưng kết hợp, đơn sắc và song song. Đó là nguồn laser (theo tiếng Anh light amplification by stimulated emission of radiation). Chúng ta sẽ nghiên cứu cơ chế phát sáng trong nguồn laser ở phần sau của giáo trình.

Trong các phòng thí nghiệm người ta tạo ra hai nguồn kết hợp bằng cách dùng dụng cụ quang học tạo ra hai nguồn thứ cấp (hay dẫn xuất) kết hợp từ một nguồn sáng ban đầu. Ta sẽ lần lượt khảo sát một số thí nghiệm như vậy.

2. Thí nghiệm khe YOUNG (IĂNG).

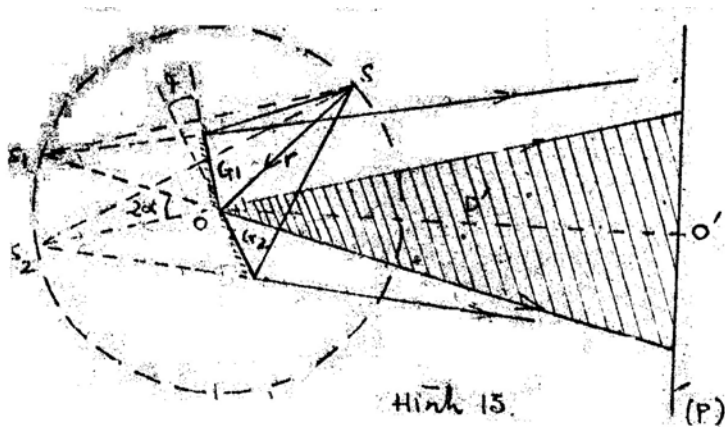


Đây là thí nghiệm đầu tiên thực hiện được sự giao thoa ánh sáng. Trước nguồn sáng, người ta đặt một màn chắn A có đục một khe hẹp F để hạn chế kích thước nguồn sáng. Ánh sáng phát ra từ F, rọi sáng hai khe hẹp, song song, F1 và F2 ở trên màn B. Giả sử F1, F2 cách đều hai khe sáng F. Theo cách bố trí trên, ta đã dùng hai khe F1, F2 để tách một đoạn sóng (phát ra từ nguồn sáng) thành hai đoàn giống hệt nhau. Như vậy F1 và F2 là hai nguồn kết hợp.

Do hiện tượng nhiễu xạ (ta khảo sát trong chương sau) các khe F1 và F2 trở thành hai nguồn sáng dẫn xuất. Trong phần chồng chất của hai chùm tia phát xuất từ F1 và F2, ta có hiện tượng giao thoa với hệ thống các vân thẳng, song song, sáng tối xen kẽ và cách đều nhau một khoảng là i theo công thức (4.5). Tại O ta có vân sáng trung tâm.

Nếu trước một trong hai nguồn F1, F2, thí dụ trước F1, ta đặt một bản mỏng có bề dày là e , chiết suất n . Quang lộ đi từ F1 tới một điểm M trong trường giao thoa trên màn ảnh tăng lên một lượng là $e(n - 1)$. Vân sáng trung tâm cũng như tất cả hệ vân sẽ dịch chuyển một đoạn xác định. Từ đoạn dịch chuyển này ta có thể suy ra bề dày e hoặc chiết suất n của bản.

3. Hai gương Fresnel (Fresnel).



Hai gương phẳng G1 và G2 hợp với nhau góc α bé. Giao tuyến của hai gương cắt mặt phẳng hình vẽ tại O (H.13). nguồn sáng điểm S đặt cách giao tuyến của hai gương một khoảng r. Mỗi một đoàn sóng xuất phát từ S đều cùng đến được hai gương. Như vậy hai chùm tia phản xạ từ hai gương thỏa mãn điều kiện kết hợp. Nhờ độ nghiêng α giữa hai gương mà 2 chùm tia phản xạ có phần chồng chất lên nhau, cho hiện tượng giao thoa.

Để nghiên cứu định lượng hiện tượng chúng ta phân tích như sau. S1 và S2 là hai ảnh ảo của S qua hai gương G1 và G2. Có thể xem các chùm tia phản xạ từ gương như xuất phát từ 2 nguồn kết hợp S1 và S2. Hai nguồn này, cùng với S, nằm trên đường tròn tâm O bán kính r. Dễ dàng chứng minh rằng góc $\angle S_1OS_2 = 2\alpha$. Như vậy khoảng cách giữa hai nguồn kết hợp:

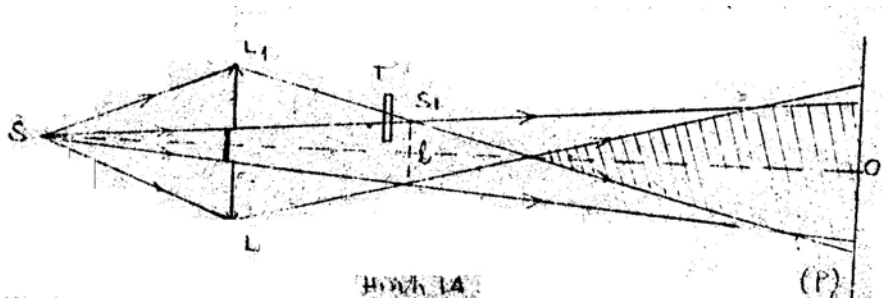
$$\lambda = 2r \alpha$$

Tương tự như trường hợp giao thoa của hai nguồn sáng điểm, màn quan sát P được đặt vuông góc với đường trung trực của đoạn S1S2. Điểm O' chính là vị trí vân sáng trung tâm. Các công thức từ (4.1) đến (4.5) đều được áp dụng đúng nếu thay $r = 2r\alpha$ và $D = D' + r$.

Để cho cường độ sáng của các vân đủ lớn, dễ quan sát, nguồn sáng S được bố trí dưới dạng khe hẹp, song song với giao tuyến của hai gương.

So với trường hợp hai khe lằng, giao thoa với hai gương Fresnel tránh được hiện tượng nhiễu xạ.

4. Hai bán thấu kính Billet.



Một thấu kính hội tụ được chia đôi theo đường kính (mặt phẳng đối xứng). Hai nửa L1 và L2 được tách rời nhau ra, cho ta hai ảnh riêng biệt S1 và S2 của cùng một nguồn sáng S (H.14). S1 và S2 là hai nguồn kết hợp. Hiện tượng giao thoa được quan sát trên màn P. Biết được khoảng cách d giữa hai nguồn kết hợp, cũng như khoảng cách D từ S1 và S2 đến màn quan sát chúng ta dễ dàng xác định kích thước của hệ vân giao thoa.

Cách bố trí này cho ta hai nguồn thật, hoàn toàn cách rời nhau. Thành thử ta có thể dễ dàng thay đổi quang lộ của một trong hai chùm tia, bằng cách đặt bản mỏng T có bề dày e và chiết suất n trước nguồn sáng S1 chẳng hạn (xem phần khe lằng).

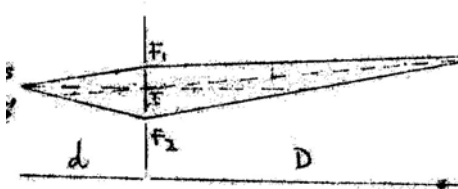
5. Gương lồi (Lloyd).



Chùm tia sáng xuất phát từ S được tách làm hai phần: Phần đến trực tiếp trên màn quan sát P, phần còn lại đến P sau khi phản xạ từ gương phẳng G (H.15). Chùm tia phản xạ như xuất phát từ ảnh ảo S'. S và S' là nguồn kết hợp S được đặt gần mặt phẳng của gương, sao cho khoảng cách $l = ss'$ là bé.

O là giao tuyến giữa đường trung trực của đoạn ss' và màn quan sát P. Ở O lẽ ra ta quan sát thấy vân sáng vì quang lộ $SO=S'O$, thì lại thấy vân tối. Để giải thích điều ấy, chúng ta thừa nhận rằng, khi phản xạ trên gương G, quang lộ thay đổi đi một nửa bước sóng. Hay nói rằng khi phản xạ trên gương, pha của chấn động đã thay đổi đi l . Hiện tượng đổi pha này xảy ra, khi ánh sáng phản xạ trên môi trường chiết quang hơn (chiết suất lớn hơn).

SS.6. KÍCH THƯỚC GIỚI HẠN CỦA NGUỒN SÁNG.



Hình 16

Trong thí nghiệm khe young, nguồn sáng điểm S được đặt cách đều hai khe F1, F2. Trên hình vẽ 16, các quang lộ SF1 và SF2 bằng nhau F1 và F2 là hai nguồn đồng bộ.

Tại O, chân đường trung trực của F1 F2 xuống màn P, ta có vân sáng trung tâm. Bây giờ giả sử S di chuyển một đoạn nhỏ y tới S'. Vân sáng trung tâm và có hệ thống vân sẽ dịch chuyển đi một đoạn $x = OO'$. Ta đi tính x.

Hiệu quang lộ tại O' bằng không. ta có:

$$S'F_1 + F_1O' = S'F_2 + F_2O'$$

Hay $S'F_1 - SF_2 = F_2O' - F_1O'$

Trước đây, ta đã tính được:

$$F_2O' - F_1O' = \frac{x\ell}{D}$$

Tương tự ta có:

$$S'F_1 - SF_2 = \frac{y\ell}{d}$$

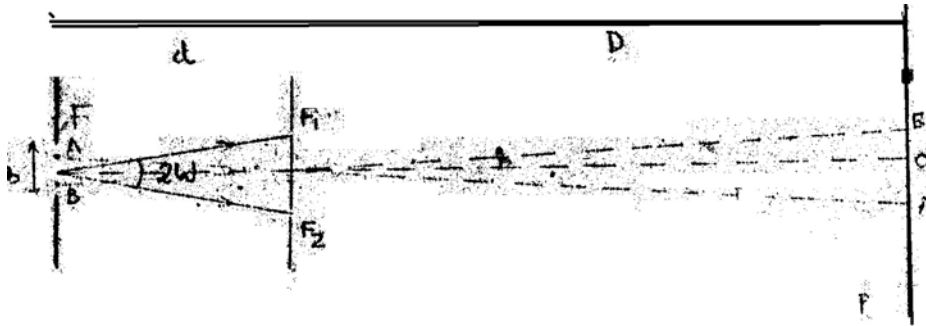
Vậy
$$\boxed{x = \frac{yD}{d}} \quad (6.1)$$

O' nằm trên đường SI, I là trung điểm của đoạn F1 F2 (hình 16)

Để có thể quan sát dễ dàng hệ vân, trong các thí nghiệm về giao thoa ánh sáng, người ta thay nguồn điểm S bằng một khe sáng F. Mỗi điểm trên khe là một nguồn sáng độc lập, cho một hệ vân riêng biệt. Muốn quan sát được rõ hiện tượng giao thoa, các hệ vân, ứng với các nguồn điểm, phải trùng nhau.

Ta nhận xét rằng trong các thí nghiệm khe Young, gương Fresnel... mặt phẳng đối xứng của hệ là mặt phẳng của hình vẽ. Vì vậy khi cho nguồn điểm S dịch chuyển theo phương thẳng góc với mặt phẳng đối xứng, hệ vân giao thoa sẽ trượt trên chính nó. Do đó, để quan sát tốt hiện tượng giao thoa, khe sáng F được đặt thẳng góc với mặt phẳng đối xứng của hệ.

Ngoài ra ta cũng có điều kiện về bề rộng của khe sáng F.



Hình 17

Gọi bề rộng của khe F là b. Điểm A là một điểm ở nửa bề rộng trên, B là một điểm ở nửa dưới có khoảng cách $AB = \frac{b}{2}$. Như vậy trên bề rộng của khe ta có vô số cặp như thế. Các điểm A và B cho các hệ vân giao thoa với vân trung tâm ở các vị trí A' và B'. hai hệ vân này lệch nhau một khoảng là:

$$A'B' = AB \frac{D}{d} = \frac{bD}{2d}$$

Nếu độ lệch A'B' này bằng nửa khoảng cách vân ($\frac{\lambda}{2}$), cực đại của hệ vân này trùng với cực tiểu của hệ vân kia, hiện tượng giao thoa sẽ biến mất.

Người ta quy ước hiện tượng còn quan sát được nếu độ lệch của mỗi cặp hệ vân như trên không vượt quá $\frac{\lambda}{4}$.

$$\frac{b_{gh} D}{2d} = \frac{\lambda}{4} = \frac{\lambda D}{4d}$$

Vậy bề rộng giới hạn của khe sáng F là:

$$b_{gh} = \frac{\lambda d}{2d}$$

Nếu 2ω là góc nhìn hai khe F1, F2 từ nguồn F, ta có:

$$\tan \omega = \frac{\frac{b}{2}}{d}$$

$$\text{Vậy } b_{gh} = \frac{\lambda}{4 \tan \omega} \approx \frac{\lambda}{4 \sin \omega}$$

Vì góc (ω) rất nhỏ.

Cách tính trên được thành lập với cách bố trí của thí nghiệm khe young. Với một thí nghiệm khác, phải dùng một cách tính riêng thích hợp.

SS. 7. GIAO THOA VỚI ÁNH SÁNG KHÔNG ĐƠN SẮC.

Trước hết, ta xét sự giao thoa với ánh sáng trắng. Đó là ánh sáng tạp gồm vô số các bước sóng biến thiên liên tục từ $0,4\mu$ tới $0,76\mu$.

Tại O, hiệu quang lộ triệt tiêu với mọi bước sóng nên ta có sự trùng nhau của các vân sáng ứng với mọi bước sóng từ $0,4\mu$ tới $0,76\mu$. Do đó ta được một vân trắng, gọi là vân trắng trung tâm.

Ra tới các cực đại kế cận, vì khoảng cách vân tỉ lệ với bước sóng, $i = \frac{\lambda D}{1}$, nên các vân sáng ứng với các bước sóng khác nhau không còn trùng nhau nữa. Ta được các vân sáng phát màu, mép trong (gần vân trung tâm) màu tím, mép ngoài màu đỏ, ở giữa là các màu trung gian biến thiên một cách liên tục, giống như màu sắc của cầu vồng.

Sự tán sắc rộng hơn khi ta xét các vân sáng xa vân trung tâm hơn.

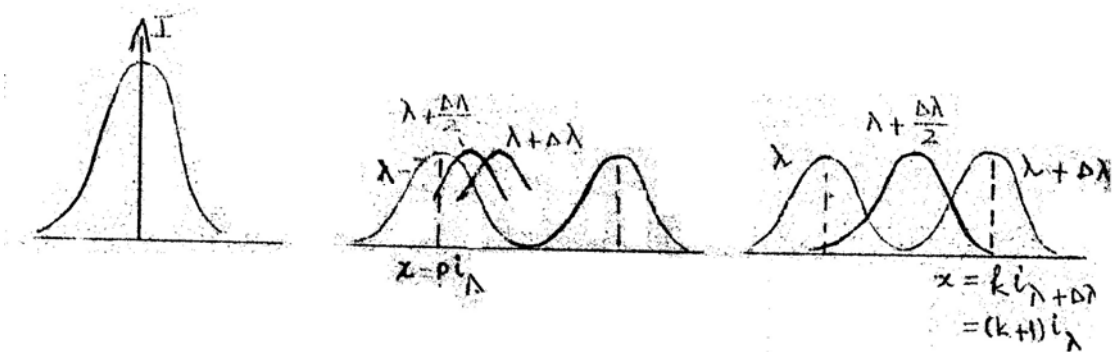
Ra tới một vị trí khá xa, tại điểm này có thể có sự chồng chất của một số vân sáng ứng với các màu khác nhau. Thí dụ xét một điểm M trên màn ảnh cách O một khoảng ứng với một hiệu quang lộ là $\Delta = 6\mu$. Trong bước sóng từ $0,4\mu$ tới $0,76\mu$ có 8 đơn sắc thỏa mãn điều kiện $G = \bar{u}$ và 7 đơn sắc thỏa mãn điều kiện

$\Delta = (2k + 1)\lambda/2$. Vậy tại M có sự tổng hợp của 8 màu ứng với 8 đơn sắc cực đại, và có sự vắng mặt của 7 đơn sắc. Sự chồng chất của 8 màu trên tạo ra tại M một màu gần như trắng (vì không chức đủ các bước sóng từ $0,4\mu$ tới $0,76\mu$), gọi là màu trắng bậc trên.

Nếu ta đặt tại M một khe vào của máy quang phổ cho khe song song với các vân, thì qua máy quang phổ, ánh sáng bậc trắng trên ấy bị phân tán thành quang phổ: 8 vân sáng tách rời nhau xen kẽ là 7 vân tối. Hệ vân sáng tối xen kẽ ấy gọi là quang phổ vạch.

Quan sát hiện tượng giao thoa trong ánh sáng trắng, giúp ta dễ dàng xác định vân sáng trung tâm.

Tiếp theo, chúng ta hãy xét trường hợp giao thoa với ánh sáng không hoàn toàn đơn sắc. Giả sử bước sóng ánh sáng nhận mọi giá trị từ λ đến $\lambda + d\lambda$.



Hình 18

Tuy nhiên, chúng ta có thể biểu diễn bằng sơ đồ (H.18) chỉ 3 hệ vân ứng với các bước sóng $\lambda, \lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}$ và $\lambda + \Delta\lambda$, rồi suy ra hình ảnh chồng chất của các bước sóng.

Tại vị trí vân sáng trung tâm các cực đại bằng nhau, nên quan sát thấy một vân sáng không bị mở rộng. Đến vân sáng thứ p, vì khoảng cách vân phụ thuộc vào bước sóng, nên các cực đại không còn trùng nhau.

Tọa độ của các cực đại sáng ứng với bước sóng.

$$x_{\lambda} = p i_{\lambda} = p \frac{\lambda D}{l}$$

$$X_{\lambda+\Delta\lambda} = p i_{\lambda+\Delta\lambda} = p \frac{(\lambda + \Delta\lambda)D}{l} . \text{ Như vậy vân sáng thứ } p \text{ bị mở rộng, bị nhòe.}$$

Khi p chưa lớn lắm $p(\lambda + \Delta\lambda) D/l < (p + 1)\lambda\Delta$ (H18), vân sáng bị nhòe, nhưng giữa vân thứ p và $(p + 1)$ vẫn còn một khoảng tối để phân biệt hai vân. Tiếp tục đi theo chiều tăng của bậc giao thoa p , đến cực đại bậc k nào đó, vị trí cực đại bậc k của bước sóng $(\lambda + \Delta\lambda)$ sẽ trùng với cực đại bậc $(k + 1)$ của bước sóng λ :

$$x = ki_{\lambda} = (k+1)i_{\lambda+\Delta\lambda} \quad (7.1)$$

Kết quả tại miền vân sáng bậc k , vân sáng bị mở rộng đều trên cả khoảng cách vân. Trên màn sẽ quan sát thấy cường độ sáng đều. Càng tiếp tục đi xa, vân càng bị mở rộng, sự chồng chất càng nhiều về hình ảnh vân sáng đều.

Vậy muốn vẫn trông thấy vân, ta phải có điều kiện:

$$p i_{\lambda+\Delta\lambda} < (p + 1) i_{\lambda}$$

Và vân bắt đầu biến mất khi:

$$ki_{\lambda+\Delta\lambda} = (k + 1) i_{\lambda} .$$

Chú ý đến (7.1) ta có:

$$\boxed{k = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}} \quad (7.2)$$

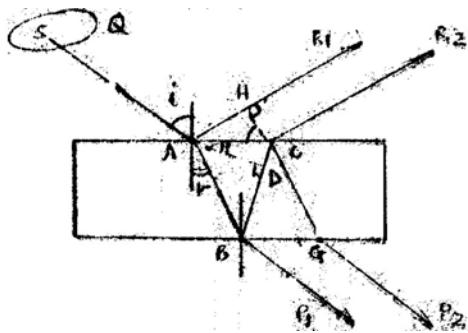
Vậy: Nếu trong chùm sáng có đủ mọi bức xạ cùng cường độ với các bước sóng nằm trong khoảng $\lambda, \lambda + \Delta\lambda$, thì ta chỉ quan sát được nhiều nhất là k vân. Với k tính theo (7.2). Số k được gọi là bậc giao thoa cực đại của bức xạ, đặc trưng cho độ đơn sắc của bức xạ.

Bức xạ màu lục của đèn thủy ngân $\lambda = 0,5461 \mu\text{m}$ chẳng hạn có thể cho bậc giao k thoa đến vài vạn.

Bức xạ lấy từ một lọc sắc thông thường chỉ cho $k =$ vài chục. Bậc giao thoa một vài triệu có thể thu được với máy phát lượng tử (Laser).

SS. 8. GIAO THOA DO BẢN MỎNG – VÂN ĐỈNH XỨ.

1. Bản mỏng hai mặt song song – vân cùng độ nghiêng.



Hình 19

Ta xét một bản mỏng trong suốt, bề dày e , chiết suất n . Nguồn sáng Q là một nguồn sáng rộng.

a. Các cặp tia kết hợp:

Nguồn sáng rộng Q gồm vô số nguồn sáng điểm độc lập. Từ nguồn điểm S , xét tia SA tới bản dưới góc tới i . Một phần ánh sáng phản xạ theo tia $AR1$; một phần khúc xạ đi vào bản, phản xạ ở mặt dưới tại B và ló ra theo tia $CR2$. Ta có $CR2 \parallel AR1$. Hai tia này có tính kết hợp vì được tách ra từ cùng một tia SA . Chúng gặp nhau ở vô cực và giao thoa với nhau.

b. Tín hiệu quang lộ:

Hiệu quang lộ khi chưa xét tới sự đổi pha do phản xạ:

$$\begin{aligned}\Delta &= (ABC) - (AH) = (ABC) - (DG) = (ABD) \\ &= n \cdot AB \cdot [1 - \sin(90^\circ - 2r)] \\ &= n \frac{e}{\cos r} (1 - \cos 2r) \\ &= 2ne \cos r\end{aligned}$$

Nhưng ta để ý rằng: sự phản xạ tại A giữa môi trường 1 kém chiết quang và môi trường 2 chiết quang hơn làm chẵn động đổi dấu, nghĩa là pha thay đổi đi π tương đương với một sự thay đổi quang lộ là $\frac{\lambda}{2}$. Vậy hiệu quang lộ cuối cùng là:

$$\Delta = 2ne \cos r + \frac{\lambda}{2} \quad (8.2)$$

hay viết theo góc i :

$$\Delta = 2e \sqrt{n^2 - \sin^2 i} \quad (8.3)$$

Hiệu quang lộ (chỉ phụ thuộc vào góc i mà không phụ thuộc vào vị trí của nguồn điểm S . Như vậy chùm tia song song xuất phát từ các điểm khác nhau của nguồn sáng Q cho cùng một trạng thái giao thoa và nhờ vậy cường độ của vân sáng khá lớn, có thể quan sát bằng mắt thường.

Trạng thái giao thoa phụ thuộc vào độ nghiêng của chùm tia sáng song song nên gọi là vân giao thoa cùng độ nghiêng. Các tia giao thoa ở vô cực nên gọi là định xứ ở vô cực. Muốn quan sát vân, người ta hứng chùm tia phản xạ một thấu kính hội tụ, và đặt màn hứng ảnh ở vị trí mặt phẳng tiêu của thấu kính.

Chú ý các tia khúc xạ qua bản mỏng: $BP1$ và $GP2$. Đây cũng là hai tia kết hợp, chúng cũng giao thoa với nhau ở vô cực.

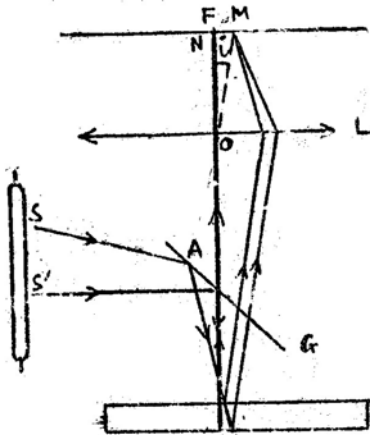
Hiệu quang lộ giữa hai tia trong trường hợp này là:

$$\Delta = 2ne \cos r = 2e \sqrt{n^2 - \sin^2 i}.$$

Sai biệt với trường hợp trên một trị số $\frac{\lambda}{2}$.

Do đó, với phương i nếu ta thấy một vân sáng trong trường hợp quan sát theo chùm tia phản xạ, thì với cùng phương đó ta thấy một vân tối trong trường hợp quan sát theo chùm tia khúc xạ. Ta nói: Hai hệ thống vân quan sát thấy trong hai trường hợp là phụ nhau.

c. Cách bố trí để quan sát vân và hình dáng hệ vân:



Thông thường hiện tượng chỉ quan sát được ở vùng lân cận với pháp tuyến của mặt bản. Thí nghiệm được bố trí theo hình 20. Thấu kính hội tụ L được đặt sao cho quang trục OF vuông góc với bản mỏng e. Kính G đặt chệch 45° với quang trục. Trên hình vẽ cho thấy đường truyền của tia SA. Tia này sau khi phản xạ từ G, đến bản mỏng e, và cho cặp tia phản xạ làm với pháp tuyến của bản góc i. Cặp tia này truyền qua kính G và được L hội tụ trên mặt phẳng tiêu tại M. Ta chỉ mới xét hiện tượng trong mặt phẳng hình vẽ. Vì hiện tượng mang tính đối xứng tròn xoay quanh quang trục ON, bên trong không gian, các chùm tia có cùng độ nghiêng sẽ hội tụ trên vòng tròn tâm F, bán kính FM. Bán kính góc của vòng tròn, nhìn từ quang tâm O, chính bằng i.

Ta hãy tính bán kính các vân liên tiếp. Giả sử ở chính tâm điểm F có một vân sáng, gọi là vân sáng số 0. Các vân tiếp theo, tính từ trong ra, lần lượt gọi là vân thứ 1, 2, 3...

Hiệu quang lộ xác định trạng thái giao thoa ở tâm hệ vân (ứng với $i = 0, r = 0$) là:

$$\Delta_0 = 2ne + \frac{\lambda}{2}$$

Ở đó có vân sáng, vậy:

$$\Delta_0 = 2ne + \frac{\lambda}{2} = p\lambda \quad (8.4)$$

p là một số nguyên. Nhớ rằng, vân sáng ở tâm có bậc giao thoa là p, đó là bậc cao nhất, gọi là vân sáng số 0 để tiện cho việc đánh số các bán kính. Vân sáng thứ k ứng với góc khúc xạ r_k với góc tới i_k và với hiệu quang lộ (k nhỏ hơn hiệu quang lộ (0 một trị số kG, ta có:

$$\Delta_k = 2ne \cos r_k + \frac{\lambda}{2} = \Delta_0 - k\lambda = 2ne + \frac{\lambda}{2} - k\lambda$$

$$2ne(1 - \cos r_k) = k\lambda$$

Với các góc i và r bé, có thể lấy gần đúng:

$$\sin r \approx r$$

$$r \approx \frac{i}{n}$$

Do đó: $4n^2G = \bar{u}$

$$i_k = \sqrt{\frac{\lambda n}{e}} \sqrt{k}$$

Nếu f là tiêu cự của thấu kính L, thì bán kính vân sáng thứ k là:

$$\rho_k = f \cdot i_k = f \sqrt{\frac{\lambda n}{e}} \sqrt{k} \quad (8.5)$$

Bán kính các vân tăng tỉ lệ với các số nguyên liên tiếp. Do đó càng xa tâm, vân càng khít lại với nhau. Nếu cố định f và k , bán kính vân thứ k tỉ lệ nghịch với \sqrt{e} . Nghĩa là, nếu so sánh bán kính hai vân tròn thứ k ứng với hai bản khác nhau thì bản càng mỏng, bán kính vân càng lớn.

Bản mỏng có thể là một lớp không khí hai mặt song song, giới hạn ở giữa hai bản thủy tinh mặt song song. Ta gọi là bản không khí.

Với một bản không khí như vậy, ta có thể thay đổi bề dày của bản một cách liên tục. Chúng ta hãy xét các biến đổi tương ứng của hệ vân giao thoa.

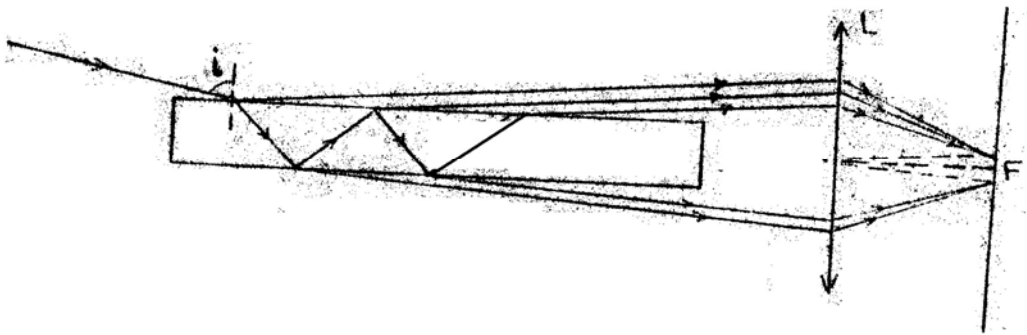
Giả sử tăng e từ từ. Theo công thức (8.4), bậc giao thoa tại tâm (cũng như tại mọi điểm khác) tăng lên. Xét một vân bất kỳ có hiệu quang lộ là:

$$\Delta = 2ne \cos r + \frac{\lambda}{2} = p\lambda$$

p là bậc giao thoa tại vân quan sát. Ta quan sát một trạng thái giao thoa nhất định thì p không đổi. Vậy khi e tăng thì $\cos r$ phải giảm, nghĩa là r tăng hay góc i tăng, do đó bán kính của vân này tăng lên. Hậu quả là tại tâm xuất hiện các vân mới, hệ vân mở rộng ra, chạy ra xa tâm.

Lý luận tương tự khi giảm bề dày e , các vân thu nhỏ lại, chạy vào tâm và biến mất.

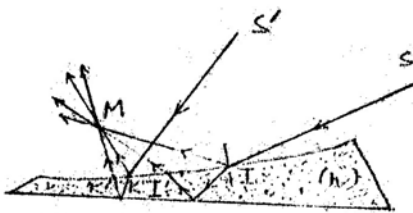
Ta cũng có thể quan sát vân giao thoa với góc tới $\approx 90^\circ$ (Hình 21). Vân giao thoa là những đường thẳng song song với các mặt của bản. Bên trong bản, ánh sáng phản xạ dưới các góc gần bằng góc giới hạn nên cường độ tia phản xạ khá lớn, do đó một tia sáng có thể phản xạ nhiều lần. Như vậy ta có sự giao thoa của nhiều tia. Với cách bố trí ở hình 21, các vân hiện lên ở mặt phẳng tiêu của thấu kính L . Bản mỏng bố trí như vậy được gọi là bản Lumme-Gercker.



Hình 21

2. Bản mỏng có bề dày thay đổi vân cùng độ dày.

a. Phân tích hiện tượng:



Hình 22

Ta xét một bản mỏng trong suốt, chiết suất n , có bề dày e thay đổi. Tia tới SI sẽ cho hai tia kết hợp phản xạ ở mặt trên và mặt dưới của bản. Hai tia này giao thoa tại M. Vì bản mỏng, hai điểm I và I' rất gần nhau.

Trong khoảng nhỏ này, bản mỏng có thể xem như có hai mặt song song. Hiệu quang lộ giữa hai tia khi tới M là:

$$\Delta = 2ne \cos r + \frac{\lambda}{2} \quad (8.6)$$

e là bề dày trung bình trong khoảng n .

Tuy nhiên, ngoài tia SI, còn rất nhiều tia SK khác cũng có thể cho hai tia phản xạ giao thoa tại M, hiệu quang lộ tương ứng là:

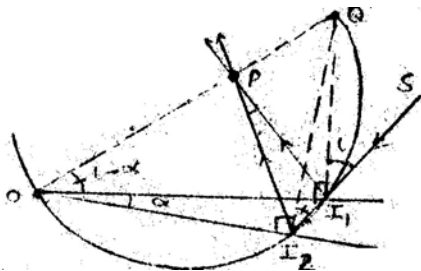
$$\Delta' = 2ne' \cos r' + \frac{\lambda}{2}$$

Khi điểm M ở xa bản mỏng, các điểm I, K cách xa nhau, các hiệu quang lộ tương ứng khác nhau rõ rệt. Như vậy tại điểm M có sự chồng chất của nhiều trạng thái giao thoa (ứng với nhiều hiệu quang lộ khác nhau), do đó ta không thể thấy vân.

Bây giờ nếu M ở gần bản thì các điểm I, K rất gần nhau. Ứng với điểm M chỉ có một trạng thái giao thoa ứng với một trị số của hiệu quang lộ tùy thuộc bề dày e tại nơi quan sát của bản (ta quan sát theo một phương nhất định nên trong công thức 8.6, gọi r được coi là hằng số). Vì vậy ta thấy được vân giao thoa. Các vân này được gọi là vân cùng độ dày, hiện lên ở bản. Đây cũng là một trường hợp vân định xứ.

b. Vân giao thoa trên nêm:

Nêm là một bản mỏng của một môi trường trong suốt, được giới hạn bởi hai mặt phẳng hợp với nhau một góc α nhỏ, giao tuyến của hai mặt phẳng được gọi là cạnh của nêm. Nếu môi trường trên là không khí, chiết suất $n \approx 1$, ta có một nêm không khí, hay còn gọi là khí lãng.



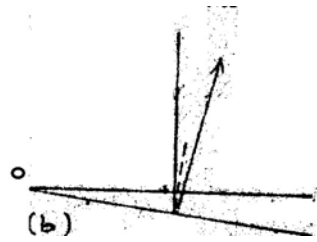
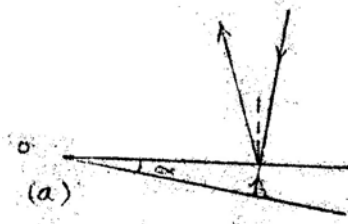
Hình 24

Người ta thường dùng chùm tia sáng song song chiếu đến mặt nêm. Để đơn giản ta xét nêm không khí ($n = 1$) được giới hạn bởi hai bản thủy tinh.

Tia S tới dưới góc i đối với mặt trên của nêm và dưới góc $(i-)$ đối với mặt dưới (h.24). Hai pháp tuyến tại I1 và I2 cắt nhau tại Q và tạo với nhau góc $($. Như vậy 4 điểm Q, I1, I2 và O cùng nằm trên đường tròn đường kính OQ (góc OI1Q = 90°, góc OI2Q = 90°). Hai tia phản xạ từ hai mặt của nêm không khí gặp nhau và giao thoa tại P. Điểm P nằm trên đường kính OQ.

Mặt phẳng OQ chính là mặt định xứ của vân giao thoa.

Vì các góc i và $($ đều bé nên xem như là vân giao thoa định xứ trên mặt nêm.



Trường hợp chiếu chùm tia tới song song vuông góc với mặt dưới của nệm (H.25 a) góc tới $i = \alpha$, và mặt đỉnh xù trùng với mặt trên của nệm góc tới $i = 0$, thì mặt đỉnh xù của vân chính là mặt dưới của nệm (H.25 b).

Cũng lý luận như trường hợp công thức (8.6), ta có hiệu quang lộ ứng với bề dày e của nệm:

$$\Delta = 2 ne \cos r + \frac{\lambda}{2}$$

Đối với trường hợp chiếu gần vuông góc với mặt nệm, ta có:

$$\Delta = 2 ne + \frac{\lambda}{2}$$

Cùng một bề dày e sẽ có cùng trạng thái giao thoa. Như vậy hệ vân giao thoa sẽ song song với cạnh nệm. Chúng ta sẽ tính khoảng cách của hai vân sáng liên tiếp. Nếu tại bề dày e , quan sát thấy vân sáng thứ k , ta có:

$$2ne_k + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

$$2ne_k = k - \frac{\lambda}{2}$$

Gọi x_k là khoảng cách từ vân sáng thứ k đến cạnh nệm:

$$e_k \approx \alpha x_k.$$

$$2n \alpha x_k = k - \frac{\lambda}{2}$$

Tương tự khoảng cách x_{k+1} từ vân sáng thứ $k + 1$ đến cạnh nệm:

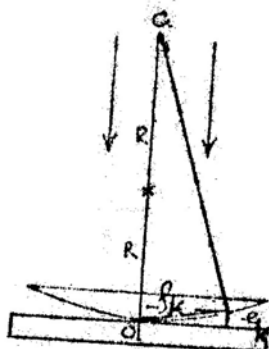
$$2n \alpha x_{k+1} = (k + 1) - \frac{\lambda}{2}$$

Khoảng cách giữa hai vân sáng liên tiếp: $i = x_{k+1} - x_k = \frac{\lambda}{2n\alpha}$.

Chú ý: đối với nệm không khí chỉ cần thay $n = 1$.

Như vậy, các vân giao thoa cách đều nhau. Ở tại cạnh nệm có một vân tối (công thức 8.7).

c. Vân tròn Niu ton:



Hình 26

Để quan sát vân đồng độ dày, có thể bố trí dụng cụ Niuton như sau: Một thấu kính phẳng lồi với mặt cong có bán kính chính khúc R được đặt tiếp xúc trên tấm kính phẳng (H. 26). Giữa thấu kính và tấm kính có lớp không khí mỏng với bề dày thay đổi. Tương tự như trong trường hợp nêm chiếu chùm tia sáng tới vuông góc trên lớp không khí mỏng, chúng ta quan sát thấy vân giao thoa đồng độ dày. Hệ thí nghiệm được bố trí đối xứng tròn xoay quanh trục CO và lớp không khí mỏng cùng độ dày có dạng vòng tròn tâm O . Vậy hệ vân là các vân tròn cùng tâm O .

Theo công thức (8.7), ta có hiệu quang lộ quan sát phản xạ là:

$$\Delta = 2e + \frac{\lambda}{2}$$

e là bề dày của lớp không khí tại nơi quan sát.

Ở tâm của hệ vân giao thoa lân cận điểm tiếp xúc O , có một vân tối. Ta hãy xác định bán kính vân tối thứ k .

Bán kính (k liên hệ với bề dày e_k tương ứng theo công thức:

$$\delta_1^2 = (2R - e_k) e_k$$

Vì e_k bé, có thể bỏ qua δ_1^2 . Vậy

$$\rho_k = \sqrt{2Re_k} \quad (8.9)$$

Nếu tại bề dày e_k có vân tối thứ k thì e_k phải thỏa mãn điều kiện:

$$\Delta = 2e_k + \frac{\lambda}{2} = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$e_k = k \frac{\lambda}{2}$$

Ta tính được bán kính vân tối thứ k :

$$\rho_k = \sqrt{2Re_k} = \sqrt{R\lambda} \sqrt{k} \quad (8.10)$$

Bán kính các vân tối tăng tỉ lệ với căn bậc hai của các số nguyên liên tiếp, nghĩa là vân sắp xếp như trong trường hợp bản song song.

Có thể quan sát hiện tượng giao thoa với ánh sáng truyền xạ. Như trước đây đã phân tích, hai hệ vân giao thoa trong ánh sáng truyền xạ và phản xạ có tính chất phụ nhau.

Bây giờ nếu ta tịnh tiến tấm thủy tinh ra xa mặt cong, bề dày của lớp không khí sẽ tăng lên. Bề dày e_k ứng với vân thứ k sẽ dịch chuyển dần về tâm, như vậy các vân giao thoa khi đó sẽ chạy tuần tự về tâm và biến mất ở đây (ngược với trường hợp bản mỏng hai mặt song song).

Cũng như mọi hiện tượng giao thoa, trong trường hợp giao thoa trên bản mỏng, kích thước của hệ vân giao thoa phụ thuộc vào bước sóng λ . Như vậy dùng ánh sáng đơn sắc hiện tượng được quan sát dễ dàng hơn.

Trong trường hợp dùng ánh sáng trắng từ các công thức (8.5), (8.8) và (8.10) cũng có thể suy luận về hình ảnh giao thoa thu được.

3. Giao thoa của nhiều chùm tia – giao thoa kế Perot Fabry:

a. Nguyên tắc:

Trước đây trong khi nghiên cứu bản hai mặt song song, ta chỉ xét sự giao thoa của tia ló đầu tiên với tia phản xạ. Các tia ló tiếp theo có cường độ rất bé vì hệ số phản xạ trên mặt bản rất nhỏ.

Bây giờ, nếu trên tấm thủy tinh ta tráng một lớp bạc mỏng (dày vài phần trăm micrômét), thì ta được một mặt có hệ số phản xạ khá lớn mà ánh sáng vẫn truyền qua được một phần. Bản như thế gọi là bản bán xạ. Ta đặt đối diện hai bản bán xạ như vậy, thì lớp không khí ở giữa hai bản làm thành một bản hai mặt song song (H.27). Nhờ hệ số của hai mặt bản mạ lớn, nên cường độ của các tia ló $R_1, R_2, R_3, R_4, \dots$ giảm từ từ, không thể chỉ kể

đến hai chùm tia đầu. Chúng ta có sự giao thoa của nhiều chùm tia, với các vân giao thoa định xứ ở vô cực.

Trên hình 27, L là vật kính của ống kính nhòm. Nếu đặt sao cho quang trục của L vuông góc với bản hai mặt song song. Trên mặt phẳng tiêu của vật kính sẽ hiện lên hệ vân tròn có cùng tâm F. Dùng nguồn sáng rộng, hệ vân hoàn toàn giống với trường hợp bản hai mặt song song.

b. Sự phân bố cường độ trên các vân:

Gọi cường độ của SI là I_0 , hệ số truyền xạ qua bản bán mạ là t , hệ số phản xạ là r , ta có:

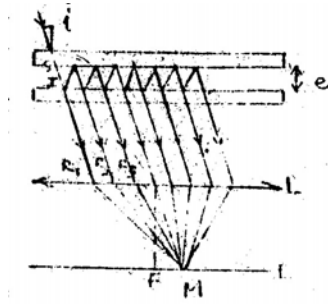
Cường độ của tia ló R1: $I_0 t$, ứng với biên độ $a = \sqrt{I_0 t}$

Cường độ của tia ló R2: $I_0 t r^2$, ứng với biên độ ar

Cường độ của tia ló R3: $I_0 t r^4$, ứng với biên độ ar^2

Lấy pha của tia R1 làm gốc, các tia liên tiếp lệch pha nhau là:

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \frac{2\pi}{\lambda} 2e \cos i \quad (8.11)$$



Hình 27.

Hàm số sóng ứng với tia R1: $a \cos \omega t$.

Hàm số sóng ứng với tia R2: $ar \cos (\omega t - \varphi)$.

Hàm số sóng ứng với tia R3: $ar^2 \cos (\omega t - 2\varphi)$.

Hàm số sóng ứng với tia R_{n+1} : $ar^n \cos (\omega t - n\varphi)$.

Biên độ chấn động tổng hợp tại M:

$$Y = a \cos \omega t + ar \cos (\omega t - \varphi) + \dots + ar^n \cos (\omega t - n\varphi).$$

Y là phần thực của tổng số:

$$X = ae^{i\omega t} + ar e^{i(\omega t - \varphi)} + ar^2 e^{i(\omega t - 2\varphi)} + \dots + ar^n e^{i(\omega t - n\varphi)}$$

$$X = ae^{i\omega t} (1 + re^{-i\varphi} + r^2 e^{-2i\varphi} + \dots + r^n e^{-in\varphi}).$$

Số hạng trong ngoặc là tổng số của cấp số nhân với công bội $re^{-i\varphi}$, khi $n \rightarrow \infty$, ta có:

$$X = \frac{a}{1 - re^{-i\varphi}} e^{i\omega t} = (\alpha + i\beta) x (\cos \omega t + i \sin \omega t)$$

$$Y = \text{Re}X = \alpha \cos \omega t - \beta \sin \omega t$$

Vậy cường độ tại M:

$$I_{(M)} = \alpha^2 + \beta^2 = A^2$$

$$I = A^2 = \left| \frac{a}{1 - re^{-i\varphi}} \right|^2 = \frac{a^2}{(1 - re^{-i\varphi})(1 - re^{i\varphi})} = \frac{a^2}{1 - 2r \cos \varphi + r^2} \quad (8.12)$$

* Cường độ cực đại khi $\cos \varphi = 1$, $\varphi = 2k\pi$

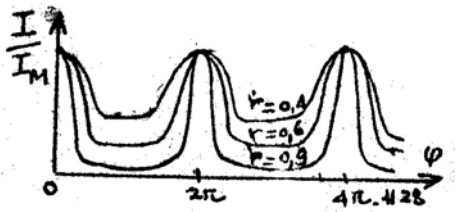
$$I_{\text{Max}} = \frac{a^2}{(1 - r)^2}$$

* Cường độ cực tiểu khi $\cos \varphi = -1$, $\varphi = (2k + 1)\pi$ $I_{\text{min}} = \frac{a^2}{(1 + r)^2}$

Hệ số tương phản:

$$\gamma = \frac{I_{\text{Max}} - I_{\text{min}}}{I_{\text{Max}} + I_{\text{min}}} = \frac{2r}{1+r^2}$$

Hệ số tương phản sẽ lớn nhất, gần bằng 1, khi hệ số phản xạ $r \approx 1$. Đường cong phân bố cường độ của các vân ứng với một vài trị số của r được vẽ trên hình 28.



Hình 28

So sánh các đường phân bố cường độ cho thấy, khi hệ số phản xạ tăng các vân sáng hẹp lại. Với $r = 0,9$, nửa độ rộng của vân giao thoa chỉ xấp xỉ bằng 1/30 khoảng cách giữa hai vân liên tiếp. Do đó, trong các phép đo, có thể xác định vị trí của các vân sáng tới mức chính xác đến 1/100 vân.

Lưu ý:

Ta có thể viết lại các công thức (8.12) như sau:

$$I = \frac{\frac{a^2}{(1-r)^2}}{1 - 2r \cos \varphi + r^2} = \frac{I_{\text{MAX}}}{\frac{(1-2r+r^2) + 2r(1-\cos \varphi)}{(1-r)^2}}$$

$$I = \bar{G}. \quad \text{Đặt } m = \bar{G}$$

$$I = \frac{I_{\text{MAX}}}{1 + m \sin^2 \frac{\varphi}{2}}$$

Nhận xét:

Vì r khá lớn, thí dụ $r = 0,9$ ($m = \bar{G} = 360$)

Như vậy chỉ cần \bar{G} biến thiên một giá trị nhỏ, nghĩa là chỉ cần rời khỏi vị trí cực đại một chút thì cường độ vân sẽ sụt xuống rất nhanh, nghĩa là các vân giao thoa cho bởi giao thoa kế Perot– Fabry rất mảnh.

Như vậy, ta có thể xác định bán kính các vân một cách khá chính xác.

c. Mẫu Fabry – Perot và lọc sắc giao thoa:

Mẫu Fabry – Perot gồm hai bản bán mạ, ngăn cách nhau bằng hai cái chèn cố định, độ dày thích hợp. Độ dày chính xác của mẫu được xác định bằng phương pháp quang học. Mẫu Fabry – perot được ứng dụng trong máy phát điện tử (sẽ trình bày trong phần sau của giáo trình).

Nếu ta chiếu vuông góc vào mẫu Fabry – Perot có độ dày chừng vài bước sóng bằng một chùm sáng trắng song song, thì mẫu chỉ để truyền qua những bức xạ có bước sóng \bar{G} thỏa mãn điều kiện.

$$2e = k\lambda \quad (k = 1, 2, 3, \dots)$$

Với e nhỏ, k chỉ chừng vài đơn vị và \bar{G} chỉ có thể nhận vài trị số xác định: mẫu tác dụng như một lọc sắc và gọi là lọc sắc giao thoa truyền xạ. Ưu điểm của lọc sắc giao thoa là cho những dải truyền qua hẹp (độ đơn sắc cao) thường không quá 200 Å với hệ số truyền xạ

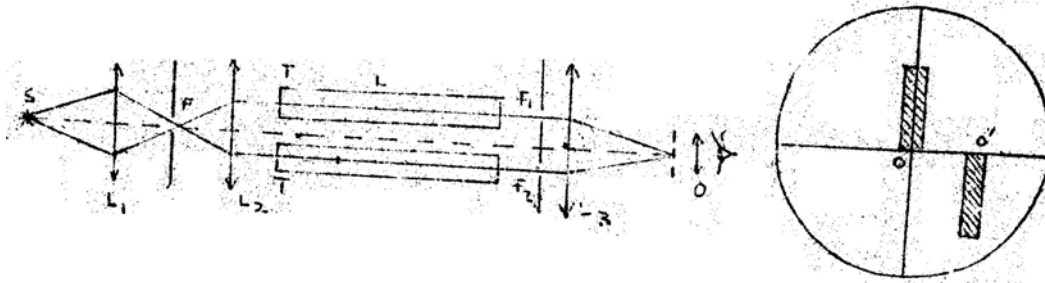
cao. Bước sóng của cực đại truyền qua có thể thay đổi bằng cách thay đổi góc tới i của chùm tia sáng.

SS. 9. CÁC MÁY GIAO THOA.

Các máy giao thoa là các máy đo dựa vào hiện tượng giao thoa ánh sáng. Quan sát một hệ vân giao thoa, có thể phát hiện những độ dịch chuyển đến một vài trăm vân, tức là phát hiện được độ biến thiên một vài phần trăm bước sóng trong hiệu quang lộ của hai chùm giao thoa. Vì vậy phép đo giao thoa là một trong những phép đo vật lý chính xác nhất.

Nguyên tắc của các máy giao thoa, một chùm đơn sắc được phân thành hai chùm kết hợp, tách biệt nhau, một chùm cố định, còn một chùm có lộ trình thay đổi được.

1. Giao thoa kế Rayleigh (Rơ-lây).



Giao thoa kế Rolây, còn gọi là khúc xạ kế giao thoa, có cấu tạo đơn giản, dùng cách bố trí khe young (H.29). S là nguồn sáng, thấu kính L1 tập trung ánh sáng chiếu vào khe hẹp F. Khe này được đặt tại mặt phẳng tiêu của L2. Chùm tia song song sau khi qua đi qua hai bình, có độ dài L, giống hệt nhau. Sau đó hai chùm tia nhiễu xạ qua hai khe young F1 và F2. Các chùm tia nhiễu xạ được hội tụ trên mặt phẳng tiêu của thấu kính L3, thấu kính này được đặt sát ngay sau hai khe hẹp F1 và F2. Dùng thị kính O để quan sát vân giao thoa.

Thông thường trong máy giao thoa người ta bố trí sao cho hai bình đựng chất cần đo chiết suất chỉ choán nửa tiết diện của chùm tia sáng song song. Vậy trong quang trường của thị kính sẽ có hai hệ vân giao thoa. Hệ vân ứng với các chùm tia chỉ đi qua không khí là hệ vân chuẩn, giả sử là hệ vân trên.(H.30).

Nếu trong hai bình T đựng cùng một chất khí (hoặc lỏng) thì hai hệ vân hoàn toàn trùng nhau, hai vân trung tâm đều ở tại O. Bây giờ, nếu một bình là chân không ($n=1$) và bình kia đựng chất khí chiết suất n , thì hiệu quang lộ của hai chùm tia tới O bằng :

$$\Delta = L(n-1) = p\lambda$$

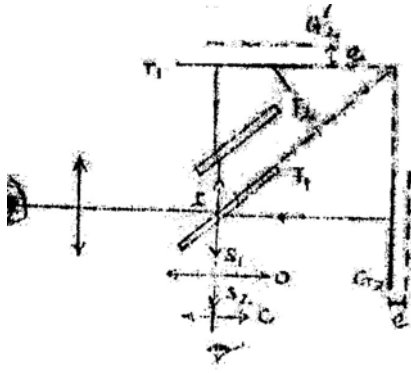
p là một số bất kỳ (bậc giao thoa).

Như vậy tại O có vân thứ p , nghĩa là vân trung tâm của hệ vân động (hệ vân dưới) đã dịch chuyển đến G cách O là p vân. Xác định được p ta tính được chiết suất n :

$$n = 1 + p \frac{\lambda}{L}$$

2. Giao thoa kế Michelson (Mai-ken-son).

a. Cấu tạo:



Hình 31 trình bày sơ đồ nguyên tắc giao thoa kế mai-ken-son.

S là nguồn sáng rộng.

L1 là thấu kính tạo các chùm tia song song. O và C là vật kính và thị kính của kính ngắm.

T1 và T2 là 2 tấm thủy tinh, bản T1 có lớp bán mạ.

G1 và G2 là hai gương phẳng. Tia tới SI bị tách ra làm hai phần. Một phần phản xạ trên lớp bán mạ đến gương G1, rồi phản xạ trở lại, đi qua T2 và T1 để tới mắt. Một phần của tia SI, đi qua lớp bán mạ tới G2, phản xạ trở lại tới T1, rồi phản xạ trên lớp bán mạ rồi tới mắt. Hai tia IS1 và IS2 là hai tia kết hợp, cho giao thoa ở vô cực. Trong điều kiện: G1, G2 cách đều I và vuông góc với nhau; các bản T1 và T2 song song với nhau, có cùng bề dày và cùng chiết suất, bản T1 nằm theo phân giác của góc vuông hợp bởi hai gương G1, G2, thì đường đi hình học của các cặp tia kết hợp là như nhau (mỗi tia đều đi qua ba lần bề dày của tấm thủy tinh). Ngoài ra, hai quang lộ khác nhau một trị số G . Vì quang lộ (một) chịu một lần phản xạ trên môi trường chiết quang hơn, còn quang lộ (hai) thì ngược lại. So sánh với giao thoa kế Rayleigh, hai chùm tia kết hợp được tách biệt hẳn nhau (IG1 và IG2), do đó ta dễ dàng tác động lên một trong hai chùm tia.

b. Cách quan sát hệ vân giao thoa:

Giả sử gương G2, được tịnh tiến ra xa T1 một khoảng nhỏ e. Ảnh của gương G2 qua lớp bán mạ là G2', có thể xem IS2 được phản xạ từ gương G- G1 và G' tạo thành bản không khí bê dày e không đổi. Đây chính là trường hợp giao thoa định xứ ở vô cực (vân đồng độ nghiêng). Điều chỉnh ống ngắm ở vô cực, ta sẽ quan sát thấy hệ vân tròn đồng tâm. Tăng từ từ bề dày e (bằng cách tịnh tiến G2) các tâm giao thoa bậc cao sẽ tuần tự xuất hiện thêm ở tâm.

Bây giờ, nếu giữ nguyên vị trí của G2, nhưng quay G2 nghiêng một góc nhỏ đối với pháp tuyến của gương, ta thấy ảnh G' của nó tạo với G1 một nêm không khí, có cạnh nằm giữa quang trường.

Điều chỉnh kính nhằm nhìn lên mặt nêm, ta sẽ quan sát thấy hệ vân giao thoa đồng bộ dày song song với cạnh nêm. Quan sát trong ánh sáng trắng, dễ dàng đánh dấu vân tối trung tâm ở tại cạnh nêm.

c. Công dụng của giao thoa kế maikenson:

Có thể dùng giao thoa kế Maikenson để đo chiết suất hay bề dày của một bản mỏng theo nguyên tắc tương tự như trong giao thoa kế Rolây. Ta thường dùng trường hợp vân định xứ trên nêm.

Giả sử ta đặt bản vẽ dày t, chiết suất n trên đường đi của tia IG2, quang lộ đến G2 tăng một lượng $t(n - 1)$, vị trí cạnh nêm thay đổi, dịch chuyển đi p vân, tuân theo hệ thức:

$$2 t (n - 1) = p \lambda$$

Xác định được p ta có thể tính t hoặc n.

Còn có thể xác định hiệu số bước sóng ($\Delta\lambda$) giữa hai bước sóng gần nhau (ví dụ như 2 vạch vàng natri). Ta thực hiện vân do bản mỏng song song.

Điều chỉnh G2 sao cho ảnh G'2 trùng G1, trong quang trường sẽ tối. Tăng dần bề dày e , vân giao thoa thứ 1, 2, 3... tuần tự xuất hiện ở tâm và chạy ra xa tâm. Khi số vân còn nhỏ, hai hệ vân giao thoa ứng với 2 bước sóng (λ và λ') chưa tách xa nhau (bán kính các vân thoa phụ thuộc vào $\Delta\lambda$ theo (8.5), nên vẫn còn quan sát được hệ vân. Đến khi bề dày e đủ lớn, thỏa mãn hệ thức:

$$2e_1 = m_1\lambda = (m_1 - \frac{1}{2})\lambda' \quad (9.2)$$

thì cực đại của hệ vân này trùng nhau với cực tiểu của hệ vân kia. Với điều kiện cường độ sáng ứng với (λ và λ') gần bằng nhau, thì thị trường sáng đều. Trước khi hệ vân biến mất, đếm được m_1 vân giao thoa xuất hiện từ tâm.

Từ (9.2) ta tính được.

$$\lambda = \frac{\lambda'}{2m_1} \approx \frac{\lambda}{2m_1} \quad (9.3)$$

$$\Delta\lambda = \frac{e_1}{m_1(m_1 - \frac{1}{2})} \quad (9.4)$$

$$\approx \frac{e_1}{m_1^2}$$

Dựa theo nguyên tắc trên còn có thể xác định độ đơn sắc của chùm ánh sáng gần đơn sắc.

Giả sử bước sóng ánh sáng nhận các giá trị từ (λ đến $\lambda + \Delta\lambda$). Tuần tự làm như trên. Hệ vân giao thoa sẽ biến mất khi bề dày e thỏa mãn điều kiện.

$$2e = k\lambda = (k - \frac{1}{2})(\lambda + \frac{\Delta\lambda}{2}) \quad (9.5)$$

(để hiểu điều kiện trên, cần xem lại hình 18).

$$k\lambda = (k-1)(\lambda + \Delta\lambda) \Rightarrow \Delta\lambda = \frac{\lambda}{k}$$

k chính là bậc giao thoa của vân ở tâm hay số vân giao thoa đếm được, trước khi hệ vân hoàn toàn nhòe đều.

Từ (9.5), ta có:

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{1}{2} (k\lambda - \frac{\Delta\lambda}{2})$$

Thông thường k rất lớn nên có thể bỏ qua $\frac{\Delta\lambda}{4}$ so với $\frac{k\lambda}{2}$, ta đi đến:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda}{k} \quad (9.6)$$

Công thức (9.6) chính là công thức (7.2) trước đây.

Bằng cách vừa trình bày, Maikenson đã xác định được $k=400.000$ với bức xạ $\lambda = 6438 \text{ \AA}$ của Cadmium nhờ đó đã đo được bước sóng λ của bức xạ với mức chính xác tới 10^{-7} .

$$\lambda = 6438,472 \text{ \AA} \text{ (ở } 150^\circ\text{C dưới áp suất chuẩn)}$$

Ông Maikenson còn dùng giao thoa kế để khảo sát vận tốc ánh sáng và thấy rằng vận tốc truyền của ánh sáng trong chân không là một hằng số vũ trụ không phụ thuộc vào cường độ, phương truyền, hoặc sự chuyển động của nguồn hay của máy thu.

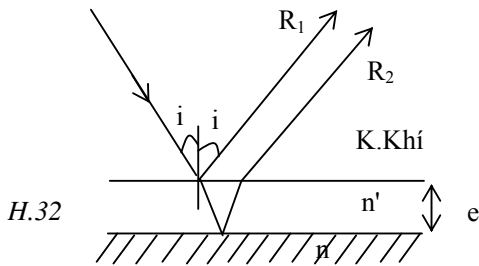
SS. 10. VÀI ỨNG DỤNG KHÁC CỦA HIỆN TƯỢNG GIAO THOA.

Như ta đã thấy, hiện tượng giao thoa được ứng dụng để chế tạo lọc sắc giao thoa và thực hiện các phép đo với độ chính xác cao trong các giao thoa kế. Sau đây là vài ứng dụng khác.

1. Khử tia phản xạ trên các mặt quang học.

Khi chùm tia sáng truyền qua mặt giới hạn các môi trường, một phần năng lượng của chùm tia bị phản xạ trở lại. Trong các quan hệ phức tạp số mặt giới hạn lớn, năng lượng mất mát do phản xạ trở nên quan trọng. Vì vậy, để phẩm chất của ảnh qua quang hệ được tốt, cần triệt tiêu phần ánh sáng phản xạ.

Giả sử cần khử phản xạ trên mặt giới hạn giữa không khí và thủy tinh chiết suất n . người ta phủ một lớp vật chất rất mỏng bề dày e , chiết suất \tilde{G} , sao cho $1 < \tilde{G} < n$.



Các chùm tia sáng tới dưới góc i , sẽ có hai tia phản xạ từ mặt trên và mặt dưới của lớp mỏng hai mặt song song, R_1 và R_2 . Như ta đã biết, 2 tia phản xạ kết hợp và hiệu quang lộ, tương ứng bằng:

$$\Delta = 2 e \sqrt{n'^2 - \sin^2 i}$$

Để làm mất hiện tượng phản xạ, hiệu quang lộ \tilde{G} cần thỏa mãn điều kiện cực tiểu của giao thoa:

$$\tilde{c} = (2k + 1)\lambda$$

Nếu các mặt quang học cần được khử phản xạ đối với ánh sáng đến vuông góc và đối với các bước sóng $\tilde{G} = 0,55\tilde{G}$.

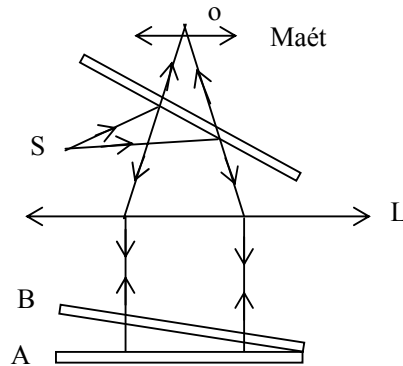
Bề dày e của lớp khử phản xạ, phải thỏa điều kiện:

$$\Delta = 2 e n' = (2k + 1) \frac{\lambda}{2}$$

$$e = (2k + 1) \frac{\lambda}{4n'} \quad (10.1)$$

Giá trị k được chọn sao cho bề dày e không quá nhỏ, khó thực hiện.

2. Kiểm tra phẩm chất các bề mặt quang học.

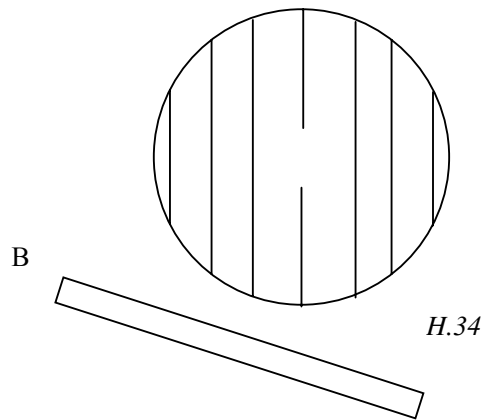


Hình 33

A là bề mặt chuẩn, B là bề mặt của tấm thủy tinh cần kiểm tra. Người ta xếp đặt, tạo một nêm không khí giữa hai mặt A và B (H. 33).

G là một gương bán mạ. Chùm tia sáng xuất phát từ s, nhờ G và thấu kính L biến thành chùm song song chiếu thẳng góc đến nêm không khí. Các thấu kính 0 và L hợp thành kính ngắm trên mặt nêm.

Trong quang trường sẽ có hệ vân thẳng song song với cạnh nêm. Trên mặt b cần kiểm tra cũng có phẩm chất tốt thì các vân thẳng và đều đặn. Còn giả sử nếu mặt B có lỗi lõm thì hệ vân bị méo mó (h.34). Khoảng vân trên hình giao thoa ứng với sự thay đổi hiệu quang lộ là λ , nghĩa là ứng với sự thay đổi bề dày của nêm một lượng $\lambda/2$.



Nhờ kính ngắm, người ta có thể phát hiện được sự sai lệch cỡ 1/10 khoảng vân của hệ vân. Như vậy người ta có thể phát hiện chỗ lỗi lõm cỡ 1/20 bước sóng trên mặt phẳng B cần kiểm tra.

Nếu B là mặt cong, người ta tạo hệ vân tròn Niuton để kiểm tra phẩm chất bề mặt.

hạt nhân nguyên tử			mạch dao động điện tử						
nguyên tử									
phân tử									
Mặt trời									
10^{-10}	10^{-8}	10^{-6}	10^{-4}	10^{-2}	10^0	10^2	10^4	10^6	
				tử ngoại		hồng ngoại			
tia X					sóng vô tuyến				
tia r			ánh sáng thấy được						

Chương III

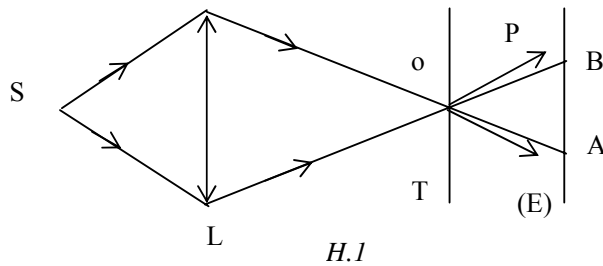
SỰ NHIỄU XẠ ÁNH SÁNG

SS. 1. CÁC THÍ NGHIỆM MỞ ĐẦU VỀ NHIỄU XẠ ÁNH SÁNG.

Quan sát nhiều thí nghiệm người ta thấy rằng, khi truyền trong một môi trường đồng tính, nếu gặp một vật cản, ánh sáng chẳng những truyền theo đường thẳng mà còn truyền theo các phương khác. Những phương đó gọi là phương nhiễu xạ. Hiện tượng nói trên gọi là nhiễu xạ.

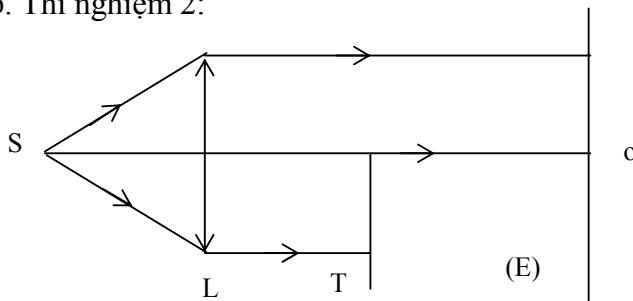
Chúng ta hãy xét các thí nghiệm sau:

a. Thí nghiệm 1:



Nguồn sáng S được thấu kính L hội tụ tại o. Điểm o là ảnh thực của S. Sau o ta đặt màn ảnh E. Theo định luật truyền thẳng ánh sáng các tia sáng chỉ nằm trong hình nón AOB, (chùm tia hình học) và trên màn E, ta quan sát thấy một vật sáng có đường kính AB. Bây giờ, đặt thêm một màn chắn T, có một tròn tại O. Khi đó sẽ có các tia OP, OR... Ở ngoài hình tròn nón AOB. Trên màn E ta quan sát thấy một hình nhiễu xạ gồm các vân tròn sáng, tối đồng tâm.

b. Thí nghiệm 2:



H.2. Những nhiễu xạ do mép màn chắn

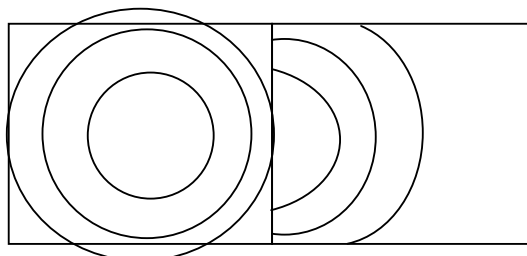
Nguồn sáng S đặt tại tiêu điểm của thấu kính L. Ta có chùm tia song song chiếu đến màn quan sát E (H.2). Trên đường truyền của chùm tia ta đặt màn chắn T có mép thẳng như trên hình vẽ. Nếu ánh sáng tuân đúng theo định luật truyền thẳng thì trên màn E ta quan sát thấy hai miền sáng tối được phân chia bởi một đường ranh giới rõ nét AB. Sự thực thì nếu quan sát kỹ (bằng kính lúp) thì AB không phải là ranh giới rõ nét. Cường độ sáng không triệt tiêu đột ngột mà giảm dần từ ranh giới AB trở vào miền bóng tối. Còn trong miền bóng sáng hình học, ở lân cận đường AB có các vân sáng tối xen kẽ nhau, càng ra xa các vân càng khít nhau lại và cho trường sáng đều.

Hai thí nghiệm trên đây chứng tỏ ánh sáng không hoàn toàn theo định luật truyền thẳng của ánh sáng. Chúng chỉ có thể giải thích được trên cơ sở thuyết sóng ánh sáng.

SS. 2. NGUYÊN LÝ HUYGHENS – FRESNEL.

1. Thí nghiệm Huyghens.

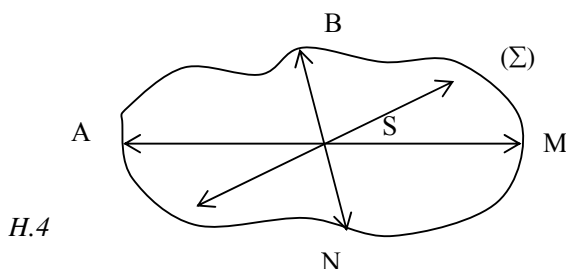
Có một chậu đựng nước, ở giữa có vách ngăn với khe hẹp O. Ta dùng âm thoa để tạo các sóng tròn tâm S ở ngăn thứ nhất (H.3). Sóng sẽ truyền đến khe hẹp O rồi truyền qua ngăn thứ hai. Ở đây các sóng có tâm là O, chứ không phải có tâm là S. Như vậy khe hẹp O, khi sóng truyền tới, trở thành một nguồn chấn động, gọi là nguồn thứ cấp.



H.3

2. Nguyên lý Huyghens.

Chúng ta tưởng tượng có mặt Σ kín, bất kỳ, bao quanh nguồn chấn động S. Huyghens nêu ra nguyên lý: Mỗi điểm của mặt kín Σ mà sóng truyền tới lại trở thành một nguồn phát sóng cầu thứ cấp, ở mỗi thời điểm mặt bao của các mặt cầu ấy là bề mặt sóng của sóng thực sự truyền đi. Biên độ và pha của những chấn động thứ cấp truyền từ A, b, M, N... có liên lạc với biên độ và pha của những chấn động truyền từ S đến A, b, M, N...



H.4

Nguyên lý Huyghens có tính định tính, có thể áp dụng để xác định phương truyền của ánh sáng, ví dụ như trong các trường hợp: Truyền thẳng, phản xạ, khúc xạ và cả khúc xạ lưỡng chiết (sẽ học ở chương sau). Để có thể giải thích một cách định lượng hiện tượng nhiễu xạ, Fresnel đã bổ sung bằng định đề sau :

3. Định đề Fresnel.

Fresnel đưa ra giải

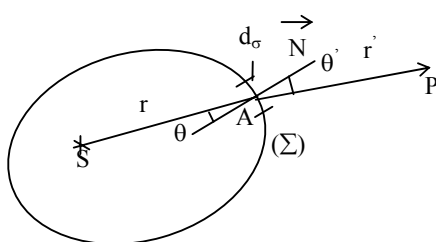
- Biên độ và pha của chính là biên độ và pha

Gọi d (là diện tích vi cận điểm A. \vec{G} là pháp tuyến tạo bởi pháp tuyến với

Theo Fresnel : - Biên độ của sóng thứ cấp theo phương AP tỷ lệ với hàm số k phụ thuộc (và (' gọi là thừa số xiên k ((, ('). Thừa số xiên nhận giá trị cực đại khi (và (' triệt tiêu.

- Đương nhiên, nếu xét sóng thứ cấp phát đi từ d (thì biên độ của tỷ lệ với d (. Xuất phát từ định đề Fresnel, ta thử viết biểu thức của sóng thứ cấp từ d (tới P.

Giả sử phương trình chấn động tại S có dạng là :



thuyết rằng :

sóng thứ cấp phát đi từ A của sóng từ S đến A.

cấp trên mặt kín () ở lân tuyến của d (. (và (' là góc các phương SA và AP.

$$a = a \cos \frac{2\pi}{T} t \quad (2.1)$$

Sóng phát đi từ nguồn điểm S là sóng cầu nên biên độ biến thiên tỷ lệ nghịch với khoảng cách, vậy phương trình sóng đến A có dạng :

$$s_A = \frac{a}{r} \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r}{\lambda} \right) \quad (2.2)$$

Biên độ và pha trong biểu thức trên cũng chính là biên độ và pha của các sóng thứ cấp phát đi từ các điểm ở lân cận điểm A. Sóng thứ cấp do d (phát đi truyền đến P, theo định đề Fresnel, là:

$$ds_{d\sigma,P} = k(\theta, \theta') \cdot \frac{a}{r.r'} \cdot d\sigma \cdot \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r+r'}{\lambda} \right) \quad (2.3)$$

4. Nguyên tắc áp dụng nguyên lý Huyghens – Fresnel.

Ta có các nhận xét như sau :

- Để xét trạng thái sáng tại P, có thể thay nguồn S bằng các nguồn thứ cấp trên mặt kín.
- Các nguồn thứ cấp cũng được kích thích bởi chấn động phát đi từ S nên là các nguồn kết hợp. Các sóng thứ cấp xuất phát từ các diện tích vi cấp trên mặt () giao thoa với nhau tại P và quy định trạng thái sáng tại P.
- Chấn động sáng tổng hợp tại P là tích phân của biểu thức (2.3) lấy trên toàn diện tích Σ .

$$s_P = \int_{(\Sigma)} k(\theta, \theta') d\sigma \cdot \frac{a}{r.r'} \cdot \cos 2\pi \left(\frac{t}{T} - \frac{r+r'}{\lambda} \right) \quad (2.4)$$

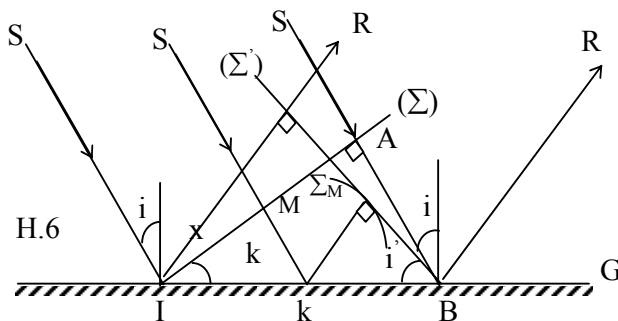
Nếu giữa nguồn S và điểm quan sát P có một màn chắn che mất một phần của (thì tích phân trên chỉ cần lấy trên phần diện tích mà màn chắn còn chừa lại.

Cần biết rằng thừa số xiên k ((,(') không thể tính được bằng một biểu thức toán học đơn giản, nên trong trường hợp tổng quát, rất khó tính tích phân trên. Tuy nhiên trong một số trường hợp, lợi dụng tính chất đối xứng của thí nghiệm, với một vài giả thuyết về k (θ, θ'), có thể tính toán được một cách chặt chẽ.

5. Cách vẽ Huyghens. Giải thích sự phản xạ và sự khúc xạ theo thuyết sóng.

Nguyên lý Huyghens được áp dụng trực tiếp trong cách vẽ Huyghens để xác định mặt sóng và tia sáng lần lượt truyền trong những môi trường khác nhau.

a/ Xác định mặt sóng và tia phản xạ:



H.6

Ta khảo sát một chùm tia sáng song song, truyền với vận tốc v, rọi vào gương phẳng G, dưới góc tới i (H.6). Chùm tia sáng là chùm song song, vậy mặt sóng (là phẳng. Giả sử tại thời điểm t = 0, tia SI đến được gương G. Trong khi đó tia SA mới tới được A trên mặt sóng (, tia này tới B trên mặt gương G sau thời gian là T, ta có : AB = vT.

Gọi khoảng cách IA là ℓ . Xét tia SK ở giữa 2 tia trên và cách SI một khoảng x . Tại thời điểm $t = 0$, tia này đạt đến M, và đến K sau thời gian $t = \frac{\ell - x}{v_1}$ với $t < T$

Ở thời điểm t , sóng tới K. Điểm này trở thành tâm phát sóng cầu thứ cấp, truyền trở lại môi trường phía trước mặt gương. Ở thời điểm T , mặt sóng cầu thứ cấp tâm là K, có bán kính là $r = v_1(T - t) = AB - MK = (\ell - x) \text{ tgi}_1$ (2.5)

Tưởng tượng rằng điểm M chạy từ I đến A, ta có một họ mặt sóng cầu thứ cấp (M, ở thời điểm T , với bán kính tương ứng tính theo công thức (2.5), mặt Σ tiếp xúc với tất cả mặt cầu (M trên là một mặt phẳng. Đó chính là mặt sóng phản xạ. Khi $x = \ell$, thì $r = 0$, vậy Σ đi qua B. Gọi $i' =$ góc hợp bởi Σ và mặt phẳng của gương G. Ta có $\sin i' = \frac{v_1(T - t)}{AB}$

mà $KB = IB - IK = \ell - x$

Vậy $\sin i' = \frac{KB}{IB} = \frac{\ell - x}{\ell}$

Và $i' = i$

Vậy mặt phẳng Σ đi qua B và tiếp xúc mặt cầu (M không phụ thuộc vào x , tức là không phụ thuộc vào sự lựa chọn điểm M.

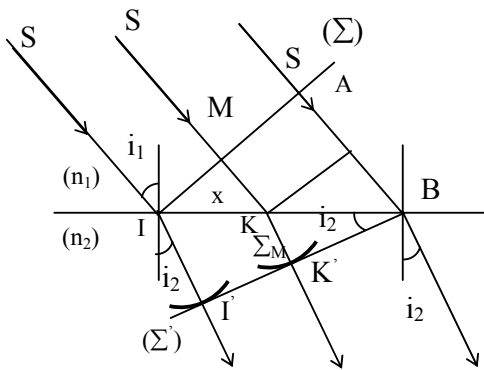
Các pháp tuyến IR và BR của mặt Σ chính là các tia phản xạ tương ứng, Rõ ràng là các góc phản xạ bằng $i' = i$. Vậy :

Sóng phản xạ cũng là sóng phẳng và tia phản xạ tạo với pháp tuyến của mặt phản xạ một góc bằng góc tới.

Từ chứng minh trên, muốn có tia phản xạ ứng với tia tới chỉ cần vẽ mặt cầu tâm I, bán kính $r = AB$, rồi từ B vẽ mặt phẳng Σ tiếp xúc với mặt cầu. Đường nối điểm I với điểm tiếp xúc I' chính là tia phản xạ.

Đó chính là cách vẽ Huyghens.

b/ Xác định mặt sóng và tia khúc xạ:



H.7

Xét mặt phẳng IB ngăn cách hai môi trường trong suốt chiết suất n_1 và n_2 . Chúng ta hãy khảo sát chùm tia song song truyền trong môi trường thứ nhất với vận tốc v_1 đến mặt phẳng ngăn cách dưới góc i_1 (H.7). Ta có thể lặp lại lý luận trên nhưng chú ý rằng $AB = v_1 T$

$$t = \frac{MK}{v_1} = \frac{x \text{ tgi}_1}{v_1}$$

Và $\zeta = v_2 \cdot (T - t) = v_2 (AB/v_1 - MK/v_1)$

Ngoài ra mặt sóng cầu thứ cấp Σ_M phải vẽ trong môi trường thứ hai (vận tốc tương ứng là v_2). Ta

tính được

$$\zeta = \frac{v_2}{v_1} (AB - MK) = \frac{v_2}{v_1} (\ell - x) \text{ tgi}_1 \text{ với } \lambda = AI$$

Mặt phẳng sóng Σ' đi qua B tiếp xúc với mặt sóng cầu thứ cấp Σ_M . Mặt Σ' tạo với mặt ngăn cách góc i_2 ta tính được :

$$\sin i_2 = \frac{\rho}{KB} = \frac{v_2}{v_1} \cdot \frac{(\ell - x) \operatorname{tg} i_1}{(\ell - x) / \cos i_1} = \frac{v_2}{v_1} \sin i_1$$

Do đó \hat{c} (2.6)

Mặt Σ' chính là mặt tiếp xúc với mọi mặt sóng cầu thứ cấp Σ_M vì nó không phụ thuộc vào M. Chúng ta đi đến kết luận :

Sóng khúc xạ cũng là sóng phẳng và tia khúc xạ tạo với pháp tuyến của mặt ngăn cách một góc thỏa mãn công thức (2.6).

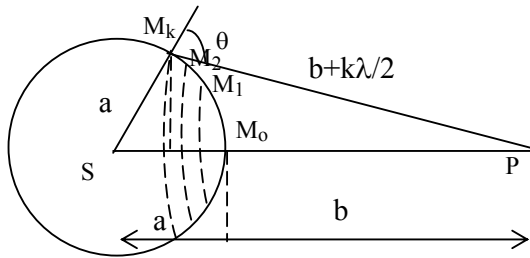
Theo cách vẽ này, ta thấy rằng tỷ số chiết suất tuyệt đối của hai môi trường bằng nghịch đảo của tỷ số vận tốc ánh sáng trong hai môi trường ấy.

Kết luận này được thí nghiệm của Fucô (Foucault) xác nhận, để quyết định sự thắng thế của thuyết sóng ánh sáng, hồi giữa thế kỷ 19.

SS.3. ĐỐI FRESNEL.

Để giải thích một số hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng, để thay thế cho pháp tính tích phân phức tạp ở trên (2.4), Fresnel dùng một phương pháp tuy không hoàn toàn chặt chẽ về mặt toán học nhưng đơn giản và trực quan, gọi là phương pháp đối Fresnel.

1. Cách chia đôi và diện tích các đôi.



Có một nguồn điểm S phát ánh sáng đơn sắc bước sóng λ , đặt trong môi trường đồng tính và đẳng hướng. Chúng ta cần khảo sát trạng thái chấn động tại P. Để đơn giản ta chọn mặt kín (Σ) là mặt cầu tâm S bán kính là a, đó chính là mặt sóng - mặt giao động đồng pha. Đường nối SP cắt (Σ) tại M_0 , các khoảng cách $SM_0 = a$ và $M_0P = b$ (H.8). Nhận xét rằng, cách bố trí của chúng ta có tính đối xứng qua đường thẳng SP, Fresnel không chọn các diện tích vi cấp d (vô cùng bé, mà chia mặt kín (Σ) thành những diện tích nhỏ, hữu hạn (S như sau :

Chọn các điểm M_1 trên (Σ) sao cho khoảng cách

$$M_1P = M_0P + \lambda/2 = b + \lambda/2$$

Chọn các điểm M_2 trên (Σ) sao cho khoảng cách

$$M_2P = M_1P + \lambda/2 = b + 2 \lambda/2$$

Chọn các điểm M_k trên (Σ) sao cho khoảng cách

$$M_kP = M_{k-1}P + \lambda/2 = b + k \lambda/2$$

Để dễ hình dung, chúng ta tưởng tượng rằng có những hình cầu tâm P bán kính PM_k chia mặt (Σ) thành những đôi cầu, những đôi cầu đầu tiên có thể xem như những hình vành khăn đồng tâm, tâm là M_0 .

Chúng ta sẽ tính bán kính các đới cầu ấy và chứng minh rằng có diện tích bằng nhau.

Gọi k là bán kính trong M_0M_k của đới cầu thứ k : độ dài $H_kM_0 = x_k$.

Vòng tròn ở giữa đánh số 0, đới có bề rộng M_1M_2 là đới số 1.

Trong hai tam giác vuông H_kSM_k và H_kPM_k , ta có :

$$\begin{aligned} \overline{H_kM_k}^2 &= \overline{SM_k}^2 - \overline{SH_k}^2 = \overline{PM_k}^2 - \overline{PH_k}^2 \\ &= a^2 - (a - x_k)^2 = (b + k\lambda/2)^2 - (b + x_k)^2 \end{aligned}$$

Khai triển 2 vế của phương trình và bỏ qua (2 bên cạnh (, ta được :

$$2ax_k = kb\lambda - 2bx_k$$

$$x_k = \frac{kb}{(a+b)} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Coi đới cầu là phẳng ta có gần đúng

$$\rho_k = M_0M_k \approx H_kM_k$$

Do đó : \hat{c}

$$\rho_k = \sqrt{\frac{ab}{a+b}} \sqrt{k} \quad (3.1)$$

Bán kính các đới tỷ lệ với căn bậc hai của những số nguyên liên tiếp. Các đới Fresnel sắp xếp tương tự như các vân tròn Niuton (Newton).

Diện tích của chõm cầu có chiều cao x_k là $S_k = 2(\pi x_k^2)$, của chõm cầu có chiều cao x_{k+1} là $S_{k+1} = 2(\pi x_{k+1}^2)$. Diện tích của đới Fresnel thứ k là :

$$\begin{aligned} \Delta S_k &= S_{k+1} - S_k = 2\pi a (x_{k+1} - x_k) \\ &= 2\pi a \frac{b}{(a+b)} \cdot \frac{\lambda}{2} \end{aligned}$$

$$\Delta S_k = \frac{\pi ab\lambda}{ab} \quad (3.2)$$

Vậy diện tích (S của tất cả các đới Fresnel kế tiếp thì đều bằng nhau.

2. Chấn động gây ra do toàn bộ mặt sóng.

Xét từ đới Fresnel này tới đới kế tiếp, vì diện tích của các đới Fresnel đều bằng ΔS , nên sự khác nhau về biên độ của chấn động thứ cấp gây ra tại P do mỗi đới là do thừa số xiên k .

Về pha chúng ta phân tích như sau : Vì (Σ) là mặt sóng, nên tại đây các chấn động thứ cấp đều cùng pha.

Khi đến P, vì khoảng cách từ 2 đới liên tiếp thứ k và $(k + 1)$ đến điểm quan sát khác nhau nửa bước sóng $\lambda/2$ cho nên các chấn động thứ cấp tương ứng có pha ngược nhau.

Chú ý đến thừa số xiên k (θ, θ') ta thấy số thứ tự k của đới càng cao thì θ'_k càng lớn ($\theta_k = 0$) nghĩa là k (θ, θ') giảm dần khi k tăng. Tóm lại do phương pháp chia đới của Fresnel, các chấn động thứ cấp đến P có ly độ tuần tự âm và dương và giảm dần về trị số tuyệt đối.

Gọi a là biên độ của chấn động tổng hợp tại P,

$a_0, a_1, a_2, \dots, a_k$ là biên độ gửi từ các đới tới p.

Ta có : $a = a_0 - a_1 + a_2 - a_3 \dots + a_k \dots - a_m$

Với $a_0 > a_1 > a_2 > \dots > a_k$

a_k giảm chậm và đều nên ta có thể coi

$$a_k = \frac{a_{k+1} + a_{k-1}}{2}$$

Ta có thể viết biểu thức của a dưới dạng

$$a = \frac{a_0}{2} + \left(\frac{a_0}{2} - a_1 + \frac{a_2}{2} \right) + \left(\frac{a_2}{2} - a_3 + \frac{a_4}{2} \right) \pm \dots \pm \frac{a_m}{2}$$

Các tổng trong dấu ngoặc triệt tiêu nên

$$a = \frac{a_0}{2} \pm \frac{a_m}{2}$$

Dấu + nếu m chẵn
- nếu m lẻ

Khi xét toàn bộ mặt sóng Σ thì $a_m \approx 0$. Vậy

$$a = \frac{a_0}{2}$$

Về cường độ sáng, ta có: $I = I_0/4$

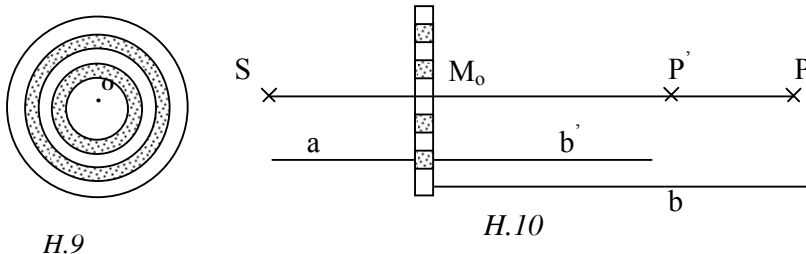
Vậy cường độ sáng ở P gây ra bởi toàn mặt cầu Σ chỉ bằng 1/4 cường độ sáng gây ra bởi đới Fresnel số 0.

3. Cách tử đới.

Phương pháp đới Fresnel được kiểm chứng rạch rỡ với thí nghiệm cách tử đới.

Phân tích ở trên cho thấy chấn động nhiều xạ từ các đới số lẻ là ngược pha với chấn động nhiều xạ từ các đới số chẵn, thành thử chúng gần như triệt tiêu lẫn nhau. Nếu có một màn chắn đặc biệt chỉ trong suốt ở những đới cùng chẵn (hoặc cùng lẻ) thì cường độ sáng ở điểm quan sát sẽ tăng gấp bội so với khi không có màn chắn. Cách tử đới là một dụng cụ như vậy.

Trên một bản trong suốt (ví dụ như thủy tinh) người ta tiến hành chia các đới Fresnel



tâm O (H.9) nghĩa là vẽ các vòng tròn tâm O, bán kính (k theo (3.1)). Sau đó bôi đen các đới số lẻ 1, 3, 5 (hoặc các đới chẵn), ta có được cách tử đới. Đặt cách tử đới ở vị trí M_0 , cách nguồn sáng S một khoảng a, còn điểm quan sát P cách M_0 một khoảng b. Khi đó ở P

rất sáng. Từ công thức (3.1) $\rho_k = \sqrt{\frac{ab\lambda}{a+b}} \sqrt{k}$ ta thấy số đới Fresnel k phụ thuộc vào bán

kính ρ_k của màn chắn như sau :

$$k = \frac{\rho_k^2}{\lambda} \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right) \quad (3.5)$$

Như vậy cho biết bán kính của màn chắn chúng ta có thể tính được số đới tương ứng. Mặt khác, còn thấy rằng số đới k còn phụ thuộc vào khoảng cách b đến điểm quan sát. Trên quang trục sẽ tìm thấy một điểm P' cách M_0 một đoạn b' sao cho

$$\left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b'} \right) = 3 \left(\frac{1}{a} + \frac{1}{b} \right)$$

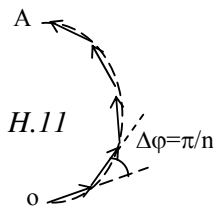
Khi đó, đới Fresnel số 0 trên cách tử đới ứng với điểm P sẽ chứa 3 đới : 0, 1, 2 ứng với điểm P' . Còn đới thứ 1 đối với P sẽ chứa 3 đới 3, 4, 5 đối với P' (3 đới này bị bôi đen). Như vậy P' cũng là 1 điểm sáng. Trên quang trục còn có những điểm P'' , P''' , mà mỗi đới trên cách tử ứng với 5, 7 đới Fresnel. Đó cũng là các điểm sáng. Ta thấy rằng cách tử đới tác dụng như một thấu kính hội tụ nhiều tiêu điểm.

Người ta còn chế tạo được cách tử đới, trong đó phần không trong suốt, được thay bằng những hình vành khăn làm bằng chất trong suốt mới có độ dày thích hợp, để ánh sáng đi qua đây có quang lộ tăng thêm $\lambda/2$ so với khi đi qua đới này nếu làm bằng chất trong suốt dùng làm cách tử. Như thế, chấn động gửi từ các đới lẻ và từ các đới chẵn đều cùng pha và độ rọi ở P tăng gấp 4 lần so với cách tử đới thường. Cách tử đới chế tạo theo nguyên tắc trên gọi là cách tử đới pha (dựa trên nguyên tắc làm thay đổi pha của các chấn động).

4. Phương pháp đồ thị.

Ở trên, ta đã thấy khi khảo sát hiện tượng nhiễu xạ, ta phải tổng hợp một số vô hạn chấn động, có pha tăng dần một cách liên tục. Ta có thể dùng cách tính của Fresnel.

Ta chia mỗi đới câu Fresnel thành đới vi cấp có cùng diện tích G . Với mỗi đới vi cấp này, ta có thể coi chấn động phát đi từ mỗi điểm thì đồng pha với nhau (khi tới P) và đồng pha với chấn động tổng hợp tại P gây ra bởi toàn đới vi cấp. Ta biểu diễn chấn động ds gây ra bởi mỗi đới vi cấp bằng các vectơ có cùng độ dài, tỷ lệ với biên độ da của dao động ds , và hợp với nhau một góc bằng hiệu số pha $d\phi$ (giữa hai chấn động ứng với hai đới vi cấp liên tiếp). Các vectơ trên hợp thành một nửa đa giác có cạnh là da , góc hợp bởi hai cạnh liên tiếp là $d\phi$.



Từ mép này sang mép kia của một đới Fresnel pha thay đổi là π , vậy $d\phi = \pi/n$. Ta xét đới Fresnel số 0, ta được nửa đa giác đều thứ nhất (hình 11), cho $n \rightarrow \infty$, nửa đa giác trên biến thành nửa vòng tròn OA . Độ dài đường kính OA biểu diễn biên độ chấn động tại P gây ra bởi đới Fresnel số 0. Với đới Fresnel số 1, ta được nửa vòng tròn AB (hình 12). Điểm B không trùng với O , là do ảnh hưởng của thừa số xiên $k(\theta, \theta')$ làm cho biên độ chấn động ứng với các đới giảm tuần tự khi số thứ tự đới tăng. Cuối cùng đi hết mặt (Σ) đồ thị tổng hợp biên độ có hình xoắn ốc với điểm tiệm cận là tâm I , trung điểm của đường kính OA .

Nhờ đồ thị trên chúng ta xác định nhanh chóng biên độ ánh sáng nhiễu xạ tại P.

Nếu giữa nguồn sáng S và P không có màn chắn, mặt (Σ) được mở hoàn toàn, biên độ sáng tại P là OI .

Nếu có màn chắn chỉ chừa đôi Fresnel đầu tiên, biên độ sáng là $OA = 2OI$ và cường độ sáng gấp 4 lần khi không có màn chắn, đúng như kết quả trước đây (3.4). Nếu màn chắn chừa 2 đôi Fresnel đầu tiên, biên độ $OB \approx O$, ở P tối.

Nếu màn chắn chứa số đôi Fresnel không nguyên, ví dụ đôi số 0 và nửa đôi số 1 thì biên độ của chấn động tổng hợp là OJ , J là điểm giữa trên cung AB .

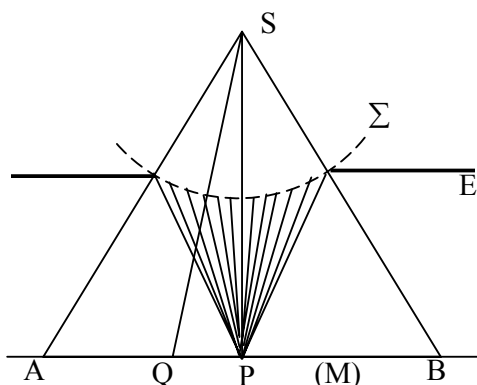
Bằng cách tổng hợp biên độ bằng đồ thị như trên, ta còn có thể giải các bài toán nhiễu xạ với các màn chắn có cấu tạo đặc biệt.

Trên đây chúng ta dùng nguồn sáng điểm và xét nhiễu xạ của sóng cầu. Nếu chiếu chùm tia sáng song song đến màn chắn, ta có nhiễu xạ của sóng phẳng. Trong trường hợp này các công thức (3.1), (3.2) và (3.5) vẫn còn dùng nếu cho bán kính a của mặt sóng tiến đến giá trị

SS.4. NHIỄU XẠ FRESNEL.

Khi màn quan sát đặt cách vật cản một khoảng giới nội (b), ta có nhiễu xạ Fresnel. Chúng ta sẽ áp dụng cách chia đôi của Fresnel để xác định hình ảnh nhiễu xạ trong các trường hợp sau :

1. Nhiễu xạ qua một lỗ tròn.



H.13

Trên hình 13, E là một màn chắn có khoét lỗ tròn tâm M bán kính (a). S là nguồn sáng điểm đơn sắc được đặt trên trục của lỗ tròn. Màn quan sát M được đặt song song với màn chắn E.

P là giao điểm của trục SM và màn M. Hiện tượng thí nghiệm trên hình 13 có tính đối xứng quanh trục SP. Từ đó suy ra rằng hình nhiễu xạ trên màn M có tính đối xứng quanh tâm P.

* Cường độ sáng tại P : Để xác định trạng thái sáng tại P, ta tiến hành chia đôi Fresnel cho mặt cầu (tâm S, bán kính $SMO = a$). Tại P sáng hay tối tùy theo số đôi Fresnel chứa trong lỗ là lẻ hay chẵn. Số đôi được tính theo công thức (3.5). Trường hợp số đôi không

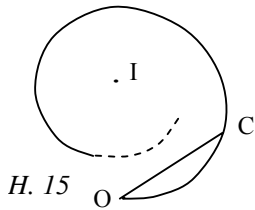
phải là nguyên, chúng ta dùng hình xoắn ốc (H.12) có thể so sánh với cường độ sáng khi không có màn chắn.

* Cường độ sáng tại Q lân cận P : Nối SQ đường này cắt (tại O. Ta tiến hành chia đôi Fresnel quanh tâm O. Tâm Mo của lỗ không trùng với tâm O. Lỗ tròn cho qua các phần của đôi số chẵn và đôi số lẻ như trên hình 14. Phần các đôi chẵn tăng cường lẫn nhau và triệt tiêu phần các đôi lẻ. Vì vậy biên độ chấn động tại Q tỷ lệ với hiệu số diện tích hai loại đôi chứa trong lỗ tròn. Ở Q có thể sáng hoặc tối.

Từ việc phân tích như trên, có thể kết luận rằng hình nhiễu xạ trên màn quan sát gồm các tròn sáng và tối xen kẽ nhau có tâm chung là P.

2. Giải thích sự truyền thẳng của ánh sáng.

Ta xét cách bố trí trên hình 13. Theo quang hình học ta nói ánh sáng truyền thẳng từ S đến P, thì theo quan điểm sóng ta ngầm hiểu rằng trạng thái chấn động tại P là được xác định bởi chùm sáng hẹp đi từ S đến P.



Giả sử lỗ Mo có diện tích chỉ bằng 1/3 diện tích đôi Fresnel số 0. Đồ thị hình xoắn ốc (H.15) cho thấy rằng biên độ tại điểm quan sát khi đó là OC bằng OI như khi không có màn chắn. Do đó, khi không có màn chắn E, ta có thể coi cường độ sáng ở P **H.16** được gây ra chỉ bởi phần mặt sóng giới hạn bởi lỗ Mo trên, còn chấn động

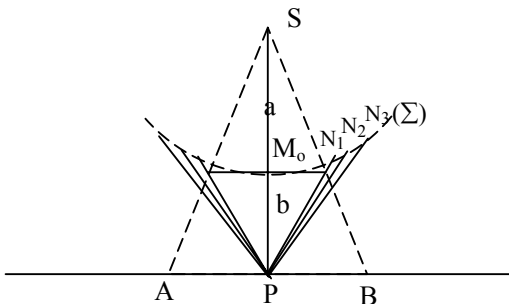
thứ cấp đi từ các phần còn lại của mặt sóng triệt tiêu lẫn nhau vì giao thoa. Như vậy, khi xét cường độ ở P ta chỉ cần xét chùm sáng hẹp giới hạn bởi phần mặt sóng nhỏ bé ấy, nói cách khác, nghĩa là có thể coi là ánh sáng truyền thẳng từ S tới P.

Về mặt lý thuyết, ta có hiện tượng nhiễu xạ khi mặt sóng (bị giới hạn. Trong thực tế, nếu lỗ Mo chứa vài chục đôi Fresnel trở lên, thì hình nhiễu xạ trên màn E không khác gì nhiều so với bóng sáng hình học. Hiện tượng nhiễu xạ chỉ bắt đầu có ảnh hưởng rõ rệt khi lỗ chứa từ 10 đôi Fresnel trở lại (đường kính vào cỡ milimét, hoặc nhỏ hơn, trong điều kiện sử dụng thông thường).

Trong các quang cụ, những lỗ trên màn chắn sáng không quá nhỏ. Chính vì thế, mà khi khảo sát sự tạo ảnh trong các quang cụ, ta vẫn có thể dùng khái niệm tia sáng và áp dụng định luật truyền thẳng.

3. Nhiễu xạ bởi một màn tròn.

Trên hình 16 các bộ phận thí nghiệm tương tự như trên hình 13, chỉ có khác E là một màn chắn hình tròn tâm Mo. Ta hãy khảo sát trạng thái sáng tại điểm P, tâm của bóng tối hình học AB. Nối P với mép màn chắn, đường nối cắt (tại các điểm N1 có $ON_1=b$.



Tiếp tục chia (thành đôi N1N2 với $PN_2 = b' + (/2$, đôi N2N3 với $PN_3 = b' + 2 (/2$.

Lập luận như trước đây, ta đi đến kết luận : chấn động sáng gây ra tại P là do nửa đôi Fresnel đầu tiên, nằm giữa 2 đường tròn N1 và N2. Như vậy tại P, ở giữa bóng tối hình học luôn luôn sáng.

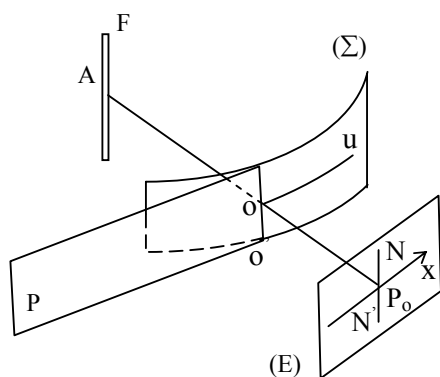
Kết luận bất ngờ trên đây hoàn toàn trái với nguyên lý của quang hình học, lại được thí nghiệm xác nhận, chứng tỏ rằng nguyên lý Huyghen – Fresnel là phù hợp với thực tế.

Dĩ nhiên vì tính đối xứng của hiện tượng, hình nhiễu xạ trên màn M là những vân tròn sáng, tối cùng có tâm P, ở xung quanh bóng đen gây ra bởi màn chắn. Ta hãy xét ảnh hưởng của kích thước màn E tới cường độ sáng tại P.

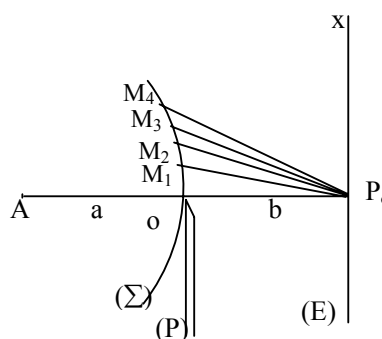
Khi màn chắn bé, thừa số xiên ứng với đới Fresnel đầu tiên (giữa N1 và N2) còn đủ lớn, ở P có cường độ sáng đáng kể. Màn chắn càng lớn, cường độ sáng ở P càng giảm. Khi màn E có kích thước tương ứng với vài chục đới Fresnel đầu tiên hoặc lớn hơn, thì ở P có thể xem như là tối.

4. Nhiễu xạ do bờ thẳng của nửa mặt phẳng.

a/ Sơ đồ thí nghiệm :



H.17a



H.17b

Nguồn sáng là một khe F. Hiện tượng nhiễu xạ gây ra bởi bờ thẳng OO' của một nửa mặt phẳng P. Khe sáng F được đặt song song với OO'. Trên màn E, đường NN' là ranh giới giữa 2 miền sáng tối của ảnh hình học.

Ta chỉ cần khảo sát hiện tượng trên mặt phẳng đối xứng OPU thẳng góc với OO'. Ta khảo sát trạng thái sáng tại điểm P0. Từ khe sáng F, sáng truyền đi theo một mặt trụ (), trục là khe F. Ta chia mặt trụ () thành từng dải theo nguyên tắc như chia đới Fresnel trong trường hợp sóng cầu.

$$P_0O = b, P_0M_1 = b + \frac{\lambda}{2}, P_0M_2 = b + 2 \frac{\lambda}{2}, \dots, P_0M_k = b + k \frac{\lambda}{2}$$

Như vậy mặt sóng () được chia thành các dải song song với OO'. Các dải này càng xa bờ OO' thì càng hẹp.

Cách chia Fresnel trên có hai đặc điểm sau :

- Các chấn động thứ cấp từ hai dải kế tiếp khi đến P0 có pha ngược nhau.
- Diện tích của các dải giảm dần theo thứ tự k, cho nên tác dụng của hai dải kế tiếp không hoàn toàn triệt tiêu nhau.

Vì tính chất đối xứng, các điểm trên màn E và nằm trên một đường thẳng song song với OO' thì ứng với cùng một trạng thái sáng. Do đó trên màn E ta được các vân thẳng, song song với bờ ngăn sáng OO'. Các vân sáng và tối xen kẽ với nhau.

b. Đường xoắn ốc Cornu (Cornuy) :

Gọi u là độ dài của cung OMk, ta có U2 (G

$$\text{Vậy } \quad \hat{c} \quad (3.6)$$

Xét hiệu quang lộ Δ , ta có thể viết từ công thức (3.6) :

$$\Delta = k \frac{\lambda}{2} = \frac{(a+b)u^2}{2ab}$$

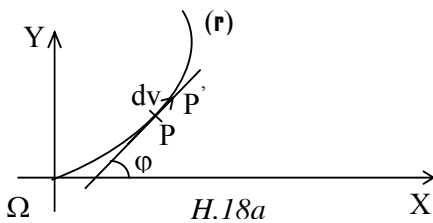
Hiệu số pha tương ứng (so với chấn động đi qua 0)

$$\varphi = \frac{2\pi\Delta}{\lambda} = \frac{2\pi(a+b)u^2}{\lambda \cdot 2ab}$$

đặt \hat{c} hay $\hat{G}u$

Vậy \hat{c}

Xét chấn động tới Po từ một dải vi cấp có bề rộng du ở lân cận Mk. Diện tích của dải vi cấp này tỷ lệ với du, do đó tỷ lệ với dv. Vậy chấn động này được biểu diễn bởi một vectơ PP', có chiều dài là dv và làm với trục góc vị tương (X một góc \hat{G} (trước (X ứng với chấn động tại Po đến từ 0)



Chấn động tổng hợp tại Po được biểu diễn bởi tổng số các vectơ \hat{G} như trên. Sự hợp này cho ta một đường cong r (giả sử các dải tính từ điểm 0 và đi về phía x dương), Hình chiếu của \hat{G} xuống hai trục (X và Y lần lượt là :

$$dX = dv \cdot \cos \varphi = \cos \frac{\pi v^2}{2} \cdot dv$$

$$dY = dv \cdot \sin \varphi = \sin \frac{\pi v^2}{2} \cdot dv$$

Suy ra tọa độ của điểm P ứng với chiều dài v của cung (P là:

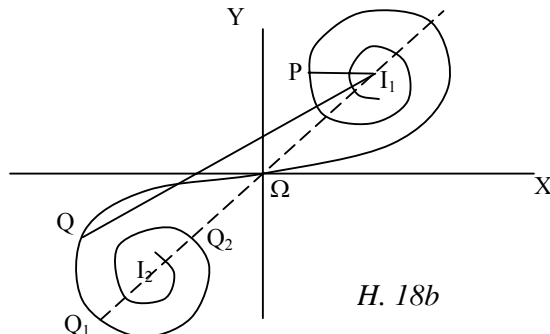
$$X = \int_0^v \cos \frac{\pi v^2}{2} \cdot dv$$

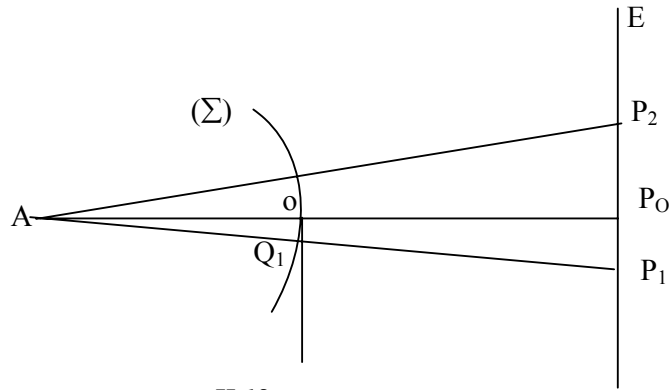
$$Y = \int_0^v \sin \frac{\pi v^2}{2} \cdot dv$$

Các tích phân này được gọi là tích phân Fresnel.

Nhờ vào một bảng tính sẵn các trị số X và Y theo các trị số của v, ta vẽ được đường cong r là một đường xoắn ốc. Nếu ta lấy các trị số của v từ 0 ((nghĩa là lấy mọi trị số của x dương), ta được một đường xoắn ốc bắt đầu từ (và tới một điểm tiệm cận I1 nằm trên đường phân giác của góc Y(X.

Nếu vẽ cả đường (r) ứng với các dải âm (nằm về phía âm), ta được đường xoắn ốc (I2, đối xứng với nửa trên qua (và có điểm tiệm cận là I2. Đường (r) này nhận (làm điểm uốn với tiếp tuyến tại (chính là trục (X. Đường cong (r) được gọi là đường xoắn ốc cornu.





H.18c

c. Khảo sát sự phân bố cường độ sáng trên màn E:

Khi không có màn chắn, tổng hợp biên độ các sóng thứ cấp, ta được nguyên vẹn đường xoắn ốc. Biên độ sáng tại P_o được biểu diễn bởi đoạn $I I_2$. Cường độ sáng tương ứng :

$$I_o = \overline{I_1 I_2}^2$$

Đặt màn chắn dạng nửa mặt phẳng. Đối với điểm P_o , màn chắn che mất nửa âm của đường xoắn ốc. Vì vậy :

$$I_{p_o} = \Omega I_1^2 = \frac{I_o}{4}$$

Vậy tại biên giới của bóng tối hình học, cường độ sáng không triệt tiêu mà bằng $\frac{1}{4}$ cường độ sáng khi không có màn chắn.

Điểm P_1 nằm trong vùng bóng tối. Nối $A P_1$ đường này cắt mặt sóng tại Q_1 (H.18c). Ta chia các dải Fresnel như trước kể từ O_1 . Trường hợp này, màn chắn che hết phần âm và 1 đoạn ở phần đường xoắn ốc, ví dụ đoạn (P (H.18b). Cường độ sáng tại P_1 :

$$I_{p_1} = \overline{P I_1}^2 < \frac{I_o}{4}$$

Điểm P_1 càng nằm sâu trong miền bóng tối trên đường xoắn ốc, điểm P càng tiến dần về điểm tiệm cận I_1 . Như vậy cường độ sáng tiến dần tới 0 khi ra xa ranh giới hình học.

Điểm P_2 nằm trong miền sáng hình học. Tiến hành như trên. Trường hợp này màn chắn chưa che hết phần âm của đường xoắn ốc. Giả sử chỉ che phần $I_2 Q$. Cường độ sáng tại P_2 :

$$I_{p_2} = \overline{Q I_1}^2 > \frac{I_o}{4}$$

P_2 càng ra xa ranh giới trên đường xoắn ốc, điểm Q tiến dần về I_2 . Đến vị trí Q_1 (H.18) ta gặp cực đại đầu tiên với :

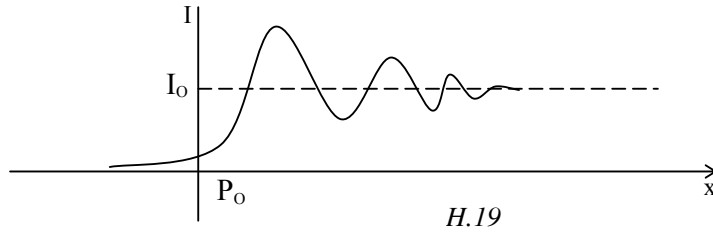
$$I_{p_2} = \overline{Q_1 I_1}^2 > I_o$$

Tiếp tục, đến vị trí Q_2 , ta gặp một cực tiểu với :

$$I_{p_2} = \overline{Q_2 I_1}^2 < I_o$$

Cứ tiếp tục như vậy, từ ranh giới NN' trở ra vùng sáng, ta lần lượt gặp các vân sáng tối xen kẽ nhau. Vân sáng có cường độ lớn hơn I_o một ít, vân tối có cường độ nhỏ hơn I_o một

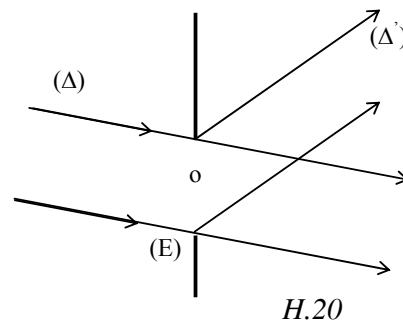
ít. Tính toán cho thấy càng ra xa các vân càng khít lại và cường độ sáng dần đến giá trị tiệm cận I_0 . Hình 19 biểu diễn sự phân bố cường độ sáng nhiễu xạ theo phương Pox.



Chú ý : Các đường xoắn ốc trên đây chỉ dùng để xác định biên độ của chấn động tổng hợp, còn pha của chấn động tổng hợp không được chú ý đến.

SS.5. NHIỄU XẠ FRAUNHOFER.

Trong các hiện tượng ta vừa khảo sát, màn quan một khoảng giới nội. Vì được gọi là nhiễu xạ ở gần ta khảo sát hiện tượng sáng song chiếu đến (H.20). Cụ thể là khảo sát theo các phương (Δ) . Như quan sát P đều ở vô cực.

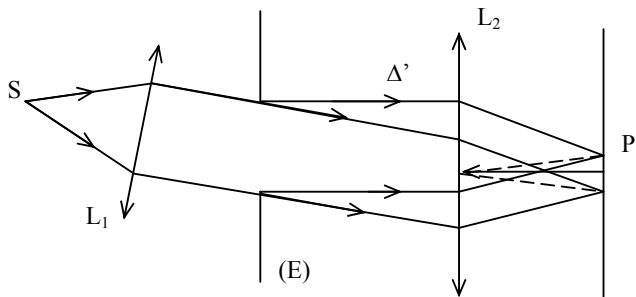


nhiều xạ Fresnel mà chúng sát được đặt cách vật cản vậy nhiễu xạ Fresnel còn vật cản. Tiếp theo đây chúng nhiễu xạ của một chùm tia màn chắn E có mang lỗ 0 cường độ ánh sáng nhiễu xạ vậy nguồn sáng S và điểm

So với trường hợp nhiễu xạ Fresnel, cách giải quyết vấn đề ở đây có nhiều thuận lợi hơn : trong công thức tổng quát (2.4), và các khoảng cách r và r' đều lớn vô hạn, vì là sóng phẳng, thừa số biên độ G trở thành một hằng số, các chấn động thứ cấp gửi từ các diện tích vi cấp của mặt sóng đều truyền theo cùng một phương (Δ') , vì vậy thừa số xiên là k có cùng một trị số, nên có thể đưa ra ngoài dấu tích phân. Các tia sáng tới và tia sáng nhiễu xạ đều là nhưng tia song song, từ đó hiệu quang giữa chúng có thể tính được bằng những công thức đơn giản. Vì những lẽ trên, ta có thể tính tích phân (2.4) đến kết quả cuối cùng và có những trường hợp có thể tính đơn giản.

1. Sơ đồ thí nghiệm.

Để dễ quan sát thường người ta bố trí thí nghiệm theo hình 21. Nguồn sáng S đặt tại tiêu điểm của thấu kính hội tụ L_1 .

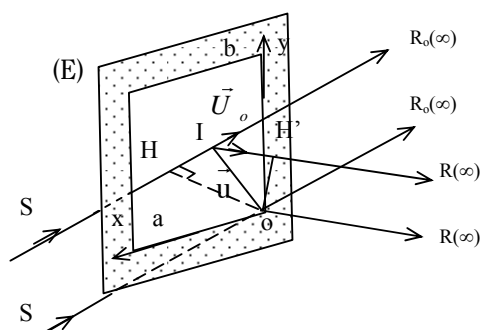


Chùm tia song song nhiễu xạ theo phương (Δ') , được hội tụ bằng thấu kính L_2 tại P' trên mặt phẳng tiêu L_2 .

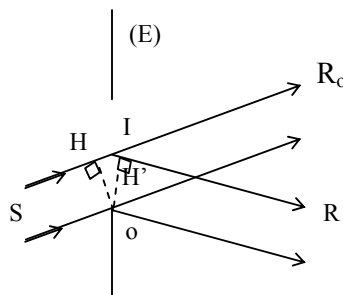
2. Nhiễu xạ do một lỗ hình chữ nhật.

Giả sử lỗ hổng trên màn E có dạng chữ nhật các cạnh là a, b.

Chiếu một chùm tia tới song song theo phương SRO qua lỗ. Ta hãy khảo sát cường độ ánh sáng nhiễu xạ theo phương R.



H. 22



H.23

Chọn tia SOR làm tia gốc. Hiệu quang lộ giữa hai tia SIR và SOR là:

$$\Delta = HI + IH' = (SIR) - (SOR)$$

Chọn các trục tọa độ trên mặt phẳng của lỗ là Ox, Oy. Gọi \vec{G} là vectơ đơn vị trên tia tới SI.

Ta có: $HI = \vec{G} \cdot (\vec{ox} + \vec{oy})$

Trong đó (α_o, β_o) là các cosin định hướng của \vec{G} :

$$\alpha_o = \cos(\vec{Ox} \cdot \vec{u}_o), \beta_o = \cos(\vec{Oy} \cdot \vec{u}_o)$$

x, y là các tọa độ của I.

Gọi \vec{G} là vectơ đơn vị trên tia nhiễu xạ IR với các cosin định hướng là (α, β) .

Ta có:

$$IH = \vec{IO} \cdot \vec{u} = -\alpha x - \beta y$$

Vậy: $\Delta = ((\alpha_o - \alpha)x + (\beta_o - \beta)y)$

Nếu chọn chấn động ở R (Δ) ứng với tia SOR làm gốc vị tương thì chấn động ở R (Δ) truyền đi từ một diện tích vi cấp $d = dx \cdot dy$ ở lân cận điểm I là

$$ds = K(\theta, \theta') d\sigma \cos\left(\omega t - \frac{2\pi\Delta}{\lambda}\right)$$

$$ds = K(\theta, \theta') \cos\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}(\alpha_o - \alpha)x - \frac{2\pi}{\lambda}(\beta_o - \beta)y\right] dx \cdot dy$$

Chấn động tổng hợp ở R (Δ) là do sự giao thoa của các chấn động thứ cấp đi từ các diện tích vi cấp lấy trên diện tích của lỗ chữ nhật.

Ta có:

$$S_R = K \int_0^a \int_0^b \cos\left[\omega t - \frac{2\pi}{\lambda}(\alpha_o - \alpha)x - \frac{2\pi}{\lambda}(\beta_o - \beta)y\right] dx \cdot dy \quad (5.3)$$

Thực hiện tích phân (5.3), đi đến kết quả:

$$S_R = K a b \frac{\sin \frac{\pi}{\lambda} (\alpha_0 - \alpha) a}{\frac{\pi}{\lambda} (\alpha_0 - \alpha) a} \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{\lambda} (\beta_0 - \beta) b}{\frac{\pi}{\lambda} (\beta_0 - \beta) b} \cdot \cos \left[\alpha t - \frac{\pi (\alpha_0 - \alpha) a}{\lambda} - \frac{\pi (\beta_0 - \beta) b}{\lambda} \right] \quad (5.4)$$

Tích số K.a.b có thể đặt bằng A₀.

Từ (5.4) ta còn thấy rằng chấn động tổng hợp có cùng pha với chấn động thứ cấp xuất phát từ điểm ở giữa lỗ chữ nhật với tọa độ I).

c. Các trường hợp giới hạn:

Biên độ AR của chấn động tổng hợp là tích của các hàm số có dạng sinu/u. Trong trường hợp a và b rất lớn ta có và AR (0. Như vậy sẽ không có ánh sáng nhiễu xạ theo phương R nếu như (((o và ((β₀.

Khi (= (o và (= (o nghĩa là phương R về trùng với phương R₀ thì phương G và AR = A₀.

Vậy A₀ là biên độ chấn động tổng hợp theo phương R₀, nghĩa là ở ảnh hình học.

3. Nhiễu xạ do một khe hẹp.

a/ Sơ đồ thí nghiệm :

Khe hẹp là trường hợp riêng của lỗ chữ nhật khi a rất nhỏ, ta có b >> a, xuất phát từ biên độ sóng tổng hợp :

$$A_R = A_0 \frac{\sin \frac{\pi}{\lambda} (\alpha_0 - \alpha) a}{\frac{\pi}{\lambda} (\alpha_0 - \alpha) a} \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{\lambda} (\beta_0 - \beta) b}{\frac{\pi}{\lambda} (\beta_0 - \beta) b} \quad (5.5)$$

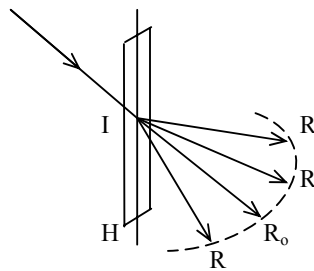
Ta thấy :

+ Nếu (o ((thì G hay I = A₂R = 0

+ Nếu (o = (thì

Khi đó : AR = A₀I

Vậy ta chỉ có ánh sáng nhiễu xạ theo các phương sao cho (=(o, nghĩa là theo các phương hợp với Oy một góc bằng góc của phương tới hợp với Oy. Hình 24 giúp ta hình dung sự phân bố chùm tia nhiễu xạ từ là các phương nhiễu xạ. Các tia nón tròn xoay có trục đối xứng là cosin bằng (o. Nếu ta hứng chùm kính hội tụ, thì ảnh nhiễu xạ sẽ thâu kính. Đó chính là giao tuyến nón trên.

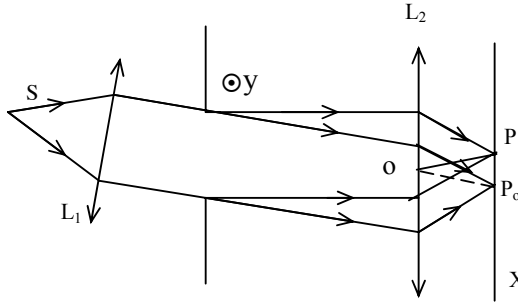


H.24

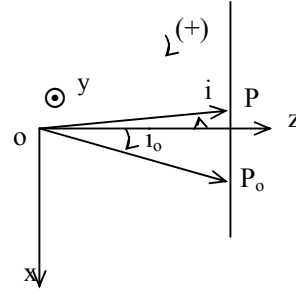
Hình 24 giúp ta hình dung sự phân bố chùm tia nhiễu xạ từ điểm I. IR₀ là phương tới, IR nhiễu xạ tựa trên một mặt IH (// Oy), nửa góc ở đỉnh có tia nhiễu xạ bằng một thấu hiện lên mặt phẳng tiêu của mặt phẳng tiêu với mặt

Ta xét trường hợp các thí có chùm tia tới gần vuông góc trên được coi một cách gần đúng là một mặt phẳng thẳng góc với Oy. Sơ đồ thí nghiệm như hình vẽ 25.

thí nghiệm, dùng trong thực tế tới Oy, khi đó mặt nón nói



H. 25



H. 26

Kết quả là trên màn ảnh, ảnh nhiễu xạ thu về một đường thẳng PX thẳng góc với khe.

b. Hình ảnh nhiễu xạ :

Trong hình 25, bề dài b của khe thẳng góc với mặt của hình vẽ. Thấu kính L_1 tạo chùm tia sáng song song chiếu tới khe bề rộng a . Thấu kính L_2 hội tụ ánh sáng nhiễu xạ lên mặt phẳng tiêu của nó. Như trên đã phân tích, chỉ có ánh sáng nhiễu xạ trên đường thẳng PoX .

Để xác định vị trí các điểm tối và các điểm sáng, ta xuất phát từ công thức (5.5) với $(= (o$, ta có :

$$A_R = A_o \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{\lambda} (\alpha_o - \alpha) a}{\frac{\pi}{\lambda} (\alpha_o - \alpha) a} \quad (5.6)$$

Để thuận tiện ta dùng hệ thức tọa độ mới như trên hình 26. Góc tọa độ O được đặt tại quang tâm của vật kính L_2 .

$i_o = (oz, OP_o)$ và $i = (oz, OP)$. Các góc có góc theo quy ước chung.

$$\alpha_o = \cos(Ox, OP_o) = \cos[(Ox, Oz) + (Oz, OP_o)] = \cos\left(-\frac{\pi}{2} + i_o\right) = \sin i_o$$

$$\alpha = \cos(Ox, OP) = \cos[(Ox, Oz) + (Oz, OP)] = \cos\left(\frac{\pi}{2} + i\right) = -\sin i$$

Vậy trong hệ tọa độ mới biểu thức biên độ sóng tổng hợp sẽ là:

$$A_R = A_o \frac{\sin \frac{\pi}{\lambda} (\sin i_o - \sin i) a}{\frac{\pi}{\lambda} (\sin i_o - \sin i) a} = A_o \frac{\sin \frac{\pi}{\lambda} (\sin i - \sin i_o) a}{\frac{\pi}{\lambda} (\sin i - \sin i_o) a} \quad (5.7)$$

Trường hợp i_o và i , đều bé, ta có :

$$A_R = A_o = \frac{\sin \frac{\pi}{\lambda} (i - i_o) a}{\frac{\pi}{\lambda} (i - i_o) a} \quad (5.8)$$

* Vị trí các điểm tối :

$$AR = 0 \text{ khi } \sin U \text{ với } \hat{G}$$

$$\sin \frac{\pi}{\lambda}(i - i_o)a = 0 \text{ khi : } \frac{\pi}{\lambda}(i - i_o)a = k\pi$$

$$\boxed{(i - i_o) = k \frac{\lambda}{a}} \text{ với } k = (1, (2, (\dots\dots$$

Khoảng cách góc giữa 2 điểm tối kế tiếp là $(i = / a$

$$\text{Khoảng cách dài giữa chúng là } (x = (F/a \quad (5.9)$$

* Vị trí các điểm sáng:

Biên độ sáng tỉ đối \hat{G} và \hat{G}_a

Để xác định vị trí các điểm sáng ta tìm cực trị của hàm số :

$$Y = \frac{\sin u}{u}$$

Nghĩa là tìm nghiệm của \hat{c}

$$\text{Suy ra : } \text{tgu} = u \quad (5.10)$$

Phương trình (5.9) được giải bằng phương pháp đồ thị, trình bày trên hình (27). Nghiệm số tìm được là :

$$u = \frac{\pi}{\lambda}(i - i_o)a = (2k + 1) \frac{\pi}{2} \text{ với } k = \pm 1, \pm 2, \dots\dots$$

Ứng với các vị trí

$$\boxed{(i - i_o) = (2k + 1) \frac{\lambda}{2a}}$$

Hay ứng với các

$$F(i - i_o) = (2k + 1) \frac{\lambda F}{2a}$$

Khoảng cách giữa cũng chính bằng tối kế tiếp.

* Điểm sáng

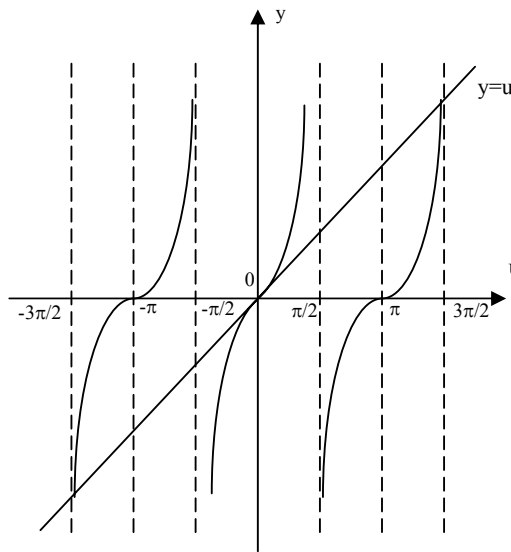
Tại P_0 , ứng với trung tâm, với cường độ sáng giữa hai điểm tối kế tiếp $F\lambda/a$.

* Sự phân bố

$$\text{Cường độ sáng tỉ đối : } \frac{I_R}{I_o} = \left(\frac{A_R}{A_o} \right)^2 = \left(\frac{\sin u}{u} \right)^2$$

Tại các điểm sáng : $u = (2k + 1)\pi, \sin u = 1$

Vậy



H. 27

góc :

khoảng cách đến P_0 :

$$(5.11)$$

2 điểm sáng kế tiếp η , khoảng cách giữa 2 điểm

trung tâm:

$I = I_o$ ta có cực đại sáng độ sáng $I_o = A^2_0$. Hai cách P_0 một khoảng $(x =$

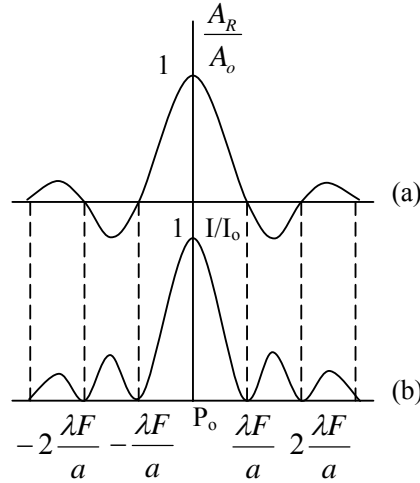
cường độ sáng:

$$\frac{I_R}{I_o} = \frac{4}{(2k+1)^2 \pi^2}$$

Đối với 2 điểm sáng ở kế tiếp cực đại sáng trung tâm, ứng với $k = 1, k = -2$, ta có :

$$\frac{I_1}{I_o} = \frac{4}{3^2 (3,14)^2} = 4\%$$

Tiếp đó :



H. 28

$$\frac{I_2}{I_o} = \frac{4}{5^2 (3,14)^2} = 1,6\%$$

Hơn 90% năng lượng ánh sáng tập trung ở cực đại nhiễu xạ trung tâm. Có thể biểu diễn sự phân bố biên độ chấn động tổng hợp và cường độ sáng nhiễu xạ dọc theo trục PoX như trên các hình 28a và 28b. Trên đây chúng ta đã khảo sát hình ảnh nhiễu xạ với nguồn sáng điểm S. Hình nhiễu xạ là các điểm sáng phân bố trên trục PoX, cực đại trung tâm tại P_oS.

Để dễ quan sát, người ta dùng nguồn sáng S có dạng khe hẹp, mỗi điểm trên khe cho các cực đại nhiễu xạ như ta vừa khảo sát. Các điểm trên khe liên tục và các hình nhiễu xạ cũng liên tục, các cực đại cùng nằm trên cùng một đường thẳng. Do đó, trong trường hợp này, ta quan sát thấy hệ vân sáng tối hình thẳng song song với khe S.

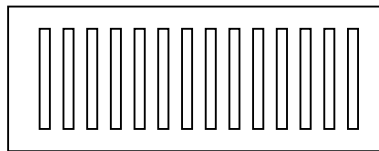
4. Nhiễu xạ qua nhiều khe hẹp - cách tử nhiễu xạ.

a/ Cấu tạo của cách tử và cách bố trí thí nghiệm:

Cách tử phẳng gồm các khe hẹp song song cách đều nhau, và cùng nằm trên một mặt phẳng (H.29). Bề rộng của mỗi khe là a, khoảng không trong suốt giữa 2 khe có bề rộng là b - Khoảng cách giữa 2 khe kế tiếp là d :

$$d = a + b \quad (5.9)$$

d được gọi là chu kỳ hay của cách tử là N, bề rộng của

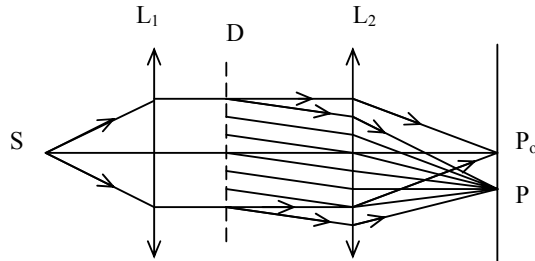


hằng số của cách tử. Số khe cách tử là $L = d \cdot N$ (5.10)

H. 29

Cấu tạo của cách tử rất tinh vi, trên bề rộng 1 mm có đến hàng trăm, hàng ngàn khe Có nhiều loại cách tử có cấu tạo riêng biệt nhưng đều dựa theo nguyên tắc : mặt sóng của chùm tia sáng tới được chia thành những phần đều đặn, lần lượt truyền qua và bị ngăn lại bởi cách tử. Cách tử D được đặt như sơ đồ thí nghiệm trên hình 30 (kích thước của cách tử

đã được phóng đại). Sơ đồ này hoàn toàn tương tự sơ đồ thí nghiệm nhiễu xạ qua một khe hẹp trên hình 25 - Trở lại phân nhiễu xạ qua một khe ta thấy rằng cực đại trung tâm P_0 ở tại vị trí ảnh hình học của S qua hai thấu kính, hoàn toàn không phụ thuộc vào vị trí của khe hẹp, khoảng cách giữa 2 cực đại và 2 cực tiểu kế tiếp bằng F/a (H.28b), chỉ phụ thuộc vào bề rộng a của mỗi khe. Trong thí nghiệm trên, ánh sáng bị nhiễu xạ qua N khe, nhưng vì lý lẽ nêu ở trên, N hình nhiễu xạ từng khít nhau, nên có thể suy ra rằng biểu đồ chấn động tổng hợp có dạng hình 28a với thừa số nhân N.



H. 30

Tuy nhiên, khác với trường hợp nhiễu xạ qua một khe, ở đây còn có hiện tượng giao thoa của N chấn động thứ cấp xuất phát từ N khe. Trên hình 30 cho thấy N chấn động thứ cấp nhiễu xạ theo phương OP, và giao thoa với nhau tại P. Từ phân tích định tính như trên, chúng ta sẽ tiến hành tính toán.

b/ Tổng hợp biên độ các chấn động thứ cấp N khe:

Biên độ chấn động thứ cấp, nhiễu xạ theo phương OP, từ mỗi một khe, đã được tính trong biểu thức (5.7) :

$$A_{1p} = A_o \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{\lambda} (\sin i - \sin i_o) a}{\frac{\pi}{\lambda} (\sin i - \sin i_o) a}$$

Trước đây chúng ta đã xác định chấn động thứ cấp từ mỗi khe có pha như chấn động thứ cấp từ điểm giữa khe. Như vậy có thể tính độ lệch pha giữa 2 khe kế tiếp khi đến P.

Hiệu quang lộ ($= dsini - dsinio = d (\sin i - \sin i_o)$)

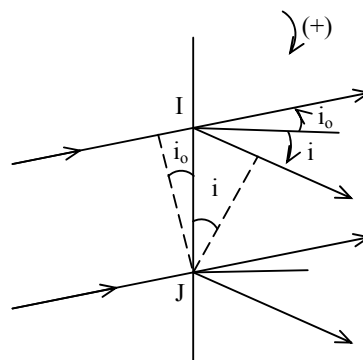
Độ lệch pha : \hat{c}

Chúng ta tổng hợp N chấn động có biên độ bằng nhau A_{1P} và độ lệch pha của 2 chấn động kế tiếp là \hat{c} .

Với phương pháp cộng bằng sơ đồ vectơ, kết quả theo công thức (2.2) của chương giao thoa cho ta biên độ của chấn động tổng hợp :

$$A_{NP} = A_{1p} = \frac{\sin N \frac{\Delta\varphi}{2}}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}}$$

$$A_{NP} = A_o \frac{\sin u}{u} \cdot \frac{\sin N \frac{\Delta\varphi}{2}}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}}$$



H. 30'

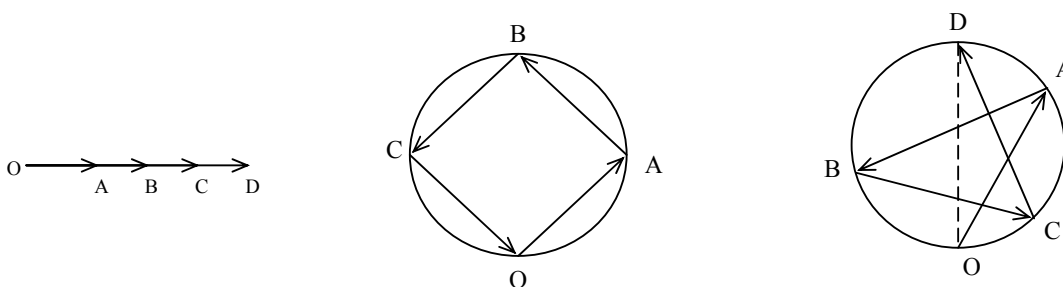
Cường độ sáng nhiễu xạ tại P :

$$I_p = A_o^2 \frac{(\sin u)^2}{u^2} \cdot \frac{\left(\sin N \frac{\Delta\varphi}{2}\right)^2}{\left(\sin \frac{\Delta\varphi}{2}\right)^2} \quad (5.12)$$

Khảo sát hàm số (5.12) chúng ta sẽ xác định được các cực đại và cực tiểu nhiễu xạ. Công việc sẽ thuận tiện hơn nếu tách (5.12) thành 2 thừa số. Dạng của thừa số thứ nhất $\left(\frac{\sin u}{u}\right)^2$ đã biết trên hình 28b, với :

* Vị trí các cực tiểu nhiễu xạ là $X = +_ - k \lambda F/a$

Các cực đại và cực tiểu của thừa số sau được phân tích bằng cách trở lại sơ đồ cộng vectơ.



(a) $\Delta\varphi = k2\pi$

(b) $N\Delta\varphi = k2\pi$

(c) $N\Delta\varphi = (2k+1)\pi$

với $k=0, (1, (2$

$k=(1, (2, \dots)((0, N, 2N)$

$k=(1, (2, \dots$

cho cực đại chính

Hình 31

Chú ý : Độ lệch pha của chẵn động thứ N so với chẵn động thứ nhất là $(N - 1)\lambda$

* Vị trí các cực đại chính:

Từ hình 31a, ta có điều kiện cho các cực đại chính :

$$\Delta\varphi = 2k\pi$$

$$\frac{2\pi}{\lambda} d(\sin i - \sin i_o) = 2k\pi$$

$$\boxed{\sin i - \sin i_o = k \frac{\lambda}{d}} \quad \text{với } k = 0, +_ - 1, +_ - 2 \quad (5.13)$$

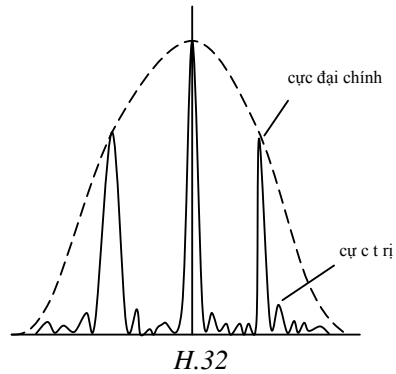
Khoảng cách góc giữa 2 cực đại chính kế tiếp là λ/d

Khoảng cách trên màn quan sát là $X = F \lambda/d$ (5.14)

Cường độ sáng các cực đại chính

$$V_i \frac{\sin N \cdot \frac{\Delta\varphi}{2}}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}} = \frac{\sin(Nk\pi)}{\sin k\pi} = N$$

$$\text{Cho nên } I_{\text{Max}} = N^2 A_0^2 \frac{(\sin u)^2}{u^2}$$



- Vị trí các cực tiểu (giao thoa) từ hình 31b, các cực tiểu giao thoa ứng với

$$N \Delta\varphi = k\pi \quad \text{với } k (0, N, 2N \dots)$$

Ứng với $\sin i - \sin i_0 = \bar{u}$

Khoảng cách giữa hai cực tiểu liên tiếp trên màn là \bar{G} (với i và i_0 nhỏ).

Với $k = N - 1$ và $k = N + 1$, ta có hai cực tiểu bên cạnh cực đại chính (ứng với $k - 1$ trong công thức 5.13). Vậy bề rộng của cực đại chính là :

$$\left[(N+1) \frac{\lambda}{Nd} - (N-1) \frac{\lambda}{Nd} \right] F = \frac{2\lambda F}{Nd}$$

- Vị trí các cực đại phụ

Từ hình (31c) ta có điều kiện cực đại phụ

$$N \Delta\varphi = (2k + 1)\pi$$

$$\text{Suy ra } \sin i - \sin i_0 = (2k + 1) \frac{\lambda}{2Nd}$$

Khoảng cách góc giữa 2 cực đại phụ kế tiếp : (λ/Nd)

Khoảng cách trên màn quan sát là $(X = F (\lambda/Nd)$ (khi xét i, i_0 nhỏ) (5.15)

Khoảng cách này nhỏ so với khoảng cách trong (5.14) N lần

Cường độ các cực đại phụ :

$$V_i \frac{\sin N \cdot \frac{\Delta\varphi}{2}}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}} = \frac{\sin(2k+1) \frac{\pi}{2}}{\sin(2k+1) \frac{\pi}{2N}}$$

$=\hat{G}$ (với k không lớn lắm)

Cường độ sáng : $I_{\text{max}} = N^2 A_0^2 \hat{G}$

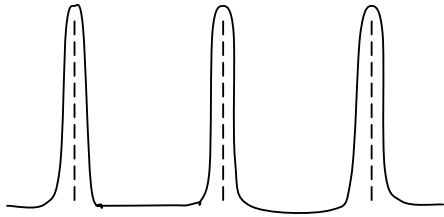
Với $k = 1$, tỉ số cuối cùng cỡ 4%.

Vậy cường độ sáng của các cực đại phụ nhỏ hơn cường độ sáng các cực đại chính nhiều lần.

- Ở trên ta đã khảo sát một cách tổng quát, bây giờ ta để ý đến trường hợp riêng của cách tử. Với quang cụ này, số khe trên một đơn vị chiều dài khá lớn nên bề rộng của mỗi khe rất nhỏ, và chu kỳ của cách tử rất nhỏ (cỡ λ). Hậu quả là trong công thức:

$$I_p = A^2_o \left[\frac{\sin \frac{\pi}{\lambda} (\sin i - \sin i_o) a}{\frac{\pi}{\lambda} (\sin i - \sin i_o) a} \right]^2 \left[\frac{\sin \frac{N\Delta\varphi}{2}}{\sin \frac{\Delta\varphi}{2}} \right]^2$$

Thừa số thứ 2 biến thiên không đáng kể khi góc nhiễu xạ i thay đổi. Do đó sự biến thiên của I_p trên thực tế là do sự biến thiên của thừa số thứ 3 : \hat{G} . Thừa số này xuất hiện là do sự giao thoa giữa các chùm tia đi qua các khe của cách tử. Vậy chính hiện tượng giao thoa đóng vai trò quan trọng trong sự phân bố cường độ sáng trên màn ảnh. Các vân sáng ta thấy trên màn là vân do thừa số thứ 3, nghĩa là các vân giao thoa. Trên thực tế cường độ các cực đại phụ không đáng kể nên trong trường hợp này ta thường không để ý đến và thấy trên màn ảnh một hệ thống gồm các vân sáng hẹp, cách nhau bởi những khoảng tối khá rộng.



Phương của các vân sáng này như ta đã biết được xác định bởi công thức

$$\sin i - \sin i_o = k\lambda \frac{1}{d}$$

Ta thấy \hat{G} chính là số khe n trên một đơn vị chiều dài của cách tử

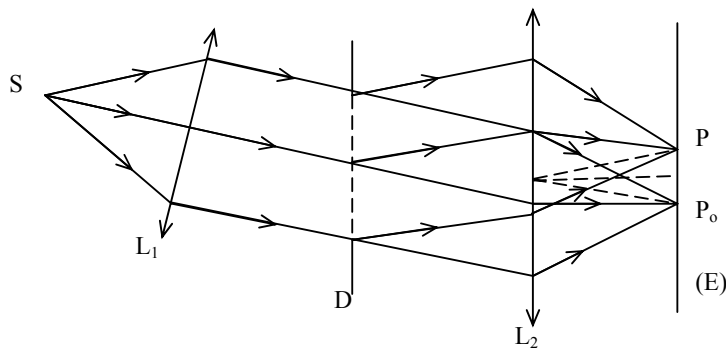
Vậy :

$$\sin i - \sin i_o = k\lambda n$$

(5.19)

Hình 32

Hình vẽ 30 được vẽ lại một cách tổng quát như hình 34.



H. 33

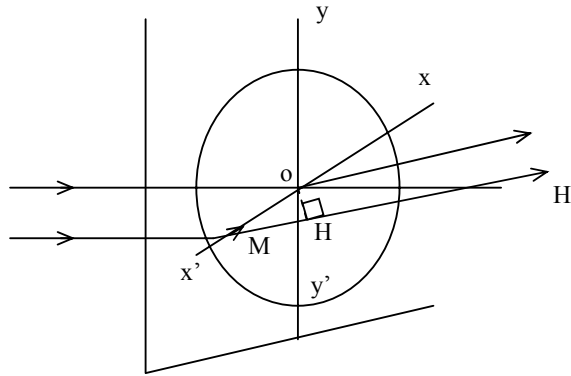
Lưu ý : Vì ta có điều kiện $-1 \leq \sin i \leq +1$

Nên số vân sáng giao thoa cho bởi cách tử bị giới hạn. Trong trường hợp tổng quát số vân sáng không đối xứng ở hai bên ảnh hình học.

5. Nhiễu xạ do một lỗ tròn.

a/ Cách bố trí dụng cụ thí nghiệm (H.35)

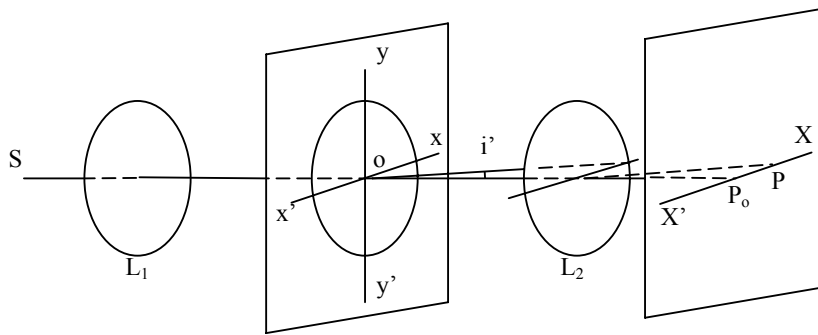
Thấu kính L_1 tạo từ nguồn điểm S một chùm tia sáng song song thẳng góc với mặt phẳng D của hồng tròn. Thấu kính L_2 đưa ảnh nhiễu xạ ở vô cực, gây ra bởi hồng tròn, về một màn ảnh E . P_o là ảnh hình học của S cho bởi hệ thống.



H. 34

Do sự đối xứng, ta được trên màn E các vân nhiễu xạ tròn cùng tâm P_0 .

b/ Cường độ ánh sáng nhiễu xạ tại một điểm.(H.34)



H. 35

Vì hiện tượng có tính đối xứng xung quanh P_0 , nên ta chỉ cần xét hiện tượng trên đường $X'X$.

Gọi M là một điểm nằm trên đường kính $X'X$ của hồng tròn và có hoành độ là x.

Hiệu quang độ giữa hai tia nhiễu xạ đi qua O và qua M là:

($= MH = x \sin i' = xi'$ (ta chỉ cần lưu ý tới trị số tuyệt đối của các góc nhiễu xạ i'). Hay hiệu số pha là :

$$\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda} = \frac{2\pi xi'}{\lambda} = \mu x \quad \text{với } \mu = \frac{2\pi}{\lambda} i'$$

Nếu chấn động tại $R_0(t)$ có dạng $\cos(\omega t)$ thì chấn động tại P (ứng với góc nhiễu xạ i') gây ra bởi một diện tích d (vi cấp lấy gần điểm M (như hình vẽ)

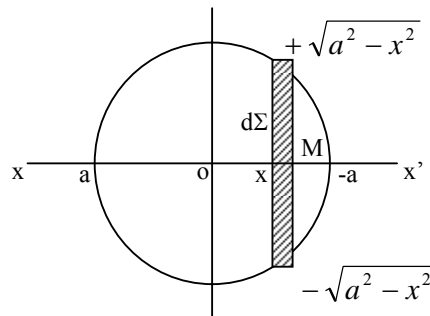
$$ds = d \cdot \cos(\omega t + \mu x) \quad \text{với}$$

$$d\Sigma = 2 \sqrt{a^2 - x^2} \cdot dx$$

Chấn động tại P gây ra bởi toàn hồng tròn là :

$$S = \int ds = \int d\Sigma \cos(\omega t + \mu x)$$

$$= 2 \int_{-a}^{+a} \sqrt{a^2 - x^2} \cos(\omega t + \mu x) \cdot dx$$



H. 36

$$= 2 \left[\int_{-a}^{+a} \sqrt{a^2 - x^2} \cos \mu x dx \right] \cdot \cos \omega t$$

$$= 4 \int_{-a}^{+a} \sqrt{a^2 - x^2} \cos \mu x dx \cdot \cos \omega t$$

Vậy biên độ chấn động tại P là (Chấn động tổng hợp đồng pha với chấn động đi qua tâm hồng).

$$A = 4 \int_{-a}^{+a} \sqrt{a^2 - x^2} \cos \mu x dx = 4a \int_{-a}^{+a} \sqrt{1 - x^2/a^2} \cos \mu x dx$$

Đặt \hat{G} với \hat{G}

$$A = 4a^2 \int_0^1 \sqrt{1 - u^2} \cos \mu u du$$

Trong biểu thức của A, tích phân tính được là :

$$\int_0^1 \sqrt{1 - u^2} \cos \mu u du = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{J_1(\mu)}{\mu}$$

Trong đó $J_1(\mu)$ là hàm số Bessel bậc 1

Vậy $A = \hat{G}$ Đặt $(a^2 = A_0)$

$$A = A_0 \frac{2J_1(\mu)}{\mu} \quad (5.20)$$

Vậy cường độ sáng tại P là :

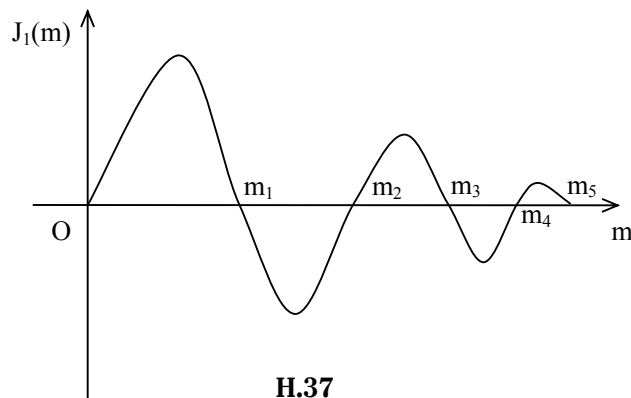
$$I = I_0 \left[\frac{2J_1(\mu)}{\mu} \right]^2 \quad (5.21)$$

c/ Tính chất của hàm $J_1(\mu)$:

- Đường biểu diễn của $J_1(\mu)$ theo μ :

Khi μ có trị số khá lớn, đường biểu diễn của $J_1(\mu)$ theo μ có thể coi là một đường hình sin tắt dần, có dạng :

$$J_1(\mu) = \sqrt{\frac{2}{\pi \mu}} \sin\left(\mu - \frac{\pi}{4}\right) \quad (5.22)$$



đoạn m_i, m_j gần như không đổi khi m khá lớn

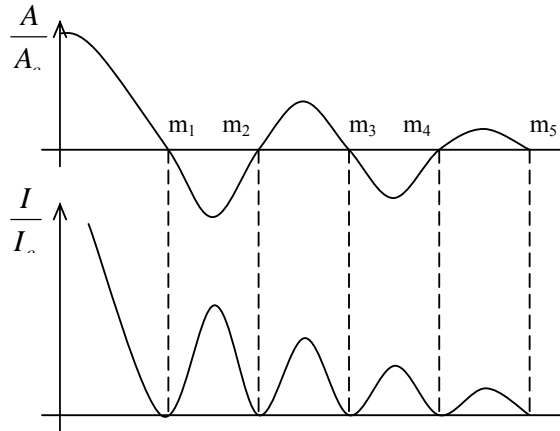
+ Khi $m \rightarrow 0$ thì $\frac{J_1(m)}{m} \rightarrow \frac{1}{2}$

Do đó \hat{c}

và \hat{c}

- Đường biểu diễn của \hat{G} và \hat{G} theo m

Đường biểu diễn của \hat{G} theo m cho biết sự biến thiên của cường độ sáng tương đối trên màn quan sát (m tỷ lệ với d). Ta thấy cường độ sáng giảm đi rất nhanh từ tâm Po ra ngoài.



H. 38

d/ Xác định vị trí vân nhiễu xạ:

* Vân tối : ứng với $J_1(m) = 0$

hay $\sin\left(m - \frac{\pi}{4}\right) = 0$

$$m - \frac{\pi}{4} = k\pi$$

$$m = k\pi + \frac{\pi}{4} \quad (5.23)$$

	Trị số gần đúng (từ công thức gần đúng)	Trị số đúng (từ hàm Bessel)
Vân tối 1 :	$m_1 = \hat{G} = 3,927$	$m_1 = 3,832$
Vân tối 2 :	$m_2 = \hat{G} = 7,068$	$m_2 = 7,015$
Vân tối 3 :	$m_3 = \hat{G} = 10,210$	$m_3 = 10,173$

Càng xa tâm, các vân càng cách đều nhau

Đặc biệt, khi ta xét vân tối 1 :

Ta có : $m = (a = \hat{G}$

suy ra :

$$d = \frac{\lambda F}{2\pi a} m$$

Ứng với vân tối 1, ta có $m_1 = \dot{G}$

$$\text{Hay } d = \frac{5 \lambda F}{8 a} \quad (5.24)$$

Hay bán kính góc nhìn từ quang tâm thấu kính L2 là :

$$i'_1 = \frac{5 \lambda}{4 2a} \quad (5.25)$$

Với $2a =$ đường kính của hồng tròn

Các trị số đúng suy từ hàm số Bessel là :

$$i'_1 = 1,22 \frac{\lambda}{2a} \quad (5.26)$$

$$d_1 = 1,22 \frac{\lambda F}{2a} \quad (5.27)$$

* Vân sáng : ứng với \dot{G}

$$\text{hay } m - \frac{\pi}{4} = (2k + 1) \frac{\pi}{2}$$

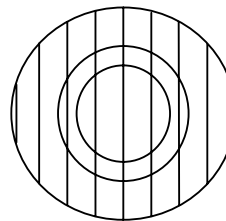
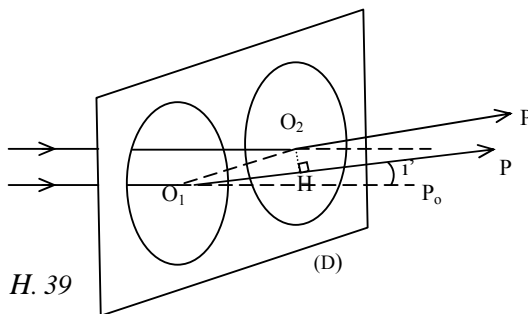
$$\text{Suy ra } m = k\pi + \frac{3\pi}{4} \quad (5.28)$$

	Trị số gần đúng (từ công thức gần đúng)	Trị số đúng (từ hàm Bessel)
Vân sáng 1 :	$m_1 = \dot{G} = 5,489$	$m_1 = 5,136$
Vân sáng 2 :	$m_2 = \dot{G} = 8,639$	$m_2 = 8,417$

Ta thấy trong trường hợp này, sự chênh lệch khá lớn nên không thể dùng công thức gần đúng để xác định vị trí vân sáng.

6. Nhiễu xạ do hai lỗ tròn.

Cách bố trí dụng cụ giống như hình 32 nhưng trên màn chắn sáng D có hai lỗ tròn giống hệt nhau, có các tâm là O₁ và O₂ cách nhau một đoạn ?.



Vị trí của vân nhiễu xạ không tùy thuộc vị trí của lỗ tròn trên màn D. Do đó các vân nhiễu xạ gây ra bởi hai lỗ tròn thì trùng nhau. Xét một điểm P trên màn E. Mỗi lỗ tròn gây ra tại P một chấn động sáng có biên độ là :

$$A = A_0 \frac{2J_1(m)}{m}$$

Và có pha bằng pha của chấn động đi qua tâm của lỗ tròn. Vậy hiệu số pha giữa hai chấn động đi qua hai lỗ tròn chính là hiệu số pha giữa hai tia đi qua hai tâm.

Hiệu quang lộ giữa hai tia đi qua hai tâm O_1, O_2 là

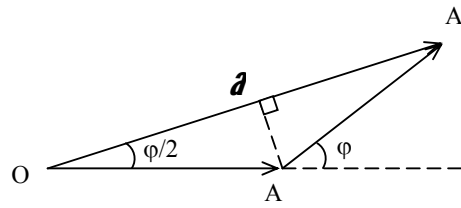
$$\delta = O_1H = \lambda \cdot \sin i = \lambda \cdot i'$$

Hiệu số pha tương ứng

$$\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi i'}{\lambda} \ell$$

Biên độ chấn động tổng hợp

$$A = 2A \cos \frac{\varphi}{2}$$



H. 41

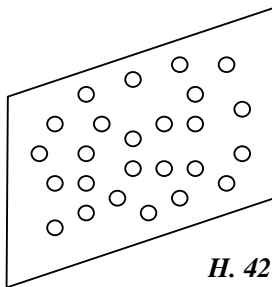
Hay
$$A = 2A_0 \cdot \frac{2J_1(m)}{m} \cdot \cos \frac{\pi i'}{\lambda} \ell \quad (5.29)$$

Thừa số G là do hiện tượng nhiễu xạ bởi lỗ tròn. Thừa số thứ hai \hat{G} là do sự giao thoa giữa hai chùm tia đi qua hai lỗ tròn này. Trên màn E, trong các vân nhiễu xạ tròn, ta thấy những vân giao thoa thẳng (h.38).

Nếu chùm tia tới không thẳng góc với mặt phẳng D mà có góc tới là i , công thức (5.29) trở thành :

$$A = 2A_0 \frac{2J_1(m)}{m} \cdot \cos \frac{\pi(i' - i)\ell}{\lambda} \quad (5.30)$$

7. Nhiễu xạ do n lỗ tròn giống nhau phân bố bất kỳ.



H. 42

Tại một điểm P trên màn E, mỗi lỗ tròn tạo một chấn động là:

$$s = A \cos(\omega t - \varphi)$$

Chấn động tổng hợp tại P

$$S = \sum s = \sum A \cos(\omega t - \varphi)$$

$$S = A \cos \omega t \cdot (\sum \cos \varphi) + A \sin \omega t \cdot (\sum \sin \varphi)$$

Cường độ tổng hợp tại P :

$$J = A^2 \left[(\sum \cos \varphi)^2 + (\sum \sin \varphi)^2 \right]$$

$$= A^2 \left[\sum_{i=1}^n (\cos^2 \varphi_i + \sin^2 \varphi_i) + 2 \sum_{i,j=1}^n \cos(\varphi_i - \varphi_j) \right]$$

Trong đó \hat{G}

Ngoài ra vì các lỗ tròn phân bố bất kỳ trên màn D nên nếu n khá lớn thì $\sum \cos(\varphi_i - \varphi_j) = 0$

Vậy
$$J = nA^2 = nI \quad (5.31)$$

Cường độ nhiễu xạ gây ra bởi một số lỗ khá lớn, giống nhau, phân bố bất kỳ, thì bằng tổng số các cường độ nhiễu xạ gây ra bởi các lỗ này.

SS.6. NĂNG SUẤT PHÂN CÁCH CỦA CÁC DỤNG CỤ QUANG HỌC.

1. Tiêu chuẩn Rayleigh.

Khi ta dùng một quang cụ để quan sát một điểm, chùm tia sáng đi qua quang cụ bị giới hạn bởi gọng của vật kính, nghĩa là bị nhiễu xạ bởi một hồng tròn. Do đó, ảnh P_0 , thực ra là một vật sáng tròn, xung quanh có các vân nhiễu xạ. Cường độ các vân này rất nhỏ so với cường độ của vân sáng ở giữa. Vì vậy ta thấy hình như chỉ có một vật sáng này mà thôi.

Năng suất phân cách của một quang cụ diễn tả khả năng của quang cụ đó có thể phân biệt được ảnh của hai điểm gần nhau. Sự phân biệt này luôn luôn có thể thực hiện được (khi ta dùng một thị kính có độ phóng đại thích hợp hoặc dùng một kính ảnh thích hợp) nếu hai vật sáng nhiễu xạ này bị phân cách bởi một khoảng tối có độ sáng yếu hơn ở một trị số tối thiểu nào đó. Người ta đo năng suất phân cách của một quang cụ bằng năng suất phân cách của vật kính. Chúng ta thừa nhận tiêu chuẩn sau đây, gọi là tiêu chuẩn Rayleigh :

- Hai vật sáng nhiễu xạ được phân biệt bởi mắt khi cực đại ở tâm của ảnh nhiễu xạ này trùng với cực tiểu thứ nhất của ảnh nhiễu xạ kia.

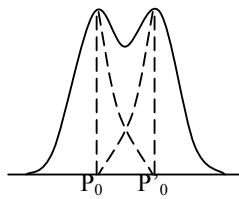
Giả sử ta quan sát hai điểm A và A' . P_0 hình học, nghĩa là các tâm của các ảnh nhiễu xạ được hai ảnh nhiễu xạ này khi

$$P_0 P'_0 \geq d_0$$

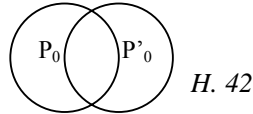
do là bán kính của mỗi ảnh nhiễu xạ

$$d_0 = 1,22 \frac{\lambda F}{2a}$$

trong đó $2a$ là đường kính của vật kính.

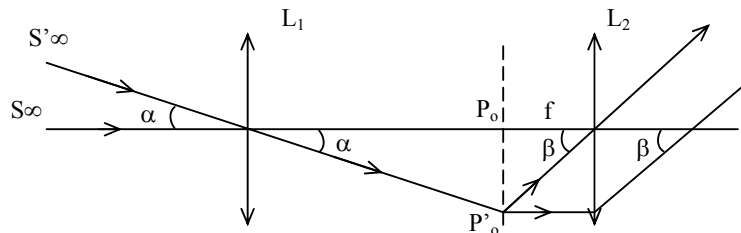


và P'_0 là hai ảnh nhiễu xạ. Mắt phân biệt



H. 42

2. Năng suất phân cách của kính thiên văn.



H. 43

Giả sử ta dùng kính thiên văn để ngắm hai ngôi sao S và S' (ở vô cực) sáng bằng nhau. Như vậy ta sẽ được hai ảnh nhiễu xạ sáng như nhau, có tâm là P_0 và P'_0 ở trên mặt phẳng tiêu của vật kính và có bán kính là :

$$d_0 = 1,22 \frac{\lambda F}{2a} \quad (6.1)$$

Hai ảnh nhiễu xạ chỉ có thể được phân biệt nếu ta có $P_0 P'_0 \gg d_0$ ứng với góc

$$\alpha = 1,22 \frac{\lambda}{2a} \quad (6.2)$$

$2a$ = đường kính khẩu độ của vật kính của kính thiên văn.

Góc α (được gọi là năng suất phân cách của kính thiên văn đối với bước sóng λ).

Với bước sóng nhạy nhất đối với mắt, $\lambda = 0,55 \mu\text{m}$, và với một kính thiên văn có vật kính có đường kính 2,5 mét, năng suất phân cách là $G = 2,68 \times 10^{-7} \text{ rad}$. Mắt người ta không thể phân biệt được hai điểm có thị giác nhỏ như vậy. Vì thế ta phải phóng đại góc β lên bằng một thị kính ở vị trí vô tiêu. Nếu G là số bội giác của kính thiên văn.

Ta có :

$$\beta = G \cdot \alpha = \frac{F}{f} \alpha$$

Ta cần điều kiện $\beta \geq 3 \cdot 10^{-4} \text{ rad}$ (nhuệ độ của mắt)

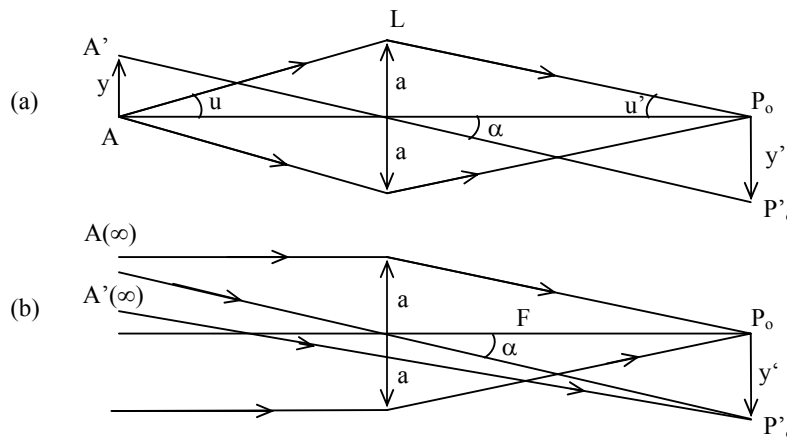
$$\text{Hay } \frac{F}{f} \cdot 1,22 \frac{\lambda}{2a} \geq 3 \cdot 10^{-4} \text{ rad} \quad (6.3)$$

3. Năng suất phân cách của kính hiển vi.

Các công thức trong trường hợp nhiễu xạ Fraunhofer đều được thành lập với chùm tia tới hồng là các chùm tia song song, nghĩa là coi như vật sáng ở vô cực.

Trong trường hợp kính hiển vi thì ngược lại, vật sáng ở rất gần vật kính.

Tuy nhiên nếu ta thay vật kính L bằng một thấu kính L' có cùng đường kính, có tiêu cự $f = OP_0$ và kéo vật AA' ra xa vô cực thì hệ thống vân nhiễu xạ trong hai trường hợp như nhau. Như vậy ta vẫn có thể áp dụng tiêu chuẩn Rayleigh cho kính hiển vi.



H. 45

Năng suất phân cách của vật kính L là khoảng cách y giữa A và A' để ta được hai ảnh phân biệt P_0 và P'_0 .

$$y' = P_0 P'_0 \geq 1,22 \frac{\lambda F}{2a}$$

Gọi n và n' là chiết suất của môi trường tới và môi trường ló (ra khỏi mặt kính).

Trị số nhỏ nhất của y' là : $y' = G = 0,61 G$ (vì $a = Fu'$, góc u' nhỏ)

Nếu môi trường ló là không khí $n' = 1$, ta có theo điều kiện Abbe về sự chính thị : $n \sin u = n' \sin u' \approx y' u$

$$\text{Vậy: } y = y' u' / n \sin u = 0,61 \lambda / n \sin u \quad (6.3)$$

y càng nhỏ, khả năng phân cách của kính hiển vi càng lớn. Vì vậy người ta thường tăng n bằng cách dùng kính hiển vi có vật kính nhúng chìm trong dầu Cèdre.

SS.7. QUANG PHỔ CÁCH TỬ.

1. Nguyên tắc .

Trong một máy quang phổ cách tử, bộ phận tán sắc là một cách tử thay cho một lăng kính.

Ta có : $\sin i - \sin i_0 = k \lambda n$

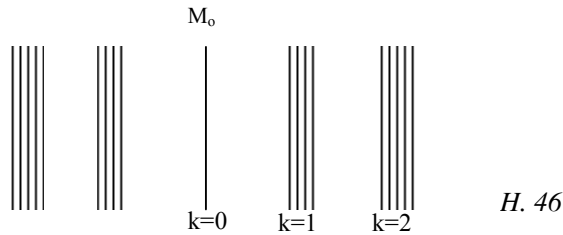
hay $\sin i = \sin i_0 + k \lambda n$

Vậy góc nhiễu xạ i thay đổi theo bước sóng λ . Do đó nếu ta chiếu tới cách tử một chùm ánh sáng trắng, thì hiện tượng tán sắc xảy ra (vì góc i thay đổi theo λ).

Tại M_0 , ứng với $k = 0$, mọi đơn sắc chồng lên nhau, do đó ta có màu trắng.

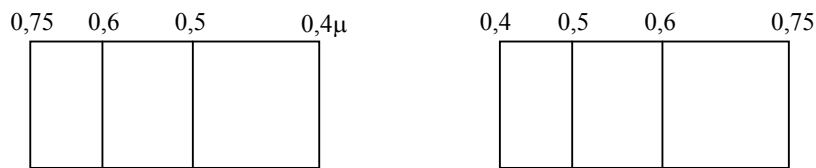
Giả sử $i_0 = 0 \rightarrow \sin i = k \lambda n$

Cho $k = 1$, ta được hai quang phổ đối xứng qua vân giữa. Ở mỗi quang phổ, tia tím lệch ít nhất, tia đỏ lệch nhiều nhất.



Nhận xét :

- Với cách tử, ta được nhiều quang phổ (bậc 1, bậc 2, ...)
- Bậc quang phổ càng lớn, quang phổ càng rộng, độ tán sắc càng lớn
- Trái với trường hợp lăng kính, trong sự tán sắc do cách tử, độ dài sóng càng lớn, bức xạ lệch càng nhiều.
- Cách tử tán sắc đều hơn lăng kính, các màu tương đối phân bố đều theo (



Quang phổ lăng kính

H. 47

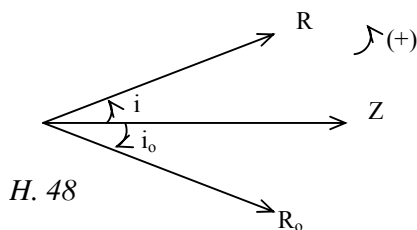
Quang phổ cách tử

2. Đo độ dài sóng bằng cách tử.

Áp dụng công thức $\sin i = \sin i_0 + k \lambda n$

$$\lambda = \frac{\sin i - \sin i_0}{kn} \quad (7.1)$$

Thay đổi góc i_0 để có độ lệch D cực tiểu, khi đó



H. 48

Ta có độ lệch $D = i - i_0$

$$\text{Hay } \frac{dD}{di_0} = \frac{di}{di_0} - 1 = 0 \quad \frac{di}{di_0} = 1$$

Mà ta có $\sin i - \sin i_0 = k \lambda$

$$\Rightarrow \cos i \cdot di - \cos i_0 \cdot di_0 = 0$$

$$\text{hay } \frac{di}{di_0} = \frac{\cos i_0}{\cos i}$$

Vậy ở độ lệch cực tiểu, ta có : $\cos i_0 = \cos i$

$$\Rightarrow i = i_0 \text{ hay } i = -i_0$$

Ta phải có $i = -i_0$, do đó $i = -i_0$

Vậy $\sin i - \sin i_0 = 2 \sin i$

Ngoài ra độ lệch cực tiểu là $D_m = i - i_0 = 2i$

$$\Rightarrow i = \frac{D_m}{2}$$

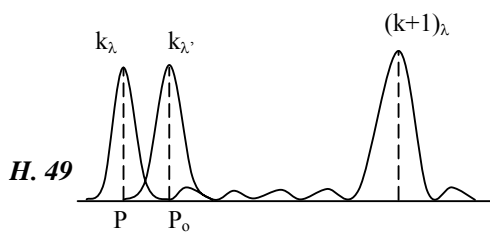
Vậy $\sin i - \sin i_0 = 2 \sin i = 2 \sin \frac{D_m}{2}$

$$\lambda = \frac{2 \sin \frac{D_m}{2}}{kn}$$

3. Năng suất phân giải của một cách tử.

Chiếu xuống cách tử một ánh sáng gồm hai bức xạ có độ dài sóng.

(và (' = (+ ((



Ta được hai hệ thống vân lệch nhau một chút.

Ta phân biệt được hai hệ thống nếu cực đại thứ k của (' trùng với vị trí của cực tiểu đầu tiên cạnh cực đại thứ k của (.

Xét công thức hiệu quang lộ giữa hai tia đi qua điểm giữa của hai khe liên tiếp.

$$\delta = \lambda (\sin i - \sin i_0)$$

Với (' , ứng với P ' , hiệu lộ là :

$$(P' = k (' (cực đại) = k ((+ (($$

Với (, ứng với điểm P , ta có một cực đại.

$$\text{Vậy } (P = k($$

Tại P ' , ta có cực tiểu đầu tiên của (cạnh P

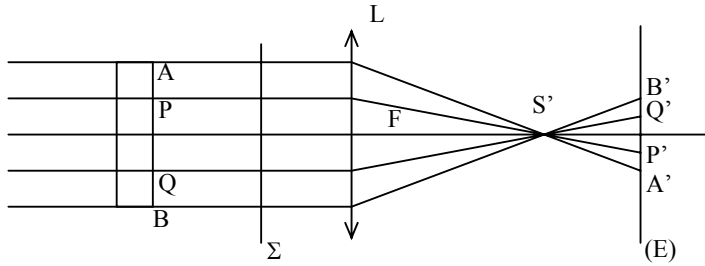
$$\text{Nên : } (P' = k(+ \hat{G}$$

$$\text{Suy ra : } k(\lambda + \Delta\lambda) = k\lambda + \frac{\lambda}{N}$$

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = kN \quad (7.3)$$

$\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ được định nghĩa là năng suất giải của cách tử
 $\Delta\lambda$ được gọi là năng suất phân cách.

SS.8. TƯƠNG PHẢN PHA.



H. 8.1

Chiếu sáng thẳng góc một bản mỏng mặt song song, trong suốt, đồng chất AB bằng một chùm tia sáng song song phát xuất từ một nguồn điểm S ở vô cực. Như vậy ánh sáng tới AB là ánh sáng điều hợp, chùm tia song song này đi qua thấu kính L, hội tụ tại S'. Ảnh của AB cho bởi thấu kính là A'B'.

Chấn động sáng tại mọi điểm trên mặt AB đều đồng pha, giả sử có phương trình :

$$s_o = a \sin \omega t$$

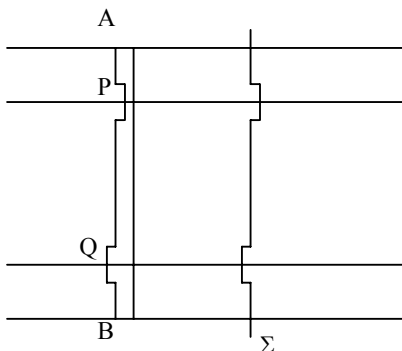
Trong điều kiện có ảnh rõ của Gauss, ta có thể coi mặt phẳng A'B' là một mặt sóng. Gọi L là quang lộ giữa hai mặt liên hợp AB và A'B'. Chấn động sáng tại mặt A'B' chậm pha hơn chấn động tại mặt AB là :

$$\phi = \frac{2\pi L}{\lambda}$$

Vậy phương trình chấn động tại các điểm trên A'B' là

$$s'_o = a \sin (\omega t - \phi)$$

- Nếu bề dày của bản AB không đều, hoặc bản không đồng nhất (chiết suất không đồng nhất tại mọi điểm) thì các chấn động sáng ở các điểm trên mặt AB không còn đồng pha nữa.



H. 8.2

Giả sử tại P có một chỗ lõm, và Q là một chỗ lồi, làm bề dày của bản kính thay đổi là δ . Mặt sóng ứng với chùm tia ló là ra khỏi AB có dạng như hình vẽ (h 8.2). Chấn động tại P' (hay Q') có pha thay đổi là :

$$\phi = \pm \frac{2\pi\delta}{\lambda} \quad \text{vôùi } \delta = (n - 1)\Delta c$$

Vậy phương trình chấn động sáng tại P' (hay Q') là

$$S' = a \sin(\omega t - \phi - \varphi)$$

- (< 0 ứng với P')
- (< 0 ứng với Q')

Như vậy nếu bề dày của bản AB không đều hoặc chiết suất của bản không đồng nhất tại mọi điểm thì chấn động sáng tại các điểm trên ảnh A'B' không đồng pha với nhau. Dĩ nhiên mắt ta không thể nhận thấy được sự khác nhau về pha này và vẫn thấy ảnh A'B' sáng đều.

Ta có thể viết :

$$s' = a \cos\varphi \cdot \sin(\omega t - \phi) - a \sin\varphi \cdot \cos(\omega t - \phi)$$

Giả sử các sự biến thiên về bề dày hoặc chiết suất của bản là rất nhỏ, ta có thể lấy $\cos\varphi \approx 1$, $\sin\varphi \approx \varphi$.

Do đó :

$$S' = a \sin(\omega t - \phi) - a\varphi \cdot \cos(\omega t - \phi)$$

$$S' = a \sin(\omega t - \phi) - a\varphi \cdot \sin(\omega t - \phi + \frac{\pi}{2})$$

Ta thấy chấn động sáng tại một điểm trên A'B' được coi là tổng hợp của hai sóng :

- Một sóng chính (hay sóng nền) có biên độ như nhau tại mọi điểm trên A'B'.

$$S'_0 = a \sin(\omega t - \phi)$$

- Một sóng phụ có biên độ thay đổi theo vị trí trên ảnh A'B' do các sự không đồng chất nói trên của các điểm trên vật AB :

$$S'_1 = -a\varphi \cdot \sin(\omega t - \phi + \frac{\pi}{2})$$

Sóng phụ này có pha vuông góc với sóng chính :

Ta nhận xét :

* Ứng với điểm lõm : $\varphi < 0$: $S'_1 = a|\varphi| \sin(\omega t - \phi + \pi/2)$ sóng phụ nhanh pha vuông góc với sóng nền.

* Ứng với điểm lồi : $\varphi > 0$

$$S'_1 = -a\varphi \cdot \sin(\omega t - \phi + \frac{\pi}{2})$$

$$S'_1 = a\varphi \cdot \sin(\omega t - \phi - \frac{\pi}{2})$$

Sóng phụ chậm pha vuông góc với sóng nền.

- Bây giờ ta để ý hiện tượng trên mặt tiêu của thấu kính L.

Sóng chính khi đi qua thấu kính L, bị nhiễu xạ bởi vành ngoài của thấu kính. Ảnh S' chính là vệt sáng giữa của ảnh nhiễu xạ gây ra bởi vành ngoài thấu kính. Bán kính của vệt sáng này là:

$$R = 1,22 \frac{\lambda F}{D}$$

F = tiêu cự của thấu kính L .

D = đường kính

Ta có thể giải thích : sóng phụ G sinh ra do sự nhiễu xạ bởi các điểm bất thường trên vật AB (điểm P hoặc điểm Q). Vệt sáng giữa của ảnh nhiễu xạ gây ra bởi các điểm này có bán kính là :

$$r = 1,22 \frac{\lambda F}{d}$$

d là đường kính của chỗ lồi, lõm.

Dĩ nhiên r khá lớn so với R . Như vậy ta có thể loại bỏ một trong hai sóng trên một cách dễ dàng. Thí dụ : Muốn loại bỏ sóng chính trên màn (E), ta chỉ việc đặt tại S' một màn ngăn sáng có diện tích bằng diện tích của vệt sáng S' .

II. QUAN SÁT MỘT VẬT BẰNG HIỆN TƯỢNG TƯƠNG PHẢN PHA.

Trong phần trên ta đã thấy, với một vật có các điểm bất thường như bản AB , thì các sóng tới các điểm trên ảnh $A'B'$ không đồng pha với nhau mà có sự tương phản pha nào đó. Nếu ta có thể nhận ra được sự biến đổi về pha này trên ảnh $A'B'$ thì ta có thể xác định được các điểm bất thường trên vật AB . Muốn vậy ta phải biến đổi sự tương phản về pha giữa các điểm trên ảnh $A'B'$ thành sự tương phản về cường độ sáng. Sau đây là phương pháp của Zernike.

Ta chắn vệt sáng nhiễu xạ S' của sóng chính bằng một bản L có diện tích bằng diện tích của vệt sáng S' , bản L được gọi là bản pha, có bề dài quang học là $(2k + 1) \lambda/4$. Như vậy bản pha làm cho pha của sóng chính biến đổi đi là G . Giả sử ta lấy trường hợp $\frac{\pi}{2}$ (tông phản pha dương) và giả sử bản pha trong suốt, sóng chính sau khi đi qua bản pha trở thành

$$S'_0 = a \cdot \sin \left(\omega t - \phi + \frac{\pi}{2} \right)$$

Sóng tổng hợp là :

$$S' = a (1 - \varphi) \cdot \sin \left(\omega t - \phi + G \right) \text{ với biên độ là } a (1 - \varphi).$$

Cường độ nền là $I_0 = a^2$ (ứng với $\varphi = 0$)

Cường độ sáng tại một điểm bất kỳ là:

$$I = a^2 (1 - \varphi)^2 \approx a^2 (1 - 2\varphi)$$

(có thể dương hay âm.

Độ tương phản tại điểm khảo sát được định nghĩa là :

$$\chi = \frac{I - I_0}{I} = -2\varphi$$

Tại điểm P' , ứng với điểm lõm P , ta có ($\varphi < 0, I > I_0$).

Tại điểm Q , ứng với điểm lồi Q , ta có ($\varphi > 0, I < I_0$).

Nếu ta dùng bản pha để làm pha của sóng chính thay đổi G (tương phản pha âm) thì các kết quả trên ngược lại.

Như vậy bằng phương pháp này, quan sát ảnh $A'B'$, ta phân biệt được các điểm sáng hơn, tối hơn, từ đó tìm ra các điểm bất thường (như P hoặc Q) trên bản AB .

Để sự quan sát dễ hơn, thay vì bản pha trong suốt ta có thể dùng bản pha có tính hấp thụ một phần đối với bước sóng λ . Cường độ của sóng chính sau khi đi qua bản pha, không còn là I_0 nữa mà giảm đi, giả sử là :

$$I'_o = \frac{I_o}{N} = \frac{a^2}{N}$$

Hay biên độ là $a' = \frac{a}{\sqrt{N}}$

Được gọi là độ truyền suốt của bản pha đối với bước sóng λ

Sóng tổng hợp trong trường hợp tương phản pha dương là :

$$S' = a \left(-\phi + \frac{1}{\sqrt{N}} \right) \cdot \sin \left(\omega t - \phi + \frac{\pi}{2} \right)$$

Cường độ : $I' = \frac{I}{N}$

Độ tương phản tại điểm quan sát :

$$\chi = 2\phi\sqrt{N}$$

Như vậy ta thấy trong trường hợp này, mặc dù cường độ nền giảm đi nhưng độ tương phản tăng lên. Thí dụ với $N = 100$, độ tương phản tăng lên 10 lần.. Do đó, ta dễ nhận ra các chỗ lồi, chỗ lõm trên vật AB hơn.

SS.9. PHÉP TOÀN KÝ.

1. Lịch sử.

Sau khi Laser được phát minh, một ngành mới của quang học phát triển khá mạnh. Đó là phép toàn ký hay phương pháp chụp ảnh nổi (ảnh trong không gian ba chiều).

Phép toàn ký thật ra được phát minh từ năm 1948 bởi nhà vật lý Gabor (giải Nobel vật lý năm 1971).

Phép chụp ảnh này gồm hai giai đoạn :

- Giai đoạn ghi: cho ánh sáng điều hợp nhiễu xạ bởi vật (mà ta muốn chụp) giao thoa với ánh sáng điều hợp (R, gọi là sóng nền hay sóng qui chiếu. Dem rửa kính ảnh ta được một toàn đồ, trên đó đã ghi lại các thông tin cần thiết để có thể tạo lại ảnh nổi của vật.

- Giai đoạn tạo lại hình : Dem rọi toàn đồ bằng một chùm tia song song, đơn sắc. Các chi tiết trên toàn đồ làm chùm tia sáng đi qua bị nhiễu xạ. Hiện tượng nhiễu xạ này sẽ tạo lại ảnh nổi của vật mà ta đã chụp.

Gabor đã thực hiện các thí nghiệm đầu tiên nhưng ảnh không được rõ vì được hai ảnh lẫn lên nhau, đồng thời trong giai đoạn đó, chưa có được các nguồn sáng thật đơn sắc.

Phải chờ sau khi nguồn sáng laser được phát minh thì phương pháp của Gabor mới được cải thiện và phép toàn ký mới được phát triển. Năm 1963, hai nhà vật lý Leith và Upatnieks của Đại học Michigan đã dùng ánh sáng Laser He - Ne và chụp được ảnh nổi rõ ràng bằng phép toàn ký.

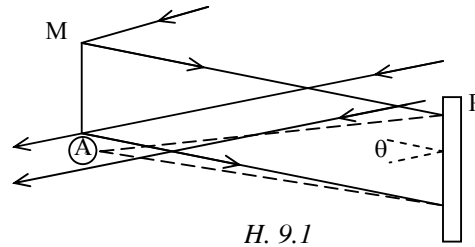
Ngày nay toàn ký là một ngành quang học rất có triển vọng và có nhiều ứng dụng trong các ngành như giao thoa kế học, khí tượng học, địa vật lý học, hiển vi kính học

2. Phương pháp LEITH - UPATNIEKS.

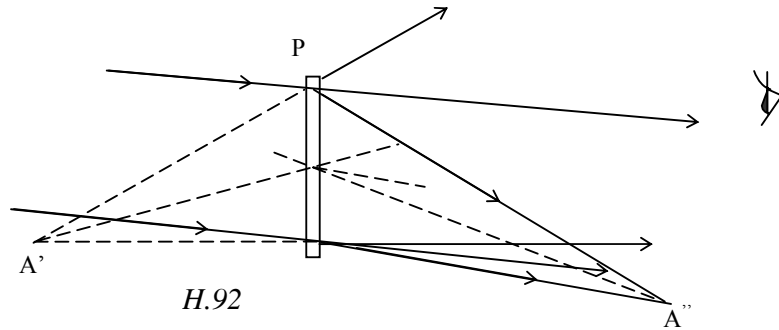
Leith và Upatnieks dùng một chùm ánh sáng laser He - Ne song song, dội tới gương M và vật A. Trên kính ảnh P, ta có sự giao thoa giữa sóng phẳng phản xạ từ gương M tới kính ảnh và sóng nhiễu xạ bởi vật A. Sau khi dem rửa kính ảnh, ta được một toàn đồ.

Dem rọi toàn đồ bằng chùm tia đơn sắc song song, với cùng một góc tới như khi ghi (vẫn dùng ánh sáng laser He - Ne). Ta sẽ được hai ảnh : ảnh ảo A' và ảnh thực A'' như hình

vẽ dưới. A' và A'' là các gian ba chiều. Một toàn đồ được gọi là toàn đồ Fresnel.



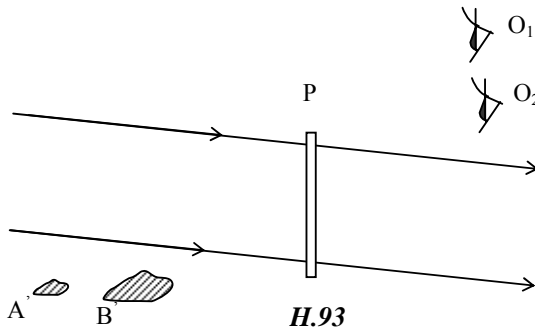
ảnh nổi trong không thành lập như trên



3. Vài tính chất đặc biệt.

1/ Trong cách chụp ảnh thường, ta chỉ ghi được trên ảnh cường độ sáng trái lại trong phép toàn ký người ta không ghi lại được cường độ mà còn ghi lại được cả pha của sóng tới kính ảnh. Nhìn qua toàn đồ p ta sẽ thấy một ảnh ảo. Đó là một ảnh nổi trong không gian ba chiều giống như vật thực sự có trước mắt ta vậy.

2/ Nếu dùng phép toàn ký để chụp một cảnh có nhiều vật, thí dụ hai vật A1B, thì khi tạo lại hình, cảnh quan sát được sẽ thay đổi tùy theo vị trí của mắt. Thí dụ nếu mắt ở vị trí O_1 , ta có thể nhìn thấy được ảnh toàn phần A' và B' của A và B. Nhưng nếu đặt mắt ở O_2 thì có thể không nhìn thấy ảnh A hoặc chỉ nhìn thấy một phần vì bị B' che khuất.

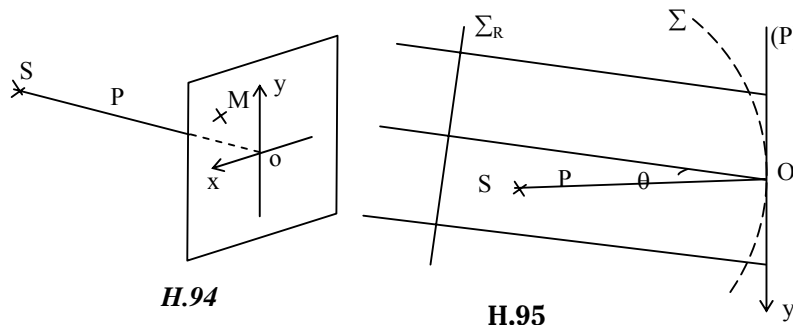


3/ Trong phép chụp ảnh thường, ta có sự tương ứng một điểm với một điểm giữa ảnh và vật. Trong phép toàn ký ta có sự tương ứng một điểm của vật với

mọi điểm trên toàn đồ. Do đó, nếu ta chỉ còn lại một mảnh của toàn đồ, ta vẫn thấy ảnh toàn thể của vật.

4. Lý thuyết về sự tạo hình trong phép toàn ký.

a/ Giai đoạn ghi :



Chiếu tới kính ảnh P một chùm tia sáng song song, đơn sắc. Đó là sóng điều hợp Σ_R , đóng vai trò của sóng qui chiếu hay sóng nền. Giả sử vật là điểm S. Như vậy kính ảnh P còn nhận được một sóng cầu nhiễu xạ (phát ra từ S. Trên kính ảnh P, ta có sự giao thoa giữa hai sóng (và (R.

Xét sóng qui chiếu (R, nếu sóng tới điểm O có dạng $a e^{j(kx - \omega t)}$ thì tại điểm M, biên độ tap là $a(x, y) = a_0 e^{-jk(y)}$ với $k = 2\pi/\lambda$ (góc (nhỏ).

Biên độ tap của sóng cầu (tại M là $F(x, y)$ có dạng :

$$F(x, y) = F_0 e^{-jk d} \quad \text{với } d = \sqrt{R^2 + y^2}$$

Vậy biên độ tổng hợp tại M là :

$$a(x, y) + F(x, y) \quad (9.1)$$

Cường độ tại M :

$$I = (a + F)(a^* + F^*) = |a|^2 + |F|^2 + a^* F + a F^* \quad (9.2)$$

Nếu thời gian ghi hình là T, năng lượng nhận bởi kính ảnh P là:

$$W = I \cdot T = T |a|^2 + T |F|^2 + T a^* F + T a F^* \quad (9.3)$$

Đem rửa kính ảnh, ta được một âm bản. Đó là toàn đồ, trên đó ta đã ghi lại các dữ kiện để có thể tạo lại ảnh nổi của S.

b/ Giai đoạn tạo lại ảnh :

Rọi vào toàn đồ một chùm tia đơn sắc, song song, điều hợp. Sóng này ta gọi là sóng tạo ảnh (R. Nếu I_0 là cường độ tới và I là cường độ truyền qua âm bản, hệ số truyền suốt của âm bản là:

$$T' = \frac{I}{I_0} \quad (9.4)$$

Hệ số truyền suốt biên độ là $t = \sqrt{T'}$, đó là một hàm theo năng lượng W mà kính ảnh nhận được trong thời gian ghi ảnh. Sự biến thiên của t theo W như hình vẽ (9.6), trên đó có một đoạn thẳng AB, ứng với đoạn này, biên độ truyền qua âm bản tỷ lệ với W. Muốn vậy các trị số của W không được xa trị số trung bình W_0 nhiều, cũng có nghĩa là những vân giao thoa trên kính ảnh không tương phản quá, hay là biên độ của các sóng (và (R phải khác nhau.

Trong điều kiện trên, ta có :

$$t = t_0 - \beta (W - W_0)$$

Ta có thể lấy $W_0 = T_0 G$

$$\text{Vậy : } t = t_0 - \beta G$$

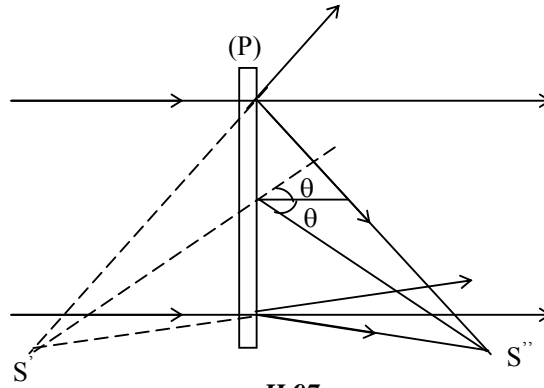
$$\text{Hay : } t = t_0 - \beta' \left[|F|^2 + a^* F + a F^* \right] \quad (9.6)$$

Với $\beta' = \beta G$

Nếu biên độ tại một điểm (x, y) trên kính ảnh gây ra bởi sóng tạo ảnh (R là $b(x, y)$ thì biên độ truyền qua toàn đồ là:

$$bt = t_0 b - b \beta' \left[|F|^2 + a^* F + a F^* \right]$$

Giả sử sóng tạo ảnh (R là mặt sóng phẳng song song với mặt phẳng P. Khi đó b là một hằng số:



H.97

Hệ thức trên viết lại là :

$$bt = t_0b - b\beta' \left[|F|^2 - b\beta' a_0 * F e^{jk\theta y} - b\beta' a_0 F * e^{-jk\theta y} \right]$$

Số hạng bto là hằng số. Số hạng thứ hai : b'(F(2 gần như không đổi vì (F(2 biến thiên không đáng kể. Như vậy, các số hạng này biểu diễn sóng phẳng truyền thẳng qua p.

Số hạng thứ 3 :G

chứa thừa số $F(x, y) = e^{-jkd}$, vậy biểu diễn sóng cầu phân kỳ phát suất từ S'. Thừa số $e^{jk(y}$ chỉ rằng S' nằm trên phương hợp với pháp tuyến của toàn đồ P một góc là (.

Số hạng thứ 4:Gchứa thừa số $F^*(x, y) = Foe^{+jkd}$ biểu diễn sóng cầu hội tụ tại S''. Âmnh này nằm trên phương hợp với pháp tuyến của toàn đồ một góc ((hình vẽ 9.7).

S' được gọi là ảnh thường, S'' được gọi là ảnh liên hợp

c/ Trường hợp vật có kích thước:

Ta coi là vật gồm vô số lớn nguồn điểm và lý luận lại như trên. Biên độ chấn động tổng hợp tại M bây giờ là :

$$a(x, y) + \Sigma F$$

Và ta có :

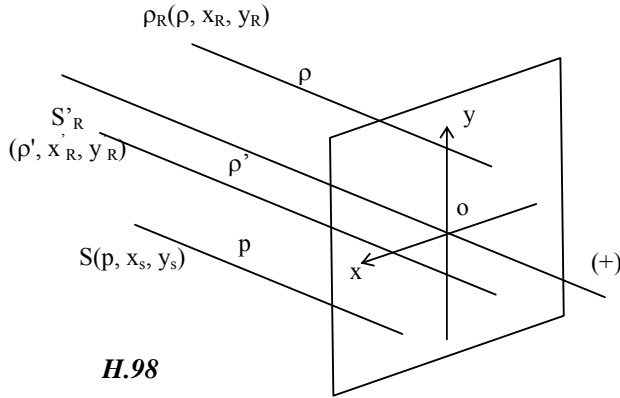
$$t = t_0 - \beta' (\Sigma F \cdot \Sigma F^* + a^* \cdot \Sigma F + a \cdot \Sigma F^*) \quad (9.10)$$

Và khi tạo ảnh bằng một sóng phẳng song song với P, ta được:

$$bt = t_0b - b\beta' \Sigma F \cdot \Sigma F^* - b\beta' a^* e^{jk\theta y} \cdot \Sigma F - b\beta' a_0 e^{-jk\theta y} \Sigma F^* \quad (9.11)$$

Số hạng thứ 3 ứng với ảnh ảo của vật (gồm ảnh ảo của tất cả các điểm của vật). Số hạng thứ tư ứng với ảnh thật (ảnh liên hợp) của vật. Các ảnh này là các ảnh nổi trong không gian 3 chiều.

5. Xác định vị trí của ảnh.



H.98

Giả sử sóng qui chiếu (R có bước sóng λ phát ra từ một nguồn điểm SR có tọa độ $((x_r, y_r)$.

Điểm vật gây ra sóng nhiễu xạ là S có tọa độ $((x_s, y_s)$.

Biên độ gây ra tại một điểm M (x, y) trên kính ảnh có dạng:

$$F = f_o e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{p^2 + (x-x_s)^2 + (y-y_s)^2}} \quad (9.12)$$

Trong các điều kiện của thí nghiệm, ta có thể dùng công thức gần đúng :

$$\sqrt{p^2 + (x-x_s)^2 + (y-y_s)^2} \approx |p| \left(1 + \frac{1}{2} \frac{(x-x_s)^2}{p} + \frac{1}{2} \frac{(y-y_s)^2}{p} \right)$$

Hệ thức (9.12) viết lại là :

$$F = f_o e^{-j \frac{2\pi |p|}{\lambda}} e^{-j \frac{\pi}{\lambda p} [(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2]} \quad (9.13)$$

$$\text{hay } F = F_o e^{-j \frac{\pi}{\lambda |p|} [(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2]} \quad (9.14)$$

Tương tự SR gây ra tại M một biên độ có dạng :

$$a = a_o e^{-j \frac{\pi}{\lambda |\rho|} [(x-x_r)^2 + (y-y_r)^2]} \quad (9.15)$$

Biên độ tổng cộng tại M là : $a + F$

Suy ra cường độ tại M :

$$I = (a + F) (a^* + F^*) =$$

$$\begin{aligned} & |a_o|^2 + |F_o|^2 + a_o^* F_o e^{j \frac{\pi}{\lambda |\rho|} [(x-x_r)^2 + (y-y_r)^2]} e^{-j \frac{\pi}{\lambda |p|} [(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2]} \\ & + a_o F_o^* e^{-j \frac{\pi}{\lambda |\rho|} [(x-x_r)^2 + (y-y_r)^2]} e^{j \frac{\pi}{\lambda |p|} [(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2]} \end{aligned}$$

Sau khi rửa kính ảnh, ta được một âm bản mà hệ số truyền suốt biên độ là t có dạng tương tự hệ thức (9.6) với các số hạng thứ 3 và thứ 4 lần lượt là :

$$\beta a_o^* F_o e^{j \frac{\pi}{\lambda |\rho|} [(x-x_r)^2 + (y-y_r)^2]} e^{-j \frac{\pi}{\lambda |p|} [(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2]} \quad (9.16)$$

$$\beta' a_o F^* o e^{-j \frac{\pi}{\lambda |\rho|} [(x-x_r)^2 + (y-y_r)^2]} e^{j \frac{\pi}{\lambda |p|} [(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2]} \quad (9.17)$$

Trong giai đoạn tạo lại ảnh, giả sử ta dội toàn đồ bởi sóng cầu phát ra từ một nguồn điểm S'R ((', x'r, y'r) và có bước sóng (', sóng này gây ra tại M một biên độ có dạng :

$$b = b_o e^{-j \frac{\pi}{\lambda' |\rho'|} [(x-x'_s)^2 + (y-y'_s)^2]} \quad (9.18)$$

Ta được biểu thức của bt (biên độ truyền qua toàn đồ) tương tự như hệ thức (9.8), trong đó các số hạng thứ 3 và thứ 4 (ứng với ảnh ảo S' và ảnh thật S'') lần lượt là :

$$A' = \beta' a_o^* b_o F_o e^{j \frac{\pi}{\lambda |\rho|} [(x-x_r)^2 + (y-y_r)^2]} e^{-j \frac{\pi}{\lambda |p|} [(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2]} \\ x e^{-j \frac{\pi}{\lambda' |\rho'|} [(x-x'_r)^2 + (y-y'_r)^2]} \quad (9.19)$$

$$A'' = \beta'' a_o b_o F^* o e^{-j \frac{\pi}{\lambda |\rho|} [(x-x_r)^2 + (y-y_r)^2]} e^{j \frac{\pi}{\lambda |p|} [(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2]} \\ x e^{-j \frac{\pi}{\lambda' |\rho'|} [(x-x'_r)^2 + (y-y'_r)^2]} \quad (9.20)$$

Gọi P' là khoảng cách từ ảnh ảo S' tới toàn đồ. Muốn tìm P' ta so sánh biểu thức (9.19) tới biểu thức tổng quát của sóng cầu phát ra bởi nguồn điểm S' đặt cách toàn đồ ột đoạn P'. Bỏ qua thừa số hằng số, sóng cầu này có dạng :

$$e^{-j \frac{\pi}{\lambda' |P'|} [(x-x_{s'})^2 + (y-y_{s'})^2]} \quad (9.21)$$

Trong biểu thức (9.19), kết hợp các thừa số trong dấu mũ có x² + y², ta được :

$$e^{j\pi \left[\frac{1}{\lambda |\rho|} - \frac{1}{\lambda |p|} - \frac{1}{\lambda' |\rho'|} \right] (x^2 + y^2)} \quad (9.22)$$

So sánh (9.22) với thừa số tương ứng trong biểu thức (9.21), ta được :

$$\frac{1}{\lambda |\rho|} - \frac{1}{\lambda |p|} - \frac{1}{\lambda' |\rho'|} = - \frac{1}{\lambda' |P'|} \quad (9.23)$$

Làm tương tự với biểu thức (9.20), ta tìm được hệ thức xác định khoảng cách P'' từ ảnh liên hợp S'' tới toàn đồ.

$$\frac{1}{\lambda' |\rho'|} + \frac{1}{\lambda |p|} - \frac{1}{\lambda |\rho|} = - \frac{1}{\lambda' |P''|} \quad (9.24)$$

hay :

$$\frac{1}{P'} = \frac{\lambda'}{\lambda} \left(\frac{1}{P} - \frac{1}{\rho} \right) + \frac{1}{\rho'} \quad (9.25)$$

$$\frac{1}{P''} = \frac{\lambda'}{\lambda} \left(\frac{-1}{P} + \frac{1}{\rho} \right) + \frac{1}{\rho'} \quad (9.26)$$

Tương tự, ta xác định các tọa độ x_s, y_s bằng cách chỉ để ý tới các thừa số có mũ chứa x và y trong các biểu thức (9.19) và (9.21), ta tìm được :

$$x_{s'} = \frac{\lambda'}{\lambda} \left(\frac{-P'}{\rho} x_r + \frac{P'}{P} x_s \right) + \frac{P'}{\rho'} x'_r \quad (9.27)$$

$$y_{s'} = \frac{\lambda'}{\lambda} \left(\frac{-P'}{\rho} y_r + \frac{P'}{P} y_s \right) + \frac{P'}{\rho'} y'_r \quad (9.28)$$

Với ảnh liên hợp, ta tìm được :

$$x_{s''} = \frac{\lambda'}{\lambda} \left(\frac{P''}{\rho} x_r - \frac{P''}{P} x_s \right) + \frac{P''}{\rho'} x'_r \quad (9.29)$$

$$y_{s''} = \frac{\lambda'}{\lambda} \left(\frac{P''}{\rho} y_r - \frac{P''}{P} y_s \right) + \frac{P''}{\rho'} y'_r \quad (9.30)$$

Ta có thể tính được độ phóng đại của ảnh cho bởi toàn đồ, thực vậy từ các hệ thức (9.27) và (9.28), ta suy ra :

$$\Delta x_{s'} = \frac{-\lambda'}{\lambda} \cdot \frac{P'}{P} \cdot \Delta x_s \quad (9.31)$$

$$\Delta y_{s'} = \frac{\lambda'}{\lambda} \cdot \frac{P'}{P} \cdot \Delta y_s \quad (9.32)$$

Không để ý đến dấu trừ, độ phóng đại của ảnh thực là :

$$G = \frac{\Delta x_{s'}}{\Delta x_s} = \frac{\Delta y_{s'}}{\Delta y_s} = \frac{\lambda'}{\lambda} \cdot \frac{P'}{P} \quad (9.33)$$

Kết hợp hệ thức (9.25), ta suy ra :

$$G = \left[1 - \frac{P}{\rho} + \frac{\lambda'}{\lambda'} \cdot \frac{P'}{\rho'} \right]^{-1} \quad (9.34)$$

Với ảnh liên hợp, ta có :

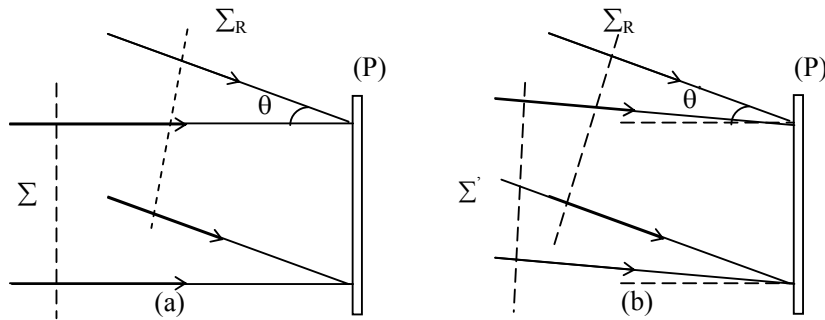
$$G = \left[1 - \frac{P}{\rho} - \frac{\lambda'}{\lambda'} \cdot \frac{P'}{\rho'} \right]^{-1} \quad (9.35)$$

6. Ứng dụng.

a. Áp dụng vào hiển vi kính học:

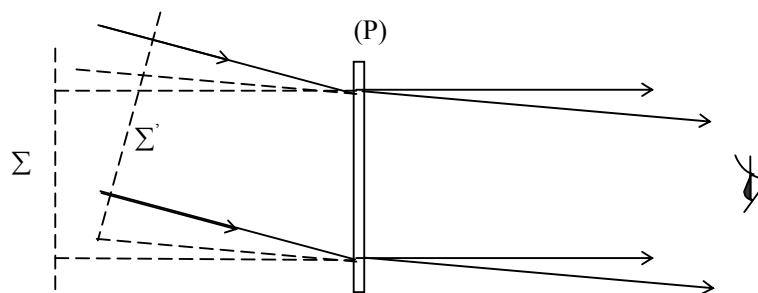
Ta đã thấy G . Do đó nếu khi ghi toàn đồ ta dùng một bước sóng ngắn, thí dụ tia X chẳng hạn, và khi tạo lại ảnh ta dùng một bước sóng lớn hơn, thí dụ ánh sáng thấy được, thì độ phóng đại của kính hiển vi có thể rất lớn.

b- Áp dụng vào ngành giao thoa:



H.9.9

Trong các giao thoa kế cổ điển, người ta chỉ có thể thực hiện giao thoa với những sóng phát ra từ cùng một nguồn, nghĩa là phát ra vào cùng một thời điểm. Với phép toàn kỳ, ta có thể thực hiện giao thoa với hai sóng ghi vào hai thời điểm khác nhau.



H.9.10

Thí dụ ta có thể ghi một sóng phẳng (Σ , gọi là sóng vật, lên toàn đồ bằng cách kết hợp với một sóng qui chiếu (R, giả sử cũng là sóng phẳng. Sau đó ta ghi một lần thứ hai bằng cách nghiêng sóng vật đi một góc nhỏ (sóng (Σ' trong hình 9.9b)

Đem rửa kính ảnh ta được một toàn đồ. Rọi toàn đồ bằng một sóng phẳng (Σ' R gồng hệt sóng qui chiếu (R, ta lập lại được pha và cường độ của hai sóng (Σ và (Σ' . Nhìn qua toàn đồ, trong vùng chung của hai chùm tia, ta thấy các vân giao thoa thẳng, song song, cách đều nhau.

Ta có thể giải thích như sau :

* Xét lần ghi thứ nhất.

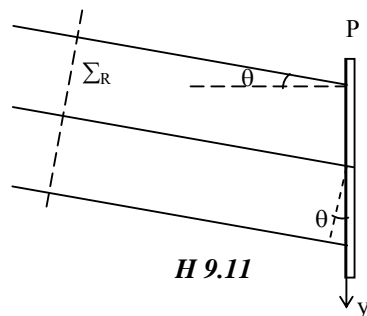
Biên độ tập của sóng qui chiếu (R tại một điểm trên kính ảnh là:

$$a = a_0 e^{-jk_0 y}$$

(giả sử góc (θ nhỏ)

Biên độ của sóng vật là b_1 không đổi trên mặt phẳng P.

Cường độ tới kính ảnh là :



H.9.11

$$I_1 = (a + b_1) (a^* + b_1) = |a|^2 + b_1^2 + a^* b_1 + a b_1$$

Năng lượng nhận được :

$$W_1 = T_1 |a|^2 + T_1 b_1^2 + T_1 a^* b_1 + T_1 a b_1$$

* Xét lần ghi thứ hai:

Biên độ tập của sóng qui chiếu (ρ) tại một điểm trên kính ảnh lần lượt là:

$$a = a_0 e^{-jk_0 y}$$

$$b_2 = b_0 e^{-jk_0 y}$$

Suy ra :

$$I_2 = (a + b_2) (a^* + b_2^*) = |a|^2 + |b_2|^2 + a^* b_2 + a b_2^*$$

$$W_2 = T_2 |a|^2 + T_2 |b_2|^2 + T_2 a^* b_2 + T_2 a b_2^*$$

Năng lượng tổng cộng kính ảnh nhận được là :

$$W = W_1 + W_2 = (T_1 + T_2) |a|^2 + T_1 b_1^2 + T_2 |b_2|^2 + a^* (T_1 b_1 + T_2 b_2) + a (T_1 b_1 + T_2 b_2^*)$$

Sau khi rửa kính ảnh, hệ số truyền suốt biên độ là :

$$t = t_0 - \beta (T_1 b_1^2 + T_2 |b_2|^2) - \beta a^* (T_1 b_1 + T_2 b_2) - \beta a (T_1 b_1 + T_2 b_2^*)$$

Rọi toàn đồ bằng sóng (ρ) giống hết sóng (R nên biên độ truyền qua là :

$$at = at_0 - \beta (T_1 b_1^2 + T_2 |b_2|^2) a - \beta |a|^2 (T_1 b_1 + T_2 b_2) - \beta a^2 (T_1 b_1 + T_2 b_2^*)$$

Để ý tới số hạng thứ 3, ta thấy có sự thành lập lại hai sóng:

$$\beta |a|^2 T_1 b_1 \quad \text{và} \quad \beta |a|^2 T_2 b_2$$

(chỉ khác nhau các hằng số $\beta |a|^2 T_1$ và $\beta |a|^2 T_2$)

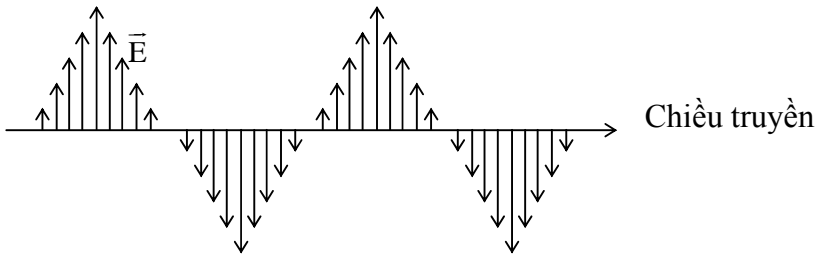
Vân giao thoa mà ta quan sát thấy là do sự hợp của hai sóng này.

Chương IV

HIỆN TƯỢNG PHÂN CỰC ÁNH SÁNG

SS1 . ÁNH SÁNG TỰ NHIÊN VÀ ÁNH SÁNG PHÂN CỰC.

Ta đã biết ánh sáng là sóng điện từ có độ dài sóng ngắn (từ 0,4 (m (0,75(m). Một nguồn sáng như một ngọn đèn, một ngọn lửa gồm vô số các hạt phát ra ánh sáng. Các hạt này là các phân tử, nguyên tử hay ion. Mỗi hạt được coi là một máy (lưỡng cực) tí hon phát sóng điện từ.

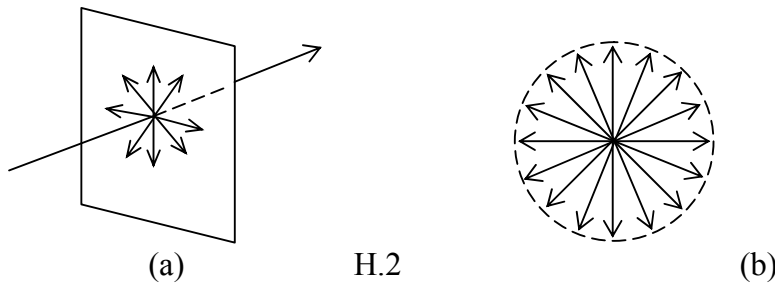


H.1

Trong quang học, vectơ điện trường \vec{E} có vai trò đặc biệt quan trọng, nên trong hình vẽ trên, ta chỉ vẽ sóng điện trường. Từ trường \vec{G} thẳng góc với hình vẽ và hướng về phía trước tờ giấy.

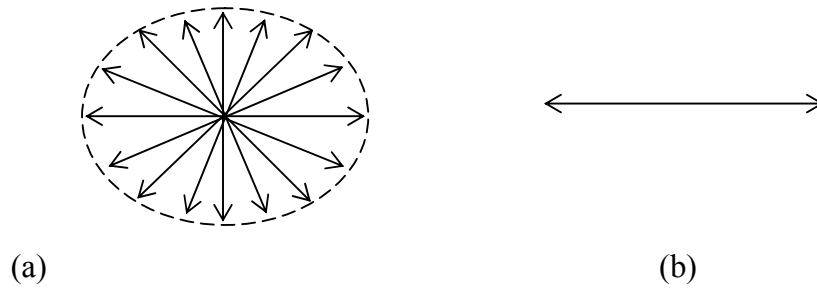
Các sóng điện từ phát ra bởi các máy phát sóng tí hon có vectơ điện trường \vec{E} (còn gọi là Frexnen hay vectơ chấn động sóng) hướng theo tất cả mọi phương thẳng góc với phương truyền của tia sáng (vì trong quá trình phát sóng, các hạt độc lập với nhau). Ánh sáng phát ra như vậy được gọi là ánh sáng tự nhiên, hay ánh sáng thiên nhiên.

Vậy ánh sáng tự nhiên được coi là gồm bởi vô số các chấn động thẳng phân bố đều nhau theo tất cả mọi phương thẳng góc với phương truyền của tia sáng, không có một phương chấn động nào được ưu đãi hơn một phương chấn động khác.



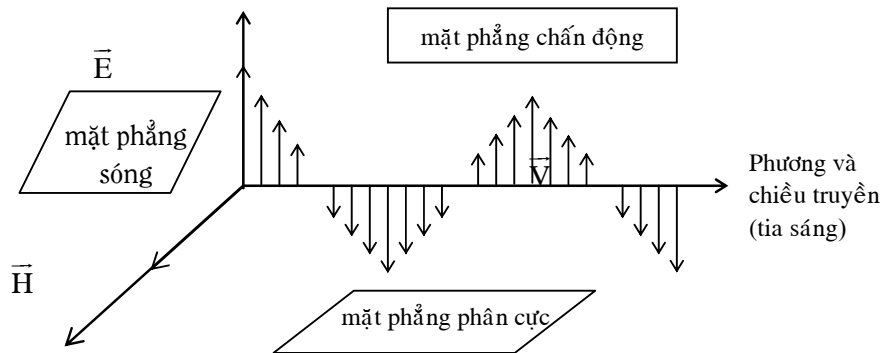
H.2

Nếu bằng một cách nào đó, ta làm mất sự đối xứng nói trên của các phương chấn động sóng, thì ánh sáng đó được gọi là ánh sáng phân cực. Ta có thể có ánh sáng phân cực một phần (h.3a) hay phân cực hoàn toàn (h.3b).



H. 3

Ánh sáng phân cực hoàn toàn còn được gọi là ánh sáng phân cực thẳng (vì nếu xét một điểm cố định, đỉnh của vectơ điện \vec{E} dao động trên một đường thẳng) hay cũng được gọi là phân cực thẳng (vì sóng hình sin nằm trong một mặt phẳng, gọi là mặt phẳng chấn động).

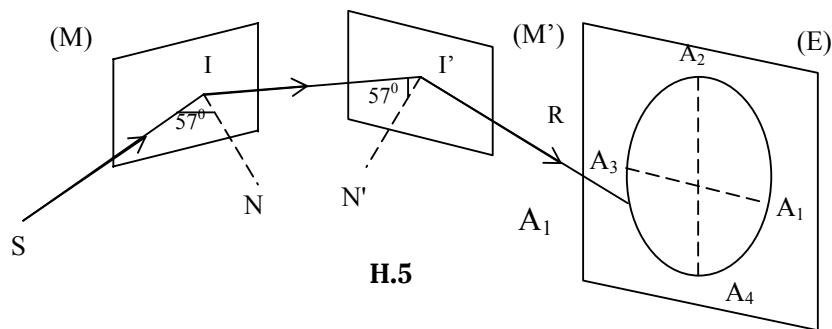


H. 4

Hình vẽ 4 ứng với một ánh sáng phân cực thẳng. Mặt phẳng hợp bởi \vec{E} và \vec{v} là mặt phẳng chấn động. Mặt phẳng chứa tia sáng và thẳng góc với vectơ điện \vec{E} được gọi là mặt phẳng phân cực, vectơ \vec{E} được gọi là vectơ phân cực. Mặt phẳng hợp bởi \vec{E} và \vec{G} là mặt phẳng sóng.

HIỆN TƯỢNG PHÂN CỰC ÁNH SÁNG DO PHẢN CHIẾU

SS.2. Thí nghiệm Malus.



H.5

Chiếu tới gương thủy tinh M một chùm tia sáng tự nhiên song song, dưới góc tới $i = 57^\circ$. Mặt sau của gương M được bôi đen để loại trừ tia phản chiếu trên mặt sau của gương. Ánh sáng khi tới mặt trước của gương M sẽ phản chiếu. Hứng chùm tia phản chiếu này trên một

gương M' giống hệt gương M và cũng với góc $i' = 57^\circ$. Tia phản chiếu cuối cùng trên gương M được hứng trên một màn ảnh E.

- Khi quay gương M xung quanh tia tới SI và vẫn giữ góc tới góc $i = 57^\circ$, kết quả thí nghiệm cho thấy cường độ sáng của tia phản chiếu II' không thay đổi (hứng chùm tia II' lên một màn ảnh để quan sát).

- Bây giờ để yên gương M và quay gương M' xung quanh tia tới II' và vẫn giữ góc tới $i' = 57^\circ$. Thí nghiệm cho thấy cường độ của chùm tia phản chiếu I'R thay đổi khi gương M' quay:

Khi mặt phẳng tới (ứng với hai gương) (SII') và (II'R) song song với nhau, cường độ của tia phản chiếu IR cực đại, vật sáng trên màn E sáng nhất, đó là tại hai vị trí A1 và A3.

Khi hai mặt phẳng tới này thẳng góc với nhau thì cường độ chùm tia I'R triệt tiêu, ứng với hai vị trí A2 và A4.

Nếu góc tới các gương khác 57° (thì tại các vị trí A2 và A4, cường độ của tia I'R chỉ cực tiểu (tại A2 và A4 tối nhất) chứ không thể triệt tiêu).

Ta có thể giải thích sơ bộ thí nghiệm trên như sau: Chùm tia sáng SI là chùm tia sáng tự nhiên nên chấn động sáng có tính đối xứng theo tất cả các phương thẳng góc với SI, vì vậy khi quay gương M thì sự quay này không thể làm thay đổi cường độ sáng của tia phản chiếu II'. Sau khi phản chiếu trên gương M, ánh sáng II' không còn tính đối xứng của chùm tia SI nữa, mà là ánh sáng phân cực thẳng. Do đó khi quay gương M', sự quay này có ảnh hưởng tới cường độ sáng của tia phản chiếu I'R. Vì tính không đối xứng của chùm tia tới II' đến gương M' nên có các vị trí của M' để ánh sáng phản chiếu cực đại, có những vị trí khác của M' để ánh sáng phản chiếu này triệt tiêu.

Nếu chùm tia SI tới gương M dưới góc tới $i < 57^\circ$ (thì chùm tia phản chiếu II' là ánh sáng phân cực một phần. Do đó khi quay gương M' thì sẽ chỉ có các phương để ánh sáng phản chiếu I'R có cường độ cực tiểu thôi, chứ không thể triệt tiêu (vì với ánh sáng phân cực một phần, ta có sự ưu đãi hơn kém giữa các phương chấn động và không có phương chấn động nào bị khử hoàn toàn).

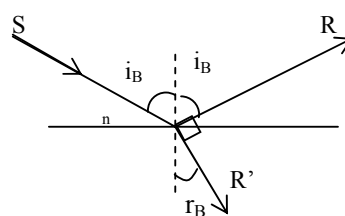
Gương M biến đổi ánh sáng tự nhiên thành ánh sáng phân cực nên được gọi là kính phân cực.

Gương M' cho ta biết ánh sáng tới (II') là ánh sáng phân cực nên được gọi là kính phân tích.

SS.3. Định luật Brewster.

Từ các công trình thực nghiệm, Brewster phát triển định luật sau:

- Để có được ánh sáng phân cực trên bề mặt của một môi trường phải có một trị số xác định tùy trường trên và tính được bởi



H. 6

cực hoàn toàn do sự phản trường trong suốt, góc tới i thuộc vào bản chất của môi trường công thức.

$$\tan i = n$$

, n = chiết suất của môi trường

Góc i này được gọi là góc tới Brewster, ký hiệu là i_B

Ta có : $\text{tg}i_B = n$ hay $\sin i_B = n \cos i_B$ so với định luật Descartes.

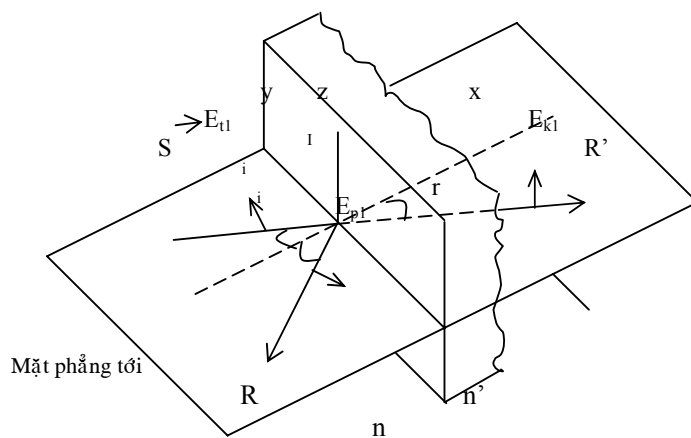
Suy ra : $\cos i_B = \sin r_B$ hay $i_B = r_B$

Vậy trong trường hợp này, tia phản chiếu và tia khúc xạ thẳng góc với nhau.

Nếu môi trường trên là thủy tinh $n = 1,5$ thì $\text{tg}i_B = 1,5$, $i_B = 57^\circ$

SS.4. Khảo sát lý thuyết về sự phân cực do phản chiếu.

Trước hết, xét sóng điện từ phân cực thẳng tới một mặt phẳng cách hai môi trường có chiết suất n và n' (giả sử $n' > n$).

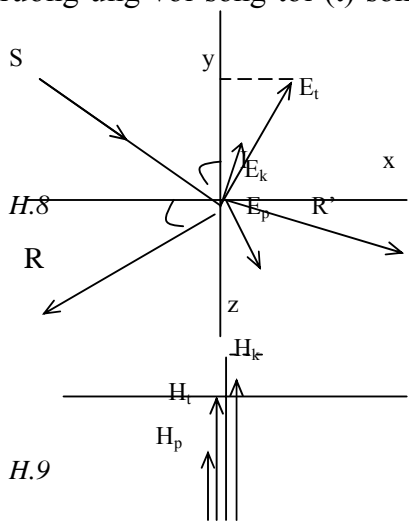


Lấy điểm tới I làm gốc tọa độ, đường pháp tuyến tại I làm trục x , mặt phẳng ngăn chia hai môi trường là mặt phẳng yz , mặt phẳng tới là mặt phẳng xy .

Xét trường hợp vectơ điện của sóng tới nằm trong mặt phẳng tới (h.7).

Các vectơ điện trường và từ trường thuộc các sóng tới, phản chiếu và khúc xạ phải thỏa “điều kiện biên” ở mặt ngăn chia hai môi trường, nghĩa là các thành phần trên mặt ngăn chia hai môi trường của các vectơ điện trường, hay các vectơ từ trường, phải có sự bảo toàn khi đi từ môi trường này sang môi trường kia.

Gọi E_{t1} , H_{t1} , E_{p1} , H_{p1} , E_{k1} , H_{k1} lần lượt là các trị số cực đại của điện trường và từ trường ứng với sóng tới (t) sóng phản chiếu (P) và sóng khúc xạ (K). Xét thời điểm tại I, điện trường và từ trường của ba sóng trên có các trị số cực đại trên.



Áp dụng điều kiện biên vào các vectơ điện trường trong hai môi trường, ta có :

$$E_{t1} \cos i - E_{p1} \cos i = E_{k1} \cos r \quad (4.1)$$

Trong trường hợp của hình vẽ 7, các vectơ từ trường song song với phương Iz và cùng chiều với nhau. Áp dụng điều kiện biên, ta có :

$$H_{t1} + H_{p1} = H_{k1} \quad (4.2)$$

Nếu gọi ϵ và μ , ϵ' và μ' lần lượt là hằng số điện môi và độ từ thẩm của môi trường 1 và môi trường 2, theo lý thuyết về sóng điện từ, ta có :

$$H_{t1} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{t1}, \quad H_{p1} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{p1}, \quad H_{k1} = \sqrt{\frac{\varepsilon}{\mu}} E_{k1}$$

Ngoài ra chiết suất của một môi trường là :

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\frac{\varepsilon\mu}{\varepsilon_0\mu_0}} \quad \begin{cases} c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}} \\ v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon\mu}} \end{cases}$$

với các môi trường trong suốt, ta có : \hat{G} , suy ra : \hat{G}
tương tự \hat{G}

Thế các hệ thức trên vào phương trình (4.2), ta được :

$$nE_{t1} + nE_{p1} = n'E_{k1} \quad (4.3)$$

Từ phương trình (4.1) suy ra : \hat{G} (4.4)

Từ phương trình (4.3) suy ra : \hat{G} (4.5)

Lấy (4.4) + (4.5), suy ra : \hat{G}

$$\text{hay } 2E_{t1} = E_{k1} \frac{\cos r \sin r + \sin i \cos i}{\cos i \sin r} = E_{k1} \frac{\sin 2r + \sin 2i}{2 \cos i \sin r}$$

$$2E_{t1} = E_{k1} \frac{\sin(i+r) \cos(i-r)}{\cos i \sin r}$$

Vậy \hat{c}

(4.6)

(4.5) – (4.4), suy ra :

$$2E_{p1} = E_{k1} \left(\frac{\sin i}{\sin r} - \frac{\cos r}{\cos i} \right) = E_{k1} \frac{\sin(i-r) \cos(i+r)}{\cos i \sin r}$$

Suy ra

$$E_{p1} = E_{t1} \frac{\operatorname{tg}(i-r)}{\operatorname{tg}(i+r)} \quad (4.7)$$

Các công thức (4.6) và (4.7) được gọi là công thức Fresnel.

- Trong trường hợp vectơ điện của sóng tới thẳng góc với mặt phẳng tới.

Trong trường hợp này, vectơ điện của các sóng phản xạ và khúc xạ cũng thẳng góc với mặt phẳng tới, và ta có các công thức Fresnel là :

$$E_{p2} = -\frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} E_{t2} \quad (4.8)$$

$$E_{k2} = \frac{2\cos i \sin r}{\sin(i+r)} E_{t2} \quad (4.9)$$

Các công thức Fresnel cho ta biết cường độ của các vectơ điện trong các sóng phản xạ và khúc xạ ứng với một góc tới xác định của chùm tia tới, phân cực thẳng chẵn động song song với mặt phẳng tới hoặc thẳng góc với mặt phẳng tới.

Gọi I_p và I_t là cường độ ánh sáng tới và ánh sáng phản chiếu, ta có hệ số phản chiếu là :

$$\rho_1 = \frac{I_{p1}}{I_{t1}} = \frac{E_{p1}^2}{E_{t1}^2} = \frac{\text{tg}^2(i-r)}{\text{tg}^2(i+r)} \quad (4.10)$$

(Trường hợp vectơ điện của chùm tia tới song song với mặt phẳng tới)

$$\text{hay } \rho_2 = \frac{I_{p2}}{I_{t2}} = \frac{E_{p2}^2}{E_{t2}^2} = \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)} \quad (4.11)$$

Nếu vectơ điện \vec{G} của sóng tới có một phương vị bất kỳ, ta có thể tách \vec{G} thành hai thành phần : song song và thẳng góc với mặt phẳng tới và áp dụng các công thức (4.10) và (4.11) cho hai thành phần này.

Bây giờ xét ánh sáng tới là ánh sáng thiên nhiên. Ánh sáng này gồm các sóng phân cực thẳng phân bố theo tất cả mọi phương thẳng góc với tia sáng. Mỗi sóng được coi là gồm hai thành phần song song và thẳng góc với mặt phẳng tới. Vì lý do đối xứng của ánh sáng tự nhiên, tổng số của mỗi thành phần thì bằng nhau. Vì vậy, trong trường hợp này, nếu I_p và I_t lần lượt là tổng số cường độ sáng của sóng phản xạ và sóng tới ứng với tất cả mọi phương vị của vectơ điện của sóng tới thì ta có :

$$(4.12)$$

$$\rho = \frac{I_p}{I_t} = \frac{1}{2} \frac{\text{tg}^2(i-r)}{\text{tg}^2(i+r)} + \frac{1}{2} \frac{\sin^2(i-r)}{\sin^2(i+r)}$$

Nếu xét trường hợp $i = 0$ và môi trường thứ nhất là không khí, ta có : \vec{G}

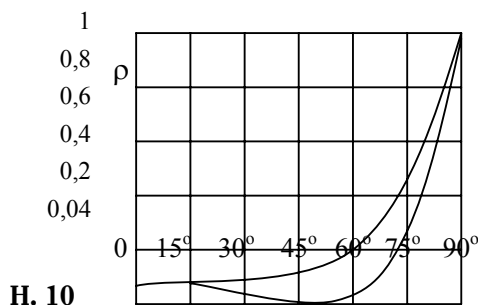
Với môi trường thứ hai là thủy tinh có chiết suất $n = 1,5$, suy ra $\rho = 4\%$. Vậy trong sự phản xạ thẳng góc trên bề mặt thủy tinh này chỉ có 4% ánh sáng phản xạ trở lại.

Ta thấy trong trường hợp góc tới Brewster, \vec{G} , số hạng thứ nhất của công thức (4.12) triệt tiêu, có nghĩa là không có ánh sáng phản xạ mà vectơ điện (vectơ chẵn động sáng) có thành phần song song với mặt phẳng tới, nói cách khác, ánh sáng phản xạ trong điều kiện này là ánh sáng phân cực thẳng có phương chẵn động thẳng góc với mặt phẳng tới hay song song với mặt phản chiếu.

$$\begin{aligned} \text{Ta có :} \quad n \sin i_B &= n' \sin r_B \\ \text{và} \quad i_B + r_B &= \frac{\pi}{2} \\ n \sin i_B &= n' \sin\left(\frac{\pi}{2} - i_B\right) = n' \cos i_B \\ \text{tgi}_B &= \frac{n'}{n} \end{aligned} \quad (4.13)$$

Ta tìm lại được định luật Brewster trong trường hợp tổng quát.

Nếu góc tới khác với góc tới Brewster, trong ánh sáng phản xạ vectơ chấn động sáng có cả hai thành phần thẳng góc và song song với mặt phẳng tới, do đó chỉ phân cực một phần.



Hình vẽ 10 biểu diễn sự biến thiên của hệ số phản chiếu (theo góc tới i trong trường hợp phản chiếu trên mặt tiếp xúc không khí - thủy tinh với chiết suất $n = 1, n' = 1,5$).

SS.5. Độ phân cực.

Xét ánh sáng tới là ánh sáng tự nhiên. Ta có thể coi chấn động sáng này tạo bởi hai thành phần vuông góc có cường độ bằng nhau ($E_{t1} = E_{t2}$) nhưng không kết hợp về pha. Ánh sáng phản xạ cũng gồm hai thành phần vuông góc không kết hợp về pha nhưng có cường độ khác nhau ($E_{p1} \neq E_{p2}$).

(thành phần song song với mặt phẳng tới)

$$E_{p1} = E_{t1} \frac{\cos(i-r)}{\cos(i+r)}$$

$$E_{p2} = E_{t2} \frac{\sin(i-r)}{\sin(i+r)} \quad (\text{thành phần thẳng góc với mặt phẳng tới})$$

Tỉ số cường độ sáng của hai chấn động thành phần là :

$$\frac{I_{p1}}{I_{p2}} = \frac{E_{p1}^2}{E_{p2}^2} = \frac{\cos^2(i+r)}{\cos^2(i-r)} \quad (5.1)$$

Ta thấy, trong trường hợp tổng quát, ta có $I_{p1} < I_{p2}$ (I_{p1} = cường độ ứng với thành phần chấn động song song với mặt phẳng tới, I_{p2} = cường độ ứng với thành phần chấn động thẳng góc với mặt phẳng tới). Vậy trong ánh sáng phản xạ, ta không còn sự đối xứng như trong ánh sáng tới tự nhiên nữa mà chấn động thẳng góc với mặt phẳng tới được ưu đãi hơn, ta có sự phân cực một phần.

Ta định nghĩa độ phân cực của một chùm tia sáng là

$$\delta = \frac{|I_2 - I_1|}{I_2 + I_1} \quad (5.2)$$

Với $0 \leq \delta \leq 1$

Với chùm tia phản xạ, ta có : $\delta_p = \frac{I_{p2} - I_{p1}}{I_{p2} + I_{p1}}$

- Các trường hợp đặc biệt :

* Chùm tia tới thẳng góc với mặt lưỡng chất :

$i = 0, r = 0, I_{p2} = I_{p1}$ ($p = 0$: ánh sáng phản xạ là ánh sáng tự nhiên).

* Tia tới lướt trên mặt lưỡng chiết :

$$i = \frac{\pi}{2}, r = \text{góc khúc xạ giới hạn}$$

$I_{p1} = I_{p2}$ ($p = 0$: ánh sáng phản xạ là ánh sáng tự nhiên).

* Tia tới đến mặt lưỡng chiết dưới góc tới Brewster

$$i = i_B, r = r_B, i_B + r_B = \frac{\pi}{2}$$

$I_{p1} = 0$ ($p = 1$: ánh sáng phản xạ phân cực toàn phần).

- Xét sự phân cực của ánh sáng khúc xạ

Gọi I_{k1} và I_{k2} lần lượt là cường độ sáng ứng với các thành phần song song và thẳng góc với mặt phẳng tới. Ta có :

$$\frac{I_{k1}}{I_{k2}} = \frac{E_{k1}^2}{E_{k2}^2} = \frac{1}{\cos^2(i-r)}$$

$$\text{Hay } \frac{I_{k2}}{I_{k1}} = \cos^2(i-r) \quad (5.3)$$

Ta thấy, trong trường hợp tổng quát, $I_{k1} > I_{k2}$ vậy trong ánh sáng khúc xạ, thành phần chấn động nằm trong mặt phẳng tới được ưu đãi hơn.

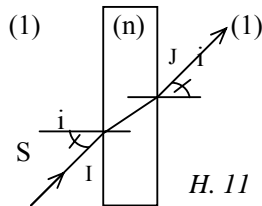
Độ phân cực (5.6)

$$\delta^k = \frac{I_{k1} - I_{k2}}{I_{k1} + I_{k2}}$$

* Khi $i = 0, I_{k1} = I_{k2}$, ($k = 0$: ánh sáng khúc xạ là ánh sáng tự nhiên).

Với $i \neq 0$, ánh sáng khúc xạ là ánh sáng phân cực một phần.

Trên thực tế, ta không thể quan sát được ánh sáng trong môi trường thủy tinh mà chỉ quan sát được ánh sáng ló ra khỏi bản thủy tinh mà thôi. Xét một trường hợp thường gặp trong thí nghiệm ánh sáng đi qua một bản thủy tinh hai mặt song song đặt trong không khí, góc tới là i , góc khúc xạ là r .



Chấn động tới SI là ánh sáng tự nhiên gồm hai thành phần không kết hợp, cường độ bằng nhau ($E_{2t1} = E_{2t2}$) chấn động ứng với tia IJ gồm hai thành phần cũng không kết hợp nhưng có cường độ khác nhau ($E_{2k1} \neq E_{2k2}$). Các thành phần của chấn động ló IR cũng có cường độ khác nhau $E'_{2k1} \neq E'_{2k2}$.

Với lần khúc xạ tại J, góc tới là góc r , góc khúc xạ là i , ta có:

$$\frac{I'_{k2}}{I'_{k1}} = \frac{E_{k2}^2}{E_{k1}^2} = \frac{E_{k2}^2}{E_{k1}^2} \cos^2(i-r)$$

$$\text{hay } \frac{I'_{k2}}{I'_{k1}} = \cos^4(i-r)$$

khi $i = i_B$ (góc tới Brewster) : $r = r_B = \hat{G}$

$$\frac{I'_{k2}}{I'_{k1}} = \cos^4\left(2i_B - \frac{\pi}{2}\right) = \sin^4 2i_B$$

$$= \left[\frac{2 \operatorname{tg} i_B}{1 + \operatorname{tg}^2 i_B} \right]^4 = \left[\frac{2n}{1 + n^2} \right]^4$$

với $n = 1,5, \hat{G}$, nghĩa là độ phân cực của ánh sáng ló khá nhỏ.

Muốn tăng độ phân cực của ánh sáng ló, ta có thể dùng nhiều bản thủy tinh đặt song song và liên tiếp nhau.

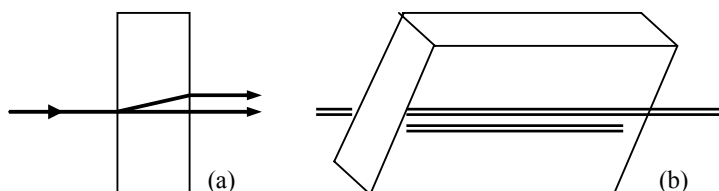
PHÂN CỰC ÁNH SÁNG DO MÔI TRƯỜNG DỊ HƯỚNG

SS.6. Môi trường dị hướng.

Từ trước đến giờ, ta chỉ xét các môi trường đẳng hướng, nghĩa là ánh sáng truyền đi trong môi trường theo mọi phương đều như nhau, thí dụ : thủy tinh thông thường, nước

Trong phần này, ta đề cập tới các môi trường dị hướng, có các tính chất thay đổi theo từng phương. Thí dụ: đá băng lan, thạch anh, Phần lớn các chất dị hướng là những chất kết tinh.

Trong trường hợp tổng quát, một tia sáng khi chiếu tới một bản tinh thể dị hướng thì được tách ra làm hai tia khúc xạ, cho ra hai tia ló, gọi là tia thường R_0 và tia bất thường R_e . Do đó khi ta nhìn một vật qua một bản tinh thể dị hướng, ta thấy hai ảnh, ứng với hai chùm tia thường và bất thường.

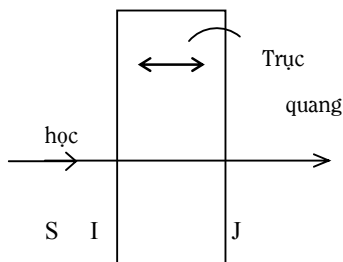


Tia bất thường khi khúc xạ qua môi trường không tuân theo ít nhất là một trong hai định luật Descartes.

- Trục quang học.

Trong môi trường dị hướng có những phương đặc biệt, khi ánh sáng truyền trong môi trường theo các phương này thì truyền giống như ở trong một môi trường đẳng hướng vậy.

Phương đặc biệt này được gọi là trục quang học của tinh thể dị hướng.

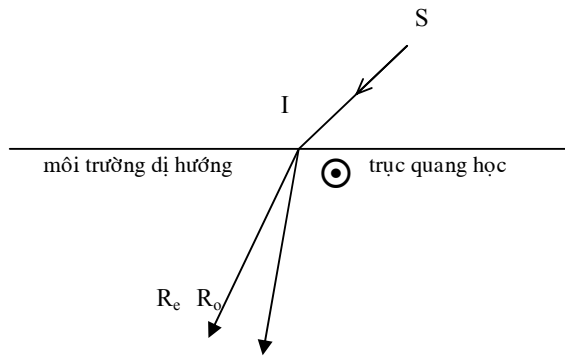


Trong trường hợp hình vẽ 13, ánh sáng truyền qua bản dị hướng song song với trục quang học, ta được một tia ló duy nhất, tuân theo các định luật Descartes về khúc xạ (tại I và J).

Các môi trường có một trục quang học được gọi là môi trường đơn trục, nếu có hai trục quang học thì gọi là môi trường lưỡng trục.

Ta chỉ đề cập tới các môi trường dị hướng đơn trục.

- Mặt phẳng hợp bởi trục quang học và tia thường được gọi là mặt phẳng chính đối với tia thường. Mặt phẳng hợp bởi trục quang học với tia bất thường được gọi là mặt phẳng chính đối với tia bất thường.

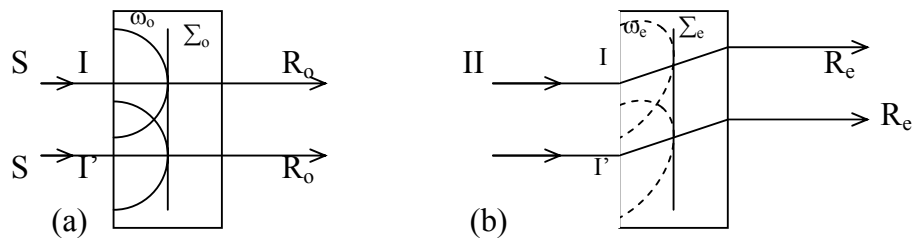


H.14

Trong hình 14, trục quang học thẳng góc với mặt phẳng hình vẽ. Mặt phẳng chính đối với tia thường là mặt phẳng thẳng góc với mặt phẳng hình vẽ và chứa tia IR₀; mặt phẳng chính đối với tia bất thường là mặt phẳng thẳng góc với mặt phẳng hình vẽ chứa tia IR_e.

SS.7. Bề mặt sóng thường - bề mặt sóng bất thường.

Chiếu một chùm tia sáng song song tới một bản dị hướng. Xét một điểm tới I. Ta có thể coi I là một nguồn sáng thứ cấp theo nguyên lý Huyghens.

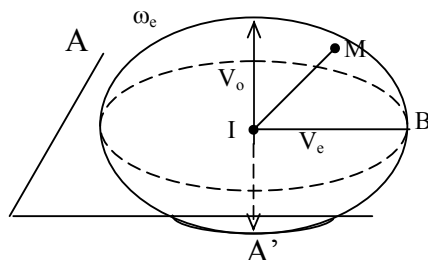


H. 15

Đối với tia thường, ánh sáng từ I truyền đi theo mọi hướng đều như nhau, do đó sau một thời gian ánh sáng truyền tới một mặt cầu, tâm I. Mặt cầu này được gọi là bề mặt sóng thường (0. Với các điểm tới khác (I', I'', ...) đối với tia thường, ta cũng có các bề mặt sóng con là các mặt cầu (tâm I', I'', ...). Mặt phẳng (0 tiếp xúc với các bề mặt sóng con (0 là mặt phẳng sóng thường.

Đối với tia bất thường, ánh sáng từ I, I'... truyền đi theo mọi phương trong môi trường dị hướng với các vận tốc khác nhau. Sau một thời gian, ánh sáng truyền tới một bề mặt có dạng elipsoid tròn xoay, với trục đối xứng tròn xoay chính là trục quang học.

Elipsoid này được gọi là bề mặt sóng bất thường (e. Mặt phẳng (e tiếp xúc với các bề mặt sóng bất thường (e được gọi là mặt phẳng sóng bất thường.



H. 16

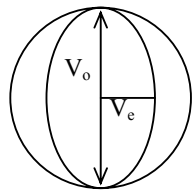
Nếu ta cắt bề mặt sóng bất thường theo một mặt phẳng (P) thẳng góc với trục quang học, ta được đường cắt là một đường tròn. Nếu mặt phẳng (P) song song với trục quang học, thì đường cắt là một đường elip.

Nếu ánh sáng truyền theo phương IA (AA' là trục quang học), nó truyền giống như trong môi trường đẳng hướng, vậy có vận tốc V_0 (vận tốc thường). Khoảng cách từ I (lấy trùng với điểm tới) tới một điểm M trên bề mặt sóng biểu diễn vận tốc của ánh sáng truyền theo phương IM. Ứng với tia bất thường IM, vận tốc truyền là V_{er} , gọi là vận tốc bất thường theo tia.

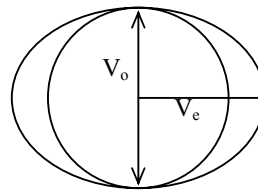
Nếu ánh sáng truyền theo các phương IB thẳng góc với trục quang học thì vận tốc truyền theo các phương này đều như nhau và có một trị số là V_e , được gọi là vận tốc bất thường chính.

Ta phân biệt 2 loại tinh thể :

- ◆ Tinh thể dương nếu có $V_0 > V_e$, thí dụ : Thạch anh.
- ◆ Tinh thể âm nếu có $V_0 < V_e$, thí dụ : Đá băng lan (Một loại tinh thể CaCO_3).



Tinh thể dương



Tinh thể âm

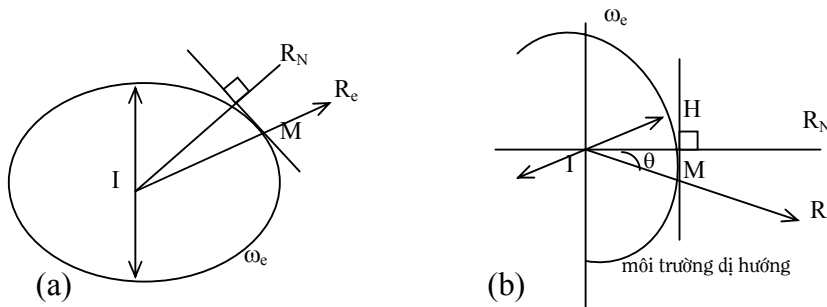
H.17

Với tia thường, bề mặt sóng là mặt cầu nên tia thường thẳng góc với bề mặt sóng (0, chính vì tính chất này, ta có các định luật Descartes đối với tia thường.

Với tia bất thường, bề mặt sóng là một elipsoid nên tia bất thường trong trường hợp tổng quát không thẳng góc với bề mặt sóng (e. Vì vậy, trong trường hợp tổng quát ta không thể áp dụng các định luật về khúc xạ của Descartes cho tia bất thường. Ta chỉ áp dụng được định luật Descartes cho các tia bất thường đặc biệt, thẳng góc với bề mặt sóng bất thường.

SS.8. Chiết suất.

Xét tia bất thường $I R_e$ cắt bề mặt sóng bất thường (e tại M. Vẽ mặt phẳng tiếp xúc với bề mặt sóng (e tại M. Tia pháp tuyến (tia bất thường theo pháp tuyến) được định nghĩa là tia $I R_n$ thẳng góc với mặt phẳng tiếp xúc trên.



H.18

Gọi thời gian để ánh sáng truyền trên tia bất thường R_e từ I tới M là t.

Vận tốc bất thường theo tia là :

$$V_{er} = \frac{IM}{t}$$

Gọi H là hình chiếu của M xuống pháp tuyến RN, ta định nghĩa vận tốc bất thường theo pháp tuyến là:

$$V_{en} = \frac{IH}{t} = \frac{IM}{t} \cos \theta = V_{er} \cdot \cos \theta$$

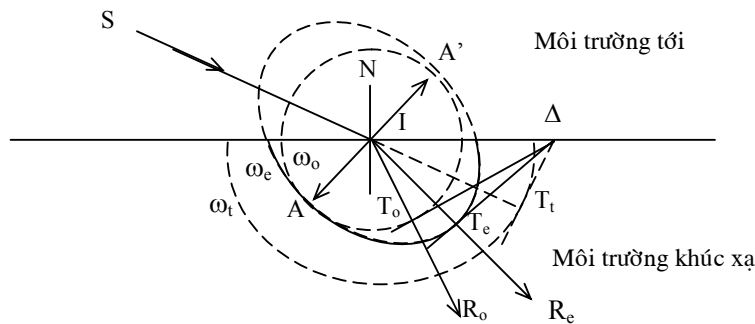
Chiết suất bất thường theo tia là : \hat{G}

Chiết suất bất thường theo pháp tuyến

$$n_{en} = \frac{c}{V_{en}} = \frac{c}{V_{er} \cdot \cos \theta} = \frac{n_{er}}{\cos \theta}$$

$$\text{Vậy } n_{en} = n_{er} \cdot \cos \theta$$

SS.9. Cách vẽ tia khúc xạ. Cách vẽ Huyghens.



H.19

Xét tia tới SI. Trục quang học của môi trường khúc xạ là AA'. Ta thực hiện cách vẽ như sau :

- Vẽ bề mặt sóng ứng với môi trường tới : (t và các bề mặt sóng thường (0 và bất thường (e ứng với môi trường khúc xạ.

- Kéo dài tia tới SI, cắt bề mặt sóng ứng với môi trường tới tại Tt . Từ điểm Tt vẽ mặt tiếp xúc với bề mặt sóng này, cắt mặt ngăn chia 2 môi trường theo đường (((thẳng góc với mặt phẳng của hình vẽ).

- Qua (, vẽ mặt tiếp xúc với bề mặt sóng thường (0 ứng với môi trường khúc xạ, ta được tiếp điểm T0. Nối IT0, đó là tia khúc xạ thường R0.

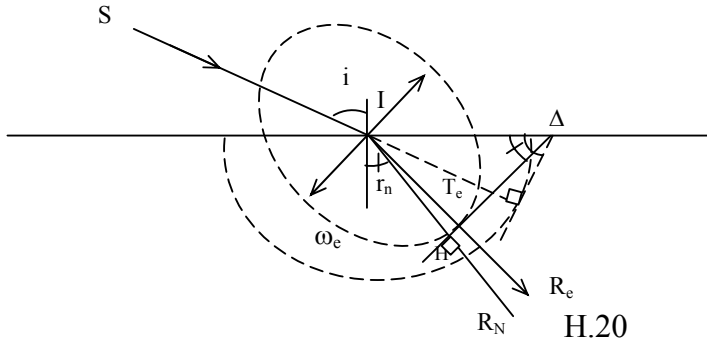
- Qua (, vẽ mặt tiếp xúc với bề mặt sóng bất thường (e ứng với môi trường khúc xạ, ta được tiếp điểm Te. Nối ITE, đó là tia khúc xạ bất thường Re.

- Từ cách vẽ trên, ta nhận xét được một điều quan trọng. Trong các trường hợp trục quang học hoặc nằm trong mặt phẳng tới, hoặc thẳng góc với mặt phẳng tới, thì các tia khúc xạ thường và bất thường cũng nằm trong mặt phẳng tới. Trái lại nếu trục quang học xiên góc với mặt phẳng tới, tia khúc xạ bất thường Re không nằm trong mặt phẳng tới.

Nhận xét thứ hai : Trong trường hợp trục quang học nằm trong mặt phẳng tới, hai mặt phẳng chính, ứng với tia thường và tia bất thường thì trùng nhau.

Ta đã biết sự khúc xạ ứng với tia bất thường không đúng theo định luật Descartes, nhưng nếu xét tia pháp tuyến IRn thì tia này lại thỏa các định luật này.

Để đơn giản ta xét môi trường tới là không khí (hình vẽ 5.20). Bề mặt sóng (t có bán kính là vận tốc c của ánh sáng trong không khí.



Ta thấy ngay : $I = c/\sin i = IH/\sin r_N$

$$\sin i = \frac{c}{IH} \sin r_N$$

So sánh với hình vẽ 5.18b ta thấy điểm T_e trong hình 5.20 chính là điểm M trong hình 5.18b với thời gian $t = 1$ đơn vị, vận tốc bất thường theo pháp tuyến: Ven

(chiết suất bất thường theo pháp tuyến)

$$\frac{c}{IH} = \frac{c}{v_{en}} = n_{en}$$

Ta tìm lại được định luật Descartes đối với tia pháp tuyến

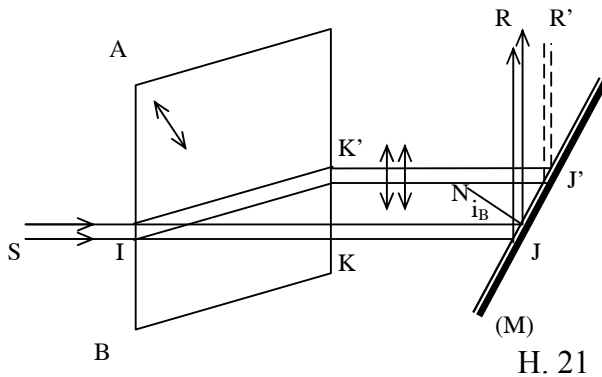
$$\sin i = n_{en} \cdot \sin r_n$$

Ngoài ra tia pháp tuyến R_n luôn luôn nằm trong mặt phẳng tới.

SS.10. Sự phân cực do khúc xạ qua môi trường dị hướng.

Từ thí nghiệm Malus ta thấy khi quay gương M để mặt phẳng tới $II'N'$ thẳng góc với phương chấn động của tia tới II' , cường độ của tia phản chiếu $I'R$ cực đại (h.5), khi mặt phẳng tới $II'N'$ song song với phương chấn động của tia tới II' thì cường độ tia phản chiếu $I'R$ cực tiểu.

Bây giờ, ta xét một thí nghiệm sau :



Chiếu thẳng góc một chùm tia sáng SI tới mặt AB của một bản tinh thể đá băng lan, ta được 2 chùm tia ló. Hứng 2 chùm tia này lên một kính phân tích M bằng thủy tinh dưới các góc tới $i_B = 57^\circ$. Quay gương M xung quanh phương của tia tới, ta thấy cường độ của 2 chùm tia phản chiếu (ứng với 2 chùm tia ló trên) thay đổi ngược chiều: khi cường độ của chùm tia này cực đại, thì cường độ chùm tia cực tiểu (coi như triệt tiêu) và ngược lại kết quả này chứng tỏ 2 chùm tia ló ra khỏi bản tinh thể là 2 chùm ánh sáng phân cực thẳng, có các phương chấn động vuông góc nhau.

Thí nghiệm cũng cho thấy, khi gương M ở vị trí như hình vẽ 21 (mặt phẳng tới KJN trùng với mặt phẳng chính ứng với tia thường) thì chùm tia phản chiếu J'R' có cường độ cực tiểu. Vậy chùm tia thường KJ có phương chấn động thẳng góc với mặt phẳng tới, trong khi chùm tia bất thường K'J' có phương chấn động song song với mặt phẳng tới.

Như vậy, với bản tinh thể, chấn động của tia thường thẳng góc với mặt phẳng chính ứng với tia thường, chấn động của tia bất thường nằm trong mặt phẳng chính ứng với tia bất thường. (Trong hình vẽ h.21, 2 mặt phẳng chính trùng nhau).

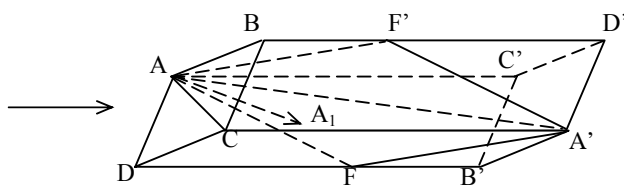
SS.11. Các loại kính phân cực .

Trong các thí nghiệm trên, ta thấy một gương thủy tinh đặt dưới góc tới Brewster sẽ cho ta một chùm tia phản chiếu phân cực, có sự bất tiện trong việc bố trí dụng cụ (không thể sắp đặt thẳng hàng), ngoài ra, khó xác định được hoàn toàn chính xác góc tới Brewster, do đó trên thực tế, trong thí nghiệm Malus, không thể làm cường độ tia phản chiếu I'R hoàn toàn triệt tiêu.

Người ta có thể dùng các loại kính phân cực sau tiện lợi hơn:

1. Nicol:

Nicol làm bằng tinh thể đá băng lan, có dạng như hình vẽ 22.

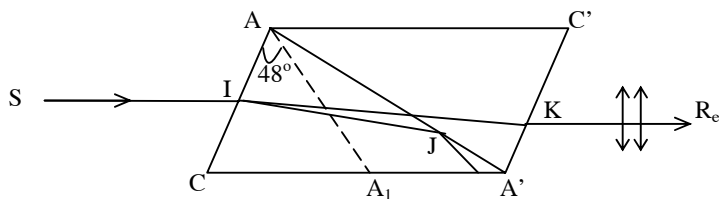


H.22

- * ABCD và A'B'C'D' là các hình thoi với AC và A'C' là các đường chéo ngắn.
- * Các mặt bên là các hình bình hành
- * $AC' \approx 3AB$.

Trục quang học AA1 nằm trong mặt phẳng ACA'C'. Ánh sáng đi vào như hình vẽ 22. Mặt phẳng ACA'C' là mặt phẳng chính của tia thường và tia bất thường.

Người ta cưa tinh thể trên theo mặt phẳng AFA'F' thẳng góc với mặt phẳng ACA'C'. Hai mặt phẳng cắt nhau theo đường AA'. Sau đó dán hai nửa tinh thể trên lại bằng một lớp nhựa Canada. Đây là một loại nhựa thơm có chiết suất n ở trong khoảng các chiết suất thường no và bất thường chính ne của đá băng lan ($n_o > n > n_e$). Ta được một lăng kính Nicol.

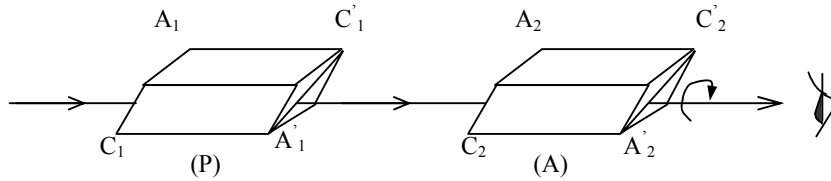


H.23

Chiếu tới Nicol một chùm tia sáng SI song song với phương AC' (SI là ánh sáng tự nhiên hoặc ánh sáng phân cực). Khi đi vào Nicol, ánh sáng được tách ra làm hai chùm tia : chùm tia thường tới lớp nhựa Canada với góc tới lớn hơn góc giới hạn nên phản chiếu toàn phần tại J (trường hợp đi từ môi trường chiết quang hơn sang môi trường chiết quang kém) và bị hấp thụ khi tới mặt CA' (được bôi đen). Chùm tia bất thường đi qua lớp nhựa Canada

và ló ra ngoài. Như vậy, Nicol chỉ cho chùm tia bất thường đi qua với mặt phẳng chấn động là mặt phẳng chính $AC'A'C$.

Trong các thí nghiệm, người ta thường dùng 2 Nicol đặt nối tiếp nhau và quan sát ánh sáng ló ra khỏi hệ thống.

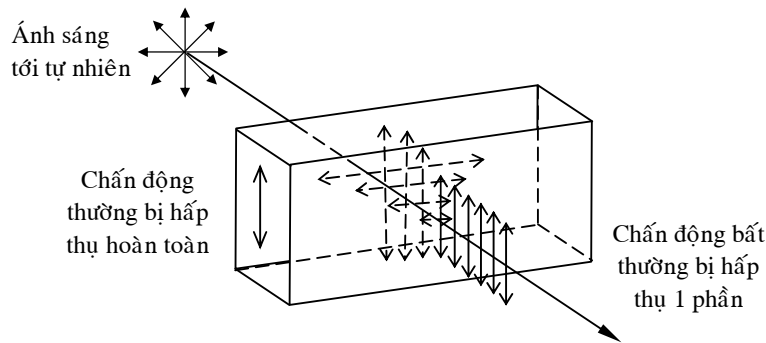


H.24

Ta quay Nicol A quanh phương của tia sáng, khi mặt phẳng chính của Nicol A song song với mặt phẳng chính của Nicol P, mắt nhận được cường độ sáng cực đại, khi 2 mặt phẳng chính thẳng góc nhau, cường độ sáng tới mắt triệt tiêu : Nicol A đã chặn lại hoàn toàn ánh sáng ló ra từ P.

2. Bản Tourmaline:

Đây là một loại tinh thể có đặc tính hấp thụ không đều chấn động thường và chấn động bất thường. Như vậy với một bề dày thích hợp, một trong hai chấn động bị hấp thụ hoàn toàn, chỉ còn chấn động thứ 2 ló ra. Bản tourmaline là một bản tinh thể loại này, có 2 mặt song song, bề dày chừng 1mm, trục quang học song song với mặt vào. Với bề dày này, bản tourmaline hấp thụ hoàn toàn tia thường và chỉ cho tia bất thường đi qua với mặt phẳng chấn động song song với trục quang học.

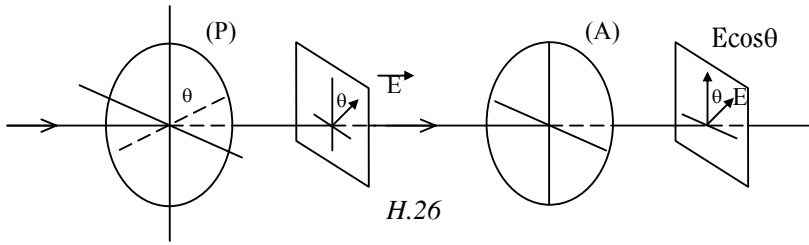


H.25

3. Bản Polaroid:

Có tính hấp thụ tia thường mạnh hơn bản tourmaline. Một bản polaroid dày 0,1mm có thể hấp thụ hoàn toàn tia thường.

SS.12. Định luật Malus.



Gọi θ là góc hợp bởi các mặt phẳng chấn động ứng với hai kính phân cực P và A. Nếu E là chấn động sáng sau khi qua P thì chỉ có thành phần $E \cos \theta$ được truyền qua kính phân cực mà thôi.

Vậy cường độ sáng sau khi qua A là :

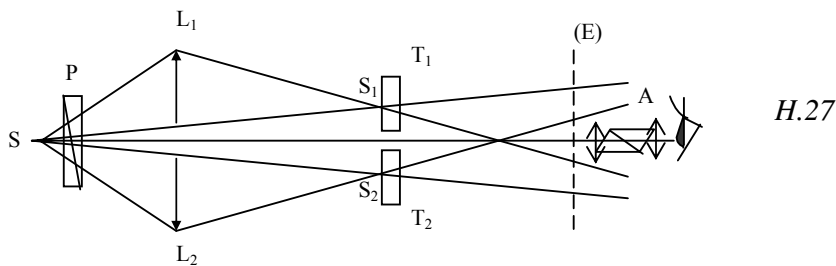
$$I = I_M \cos^2 \theta$$

Trong đó I_M là cường độ cực đại của ánh sáng ló ra khỏi A (khi quay kính A quanh phương truyền của tia sáng, ta có $I = 0$ khi $\theta = 90^\circ$ và $I = I_M$ khi $\theta = 0$). Hệ thức trên được thành lập bởi Malus năm 1809 do các kết quả thực nghiệm, nên được gọi là định luật Malus.

GIAO THOA VỚI ÁNH SÁNG PHÂN CỰC

SS.13. Thí nghiệm Arago - Fresnel.

Ta có thể thực hiện giao thoa với ánh sáng phân cực nhưng vấn đề phức tạp hơn khi dùng ánh sáng tự nhiên.



Trong thí nghiệm này dùng các bán thấu kính Billet nhưng sau S_1 và S_2 đặt 2 bản tourmaline T_1 và T_2 . Quan sát hiện tượng trên màn E.

Trước hết chưa dùng nicol A. Ta thấy trong cả 2 trường hợp: Ánh sáng tới các bán thấu kính L_1 và L_2 là ánh sáng tự nhiên (không dùng nicol P) hay ánh sáng phân cực (có dùng nicol như hình vẽ 27). Kết quả thí nghiệm như sau :

- Nếu T_1 và T_2 ở vị trí có quang trục song song, trên màn E ta thấy có hiện tượng giao thoa.
- Nếu T_1 và T_2 ở vị trí có các quang trục thẳng góc, trên màn E không thấy hiện tượng giao thoa (vì 2 chấn động không cùng phương).

- Bây giờ vẫn giữ T_1 và T_2 ở vị trí thẳng góc nhưng quan sát màn E bằng một kính nhòm có Nicol A. Hiện tượng quan sát được như sau :

- Nếu ánh sáng tới L_1 và L_2 là ánh sáng thiên nhiên, ta không thấy vân giao thoa mặc dù, sau khi qua A, hai chấn động đã cùng phương. Điều này đưa đến kết luận: hai chùm tia sáng phân cực ló ra từ T_1 và T_2 không phải là ánh sáng kết hợp. Thực vậy, ta đã biết, một chấn động sáng tự nhiên được coi gồm hai chấn động thành phần vuông góc nhau và không kết hợp về pha. Hai bản Tourmaline cho truyền qua hai chấn động vuông góc và

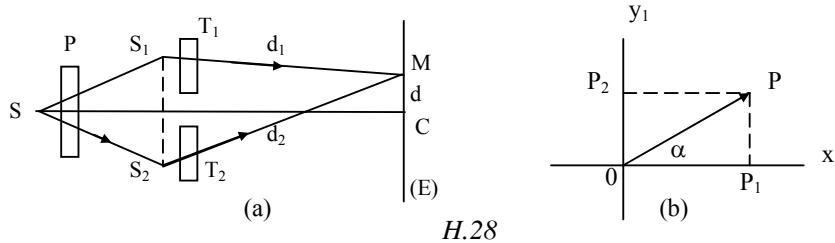
không kết hợp, do đó sau khi đi qua A mặc dù đã cùng phương, vẫn không thể có giao thoa.

- Nếu đặt Nicol P sau nguồn S, ta có ánh sáng phân cực thẳng tới L1 và L2. Nhìn qua A ta thấy có vân giao thoa.

Trong trường hợp này các bản T1 và T2 cho truyền qua hai thành phần của cùng một chấn động, nghĩa là chúng có thể kết hợp về pha với nhau. Sau khi đi qua A, hai chấn động trở thành đồng phương, tạo thành hiện tượng giao thoa.

SS.14. Khảo sát chấn động Elip.

Tại một điểm M trên màn E, ta có sự hợp của hai chấn động vuông góc. Ta khảo sát chấn động elip do sự hợp này.



H.28

Giả sử sau khi đi qua Nicol P, chấn động sáng có dạng $s = a \cos(\omega t)$.

Trong hình 28(b), các trục Ox_1, Oy_1 song song với các trục quang học của hai bản tourmaline T1, T2. Các chấn động truyền qua T1 và T2 là hai thành phần vuông góc của chấn động s nên viết được dưới dạng:

$$x_1 = a \cos \alpha \cdot \cos \omega t = A \cos \omega t$$

$$y_1 = a \sin \alpha \cdot \cos \omega t = B \cos \omega t$$

$$\text{với } A = a \cos \alpha, \quad B = a \sin \alpha$$

Khi truyền tới M, hai quang lộ khác nhau nên không còn đồng pha nữa mà giữa chúng có một hệ số pha là

$$\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi(d_2 - d_1)}{\lambda}$$

Sau khi đổi góc thời gian, hai chấn động khi tới M có thể viết như sau :

$$x = A \cos \omega t; \quad y = B \cos (\omega t - \varphi)$$

(các trục x và y lấy trên màn E, song song với các trục x_1 và y_1 , nghĩa là song song với hai trục quang học của hai bản tourmaline T1 và T2).

$$\text{Suy ra : } \frac{x}{A} \sin \varphi = \cos \omega t \cdot \sin \varphi \quad (14.1)$$

$$\frac{x}{A} \cos \varphi = \cos \omega t \cdot \cos \varphi$$

và cũng

$$\frac{y}{B} - \frac{x}{A} \cos \varphi = \sin \omega t \cdot \sin \varphi \quad (14.2)$$

Bình phương 2 vế các phương trình (14.1) và (14.2), cộng lại và suy ra :

$$\frac{x^2}{A^2} - \frac{2 \cos \varphi}{AB} xy + \frac{y^2}{B^2} - \sin^2 \varphi = 0 \quad (14.3)$$

Đây là phương trình một conic có biệt số là

$$\Delta = b^2 - ac = \frac{\cos^2 \varphi - 1}{\mathbb{A}^2 \mathbb{B}^2} < 0$$

Vậy là phương trình của chân động elip.

Ta xét một trường hợp quen thuộc trong các thí nghiệm là để phương chân động OP hợp với các phương của 2 trục quang học của T1 và T2 các góc 45o .

$$\alpha = 45^\circ \Rightarrow \mathbb{A} = \mathbb{B} = \frac{a\sqrt{2}}{2}$$

Phương trình (5.21) trở thành

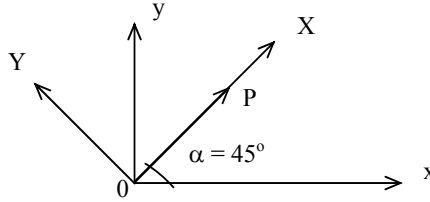
$$x^2 - 2 \cos \varphi .xy + y^2 - \frac{a^2}{2} \sin^2 \varphi = 0 \quad (14.4)$$

Chọn hệ trục mới :

OX theo phương OP,

OY thẳng góc với OP

Ta có :



H.29

$$X = x \cos \alpha + y \sin \alpha = \frac{\sqrt{2}}{2} (x + y)$$

$$= \frac{a}{2} [\cos \omega t + \cos (\omega t - \varphi)]$$

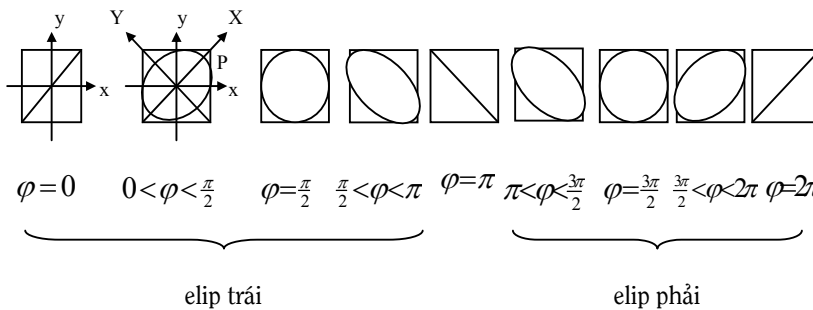
$$= a \cos \frac{\varphi}{2} \cos (\omega t - \frac{\varphi}{2})$$

$$Y = x \sin \alpha + y \cos \alpha = \frac{\sqrt{2}}{2} (-x + y)$$

$$= \frac{a}{2} [-\cos \omega t + \cos (\omega t - \varphi)] = a \sin \frac{\varphi}{2} \sin (\omega t - \frac{\varphi}{2})$$

Suy ra
$$\frac{X^2}{a^2 \cos^2 \frac{\varphi}{2}} + \frac{Y^2}{a^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}} = 1 \quad (14.5)$$

Đây là phương trình của elip có hai trục OX và OY, nội tiếp trong một hình vuông có cạnh là $a\sqrt{2}$, các nửa trục của elip là $a \cos \frac{\varphi}{2}$ và $a \sin \frac{\varphi}{2}$. Dạng của elip thay đổi theo trị số của φ , nghĩa là thay đổi theo vị trí của điểm M trên màn E.



Muốn xác định chiều của elip, ta xét :

$$y = B \cos(\omega t - \varphi)$$

$$\frac{dy}{dt} = -\omega B \sin(\omega t - \varphi)$$

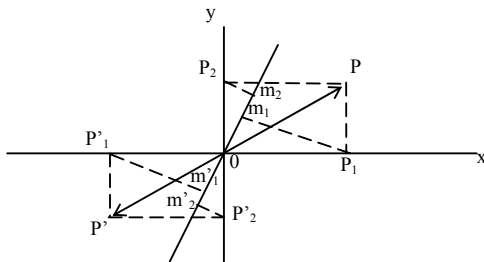
Tại P, ứng với $t = 0, \dot{G}$

- Nếu \dot{G} , elip có chiều ngược chiều quay của kim đồng hồ, ta gọi là elip trái.
- Nếu \dot{G} , chiều của elip đồng chiều với chiều quay của kim đồng hồ, ta gọi là elip phải.

* Nhận xét : tại các điểm trên màn E ứng với $t = k\pi$ ($k = \text{số nguyên}$), ta có chấn động thẳng. Tại các điểm ứng với $t = (2k + 1)\frac{\pi}{2}$, ta có chấn động tròn.

SS.15. Khảo sát cường độ sáng của vân.

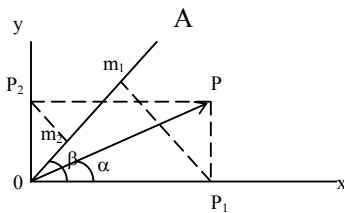
Tại mỗi điểm trên màn E, ta có sự hợp của hai chấn động vuông góc, cường độ sáng tại mọi điểm này bằng nhau, do đó không có vân giao thoa. Nhưng nếu ta quan sát màn E qua Nicol A thì lại thấy vân xuất hiện. Đó là vân giao thoa do sự hợp của hai thành phần om_1 và om_2 của các chấn động x và y chiếu xuống phương OA (phương chấn động cho bởi Nicol A).



H.30

Hệ thống vân rõ nhất khi ta có trường hợp $om_1 = om_2$ (hai biên độ bằng nhau).

Ta nhắc lại, các phương trình chấn động sáng khi đến M là :



$$x = A \cos \omega t$$

$$y = B \cos (\omega t - \varphi)$$

$$\text{với } A = a \cos(\varphi), B = a \sin(\varphi)$$

Gọi β là góc hợp bởi OA và Ox

Các chấn động trên sau khi qua Nicol A là :

$$s_1 = A \cos \beta \cos \omega t$$

$$s_2 = B \sin \beta \cos(\omega t - \alpha)$$

Chấn động tổng hợp :

$$s = s_1 + s_2 = A \cos \beta \cos \omega t + B \sin \beta \cos(\omega t - \alpha)$$

$$s = (A \cos \beta + B \sin \beta \cos \alpha) \cos \omega t + B \sin \beta \sin \alpha \sin \omega t$$

Cường độ sáng là :

$$I = (A \cos \beta + B \sin \beta \cos \alpha)^2 + B^2 \sin^2 \beta \sin^2 \alpha$$

- Khai triển và thu gọn, ta có thể viết dưới 2 dạng :

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2(\alpha - \beta) - \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad (15.1)$$

$$\frac{I}{I_0} = \cos 2(\alpha + \beta) + \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2} \quad (15.2)$$

trong đó $I_0 = a^2$

Trong cả 2 công thức trên, số hạng thứ nhất không phụ thuộc (nghĩa là không tùy thuộc vị trí điểm quan sát M trên màn E. Các số hạng này biểu diễn độ sáng của nền. Trái lại, trong các số hạng thứ hai có chứa φ . Vậy sự thay đổi của cường độ I là do các số hạng này. Hệ thống vân rõ nhất khi nền đen, nghĩa là khi ta có $\cos 2(\alpha - \beta) = 0$ hay $\cos 2(\alpha + \beta) = 0$.

Xét công thức 15.1 : $\cos 2(\alpha - \beta) = 0$ ứng với $2(\alpha - \beta) = 90^\circ$. Đó là trường hợp OA và OP thẳng góc nhau (2 nicol thẳng góc).

Nếu $\alpha = 45^\circ$ thì $\beta = 135^\circ$: $\sin 2\alpha = 1$, $\sin 2\beta = -1$

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

Trong trường hợp này, ta quan sát thấy vân giữa tối

$$\left(\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = 0, I = 0\right)$$

- Xét công thức 15.2 : $\cos 2(\alpha + \beta) = 0$ ứng với $2(\alpha + \beta) = 90^\circ$ (các phương OA và OP cùng nằm trong một góc phần tư hợp bởi các trục Ox, Oy).

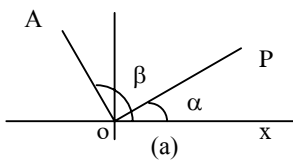
Nếu $\alpha = 45^\circ$ thì $\beta = 45^\circ$, $\sin 2\alpha = \sin 2\beta = 1$ (hai nicol song song: OA // OP).

$$I = I_0 \cos^2 \frac{\varphi}{2}$$

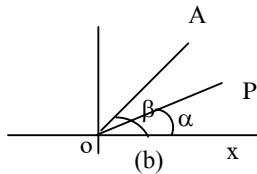
Trong trường hợp này, ta quan sát thấy vân giữa sáng

$$(\varphi = 0, I = I_0)$$

Lưu ý : Hai công thức (15.1) và (15.2) tương đương với nhau. Để cho tiện, ta dùng công thức thứ nhất nếu OP và OA nằm trong hai góc phần tư khác nhau hợp bởi các trục Ox và Oy. Dùng công thức thứ hai nếu OA và OP cùng ở trong một góc phần tư.



H.32



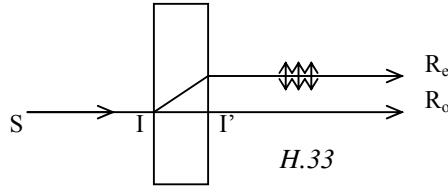
BẢN TINH THỂ MỎNG

SS.16. Phương ưu đãi.

Chiếu thẳng góc một chùm tia sáng song song, đơn sắc tới một bản tinh thể dị hướng, hai mặt song song, bề dày e . Ta được hai chùm tia ló có hai phương chấn động thẳng góc nhau (chùm tia thường R_o và chùm tia bất thường R_e).

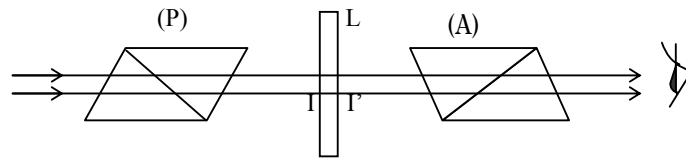
Nếu bề dày e bất thường sẽ trùng ánh sáng phân cực động vuông góc trên.

Ta có thể kiểm



nhỏ, hai chùm tia thường và nhau, ta được ánh sáng ló là elip do sự hợp của hai chấn

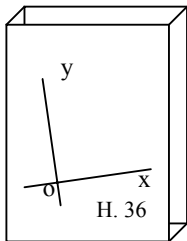
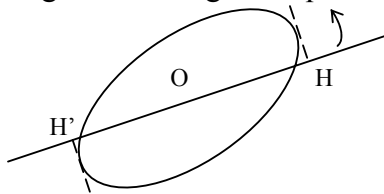
lại bằng thí nghiệm sau :



H.34

Cho một chùm tia sáng song song, đơn sắc đi qua hai Nicol P và A ở vị trí vuông góc. Mắt sẽ không nhận được ánh sáng. Giữa P và A, ta đặt vào một bản tinh thể dị hướng mỏng L, có hai mặt song song và thẳng góc với chùm tia sáng. Ta lại thấy ánh sáng tới mắt. Xoay nicol phân tích A, ta thấy cường độ ánh sáng ló biến thiên qua các cực đại và các cực tiểu nhưng không triệt tiêu. Điều này chứng tỏ ánh sáng đi ra từ bản tinh thể mỏng L là ánh sáng phân cực elip. Biên độ của chấn động ló ra khỏi nicol A được biểu diễn bởi hình chiếu OH của elip xuống phương OA (phương của mặt phẳng thiết diện chính của nicol A). Do đó, khi quay nicol A, cường độ ánh sáng ló đi qua các cực đại và các cực tiểu.

H.35

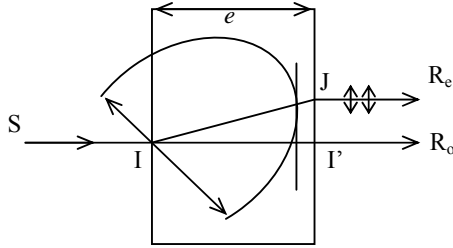


Bây giờ, ta giữ (P) và (A) ở vị trí thẳng góc và quay bản tinh thể L xung quanh phương truyền của tia sáng ta sẽ thấy có hai vị trí của bản L để không có ánh sáng ló ra khỏi nicol A. Hai vị trí này cách nhau một góc quay là 90° . Vậy ta có thể kết luận : trong tinh thể dị hướng có hai phương chấn động đặc biệt Ox và Oy thẳng góc nhau khi ánh sáng tới có phương chấn động song song với một trong hai phương này thì không bị thay đổi trạng thái phân cực (vẫn là phân cực thẳng như cũ) trong thí nghiệm trên, khi ta quay bản tinh thể L đến lúc phương Ox hoặc Oy song song với phương chấn động OP của ánh sáng tới thì ánh sáng phân cực này được đi qua không bị thay đổi. Ánh sáng ló khỏi (L) vẫn là ánh sáng phân cực thẳng OP do đó bị A hoàn toàn chặn lại.

Các phương Ox và Oy được gọi là các phương ưu đãi của bản tinh thể (các đường Ox và Oy còn được gọi là các đường trung hòa của bản tinh thể dị hướng).

SS.17. Hiệu quang lộ giữa tia thường và tia bất thường gây ra do bản tinh thể.

Giả sử ánh sáng chiếu tới bản mỏng là ánh sáng phân cực thẳng OP. Khi đi vào bản, chấn động OP được phân tích thành hai chấn động thành phần OP1 và OP2 theo các phương ưu đãi Ox, Oy. Các chấn động OP1, OP2 truyền qua bản tinh thể mà không bị biến đổi trạng thái phân cực và chính là các chấn động của tia thường và tia bất thường mà ta đã đề cập ở trên.



Hình 37

Hiệu quang lộ giữa hai tia khi đi qua bản là
 ($= IJ n_{en} - I\Gamma' n_o$ mà $IJ n_{en} = I\Gamma' n_o$ (xem lại phần 5.8)

$$\delta = e (n_{en} - n_o) \quad (17.1)$$

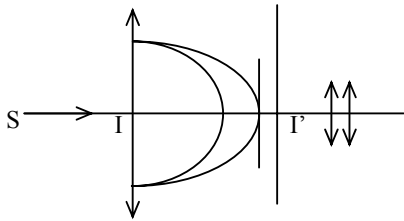
trong đó : n_{en} = chiết suất bất thường theo pháp tuyến

n_o = chiết suất thường

Hiệu số pha tương ứng là :

$$\varphi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi e (n_{en} - n_o)}{\lambda}$$

Trong trường hợp đặc biệt trục quang học song song với các mặt của bản tinh thể, các tia thường và bất thường trùng nhau; tia bất thường thẳng góc với trục quang học nên $n_{en} = n_e$ (chiết suất bất thường chính).



H.38

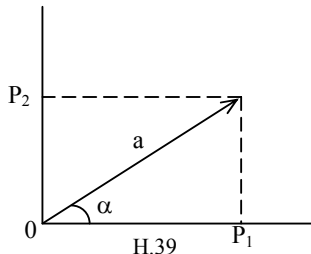
Khi đó : ($= e (n_e - n_o)$)

Ta trở lại trường hợp chung ở trên. Như vậy ta thấy : khi đi vào bản tinh thể, hai chấn động thành phần OP1, OP2 đồng pha với nhau. Khi đi vào bản tinh thể dị hướng, chúng truyền đi với các vận tốc khác nhau nên trở thành lệch pha với nhau. Khi ló ra khỏi bản tinh thể, giữa chúng

có một hiệu số pha là (.

Sự tổng hợp 2 chấn động vuông góc và không đồng pha này tạo thành chấn động elip.

Giả sử chấn động OP1 song song với trục Ox và ứng với chiết suất nhỏ nghĩa là ứng với vận tốc truyền lớn. Trong trường hợp đó, trục Ox được gọi là trục nhanh, phân biệt với trục Oy là trục chậm.



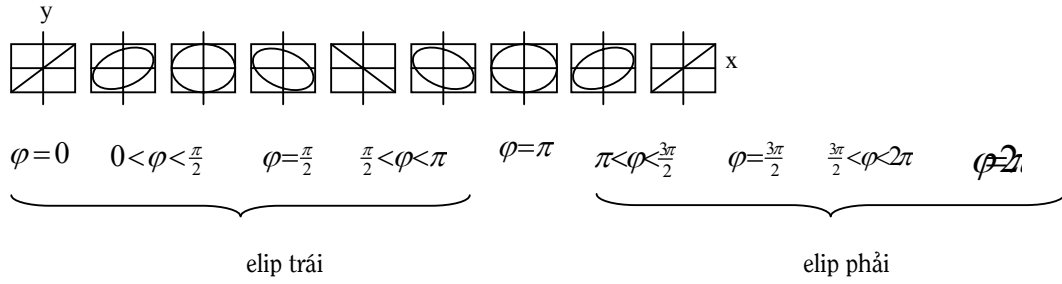
H.39

Nếu chấn động tới OP có biên độ là a thì các chấn động thành phần OP1, OP2 có các biên độ là $a \cos(\alpha)$, $a \sin(\alpha)$. Khi ló ra khỏi bản mỏng, các chấn động này có thể viết dưới dạng:

$$x = a \cos \alpha \cdot \cos \omega t ;$$

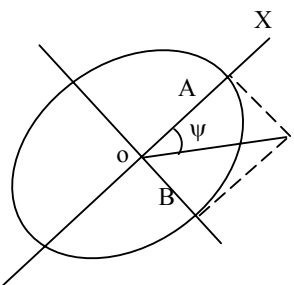
$$y = a \sin \alpha \cdot \sin (\omega t - \varphi)$$

Chấn động elip do sự hợp của hai chấn động này nội tiếp trong một hình chữ nhật có các cạnh là $2a \cos(\alpha)$ và $2a \sin(\alpha)$. Hình dạng và phương vị của elip thay đổi theo trị số của góc (α) và hiệu số vị tương (φ) . Ở đây ta xét trường hợp giữ (α) không đổi, sự thay đổi của chấn động elip theo hiệu số vị tương (φ) như hình vẽ 40.



H.40

Như vậy nếu bản tinh thể có cùng bản chất thì ta được các chấn động elip khác nhau ló ra khỏi bản tùy theo bề dày e của bản tinh thể.



Tỉ số $e = \frac{b}{a}$ giữa hai nửa trục của elip được gọi là elip tính của

chấn động. $e = \frac{b}{a} = \text{tg} \Psi$

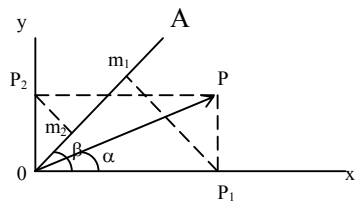
Tỉ số này để đo độ đẹp của elip, $\frac{b}{a}$ càng nhỏ, elip càng đẹp.

Khi $e = 0$, chấn động elip trở thành chấn động thẳng song song với trục Ox. Khi $e = 1$, chấn động elip trở thành chấn động tròn. Nếu $e > 1$, ta lại có chấn động elip, khi $e = \infty$, ta có chấn động thẳng song song với trục Oy.

- Nếu chấn động tới OP hợp với các đường trung hòa các góc 45° thì elip nội tiếp trong một hình vuông có cạnh $\frac{a}{2}$. Các cạnh hình vuông song song với các trục Ox và Oy (đoạn 5.14)

SS.18. Chấn động elip truyền qua một nicol.

Trong trường hợp tổng quát, chấn động tới OP không song song với các phương ưu đãi Ox và Oy của bản tinh thể, chấn động ló ra khỏi bản là một chấn động elip. Cho chấn động này đi qua một nicol phân tích A (hình vẽ 34). Gọi α và β là các góc hợp bởi các phương chấn động OP và OA (ứng với nicol phân cực và nicol phân tích) với phương ưu đãi Ox, chứng minh như đoạn 5.15, ta tính được cường độ ánh sáng I ló ra khỏi nicol A bằng các công



H.42

thức:

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2(\beta - \alpha) - \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

$$\frac{I}{I_0} = \cos^2(\beta + \alpha) + \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \cos^2 \frac{\alpha}{2}$$

với $I_0 = a^2$

SS.19. Các bản mỏng đặc biệt.

Giả sử chấn động tới có dạng : $s = a \cos(t)$

Khi đi vào bản mỏng tại I, các thành phần của chấn động OP theo 2 phương vuông góc là :

$$OP_1 : x = a \cos\alpha \cdot \cos\omega t$$

$$OP_2 : y = a \sin\alpha \cdot \cos\omega t$$

Khi ló ra khỏi bản mỏng tại I', hai chấn động thành phần này không còn đồng pha nữa mà có một hiệu số pha là $\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda}$

$$OP'_1 : x' = a \cos\alpha \cdot \cos\omega t$$

$$OP'_2 : y' = a \sin\alpha \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

Chấn động ló là tổng hợp của 2 chấn động thành phần này.

1. Bản sóng :

Nếu hiệu quang lộ δ (bằng một bội số của λ , bản mỏng tinh thể dị hướng được gọi là một bản sóng.

$$\text{Chấn động tới : } x = a \cos(\omega t) \cdot \cos\alpha$$

$$y = a \sin\alpha \cdot \cos\omega t$$

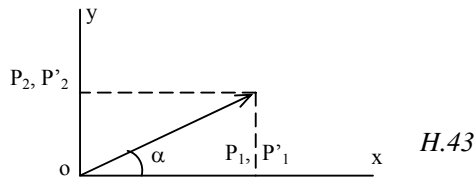
$$\text{Chấn động ló : } x = a \cos(\omega t) \cdot \cos\alpha$$

$$y = a \sin\alpha \cdot \cos(\omega t - \varphi)$$

$$= a \sin\alpha \cdot \cos\omega t$$

vì $\delta = k\lambda$, $\varphi = k2\pi$, $\cos(\omega t - \varphi) = \cos\omega t$

Vậy chấn động ló vẫn là chấn động OP.



2. Bản nửa sóng :

Đó là bản mỏng tinh thể ứng với δ (bằng một bội số lẻ của $\frac{\lambda}{2}$

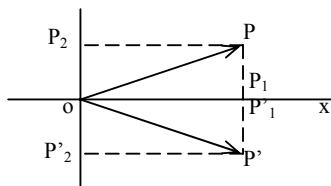
$$\text{Chấn động tới : } x = a \cos(\omega t) \cdot \cos\alpha$$

$$y = a \sin\alpha \cdot \cos\omega t$$

$$\text{Chấn động ló : } x = a \cos(\omega t) \cdot \cos\alpha$$

$$y = a \sin\alpha \cdot \cos(\omega t - \varphi) = -a \sin\alpha \cdot \cos\omega t$$

vì $\delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$, $\varphi = (2k + 1)\pi$, $\cos(\omega t - \varphi) = -\cos\omega t$



H.44

Vậy chấn động ló là chấn động thẳng OP' đối xứng với chấn động tới OP qua các đường trung hòa.

3. Bản phân tư sóng : ứng với (bằng một bội số lẻ của $\frac{\lambda}{4}$

$$\delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{4}, \quad \varphi = (2k + 1)\frac{\pi}{2}$$

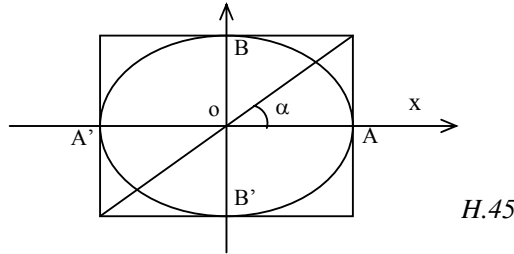
Lấy trường hợp ($= \frac{\pi}{2}$, các thành phần của chấn động ló theo các phương ưu đãi là :

$$x = a \cos \alpha \cdot \cos \omega t$$

$$y = a \sin \alpha \cdot \cos (\omega t - \varphi) = a \sin \alpha \cdot \sin \omega t$$

Suy ra : $\left(\frac{x}{a \cos \alpha}\right)^2 + \left(\frac{y}{a \sin \alpha}\right)^2 = 1$

Vậy chấn động ló là chấn động elip có hai trục là hai đường trung hòa của bản phân tư sóng.



H.45

Các nửa trục của elip là $a \cos(\alpha)$ và $a \sin(\alpha)$, do đó elip tính là

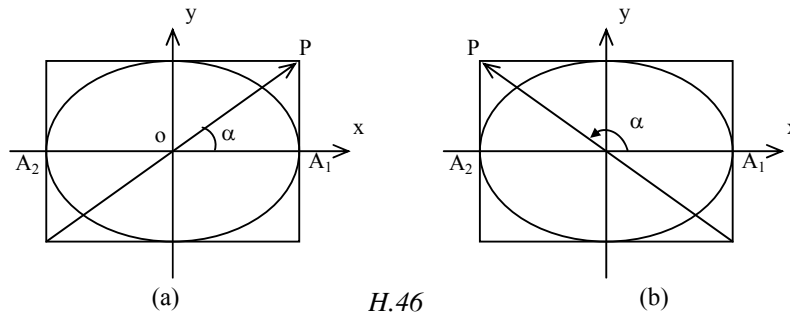
$$e = \operatorname{tg} \psi = \frac{OB}{OA} = \operatorname{tg} \alpha$$

là góc hợp bởi phương chấn động OP và trục nhanh. Ta thấy dạng của elip thay đổi theo góc α .

- Nếu ($= 0$ hay $\frac{\pi}{2}$, $e = 0$ hay $($, ánh sáng ló là ánh sáng phân cực thẳng, phương chấn động song song với trục Ox (ứng với ($= 0$) hay song song với trục Oy (ứng với ($= \frac{\pi}{2}$)).

Nếu ($= \frac{\pi}{4}$ hay $\frac{3\pi}{4}$, $e = 1$, ánh sáng ló là ánh sáng phân cực tròn.

Với bản $\frac{\pi}{4}$ sóng (trường hợp ($= G$), ta phân biệt hai trường hợp :



H.46

- Khi chấn động tới OP nằm trong góc phần tư thứ nhất hợp bởi các phương ưu đãi : Vào lúc $t = 0$, ta có $x_0 = a \cos(\alpha) > 0$, $y_0 = 0$ ứng với điểm A1. Ngoài ra G , nghĩa là khi đó y tăng. Vậy chiều quay của elip ngược chiều quay của kim đồng hồ. Ta có chấn động elip trái (hình 5.46a).

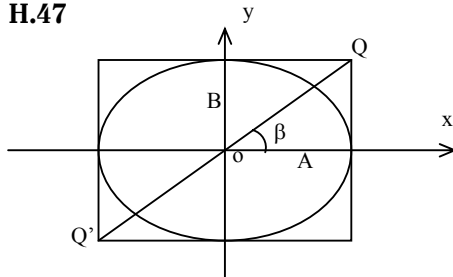
- Khi chấn động tới OP nằm trong góc phần tư thứ hai : Vào lúc $t = 0$, ta có $x_0 = a \cos(\alpha) < 0$, $y_0 = 0$ ứng với điểm A2. Ngoài ra G , nghĩa là y tăng. Vậy trong trường hợp này, chiều

quay trên elip cùng chiều với chiều quay của kim đồng hồ. Ta có chân động elip phải (hình 5.46b).

Bây giờ ta xét tác dụng của bản phân tư sóng đối với ánh sáng tới là ánh sáng phân cực elip có hai trục song song với hai phương ưu đãi của bản phân tư sóng.

Chiếu thẳng góc một chùm tia sáng song song, đơn sắc, phân cực elip xuống một bản phân tư sóng L. Quay bản tinh thể L xung quanh phương truyền của chùm tia sáng tới một

H.47



vị trí, giả sử có các phương ưu đãi song song với các trục của chân động elip. Nếu chân động tới là chân động elip phải, các phương trình của chân động σ thể viết dưới dạng :

$$x = A \cos \omega t$$

$$y = -B \sin \omega t$$

Trong đó A và B là các nửa trục của elip trên các phương Ox và Oy.

Giả sử với bản L, ta có \tilde{G} . Khi đi qua bản, hai chân động thành phần trên có một hiệu số pha là \tilde{G} với chân động y là chân động chậm pha. Phương trình của hai chân động thành phần khi ló ra có dạng :

$$x = A \cos \omega t, \quad y = -B \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = B \cos \omega t$$

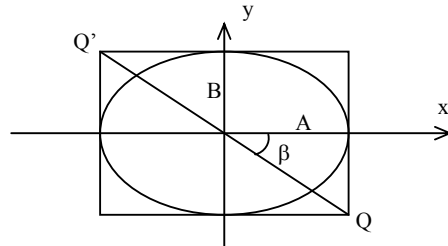
Suy ra \tilde{c} (hằng số)

Vậy chân động ló là một chân động thẳng OQ nằm trong góc phần tư thứ nhất của 2 phương ưu đãi và hợp với trục nhanh Ox một góc là \tilde{c} (với $\tan \tilde{c} = \tilde{G}$)

Nếu chân động tới là elip trái, các phương trình là :

$$x = A \cos \omega t$$

$$y = B \sin \omega t$$



H.48

Các chân động thành phần khi ló ra có dạng :

$$x = A \cos \omega t$$

$$y = B \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = -B \cos \omega t$$

$$\text{Suy ra : } \frac{y}{x} = \frac{-B}{A}$$

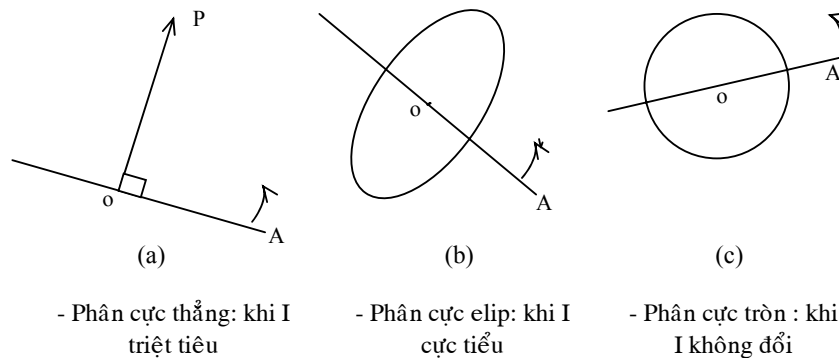
Ánh sáng ló là ánh sáng phân cực thẳng OQ nằm trong góc phần tư thứ hai có hệ số góc là \tilde{G}

Trường hợp đặc biệt : Nếu ánh sáng tới là ánh sáng phân cực tròn (phải hoặc trái) thì ánh sáng ló là ánh sáng phân cực thẳng song song với các phân giác của các góc phần tư thứ nhất hoặc thứ hai.

SS.20. Phân biệt các loại ánh sáng phân cực.

Muốn phân biệt tính phân cực của một chùm tia sáng, ta cho chùm tia phân cực này đi qua một nicol phân tích A. Quay nicol A quanh phương truyền của tia sáng.

- ◆ Nếu có một vị trí của A chặn lại hoàn toàn ánh sáng (mắt thấy tối đen), ta kết luận ánh sáng tới nicol là ánh sáng phân cực thẳng (hình 49a)
- ◆ Nếu không thấy vị trí nào của A chặn lại được hoàn toàn ánh sáng nhưng thấy cường độ ánh sáng ló có các cực đại và cực tiểu (mắt thấy khi sáng nhất, khi tối nhất nhưng không tối đen). Trong trường hợp này ánh sáng tới A là ánh sáng elip (hình 49b).
- ◆ Nếu thấy cường độ ánh sáng ló không thay đổi (mắt thấy thị trường luôn sáng đều) khi quay nicol phân tích A, ta kết luận ánh sáng tới A là ánh sáng phân cực tròn (hình 49c).



H.49

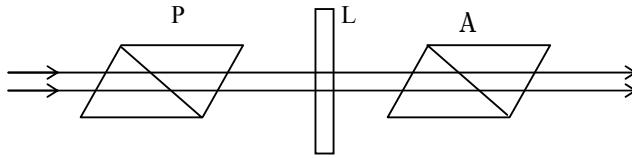
Chú ý rằng : Trong trường hợp tổng quát, khi chiếu một chùm tia sáng qua nicol phân tích A và quay nicol A như trên mà thấy cường độ ánh sáng ló ra khỏi A không thay đổi thì ánh sáng tới A có thể là ánh sáng phân cực tròn, nhưng cũng có thể là ánh sáng tự nhiên.

Muốn phân biệt hai trường hợp này, ta cho chùm tia sáng đi qua một bản phần tư sóng. Nếu ánh sáng tới là ánh sáng phân cực tròn thì sau khi qua bản phần tư sóng trở thành ánh sáng phân cực thẳng nên ta có thể làm triệt tiêu cường độ sáng bằng một nicol phân tích. Nếu ánh sáng tới là ánh sáng tự nhiên thì ta không thể làm triệt tiêu cường độ ánh sáng ló được.

SS.21. Tác dụng của bản tinh thể dị hướng đối với ánh sáng tạp - Hiện tượng phân cực màu.

Trong các phần trên, ta chỉ đề cập tới tác dụng của bản tinh thể dị hướng đơn trục đối với một ánh sáng đơn sắc. Trong phần này ta đề cập tới trường hợp ánh sáng tạp.

Chiếu một chùm ánh sáng trắng song song qua một hệ thống gồm một nicol phân cực P, một bản tinh thể dị hướng L (như thạch anh hoặc đá băng lan), một nicol phân tích A.



H.5

Sau khi qua nicol P, ánh sáng vẫn là ánh sáng trắng nhưng là phân cực thẳng, chấn động theo phương OP, gồm tất cả các độ dài sóng từ tím tới đỏ. Ứng với mỗi một độ dài sóng, hiệu số pha giữa các chấn động theo hai phương ưu đãi Ox và Oy do sự truyền qua bản tinh thể L là :

$$\varphi = \frac{2\pi(n_{en} - n_o)e}{\lambda}$$

Khi đi từ độ dài sóng tím tới độ dài sóng đỏ, hiệu số nen - n0 biến thiên không đáng kể, do đó ta có thể coi hiệu số pha biến thiên tỷ lệ nghịch với độ dài sóng.

Để cụ thể, ta xét một đơn sắc có độ dài sóng (λ). Khi ra khỏi P, chấn động thẳng này giả sử có biên độ a(ứng với cường độ I(=a²). Bản tinh thể L biến chấn động thẳng này thành chấn động elip có các chấn động thành phần theo hai phương ưu đãi của bản L có biên độ là a(cos(β) và a(sin(β) (β là góc hợp bởi phương chấn động OP với phương ưu đãi Ox). Cường độ của ánh sáng ló ra khỏi tinh thể dị hướng L là (a² cos²(β) + a² sin²(β) = a² = I(, nghĩa là bằng cường độ của ánh sáng tới bản.

Nếu ta xét tất cả các đơn sắc từ tím tới đỏ thì (β biến thiên theo λ, do đó chấn động elip ló ra khỏi bản L, ứng với các độ dài sóng, có dạng và phương vị khác nhau.

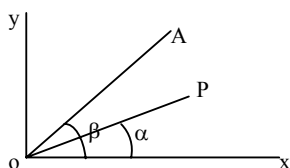
Gọi (α là góc hợp bởi phương chấn động OA xác định bởi nicol phân tích A và phương ưu đãi Ox của bản L. Cường độ ánh sáng ló ra khỏi nicol A ứng với đơn sắc có độ dài sóng (λ là :

$$I = I_\lambda \left[\cos^2(\beta + \alpha) + \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2} \right]$$

hay

$$I = I_\lambda \left[\cos^2(\beta - \alpha) - \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right]$$

Xét một dải độ dài sóng vi phân dλ ở trong khoảng λ và λ + dλ và xét ánh sáng ló ra khỏi bản L. Vì dλ rất nhỏ nên có thể coi các độ dài sóng ở trong khoảng này có cùng cường độ I(λ. Cường độ sáng dI gây ra bởi cả dải dλ thì tỉ lệ với Iλ và với dλ, do đó dI có thể viết :
dI = Iλdλ.



H.5

Cường độ này sau khi ló ra khỏi nicol phân tích A trở thành (giả sử OP và OA cùng nằm trong một góc phần tư hợp bởi hai phương Ox, Oy) :

$$dJ = I_\lambda \left[\cos^2(\beta + \alpha) + \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2} \right] d\lambda$$

Cường độ gây ra bởi tất cả các độ dài sóng từ tím tới đỏ là :

$$J = \cos^2(\beta + \alpha) \int I_\lambda \cdot d\lambda + \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \int I_\lambda \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2} \cdot d\lambda$$

Dấu (lấy từ độ dài sóng tím tới độ dài sóng đỏ.

(I(là cường độ của chùm tia sáng ló ra khỏi bản L gồm tất cả các độ dài sóng từ tím tới đỏ, do đó ứng với ánh sáng trắng. Vậy số hạng đầu là cường độ của nền trắng.

Số hạng thứ hai có chứa (là cường độ của ánh sáng màu.

Khi cường độ của nền trắng triệt tiêu, ta ở trong điều kiện quan sát tốt nhất. Muốn vậy, ta để các nicol P và A ở các vị trí ứng với (= (= 45o.

Khi đó

$$J_1 = \int I_\lambda \cos^2 \frac{\varphi}{2} \cdot d\lambda$$

Màu ta nhìn thấy qua nicol phân tích A là một màu tập hợp bởi các đơn sắc ló ra khỏi A. Cường độ của mỗi đơn sắc này khi ló ra khỏi A thì khác nhau và được tính bởi công thức

$$I = I_\lambda \cos^2 \frac{\varphi}{2}$$

Các đơn sắc có cường độ ánh sáng ló triệt tiêu ứng với :

$$\varphi = (2k + 1)\pi \quad \text{hay} \quad \delta = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$$

Trong điều kiện gần đúng, vì nen - no thay đổi không đáng kể theo độ dài sóng, nên ta có thể coi (= (nen - no) e độc lập với độ dài sóng khi ta xét từ độ dài sóng tím tới độ dài sóng đỏ. Giả sử bản tinh thể L khá mỏng có bề dày e sao cho (= 1((đối với mọi độ dài sóng).

Với bản này, các đơn sắc có cường độ ló ra khỏi A triệt tiêu ứng với :

$$\delta = (2k + 1) \lambda = 1\mu$$

$$\text{suy ra : } \lambda = \frac{2\mu}{2k+1}$$

Nếu lấy độ dài sóng các ánh sáng thấy được ở trong khoảng 0,4(tới 0,8(, ta có :

$$0,4\mu \leq \frac{2}{2k+1} \leq 0,8\mu$$

$$\text{suy ra : } 0,75 \leq k \leq 2$$

k là một trị số nguyên nên lấy hai giá trị : 1 và 2.

Vậy ta chỉ có hai đơn sắc có cường độ triệt tiêu ứng với các độ dài sóng (1 = 0,67(và (2 = 0,4μ

Các đơn sắc có cường độ cực đại ứng với $\cos\varphi/2 = \pm 1$ hay $\varphi = k2\pi$, $\delta = k\pi = 1\mu$ (vẫn theo giả thuyết trên).

$$\Rightarrow 0,4\mu \leq \lambda = \frac{1}{k} \leq 0,8\mu$$

$$\text{hay} \quad \frac{1}{0,8} \leq k \leq \frac{1}{0,4}$$

$$1,25 \leq k \leq 2,5$$

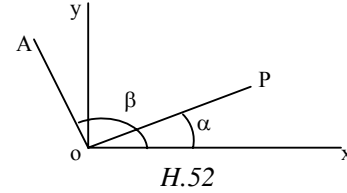
Suy ra k = 2. Ta chỉ có một đơn sắc có cường độ ló ra cực đại ứng với độ dài sóng (3 =

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{2} = 0,5\mu$$

Như vậy, ánh sáng ló ra khỏi A sẽ có màu tạp nào đó, chứ không thể có màu trắng bậc trên. Đó là màu ta nhìn thấy ở bản L qua nicol phân tích A.

- Trường hợp OP và OA nằm trong hai góc phần tư khác nhau.

Cường độ ánh sáng ló ra khỏi A ứng với dải d (được viết dưới dạng :



$$dJ = I_{\lambda} \left[\cos^2(\beta - \alpha) - \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right] d\lambda$$

Cường độ gây ra bởi tất cả các độ dài sóng từ tím tới đỏ là :

$$J = \cos^2(\beta - \alpha) \int I_{\lambda} \cdot d\lambda - \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \int I_{\lambda} \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2} d\lambda$$

Số hạng thứ nhất biểu diễn cường độ nền sáng trắng. Số hạng thứ hai biểu diễn cường độ ánh sáng màu tạp.

Ta quan sát tốt nhất khi $(= 450$ và $(= 1350$, lúc đó cường độ nền sáng trắng triệt tiêu, $\sin 2(= 1$, $\sin 2\beta = -1$.

$$J_2 = \int I_{\lambda} \sin^2 \frac{\varphi}{2} d\lambda$$

Nếu ta vẫn dùng bản tinh thể mỏng ứng với $(= 1$ (như thí dụ ở trên, thì ta thấy đơn sắc 0,5 (lúc này cho cực đại, bây giờ bị triệt tiêu cường độ. Ngược lại các đơn sắc 0,67 (và 0,4 (lúc này bị triệt tiêu cường độ bây giờ lại có cường độ ló ra khỏi A cực đại. Nhìn qua nicol phân tích A, ta thấy bản L có một màu xác định, vẫn là một màu tạp nhưng khác với màu nhìn được trong trường hợp trên.

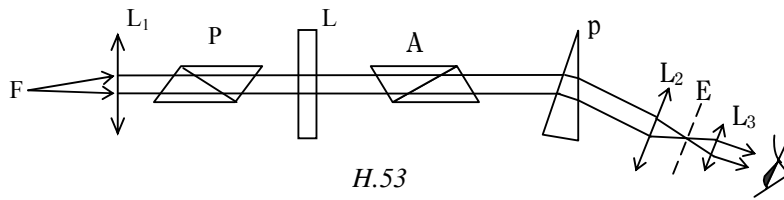
Nếu ta chồng chập hai màu có trong hai trường hợp ta sẽ được màu trắng. Thực vậy :

$$J_1 + J_2 = \int I_{\lambda} \cos^2 \frac{\varphi}{2} \cdot d\lambda + \int I_{\lambda} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \cdot d\lambda = \int I_{\lambda} \cdot d\lambda$$

Vì vậy hai màu trên được gọi là hai màu hỗ bổ của nhau (hợp với nhau thì thành ánh sáng trắng). Hiện tượng nhìn thấy màu trên các bản mỏng dị hướng như trên được gọi là hiện tượng phân cực màu.

- Nếu bản khá dày, bằng cách lý luận tương tự các thí dụ trên, ta thấy số đơn sắc cho cường độ cực đại và số đơn sắc cho cường độ triệt tiêu khá nhiều khi ló ra khỏi nicol phân tích A. Các độ dài sóng cho cường độ cực đại và triệt tiêu này phân bố đều trong quang phổ từ tím tới đỏ. Vì vậy ánh sáng đi ra khỏi A là ánh sáng trắng cao đẳng.

SS.22. Khảo sát quang phổ trong hiện tượng phân cực màu.



Ta thiết trí dụng cụ như hình vẽ H.53. Nguồn sáng trắng là một khe F thẳng góc với mặt phẳng của hình vẽ, tại vị trí tiêu điểm của một thấu kính hội tụ L₁. Chùm tia sáng trắng song song ló ra khỏi L₁ đi qua hệ thống nicol phân cực P, bản tinh thể dị hướng L, nicol phân tích A. Sau đó đi qua một kính quang phổ. Lăng kính p cho ta một quang phổ hiện ra ở mặt phẳng tiêu E của thấu kính L₂ và ta quan sát quang phổ này bằng thị kính L₃. Trong trường hợp tổng quát, ta quan sát thấy một quang phổ vằn với những vạch tối. Bản L càng dày số vạch tối càng nhiều, dải đều trên quang phổ.

Bỏ qua sự giảm cường độ sáng do sự hấp thụ hay phản chiếu khi đi qua kính quang phổ, cường độ sáng tại điểm quan sát M trên màn E là :

$$\text{hay } I = I_{\lambda} \left[\cos^2(\beta + \alpha) + \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \cos^2 \frac{\varphi}{2} \right]$$

$$I = I_{\lambda} \left[\cos 2(\beta - \alpha) - \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \cdot \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right]$$

Vị trí các đơn sắc trong quang phổ tùy thuộc độ dài sóng của chúng và không tùy thuộc các góc α, β . Vì vậy khi ta quay nicol P hoặc A, vị trí các vạch sáng và các vạch tối không dời chỗ mà chỉ thay đổi về độ sáng mà thôi.

Ở một trường hợp bất kỳ, trong các công thức tính cường độ I tại một điểm M trên quang phổ, số hạng thứ nhất $I \cos^2(\beta + \alpha)$ không triệt tiêu, do đó các vạch tối (ứng với $\cos = 0$ hay $\sin = 0$) không tối đen hoàn toàn. Ta có một quang phổ vằn trên cái nền là một quang phổ liên tục. Muốn quan sát quang phổ vằn tốt nhất, ta phải loại bỏ nền quang phổ liên tục này. Đó chính là hai trường hợp : $\alpha = \beta = 45^\circ$ và $\alpha = 45^\circ, \beta = 135^\circ$ đã khảo sát ở trên.

Giả sử lúc ban đầu ta để các nicol P và A ở các vị trí có $\alpha = \beta = 45^\circ$. Và quan sát quang phổ, ta thấy 2 vạch hoàn toàn tối đen ở các vị trí ứng với (1) và (2). Bây giờ quay nicol theo chiều mũi tên để α tăng, vị trí các màu trong quang phổ không thay đổi nhưng các vạch (1) và (2) không hoàn toàn tối đen nữa vì cường độ nền tăng lên, quang phổ vằn mờ dần. Khi OA trùng với Oy, $\alpha = 90^\circ, \sin 2\alpha = 0$.

Trong công thức

$$J = \cos^2(\beta + \alpha) \int I_{\lambda} d\lambda + \sin 2\alpha \cdot \sin 2\beta \int I_{\lambda} \cos^2 \frac{\varphi}{2} d\lambda$$

Số hạng thứ hai triệt tiêu: quang phổ vằn biến mất, ta thấy một quang phổ liên tục.

- ◆ Khi quay để $\alpha > 90^\circ$, quang phổ vằn lại xuất hiện, mới đầu mờ, sau rõ dần. Khác với trường hợp trên, ở các vị trí lúc trước có vạch tối, bây giờ có vạch sáng ((1) và (2) và ngược lại trước có vạch sáng, bây giờ có vạch tối ((3)).
- ◆ Khi $\alpha = 135^\circ$, OA (OP, $\cos 2(\beta - \alpha) = 0$, cường độ nền triệt tiêu, vạch (3) hoàn toàn tối đen. Quang phổ này được gọi là quang phổ hõ bỏ của quang phổ lúc đầu.

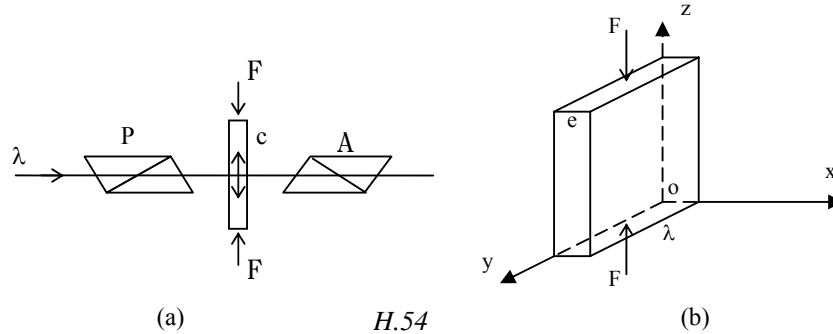
Tiếp tục quay nicol A, quang phổ vằn lại mờ dần và biến mất khi OA song song với Ox.

HIỆN TƯỢNG LŨNG CHIẾT NHÂN TẠO

SS.23. Lũng chiết do sự nén.

Các môi trường dị hướng ta đã xét ở các phần trên hầu hết là những môi trường kết tinh. Trong các môi trường này, chính sự dị hướng trong sự cấu trúc tinh thể đưa đến tính dị hướng quang học. Vì vậy, nếu ta dùng một lực nén tác dụng vào một môi trường đẳng hướng để tạo một sự bất đối xứng trong môi trường này thì sẽ gây ra được hiện tượng chiết quang kép giống như một tinh thể dị hướng tự nhiên.

Thí nghiệm dưới đây chứng tỏ hiện tượng lưỡng chiết nhân tạo nói trên.



Cho một chùm tia sáng song song, đơn sắc đi qua một hệ thống hai nicol P và A chéo góc. Như vậy sẽ không có ánh sáng ló ra khỏi A. Bây giờ giữa hai nicol P và A, đặt một khối thủy tinh C đẳng hướng: vẫn không có ánh sáng ló ra khỏi A. Nhưng nếu ta tác dụng vào các mặt trên và dưới của khối C một lực nén đều \vec{G} theo phương Oz thì khi đó lại thấy ánh sáng đi qua A. Điều này chứng tỏ dưới tác dụng của lực nén \vec{G} , phương Oz trong khối thủy tinh C có tính chất khác với các phương khác và khối C trở thành môi trường dị hướng.

Thí nghiệm cho biết dưới tác dụng của sức nén như trên, khối C giống như một môi trường đơn trục, có trục quang học song song với phương của lực nén.

Ánh sáng phân cực thẳng OP chiếu tới khối thủy tinh C theo phương Ox, khi ló ra khỏi C, trở thành ánh sáng phân cực elip, do đó một phần ánh sáng ló ra khỏi nicol A.

Nếu ta triệt tiêu lực nén \vec{G} , thủy tinh trở lại đẳng hướng như cũ.

Thí nghiệm cho biết độ chiết quang kép $n_e - n_o$ sinh ra do sự nén thì tỉ lệ với áp suất p tác dụng lên môi trường.

$$(n = n_e - n_o) = k(p, \quad k = \text{hằng số tỷ lệ}$$

$$\Delta n = k \lambda \frac{F}{S} = k \lambda \frac{F}{e \cdot l}$$

Hiệu lộ giữa các tia bất thường và thường khi đi qua khối C là:

$$\delta = (n_e - n_o)e = k \lambda \frac{F}{l}$$

Trong đó : n_e = chiết suất bất thường chính, ứng với phương chấn động song song với phương của lực nén.

n_o = chiết suất thường, ứng với phương chấn động thẳng góc với phương của lực nén.

Hằng số k tùy thuộc bản chất của môi trường chịu nén và tùy thuộc độ dài sóng của ánh sáng truyền qua, có thể dương hay âm.

- ◆ Khi $k > 0$, $n_e > n_o$, $v_e < v_o$: môi trường chịu nén có tính dị hướng giống như một tinh thể dương (như thạch anh).
- ◆ Ngược lại, nếu $k < 0$, $n_e < n_o$, $v_e > v_o$: môi trường trở thành giống tinh thể âm (như đá băng lan).

Thí dụ với thủy tinh và khi dùng ánh sáng vàng ($\lambda = 0,6 \times 10^3 \text{ nm}$, áp suất p tính ra kg lực/mm^2 , k có trị số $-0,05$).

Với một áp suất $p = 1 \text{ kg lực/mm}^2$, độ lưỡng chiết là

$$\Delta n = |n_e - n_o| = |k| \lambda p = 0,05 \times 0,6 \times 10^{-3} \times 1 = 3 \times 10^{-5}$$

Ta thấy trị số này nhỏ so với độ lưỡng chiết trong các chất dị hướng thiên nhiên (thí dụ : đá băng lan có $(n = 0,173)$).

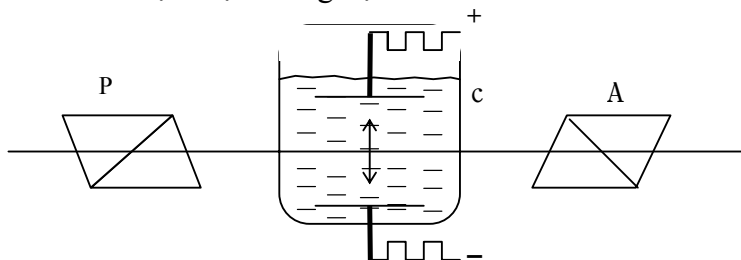
Ta lưu ý : n_o là chiết suất ứng với tia thường khi thủy tinh đã trở thành dị hướng do sự nén, không được nhầm với chiết suất n của thủy tinh khi không bị nén. Ta có $n_e > n$ và $n_o > n$.

Hiện tượng phân cực nén này được ứng dụng trong kỹ nghệ cơ khí để khảo sát sức nén trên các bộ phận trong các máy móc khi máy hoạt động.

SS.24. Lưỡng chiết điện (hay hiệu ứng Kerr).

Đây là hiện tượng một chất lỏng đẳng hướng trở thành dị hướng khi được đặt trong một điện trường. Hiện tượng này được khảo sát lần đầu tiên bởi Kerr năm 1875 nên được gọi là hiệu ứng Kerr.

Ta có thể thực hiện thí nghiệm như sau :



H.55

Chậu C chứa một chất lỏng đẳng hướng, nitrobenzen chẳng hạn, điện trường tác dụng vào chất lỏng gây ra do hai cốt của một máy tụ điện. Hệ thống này được gọi là tế bào Kerr và được đặt giữa hai nicol P và A ở vị trí chéo góc. Nếu không có điện trường (hai cốt của máy tụ điện không tích điện), dĩ nhiên không có ánh sáng ló ra khỏi A. Cho máy tụ điện tích điện để tạo một điện trường giữa hai cốt máy, ta thấy có ánh sáng ló ra khỏi A. Khi đó chất lỏng giữa hai cốt máy tụ điện đã trở thành dị hướng, có các tính chất quang học giống như một tinh thể đơn trục có trục quang học song song với phương của điện trường. Ánh sáng ló ra khỏi chất lỏng là ánh sáng elip, do đó một phần ánh sáng đi qua nicol A.

Khi đi vào chất lỏng ở trong điện trường, chấn động thẳng OP bị tách làm hai chấn động theo hai phương vuông góc, truyền đi với hai vận tốc khác nhau v_o và v_e . Tia thường chấn động thẳng góc với điện trường, ứng với chiết suất n_o . Tia bất thường chấn động song song với điện trường, ứng với chiết suất bất thường chính n_e .

Thí nghiệm cho biết, ứng với một độ dài sóng λ , độ lưỡng chiết ($n = n_e - n_o$ tỉ lệ với bình phương của điện trường E).

$$\Delta n = n_e - n_o = B \lambda E^2$$

B được gọi là hằng số Kerr, tùy thuộc bản chất của chất lỏng, độ dài sóng (và nhiệt độ : B tăng khi ta xét từ ánh sáng đỏ tới ánh sáng tím và giảm khi nhiệt độ tăng.

Vì (n tỉ lệ với E² nên dấu của (n không tùy thuộc chiều của điện trường. Hầu hết các chất lỏng, dưới tác dụng của điện trường, có tính chất dị hướng giống như các tinh thể dương đơn trục, nghĩa là có $n_e > n_o$ hay $B > 0$. Chỉ có vài chất lỏng có $B < 0$ (thí dụ ether).

Hiệu quang lộ giữa 2 chấn động ưu đãi khi đi qua chất lỏng là :

$$\delta = (n_e - n_o) l$$

l = bề dài của cốt máy tụ điện

Độ lưỡng chiết (n trong hiện tượng lưỡng chiết điện rất nhỏ so với độ lưỡng chiết của các chất dị hướng thiên nhiên kết tinh. Hiện tượng này cũng thấy với một số chất khí nhưng độ lưỡng chiết sinh ra trong trường hợp này rất nhỏ.

a) Lý thuyết của hiện tượng lưỡng chiết điện:

Các phân tử của các chất lỏng, hay chất khí, trong hiện tượng lưỡng chiết điện đã có tính dị hướng. Khi không có tác dụng của điện trường ngoài, các phân tử này do sự dao động nhiệt hỗn loạn phân bố tự do theo mọi hướng, do đó nên xét toàn thể thì môi trường được coi như đẳng hướng (hình 56a).



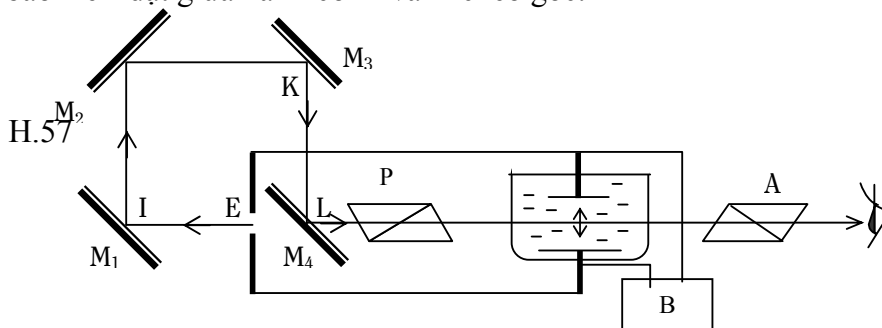
(a) H.56 (b)

Khi chất lỏng (hay chất khí) này được đặt trong một điện trường \vec{G} thì các phân tử được định hướng theo phương song song với điện trường \vec{G} (tác dụng của điện trường trên các phân tử phân cực hay các lưỡng cực điện - hình 56b), nghĩa là trong môi trường xuất hiện một phương có tính phân cực mạnh hơn các phương khác : môi trường đã trở thành dị hướng. Nếu ta đổi chiều điện trường \vec{G} thì các phân tử sẽ quay đi một góc 180° nhưng tính phân cực của môi trường thì không có gì thay đổi. Ngoài ra, nếu nhiệt độ càng cao thì sự dao động nhiệt càng mạnh do đó sự định hướng của các phân tử càng kém, hằng số Kerr B có trị số càng nhỏ.

b) Đo thời gian kéo dài của hiện tượng kerr:

Sự phân cực do điện trường không lập tức chấm dứt khi điện trường gây ra nó triệt tiêu mà còn kéo dài một thời gian. Người ta đã đo thời gian kéo dài thêm bằng thí nghiệm sau (hình 57).

Tế bào Kerr đặt giữa hai nicol P và A chéo góc.



Hai cốt của máy tụ điện của tế bào Kerr được nối với hai đầu của một cái phóng tia lửa điện E, và được tích điện nhiều lần trong một giây nhờ một cuộn cảm ứng B. Khi hiệu điện thế giữa hai cốt máy tụ điện đủ mạnh, máy tụ điện sẽ phóng điện : E phát ra một tia lửa điện và hiệu điện thế giữa hai cốt máy tụ điện triệt tiêu. Ánh sáng phát ra từ E, phản chiếu trên các gương M1, M2, M3, M4, đi một lộ trình D = EIJKLP trước khi tới tế bào Kerr. Như vậy, ánh sáng của các tia lửa điện phóng ra bởi E đi vào tế bào Kerr sau một thời gian $t = \frac{D}{c}$ kể từ lúc điện trường trong chất lỏng của tế bào bị triệt tiêu. (c là vận tốc ánh sáng)

Ta gọi τ (= thời gian hiện tượng lưỡng chiết điện còn tồn tại trong chất lỏng sau khi điện trường đã triệt tiêu. Nếu $t < \tau$, vì hiện tượng lưỡng chiết điện còn tồn tại nên ánh sáng phân cực thẳng OP đi qua tế bào Kerr trở thành ánh sáng elip, do đó có ánh sáng đi qua A. Ngoài ra sự phóng điện xảy ra nhiều lần trong một giây nên mắt sẽ thấy sáng liên tục. Nếu $t > \tau$, khi ánh sáng tới tế bào Kerr, hiện tượng lưỡng chiết điện đã chấm dứt : sau khi đi qua tế bào Kerr, ánh sáng vẫn là phân cực thẳng OP, nên bị nicol A chặn lại : mắt thấy tối.

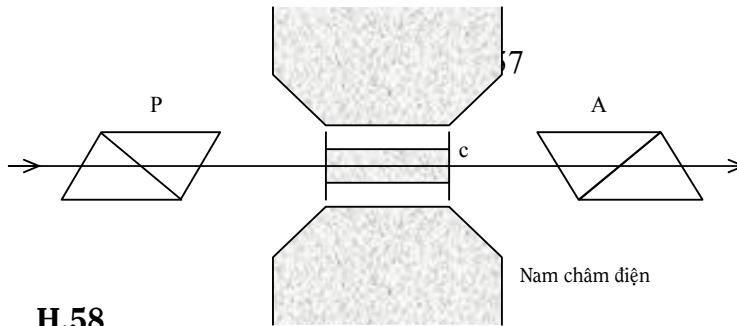
Cách đo A như sau: lúc đầu ta để các gương M1, M2 gần các gương M3, M4 để quang lộ D ngắn, thời gian t nhỏ hơn thời gian τ , mắt thấy sáng liên tục. Di chuyển tịnh tiến các gương M1, M2 ra xa M3 và M4, ta thấy cường độ ánh sáng ló ra khỏi A giảm đi rất nhanh, nghĩa là hiện tượng lưỡng chiết điện giảm đi rất nhanh khi D tăng. Ta thấy tối khi khoảng cách D (4 mét. Khi đó $t = \tau$.

$$\theta = \frac{D}{c} \approx \frac{4}{3 \times 10^8} \approx 10^{-8} \text{ giây}$$

Thời gian này thực ra chỉ là giới hạn trên của τ (vì các tia lửa điện cũng kéo dài một thời gian chứ không tắt lập tức. Các phép đo về sau chính xác hơn cho các trị số τ (ở trong khoảng 10-10 giây và 10-11 giây.

Hiện tượng Kerr được ứng dụng để đo các thời gian rất ngắn, được dùng trong kỹ nghệ phim nói (ghi âm thanh lên phim chiếu bóng).

SS.25. Lưỡng chiết từ.



H.58

Dưới tác dụng của một từ trường, một chất lỏng đẳng hướng có thể trở thành dị hướng, thí dụ Nitrobenzen.

Để khảo sát, ta có thể sắp đặt các dụng cụ như hình vẽ 5.58. Các nicol P và A ở vị trí chéo góc nhau. Chất lỏng đựng trong một ống C, đặt giữa hai cực của một nam châm điện mạnh. Chùm tia sáng đi qua hệ thống thẳng góc với từ trường.

Thí nghiệm cho biết, tương tự hiện tượng lưỡng chiết điện, độ lưỡng chiết sinh ra do tác dụng của từ trường vào chất lỏng thì tỉ lệ với độ dài sóng λ (của ánh sáng và tỉ lệ với bình phương của cường độ từ trường H.

$$n = n_e - n_o = C \lambda H^2$$

C là một hằng số tùy thuộc bản chất của chất lỏng, độ dài sóng (của ánh sáng và nhiệt độ và có thể âm hay dương.

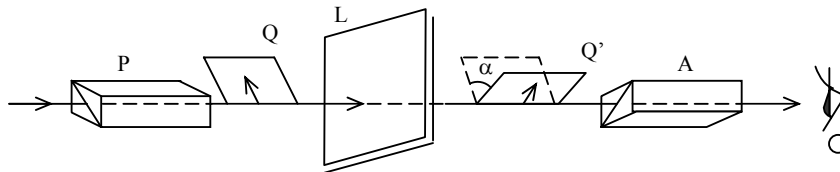
Một trong hai phương chấn động ưu đãi song song với phương của từ trường.

Ta có thể giải thích hiện tượng lưỡng chiết từ, tương tự hiện tượng lưỡng chiết điện, bằng thuyết định hướng phân tử.

PHÂN CỰC QUAY TỰ NHIÊN

SS.26. Thí nghiệm về phân cực quay.

Năm 1811, Arago đã thực hiện thí nghiệm sau về hiện tượng phân cực quay tự nhiên.



H.59

Chiếu một chùm tia sáng song song, đơn sắc, đi qua một hệ thống gồm hai nicol P và A đặt chéo góc. Mắt đặt tại O dĩ nhiên không thấy ánh sáng.

Sau đó đặt trong khoảng hai nicol P và A một bản thạch anh hai mặt song song, có trục quang học thẳng góc với hai mặt và song song với phương truyền của tia sáng (để tránh hiện tượng chiết quang kép đã nói ở các phần trên) : Mắt lại nhận được ánh sáng ló ra khỏi A.

Quay nicol phân tích A một góc α , cùng chiều kim đồng hồ hay ngược chiều tùy thuộc đặc tính của bản L, ánh sáng lại hoàn toàn bị A chặn lại.

Từ thí nghiệm này, người ta suy ra rằng : Bản thạch anh L có tính chất làm quay mặt phẳng chấn động của chùm tia sáng truyền qua nó. Ánh sáng tới có mặt phẳng chấn động là Q thì khi ló ra khỏi bản L, mặt phẳng chấn động sáng là Q' hợp với mặt phẳng Q một góc α . Chiều quay cũng như trị số của α (tùy thuộc các tính chất của bản L. Chính vì vậy khi ta quay nicol phân tích A một góc α thì mặt phẳng chính của A thẳng góc với mặt phẳng chấn động Q' nên ánh sáng bị chặn lại.

Hiện tượng trên được gọi là phân cực quay tự nhiên hay triền quang.

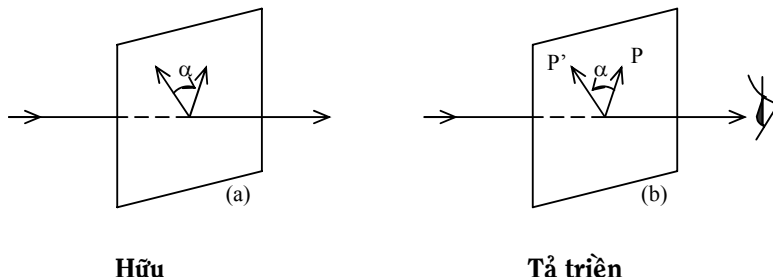
Các tính chất có tính chất làm quay mặt phẳng chấn động sáng như vậy được gọi là các chất quang hoạt.

Ta cần phân biệt môi trường quang hoạt và môi trường dị hướng. Thạch anh vừa có tính dị hướng vừa có tính quang hoạt nhưng đá băng lan chỉ có tính dị hướng mà không có tính quang hoạt, ngược lại nhiều chất đẳng hướng lại có tính quang hoạt như một số lớn các chất hữu cơ.

Có những chất chỉ có tính quang hoạt khi ở trạng thái rắn, thí dụ thạch anh, khi các chất này chuyển sang một trạng thái khác (lỏng, hơi, dung dịch) thì tính quang hoạt mất. Sự kiện này chứng tỏ, với các chất trên, tính quang hoạt là một thuộc tính do sự sắp xếp các nguyên tử hay phân tử trong tinh thể. Khi sự sắp xếp này không còn (môi trường chuyển sang trạng

thái lỏng hay hơi) thì tính quang hoạt cũng mất theo. Ngược lại, có nhiều chất khác như đường, acid tartric... Có tính quang hoạt ở mọi trạng thái, kể cả trạng thái dung dịch, với các chất này, tính quang hoạt là một thuộc tính nằm ngay trong bản thân các phân tử nên tính đó vẫn tồn tại dù môi trường thay đổi trạng thái.

Thí nghiệm cho thấy có hai loại môi trường quang hoạt, sự phân biệt tùy theo chiều quay của mặt phẳng chấn động sáng đối với mắt quan sát viên.



H.60

Các chất quang hoạt làm mặt phẳng chấn động sáng quay theo chiều kim đồng hồ (đối với mắt quan sát viên) được gọi là chất hữu triền (hình 5.60a). Ngược lại các chất làm mặt phẳng chấn động sáng quay ngược chiều kim đồng hồ được gọi là các chất tả triền (hình 5.60b).

SS.27. Định luật Biot.

Các thí nghiệm cho thấy, với mỗi chất quang hoạt, góc quay (của mặt phẳng chấn động sáng tỉ lệ với bề dày (của môi trường quang hoạt mà ánh sáng đi qua.

$$\alpha = \zeta l$$

(ζ là một hằng số tùy thuộc bản chất của môi trường quang hoạt, độ dài sóng của ánh sáng, nồng độ nếu chất quang hoạt là dung dịch và tùy thuộc cả nhiệt độ.

Ta thấy (chính là góc quay ứng với một đơn vị bề dày.

Nếu môi trường quang hoạt là một dung dịch của một chất quang hoạt tan trong một dung dịch không có tính triền quang, các thí nghiệm cho biết, góc quay (tỉ lệ với nồng độ C của dung dịch. Biot đã phát biểu định luật như sau :

Với một độ dài sóng nhất định của ánh sáng, góc quay (gây ra bởi một bề dày (của một dung dịch quang hoạt thì tỉ lệ với nồng độ C của dung dịch..

$$\alpha = [\alpha] \cdot l C$$

Nồng độ C được định nghĩa là khối lượng chất quang hoạt hòa tan trong một đơn vị thể tích của dung dịch.

[α] là một hằng số, độc lập đối với nồng độ C và được gọi là “năng suất triền quang riêng” của chất quang hoạt hòa tan. Trị số của [α] tùy thuộc độ dài sóng của ánh sáng nhưng thay đổi không đáng kể đối với nhiệt độ. Chiều dài (thường được tính ra dm nên [α] chính là góc quay ứng với một cột dung dịch dài 1dm chứa 1g chất quang hoạt hòa tan trong mỗi cm³ dung dịch.

Trong trường hợp dung dịch chứa nhiều chất quang hoạt hòa tan lẫn lộn có năng suất triền quang riêng $[(1), [(2), [(3), \dots$ và nồng độ c_1, c_2, \dots góc quay (gây ra bởi một bề dày (của dung dịch là:

$$\alpha \approx ([\alpha_1] c_1 + [\alpha_2] c_2 + \dots) \lambda$$

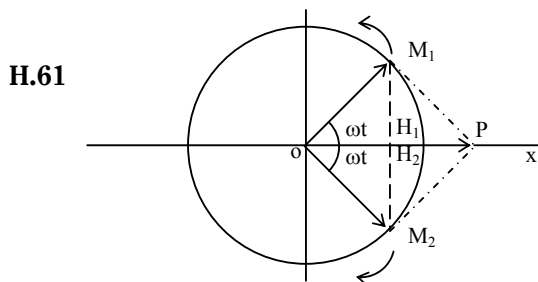
Với quy ước: các năng suất triền quang riêng $[(1), [(2), \dots$ được coi là dương nếu chất quang hoạt hòa tan có tính hữu triền, được coi là âm nếu có tính tả triền.

Định luật Biot chỉ gần đúng và chỉ được dùng cho các dung dịch loãng.

SS.28. Lý thuyết về hiện tượng phân cực quay.

Fresnel đã giải thích hiện tượng phân cực quay như sau :

Chấn động thẳng OP có phương trình $s = a \cos(\omega t)$ được coi là tổng hợp của hai chấn động tròn $\overline{OM_1}$ và $\overline{OM_2}$, quay xung quanh O với vận tốc góc ω ngược chiều nhau và $OM_1 = OM_2 = \frac{a}{2}$.



Khi chưa đi vào môi trường quang hoạt, hai chấn động tròn truyền đi với cùng vận tốc, nên chấn động tổng hợp luôn luôn là OP nằm trên trục Ox. Khi đi vào môi trường quang hoạt. Hai chấn động tròn này truyền đi với các vận tốc V_1, V_2 khác nhau, ứng với các chiết suất n_1, n_2 .

Giả sử chấn động tròn OM_1 là chấn động nhanh pha ($V_1 > V_2$ hay $n_1 < n_2$). Các chấn động chiếu $\overline{OH_1}, \overline{OH_2}$ xoảng trước Ox lệch caùc chaán ñoàng sin thaúng, khi ñi vaøo baùn quang hoạt còu dạng :

$$x_1 = x_2 = \frac{a}{2} \cos \omega t$$

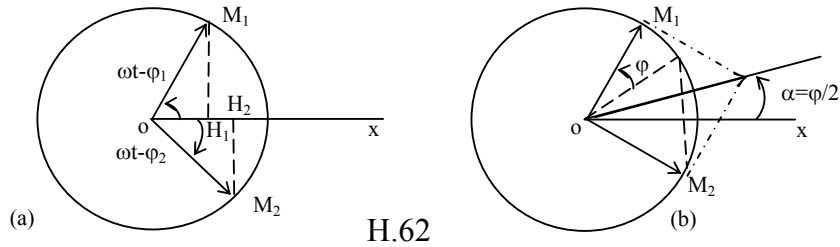
Khi ra khỏi bản có dạng :

$$x_1 = \frac{a}{2} \cos(\omega t - \varphi_1) \quad \text{vôùi} \quad \varphi_1 = \frac{2\pi n_1 l}{\lambda}$$

$$x_2 = \frac{a}{2} \cos(\omega t - \varphi_2) \quad \text{vôùi} \quad \varphi_2 = \frac{2\pi n_2 l}{\lambda}$$

Ta có : (1 < 2

Như vậy hai chấn động khi ra khỏi môi trường quang hoạt không còn đồng pha nữa.



H.62

mà có một hiệu số pha là

$$\varphi = 2\pi\delta/\lambda = 2\pi(n_2 - n_1)l / \lambda$$

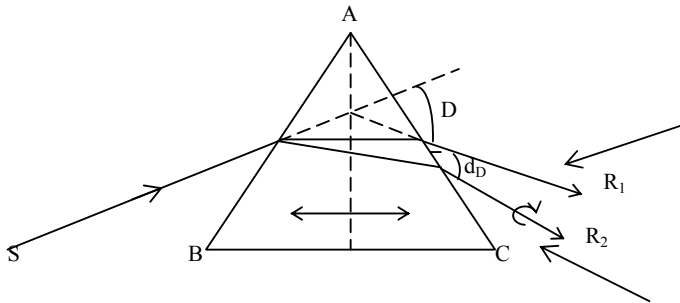
Cũng chính là góc quay mà chân động tròn nhanh pha I hơn chân động tròn chậm pha I khi ló ra khỏi môi trường quang hoạt (hình 62). Vì vậy khi hai chân động tròn này hợp lại thì chân động tổng hợp không còn là \vec{G} nữa mà là \vec{G} nằm trên trục Ox' làm với trục Ox một góc $\alpha = \frac{\varphi}{2}$ và cùng chiều với φ :

$$\alpha = \frac{\pi(n_2 - n_1)l}{\lambda}$$

Ta có nhận xét : chiều quay của mặt phẳng chân động sáng là chiều quay của chân động tròn nhanh pha.

SS.29. Kiểm chứng thuyết Fresnel.

Ta có thể kiểm chứng thuyết Fresnel bằng thí nghiệm sau



H.63

Ta dùng một lăng kính bằng thạch anh, có thiết diện thẳng là một tam giác đều ABC, trục quang học thẳng góc với mặt phẳng đối xứng của lăng kính (hình 63). Chiều tới lăng kính một chùm tia sáng song song, giả sử dùng ánh sáng vàng của Natrium, với góc tới có độ lệch cực tiểu D. Thí nghiệm cho thấy ta được hai chùm tia ló, chứng tỏ khi đi qua lăng kính chùm tia sáng đã bị tách ra làm hai chùm tia ứng với hai chiết suất khác nhau. Một trong hai chùm tia này song song với đáy lăng kính khi đi trong lăng kính. Ngoài ra thí nghiệm cũng cho thấy hai chùm ánh sáng ló, là những ánh sáng phân cực tròn : một tròn trái, một tròn phải.

Nếu lăng kính trên bằng thạch anh tả triền thì tia trên (lệch ít) là ánh sáng tròn trái (trong trường hợp này, tròn trái là chân động nhanh pha : V lớn, n nhỏ nên lệch ít), tia dưới là ánh

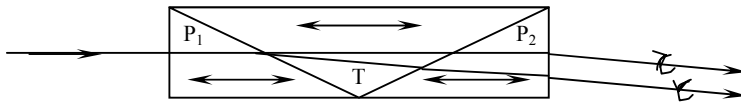
sáng tròn phải. Nếu lăng kính bằng thạch anh hữu triền thì ngược lại : tia trên là tròn phải, tia dưới là tròn trái.

Hiệu số giữa hai chiết suất rất nhỏ. Thí dụ trong trường hợp thạch anh, với ánh sáng vàng Natri mỗi mm bề dày làm mặt phẳng chấn động sáng quay một góc 21o7.

$$\alpha = \frac{(n_2 - n_1)\ell}{\lambda}$$

$$\text{Suy ra : } \Delta n : n_2 - n_1 = \frac{\alpha\lambda}{\pi\ell} = \frac{21,7 \times 0,589}{180 \times 1000} \approx 7 \times 10^{-5}$$

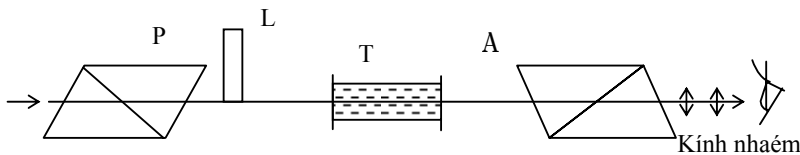
Do đó độ lệch giữa hai chùm tia ló cũng rất nhỏ. Với lăng kính có góc ở đỉnh 60o như trong thí nghiệm trên thì độ lệch đó là 0,23(. Vì vậy, để tách rời hai chùm tia ló cho dễ quan sát, người ta phải ghép nhiều lăng kính với nhau sao cho độ lệch giữa hai chùm tia ló tăng dần lên khi đi từ lăng kính này qua lăng kính khác. Fresnel đã ghép một hệ thống gồm 3 lăng kính như hình vẽ 64. Các lăng kính P1, P2 bằng thạch anh hữu tiên, lăng kính T bằng thạch anh tả triền. Các trục quang học như hình vẽ.



H.64

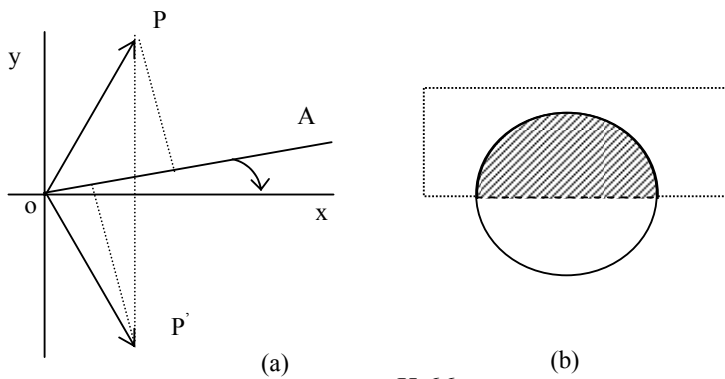
SS.30. ĐƯỜNG KẾ.

Đường kế là một loại triền quang kế, ứng dụng hiện tượng phân cực quay để đo nồng độ của một dung dịch đường. Sự cấu tạo của đường kế như hình vẽ 64.



H.65

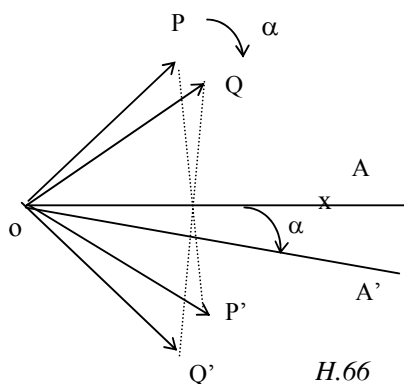
Lúc đầu, bỏ ống T ra.



H.66

Nicol P biến ánh sáng tự nhiên thành ánh sáng phân cực OP. Bản nửa sóng L chắn một nửa thị trường. Như vậy chùm ánh sáng gồm: nửa chùm không đi qua bản nửa sóng vẫn chấn động theo phương OP, nửa chùm đi qua bản nửa sóng chấn động theo phương OP' đối xứng với phương OP qua các đường trung hòa của bản L. Như vậy, với một vị trí bất kỳ của nicol A, ta thấy hai nửa thị trường có độ sáng khác nhau (hình.64). Quay nicol A để phương OA của thiết diện chính song song với phương Ox, khi đó hình chiếu của OP và OP' xuống OA bằng nhau nên ta thấy hai nửa thị trường sáng như nhau.

- Đặt ống T có chứa dung dịch đường vào vị trí giữa bản L và nicol phân tích A. Dung dịch đường là một dung dịch quang hoạt hữu triền, nên khi ánh sáng đi qua, các phương chấn động OP và OP' quay cùng chiều một góc α , các phương chấn động sáng khi ló ra khỏi dung dịch đường bây giờ là OQ và OQ'. Vì vậy ta lại thấy hai nửa thị trường sáng tốt khác nhau. Muốn hai nửa thị trường sáng đều nhau như cũ, ta phải quay nicol phân tích A cùng chiều một góc α . Xác định được trị số của góc quay α , ta suy ra nồng độ của dung dịch đường theo định luật Biot.



SS.31. TÁN SẮC DO HIỆN TƯỢNG PHÂN CỰC QUAY.

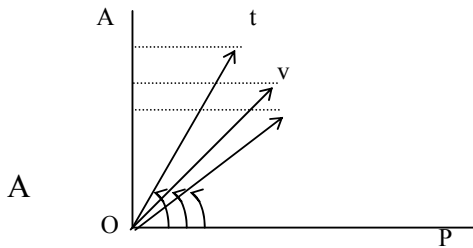
Thực hiện thí nghiệm phân cực quay với cùng một bản thạch anh nhưng lần lượt với nhiều đơn sắc khác nhau, người ta thấy góc quay α của mặt phẳng chấn động sáng thay đổi tùy theo độ dài sóng λ . Một cách gần đúng, Biot nhận thấy α (tỷ lệ nghịch với λ^2) và đưa ra công thức sau :

$$A \text{ là một hằng số đối với } \left(\frac{A}{\lambda^2}\right)$$

Như vậy một độ dài sóng càng nhỏ thì ứng với một góc quay càng lớn và sự biến thiên này khá nhanh. Thí dụ với một bản thạch anh dày 1mm, các góc quay α ứng với các độ dài sóng như sau:

	λ	α
Đỏ	7594 A	120,65
Vàng	5893 A	210,72
Tím	4308 A	420,59

Nếu ta xét các bản mỏng, bề dày vài mm, thì các góc quay α ứng với các đơn sắc từ đỏ tới tím đều là các góc hình học. Ánh sáng ló ra khỏi nicol A là một ánh sáng tạp, và màu ta thấy thay đổi theo phương của nicol A, do sự thay đổi về cường độ của các đơn sắc trong ánh



sáng tạp đó (Biên độ của mỗi chấn động được biểu diễn bằng hình chiếu của các vectơ chấn động xuống phương OA).

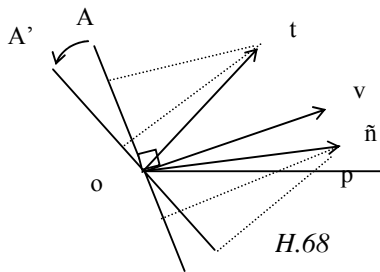
Muốn loại một đơn sắc nào, ta chỉ cần quay nicol để phương OA thẳng góc với phương chấn động của đơn sắc đó.

Đặc biệt nếu ta quay nicol A để OA thẳng góc với Ov (phương chấn động ứng với màu vàng 5.600 Å) thì ánh sáng ló ra khỏi A có một màu gọi là “màu nhạy”, nếu ta quay nicol A khỏi vị trí này một chút thì ta thấy màu biến đổi hẳn. Vậy muốn có màu nhạy, ta chỉ cần làm triệt tiêu ánh sáng vàng trung bình (5.600 Å) trong ánh sáng trắng thực.

Giả sử, ta dùng một bản thạch anh tả triển. Từ vị trí của OA có màu nhạy ta quay nicol A ngược chiều kim đồng hồ thì màu tạp ló ra khỏi A ngả sang màu đỏ (hình 68).

Nếu ta quay theo chiều ngược lại, màu trên sẽ ngả sang màu xanh.

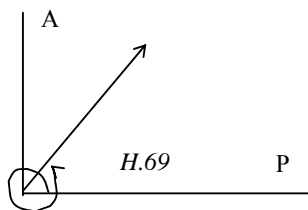
Bằng cách dùng nhiều bản quang hoạt bằng các chất khác nhau hoặc có bề dày khác nhau, ta được nhiều màu nhạy khác nhau (do sự thay đổi cường độ các đơn sắc trong màu nhạy).



- Nếu ta dùng các bản quang hoạt khá dày, vài cm trở lên thì các góc quay của các đơn sắc là các góc lượng giác (hình 69).

Các vectơ chấn động của các đơn sắc phân bố theo mọi phương thẳng góc với tia sáng. Thí dụ với một bản thạch anh dày 10cm, góc quay (biến thiên từ 1265° tới 4259° khi ta xét từ đỏ tới tím. Trong trường hợp như vậy, dù nicol A ở vị trí nào, ta thấy phương OA cũng thẳng góc với phương chấn động của một số khá lớn các đơn sắc, vì vậy các đơn sắc này hoàn toàn bị loại trong ánh sáng ló ra khỏi nicol A. Quan sát qua A, ta được một màu trắng cao đẳng.

Nếu hai nicol P và A ở vị trí thẳng góc (hình 68), tất cả các đơn sắc nào có vectơ chấn động quay một góc k(đều bị loại hoàn toàn trong ánh sáng ló ra khỏi A; tất cả các đơn sắc có vectơ chấn động quay một góc G thì đi qua nicol A không bị biến đổi, các đơn sắc này được gọi là các bức xạ được ưu đãi.



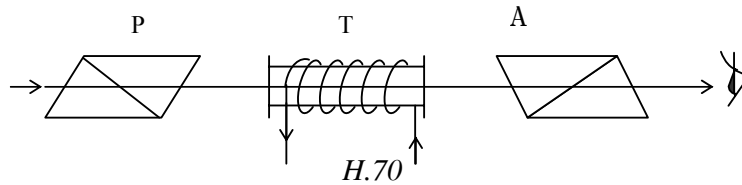
Như vậy, nếu hứng ánh sáng ló ra khỏi nicol A vào một kính quang phổ ta sẽ được một quang phổ vắn. Các vắn đen ứng với các bức xạ bị loại, các vắn sáng ứng với các bức xạ được ưu đãi.

PHÂN CỰC QUAY TỪ

Ta có thể dùng từ trường để gây ra hiện tượng phân cực quay đối với một môi trường lúc đầu không có tính quang hoạt. Hiện tượng phân cực quay nhân tạo này được gọi là phân cực quay từ, được khám phá bởi Faraday năm 1846 và được nhận thấy với hầu hết các môi trường trong suốt.

SS.32. THÍ NGHIỆM VỀ PHÂN CỰC QUAY TỪ.

Ta thiết trí các dụng cụ trong các thí nghiệm như sau :



Hai nicol P và A ở vị trí thẳng góc. Ống T ở giữa P và A chứa một chất lỏng trong suốt đẳng hướng, thí dụ sulfur carbon. Mắt sẽ không nhận được ánh sáng.

Chọn một dòng điện chạy qua một cuộn dây cuốn chung quanh ống T để tạo một từ trường H ở trong chất lỏng và song song với phương truyền của tia sáng. Ta lại thấy ánh sáng đi qua A. Nếu ta quay nicol A một góc (cùng chiều với dòng điện sinh từ thì ánh sáng lại bị A hoàn toàn chặn lại.

Thí nghiệm này chứng tỏ: Từ trường H đã làm cho chất lỏng trong ống T trở thành có tính quang hoạt, do đó làm mặt phẳng chấn động sáng quay một góc (, tương tự như hiện tượng phân cực quay gây ra bởi các chất quang hoạt thiên nhiên.

Góc quay (càng lớn nếu ta thực hiện thí nghiệm với các chất có chiết suất lớn.

SS.33. ĐỊNH LUẬT VERDET.

Nếu môi trường được đặt trong một từ trường đều song song với phương truyền của ánh sáng, góc quay (của mặt phẳng chấn động sáng tỷ lệ với cường độ từ trường H và chiều dài (của môi trường nằm trong từ trường.

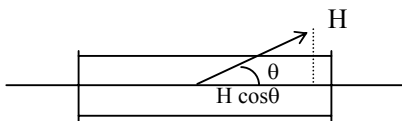
$$\alpha = \rho \cdot \lambda \cdot H$$

(được gọi là hằng số Verdet tùy thuộc bản chất của môi trường và tùy thuộc độ dài sóng của ánh sáng.

(thường được tính ra phút/cm.gauss

Với nước và ánh sáng vàng của Na, ta có (= 0,013 phút/ cm.gauss. Sulfur carbon là một chất lỏng có chiết suất lớn (n = 1,628 với ánh sáng vàng của Na) nên trị số của (rất lớn so với nước hoặc đa số các chất lỏng hữu cơ: (CS₂= 0,042 phút/cm.gauss.

- Nếu từ trường không song song với phương truyền của ánh sáng thì góc quay (tỷ lệ với thành phần của H trên phương truyền của ánh sáng.



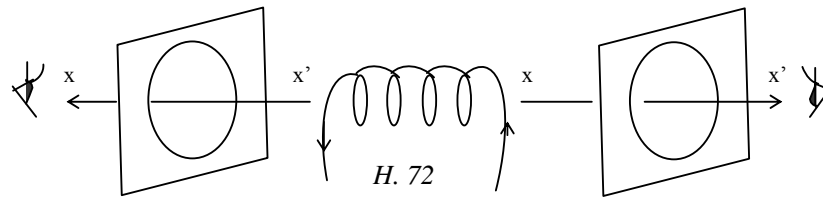
$$\alpha = \rho \cdot \lambda \cdot H \cos \theta$$

H.71

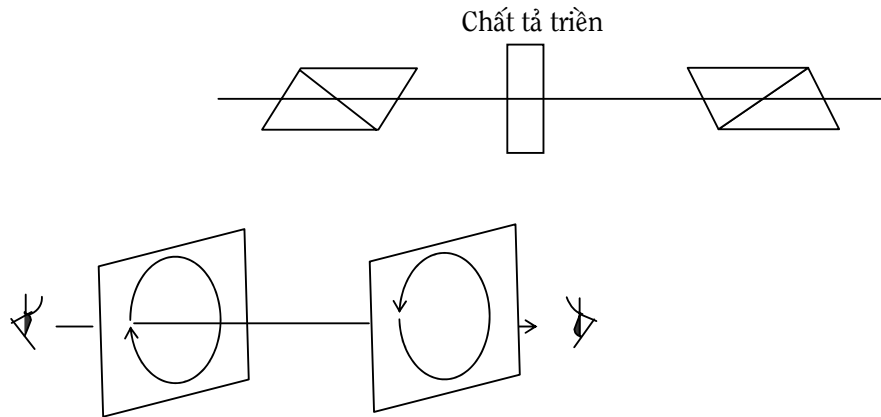
SS.34. SỰ KHÁC BIỆT GIỮA PHÂN CỰC QUAY TỪ VÀ PHÂN CỰC QUAY THIÊN NHIÊN.

Các thí nghiệm cho thấy, thông thường chiều quay của mặt phẳng chấn động sáng trong hiện tượng phân cực quay từ cùng chiều với dòng điện sinh từ. Vậy chiều của góc quay (không tùy thuộc chiều truyền của ánh sáng).

Trong thí nghiệm ở hình vẽ 72, nếu mắt nhìn theo chiều $x'x$ (ánh sáng truyền theo chiều xx') sẽ thấy mặt phẳng chấn động sáng quay ngược chiều kim đồng hồ, sulfur carbon trở thành một chất tả triền; ngược lại nếu mắt nhìn theo chiều xx' (ánh sáng truyền theo chiều $x'x$) thì lại thấy mặt phẳng chấn động sáng quay theo chiều kim đồng hồ, sulfur carbon trong trường hợp này đóng vai trò của chất hữu triền.



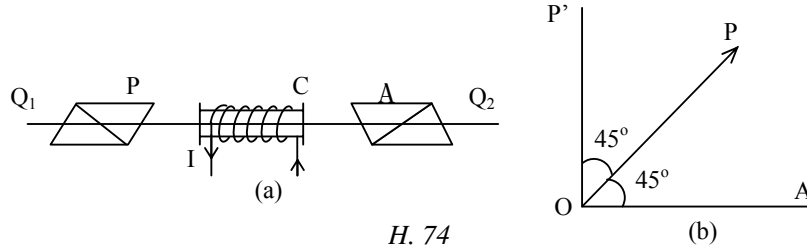
Trái lại trong hiện tượng phân cực quay thiên nhiên, nếu một chất là tả triền thì luôn luôn là tả triền (hữu triền cũng vậy). Chiều của góc quay (thay đổi theo chiều truyền ánh sáng).



Nói chung, với đa số các chất, chiều quay của mặt phẳng chấn động sáng cùng chiều với dòng điện sinh từ, nhưng cũng có vài chất, chiều quay này ngược chiều dòng điện, thí dụ các dung dịch muối sắt. Các chất này được gọi là các chất âm.

SS.35. ỨNG DỤNG: KÍNH TRONG SUỐT MỘT CHIỀU.

Ta sắp đặt như sau :



H. 74

Các nicol P và A ở các vị trí để hai mặt phẳng thiết diện chính hợp với nhau một góc 45° . C là môi trường gây hiện tượng phân cực quay từ. Chọn các đại lượng thích hợp để khi ánh sáng đi qua, góc quay của mặt phẳng chấn động sáng là α ($\alpha = H = 45^\circ$).

Giả sử có hai quan sát viên đối diện nhau, ở các vị trí Q_1 và Q_2 .

Đối với người ở Q_1 , ánh sáng tới C có phương chấn động là OA , khi đi qua C , phương chấn động quay một góc 45° theo chiều dòng điện I , trở thành song song với phương OP , do đó đi qua nicol P không bị thay đổi trạng thái phân cực. Vì vậy người đứng ở Q_1 nhìn thấy người ở vị trí Q_2 và thấy khối C như trong suốt.

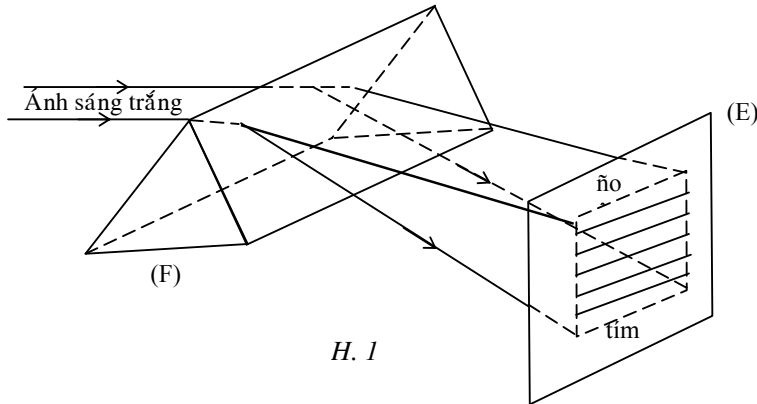
Ngược lại, đối với người ở Q_2 , ánh sáng tới C có phương chấn động là OP . Khi đi qua C , phương chấn động quay một góc 45° theo chiều dòng điện, trở thành phương OP' thẳng góc với phương OA . Do đó bị nicol A chặn lại. Vì vậy người ở vị trí Q_2 không nhìn thấy người ở vị trí Q_1 . Môi trường C như vậy chỉ cho ánh sáng đi qua theo một chiều mà thôi.

Chương V

SỰ TÁN SẮC ÁNH SÁNG

SS.1. HIỆN TƯỢNG TÁN SẮC THƯỜNG.

Ta đã đề cập tới hiện tượng tán sắc ánh sáng, khi khảo sát về lăng kính. Một chùm ánh sáng trắng khi đi qua một lăng kính, bị tán sắc thành các ánh sáng đơn sắc có màu biến thiên liên tục từ đỏ tới tím.



Để giải thích hiện tượng tán sắc này, người ta cho rằng ánh sáng trắng là một ánh sáng tổng hợp gồm vô số các ánh sáng đơn sắc, có các độ dài sóng khác nhau, biến thiên một cách liên tục. Mỗi một độ dài sóng ứng với một chiết suất của lăng kính. Do đó các đơn sắc khi đi qua lăng kính sẽ có góc lệch khác nhau, và ló ra khỏi lăng kính theo các phương khác nhau. Hứng chùm tia ló lên một màn E, ta được một vệt sáng màu biến thiên liên tục từ đỏ tới tím. Dải màu này gọi là quang phổ của ánh sáng tới.

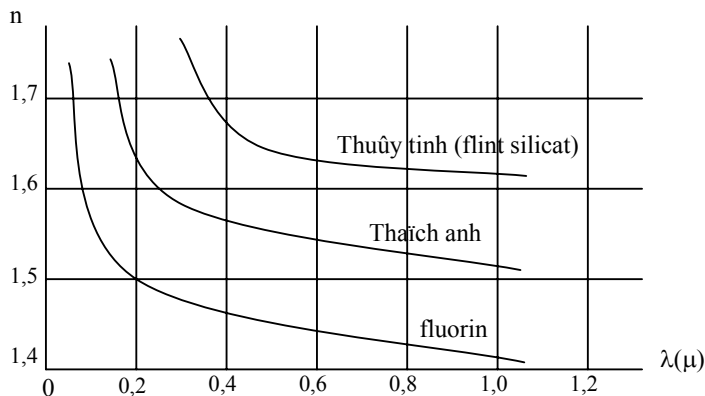
Trong thí nghiệm trên, màu đỏ bị lệch ít nhất. Độ lệch tăng dần từ đỏ, cam, vàng, lục, lam, chàm tới tím.

Như vậy, từ hiện tượng tán sắc, ta thấy chiết suất của một môi trường chiết quang là một hàm số theo bước sóng.

$$n = f(\lambda)$$

(λ là bước sóng của đơn sắc trong chân không).

Đường biểu diễn sự biến thiên của chiết suất của một chất theo bước sóng được gọi là đường cong tán sắc của chất ấy. Hình vẽ bên dưới là đường cong tán sắc của một số chất.

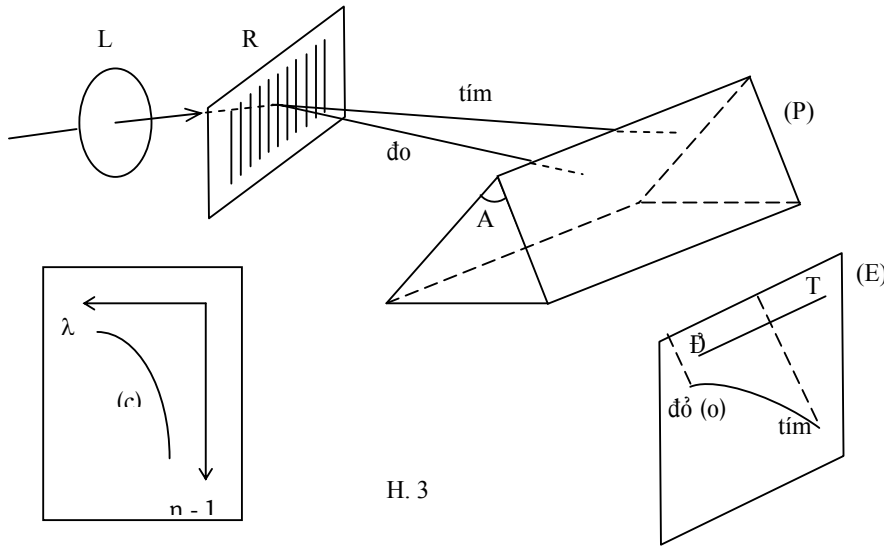


H. 2

Ta thấy đường cong tán sắc của các chất đều có chung một dạng tổng quát: chiết suất giảm khi bước sóng tăng. Đường cong tán sắc loại này đặc trưng cho hiện tượng tán sắc thường.

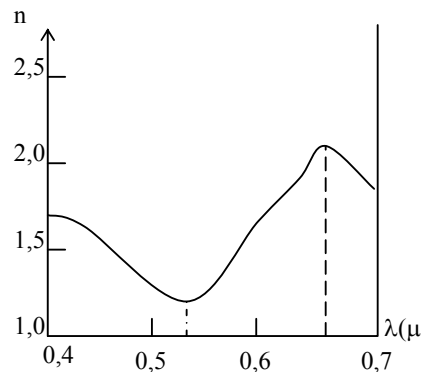
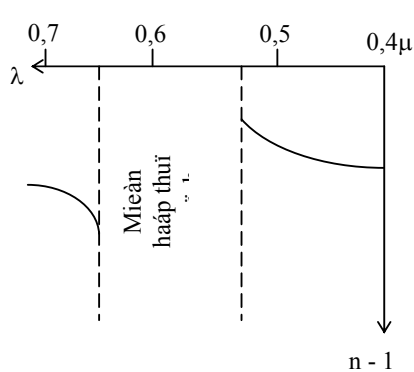
Ta có thể xác định đường cong tán sắc của một chất bằng phương pháp thực nghiệm như sau:

Giả sử ta muốn vẽ đường cong tán sắc của lăng kính P. Xếp đặt một hệ thống quang cụ như hình vẽ (3). Thấu kính hội tụ L cho một chùm tia sáng trắng song song tới một cách từ R thẳng đứng. Chùm tia ló khỏi cách tử bị tán sắc từ tím tới đỏ. Nếu ta hứng trực tiếp chùm tia ló này lên màn E (bỏ lăng kính P ra), ta được một quang phổ ĐT nằm ngang. Nếu chùm tia tới thẳng góc với cách tử, sự phân bố các đơn sắc trong quang phổ ĐT tỷ lệ với bước sóng λ . Vậy trục nằm ngang trên màn E biểu diễn bước sóng λ . Bây giờ chùm tia ló đi ra từ cách tử được cho đi qua lăng kính P có đáy nằm ngang.



Các đơn sắc sẽ lệch về phía đáy lăng kính. Độ lệch tăng dần từ đỏ tới tím. Nếu lăng kính P có góc A nhỏ thì độ lệch của các đơn sắc đi qua lăng kính tỷ lệ với $n - 1$. Vậy trục thẳng đứng trên màn E tỷ lệ với $n - 1$. Trên màn E ta được một đường cong (c) có màu biến thiên từ đỏ tới tím, biểu diễn sự biến thiên của $n - 1$ theo bước sóng λ . Dạng của C là dạng của đường cong tán sắc của môi trường dùng làm lăng kính P.

SS.2. HIỆN TƯỢNG TÁN SẮC KHÁC THƯỜNG.



Trong phần trên ta khảo sát hiện tượng tán sắc của các chất trong suốt đối với vùng ánh sáng thấy được. Trong vùng này chiết suất giảm dần khi bước sóng tăng. Bây giờ khảo sát hiện tượng tán sắc của một chất có tính hấp thụ mạnh đối với một vùng nào đó trong khoảng ánh sáng thấy được, ta thấy một hiện tượng ngược lại ở trong vùng độ dài sóng bị hấp thụ và trong vùng lân cận : Trong các vùng này chiết suất tăng theo độ dài sóng. Hiện tượng tán sắc với đặc tính này được gọi là hiện tượng tán sắc khác thường. Thí dụ trong thí nghiệm ở hình vẽ (3) ta dùng lăng kính P bằng cyanin, đường cong tán sắc có dạng như hình (4). Đường này bị gián đoạn một khoảng trong vùng từ lục tới đỏ (vào khoảng từ 0,54 (tới 0,66 (). Đó là vùng ánh sáng thấy được bị cyanin hấp thụ. Điều quan trọng là: Quan sát đường cong tán sắc này, ta thấy ở hai bên miền hấp thụ, các đơn sắc về phía màu lục lệch ít hơn các đơn sắc về phía màu đỏ. Muốn vẽ được toàn bộ đường cong tán sắc của cyanin, ta có thể dùng các lăng kính P có góc ở đỉnh nhỏ (chừng vài phút). Hình vẽ (5) là đường tán sắc của cyanin ở thể rắn và trong vùng ánh sáng thấy được. Đường cong này cho ta phân biệt rõ ràng hiện tượng tán sắc thường và tán sắc khác thường. Ở hai bên vùng hấp thụ, ta có hiện tượng tán sắc thường : chiết suất giảm khi độ dài sóng tăng; ở trong vùng hấp thụ, ta có hiện tượng tán sắc khác thường: chiết suất tăng khá nhanh theo độ dài sóng.

Nói chung, một chất hấp thụ mạnh ánh sáng ở trong một vùng độ dài sóng nào thì gây ra hiện tượng tán sắc khác thường ở vùng độ dài sóng đó.

Thật ra, hiện tượng tán sắc khác thường không có gì là “khác thường”, mà là một hiện tượng phổ biến, vì chúng ta đã biết bất kỳ một môi trường vật chất nào cũng có tính hấp thụ bức xạ trong một số vùng nào đó. Và trong các vùng này, ta đều có hiện tượng tán sắc khác thường. Thí dụ, trong vùng ánh sáng thấy được, thủy tinh gây ra hiện tượng tán sắc thường. Nhưng trong những vùng ánh sáng tử ngoại, thủy tinh có tính hấp thụ mạnh, ta lại có hiện tượng tán sắc khác thường.

LÝ THUYẾT VỀ HIỆN TƯỢNG TÁN SẮC

SS.3. NHỮNG HỆ THỨC CĂN BẢN TRONG THUYẾT ĐIỆN TỪ.

* Biểu thức của chiết suất.

Ta đã biết trong lý thuyết về điện từ, nếu gây ra tại một điểm trong chân không hay trong một điện môi đẳng hướng một điện trường thay đổi \vec{G} thì dòng điện dịch tương ứng \vec{G} gây ra trong không gian chung quanh một từ trường thay đổi \vec{G} . Sự biến thiên của từ trường này lại gây ra một điện trường ứng. Cứ như vậy điện trường \vec{G} được truyền đi trong chân không, hay trong điện môi. Ta có các hệ thức của Maxwell đối với một điện môi như sau :

$$\vec{i} = \text{rot}\vec{H} \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = -\text{rot}\vec{E} \quad (3.2)$$

$$\vec{B} = \mu\vec{H} \quad (3.3)$$

$$\vec{i} = \varepsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (3.4)$$

(dòng điện dịch trong điện môi)

Trong đó : \hat{c} = vectơ cảm ứng từ

(= độ từ thẩm của môi trường

(= hằng số điện môi

Từ 4 hệ thức trên, ta suy ra :

$$\epsilon \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} = \text{rot} \vec{H} \quad (3.5)$$

$$\mu \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} = -\text{rot} \vec{E} \quad (3.6)$$

Từ hai phương trình (3.5) và (3.6), ta suy ra phương trình truyền của điện trường:

(3.7)

$$\frac{\partial^2 E}{\partial t^2} = v^2 \Delta \vec{E}$$

Với $v^2 = \frac{1}{\epsilon \mu}$, v = vận tốc truyền

Vậy
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

Trong môi trường là chân không, vận tốc truyền là :

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Gọi ϵ_r và μ_r là hằng số điện môi tỉ đối và độ từ thẩm tỉ đối của môi trường, ta có :

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r \epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r \mu_r}}$$

Vậy chiết suất của môi trường là:

$$n = \frac{c}{v} = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

Với các môi trường thông thường, ta có $\mu_r \approx 1$ nên

$$n = \sqrt{\epsilon_r}$$

Hệ thức này được nghiệm đúng với nhiều môi trường. Dưới đây là bảng so sánh các trị số của n và ứng với vài môi trường $\sqrt{\epsilon_r}$

	n	$\sqrt{\epsilon_r}$
- Không khí	1,000294	1,000295
- Khí Hydrogen	1,000138	1,000132
- Khí Nitrogen	1,000299	1,000307
- Benzen	1,482	1,490

Ta xét một sóng phẳng phân cực thẳng Ex, chấn động theo phương OX, có mạch số (, truyền đi theo phương Oz với vận tốc v. Ta có hệ thức :

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial t^2} = v^2 \Delta E_x = v^2 \frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} ()$$

Nếu chấn động phát ra từ nguồn là chấn động điều hòa, thì Ex có dạng :

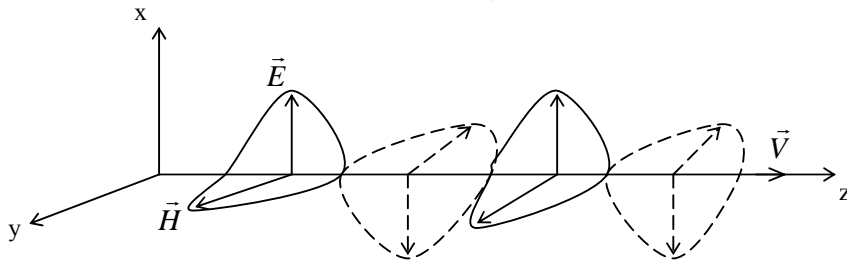
$$\text{hay dạng tập } E_x = a \cos \omega \left(t - \frac{z}{v} \right) \quad (3.8)$$

$$E_x = a e^{j\omega \left(t - \frac{z}{v} \right)} \quad (3.9)$$

Từ hệ thức (3.9), ta suy ra

Với $a\sqrt{\epsilon} = b\sqrt{\mu}$ (Từ trường G chấn động theo phương Oy thẳng góc với Ox)
$$H_y = b \cos \omega \left(t - \frac{z}{v} \right)$$

Giữa các vectơ \vec{E} , \vec{H} và \vec{v} (vận tốc truyền) liên hệ với nhau như hình vẽ 6.



H. 6

SS.4. PHƯƠNG TRÌNH TRUYỀN CỦA MỘT CHÂN ĐỘNG ĐƠN SẮC - CHIẾT SUẤT THEO THUYẾT ĐIỆN TỬ CỦA LORENTZ.

Như ta đã thấy ở trên, từ thuyết điện tử, người ta lập được hệ thức \vec{G} và ta đã thấy hệ thức này được nghiệm đúng với nhiều môi trường. Điều đó chứng tỏ sự vững chắc của thuyết điện tử. Tuy nhiên với một số môi trường khác, ta lại thấy các trị số của n và \vec{G} khác nhau hẳn. Thí dụ với nước, ta có : $n = 1,33$ nhưng \vec{G} (8,94. Như vậy về điểm này, thuyết điện tử đã có những hạn chế của nó. Ngoài ra hệ thức \vec{G} không cho thấy ảnh hưởng của bước sóng đối với chiết suất.

Vì những hạn chế đó, ta không thể chỉ dùng thuyết điện tử của Maxwell để giải thích hiện tượng tán sắc. Muốn giải thích hiện tượng này ta phải để ý tới tác dụng của vectơ chân động sáng (vectơ điện trường \vec{G}) đối với các hạt mang điện của môi trường. Đó là thuyết điện tử của Lorentz. Những hạt mang điện đây có thể là các electron hay các hạt lớn như ion. Tuy nhiên với các sóng sáng có tần số cao như ta đang khảo sát thì chỉ cần để ý tới các electron. Chỉ khi nào đề cập tới vùng hồng ngoại ta mới cần để ý tới các ion.

Do tác dụng của điện trường \vec{G} của sóng sáng, các electron bị dịch chuyển, tạo thành một dòng điện phân cực. Ta xét một thể tích vi cấp của điện môi, kích thước rất nhỏ so với bước sóng của ánh sáng truyền qua. Trong điều kiện này, điện trường \vec{G} được coi như giống nhau tại mọi điểm trong thể tích này. Bây giờ ta xét các electron, chứa trong các phân tử khác nhau nhưng đồng nhất như nhau, vào mỗi thời điểm, cùng chịu một sự chuyển dịch \vec{G} . Vào thời điểm đó, sự dịch chuyển của các electron này tương đương với một dòng điện song song với vận tốc dịch chuyển \vec{G} . Trong thời gian dt , đoạn dịch chuyển của electron là ds . Gọi N là số electron trong một đơn vị thể tích. Số electron đi qua một đơn vị diện tích thẳng góc với đường di chuyển trong thời gian dt là $N.ds$, ứng với một sự di chuyển điện tích là $dq = N.e.ds$. Dòng điện phân cực có trị số là

$$i_p = \frac{dq}{ds} = N.e. \frac{ds}{dt}$$

$$\text{Hay dạng vectơ là : } \vec{i}_p = N.e. \frac{d\vec{s}}{dt} \quad (4.1)$$

Như vậy để giải thích hiện tượng tán sắc ta vẫn dùng được các hệ thức trong thuyết điện tử của Maxwell nhưng dòng điện \vec{G} trong công thức (4.1) phải được hiệu chỉnh lại. Ta thừa nhận rằng, trong trường hợp này, dòng điện \vec{G} là tổng của hai dòng điện: Dòng điện dịch, đồng nhất với dòng điện dịch trong chân không, \vec{G} và dòng điện phân cực \vec{G} (ở trên, ta chỉ mới xét một nhóm electron đồng nhất, nếu xét tất cả các nhóm electron đồng nhất thì dòng điện phân cực toàn phần là \vec{G}).

$$\vec{i} = \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sum N.e. \frac{d\vec{s}}{dt} \quad (4.2)$$

Bây giờ ta xét sự chuyển động của các electron. Ta đã biết trong một điện môi, ta không có các electron tự do như trong các kim loại. Các electron trong điện môi chỉ có thể chuyển động bên trong các phân tử. Ta thừa nhận rằng : Các electron chuyển động dưới tác dụng của lực ma sát tỷ lệ với vận tốc $\frac{-r d\vec{s}}{dt}$ và lực liên kết electron với vị trí cân bằng $-k\vec{s}$. Lực này có xu hướng kéo electron trở về vị trí cân bằng và tỷ lệ với ly độ s , có tính chất như một lực đàn hồi. Nếu không có tác dụng của điện trường, phương trình chuyển động của electron được viết dưới dạng :

$$\begin{aligned} m \frac{d^2 \vec{s}}{dt^2} + r \frac{d\vec{s}}{dt} + k\vec{s} &= 0 \\ m \frac{d^2 \vec{s}}{dt^2} + r \frac{d\vec{s}}{dt} + k\vec{s} &= 0 \end{aligned}$$

Chuyển động của electron là các dao động tắt dần. Chu kỳ dao động riêng T_0 của electron được định nghĩa là chu kỳ dao động của electron khi không có ma sát. Ta có :

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (4.3)$$

m là khối lượng electron

Dưới tác dụng của điện trường \vec{E} có mạch $\frac{\delta 2\pi}{T}$, electron chịu thêm một lực \vec{e} , phương trình dao động của electron trở thành :

$$m \frac{d^2 \vec{s}}{dt^2} + r \frac{d\vec{s}}{dt} + k\vec{s} = e\vec{E} \quad (4.4)$$

Ta xét nghiệm có dạng :

$$\vec{s} = \vec{A}e^{j\omega t}$$

Vận tốc và gia tốc của electron là :

$$\frac{d\vec{s}}{dt} = \vec{A}j\omega e^{j\omega t} = j\omega \vec{s}$$

$$\frac{d^2 \vec{s}}{dt^2} = -\vec{A}\omega^2 e^{j\omega t} = -\omega^2 \vec{s}$$

Phương trình (4.4) trở thành

$$(-m\omega^2 + jr\omega + k)\vec{s} = e\vec{E}$$

$$\text{Suy ra : } \frac{d\vec{s}}{dt} = \frac{e}{k + jr\omega - m\omega^2} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\text{Vậy } \vec{i} = \epsilon_0 \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \sum \frac{Ne^2}{k + jr\omega - m\omega^2} \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

$$\text{Hay } \vec{i} = \left(\epsilon_0 + \sum \frac{Ne^2}{k + jr\omega - m\omega^2} \right) \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

Vậy ϵ' bằng tích số của $\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ với một tạp số (ϵ')

$$\epsilon' = \epsilon_0 + \sum \frac{Ne^2}{k + jr\omega - m\omega^2} \quad (4.5)$$

Vậy $\vec{i} = \epsilon' \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$ (4.6)

(ϵ' được gọi là hằng số điện môi tạp.

Từ các phương trình (3.1), (3.2), (3.3) và (4.5) suy ra :

$$\begin{aligned} \epsilon' \cdot \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} &= \text{rot } \vec{H} \\ \mu \cdot \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} &= -\text{rot } \vec{E} \end{aligned}$$

và ta cũng có phương trình truyền sóng của điện trường \vec{E}

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = v^2 \Delta \vec{E} \quad \text{với} \quad v^2 = \frac{1}{\epsilon' \mu}$$

Suy ra nghiệm tương tự (4.8)

$$E = a \exp j\omega \left(t - \frac{z}{v} \right)$$

Ta có thể đặt

$$\epsilon' = \epsilon_0 (v - j\xi)^2$$

Hay $\epsilon'_r = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} = (v - j\xi)^2 = n'^2$ (4.7)

Trong đó (ϵ'_r = hằng số điện môi tạp tỉ đối

n' = chiết suất tạp

Ta có :
$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon' \mu}} = \frac{1}{\sqrt{\epsilon'_r \mu_r \epsilon_0 \mu_0}} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'_r \mu_r}}$$

Cho ($r = 1$, ta có : \vec{E}

Vậy :

$$\begin{aligned} E &= a \exp j\omega \left(t - \frac{n'}{c} z \right) \\ E &= a \exp j\omega \left(t - \frac{v - j\omega}{c} z \right) \\ E &= a \exp \frac{-\omega \xi}{c} z \exp j\omega \left(t - \frac{v}{c} z \right) \end{aligned}$$

Hay (4.8)

Phần thực là

$$E_x = a \exp\left(-\frac{\omega\xi}{c} z\right) \cos\left(t - \frac{v}{c} z\right)$$

SS.5. SO SÁNH ϵ'_r và ϵ_r .

Bây giờ ta thử so sánh ϵ'_r và ϵ_r .

Ta có :
$$\epsilon' = \epsilon_o + \sum \frac{Ne^2}{k + jr\omega - m\omega^2}$$

hay
$$\epsilon'_r = 1 + \sum \frac{\frac{Ne^2}{\epsilon_o \cdot k}}{1 + jr\frac{\omega}{k} - \frac{m\omega^2}{k}}$$

Trong đó
$$\frac{m}{k} = \frac{T_o^2}{4\pi^2}$$

Suy ra
$$\frac{m\omega^2}{k} = \frac{T_o^2}{T^2}$$

$$jr\frac{\omega}{k} = jG\frac{T_o}{T} \quad \text{với} \quad G = \frac{rT_o}{2\pi m}$$

Ngoài ra đặt
$$\frac{Ne^2}{\epsilon_o k} = K$$

Vậy
$$\epsilon'_r = 1 + \sum \frac{K}{1 + jG\frac{T_o}{T} - \frac{T_o^2}{T^2}} \quad (5.1)$$

Trong tĩnh điện học ta có:

$$\vec{D} = \epsilon\vec{E} = \epsilon_o\vec{E} + \vec{P}$$

Suy ra
$$\epsilon_r = \frac{\vec{D}}{\epsilon_o \cdot \vec{E}} = 1 + \frac{\vec{P}}{\epsilon_o \cdot \vec{E}}$$

\vec{P} là moment lưỡng cực ứng với một đơn vị thể tích của môi trường. Ta có:
 $\vec{P} = \sum Ne\vec{s}$, với \vec{s} là đoạn dịch chuyển của electron.

Mặt khác, ở trạng thái cân bằng, ta có :

$$\vec{k}S = e\vec{E}$$

Suy ra

$$\frac{P}{\epsilon_0 E} = \sum \frac{Ne^2}{\epsilon_0 k} = \sum K$$

Vậy

$$\epsilon_r = 1 + \sum K$$

(5.2)

Ta thấy (ϵ_r tiến tới hằng số điện môi tĩnh điện (ϵ_r khi T tăng lên vô cực. Suy ra n^2 tiến tới phần thực (ϵ_1), hay ($\epsilon_1 = \epsilon_r$), khi ta khảo sát các độ dài sóng lớn.

Phần thực (ϵ_1) là chiết suất của môi trường. (ϵ_1 hay n) chỉ bằng ϵ_r khi ta xét độ dài sóng lớn mà thôi.

(ϵ_2 được gọi là chỉ số tắt, hay chỉ số hấp thụ của môi trường.

(ϵ_2 càng lớn, biên độ \vec{E} giảm càng nhanh khi truyền trong môi trường, nghĩa là chấn động bị hấp thụ càng mạnh. Vậy hệ thức Maxwell \vec{E} chỉ là một hệ thức trong trường hợp giới hạn. Hệ thức này càng được nghiệm đúng khi ta xác định chiết suất ứng với các độ dài sóng càng lớn (hay chu kỳ càng lớn). Điều này được xác nhận bằng thực nghiệm. Thí dụ : Khi khảo sát thạch anh, người ta đo được $\sqrt{\epsilon_r} = 2,12$ so với chiết suất thông thường ở vùng vô tuyến và vùng ánh sáng thấy hoặc $n \approx 1,5$. Những khi nào chiết suất này ứng với độ dài sóng 56 μ (thì Rubens tìm được trị số là 2,18, rất gần $\sqrt{\epsilon_r}$).

Ta nhận xét (ϵ_r , (ϵ_1 , n^2 , (ϵ_2 và (ϵ_1) là các hàm theo chu kỳ T .

SS.6. GIẢI THÍCH HIỆN TƯỢNG TÁN SẮC.

Trước tiên ta thừa nhận rằng sự dao động của các hạt mang điện, hay electron nói riêng, bên trong phân tử kèm theo một sự tiêu tán năng lượng, tương tự như các hạt cơ học mất năng lượng do sự ma sát. Hiện tượng này biến thành nhiệt, năng lượng của chấn động sáng và gây ra hiện tượng hấp thụ.

Cũng chính vì hiện tượng này mà ta thấy trong phương trình (4.13) có lực ma sát \vec{G} . Sự tiêu tán năng lượng nói trên không xảy ra như nhau đối với các bước sóng mà thay đổi theo bước sóng của chấn động sáng. Ngoài ra, ta đã biết, chấn động của các hạt mang điện như electron là chấn động cưỡng bức. Chấn động sáng là chấn động kích thích. Chấn động của các hạt mang điện càng mạnh khi chu kỳ của chấn động kích thích càng gần chu kỳ riêng T_0 của hạt. Mà lực ma sát \vec{G} tỷ lệ với vận tốc của hạt, vậy hiện tượng tiêu tán năng lượng trên mạnh nhất khi chu kỳ T của chấn động sáng bằng chu kỳ riêng T_0 của hạt. Hay nói cách khác, hiện tượng hấp thụ xảy ra rõ rệt ở vùng lân cận chu kỳ riêng T_0 và mạnh nhất khi ta có sự cộng hưởng, nghĩa là khi chu kỳ của chấn động kích thích bằng chu kỳ riêng T_0 của hạt bị kích thích.

Sự hấp thụ xảy ra trong từng vùng bước sóng như vậy được gọi là sự hấp thụ lọc lựa.

Bây giờ ta trở lại hệ thức

$$\epsilon_r' = n^2 = (v - j\xi)^2 = 1 + \sum \frac{K}{1 + jG \frac{T_0}{T} - \frac{T_0^2}{T^2}}$$

Thế $\hat{\epsilon}$, \hat{G} và tách riêng hai phần thực và ảo, ta được

* Phần thực : \hat{G} (6.1)

* Phần ảo $j2v$ (với \hat{G} (6.2)

* SỰ TÁN SẮC THƯỜNG.

Sự tán sắc thường xảy ra với các khoảng độ dài sóng ở ngoài vùng hấp thụ. Hệ số G thường có trị số khá nhỏ, do đó nếu ta xét các (cách xa (o đáng kể thì ta có thể bỏ qua số hạng $G^2(2(o^2$ bên cạnh số hạng $((2 - (o^2)^2$. Giả sử bây giờ ta xét vùng hấp thụ ở lân cận độ dài sóng (o và giả sử độ dài sóng này ở cách khá xa các độ dài sóng cộng hưởng (1, (2, ... khác. Như vậy trong vùng bước sóng khảo sát, các số hạng trong tổng số \hat{G} ứng với (1, (2, ... được coi như các hằng số, các số hạng trong tổng số \hat{G} ứng với (1, (2, ... có thể coi như triệt tiêu.

Các hệ thức (6.1) và (6.2) viết lại là :

$$v^2 - \xi^2 - \alpha = K \frac{\lambda^2 (\lambda^2 - \lambda_0^2)}{(\lambda^2 - \lambda_0^2)^2 + G^2 \lambda^2 \lambda_0^2} \quad (6.3)$$

$$= K \frac{G \lambda_0 \lambda^3}{(\lambda^2 - \lambda_0^2)^2 + G^2 \lambda^2 \lambda_0^2} \quad (6.4)$$

(là một hằng số.

Ta đang xét các độ dài sóng (ở ngoài vùng hấp thụ, nghĩa là (cách (o khá xa, nên trị số của số hạng bên phải của hệ thức (6.4) rất nhỏ, do đó (coi như triệt tiêu. Công thức (6.1) trở thành

$$v^2 = n^2 = 1 + \sum \frac{K \lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} = n_\infty^2 + \sum \frac{K \lambda_0^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (6.5)$$

$n_\infty^2 = 1 + \sum K$ làø giới hạn của n khi cho λ tiến tới vô cực, ta thấy ngay $n_\infty^2 = \epsilon_r$. Công thức (4.23) nãôi gọi là công thức Sellmeier. Ta có thể tìm lại một kết quả đã đề cập ở đoạn SS 4.5: $n^2 = (r$ khi cho (((.

Vậy để giải thích hiện tượng tán sắc thường, ta phải thay thế công thức $n^2 = (r$ bằng công thức Sellmeier :

$$n^2 = \epsilon_r + \sum \frac{K \lambda_0^2}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (6.6)$$

Theo công thức này ta thấy (tăng thì chiết suất giảm, phù hợp với thực nghiệm khi khảo sát hiện tượng tán sắc thường. Ta nên nhớ công thức Sellmeier chỉ có giá trị khi ta xét các độ dài sóng ở khá xa (o, nghĩa là khá xa vùng hấp thụ.

Với các môi trường trong suốt đối với vùng ánh sáng thấy được, (o nằm trong vùng tử ngoại hay hồng ngoại).

- Trường hợp chỉ có các vùng hấp thụ trong vùng tử ngoại. Ta có (o nhỏ đối với (nên ta có :

$$\frac{K\lambda^2}{\lambda^2 - \lambda_o'^2} = \frac{K}{1 - \lambda_o'^2 / \lambda^2} \approx K \left(1 + \frac{\lambda_o'^2}{\lambda^2} + \frac{\lambda_o'^4}{\lambda^4} \right)$$

Công thức (4.23) có dạng

$$n^2 = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} \quad (6.7)$$

Với $A = 1 + \sum K, B = \sum K\lambda_o'^2, C = \sum K\lambda_o'^4$

Công thức (6.7) được coi là công thức Cauchy, áp dụng khi khảo sát với các bước sóng (cách khá xa các bước sóng cộng hưởng nằm trong vùng tử ngoại. Công thức này rất phù hợp với các kết quả thực nghiệm khi khảo sát sự tán sắc của thủy tinh.

Nếu chỉ lấy hai số hạng đầu, công thức Cauchy trở thành :

$$n^2 = A + \frac{B}{\lambda^2}$$

Các hằng số A, B, C được xác định bằng thực nghiệm đối với từng môi trường khảo sát.

- Trường hợp có cả vùng hấp thụ trong vùng hồng ngoại. Thí dụ, bước sóng cộng hưởng (o nằm trong vùng hồng ngoại, ta có (nhỏ so với (o. Vậy

$$\frac{K'\lambda_o'}{\lambda^2 - \lambda_o'^2} = \frac{K'}{1 - \frac{K'^2}{\lambda_o'^2}} \approx -K' \left(1 + \frac{\lambda^2}{\lambda_o'^2} + \frac{\lambda^4}{\lambda_o'^4} \right)$$

Công thức (6.5) viết lại là :

$$n^2 = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} - A'\lambda^2 - B'\lambda^4 \quad (6.8)$$

với $A = 1 + (K - K') = (r - K')$

$$A' = \frac{K'}{\lambda_o'^2}, B' = \frac{K'}{\lambda_o'^4}$$

Công thức (6.8) là công thức Briot, được dùng để khảo sát sự tán sắc bởi các môi trường có các vùng hấp thụ ở trong hai vùng hồng ngoại và tử ngoại.

* HIỆN TƯỢNG TÁN SẮC KHÁC THƯỜNG.

Hiện tượng tán sắc khác thường xảy ra đối với các bước sóng ở trong vùng hấp thụ. Trong trường hợp này (gần bằng (o nên ta phải giữ nguyên hai số hạng ở mẫu số các công thức (6.3) và (6.4).

$$n^2 - \xi^2 - \alpha = K \frac{\lambda^2 (\lambda^2 - \lambda_o'^2)}{(\lambda^2 - \lambda_o'^2)^2 + G^2 \lambda_o'^2 \lambda^2}$$

$$2\xi n = \frac{KG\lambda_o'\lambda^3}{(\lambda^2 - \lambda_o'^2)^2 + G^2 \lambda_o'^2 \lambda^2}$$

Để đơn giản sự khảo sát sự biến thiên của n và G (theo ω , hay theo mạch số ω), ta xét trường hợp một vùng hấp thụ duy nhất của một chất khí ở áp suất yếu. Trong trường hợp này ta có chiết suất gần bằng 1 và $n^2 - 1 \approx 2(n - 1)$

Ta có : G

$$n^2 = \epsilon'_r = 1 + \frac{Ne^2 / \epsilon_0}{k + jr\omega - m\omega^2}$$

hay
$$n^2 - 1 = \frac{Ne^2}{\epsilon_0 \cdot m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + j \frac{r}{m} \omega}$$

suy ra
$$n - 1 = \frac{Ne^2}{2\epsilon_0 \cdot m} \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 + j \frac{r}{m} \omega}$$

Tách riêng hai phần thực và ảo, ta được :

$$v - 1 = n - 1 = \frac{Ne^2}{2\epsilon_0 \cdot m^2} \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{r^2}{m^2} \omega^2} \quad (6.9)$$

$$\xi = \frac{Ne^2 r}{2\epsilon_0 \cdot m^2} \frac{\omega}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{r^2}{m^2} \omega^2} \quad (6.10)$$

Hệ thức (6.9) diễn tả sự biến thiên của chiết suất n theo ω . Hệ thức (6.10) diễn tả sự biến thiên của chỉ số hấp thụ G theo ω .

* KHẢO SÁT ĐƯỜNG CONG TÁN SẮC.

Dựa vào hàm số $n - 1 = f(\omega)$ hệ thức (6.9) ta vẽ được đường cong tán sắc của môi trường khảo sát.

$$f = n - 1 = M \frac{\omega_0^2 - \omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{r^2}{m^2} \omega^2} \quad \text{với } M = \frac{Ne^2}{2\epsilon_0 \cdot m}$$

$$\frac{df}{d\omega} = M \frac{2\omega \left[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 - \frac{r^2}{m^2} \omega^2 \right]}{\left[(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + \frac{r^2}{m^2} \omega^2 \right]^2}$$

(> 0 vậy dấu của G là dấu của G)

Ta có

$\hat{\omega}$ nếu ta có : G

suy ra $\hat{\omega}$ và G

hay
$$\omega < \omega_0 \sqrt{1 - G}$$

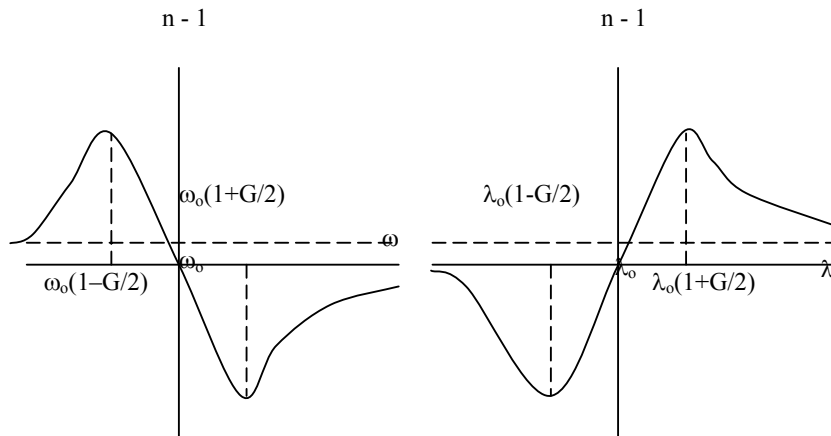
và $\hat{\omega}$

Ngược lại, G nếu : G

Ngoài ra G khi ta có :

$$\omega = \omega_m = \omega_o \sqrt{1 \mp G} \approx \omega_o \left(1 \mp \frac{G}{2} \right)$$

Vậy đường cong tán sắc, hay đường biểu diễn của $n - 1$ theo (như sau (hình 4.7).



H. 7

H. 8

Nếu $\omega \gg \omega_o$, xét công thức 4.27, ta thấy $n - 1 \approx \frac{M}{\omega^2}$ (0 hay $n \approx 1$). Chấn động đi vào môi trường hầu như không bị khúc xạ. Điều này được nghiệm đúng với các tia có năng lượng lớn như tia γ (có tần số lớn).

Nếu $\omega \ll \omega_o$, $n - 1 \approx \frac{M}{\omega^2} + 1 = \text{hằng số}$.

Vậy đối với các chấn động đi qua môi trường có tần số nhỏ, chiết suất n được coi như không thay đổi theo tần số (hay bước sóng). Đây là trường hợp sóng vô tuyến hoặc hồng ngoại xa. Trong các vùng này, hệ thức Maxwell $n^2 = \epsilon_r$ được nghiệm đúng như ta đã thấy trong tĩnh điện học.

Hình vẽ (8) biểu diễn sự biến thiên của $n - 1$ theo bước sóng λ . Ta thấy phù hợp với đường cong tán sắc vẽ được do thực nghiệm: khi bước sóng ở xa vùng hấp thụ (về cả hai bên) thì chiết suất giảm khi λ tăng. Đó là sự tán sắc thường. Càng lại gần vùng hấp thụ, sự biến thiên càng nhanh.

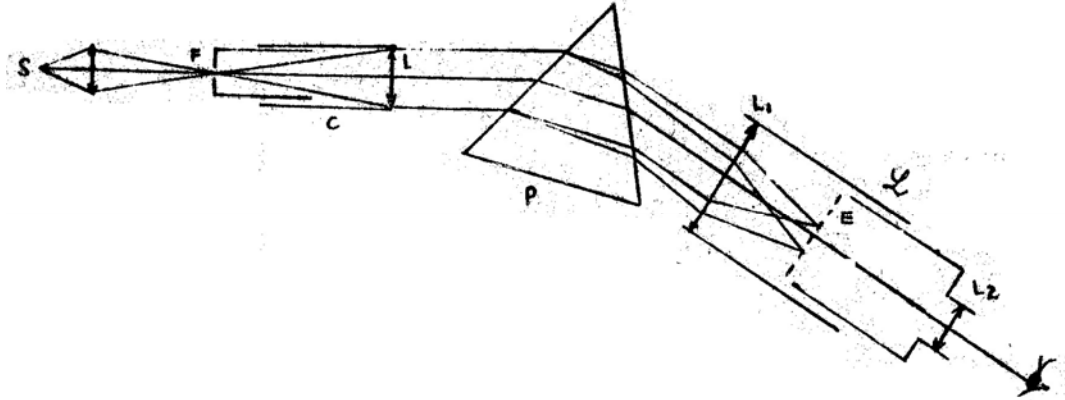
Hiện tượng tán sắc khác thường xảy ra khi bước sóng ở trong vùng hấp thụ mạnh ($\lambda_o \sqrt{1-G} < \lambda < \lambda_o \sqrt{1+G}$). Trong vùng này n tăng khi λ tăng.

SS.7 . KÍNH QUANG PHỔ.

Quang cụ dùng để phân tích một ánh sáng tạp thành quang phổ (gồm các đơn sắc) gọi là kính quang phổ.

a. Kính quang phổ có lăng kính.

Một kính quang phổ có 3 bộ phận chính :



H.9

- Ống chuẩn trực C
- Bộ phận tán sắc là lăng kính P
- Kính nhòm L

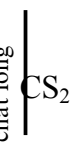
* Ống chuẩn trực:

Gồm một khe F (thẳng góc với mặt phẳng của hình vẽ) có thể điều chỉnh bề rộng được, được chiếu sáng bởi nguồn sáng S mà ta muốn khảo sát quang phổ. Khe F trở thành một khe sáng, được để ở vị trí mặt phẳng tiêu của một thấu kính L tiêu sắc. Như vậy, ống chuẩn trực cho một chùm tia sáng tạp song song, chiếu tới lăng kính P.

* Bộ phận tán sắc:

Trong loại máy này là một lăng kính. Tùy theo phạm vi bước sóng mà ta cần khảo sát, ta dùng lăng kính làm bằng các chất khác nhau :

Môi trường	: nD	Phạm vi sử dụng	Đặc tính
thủy tinh	Flint nhẹ	0,3 μ \rightarrow 3 μ	- Tán sắc mạnh, hấp thụ tia tử ngoại gần dải hấp thụ ở 2,9 μ
	Flint nặng	0,4 μ \rightarrow 2,5 μ	
	SiO ₂ đúc	0,185 μ \rightarrow 3,5 μ	
tinh thể	CaF ₂ (fluorin)	0,14 μ \rightarrow 8 μ	vùng hồng ngoại < 23 μ
	KCl (sylvin)	1,490	
	KBr	1,559	
	CsI	1,788	
		15 μ \rightarrow 27 μ	vùng hồng ngoại

chất lỏng  CS_2	1,629	$< 50($ $0,22\mu \rightarrow 5,8\mu$	- Tán sắc mạnh. Dải hấp thụ ở vùng tử ngoại gần.
--	-------	---	---

n_D là chiết suất ứng với vạch D của Na.

Khi sử dụng, lăng kính được đặt ở vị trí có độ lệch cực tiểu đối với bức xạ trung bình của vùng ánh sáng khảo sát. Đây là vị trí tốt nhất cho việc khảo sát.

- Kính nhòm : Quang phổ được quan sát nhờ một kính nhòm L. Ánh sáng bị tán sắc (khi ló ra khỏi lăng kính) được hội tụ lên mặt phẳng tiêu E của thấu kính L1. Vì các đơn sắc lệch khác nhau khi đi qua lăng kính nên vị trí các màu trên mặt phẳng E lệch nhau, tạo thành quang phổ. Ta quan sát nhờ một vật kính L2.

Nếu muốn chụp hình quang phổ, ta có thể đặt một phim ảnh ở vị trí mặt phẳng E. Trong trường hợp này, ta có một máy quang phổ ký : Quang phổ ký đặc biệt cần thiết khi ta khảo sát quang phổ tử ngoại, là vùng bước sóng mà mắt không thể quan sát được.

Các máy quang phổ cho ta biết ngay trị số các bước sóng, nhờ một bảng đo mẫu có sẵn trong máy, được gọi là các quang phổ kế.

* NĂNG SUẤT GIẢI CỦA KÍNH QUANG PHỔ LĂNG KÍNH.

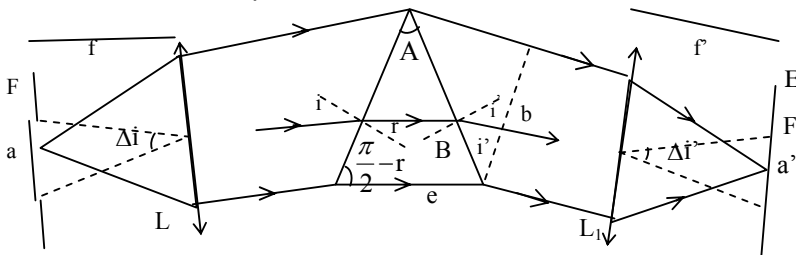
Xét hai bước sóng $(\lambda$ và $(\lambda'$ ($\lambda' = \lambda + d$) (phát ra từ khe sáng F. Ứng với mỗi bước sóng $(\lambda$ và $(\lambda'$ ta có một ảnh trên mặt phẳng E. Một kính quang phổ có năng suất giải càng cao nếu ta thể phân biệt được hai ảnh (ứng với $(\lambda$ và $(\lambda'$) với d (càng nhỏ).

1. Ảnh hưởng của bề rộng khe sáng F.

Giả sử khe F có bề rộng a , ảnh F' trên màn E của khe F có bề rộng a' . Vì lăng kính ở vị trí có độ lệch cực tiểu nên độ biến thiên của góc tới (i (khi xét từ mép này tới mép kia của khe F) và độ biến thiên của góc ló (i' (xét từ mép này tới mép kia của khe F')) phải bằng nhau. Ta có :

$$\Delta i = \Delta i' \text{ hay } \frac{a}{f} = \frac{a'}{f'}$$

f và f' là tiêu cự của các thấu kính L và L1.



Nếu khe F khá rộng thì bề rộng a' của ảnh hình học F' lớn hơn bề rộng của ảnh nhiễu a . Do đó ảnh F' sáng đều. Gọi $(D$ là độ biến thiên của độ lệch ứng với các bước sóng $(\lambda$ và $(\lambda + \Delta\lambda$), hay ứng với các chiết suất n và $n + \Delta n$. Điều kiện để ta phân biệt được hai ảnh ứng với hai bước sóng là hai ảnh này không lấn lên nhau nghĩa là ta phải có điều kiện

$$f' \cdot \Delta D > a'$$

suy ra $f \cdot \Delta D > a$

Cũng trong điều kiện độ lệch cực tiểu của lăng kính, ta có :

$$\frac{\Delta D}{\Delta n} = 2 \frac{tgi}{n}$$

do đó : \hat{c}

Vậy điều kiện giới hạn về bề rộng của khe sáng F để có thể phân biệt được hai ảnh ứng với hai bước sóng cách nhau ($\Delta\lambda$) là :

$$a = 2f.tgi \frac{\Delta n}{n} \quad (4.29)$$

Nhận xét công thức (4.29), ta thấy nếu tiêu cự f của thấu kính chuẩn trực L càng nhỏ thì bề rộng a của khe sáng F phải càng bé. Ngược lại muốn mở rộng khe F để quang thông tới lăng kính tăng lên thì phải tăng tiêu cự f.

2. Ảnh hưởng của hiện tượng nhiễu xạ.

Trong trường hợp khe F khá nhỏ, ta chỉ cần để ý tới hiện tượng nhiễu xạ khi khảo sát năng suất giải của kính quang phổ. Thiết diện của lăng kính đóng vai trò của hổng nhiễu xạ. Gọi b là bề rộng của chùm tia ló ra khỏi lăng kính, B là bề rộng mặt ra của lăng kính, e là chiều dài lớn nhất ánh sáng đi qua lăng kính (trong trường hợp hình vẽ 4.10 chính là bề rộng của đáy lăng kính).

Ta có : \hat{c} và \hat{c}

Ngoài ra, ta có :

$$\frac{dD}{dn} = \frac{\sin A}{\cos i' \cdot \cos r} = \frac{e}{b}$$

hay $dD = \frac{e}{b} dn$

Ta có thể coi ảnh nhiễu xạ trên màn E, ứng với một bước sóng (λ), như gây ra bởi một hổng có bề rộng b. Một nửa bề rộng của ảnh nhiễu xạ tính theo góc là \hat{G}

Góc \hat{G} (chính là giới hạn để ta có thể phân biệt được hai ảnh nhiễu xạ ứng với hai bước sóng (λ và $\lambda + \Delta\lambda$))

Vậy ta phải có : $dD \geq \Delta\lambda$

hay $\frac{e}{b} dn \geq \frac{\lambda}{b}$
 $edn \geq \lambda$

Năng suất giải của kính quang phổ được định nghĩa là :

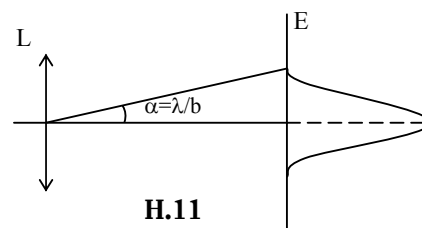
\hat{c} Vậy \hat{c} (7.1)

Năng suất giải R càng lớn thì ta càng có khả năng phân biệt được hai ảnh nhiễu xạ ứng với hai bước sóng có độ lệch $\Delta\lambda$ (càng nhỏ).

Công thức (7.1) được gọi là công thức Lord Rayleigh. Theo công thức này, ta thấy năng suất giải của kính quang phổ chỉ tùy thuộc vào lăng kính.

Tỷ số \hat{G} được gọi là độ tán sắc của kính quang phổ.

Ta cũng cần lưu ý : Khi đề cập tới sự phân biệt hai ảnh, nếu ta trực tiếp quan sát bằng mắt, thì ngoài tiêu chuẩn của Lord Rayleigh về sự phân biệt hai ảnh nhiễu xạ, ta cần xét tới năng suất phân ly của mắt.

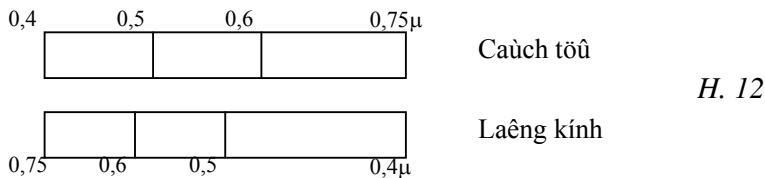


B. KÍNH QUANG PHỔ DÙNG CÁCH TỬ.

Sự cấu tạo của loại kính quang phổ này tương tự kính quang phổ dùng lăng kính, chỉ khác bộ phận tán sắc là một cách tử thay cho lăng kính.

Như ta đã biết khi khảo sát cách tử, với loại kính quang phổ dùng cách tử, ta được nhiều quang phổ. Các quang phổ này tán sắc càng mạnh khi bậc của nó càng lớn. Khác với quang phổ cho bởi lăng kính, với cách tử, độ lệch của tia sáng càng lớn nếu bước sóng càng lớn. Do đó tia đỏ lệch nhiều nhất, tia tím lệch ít nhất. Trong trường hợp đặc biệt, nếu chùm tia tới thẳng góc với cách tử và khi xét các góc nhiễu xạ nhỏ thì độ lệch của tia sáng tỷ lệ với bước sóng.

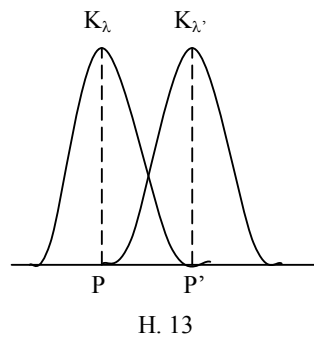
Ngoài ra, sự phân bố các màu trong quang phổ cách tử, so với bước sóng, đều đặn hơn quang phổ lăng kính như ta đã thấy trong (hình vẽ 12).



Với kính quang phổ cách tử, người ta được những quang phổ tán sắc khá mạnh so với quang phổ lăng kính.

* NĂNG SUẤT GIẢI CỦA KÍNH QUANG PHỔ CÁCH TỬ.

Trong chùm tia sáng đi qua cách tử, ta xét hai bức xạ ứng với hai bước sóng λ và λ' ($\lambda' = \lambda + d$). Với hai bước sóng này, ta được hai hệ thống vân lệch nhau một chút. Theo tiêu chuẩn Lord Rayleigh, ta phân biệt được hai hệ thống vân nếu cực đại thứ K của λ' ($K(\lambda')$) gần nhất là trùng với cực tiểu đầu tiên cạnh cực đại thứ K của λ ($K(\lambda)$).



Tại điểm P, ta có cực đại thứ K ứng với bước sóng λ , vậy hiệu quang lộ của hai chùm tia đi qua hai khe liên tiếp của cách tử là

$$\delta_P = K\lambda$$

- Tại P', ta có cực đại thứ K của bước sóng λ' vậy :

$$\delta_{P'} = K\lambda' = K(\lambda + d\lambda)$$

Ngoài ra, P' cũng là vị trí của cực tiểu đầu tiên cạnh cực đại thứ K của bước sóng λ , nên ta có :

$$\delta_{P'} = K\lambda + \frac{\lambda}{N}$$

N là tổng số khe của cách tử

Vậy $K(\lambda + d) = K(\lambda + G)$

Suy ra $\frac{\lambda}{d\lambda} = KN$

được định nghĩa là năng suất giải R của cách tử

$$R = \frac{\lambda}{d\lambda} = KN$$

Vậy năng suất giải của kính quang phổ cách tử càng lớn nếu ta xét quang phổ có bậc K càng lớn.

SS.8. CÁC LOẠI PHỔ.

* Quang phổ phát xạ.

1. Phổ liên tục:

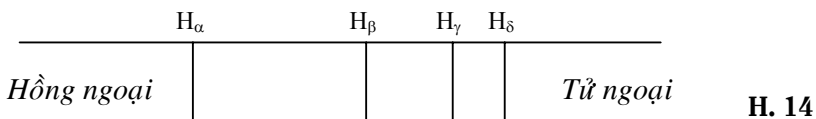
Một phổ liên tục chứa tất cả các bức xạ với các bước sóng ở trong một khoảng hạn nào đó. Trong quang phổ này, các màu biến thiên một cách liên tục.

Quang phổ mặt trời là một thí dụ gần đúng về phổ liên tục từ tím tới đỏ nếu ta bỏ qua các vạch hấp thụ Fraunhofer. Ta cũng có các phổ liên tục cho bởi các chất rắn hay chất lỏng bị kích thích bởi nhiệt (nung nóng).

2. Quang phổ vạch.

Gồm nhiều vạch rời nhau. Mỗi vạch là một đơn sắc. Thường các vạch không phân bố đều trên toàn bề rộng của quang phổ.

Thí dụ : quang phổ hydrogen cho bởi ông Geissler gồm 4 vạch trong vùng trông thấy được gọi là H_α, H_β, H_γ, H_δ



Các vạch H_α, H_β, H_γ, H_δ lần lượt có bước sóng 6563Å, 4861Å, 4340Å, 4102Å.

Quang phổ cho bởi ngọn lửa Natrium gồm một vạch kép D gồm hai vạch rất gần nhau ứng với các bước sóng 5890Å và 5896Å. Nếu ta thực hiện thí nghiệm với nhiều muối khác nhau của Na, ta thấy vị trí của các vạch D không thay đổi trong quang phổ. Như vậy các vạch này đặc trưng cho nguyên tố Natrium, đó là phổ của nguyên tử Natrium sau khi phân ly khỏi muối của nó. Người ta thừa nhận rằng tất cả các quang phổ vạch đều là quang phổ sinh ra bởi các nguyên tử của các nguyên tố khác nhau.

3. Quang phổ dải.

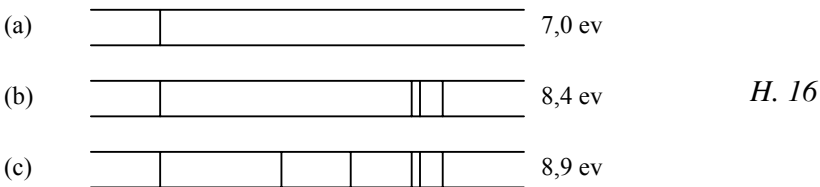
Gồm nhiều dải sáng màu, một cạnh rõ nét, cạnh kia mờ dần.



Nhưng nếu ta dùng một kính quang phổ có độ tán sắc mạnh hơn thì ta thấy các dải bị phân ly thành vô số vạch. Các vạch này gần nhau ở về phía cạnh rõ nét và càng xa nhau khi đi về phía cuối dải.

Quang phổ dải sinh ra bởi các phân tử. Thực vậy ta được quang phổ dải khi nguồn phát xạ là các khí đa nguyên tử khi các điều kiện kích thích không làm phân ly khí đó. Thí dụ quang phổ cho bởi ống Geissler chứa khí nitrogen. Nếu sự kích thích mạnh khiến các phân tử bị phân ly thành các nguyên tử thì ta lại được quang phổ vạch. Ta có thể kiểm nhận điều này bằng cách khảo sát quang phổ nitrogen khi kích thích bằng tia lửa điện, là một cách kích thích mạnh làm phân ly các phân tử N₂ thành các nguyên tử N.

Như vậy, ta thấy sự cấu tạo của một quang phổ phát ra bởi một nguồn phát xạ thay đổi theo điều kiện kích thích (nhiệt độ, áp suất, hiệu thế điện,). Ở đây ta không đề cập tới cơ cấu của sự phát xạ, cho nên không đi sâu vào vấn đề này, tuy nhiên cũng nêu một thí dụ cho thấy sự thay đổi về thành phần quang phổ do sự thay đổi điều kiện kích thích nguồn phát xạ. Trong trường hợp phát xạ do bởi thủy ngân gây ra bởi sự bắn phá bằng một chùm điện tử. Sự cấu tạo của quang phổ thay đổi theo năng lượng electron kích thích. Các hình 4.16a, 4.16b, 4.16c là các phổ phát xạ bởi Hg ứng với năng lượng của electron kích thích lần lượt là 7,0 eV, 8,4 eV, 8,9 eV.



* QUANG PHỔ HẤP THỤ.

Đội một chùm tia sáng đi qua một chất A, giả sử dùng ánh sáng trắng. Chùm tia ló ra được cho đi qua một kính quang phổ. Nếu chất A không có tính hấp thụ đối với các bước sóng của ánh sáng tới thì ta vẫn quan sát một quang phổ liên tục từ đỏ tới tím. Nếu chất A có tính hấp thụ đối với một số bước sóng trong ánh sáng tới, thì khi quan sát, trên nền của phổ liên tục, ta thấy những vạch đen hay dải đen ở vị trí của các bước sóng bị hấp thụ. Quang phổ với những vạch đen hay dải đen được gọi là quang phổ hấp thụ của chất A.

Thí dụ : quang phổ mặt trời đúng ra là quang phổ hấp thụ. Những vạch hấp thụ được gọi là vạch Fraunhofer, ở vị trí các bước sóng bị lớp khí áp suất yếu xung quanh mặt trời (gọi là lớp chromosphere) và lớp khí quyển bao quanh trái đất hấp thụ (7594A, 6867A, 6563A, 6893A).

* ĐỊNH LUẬT KIRCHHOFF.

Trong khi khảo sát các quang phổ hấp thụ của các chất khác nhau, người ta nhận xét được một điều quan trọng là: chính những bức xạ hiện diện trong quang phổ phát xạ lại là những bức xạ bị hấp thụ trong quang phổ hấp thụ.

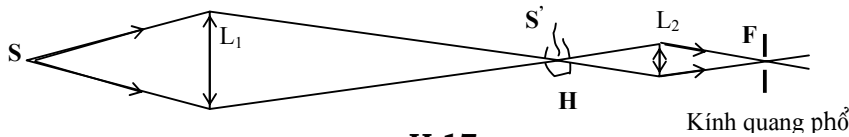
Kirchhoff đã nêu định luật sau :

Một vật chỉ có thể phát ra những bức xạ mà nó có thể hấp thụ trong cùng một điều kiện.

- Kiểm chứng :

Ta đã biết ngọn lửa Na (bằng cách bỏ vài hạt muối vào ngọn lửa đèn cồn) phát ra các vạch 5890A và 5896A. Theo định luật Kirchhoff, ngọn lửa Na cũng phải hấp thụ các bước sóng trên.

Thực vậy, ta xếp đặt một thí nghiệm như hình vẽ 4.17.



H 17

S là một đèn điện dây tóc cho một quang phổ liên tục. Nếu tại S' ta đặt một ngọn lửa Na thì qua kính quang phổ ta thấy trên nền quang phổ liên tục của đèn điện S xuất hiện 2 vạch đen tại vị trí của các bước sóng 5890Å và 5896Å. Thực ra, hai vạch này không hoàn toàn đen, vì mặc dù ngọn lửa S' hấp thụ các bước sóng trên của ngọn đèn S nhưng chính S' lại phát ra hai đơn sắc này. Nhưng cường độ sáng của các bức xạ phát ra bởi S' yếu hơn cường độ sáng của các bức xạ còn lại trên quang phổ liên tục phát ra bởi S nên ta nhìn thấy hai vạch như đen.

Hiện tượng trên được gọi là hiện tượng đảo vạch quang phổ.

SS.9. VẬN TỐC PHA - VẬN TỐC NHÓM.

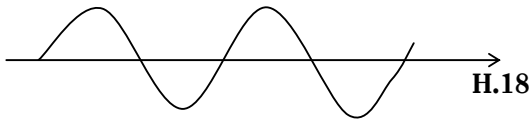
Ta trở lại phương trình chấn động của một sóng phẳng điều hòa. Chấn động phát ra từ nguồn giả sử có dạng :

$$s_0 = a \cos \omega t$$

Nếu v là vận tốc truyền của sóng, phương trình chấn động tại một điểm M trên phương truyền Ox, cách nguồn chấn động một đoạn x là :

$$S = a \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right)$$

với (t ã) là pha của chấn động



Xét một điểm M mà pha có một trị số là K.

$$\omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = K$$

suy ra t ã = hằng số

hay x = vt + hằng số

Như vậy ta thấy v chính là vận tốc truyền của các điểm có pha không thay đổi. Vì vậy v được gọi là vận tốc pha.

Thực ra, không bao giờ có một sóng điều hòa như trên truyền vô tận trong không gian và thời gian, mà trong thực tế, các sóng ta khảo sát là chồng chất của nhiều sóng điều hòa. Trước hết ta xét trường hợp đơn giản : sự chồng chất của hai sóng có cùng biên độ a, chu kỳ hơi khác T và T'. Phương trình của hai sóng là :

$$S_1 = a \cos \omega \left(t - \frac{x}{v} \right) = a \cos 2\pi(vt - kx) \quad \text{vôùi } k = \frac{1}{\lambda}$$

$$S_2 = a \cos \omega' \left(t - \frac{x}{v'} \right) = a \cos 2\pi(v't - k'x) \quad \text{vôùi } k' = \frac{1}{\lambda'}$$

Chấn động tổng hợp là :

$$S = S_1 + S_2 = 2a \cos 2\pi \left(\frac{v' - v}{2} t - \frac{k' - k}{2} x \right) \cos 2\pi \left(\frac{v' + v}{2} t - \frac{k' + k}{2} x \right) \text{ vì } v' \approx v, \text{ và } k' \approx k, \text{ nên ta}$$

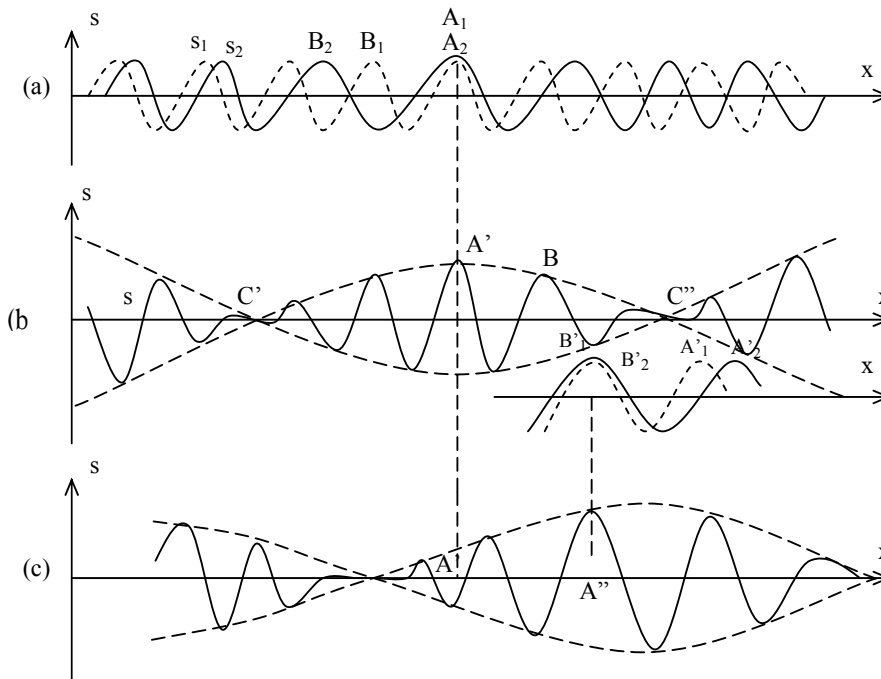
coù theỏ cho $\frac{v' + v}{2} \approx v, \frac{k' + k}{2} \approx k$

Vây

Ta thấy biên độ A của sóng tổng hợp thay đổi theo hoành độ x và thời gian t

$$A = 2a \cos 2\pi \left(\frac{\Delta v}{2} t - \frac{\Delta k}{2} x \right)$$

Sự hợp của hai sóng điều hòa như trên được biểu diễn bằng hình vẽ 4.19



H. 19

Nếu chỉ có bước sóng (, ta có chấn động sin s1; Nếu chỉ có bước sóng (', ta có chấn động sin s2; Nếu có cả hai bước sóng (và (', ta có chấn động tổng hợp s với bước sóng là A'B và có biên độ thay đổi một cách tuần hoàn : cực đại tại A', triệt tiêu tại C', C'', ...

Pha của sóng tổng hợp là $2\pi((t - kx))$. Muốn tính vận tốc truyền pha (vận tốc pha) ta cho $2\pi((t - kx) = \text{hằng số}$.

Suy ra $x = vt + \text{hằng số}$

Vây vận tốc truyền pha của sóng tổng hợp là

$$v = \frac{v}{k} = \lambda v$$

(9.1)

Đoạn sóng C'C'' được gọi là một nhóm sóng. Vận tốc truyền v đi của nhóm sóng được gọi là vận tốc nhóm. Giả sử hình 19a biểu diễn các chấn động vào thời điểm t. Khi đó các cực đại A1, A2 trùng nhau. Hình 19b biểu diễn chấn động tổng hợp s vào cùng thời điểm có biên độ cực đại ở A'. Vào thời điểm t' = t + (, sóng s1 truyền được một đoạn v(, sóng s2 truyền được một đoạn v'(. Nếu thời gian (thích hợp để có hiệu số v' - v(= (v' - v) (= (' - (thì các cực đại B'1 và B'2 (từ B1 và B2 đến) sẽ trùng nhau. Nhóm sóng di chuyển được một đoạn là A'A'' =

v. (Ta thấy vận tốc nhóm V là vận tốc truyền của biên độ và có trị số khác với vận tốc pha v. Xét sự truyền của một biên độ xác định. Ta có :

chăng số

suy ra chăng số

x là đoạn di chuyển của biên độ nói trên ứng với thời gian t, vận tốc truyền biên độ là $\frac{\Delta v}{k}$ hay $\frac{dv}{dk}$

$$\boxed{V = \frac{dv}{dk}} \quad (9.2)$$

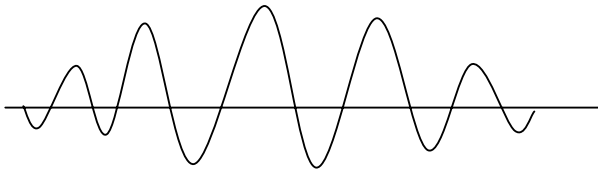
Mà ta có : $\omega = \tilde{G}$

Suy ra
$$V = v + k \frac{dv}{dk}$$

Hay
$$\boxed{V = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}}$$

Tùy theo dấu của \tilde{G} , vận tốc nhóm V có thể lớn hay nhỏ hơn vận tốc pha v.

Ở trên ta đã xét trường hợp chồng chất hai sóng điều hòa để giản dị hóa vấn đề. Các sóng mà ta khảo sát trong thực tế được coi là tổng hợp của nhiều sóng. Trong trường hợp này, ta chứng minh được với sự gần đúng, sóng tổng hợp chỉ có biên độ khác không trong một khoảng không gian nhỏ. Ta gọi sóng tổng hợp này là một bó sóng.



Vận tốc pha và vận tốc nhóm của bó sóng là :

$$v = \frac{v_0}{k_0}$$

$$V = \left(\frac{dv}{dk} \right)_{k_0}$$

(ω_0 là tần số trung bình của các sóng điều hòa tổng hợp thành bó sóng, $k_0 = \tilde{G}$)

Ta nhận xét vận tốc nhóm chỉ bằng vận tốc pha khi $\tilde{G} = 0$, nghĩa là với các môi trường không tán sắc (vận tốc truyền pha không phụ thuộc bước sóng).

Chương VI

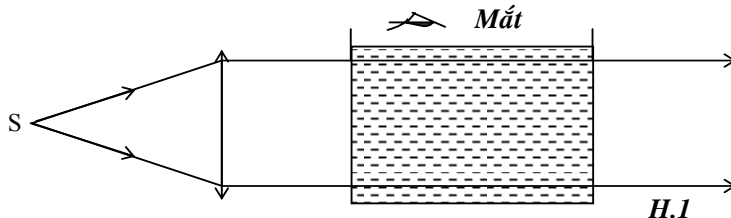
SỰ TÁN XẠ ÁNH SÁNG

§§1. HIỆN TƯỢNG TÁN XẠ ÁNH SÁNG.

Quan sát một chùm tia sáng rơi vào một phòng tối. Nếu không khí trong phòng thật sạch, ta không thấy được đường đi của chùm tia sáng. Điều đó chứng tỏ ánh sáng chỉ truyền theo phương quang hình. Nhưng nếu trong phòng có vẫn các hạt bụi nhỏ thì ta nhìn thấy được đường đi của chùm tia sáng chiếu vào phòng nhờ những hạt bụi nhỏ, trở thành những hạt sáng, bên trong chùm tia. Điều này chứng tỏ rằng trong một môi trường vẫn có lẫn các hạt nhỏ không đồng tính (về quang học) với môi trường, ngoài phần ánh sáng truyền đi theo phương tới, còn một phần ánh sáng truyền theo các phương khác. Hiện tượng này gọi là sự tán xạ ánh sáng.

Ta cũng có hiện tượng tán xạ trong các môi trường vẫn ở thể lỏng, và ngay cả trong trường hợp tinh thể.

Ta có thể thực hiện một thí nghiệm đơn giản như sau :

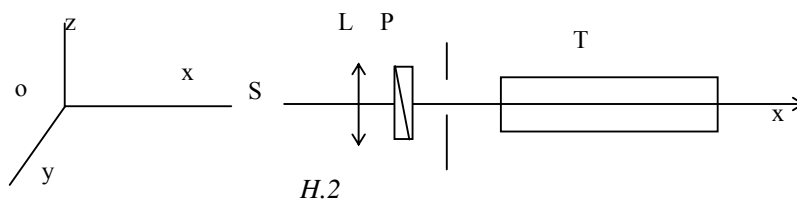


Rơi một chùm tia sáng song song qua một chậu nước yên tĩnh. Nếu nước thật sạch thì mắt đặt ở vị trí, giả sử như hình vẽ 1, không nhìn thấy đường đi của chùm tia sáng qua nước. Nhỏ vào chậu nước vài giọt nước hoa, nước trong chậu C trở thành một môi trường vẫn và mắt nhìn thấy rõ đường đi của chùm tia sáng qua chất lỏng. Vậy môi trường đã tán xạ ánh sáng.

Hiện tượng tán xạ ánh sáng bởi các hạt nhỏ (so với bước sóng) trong một môi trường đồng tính về quang học được gọi là hiện tượng Tyndall; Tyndall khảo sát thực nghiệm (1868) và Hayleigh khảo sát về lý thuyết (1871).

§§2. SỰ TÁN XẠ BỞI CÁC HẠT NHỎ SO VỚI BƯỚC SÓNG – HIỆN TƯỢNG TYNDALL.

Ta khảo sát hiện tượng tán xạ ánh sáng bởi môi trường vẫn với ánh sáng tự nhiên hoặc ánh sáng phân cực. Thí nghiệm được thiết trí như hình vẽ 2.

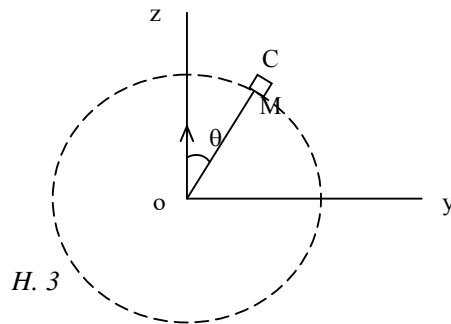


Ống T chứa môi trường tán xạ ánh sáng. Giả sử các hạt tán xạ là những hạt điện môi, không màu, trong suốt, đồng chất và có dạng hình cầu, kích thước nhỏ so với các bước sóng

khảo sát. Mắt quan sát theo phương Oy. Ánh sáng khuếch tán có màu xanh nhạt, trong khi ánh sáng tới là ánh sáng trắng.

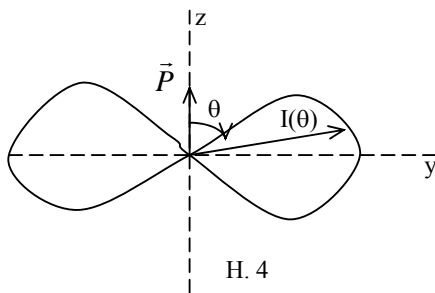
Quay kính phân cực P xung quanh phương Ox, ta thấy cường độ ánh sáng tán xạ qua một cực tiểu gần như triệt tiêu khi phương chấn động của ánh sáng tới song song với phương quan sát Oy và qua một cực đại khi phương chấn động tới song song với phương Oz.

Ngược lại, ta có thể giữ cố định phương chấn động của ánh sáng tới, thí dụ theo phương Oz và thay đổi phương quan sát OM trong mặt phẳng thẳng góc với phương truyền Ox của chùm tia tới thì ta thấy khi phương quan sát OM song song với phương Oy, cường độ ánh sáng tán xạ cực đại; Khi phương quan sát OM trùng với phương Oz, cường độ ánh sáng tán xạ triệt tiêu.



Vậy không có ánh sáng tán xạ theo phương của chấn động tới. Ngoài ra, quan sát bằng một nicol phân tích, ta thấy ánh sáng tán xạ cũng là ánh sáng phân cực thẳng.

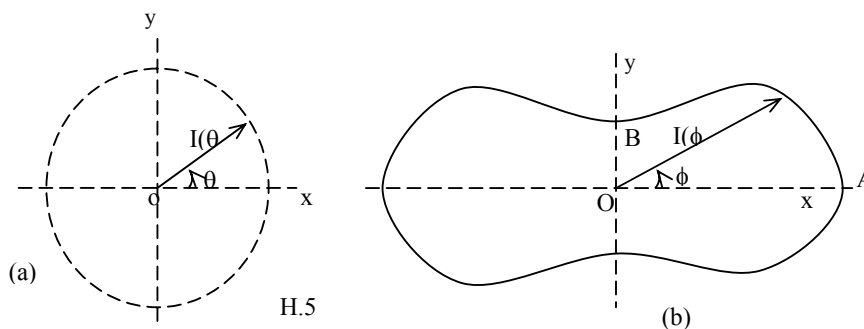
Nếu ta đo cường độ ánh sáng khuếch tán I tại mỗi vị trí M bằng một tế bào quang điện C và vẽ đường biểu diễn sự biến thiên của I theo góc θ ta được đường cong có dạng như hình vẽ h.4.



- Bây giờ dùng ánh sáng tới là ánh sáng tự nhiên (bỏ kính phân cực P ra). Vì ánh sáng chỉ truyền được chấn động ngang nên ánh sáng tán xạ theo phương quan sát OM vẫn là ánh sáng phân cực toàn phần. Phương chấn động thẳng góc với OM. Nếu phương tán xạ không thẳng góc với Ox, ánh sáng tán xạ chỉ phân cực một phần. Ngoài ra, vì sự phân bố đối xứng các chấn động thẳng trong mặt phẳng YOZ xung quanh phương truyền Ox

của ánh sáng tự nhiên, ta thấy cường độ ánh sáng tán xạ trong trường hợp này không thay đổi khi quay phương quan sát OM trong mặt phẳng YOZ.

- Trong thí nghiệm ở hình vẽ 2, ta để ống T thẳng đứng, nghĩa là cho trục của ống song song với trục Oz. Đo cường độ ánh sáng khuếch tán theo các phương thẳng góc với trục Oz. Nếu ánh sáng tới là ánh sáng phân cực chấn động theo phương Oz thì cường độ ánh sáng khuếch tán I không đổi khi phương quan sát OM quay xung quanh O trong mặt phẳng XOY. Nếu ánh sáng tới là ánh sáng tự nhiên thì cường độ I thay đổi theo góc (như hình vẽ 5b với $OA = 2OB$).



§§3. ĐỊNH LUẬT RAYLEIGH.

- Cường độ ánh sáng tán xạ I tỷ lệ nghịch với lũy thừa bậc 4 của bước sóng ánh sáng

$$I = \frac{K}{\lambda^4}$$

K là một hằng số đối với bước sóng (λ).

Theo định luật này bước sóng càng nhỏ thì ánh sáng khuếch tán có cường độ càng lớn. Chính vì vậy khi cho ánh sáng trắng đi qua môi trường tán xạ và quan sát ánh sáng tán xạ, ta thấy màu xanh nhạt.

Định luật này được giải thích như sau : Xét một điểm M của thể tích vi cấp v trong môi trường tán xạ. Giả sử phương trình chấn động của ánh sáng tới tại điểm M là $A \cos(\omega t)$. Theo lý thuyết về nhiễu xạ thì thể tích vi cấp v đóng vai trò của một nguồn thứ cấp đồng pha với chấn động tới. Chấn động từ nguồn thứ cấp này truyền tới một điểm P cách M một khoảng r là

$$y = k \frac{A}{r} \cdot v \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi r}{\lambda}\right)$$

Hệ số k tùy thuộc góc mà phương MP làm với phương của tia tới, tính chất của hạt tán xạ, mật độ các hạt tán xạ, bước sóng (λ) của ánh sáng.

$k \cdot \frac{A}{r} \cdot v$ chính là biên độ chấn động của ánh sáng. Vậy phải cường độ ánh sáng vôn là A . Do đó $\frac{kv}{r}$ không có thứ nguyên (hay có thứ nguyên bằng 1 : $\tilde{G} = 1$), suy ra thứ nguyên của k là nghịch đảo của chiều dài bình phương \tilde{G} . Rayleigh chứng tỏ được rằng hệ số k tỷ lệ nghịch với (λ^2) .

$$k = \frac{k_0}{\lambda^2}$$

Vậy biên độ của chấn động tán xạ có thể viết là :

$$a = k \cdot \frac{A}{r} \cdot v = k_0 \cdot \frac{A}{r} \cdot v \cdot \frac{1}{\lambda^2}$$

Cường độ chấn động tán xạ là :

$$I = a^2 = \left[k_0 \cdot \frac{A}{r} \cdot v \right]^2 \frac{1}{\lambda^4} = \frac{K}{\lambda^4}$$

§§4. THUYẾT ĐIỆN TỪ VỀ SỰ TÁN XẠ BỞI CÁC HẠT NHỎ.

Xét các hạt tán xạ trong môi trường. Điện trường xoay chiều \vec{E} của sóng ánh sáng khi truyền qua môi trường làm dời chỗ các điện tích bên trong mỗi hạt khiến các hạt trở thành phân cực, tạo thành một lưỡng cực điện có moment \vec{p} . Nếu kích thước của hạt nhỏ so với bước sóng thì vào mỗi thời điểm, trong thể tích v của hạt, ta có thể coi như có một điện trường đều. Moment \vec{p} có trị số tỷ lệ với điện trường E và thể tích v . Ta có thể đặt

$$P = \alpha \cdot vE$$

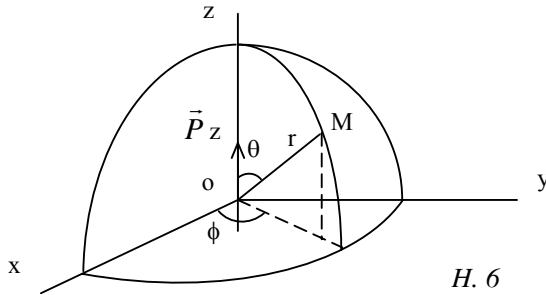
Hệ số tỷ lệ (tùy thuộc bản chất của hạt).

Giả sử điện trường \vec{E} có dạng $E = E_m \cos(\omega t)$, moment P sẽ có dạng

$$P = P_m \cos(\omega t) \quad \text{với} \quad P_m = (\alpha \cdot v) E_m$$

Lưỡng cực điện hình sin này sẽ phát xạ một sóng thứ cấp có mạch số (và bước sóng). Giả sử Oz là phương của điện trường \vec{E} , đồng thời là phương của moment \vec{p} đặt tại O. Tại một điểm M cách O một đoạn r , điện trường của sóng thứ cấp tính được là :

$$E' = -\frac{\pi \sin \theta}{\epsilon_0 \lambda^2 r} P_m \cos \omega \left(t - \frac{r}{c} \right) = E'_m \cos(\omega t - kr) \quad (4.1)$$



H. 6

Trong đó θ là góc hợp bởi các phương Oz và OM.

Năng lượng truyền theo phương OM, qua một đơn vị diện tích tại M trong một đơn vị thời gian được tính theo công thức :

$$I = \frac{\epsilon_0 C E_m^2}{2} = \frac{4 P_m^2}{32 \pi^2 \epsilon_0 \cdot c^3 r^2} \sin^2 \theta$$

$$\text{hay} \quad I = \frac{\omega^4 \alpha^2 v^2}{32 \pi^2 \epsilon_0 \cdot c^3 r^2} E_m^2 \sin^2 \theta$$

Sóng thứ cấp phát ra bởi lưỡng cực điện là sóng tán xạ mà ta khảo sát và ta thấy I , theo định nghĩa, chính là cường độ ánh sáng tán xạ theo phương OM.

Ta có thể đặt I dưới dạng

$$I = C E_m^2 \sin^2 \theta \quad (4.2)$$

với $C =$ hằng số, \hat{c}

Theo công thức (4.2) ta thấy cường độ ánh sáng tán xạ thay đổi theo góc tán xạ θ . Xét trong mặt phẳng yOz , vẽ đường biểu diễn biến thiên của I theo θ , ta được một đường có dạng như đường cong thực nghiệm trong hình 4.

- Khi ta quan sát theo phương OM thì ánh sáng tán xạ nhận được không phải từ một hạt duy nhất mà bởi vô số hạt, các hạt này phân bố hoàn toàn ngẫu nhiên trong thể tích được khảo sát của môi trường tán xạ. Do đó số hạng \hat{G} trong công thức (4.1) thay đổi một cách bất kỳ khi ta xét từ lưỡng cực điện này tới lưỡng cực điện khác. Nói cách khác, các sóng thứ cấp tới M không có một sự liên hệ nhất định về pha, đó là các sóng không điều hợp không liên kết. Vì vậy, cường độ sáng ta nhận được là tổng số các cường độ của các sóng thứ cấp.

Ngoài ra, biểu thức của I không tùy thuộc góc θ , phù hợp với hình vẽ 5a.

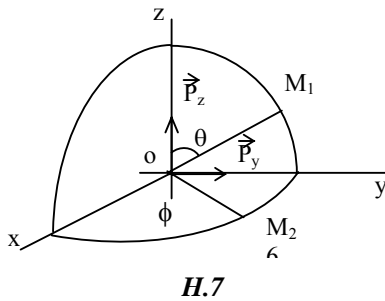
- Trường hợp ánh sáng tới là ánh sáng tự nhiên. Ta có thể coi như chấn động sáng có hai thành phần E_y và E_z độc lập với nhau, có biên độ bằng nhau và thỏa hệ thức :

$$E_{ym}^2 + E_{zm}^2 = \frac{1}{2} E_m^2$$

E_m^2 tỷ lệ với cường độ của ánh sáng tới.

Trước hết ta xét sự thay đổi cường độ ánh sáng tán xạ theo các phương trong mặt phẳng yOz

Các thành phần \hat{G}_y, \hat{G}_z gây ra các lưỡng cực điện \vec{P}_y, \vec{P}_z . Các lưỡng cực điện này phát xạ sóng thứ cấp. Xét phương tán xạ OM1 nằm trong mặt phẳng yOz (thẳng góc với phương tới). Các cường độ ánh sáng tán xạ phát ra bởi các lưỡng cực điện \vec{G} theo phương OM1, lần lượt là $CE_{ym}^2 \cos^2 \theta$ và $CE_{zm}^2 \sin^2 \theta$. Cường độ



H.7

tổng cộng theo phương OM1 là :

$$I = CE_{ym}^2 \cos^2 \theta + CE_{zm}^2 \sin^2 \theta = \frac{1}{2} CE_m^2$$

Vậy I = hằng số, phù hợp với kết quả trong thực nghiệm ta đã xét ở phần SS.2.

- Bây giờ xét sự biến thiên của cường độ ánh sáng tán xạ theo các phương thẳng góc với Oz, nghĩa là các phương nằm trong mặt phẳng xOy.

Cường độ ánh sáng tán xạ theo một phương OM2, hợp với Ox một góc ϕ , phát ra bởi các lưỡng cực điện \vec{P}_y, \vec{P}_z lần lượt là $CE_{ym}^2 \cos^2 \phi$, CE_{zm}^2 (góc $\theta = 90^\circ$).

Cường độ tổng cộng là :

$$I = CE_{ym}^2 \cos^2 \phi + CE_{zm}^2 = \frac{1}{2} CE_m^2 (1 + \cos^2 \phi)$$

Ta nhận xét \hat{G} chính là cường độ ánh sáng tán xạ theo phương Oy. Đặt \hat{G} . Vậy cường độ ánh sáng tán xạ theo một phương hợp với phương tới một góc ϕ (được tính bởi công thức :

$$I_\phi = I_\perp (1 + \cos^2 \phi) \quad (4.3)$$

Trong đó \hat{G} là cường độ tán xạ theo một phương bất kỳ thẳng góc với phương tới.

Vì lý do đối xứng, cường độ tán xạ theo một phương bất kỳ hợp với phương tới một góc ϕ (đều có cùng trị số I.

Công thức (4.3) phù hợp với kết quả thực nghiệm biểu diễn bởi hình vẽ 5b. Khi $\phi = 0$, OM2 trùng với Ox, $I_0 = 2 I_\perp$

- Xét hình vẽ 7, ta cũng thấy ngay, nếu phương tán xạ thẳng góc với phương tới Ox, ánh sáng tán xạ phân cực toàn phần, nếu phương tán xạ không thẳng góc với phương tới, thí dụ phương OM2 thì chấn động tán xạ truyền tới M2 gồm hai thành phần :

Thành phần E'_z phát ra bởi lưỡng cực điện \vec{G} , ứng với cường độ CE_{2zm} , thành phần E'_y phát ra bởi lưỡng cực điện \vec{G} , ứng với cường độ $CE_{2ym} \cos 2\theta$. (Đây là ánh sáng phân cực một phần).

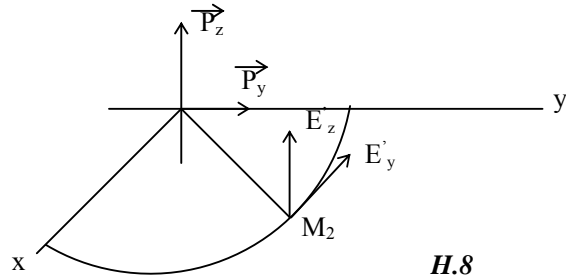
Ta cũng nhận xét :

$$I = CE_{2m}^2 \sin^2 \theta \quad \text{với} \quad C = \frac{\omega^4 \alpha^2 V^2}{32\pi^2 \epsilon_0 C^3 r^2}$$

mà \hat{c}

Ta tìm lại được định luật Rayleigh

$$I = \frac{K}{\lambda^4}$$



* TỶ SỐ LORD RAYLEIGH.

Từ định nghĩa về cường độ sáng của nguồn, ta thấy I_{\perp} là cường độ sáng của hạt tán xạ. Gọi N là số hạt tán xạ trong một đơn vị thể tích. Cường độ tán xạ của một đơn vị thể tích theo phương Oy ($\theta = 90^\circ$) khi ánh sáng tới là ánh sáng tự nhiên là:

$$J_{\perp} = NI_{\perp}^2 = \frac{N\alpha^2 V^2 \pi^2 \cdot c}{4\epsilon_0 \lambda^4} E_m^2$$

Cường độ của chùm tia tới trên mặt phẳng thẳng góc với Ox là :

$$\mathcal{E} = \frac{1}{2} \epsilon_0 \cdot c \cdot E_m^2$$

$$\text{Suy ra} \quad \mathfrak{R} = \frac{I_{\perp}}{\mathcal{E}} = N \cdot \frac{\pi^2 \alpha^2 v^2}{2\epsilon_0 \lambda^4} \quad (4.6)$$

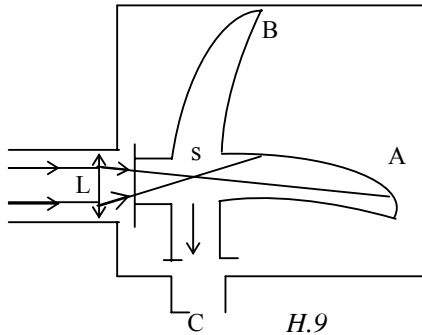
\mathfrak{R} được gọi là tỷ số Lord Rayleigh.

Trong các phần trên ta đã xét hiện tượng nhiễu xạ do các hạt lơ lửng trong một môi trường. Các kết quả đưa ra bởi Lord Rayleigh chỉ đúng với điều kiện: hạt có kích thước nhỏ so với bước sóng ánh sáng. Trong trường hợp hạt có kích thước lớn, các kết quả trên không còn đúng với thực nghiệm nữa. Ta xét một thí dụ đơn giản: khói thuốc lá có màu xanh là do sự khuếch tán ánh sáng do các hạt nhỏ carbon. Nhưng khói thuốc lá được thổi ra từ miệng lại có màu ngả sang trắng, vì các hạt khuếch tán trong trường hợp này lớn hơn, do các hạt hơi nước trong khí thổi ra từ miệng. Hiện tượng các hạt bụi sáng trong chùm tia nắng dọi vào phòng tối cũng là một trường hợp khuếch tán ánh sáng bởi các hạt có kích thước tương đối lớn.

§§5. SỰ TÁN XẠ PHÂN TỬ.

Thực ra, một môi trường hoàn toàn tinh chất, không có các hạt vẩn, vẩn khuếch tán ánh sáng. Tuy nhiên cường độ ánh sáng khuếch tán bởi các môi trường này rất yếu. Thí dụ với không khí tỷ số Lord Rayleigh $\mathfrak{R} = 0.25 \times 10^{-7}$ ứng với bước sóng 0,4 μ . Vì vậy, muốn đo được cường độ ánh sáng khuếch tán ta phải làm sao loại bỏ được các ánh sáng ký sinh.

Hình 9 là sơ đồ một loại dụng cụ để khảo sát hiện tượng tán xạ này. Môi trường tán xạ được chứa trong một ống chữ thập bằng thủy tinh có hai nhánh A và B uốn cong. Bên ngoài các nhánh bôi đen để hấp thụ ánh sáng không cho phản xạ trở lại gây khó khăn cho việc quan sát ánh sáng tán xạ. Mắt quan sát đặt ở cửa C của phòng tối.



Ta dùng các nguồn sáng khá mạnh như mặt trời hay hồ quang. Ánh sáng tới được thấu kính L hội tụ tại điểm S.

Các kết quả thí nghiệm cho thấy ánh sáng tán xạ có màu xanh. Cường độ tán xạ tỷ lệ nghịch với lũy thừa bậc 4 của bước sóng, tương tự hiện tượng Tyndall.

Để giải thích hiện tượng tán xạ này, người ta cho rằng chính các phân tử của môi trường tinh chất đã tán xạ ánh sáng. Vì vậy hiện tượng được gọi là tán xạ phân tử. Thật vậy, dù môi trường hoàn toàn tinh chất, không có các hạt lạ, nhưng do sự chuyển động nhiệt hỗn loạn của các phân tử, số phân tử N trong mỗi đơn vị thể tích không phải là một hằng số, mà có những thay đổi khi đi từ nơi này tới nơi khác, đưa đến sự thay đổi của chiết suất từ nơi này đến nơi khác trong môi trường. Nói cách khác, vào mỗi thời điểm, môi trường mặc dù hoàn toàn tinh chất, vẫn không hoàn toàn đồng tính về quang học, do đó vẫn tán xạ ánh sáng. Sự chuyển động nhiệt của các phân tử tùy thuộc vào nhiệt độ, do đó cường độ ánh sáng tán xạ phân tử cũng tùy thuộc nhiệt độ. Theo thực nghiệm và theo lý thuyết của Einsteins, cường độ ánh sáng tán xạ tỷ lệ với nhiệt độ tuyệt đối T của môi trường.

Nếu ánh sáng tới là ánh sáng tự nhiên và quan sát theo phương thẳng góc với tia tới, ta thấy ánh sáng tán xạ trong trường hợp tổng quát không phải là ánh sáng phân cực toàn phần. Tỷ số i/I (i = cường độ ứng với chấn động song song với tia tới, I là cường độ ứng với chấn động thẳng góc với tia tới) được gọi là hệ số khử cực của chùm tia tán xạ. Với khí argon, hệ số khử cực ($5/1000$, với không khí (i/I) ($4/100$. Người ta giải thích tính khử cực này bằng sự dị hướng của các phân tử của môi trường. Thực vậy, trong thực tế, các phân tử nói chung không phải là những hạt hình cầu, mà phải coi là những hạt có tính dị hướng. Những dao động của những tâm diện tích bên trong phân tử có thể theo những phương khác với phương của chấn động tới.

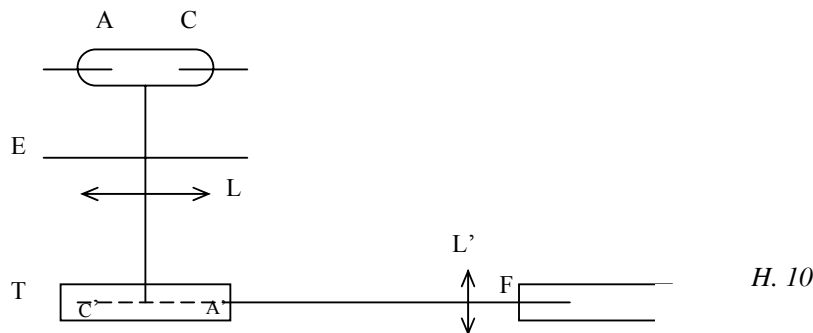
Hiện tượng tán xạ phân tử không những quan sát được với chất khí, mà người ta còn thấy với chất lỏng. Trong trường hợp chất lỏng, vì mật độ phân tử lớn hơn nhiều so với chất khí, nên cường độ tán xạ cũng mạnh hơn nhiều. Hiện tượng này phức tạp vì không thể bỏ qua sự tác dụng hỗ tương giữa các phân tử trong chất lỏng.

Ta có thể dùng hiện tượng tán xạ phân tử để giải thích màu xanh của nền trời, màu đỏ trên bầu trời lúc bình minh hay hoàng hôn.

§§6. SỰ TÁN XẠ TỔ HỢP.

Khi thực hiện thí nghiệm về sự tán xạ phân tử với ánh sáng tới đơn sắc, giả sử có tần số ν_0 , và phân tích phổ của ánh sáng tán xạ người ta nhận thấy: ngoài vạch ứng với tần số ν_0 , còn có những vạch phụ có tần số ở hai bên trị số ν_0 và cường độ rất yếu so với vạch ν_0 (1% cường độ của vạch tán xạ phân tử ν_0). Hiện tượng này được gọi là hiện tượng tán xạ tổ hợp, hay trong một số tài liệu, được gọi là hiệu ứng Raman. Hiện tượng được khảo sát gần như đồng thời vào năm 1928 bởi các nhà bác học Lãng - sbec và Man - đen - stam của Liên Xô và Raman và Krichman của Ấn Độ.

Sơ đồ thiết trí dụng cụ thí nghiệm như hình vẽ 10.

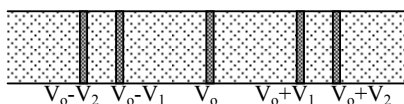


Đèn thủy ngân AC dùng làm nguồn sáng. Kính lọc đơn sắc E chỉ cho từng ánh sáng đơn sắc của nguồn sáng đi qua. Một thấu kính L hội tụ ảnh A'C' của nguồn sáng vào trong ống T chứa môi trường tán xạ (như benzen, tetracolor carbon, ...). Thấu kính L' chiếu ảnh của cột sáng A'C' trong môi trường tán xạ lên khe F của một kính quang phổ.

Hiện tượng được quan sát với các đặc tính như sau :

* Các vạch phụ có tần số đối xứng từng đôi một qua tần số ν_0 : $\nu_0 - (1$ và $\nu_0 + (1$, $\nu_0 - (2$ và $\nu_0 + (2$, ...

Các vạch phụ có tần số nhỏ hơn tần số ν_0 ($\nu_0 - (1$, $\nu_0 - (2$, ...) được gọi là các vạch stokes hay vạch âm. Các vạch phụ có tần số lớn hơn ν_0 ($\nu_0 + (1$, $\nu_0 + (2$, ...) được gọi là các vạch đối stokes hay vạch dương. Cường độ vạch dương luôn luôn yếu hơn cường độ vạch âm tương ứng.



H. 11

* Các khoảng cách về tần số $(1, (2, \dots$ giữa các vạch phụ và vạch tán xạ phân tử $(\nu_0$) đặc trưng cho chất tán xạ, không phụ thuộc vào tần số ν_0 của ánh sáng tới.

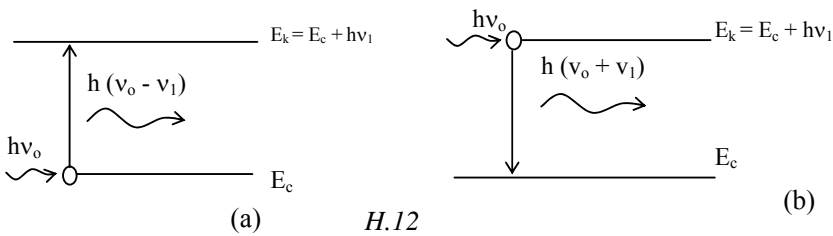
Ta có thể chứng minh điều này bằng cách dùng một chất tán xạ duy nhất trong ống T và thay đổi ν_0 (dùng các kính lọc đơn sắc E khác nhau để chiếu các đơn sắc khác nhau của nguồn sáng tới môi trường tán xạ). Ta thấy các trị số $(1, (2$ không thay đổi.

* Các trị số $(1, (2, \dots$ trong hiệu ứng Raman hầu như bằng tần số của các vạch hấp thụ của môi trường tán xạ trong vùng hồng ngoại.

§§7. GIẢI THÍCH HIỆN TƯỢNG TÁN XẠ TỔ HỢP BẰNG THUYẾT LƯỢNG TỬ ÁNH SÁNG.

Ta có thể giải thích hiện tượng tán xạ tổ hợp bằng sự trao đổi năng lượng giữa phân tử của chất tán xạ và photon của ánh sáng tới. Photon tới mang năng lượng $h\nu_0$. Khi đụng với phân tử của môi trường tán xạ, chỉ một phần $h\nu_1$ của năng lượng này bị phân tử hấp thụ để đi từ trạng thái căn bản E_c lên trạng thái kích thích E_k . Phần năng lượng còn lại $h(\nu_0 - \nu_1)$ phát xạ dưới hình thức photon của ánh sáng tán xạ có tần số $(\nu_0 - \nu_1)$. Đó là vạch Stokes trong phổ Raman. Để giải thích vạch đối Stokes, ta thừa nhận rằng trong môi trường tán xạ có những phân tử ở trạng thái kích thích E_k . Khi bị đụng bởi photon của ánh sáng tới, phân tử này phát ra năng lượng gồm năng lượng $h\nu_1$ (mà phân tử nhận vào khi hấp thụ để đi từ trạng thái E_c tới trạng thái E_k) và năng lượng $h\nu_0$ của photon tới. Vậy năng lượng tổng cộng phát ra dưới dạng photon tán xạ là $h(\nu_0 + \nu_1)$ ứng với tần số $(\nu_0 + \nu_1)$. Phân tử trở về trạng thái căn bản E_c . Sự phát xạ các vạch Stokes và đối Stokes được biểu diễn bởi hai sơ đồ 12a và 12b.

Số phân tử ở trạng thái kích thích E_k , trong các trường hợp bình thường, bao giờ cũng nhỏ hơn số phân tử ở trạng thái căn bản E_c . Do đó, khả năng phát xạ vạch đối Stokes kém hơn khả năng phát xạ vạch Stokes. Điều này giải thích tại sao cường độ vạch Stokes lớn hơn cường độ vạch đối Stokes.



Chương VII

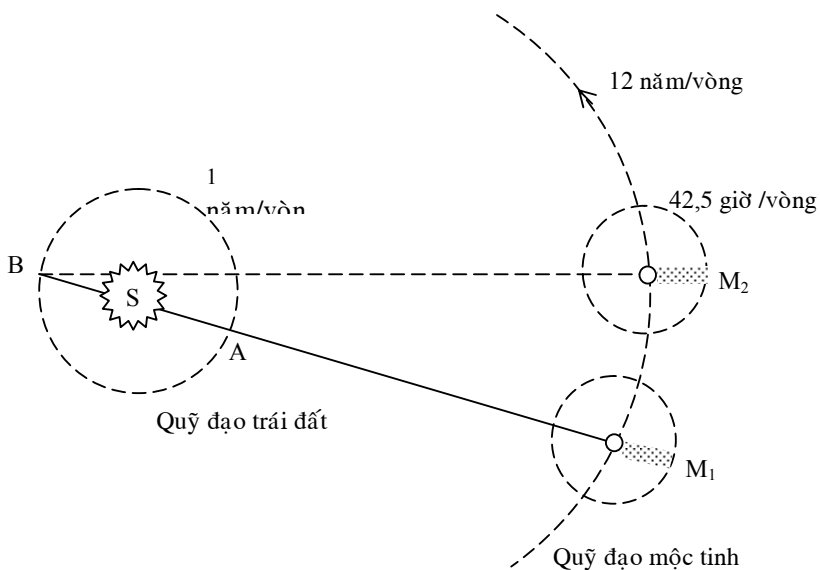
ĐO VẬN TỐC ÁNH SÁNG

§§1. PHƯƠNG PHÁP ROMER.

Ánh sáng truyền đi tức thời hay có một vận tốc giới hạn ? Đó là vấn đề mà từ xưa các nhà thông thái đã đặt ra và không đồng ý với nhau. Aristote cho rằng vận tốc ánh sáng là vô hạn. Ngược lại nhà khoa học Hồi giáo Avicenna lại cho rằng vận tốc ánh sáng mặc dầu rất lớn nhưng có một trị số xác định. Alhazen (nhà vật lý A - rập) và Boyle (Ái Nhĩ Lan) đồng ý với quan điểm này. Một số các nhà bác học nổi tiếng khác như Kepler, Descartes lại đồng ý với Aristote.

Galiléc là người đầu tiên đưa ra một phương pháp đo vận tốc ánh sáng, nhưng không thành công vì phương pháp quá đơn giản. Người thứ nhất đưa ra một phép đo có giá trị, mặc dù kết quả chưa được chính xác, là Romer - một nhà thiên văn người Đan Mạch. Thí nghiệm thực hiện vào năm 1676.

Khi quan sát hệ tinh gần một tinh nhất, các nhà thiên văn thời bấy giờ nhận thấy : trong một năm, nghĩa là trong thời gian trái đất quay được một vòng xung quanh mặt trời, thời gian T giữa hai lần liên tiếp hệ tinh trên đi vào vùng tối phía sau một tinh thì thay đổi, trong khi đáng nhẽ T phải là hằng số. Thời gian này càng tăng khi trái đất càng xa một tinh và giảm khi hai hành tinh này càng gần nhau. Thời gian sai biệt (T cực đại khi xét hai vị trí trái đất gần và xa một tinh nhất (vị trí A và vị trí B). Thời gian này, các nhà thiên văn thời bấy giờ đo được là 1320 giây. Thời gian sai biệt này làm các nhà thiên văn lúng túng, không giải thích được. Sự kiện này cho thấy hình như thời gian T , để một tinh trên quay được một vòng xung quanh một tinh, thay đổi theo vị trí của trái đất. Điều này khó có thể chấp nhận. Để giải thích thời gian ($T = 1320$ giây này, Romer chấp nhận thuyết cho rằng ánh sáng có một vận tốc giới hạn. Khi trái đất ở vị trí A, ánh sáng chỉ truyền đi trên quãng đường M_1A . Khi trái đất ở vị trí B, quãng đường ánh sáng phải truyền đi là M_2B . Và thời gian 1320 s là thời gian ánh sáng truyền đi trên quãng đường chênh lệch $M_2B - M_2A$, coi như bằng đường kính AB của quỹ đạo của trái đất.



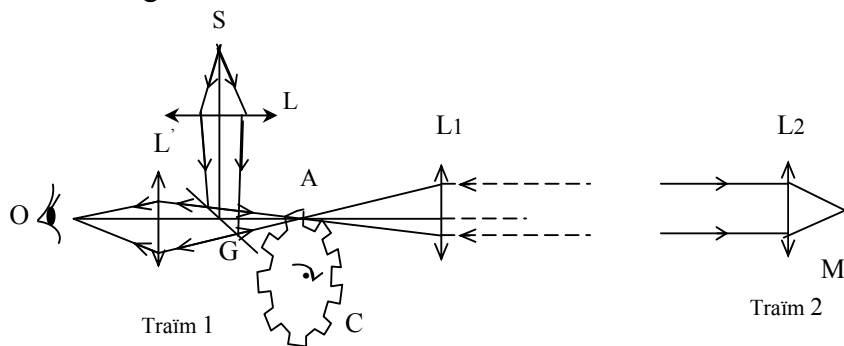
Thời bấy giờ, người ta tính được $AB = 293 \times 106 \text{ km}$, do đó Romer tìm được vận tốc ánh sáng là : $C (222.000 \text{ km / s}$

Với các con số chính xác ngày nay : $(T) \text{ cực đại} = 1002 \text{ s}$ và $AB = 299,5 \times 106 \text{ km}$. Bằng phương pháp của Romer, ta tính lại được kết quả : $C (298.000 \text{ km / s}$

§§2. PHƯƠNG PHÁP DÙNG ĐĨA RĂNG CỬA.

Phương pháp của Romer là một phương pháp thiên văn, người ta không thể kiểm soát được các dữ kiện của thí nghiệm, đồng thời nó đòi hỏi một thời gian dài để hoàn tất thí nghiệm. Do đó các nhà bác học không thỏa mãn với phương pháp này. Fizeau là người đầu tiên thực hiện phép đo vận tốc ánh sáng ngay trên mặt đất. Thí nghiệm của Fizeau được thực hiện vào năm 1849.

Thí nghiệm được thiết trí như hình vẽ 4.2



Ánh sáng xuất phát từ nguồn S, đi qua thấu kính L, phản chiếu trên gương nửa trong suốt G. Chùm tia phản chiếu hội tụ tại điểm A. Thấu kính L1 biến chùm tia phân kỳ tới thấu kính thành chùm tia song song. Ánh sáng truyền tới một vị trí thứ hai cách vị trí phát xuất nhiều cây số. Tại vị trí này, một thấu kính L2 hội tụ chùm tia sáng trên một gương M. Gương này phản chiếu chùm tia sáng trở lại. Chùm tia trở về đi qua gương G. Ta quan sát nhờ một thấu kính L'. Đĩa quay C là một đĩa răng cưa, bề rộng của khe và của răng bằng nhau.

Nếu lúc đầu đĩa C đứng yên và điểm A ở giữa một khe của đĩa thì mắt sẽ nhìn thấy ảnh của nguồn sáng S. Cho đĩa C quay với vận tốc tăng dần khi vận tốc quay đủ lớn để thời gian đi về của ánh sáng (giữa hai trạm đi và đến) bằng thời gian để răng bên cạnh điểm A quay tới trước điểm A thì ánh sáng bị đĩa C chặn lại : mắt không nhìn thấy ảnh của S nữa.

Gọi D là khoảng cách giữa hai trạm. Quãng đường đi về là $2D$. Thời gian tương ứng là $\frac{2D}{c}$

- $n =$ số vòng quay mỗi giây của đĩa C khi mắt thấy ánh sáng tắt.
- $P =$ số răng của đĩa C

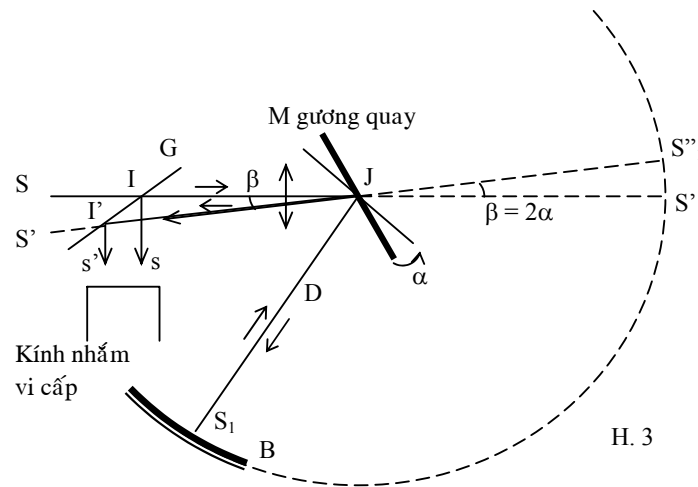
Vận tốc ánh sáng là : c

Fizeau đã dùng một đĩa có 720 răng và nhận thấy ánh sáng bị tắt khi đĩa C quay với vận tốc 12,5 vòng/s ứng với khoảng cách D là 8,69 km. Từ đó, suy ra trị số của vận tốc ánh sáng là $C(312.000 \text{ km / s}$.

Bằng phương pháp này, Cornu tìm được $C (300.400 (300\text{km/s} (1876)$. Perrotin tìm được $C (299.880 (50 \text{ km / s} (1902)$.

§§3. PHƯƠNG PHÁP GƯƠNG QUAY.

Phương pháp này thu ngắn khoảng cách D rất nhiều so với các thí nghiệm của Fizeau, Cornu và được thực hiện bởi Foucault vào năm 1862. Hình vẽ 3 trình bày cách thiết trí thí nghiệm của Foucault.



Nếu gương quay M đứng yên hay có vận tốc quay nhỏ, ánh sáng đi về theo quỹ đạo $SIJS_1J$. Ta có ảnh cuối cùng s . Nếu gương M quay với vận tốc lớn thì trong thời gian ánh sáng đi về trên quãng đường JS_1 , gương M đã quay được một góc α . Do đó trong lần về, tia phản chiếu trên gương M là JJ' . Ta có ảnh cuối cùng là s' . Bằng một kính nhòm vi cấp, ta xác định được khoảng cách ss' . Từ đó suy ra vận tốc ánh sáng.

Gọi S'_1 là ảnh của S nếu không có gương M . Nhưng vì có gương M nên chùm tia sáng phản chiếu hội tụ tại một điểm S_1 trên gương cầu lõm B . S_1 và S'_1 đối xứng qua gương M nên không tùy thuộc vị trí của gương này. Do đó khi M quay, S'_1 cố định. Khi gương M quay một góc α , tia phản chiếu quay một góc $\beta = 2\alpha$, S'_1 là ảnh của S_1 cho bởi gương M . Ta có

Dùng kính nhòm vi cấp đo khoảng cách:

$$ss' = SS' = (d \text{ (} d \text{ là khoảng cách từ nguồn sáng } S \text{ tới gương quay)}).$$

Thời gian ánh sáng từ gương M tới gương cầu lõm B và trở về là τ :

$$\beta = 2\alpha = 4(N\alpha) \text{ (} N = \text{số vòng quay mỗi giây của gương } M).$$

$$\text{Suy ra : } \beta = \frac{8\pi ND}{C}$$

Foucault tính được vận tốc ánh sáng C :

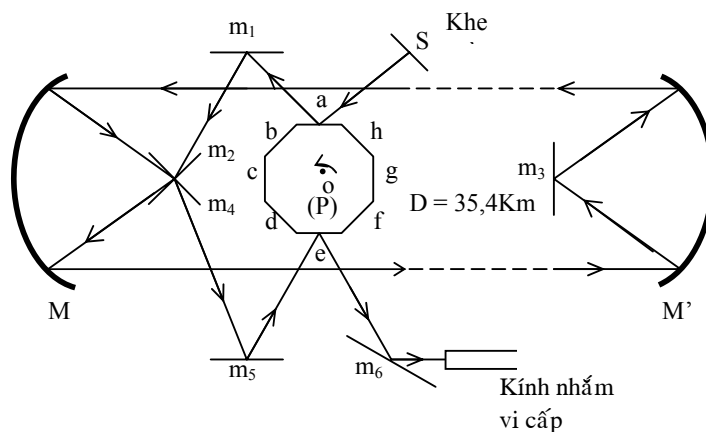
Trong thí nghiệm của Foucault, khoảng cách $D = 20\text{m}$, $N=800\text{vòng / giây}$, vận tốc ánh sáng tính được là :

$$C = 298.000 \pm 500 \text{ km / s}$$

Newcomb năm 1882 thực hiện lại thí nghiệm của Foucault với $D = 3700\text{m}$, $N = 210\text{vòng / giây}$, tìm được $C = 299.860 \pm 50 \text{ km / s}$.

§4. PHƯƠNG PHÁP MICHELSON.

Michelson đã thực hiện nhiều thí nghiệm để đo vận tốc ánh sáng. Ở đây, ta chỉ đề cập tới các thí nghiệm sau cùng của Michelson được thực hiện trong khoảng thời gian 1924 – 1926. Khoảng cách ánh sáng đi về dài 35,4 km giữa hai ngọn núi Wilson và San Antonio. Thiết trí của thí nghiệm như hình vẽ H.4.



H. 4

P là một lăng kính phản xạ 8 mặt, có thể quay xung quanh trục O. M và M' là hai gương cầu lõm. Lúc đầu, P đứng yên, ánh sáng từ khe sáng S tới mặt a của lăng kính P và lần lượt phản chiếu trên các gương : m1, m2, M, M', m3, M', M, m4, m5 tới mặt e (đối diện với mặt a) của lăng kính P, phản chiếu trên mặt này tới gương m6. Quan sát bằng một kính nhòm vi cấp, ta thấy ảnh cuối cùng S' của khe sáng S. Sau khi đã điều chỉnh hệ thống như trên, người ta cho lăng kính P quay thì ảnh S' biến mất. Ảnh này lại xuất hiện ở đúng vị trí cũ nếu trong thời gian ánh sáng đi về, mặt d của lăng kính P quay tới đúng vị trí ban đầu của mặt e, nghĩa là thời gian đi về (của ánh sáng bằng thời gian t để lăng kính P quay được 1/8 vòng. Nếu N là số vòng quay mỗi giây tương ứng của lăng kính P, ta có : \dot{G}

Vận tốc ánh sáng là :

$$C = \frac{2D}{\theta} = 16DN$$

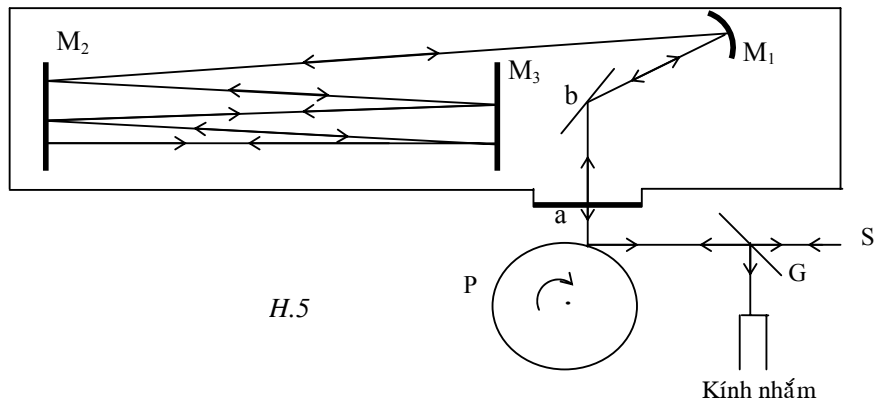
Trong thí nghiệm trên của Michelson, lăng kính P quay với vận tốc 528 vòng / giây.

Thực ra, trong các thí nghiệm, hai thời gian (và t khó thể điều chỉnh cho hoàn toàn bằng nhau. Do đó ta có $\theta = t \dot{\theta}$ (, nghĩa là mặt d khi tới thế chỗ mặt e, hợp với vị trí ban đầu của mặt e một góc θ . Vì vậy, ta quan sát thấy một ánh sáng S'1 không trùng với vị trí ban đầu S'. Xác định khoảng cách S'S'1, ta có thể tính được θ . Từ đó tính được số hạng hiệu chỉnh cho vận tốc ánh sáng.

Trong thời gian từ năm 1924 tới đầu năm 1927, Michelson đã thực hiện phép đo nhiều lần. Kết quả trung bình của các thí nghiệm là 299.976 km/giây với sai số 4 km/giây.

$$C = 299.976 (\pm 4 \text{ km/giây})$$

Năm 1930, Michelson với sự cộng tác của Pease và Pearson thực hiện phép đo vận tốc ánh sáng trong chân không. Để thực hiện thí nghiệm này, ông dùng một ống dài 1600m và hút không khí trong ống ra (áp suất chỉ còn 0,5 mmHg). Thiết trí của thí nghiệm như trong hình vẽ 5.



H.5

P là một lăng kính phản xạ 32 mặt. Chùm tia sáng từ nguồn S, đi qua gương bán trong suốt G, phản chiếu ở p và b tới một gương lõm M1. Gương này tạo thành chùm tia phản xạ song song. Chùm tia song song này phản xạ nhiều lần liên tiếp trên hai gương phẳng M2 và M3 gần như song song nhau. Lần phản xạ sau cùng trên gương M2 thẳng góc với gương này để tia sáng đi về theo đường cũ, ló ra khỏi ống chân không, phản xạ trên lăng kính P và trên gương bán trong suốt G tới kính nhẩm. Nguyên tắc đo C giống như phương pháp trên.

Thí nghiệm này được tiến hành suốt năm 1930 cho tới gần nửa năm 1931 (khi Michelson mất) với hàng trăm lần đo. Sau khi Michelson mất, Pease và Pearson tiếp tục công việc cho tới năm 1933. Tính cả thấy 2885 lần đo đã được thực hiện trong một thời gian 3 năm với kết quả là :

$$C = 299.774 \text{ (11 km / giây)}$$

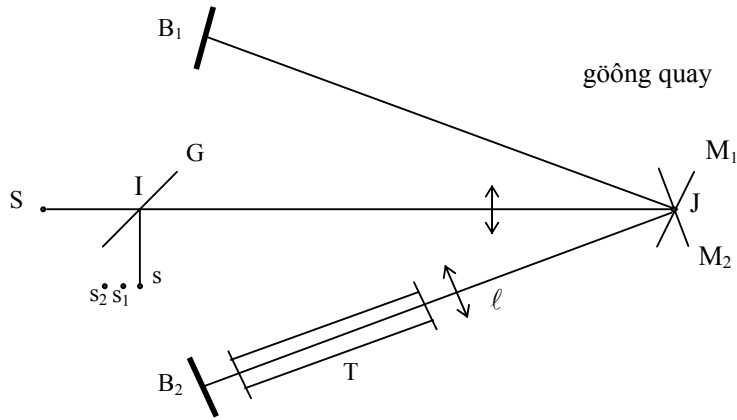
Trị số đo được bởi các thí nghiệm của Michelson và các cộng sự viên đã khá chính xác. Sau này, người ta còn thực hiện nhiều thí nghiệm bằng các phương pháp khác nhau, để cố gắng đạt được các kết quả chính xác hơn nữa. Hiện nay chúng ta thừa nhận vận tốc của ánh sáng trong chân không là:

$$C = 299.793 \text{ km / giây.}$$

Với sai số nhỏ hơn 1 km / giây.

§§5. VẬN TỐC ÁNH SÁNG TRONG MÔI TRƯỜNG ĐỨNG YÊN.

Năm 1850, Foucault dùng phương pháp gương quay để so sánh vận tốc ánh sáng trong không khí và trong nước. Nguyên tắc của thí nghiệm được mô tả trong đoạn SS.3. Sơ đồ của thí nghiệm như hình vẽ 6. Chùm tia sáng phát suất từ nguồn S được hội tụ trên các gương cầu lõm B1.B2 (có tâm là J) khi gương quay qua các vị trí M1 và M2. Ống T chứa đầy nước. Khi gương quay đứng yên ở vị trí M1, chùm tia sáng tới và phản chiếu trên gương lõm B1, ta có ảnh cuối cùng ở vị trí s. Khi gương quay đứng yên ở vị trí M2, chùm tia sáng tới và phản chiếu trên gương lõm B2 (đi qua nước trong ống T), ảnh cuối cùng cũng ở vị trí s. Khi cho gương quay quay, ảnh cuối cùng ở vị trí s1 (đối với chùm tia tới B1) và ở vị trí s2 (đối với chùm tia tới B2). Foucault nhận thấy $ss2 > ss1$. Điều này chứng tỏ thời gian ánh sáng đi về trên đoạn đường JB2 lớn hơn thời gian đi về trên đoạn đường JB1. Từ đó suy ra vận tốc v của ánh sáng trong nước nhỏ hơn vận tốc ánh sáng trong không khí (coi như bằng C).



H.6

Năm 1888, Michelson làm lại thí nghiệm của Foucault và tìm được $v = c/1,33$ nghĩa là bằng chiết suất tuyệt đối n của nước đối với ánh sáng thấy được : $v = c/n$.

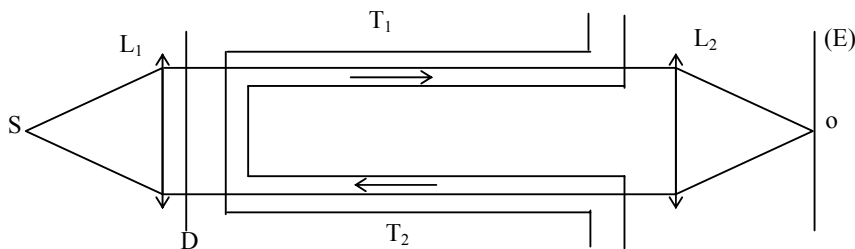
Thực ra, ta thấy trong các phép đo vận tốc ánh sáng, người ta đã đo vận tốc truyền biên độ, nghĩa là vận tốc nhóm V , chứ không phải vận tốc pha v .

$$V = v - \lambda \frac{dv}{d\lambda}$$

Nhưng trong chân không : \bar{G} , ta có $v = V$. Trong các môi trường như không khí hay nước thì \bar{G} nên ta có thể lấy $v (V$. Trái lại trong nhiều môi trường, v và V có thể khác nhau nhiều. Trong trường hợp này ta cần hiệu chỉnh lại kết quả trong phép đo vận tốc ánh sáng. Thí dụ khi đo vận tốc ánh sáng trong CS2 (Sulfur Carbon) là một môi trường tán sắc mạnh. Michelson thấy vận tốc là $C / 1,758$ trong khi chiết suất trung bình của CS2 là 1,635.

§§6. VẬN TỐC ÁNH SÁNG TRONG MỘT MÔI TRƯỜNG CHUYỂN ĐỘNG.

Fizeau đã thực hiện thí nghiệm như hình vẽ (đã đơn giản hóa).



H.7

Nguồn sáng S đặt ở tiêu điểm của thấu kính L1, do đó ta có chùm tia sáng song song chiếu thẳng góc tới màn chắn sáng D có hai khe hẹp. Hai chùm tia sáng qua hai khe này được cho đi qua hai nhánh T1 và T2 của một ống chữ U chứa đầy nước. Vân giao thoa được một thấu kính L2 làm hiện lên một màn E đặt ở vị trí mặt phẳng tiêu của nó.

Lúc đầu để nước trong ống chữ U đứng yên, hệ thống vân giao thoa chiếm một vị trí nào đó trên màn E. Cho nước trong ống chuyển động với vận tốc V , ta thấy hệ thống vân bị dời chỗ, chứng tỏ có sự thay đổi về quang lộ đi qua các nhánh T1, T2 so với trường hợp nước đứng yên.

Ban đầu người ta nghĩ rằng có thể giải thích hiện tượng bằng cách cộng vận tốc như trường hợp âm thanh truyền trong không khí chuyển động. Như vậy, với \bar{G} là vận tốc của ánh sáng trong nước đứng yên (n là chiết suất của nước) thì trong trường hợp nước chuyển

động theo chiều như hình vẽ, vận tốc ánh sáng trong nhánh T1 là \hat{G} , và trong nhánh T2 là \hat{G} . Thời gian để ánh sáng đi qua hai nhánh T1 và T2 lần lượt là \hat{G}, \hat{G} , (ℓ là chiều dài chung của T1 và T2).

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2v\ell}{\frac{c^2}{n^2} \left(1 - \frac{n^2 v^2}{c^2}\right)}$$

$$\Delta t \approx \frac{2v\ell n^2}{c^2} \quad \text{vì} \quad \frac{n^2 v^2}{c^2} \approx 0$$

Xét điểm O, hiệu quang lộ của hai chùm tia là :

$$\Delta \delta = c \cdot \Delta t$$

Ứng với sự biến thiên về bậc giao thoa là :

$$\Delta p \leq \frac{\Delta \delta}{\lambda} = \frac{c \Delta t}{\lambda} = \frac{2v\ell n^2}{c\lambda}$$

Nhưng trên thực tế, thí nghiệm cho thấy độ biến thiên của bậc giao thoa tại O không phải là p mà là một trị số (p').

$$\Delta p' = \Delta p \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

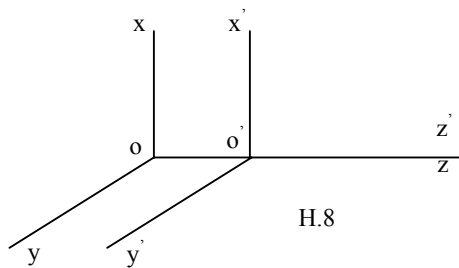
Nghĩa là hiện tượng xảy ra giống như vận tốc ánh sáng trong các nhánh T1 và T2 là :

$$\frac{c}{n} \pm v \left(1 - \frac{1}{n^2}\right)$$

chứ không phải như lý luận ở trên.

$\alpha = 1 - \frac{1}{n^2}$ ãõõĩc gõĩ laõ heã soá keuo sũng aũnh saũng của môi trũõng chuyẽn ãõõĩc.

§§7. GIẢI THÍCH THÍ NGHIỆM FIZEAU BẰNG THUYẾT TƯƠNG ĐỐI.



H.8

Xét một hệ thống qui chiếu S (x, y, z, t) và một hệ thống qui chiếu S' (x', y', z', t') chuyển động thẳng đều với vận tốc v theo phương Oz (Oz trùng với $O'z'$, $Ox \parallel O'x'$, $Oy \parallel O'y'$)

Theo cơ học cổ điển, ta có phép biến đổi Galilée như sau :

$$\begin{aligned} t' &= t \\ x' &= x \\ y' &= y \end{aligned} \quad (7.1)$$

$$z' = z - vt$$

Trong đó t là thời gian tuyệt đối, không tùy thuộc vào hệ qui chiếu S hay S'.

Nhưng theo thuyết tương đối của Einstein, ta có các phương trình biến đổi của các tọa độ không gian và thời gian là :

$$\begin{aligned} x' &= x \\ y' &= y \\ z' &= \frac{z - vt}{\sqrt{1 - \beta^2}} \end{aligned} \quad (7.2)$$

$$t' = \hat{G} \quad \text{với} \hat{G}$$

hay

$$x = x'$$

$$y = y' \quad (7.3)$$

$$z = \frac{z' - vt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$t = \hat{G}$ đó là phép biến đổi Lorentz

Ta thấy, theo quan điểm tương đối của Einstein thì ý niệm về thời gian cũng có tính tương đối: thời gian tùy thuộc vào hệ qui chiếu.

Xét một vật chuyển động theo phương Oz, có vận tốc u' đối với hệ qui chiếu S' , và có vận tốc u đối với hệ qui chiếu S .

Ta có: $u' = \hat{G}$ và $u = \hat{G}$

Từ hai công thức cuối của nhóm (7.3) ta có:

$$dz = \frac{dz' + vdt'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$dt = \frac{dt' + \frac{\beta}{c} dz'}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Suy ra:

$$\frac{dz}{dt} = \frac{dz' + vdt'}{dt' + \frac{\beta}{c} dz'}$$

hay:

$$u = \frac{\frac{dz'}{dt'} + v}{1 + \frac{\beta}{c} \cdot \frac{dz'}{dt'}}$$

$$u = \frac{u' + v}{1 + \frac{v}{c^2} u'} \quad (7.4)$$

Nếu v và u' rất nhỏ so với c : \hat{G} , ta thấy lại công thức về phép cộng vận tốc trong động học cổ điển: $u = u' + v$.

Nếu $u' = c$, ta suy ra $u = c$. Vậy vận tốc ánh sáng c không tùy thuộc hệ qui chiếu.

Trở lại thí nghiệm Fizeau, xét nhánh T1 và giả sử chiều dương từ trái sang phải, ta có $v = V$ (vận tốc của nước), $u' = \hat{G}$ (vận tốc của ánh sáng đối với hệ qui chiếu S' là nước), vậy vận tốc của ánh sáng đối với hệ qui chiếu S , giả sử gắn liền với phòng thí nghiệm, là:

$$u = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + \frac{v}{c^2} \frac{c}{n}} = \frac{\frac{c}{n} + v}{1 + \frac{v}{cn}}$$

hay $u (\hat{G})$ vì \hat{G} nhỏ

Suy ra:

$$u \approx \frac{c}{n} + v(1 - \frac{1}{n^2})$$

Nếu xét chùm tia truyền qua nhánh T2, ta có: $v = -V$, $u' = \hat{G}$. Suy ra $u (\hat{G})$. Phù hợp với thí nghiệm.

Chương VIII

BỨC XẠ NHIỆT

§§1. ĐỊNH NGHĨA.

Một vật phát ra bức xạ được gọi là nguồn bức xạ. Sự phát bức xạ của một vật có thể là do nhiều nguyên nhân : vật bị kích thích bởi ánh sáng, bằng sự phóng điện, do tác dụng hóa học, ... Trong chương này, ta khảo sát sự bức xạ nhiệt. Đó là hiện tượng nhiệt bên trong vật biến thành năng lượng bức xạ phát ra. Thông thường, một vật phát ra bức xạ thấy được đưa lên một nhiệt độ trên 500oC. Nhiệt độ của vật càng cao thì năng lượng bức xạ phát ra càng nhiều. Ở các nhiệt độ thấp hơn, vật cũng phát bức xạ nhưng thuộc vùng hồng ngoại nên mắt ta không nhận thấy được.

§§2. CÁC ĐẠI LƯỢNG TRONG PHÉP ĐO NĂNG LƯỢNG BỨC XẠ.

* Công suất bức xạ:

Người ta định nghĩa công suất bức xạ của nguồn là năng lượng do nguồn phát ra không gian xung quanh trong một đơn vị thời gian.

Nếu (W là năng lượng bức xạ toàn phần (gồm tất cả các độ dài sóng và phát ra theo tất cả mọi phương) phát ra trong thời gian (t thì công suất phát xạ (toàn phần) là :

$$P = \frac{\Delta W}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Công suất phát xạ được tính ra Watt.

* Năng suất phát xạ toàn phần:

- Năng suất phát xạ toàn phần được định nghĩa là năng lượng bức xạ phát ra (gồm tất cả các độ dài sóng và theo tất cả mọi phương) bởi một đơn vị diện tích trên bề mặt của vật bức xạ trong một đơn vị thời gian.

Nếu (W là năng lượng bức xạ toàn phần phát ra bởi một diện tích ds của bề mặt vật bức xạ trong một đơn vị thời gian thì năng suất phát xạ toàn phần là :

$$R = \frac{\delta W}{ds} \quad (2.2)$$

R được tính ra Watt/m².

* Hệ số phát xạ đơn sắc:

Bây giờ ta xét các bức xạ có độ dài sóng ở trong khoảng (và (+ d((d(rất nhỏ). Năng lượng (W(phát ra theo mọi phương bởi một diện tích ds trong một đơn vị thời gian mang bởi các đơn sắc trên, thì tỉ lệ với diện tích ds và với d(. Do đó ta có thể viết:

$$\delta W_{\lambda} = R_{\lambda} . ds . d\lambda \quad (2.3)$$

R(được gọi là hệ số phát xạ đơn sắc ứng với độ dài sóng (và được tính ra Watt/m³ trong hệ thống đơn vị SI.

Năng lượng toàn phần phát ra trong một đơn vị thời gian bởi diện tích ds là :

$$\delta W = \int \delta W_{\lambda} = \left(\int_0^{\infty} R_{\lambda} d\lambda \right) . ds$$

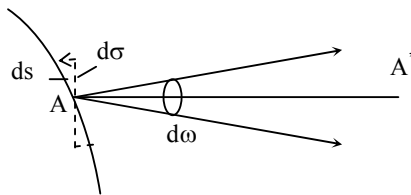
so với : (W = Rds

Ta có : $R = \bar{G}$ (2.4)

R và \bar{R} (tùy thuộc vào nhiệt độ của vật bức xạ).

*** ĐỘ CHÓI NĂNG LƯỢNG.**

Xét một diện tích vi phân ds bao quanh một điểm A trên bề mặt của một vật bức xạ và xét một chùm tia bức xạ có góc khối $d\omega$ (với phương trung bình là AA'). Năng lượng dW mang bởi chùm tia (gồm tất cả các độ dài sóng) trong một đơn vị thời gian thì tỉ lệ với góc khối $d\omega$ (và với diện tích $d\omega$ (hình chiếu của ds xuống mặt phẳng thẳng góc với phương trung bình AA'): $d\omega = ds \cos i$ với i là góc hợp bởi pháp tuyến AN của diện tích ds với phương AA'). Ta có thể viết dW dưới dạng :



$$dW = e \cdot ds \cdot d\omega \tag{2.5}$$

Hệ số tỉ lệ e chỉ tùy thuộc vào bản chất và nhiệt độ của nguồn, và tùy thuộc vào phương AA' . Ta thấy e chính là năng lượng phát ra trong một đơn vị thời gian theo phương AA' bởi một đơn vị diện tích của bề mặt phát xạ thẳng góc với phương AA' và ứng với một chùm tia có góc khối bằng một đơn vị:

$$e = \frac{dW}{ds \cdot d\omega}$$

Hệ số e được gọi là độ chói năng lượng của nguồn theo phương AA' (ta thấy biểu thức của e giống như biểu thức của độ chói B trong trắc quang học $B = \bar{G}$).

*** HỆ SỐ CHÓI NĂNG LƯỢNG ĐƠN SẮC.**

Bức xạ phát ra bởi một nguồn có thể gồm nhiều đơn sắc. Năng lượng phát ra ứng với các đơn sắc thì không bằng nhau. Do đó người ta đưa vào một đại lượng đặc trưng trong sự bức xạ, gọi là hệ số chói năng lượng đơn sắc e_λ . Nếu chùm tia bức xạ trên gồm các đơn sắc có độ dài sóng ở trong khoảng λ và $\lambda + d\lambda$ thì năng lượng mang bởi chùm tia trên trong một đơn vị thời gian là :

$$dW_\lambda = e_\lambda \cdot ds \cdot d\omega \cdot d\lambda \tag{2.6}$$

Năng lượng của chùm tia trên và kể tất cả mọi độ dài sóng là:

$$dW = \int_0^\infty dW_\lambda = \left(\int_0^\infty e_\lambda d\lambda \right) \cdot ds \cdot d\omega$$

So sánh với công thức (2.5) ta có ngay :

$$e = \int_0^\infty e_\lambda \cdot d\lambda \tag{2.7}$$

Ta thấy, theo công thức (2.6), theo một phương nào đó, nếu e_λ càng lớn thì năng lượng bức xạ phát ra càng nhiều, vật bức xạ càng mạnh.

§§3. HỆ SỐ HẤP THỤ.

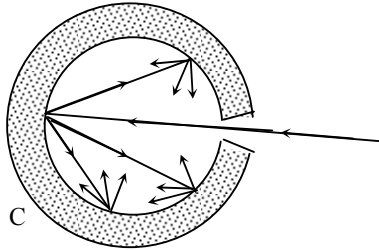
Xét một chùm tia bức xạ gồm các độ dài sóng ở trong khoảng λ và $\lambda + d\lambda$ chiếu tới một diện tích vi phân ds bao quanh điểm A của một vật, với phương trung bình là λ . Năng lượng tới ds trong một đơn vị thời gian dW'_λ . Một phần dW''_λ (của năng lượng trên) bị ds hấp thụ. Người ta định nghĩa hệ số hấp thụ của vật tại điểm A, theo phương λ , đối với độ dài sóng λ và ở nhiệt độ T của vật là :

$$a_\lambda = \frac{dW''_\lambda}{dW'_\lambda} \tag{3.1}$$

a là tỷ số giữa hai đại lượng cùng thứ nguyên, do đó không có đơn vị. Với mọi vật, ta có $0 \leq a \leq 1$.

§§4. VẬT ĐEN.

Vật đen là những vật hấp thụ hoàn toàn năng lượng bức xạ chiếu tới, đối với mọi độ dài sóng và đối với mọi góc tới. Nghĩa là với vật đen ta có $a = 1$ với tất cả các độ dài sóng. Như vậy nếu ta chiếu tới vật đen một tia sáng thì tất cả đều bị vật hấp thụ, không có ánh sáng phản xạ, không có ánh sáng khuếch tán, cũng không có ánh sáng truyền qua. Vì vậy, gọi là vật đen (thực ra danh từ này không chính lắm, vì, mặc dù vậy, vật có thể phát xạ).

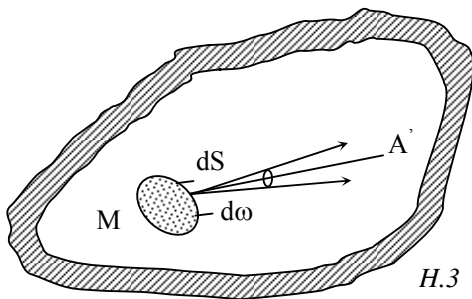


H.2

Trong thực tế, ta không có được một vật đen tuyệt đối theo đúng định nghĩa, vì không có vật nào hấp thụ hoàn toàn năng lượng tới. Tuy nhiên một bình kín C có đục một lỗ thủng nhỏ, bên trong bôi đen bằng mô hống, có thể coi là một vật đen, bức xạ khi đi qua lỗ hổng vào bên trong bình, phản xạ nhiều lần liên tiếp bên trong bình, do đó hầu hết năng lượng bức xạ đều bị hấp thụ. Diện tích lỗ hổng vừa là bề mặt hấp thụ vừa là bề mặt phát xạ (khi phát xạ, bức xạ từ trong thoát ra cũng qua lỗ hổng này).

§§5. ĐỊNH LUẬT KIRCHHOFF.

Xét một bình kín C không cho bức xạ đi qua, bên trong là chân không và được giữ ở một nhiệt độ không đổi T . Trong bình là một vật M.



H.3

Thí nghiệm cho thấy dù vật M làm bằng chất gì và có nhiệt độ ban đầu là bao nhiêu thì sau một thời gian, nhiệt độ của M cũng bằng với nhiệt độ T của bình. Trong trường hợp này, sự truyền nhiệt không thể xảy ra do hiện tượng dẫn nhiệt hay hiện tượng đối lưu, mà sự cân bằng được thực hiện là do sự trao đổi năng lượng dưới dạng bức xạ giữa bình C và vật M. Thành trong của bình phát ra bức xạ (hoặc phản chiếu). Năng

lượng bức xạ này khi chiếu tới M thì một phần bị vật M hấp thụ, biến thành nhiệt năng của các nguyên tử bên trong M. Nhưng đồng thời, vật M cũng phát ra bức xạ (năng lượng bức xạ này được chuyển hóa từ nhiệt năng của các nguyên tử của M). Giả sử lúc đầu nhiệt độ của vật M thấp hơn nhiệt độ của bình C. Hiện tượng hấp thụ ở M mạnh hơn hiện tượng phát xạ, nhiệt độ của M tăng lên. Nhiệt độ của M càng cao thì hiện tượng phát xạ càng mạnh. Tới một lúc năng lượng do M phát ra bằng năng lượng thu vào trong cùng một thời gian ta có sự cân bằng nhiệt độ của vật M và của bình C bằng nhau.

Gọi e_λ và a_λ lần lượt là hệ số chói năng lượng đơn sắc và hệ số hấp thụ của vật M tại một điểm A đối với phương AA' và đối với độ dài sóng λ . Xét chùm tia bức xạ phát ra bởi một diện tích vi phân ds bao quanh điểm A, có góc khối $d\omega$ và phương trung bình AA'.

Năng lượng mang bởi chùm tia này trong một đơn vị thời gian và đối với các độ dài sóng ở trong khoảng λ và $\lambda + d\lambda$ là:

$$dW_\lambda = e_\lambda \cdot d\sigma \cdot d\omega \cdot d\lambda$$

($d\sigma = ds \cdot \cos i$ là hình chiếu của ds xuống mặt phẳng thẳng góc với phương AA').

Bây giờ ta xét chùm tia trên nhưng theo chiều ngược lại, nghĩa là xét năng lượng do bình C bức xạ vào diện tích ds của vật M. Năng lượng này (trong một đơn vị thời gian và ứng với cùng các độ dài sóng trên) truyền qua khoảng chân không trong bình và có trị số là:

$$dW'_\lambda = E_\lambda \cdot d\sigma \cdot d\omega \cdot d\lambda \quad (5.1)$$

E_λ là hệ số tỉ lệ. Người ta chứng minh được E_λ không tùy thuộc bản chất của thành bình và phương của chùm tia sáng, mà chỉ tùy thuộc nhiệt độ T và độ dài sóng λ . Như vậy $E_\lambda = E(T, \lambda)$ là một hàm phổ biến theo nhiệt độ T và độ dài sóng λ (phổ biến vì chung cho mọi vật). E_λ được gọi là cường độ riêng của bức xạ nhiệt trong chân không.

Phần năng lượng bị diện tích ds hấp thụ là: $dW''_\lambda = a_\lambda \cdot dW'_\lambda = a_\lambda \cdot E_\lambda \cdot d\sigma \cdot d\omega \cdot d\lambda$.

Trong điều kiện cân bằng ta phải có:

$$dW'_\lambda = dW''_\lambda$$

Suy ra: $e_\lambda = a_\lambda \cdot E_\lambda$

Vậy
$$\frac{e_\lambda}{a_\lambda} = E(\lambda, T) \quad (5.2)$$

Dựa vào hệ thức trên, định luật Kirchhoff được phát biểu như sau:

Tỉ số giữa hệ số chói năng lượng đơn sắc e_λ và hệ số hấp thụ a_λ tại một điểm trên bề mặt của một vật, lấy theo cùng một độ dài sóng và cùng một phương là một hằng số. Hằng số này độc lập đối với bản chất của vật, với điểm khảo sát trên bề mặt của vật và với phương phát xạ. Nó chỉ tùy thuộc độ dài sóng λ và nhiệt độ của vật.

§§6. Ý NGHĨA CỦA ĐỊNH LUẬT KIRCHHOFF.

1. Từ hệ thức (2.6) định nghĩa e_λ , ta thấy hệ số chói năng lượng đơn sắc e_λ biểu thị khả năng phát xạ theo một phương xác định và đối với độ dài sóng λ , của một điểm trên bề mặt một vật ở một nhiệt độ xác định. Vậy theo định luật Kirchhoff, một vật phát ra bức xạ λ càng mạnh nếu nó hấp thụ bức xạ này càng mạnh. Nói cách khác, đối với một bức xạ λ , một vật bức xạ tốt nếu nó là một vật hấp thụ tốt.

2. Cho e_λ và a_λ theo thứ tự là hệ số chói năng lượng đơn sắc và hệ số hấp thụ của một vật bất kỳ; e_λ^{vd} là hệ số chói năng lượng đơn sắc của vật đen, theo định luật Kirchhoff, tỉ số giữa hệ số chói năng lượng đơn sắc và hệ số hấp thụ không tùy thuộc bản chất của vật nên xét cùng một nhiệt độ và cùng một độ dài sóng λ , ta có:

$$\frac{e_\lambda}{a_\lambda} = e_\lambda^{vd}$$

Vậy tỉ số giữa hệ số chói năng lượng đơn sắc và hệ số hấp thụ (ứng với cùng một độ dài sóng và xét cùng một phương) của một vật bất kỳ thì bằng hệ số chói năng lượng đơn sắc của vật đen đối với cùng một độ dài sóng và ở cùng một nhiệt độ.

3. Ngoài ra với một vật bất kỳ, hệ số hấp thụ luôn luôn nhỏ hơn 1 ($a_\lambda < 1$) nên luôn ta có:

$$e_\lambda^{vd} > e_\lambda$$

Vậy ứng với cùng một độ dài sóng và cùng một nhiệt độ, vật đen là vật có khả năng phát xạ mạnh nhất.

Ta cũng suy ra từ định luật Kirchhoff

$$e_\lambda = a_\lambda \cdot e_\lambda^{v.d}$$

Muốn $e_\lambda \neq 0$, ta phải có đồng thời $a \neq 0$ và $e_\lambda^{v.d} \neq 0$. Điều đó có nghĩa là muốn một vật bất kỳ, ở một nhiệt độ xác định, có thể phát ra bức xạ λ ($e \neq 0$) thì điều kiện là vật đó phải hấp thụ được bức xạ λ ($a \neq 0$) và đồng thời vật đen ở cùng nhiệt độ cũng có khả năng phát ra bức xạ đó ($e_\lambda^{v.d} \neq 0$).

§§7. SỰ PHÁT XẠ CỦA VẬT ĐEN.

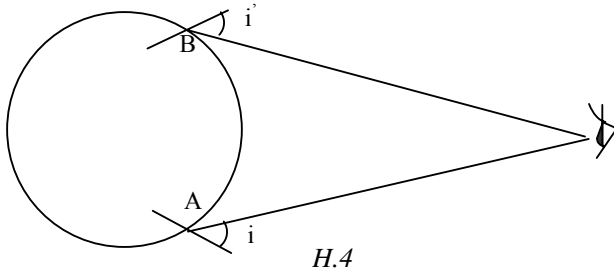
a/ Với vật đen, ta có $a_\lambda^{v.d} = 1$. Vậy

$$a_\lambda^{v.d} = E_\lambda$$

Ta đã biết $E_\lambda = E(\lambda, T)$ là một hàm phổ biến theo nhiệt độ T và độ dài sóng λ , không tùy thuộc vào bản chất của vật đen cũng như cách thực hiện vật đen. Vì vậy, hệ số chói năng lượng đơn sắc $a_\lambda^{v.d}$ của vật đen cũng không tùy thuộc bản chất và cách thực hiện nó, nói cách khác ở cùng một nhiệt độ và đối với cùng một độ dài sóng, mọi vật đen đều có cùng một hệ số chói năng lượng đơn sắc $a_\lambda^{v.d}$.

b/ Đối với vật đen, hệ số hấp thụ $a_\lambda^{v.d}$ (không tùy thuộc phương khảo sát nên hệ số chói năng lượng đơn sắc $e_\lambda^{v.d}$ cũng không tùy thuộc phương phát xạ, do đó khả năng phát xạ của vật đen theo mọi phương đều như nhau

c/ Độ chói năng lượng toàn phần (đối với mọi độ dài sóng từ 0 tới ∞) $e = \int e_\lambda d_\lambda$ trong trường hợp vật đen cũng độc lập với phương phát xạ. Vì vậy khi nung quả cầu bằng kim loại phủ mờ hóng (coi như vật đen) tới nhiệt độ phát xạ ánh sáng thấy được, ta thấy như một đĩa tròn sáng vì khả năng phát xạ của mọi điểm trên hình cầu theo phương tới mắt đều như nhau.

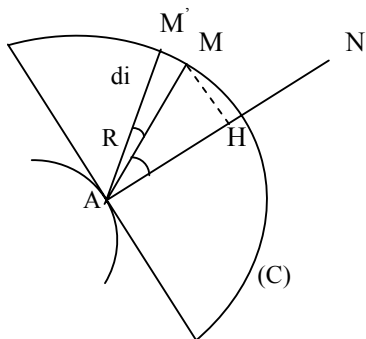


* Vì $E_\lambda = a_\lambda^{v.d}$ nên ta cũng gọi E_λ là hệ số chói năng lượng đơn sắc của vật đen và độ chói năng lượng toàn phần có thể viết là:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda d_\lambda \quad (7.14)$$

d/ Hệ thức liên lạc giữa E_λ và R_λ :

Bây giờ ta tính năng lượng bức xạ phát ra bởi một đơn vị diện tích bề mặt của vật đen, theo tất cả mọi phương và gồm tất cả các độ dài sóng. Năng lượng này chính là năng suất phát xạ toàn phần R .



Năng lượng bức xạ phát ra bởi một đơn vị diện tích trên bề mặt vật đen trong một đơn vị thời gian giới hạn trong một hình nón sơ cấp góc khối $d\omega$ là gồm tất cả các độ dài sóng từ 0 tới ∞ (là $dW = E dS \cos i d\omega = E \cos i d\omega$. Xét chùm tia giới hạn giữa hai hình nón có trục là pháp tuyến AN, các nửa góc ở đỉnh là i và $i + di$, góc khối của chùm tia này là :

$$d\omega = \frac{2\pi \cdot MH \cdot MM'}{R^2} = 2\pi \sin i \cdot di$$

Vậy $dW = 2(E \cdot \cos i \sin i \cdot di)$.

Năng suất phát xạ toàn phần là :

$$R = 2\pi E \int_0^{\pi/2} \cos i \cdot \sin i \cdot di = E\pi \int_0^{\pi/2} \sin 2i \cdot di = \pi \cdot E$$

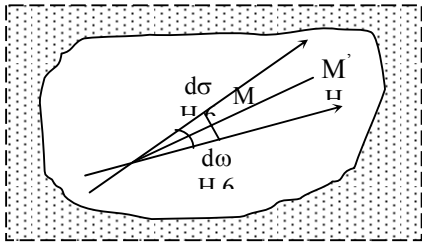
$$\boxed{R = \pi \cdot E} \quad (7.2)$$

Tương tự ta cũng chứng minh được hệ thức liên hệ giữa số phát xạ đơn sắc R(và hệ số chói năng lượng đơn sắc E(của vật đen.

$$R_\lambda = \pi \cdot E_\lambda \quad (7.3)$$

e/ Mật độ năng lượng.

Trong các khảo sát hiện tượng phát xạ của một vật, người ta còn dùng một đại lượng gọi là mật độ năng lượng.



Xét các độ dài sóng ở trong khoảng λ và $\lambda + d\lambda$. Năng lượng bức xạ mang bởi chùm tia hình nón sơ cấp có góc khối $d\omega$, phương trung bình MM' , đi qua diện tích $d\sigma$ (xung quanh điểm M và thẳng góc với MM')... trong một đơn vị thời gian là $E_\lambda \cdot d\sigma \cdot d\omega \cdot d\lambda$. Trong một thời gian dt , đoạn truyền của bức xạ là $C \cdot dt$. Năng lượng đi qua diện tích $d\sigma$ là $E_\lambda \cdot d\sigma \cdot d\omega \cdot d\lambda \cdot dt$ chiếm một thể tích là $C \cdot dt \cdot d\sigma$. Vậy năng lượng bức xạ trong một đơn vị thể tích là :

$$\frac{E_\lambda \cdot d\sigma \cdot d\omega \cdot d\lambda \cdot dt}{C \cdot dt \cdot d\sigma} = \frac{1}{C} E_\lambda \cdot d\omega \cdot d\lambda$$

Năng lượng bức xạ trong đơn vị thể tích này tính theo tất cả mọi phương là :

$$\frac{1}{C} E_\lambda \cdot d\lambda \int d\omega = \frac{4\pi}{C} E_\lambda \cdot d\lambda$$

Dấu tích phân lấy theo toàn thể không gian nên $\int d\omega = 4\pi$ Stêradian.

Đặt năng lượng này là : $U_\lambda \cdot d\lambda$

Vậy
$$\boxed{U_\lambda = \frac{4\pi}{C} E_\lambda} \quad (7.4)$$

U được gọi là mật độ năng lượng đơn sắc của vật đen. Năng lượng toàn phần chứa trong đơn vị thể tích trên (theo tất cả mọi phương và với tất cả các độ dài sóng từ 0 tới ∞) được gọi là mật độ năng lượng toàn phần U của vật đen. Ta có :

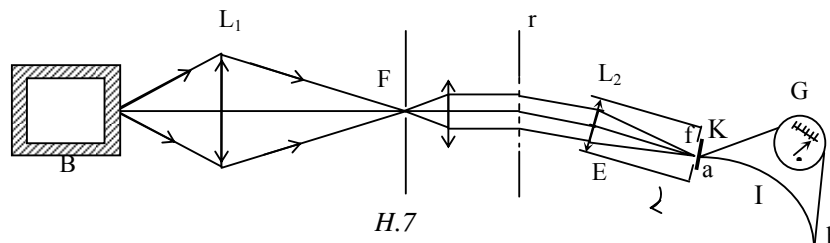
$$U = \int_0^\infty U_\lambda \cdot d\lambda = \frac{4\pi}{C} \int_0^\infty E_\lambda \cdot d\lambda = \frac{4\pi}{C} E$$

$$U = \int_0^\infty U_\lambda \cdot d\lambda = \frac{4\pi}{C} E$$

$$\boxed{U = \frac{4\pi}{C} E} \quad (7.5)$$

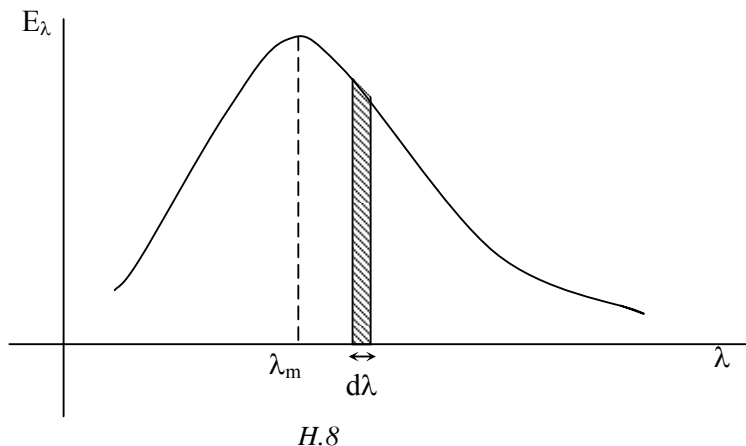
§§8. ĐƯỜNG ĐẶC TRƯNG PHỔ PHÁT XẠ CỦA VẬT ĐEN.

Ta đã biết bức xạ phát ra bởi một vật gồm nhiều đơn sắc, năng lượng phát ra ứng với mỗi đơn sắc không bằng nhau và được đặc trưng bởi hệ số chói năng lượng đơn sắc E_λ (hoặc R_λ hay U_λ). Đường cong biểu diễn sự biến thiên của E_λ theo bước sóng λ được gọi là đường đặc trưng phổ phát xạ của vật. Ta xác định được đặc trưng phổ phát xạ của vật đen bằng thí nghiệm sau.



Vật đen là lỗ A nhỏ của bình kín B. Bình B được giữ ở một nhiệt độ T không đổi mà ta cần khảo sát. Chùm tia bức xạ phát ra từ A được hội tụ vào khe F của ống chuẩn trực C nhờ một thấu kính hội tụ L_1 . Chùm tia ló song song đi ra từ ống chuẩn trực C được cho đi qua một cách tử r và bị tán sắc bởi cách tử. Trong cùng một quang phổ, các đơn sắc lệch theo các phương nhiều xạ khác nhau. Mỗi chùm tia nhiễu xạ được hội tụ tại khe f nhờ thấu kính hội tụ L_2 của ống E. Bằng cách quay ống E, ta có thể hội tụ chùm tia bức xạ có độ dài sóng λ tới $\lambda + d_\lambda$ vào khe f . Tại khe này, ta đặt một lá kim loại nhỏ k bôi đen để hấp thụ năng lượng bức xạ hội tụ ở khe f . Năng lượng này biến thành nhiệt năng làm tăng nhiệt độ ở k . Ta đo nhiệt độ của k bằng một cặp nhiệt điện I, đầu hàn a gắn với miếng kim loại k , đầu hàn b tiếp xúc với một nguồn lạnh. Sự chênh lệch nhiệt độ ở hai đầu hàn a và b tạo một dòng nhiệt điện và ta đo bằng một điện kế G rất nhạy. Đường cong biểu diễn sự biến thiên của độ chỉ trên điện kế G theo độ dài sóng của bức xạ phát ra bởi vật đen A chính là đường cong biểu diễn sự biến thiên của E_λ (hoặc R_λ hay U_λ) theo λ (hay chính là đường đặc trưng phổ phát xạ của vật đen (hình 8).

Bằng cách thay đổi nhiệt độ T của vật đen, ta vẽ được nhiều đường đặc trưng ứng với nhiều nhiệt độ khác nhau.

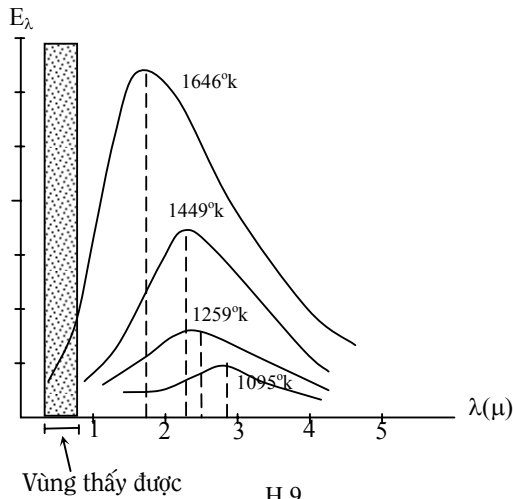


Diện tích gạch chéo trên đồ thị tỉ lệ với $E_\lambda d_\lambda$ do đó tỉ lệ với năng lượng bức xạ (gồm các độ dài sóng ở trong khoảng $(\lambda + d_\lambda)$ phát ra bởi một đơn vị diện tích của vật đen A, trong một đơn vị thời gian.

Diện tích giới hạn bởi đường đặc trưng và trục hoành tỉ lệ với năng lượng toàn phần, gồm tất cả các độ dài sóng từ 0 tới ∞ , phát ra bởi một đơn vị diện tích của bề mặt vật đen trong một đơn vị thời gian, nghĩa là tỉ lệ với năng suất phát xạ toàn phần R.

Nhận xét đường đặc trưng trên, ta thấy E_λ (hoặc R_λ hay U_λ) cực đại ứng với một độ dài sóng λ_m .

Các đường đặc trưng thay đổi theo nhiệt độ của vật đen như hình vẽ 9.



Nhận xét các đường này ta thấy:

- Năng suất phát xạ toàn phần R tăng rất nhanh theo nhiệt độ T của vật đen.
- Nhiệt độ của vật đen càng cao thì trị số của λ_m càng tiến về phía độ dài sóng ngắn.

§§9. ĐỊNH LUẬT STEFAN - BOLTZMANN.

Bằng thực nghiệm, năm 1879, Stefan đưa ra định luật :

Năng suất phát xạ toàn phần của vật đen tỉ lệ với lũy thừa bậc 4 của nhiệt độ tuyệt đối của vật.

$$R_{\text{vĩ}} = \sigma \cdot T^4 \quad (9.1)$$

Cơ sở lý thuyết của định luật này được Boltzmann thiết lập lên, dựa vào các lý thuyết trong nhiệt động lực học. Vì vậy định luật này được gọi là định luật Stefan - Boltzmann.

(được gọi là hằng số Stefan - Boltzmann.

Nếu R tính ra watt / m², T tính ra độ tuyệt đối thì (có trị số là:

$$\sigma = 5,672 \times 10^{-8}$$

Người ta đã áp dụng định luật Stefan vào sự bức xạ của mặt trời, một vật đen gần đúng và đo được nhiệt độ mặt trời T (5.950(k.

§§10. ĐỊNH LUẬT DỜI CHỖ CỦA WIEN.

Wien đã chứng minh được hàm số sau :

$$u_\nu = T^3 f(\nu/T) \quad (10.1)$$

Trong đó u_ν là mật độ năng lượng đơn sắc của vật đen ứng với tần số ν (T là nhiệt độ tuyệt đối của vật đen.

Cơ sở lý thuyết của định luật này đã được Wien xây dựng trên các lý thuyết của nhiệt động lực học và hiện tượng Doppler - Fizeau.

Ta có thể chuyển hàm số trên theo biến số (:

Năng lượng bức xạ chứa trong một đơn vị thể tích và gồm các bức xạ có độ dài sóng ở trong khoảng $(\lambda, \lambda + d\lambda)$ (hay trong khoảng tần số $(\nu, \nu + d\nu)$ là

$$du = u(\lambda) d\lambda \quad \text{mà } G$$

$u(\lambda)$ (hay $u(\nu)$ là mật độ năng lượng đơn sắc của vật đen ứng với độ dài sóng λ (hay tần số ν)).

Ta có (10.2)

Thế vào (10.1) ta được :

$$u_{\lambda} = -\frac{cT^3}{\lambda^2} f\left(\frac{c}{\lambda T}\right) = \frac{-cT^5}{(\lambda T)^2} f\left(\frac{c}{\lambda T}\right)$$

Đặt hàm $x = \frac{c}{\lambda T}$

Ta được $U(\lambda, T) = T^5 \cdot f(x)$ (10.3)

Ta nhận thấy nếu đặt $x = \frac{c}{\lambda T}$ và $x = f(x)$ rồi vẽ đường Co biểu diễn sự biến thiên của y theo x thì ứng với mỗi trị số của nhiệt độ T trong phương trình (10.3), ta có thể vẽ được đường biểu diễn của $u(\lambda)$ (theo λ suy ra từ đường Co. Định luật dời chỗ của Wien được phát biểu như sau :

Từ đường C biểu diễn sự biến thiên của $U(\lambda)$ (theo λ ở một nhiệt độ T ta có thể suy ra đường biểu diễn C' ứng với nhiệt độ T' bằng phép biến đổi x và $f(x)$

(u' và u ở đây là các trị số của $u(\lambda)$ ở các nhiệt độ T' và T , dùng nhằm với mật độ năng lượng toàn phần).

Ta suy ra kết quả đặc biệt ứng với độ dài sóng λ_m (tại độ dài sóng này, $u(\lambda)$ cực đại, nghĩa là $R(\lambda_m)$ và $E(\lambda_m)$ cực đại).

$$\lambda_m T = \text{hằng số} = 2897,1 \mu^{\circ}\text{K} \quad (10.4)$$

§§11. PHƯƠNG TRÌNH ĐƯỜNG ĐẶC TRƯNG CỦA WIEN VÀ CỦA RAYLEIGH - JEANS.

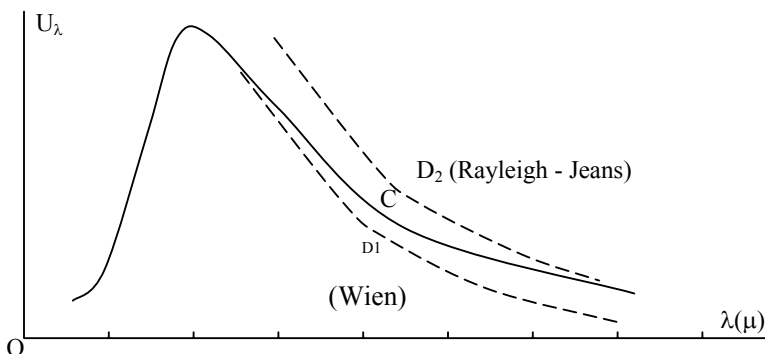
Các nhà nghiên cứu cố gắng tìm một công thức diễn tả đúng sự phân bố năng lượng bức xạ theo độ dài sóng mà người ta đã biết qua thực nghiệm. Nói cách khác, người ta cố gắng xây dựng một lý thuyết để giải thích đường đặc trưng của phổ bức xạ được vẽ nhờ thực nghiệm. Wien đã đề nghị công thức sau :

$$u_{\lambda} \cdot d\lambda = \frac{C_1 \cdot \lambda^{-5}}{e^{C_2/\lambda T}} d\lambda \quad (11.1)$$

Trong đó : u_{λ} là mật độ năng lượng đơn sắc ở khoảng rộng bên trong vật đen có nhiệt độ không đổi T .

T = nhiệt độ tuyệt đối

C_1 và C_2 là hai hằng số xác định nhờ thực nghiệm, được gọi là hằng số bức xạ thứ nhất và thứ hai. Công thức của Wien phù hợp với đường đặc trưng phổ bức xạ C vẽ được nhờ thực nghiệm về phía độ dài sóng ngắn, nhưng khi λ (lớn hơn λ_m thì không còn trùng nhau nữa (đường D1 trong hình 10). Ngoài ra, một nhược điểm quan trọng của công thức Wien là trong khi cố gắng xây dựng lý thuyết cho đường đặc trưng phổ bức xạ thì Wien lại chấp nhận trong phương trình của mình hai hằng số thực nghiệm.



H.10

Lý thuyết của Rayleigh và Jeeans chặt chẽ hơn. Hai ông cho rằng bức xạ điện từ phản chiếu đi lại nhiều lần bên trong khoảng rỗng của vật đen. Những bức xạ có phương truyền và độ dài sóng thích hợp với kích thước của khoảng rỗng hợp với các sóng phản xạ của chúng tạo thành một hệ thống sóng đứng. Có nhiều loại sóng đứng tùy theo trạng thái phân cực của chúng và tùy theo véc tơ sóng \vec{G} của bức xạ điện từ (Véc tơ sóng \vec{G} có phương là phương truyền của bức xạ và có suất \vec{G}). Vì hệ thống cân bằng về nhiệt nên năng lượng bức xạ bị hấp thụ bởi mặt trong của thành bình bằng với năng lượng bức xạ được phát ra bởi các nguyên tử của thành bình. Năng lượng trung bình của mỗi "loại" sóng đứng theo lý thuyết thống kê cổ điển là kT với k là hằng số Boltzmann.

Rayleigh tính được số loại sóng đứng trong một đơn vị thể tích của khoảng rỗng trong vật đen đối với dải độ dài sóng vi cấp $d\lambda$ (từ λ tới $\lambda + d\lambda$) là:

$$\boxed{dn_{\lambda} = \frac{8\pi}{\lambda^4} d\lambda} \quad (11.2)$$

Vậy năng lượng bức xạ ở trong một đơn vị thể tích này là :

$$u_{\lambda} \cdot d\lambda = 8\pi kT \frac{d\lambda}{\lambda^4} \quad (11.3)$$

Do đó mật độ năng lượng đơn sắc ứng với độ dài sóng λ là :

$$\boxed{u_{\lambda} = \frac{8\pi kT}{\lambda^4}} \quad (11.4)$$

Xét về phương diện lý thuyết thì dẫn giải của Rayleigh và Jeans chặt chẽ hơn công thức Wien nhưng công thức (11.4) chỉ phù hợp với đường đặc trưng thực nghiệm C ở khoảng độ dài sóng lớn, khi đi về phía λ nhỏ thì U_{λ} tiến tới ∞ (đường D2 trong H.10). Điều này mâu thuẫn trầm trọng với thực nghiệm. Người ta không tìm thấy một kẽ hở nào trong lý thuyết của Rayleigh và Jeans, và coi đây là một sự khủng hoảng về lý thuyết, không thể giải thích được trong một thời gian dài. Đó là sự khủng hoảng trong vùng tử ngoại.

§§12. LÝ THUYẾT PLANCK; SỰ PHÁT XẠ LƯỢNG TỬ.

Trước hết Planck nhận thấy nếu thêm -1 vào mẫu số của công thức Wien và điều chỉnh các hằng số C_1, C_2 thì được một công thức phù hợp với toàn thể đường đặc trưng phổ phát xạ của vật đen về được bằng thực nghiệm, đồng thời từ công thức đó, có thể suy ra công thức Rayleigh - Jeans khi xét các sóng λ lớn. Nhưng vậy chắc chắn công thức Rayleigh - Jeans có sự sai lầm. Mặt khác, Planck dò lại hết sức cặn kẽ lý luận của Rayleigh và Jeans nhưng không phát hiện được kẽ hở nào trong lý thuyết này. Hai yếu tố trên khiến Planck phải kết luận : khuyết điểm không phải nằm trong lý thuyết của Rayleigh mà nằm trong cơ sở của lý thuyết đó. Nghĩa là nằm trong các lý thuyết cổ điển. Rayleigh dựa trên lý thuyết cổ điển cho rằng năng lượng trung bình \bar{G} của mỗi loại sóng đứng là kT , Planck đi tính lại năng lượng trung bình này trên một cơ sở khác.

Theo quan điểm của Planck một vật bức xạ gồm một số rất lớn các vật dao động vi cấp, chấn động với mọi tần số. Những vật dao động vi cấp này là các nguồn phát ra bức xạ. Năng lượng trung bình \bar{G} của mỗi loại sóng đứng là năng lượng của các vật dao động vi cấp. Planck tính năng lượng này bằng cách lấy số vật dao động vi cấp ở cùng một mức năng lượng nhân với năng lượng ở mức đó, lập tổng các tích số này và chia cho tổng số các vật dao động vi cấp ở mọi mức.

Theo quan điểm cổ điển, năng lượng của các vật dao động vi cấp có thể có mọi trị số liên tục. Planck đã đưa ra một quan điểm rất cách mạng lúc bấy giờ là năng lượng của các

vật dao động vi cấp không phải có một chuỗi trị số liên tục, mà chỉ có thể có những trị số gián đoạn và là một bội số của năng lượng (ϵ). Xét các vật dao động vi cấp ở mức năng lượng $m\epsilon$ (m là một số nguyên). Số vật dao động vi cấp ở mức năng lượng này theo định luật phân bố Boltzmann là

$$n_m = n_0 \cdot e^{-m\epsilon/kT} \quad (12.1)$$

Năng lượng của n_m vật dao động là

$$m\epsilon n_m = m\epsilon n_0 e^{-m\epsilon/kT}$$

Năng lượng trung bình của một vật dao động là :

$$\bar{W} = \frac{\sum_{m=0}^{\infty} m\epsilon n_0 e^{-m\epsilon/kT}}{\sum_{m=0}^{\infty} n_0 e^{-m\epsilon/kT}}$$

Vì m là một số nguyên nên ta có :

$$\bar{W} = \frac{0 + \epsilon e^{-\epsilon/kT} + 2\epsilon e^{-2\epsilon/kT} + 3\epsilon e^{-3\epsilon/kT} + \dots}{1 + e^{-\epsilon/kT} + e^{-2\epsilon/kT} + e^{-3\epsilon/kT} + \dots}$$

Đặt $x = e^{-\epsilon/kT}$, ta có :

$$\bar{W} = \epsilon x \frac{1 + 2x + 3x^2 + \dots}{1 + x + x^2 + x^3 + \dots} \quad \text{vôùi } x < 1$$

$$\text{Hay } \bar{W} = \epsilon x \frac{1/(1-x)^2}{1/(1-x)} = \frac{\epsilon x}{1-x} = \frac{\epsilon}{(1/x)-1}$$

Vậy
$$\bar{W} = \epsilon x \frac{\epsilon}{e^{\epsilon/kT} - 1} \quad (12.2)$$

Năng lượng bức xạ ở trong một đơn vị thể tích của khoảng rỗng bên trong vật đen đó với dải độ dài sóng vi cấp $d\lambda$ (từ λ tới $\lambda + d\lambda$) là :

$$u_\lambda d\lambda = \bar{W} \cdot dn_\lambda = \frac{8\pi x}{\lambda^4} \cdot \frac{\epsilon}{e^{\epsilon/kT} - 1} \cdot d\lambda$$

$$u_\lambda d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^4} \cdot \frac{\epsilon}{e^{\epsilon/kT} - 1} \cdot d\lambda \quad (12.3)$$

Theo các lý thuyết cổ điển, năng lượng có thể có mọi trị số, liên tục, điều đó cũng có nghĩa là (có thể tiến tới số không, khi đó ta thấy lại kết quả G (áp dụng qui tắc Hospital để cắt dạng vô định của công thức (12.2) khi thể $\lambda \rightarrow 0$), nghĩa là phù hợp với công thức của Rayleigh. Để tránh sự khủng hoảng gây ra bởi công thức Rayleigh, Planck cho rằng (không thể bằng không, nó là năng lượng nhỏ nhất phát ra hay thu vào bởi vật dao động vi cấp và được gọi là lượng tử.

So sánh công thức đưa ra bởi Planck và công thức đề nghị bởi Wien (11.1) ta thấy tương tự nếu thừa nhận ($\lambda \rightarrow 0$ (chỉ khác nhau -1 ở mẫu số) và nếu lấy :

$$\frac{C_2}{\lambda^5} = \frac{\epsilon}{kT} \quad \text{hay} \quad \epsilon = \frac{C_2 k}{\lambda} = \frac{C_2 k}{C} \nu$$

c = vận tốc ánh sáng trong chân không
 ν = tần số chấn động của bức xạ phát ra.

Đặt hằng số h , ta thấy :

$$(12.4)$$

Thế (12.4) vào (12.3) ta được :

$$\epsilon = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$$

$$u_{\lambda} d\lambda = \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{hc/kT\lambda} - 1} d\lambda \quad (12.5)$$

Mật độ năng lượng đơn sắc là :

$$u_{\lambda} = \frac{8\pi hc \lambda^{-5}}{e^{hc/kT\lambda} - 1} \quad (12.6)$$

Suy ra độ chói năng lượng đơn sắc :

$$E_{\lambda} = \frac{2hc^2 \lambda^{-5}}{e^{hc/kT\lambda} - 1}$$

Công thức được gọi là công thức Planck, hoàn toàn phù hợp với đường đặc trưng C vẽ được bởi thực nghiệm (hình 10).

Hằng số h được gọi là hằng số Planck.

$$h = (6,6253 + 0,0003) \times 10^{-34} \text{ joule giây}$$

Vậy theo Planck, năng lượng của mỗi vật dao động phải là một bội số nguyên của tích số giữa hằng số h và tần số (của bức xạ mà nó phát ra.

Năng lượng của một vật dao động chỉ có thể thay đổi nhỏ nhất là:

$$\varepsilon = hv$$

Ta có thể từ công thức Planck tìm lại các định luật Stefan – Boltzmann, định luật Wien, công thức Rayleigh – Jeans khi (lớn. Điều này xác định sự đúng đắn của giả thuyết Planck về lượng tử.

Khái niệm về lượng tử được Planck đưa ra năm 1900, lúc đầu chỉ nhằm mục đích cố gắng giải thích hiện tượng bức xạ nhiệt của vật đen. Nhưng ta sẽ thấy, phát kiến táo bạo và nổi tiếng này của Planck đã dẫn tới những chuyển biến mạnh trong ngành vật lý.

§§13. BỨC XẠ NHIỆT CỦA VẬT THỰC.

Theo định luật Kirchhoff, ta có :

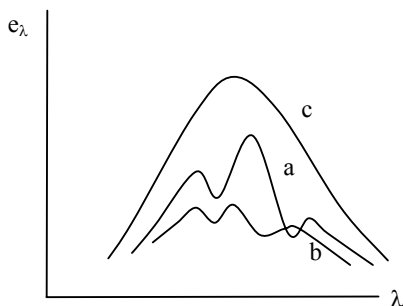
$$e(\lambda, T) = R(\lambda, T) \quad \text{hay} \quad R(\lambda, T) < R_{\text{vđ}}(\lambda, T)$$

Ở cùng một nhiệt độ và xét cùng một độ dài sóng, hệ số phát xạ đơn sắc của một vật thực (không đen) bao giờ cũng nhỏ hơn hệ số phát xạ đơn sắc của vật đen.

$$\text{Mà} \quad R < R_{\text{vđ}} \quad \text{suy ra} \quad : \quad R < R_{\text{vđ}}$$

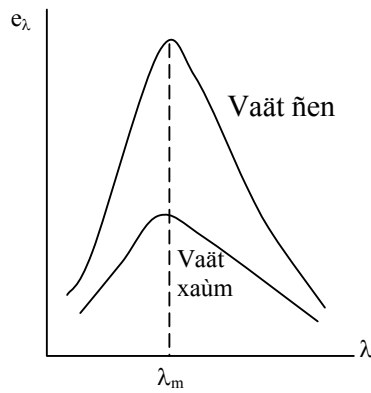
Nghĩa là năng suất phát xạ toàn phần của vật thực cũng phải nhỏ hơn năng suất phát xạ toàn phần của vật đen.

Ta cũng có thể khảo sát sự phân bố năng lượng trong phổ bức xạ của một vật thực bằng phương pháp giống như khi khảo sát sự bức xạ của vật đen, nhưng trong trường hợp này đường đặc trưng tùy thuộc bản chất của vật thực. Trong hình vẽ 11 đường a và b là các

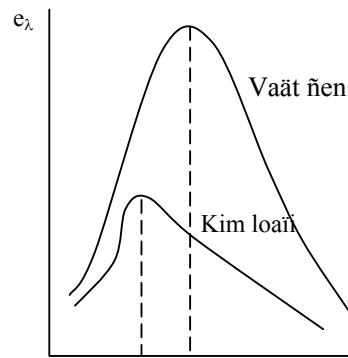


đường đặc trưng phổ phát xạ của hai vật thực A và B ở cùng nhiệt độ nhưng làm bằng hai chất khác nhau. Đường C là đường đặc trưng phổ phát xạ của vật đen.

Những vật thực có hệ số hấp thụ a(thay đổi không đáng kể theo độ dài sóng (a(= a, hằng số đối với độ dài sóng) nên độ chói năng lượng đơn sắc e(tỉ lệ với độ chói E(của vật đen ứng với cùng một độ dài sóng và cùng một nhiệt độ: e??= aE?. Trong trường hợp này sự phân bố năng lượng trong phổ phát xạ giống như sự phân bố trong phổ của vật đen (hình 12) và vật được gọi là vật xám, thí dụ trường hợp carbon.



H.12



H.13

Trong trường hợp các kim loại, đường phân bố năng lượng trong phổ phát xạ có dạng tương tự như trường hợp vật đen nhưng đỉnh nhọn dịch chuyển thường là về phía độ dài sóng ngắn, đối với đường đặc trưng phổ phát xạ của vật đen ở cùng một nhiệt độ (hình 13).

Với các vật đen, năng suất phát xạ toàn phần R_{vd} tuân theo định luật Boltzmann.

$$R_{vd} = \sigma T^4$$

Với các vật thực thì năng suất phát xạ toàn phần R phải nhỏ hơn .

$$R < R_{vd} \text{ hay } R < \sigma T^4$$

Ta đặt $R = b \sigma T^4$

b được gọi là độ đen của vật, có trị số tùy thuộc tính chất và nhiệt độ của vật và luôn luôn nhỏ hơn một ($b < 1$).

Nếu ta xét nhiệt độ T' của một vật đen có năng suất phát xạ toàn phần bằng năng suất phát xạ của một vật thực ở nhiệt độ T thì T' được gọi là nhiệt độ bức xạ của vật thực.

$$\text{Ta có : } \sigma T'^4 = b \sigma T^4$$

Suy ra nhiệt độ thực của vật thực là :

$$T = \frac{T'}{\sqrt[4]{b}} \quad (13.2)$$

Như vậy nếu xác định được nhiệt độ bức xạ T' của vật thực, ta suy ra được nhiệt độ thực T của nó nếu biết độ đen b .

§§14. HỎA KẾ QUANG HỌC.

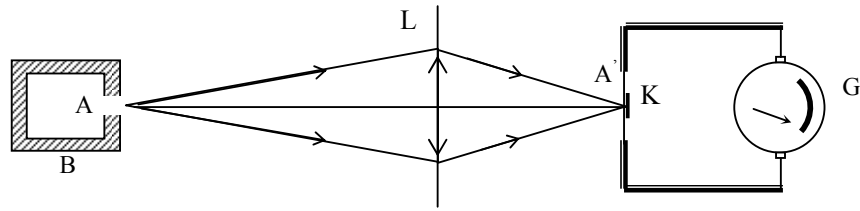
Hỏa kế quang học dùng để đo các nhiệt độ cao, thí dụ nhiệt độ một vật nung đỏ, nhiệt độ lò luyện kim.... Với các nhiệt độ cao như vậy người ta không thể xác định bằng các phương pháp thông thường.

Sau đây là hai kiểu quang hỏa kế chủ yếu.

* Quang hỏa kế bức xạ toàn phần.

Loại quang hỏa kế này đo công suất phát xạ toàn phần của vật đen, thí dụ cửa sổ một lò luyện kim và ứng dụng định luật Stefan để suy ra nhiệt độ của vật.

Dưới đây là sơ đồ của một loại quang hỏa kế kiểu này.

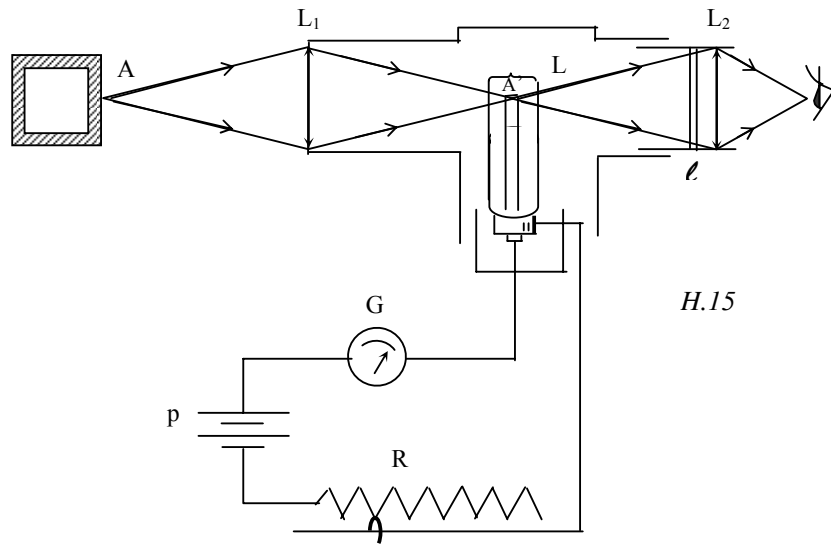


H.14

Thấu kính L trong suốt đối với mọi đơn sắc, hội tụ chùm tia bức xạ phát ra từ nguồn A (đóng vai trò của vật đen) vào một đĩa nhỏ k bằng bạc bôi đen. Độ chói của ảnh A' trên đĩa k bằng độ chói của nguồn A. Nhiệt độ của đĩa k được đo bằng một cặp nhiệt điện và một điện kế G có độ nhạy lớn. Nhiệt độ này tỷ lệ với độ chói của ảnh A', do đó tỷ lệ với độ chói của vật đen A. Bằng một bảng đo mẫu nhiệt độ có sẵn, ta suy ra nhiệt độ của A bằng cách đọc độ chỉ trên điện kế G.

Nếu A không phải vật đen thì nhiệt độ đo được chỉ là nhiệt độ bức xạ T' của vật. Nhiệt độ thực của A là $T = \frac{T'}{b}$ với b là độ đen của A.

* Quang hóa kế đơn sắc.



Thấu kính L1 của quang hóa hội tụ chùm tia sáng phát ra từ nguồn A, tạo thành một ảnh A' nằm trong mặt phẳng của dây tóc bóng đèn L. Bản (là một kính lọc màu chỉ cho màu đỏ lân cận độ dài sóng, thí dụ 0,66(, đi qua. Khi quan sát ta thấy ảnh của dây tóc bóng đèn nằm trên một nền, sáng hơn hoặc tối hơn, đó là ảnh của A. Điều chỉnh biến trở R cho tới khi ta thấy ảnh của dây tóc bóng đèn biến mất trên nền đỏ ảnh của A. Khi đó độ chói của nguồn bức xạ A và của dây tóc bóng đèn bằng nhau ở các độ dài sóng lân cận 0,66(. Đọc độ chỉ trên điện kế G và nhờ một bảng đo mẫu có trước, ta suy ra nhiệt độ của nguồn bức xạ A.

Nếu nguồn bức xạ A là vật đen thì nhiệt độ đo được là nhiệt độ thực của A.

Nếu A không phải là vật đen thì nhiệt độ đo được Ta không phải là nhiệt độ thực của A (vì khi đo mẫu, ta dùng các vật đen). Ta được gọi là nhiệt độ chói ứng với độ dài sóng được khảo sát. Nhiệt độ Ta được đọc trên bảng đo mẫu (thực hiện với các vật đen) nên nó chính là nhiệt độ của vật đen có độ chói bằng độ chói của vật thực A. Nếu gọi T là nhiệt độ thực của A ta có :

$$e_{\lambda, T} = E_{\lambda, T_a}$$

Với các nhiệt độ nhỏ hơn 3000o và với ánh sáng thấy được ta có thể dùng công thức đơn giản của Wien thay cho công thức Planck.

Vậy : \hat{c} với $C_1 = 2hc^2$

$$C_2 = \frac{hc}{k}$$

$$\text{Suy ra : } \text{Log } a_{\lambda, T} + \frac{C_2}{\lambda} \left(\frac{1}{T_a} - \frac{1}{T} \right) = 0$$

Từ đó suy ra nhiệt độ thực của A

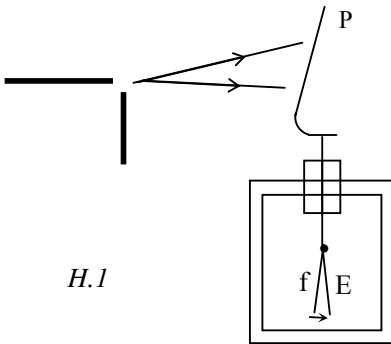
$$T = \frac{T_a}{1 + \frac{k\lambda}{hc} T_a \cdot \text{Log } a_{\lambda, T}}$$

Thí dụ đối với vật bức xạ là một sợi dây tungsten nung tới 2000ok thì nhiệt độ chói ứng với độ dài sóng 6650 Ao vào khoảng 1860ok.

Chương IX

HIỆN TƯỢNG QUANG ĐIỆN

§§1. THÍ NGHIỆM CĂN BẢN.



Dùng một bản P bằng kẽm và gắn với một bình điện nghiệm như hình vẽ. Tích điện vào bình. Rọi vào bản P một chùm tia sáng giàu tia tử ngoại, ta thấy kết quả như sau :

Nếu bình điện nghiệm được tích điện dương thì sự chiếu sáng trên không gây ra một tác dụng nào đối với điện tích của bình : f vẫn tách khỏi E như cũ.

Nếu bình điện nghiệm được tích điện âm, ta thấy f khép lại khá nhanh, chứng tỏ điện tích của bình điện nghiệm, cũng như của bản P giảm đi và triệt tiêu : bình đã phóng điện.

Bây giờ lại tích điện âm vào bản P và bình điện nghiệm nhưng đặt giữa nguồn sáng và bản P một bản thủy tinh (bản này có tính chất hấp thụ tia tử ngoại). Ta thấy sự phóng điện không xảy ra : f và E vẫn đẩy nhau.

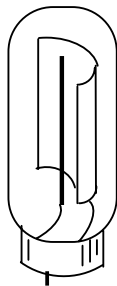
Từ thí nghiệm này, người ta kết luận :

Ánh sáng tử ngoại khi chiếu tới bản kẽm đã làm bật ra các electron ở bản P, do đó điện tích âm ở bản P và ở bình giảm đi và triệt tiêu.

Sự phóng thích electron gây ra bởi ánh sáng như vậy được gọi là hiệu ứng quang điện : các electron được phóng thích trong hiệu ứng này được gọi là quang điện tử. Hiệu ứng này được khám phá bởi Hertz năm 1887.

§§2. TẾ BÀO QUANG ĐIỆN.

Dụng cụ chính để khảo sát hiện tượng quang điện là tế bào quang điện. Đó là một bóng trong suốt không cản tia tử ngoại, bên trong bóng hầu như là chân không và gồm có :



- Một cathôđ C (bản âm cực) là một lớp kim loại tinh khiết mà ta muốn khảo sát.

- Một anôđ A (bản dương cực) là một thanh kim loại (có thể là một vòng kim loại).

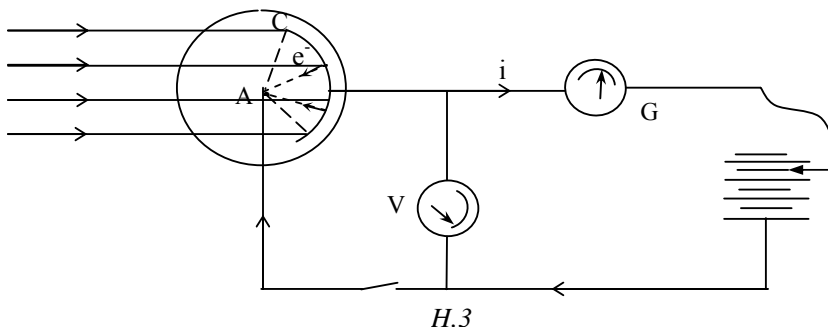
Anôđ A được nối với một điện thế cao hơn điện thế ở cathôđ C.

Do đó khi rọi vào cathôđ một chùm tia sáng thích hợp, làm bật ra các electron thì những electron này sẽ bị hút về phía anôđ tạo thành một dòng electron di chuyển.

§§3. KHẢO SÁT THỰC NGHIỆM – CÁC ĐỊNH LUẬT.

Dòng electron di chuyển tạo thành trong mạch (hình vẽ) một dòng điện i có cường độ rất yếu, gọi là dòng quang điện. Để đo dòng điện này ta phải dùng một điện kế G rất nhạy. Một volt kế V để đo hiệu điện thế giữa anod A và cathod C .

Từ thí nghiệm trên ta suy ra các định luật sau :



* Định luật 1:

Đối với một kim loại tinh chất hiện tượng quang điện chỉ xảy ra nếu tần số của ánh sáng kích thích lớn hơn một trị số (λ_0 tùy thuộc tính chất của bản C).

Nói cách khác, hiệu ứng chỉ xảy ra nếu độ dài sóng của ánh sáng kích thích nhỏ hơn trị số (λ_0). Độ dài sóng (λ_0 được gọi là thêm quang điện hay thêm kích thích. Dưới đây là thêm quang điện đối với một số kim loại tinh chất.

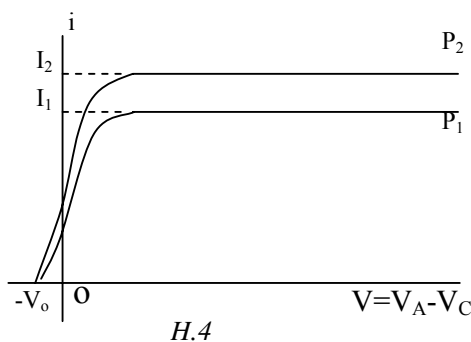
Kim loại	K	Ca	Zn	Cu	Ag		
λ_0		0,55	0,45	0,37	0,29	0,27	(μ)

Trị số của (λ_0 sẽ thay đổi trong kim loại có lẫn tạp chất.

Trong trường hợp độ dài sóng (λ của ánh sáng kích thích lớn hơn (λ_0 ta không thể gây ra hiệu ứng dù chùm tia sáng có cường độ rất mạnh.

* Định luật 2 :

Bây giờ ta dùng một chùm tia sáng kích thích có công suất bức xạ không thay đổi và thay đổi hiệu điện thế V giữa anod và cathod, ghi cường độ i của dòng quang điện ứng với mỗi trị số của V , ta vẽ được đường biểu diễn sự biến thiên của i theo V . Ta thấy lúc đầu i tăng theo V nhưng khi V tới một trị số nào đó thì cường độ dòng quang điện giữa nguyên một trị số I được gọi là cường độ bão hòa, lúc đó tất cả electron được phóng thích khỏi c trong một đơn vị thời gian đều bị hút về anod trong cùng thời gian đó.



Khi dùng các chùm tia kích thích có cùng độ dài sóng nhưng có công suất bức xạ khác nhau : P_1, P_2, \dots ta thấy các đường biểu diễn i theo V có cùng dạng tổng quát nhưng có các trị số cường độ bão hòa khác nhau I_1, I_2, \dots (hình 4)

Thí nghiệm cho thấy :

$$\frac{I_1}{P_1} = \frac{I_2}{P_2} = \dots = \text{hằng số}$$

Ta có định luật 2 như sau :

- Cường độ dòng điện bão hòa (hay cường độ phát xạ quang điện từ bởi cathod) tỉ lệ với công suất bức xạ nhận được bởi cathod.

Định luật này được gọi là định luật Stôlêtôp.

* Định luật 3 :

Quan sát các đường biểu diễn i theo v , ta thấy với cùng một độ dài sóng của ánh sáng kích thích, dòng quang điện i triệt tiêu khi v có một trị số âm $-V_0$. Với hiệu điện thế này, điện trường cản trở chuyển động của electron, vận tốc electron giảm dần khi tiến về anod. Vì i triệt tiêu, nên ngay với các electron có vận tốc lớn nhất (lúc bật ra khỏi cathod) vận tốc của nó cũng bị triệt tiêu bởi điện trường giữa anod và cathod trước khi nó đi tới A.

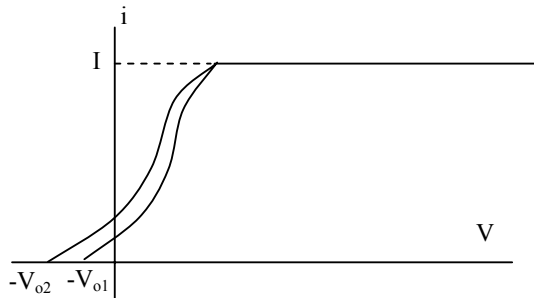
Ta có : \hat{c}

Trong đó :

- VM = vận tốc lớn nhất của electron lúc bật ra khỏi cathod
- e = điện tích của electron (giá trị tuyệt đối)
- m = khối lượng của electron

Vậy : \hat{c} (2.1)

Trị số tuyệt đối V_0 được gọi là điện thế dừng.



Nhận xét công thức (2.1) ta thấy động năng cực đại của electron chỉ tùy thuộc vào V_0 mà không tùy thuộc vào công suất bức xạ của chùm tia rọi tới cathod (thực nghiệm chứng tỏ V_0 không tùy thuộc công suất bức xạ của chùm tia kích thích, hình 4). Nhưng nếu ta thực hiện thí nghiệm với các bức xạ có tần số khác nhau, giả sử $(2 > 1)$ và giữ công suất bức xạ không đổi, các đường biểu diễn i theo V như sau:

Ta có : $V_{02} > V_{01}$

Định luật 3 được phát biểu như sau :

- Động năng cực đại của electron bật ra khỏi kim loại ở cathod thì độc lập đối với công suất bức xạ chiếu tới cathod và là một hàm đồng biến của tần số bức xạ kích thích.

Định luật 3 còn được gọi là định luật Einstein (Anhsthanh)..

§§4. SỰ GIẢI THÍCH CỦA EINSTEIN - THUYẾT LƯỢNG TỬ ÁNH SÁNG.

Thuyết sóng điện từ về ánh sáng đã tỏ ra bất lực khi cố gắng giải thích các định luật trong hiệu ứng quang điện. Theo thuyết này nếu chùm tia sáng kích thích có công suất bức xạ càng lớn thì năng lượng nó cung cấp cho electron ở cathod C càng nhiều, do đó với một chùm tia, dù độ dài sóng là bao nhiêu, nếu có cường độ đủ mạnh thì sẽ gây ra được hiệu ứng quang điện. Điều này mâu thuẫn với định luật về thềm quang điện. Hơn nữa, nếu công suất bức xạ của chùm tia sáng kích thích càng lớn thì động năng ban đầu cực đại của electron cũng phải càng lớn, điều này cũng không phù hợp với thực nghiệm cho thấy động năng cực đại này độc lập đối với công suất bức xạ.

Để giải thích hiệu ứng quang điện, năm 1905, Einstein đưa ra thuyết lượng tử ánh sáng. Như ta đã biết, thuyết lượng tử được Planck nêu ra để giải thích hiện tượng bức xạ của vật đen. Nhưng Planck cho rằng chỉ áp dụng cho nguồn dao động bức xạ và với bức xạ ở trong vùng lân cận nguồn mà thôi, còn khi truyền đi trong không gian thì vẫn tuân theo các định luật của lý thuyết điện từ cổ điển.

Einstein khai triển thuyết của Planck, áp dụng thuyết lượng tử cho bức xạ trong toàn không gian và thời gian. Những nét chính của thuyết lượng tử ánh sáng như sau : ánh sáng gồm những hạt rất nhỏ gọi là quang tử hay photon. Mỗi photon mang một năng lượng là $h\nu$ (= $h\omega$), trong đó h là hằng số Planck, ν (ω) là tần số của ánh sáng. Với cùng một đơn sắc thì các photon đều giống nhau. Ở trong chân không, tất cả mọi photon ứng với tất cả mọi đơn sắc, đều truyền đi với cùng một vận tốc là c (3×10^8 m/s). Cường độ của một chùm ánh sáng thì tỉ lệ với số photon đi qua một đơn vị diện tích trong một đơn vị thời gian.

Dựa vào thuyết này, Einstein đã giải thích được các định luật của hiệu ứng quang điện.

* Giải thích định luật 1:

Các photon mang năng lượng $h\nu$ đập vào cathod C, truyền năng lượng này cho electron ở cathod. Tác dụng giữa photon và electron có tính cách cá nhân, nghĩa là giữa một photon và một electron. Muốn làm electron bật ra khỏi cathod để có thể gây ra dòng quang điện thì ít nhất năng lượng $h\nu$ (phải bằng công suất W_0 để bứt rời electron khỏi kim loại.

$$h\nu \geq W_0$$

W_0 tùy thuộc tính chất của kim loại.

Vậy tần số của ánh sáng kích thích phải lớn hơn một trị số ν_0 hay độ dài sóng phải nhỏ hơn một trị số λ_0

$$\nu > \nu_0 \quad (\text{thềm quang điện})$$

* Giải thích định luật 2:

Giữ công suất phát xạ của chùm tia kích thích không đổi, tăng hiệu điện thế V , số electron bị hút về anod trong một đơn vị thời gian tăng lên, do đó dòng quang điện i tăng. Khi V lớn hơn một trị số nào đó, tất cả electron bắn ra khỏi cathod trong một đơn vị thời gian đều bị hút về anod trong cùng thời gian đó. Vì vậy dù tăng V nữa, số electron tới anod trong một đơn vị thời gian không thể tăng thêm, dòng quang điện i đạt tới trị số bão hòa.

Khi tăng công suất của chùm tia kích thích, nghĩa là tăng số photon đập vào cathod, ta đã làm cho số electron bị bắn ra khỏi cathod tăng lên, số electron này tỉ lệ với số photon tác dụng vào cathod C. Vậy cường độ phát xạ quang điện từ (hay cường độ bão hòa của dòng quang điện) tỉ lệ với công suất của chùm tia kích thích.

- Giải thích Định luật 3:

Electron bắn ra khỏi cathod có thể có các vận tốc khác nhau. Với các electron ở trên bề mặt của cathod C, năng lượng $h\nu$ của photon gồm một phần W_0 để bứt electron khỏi kim loại, một phần còn lại chuyển thành động năng của electron. Động năng của electron này lớn nhất. Ta có:

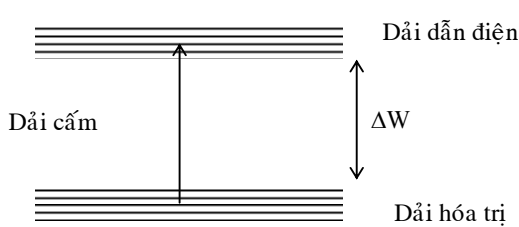
$$h\nu = W_0 + \frac{1}{2}mV_M^2 \quad (4.1)$$

Với các electron nằm bên trong lớp kim loại dùng làm cathod, động năng của nó khi thoát khỏi cathod sẽ nhỏ hơn, vì một phần năng lượng bị mất đi do sự đụng với các nguyên tử kim loại khi đi ra tới bề mặt của cathod. Với các electron này ta có :

$$h\nu > W_0 + \frac{1}{2}mv^2 \quad (4.2)$$

Xét công thức (4.1) ta thấy, với cùng một kim loại, động năng cực đại \tilde{G} của electron ($ECM = h\nu - W_0$) tăng theo tần số của ánh sáng kích thích và không tùy thuộc công suất của chùm tia này.

§§5. HIỆU ỨNG QUANG ĐIỆN TRONG.



Hiện tượng ta khảo sát trên được gọi là hiệu ứng quang điện ngoài: khi ta rọi tới một kim loại một chùm tia sáng có độ dài sóng thích hợp, các photon làm bật ra từ bề mặt kim loại những electron. Ta còn có thể nhận thấy hiệu ứng quang điện trong các chất bán dẫn. Một photon có thể làm cho một electron của chất bán dẫn nhảy từ dải hóa trị lên dải dẫn điện. Muốn gây được tác

dụng vậy, năng lượng của photon phải lớn hơn khoảng cách năng lượng (W giữa hai dải. Cũng như hiệu ứng quang điện ngoài, ta cũng có thêm quang điện đối với hiệu ứng quang điện trong. Ánh sáng muốn gây ra được hiệu ứng này thì tần số của nó phải lớn hơn một trị số là

$$V_o = \frac{\Delta W}{h}$$

hay độ dài sóng phải nhỏ hơn một trị số là

$$\lambda_o = \frac{c}{V_o} = \frac{hc}{\Delta W}$$

kết quả là độ dẫn điện của chất khảo sát tăng lên.

§§6. VÀI DỤNG CỤ QUANG ĐIỆN.

1. Tế bào quang điện.

Trong khi khảo sát về hiệu ứng quang điện, ta đã đề cập tới loại tế bào quang điện chân không nghĩa là bên trong tế bào được hút hết tất cả các chất khí, coi như chỉ là chân không. Loại tế bào quang điện này có độ nhạy rất yếu, vào cỡ 15 (A/m (độ nhạy ở đây được định nghĩa là tỷ số giữa cường độ bão hòa, tính ra microampere, và quang thông rọi tới cathod, tính ra lumen).

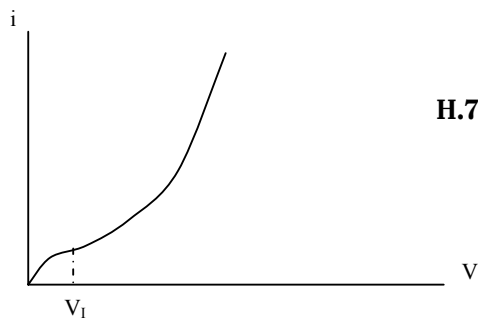
Ta cũng có thể dùng loại tế bào quang điện có khí, bên trong tế bào quang điện loại này có chứa một chất khí hiếm, thí dụ Argon, để tránh tác dụng với kim loại ở cathod.

Áp suất trong tế bào tốt nhất vào cỡ 0,1 mm Hg. Tham gia vào dòng quang điện, ngoài các electron sơ cấp bật ra từ cathod do các photon, ta còn có các electron thứ cấp sinh ra do :

- Sự đưng của electron sơ cấp với các nguyên tử khí hiếm.
- Sự đưng của các ion dương (sinh ra do sự đưng của electron sơ cấp với nguyên tử khí hiếm) với cathod.

Kết quả là số electron lao về anod đưng nhân lên gấp bội so với trường hợp tế bào quang điện chân không. Với loại tế bào quang điện có khí, độ nhạy có thể lên tới 100(A/m.

Khi thực hiện loại tế bào quang điện có khí, áp suất trong tế bào phải thích hợp. Nếu áp suất yếu quá, sự đưng giữa electron sơ cấp và các nguyên tử khí ít xảy ra. Nếu áp suất quá cao, mật độ nguyên tử khí hiếm lớn, do các sự đưng dọc đường (không gây ra sự ion hóa nguyên tử khí hiếm), các electron khó đạt tới động năng cần thiết để bứt được điện tử khỏi nguyên tử khí hiếm.

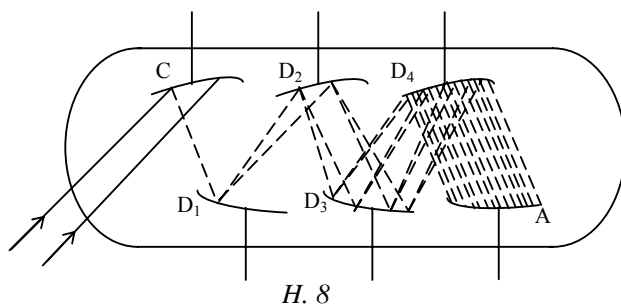


Đường biểu diễn sự biến thiên cường độ dòng quang điện i theo hiệu số điện thế V giữa anod và cathod trong trường hợp tế bào quang điện có khí như hình vẽ 7. Khi V nhỏ hơn điện thế ion hóa V_1 của chất khí, 15V đối với Argon, đường cong có dạng tương tự trường hợp tế bào quang điện chân không (bề lõm quay xuống), khi V tiến tới V_1 , cường độ i gần như bão hòa. Khi V vượt trị số V_1 thì i lại tăng lên (do sự tham gia của các electron thứ cấp sinh ra do các sự đưng), đường biểu diễn có bề lõm quay về phía trên.

Hiệu điện thế sử dụng không đưng quá cao để tránh sự phóng điện trong chất khí.

2. Máy nhân quang điện.

Máy nhân quang điện là một loại tế bào quang điện chân không phức tạp, trong đó số quang điện tử phát ra từ cathod đưng nhân gấp bội do hiện tượng phát điện tử thứ cấp.



Hình vẽ 8 mô tả đơn giản một máy nhân quang điện.. Bên trong ống là chân không và gồm có: một cathod C, nhiều dương cực phụ D1, D2, D3 ... có điện thế cao dần gọi là các dynod và một anod A có điện thế cao nhất.

Các photon đập vào cathod làm bắn ra từ điện cực này các electron. Đó là sự phát điện tử sơ cấp. Các điện tử sơ cấp này đưng hướng dẫn đập vào dynod D1, lại làm bắn ra các electron từ dynod này, đó là hiện tượng phát điện tử thứ cấp. Các điện tử phát ra từ D1 lại

được hướng dẫn đập vào dynod D2 gây ra sự phát điện tử thứ cấp kế tiếp ... Cứ như vậy số điện tử được nhân lên gấp bội trước khi đến anod A.

Ở các hiệu điện thế thường dùng (hiệu điện thế giữa các dynod thường dùng vào khoảng 80 volt tới 120 volt), các electron khi đập vào các dynod có những năng lượng lớn hơn năng lượng của photon nhiều. Sự phát ra điện tử thứ cấp tùy thuộc chất làm dynod, năng lượng của điện tử sơ cấp, góc tới của các điện tử này...

Gọi d là hệ số phát điện tử thứ cấp trung bình của các dynod (hệ số phát điện tử thứ cấp được định nghĩa là tỷ số giữa số điện tử thứ cấp phát ra và số điện tử sơ cấp đập vào dynod). N là số điện tử tới dynod thứ nhất, số điện tử tới anod là : Ndn

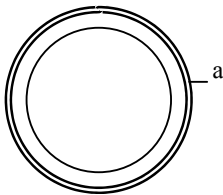
Với n là số dynod của máy. Với năng lượng điện tử sơ cấp đập vào dynod vào khoảng 700 eV tới 900 eV, trị số của d có thể lên tới trên 10. Thí dụ hợp kim AgMg, $d = 15$ (cực đại) khi năng lượng điện tử sơ cấp vào khoảng 300 eV. Ngoài ra ta thừa nhận d tỷ lệ với hiệu điện thế V_0 giữa hai dynod liên tiếp ($d = k \cdot V_0$, k : hằng số).

Với một máy nhân quang điện thông thường, số điện tử tới anod có thể gấp triệu lần số điện tử tới dynod thứ nhất ($dn = 10^6$)

Do đó cường độ dòng quang điện rất lớn so với trường hợp một tế bào quang điện chân không đơn giản.

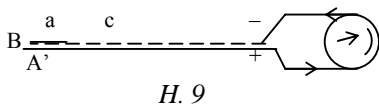
3. Pin quang điện.

Pin quang điện còn gọi là tế bào lớp dùng, là một áp dụng của hiệu ứng quang điện trong khi một chất bán dẫn như germanium hay selenium, tiếp xúc với một kim loại thích hợp thì có thể phát sinh một sức điện động khi được chiếu sáng. Sơ đồ cấu tạo của một pin quang điện bán dẫn kim loại như hình vẽ 9.



B là lớp bán dẫn tiếp xúc với một bản kim loại A thích hợp, a là một vành kim loại tiếp xúc với một lớp vàng C rất mỏng để ánh sáng đi qua được.

Vành a và bản kim loại A đóng vai trò hai điện cực của máy phát quang điện. Khi rọi ánh sáng vào lớp bán dẫn qua lớp C, ta được một dòng quang điện i theo chiều như trên hình vẽ.



H. 9

Một yếu tố rất thuận lợi của Pin quang điện là không cần một nguồn cung cấp điện thế như các loại tế bào quang điện mô tả ở trên, đồng thời có độ nhạy khá lớn, cỡ vài trăm (A/lumen).

Hiệu ứng quang điện có nhiều ứng dụng quan trọng trong đời sống hàng ngày cũng như trong các phòng thí nghiệm. Các tế bào quang điện, pin quang điện, máy nhân quang điện ... được dùng trong các phép đo quang học cần sự chính xác cao, trong các mạch tự động, ... một ứng dụng quan trọng và có nhiều triển vọng là biến đổi quang năng của ánh sáng mặt trời, một nguồn năng lượng vô hạn, thành điện năng để phục vụ đời sống.

§§7. LÝ THUYẾT VỀ PHOTON.

Ta đã thấy, để giải thích hiệu ứng quang điện, Einsteins đã khai triển thuyết lượng tử của plack và đưa vào thuyết photon, cho rằng năng lượng ánh sáng được tập trung trong những hạt nhỏ gọi là photon hay quang tử. Như vậy, song song với bản chất sóng, chúng ta đã chấp nhận bản chất hạt của ánh sáng, tuy nhiên đây không phải là những hạt cơ học đơn giản như quan niệm của Newton mà có những thuộc tính riêng của nó.

Một chùm ánh sáng đơn sắc có tần số ν (gồm vô số các hạt photon, mỗi hạt có một năng lượng là $h\nu$, trong đó h là hằng số planck.

Mỗi một đơn sắc ứng với một loại photon có năng lượng nhất định. Trong chân không, tất cả các loại photon đều truyền đi với vận tốc C (300.000 km/giây, nhưng trong một môi trường khác, photon của mỗi đơn sắc lại có một vận tốc truyền riêng

$$V_{\nu} = \frac{C}{n}$$

Theo thuyết tương đối, giữa khối lượng m và năng lượng W của một vật, có hệ thức liên lạc $W = mc^2$. Vậy khối lượng của photon là :

$$m = \frac{W}{C^2} = \frac{h\nu}{C^2}$$

Động lượng của photon có trị số là :

$$p = mc = \frac{h\nu}{C} = \frac{h}{\lambda}$$

hay: \vec{G} (là \vec{G} vectơ sóng, song song với phương truyền sáng và có G)

Ngoài ra theo thuyết tương đối, một vật có khối lượng tĩnh m_0 (khối lượng khi đứng yên) thì khi chuyển động với vận tốc V có khối lượng là :

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{V}{C}\right)^2}}$$

Với photon, ta có $v = c$. Như vậy nếu photon có m_0 ($\neq 0$) thì phải có $m = \infty$.

Điều này trái với thực tế. Vậy ta phải công nhận photon là một loại hạt đặc biệt có khối lượng tĩnh $m_0 = 0$. Hay ta cũng có thể nói khi một photon bị ngừng lại thì lập tức tất cả năng lượng $W = mC^2$ của nó chuyển cho một vật khác (giả sử trong trường hợp hấp thụ hoàn toàn) và photon đó hết tồn tại.

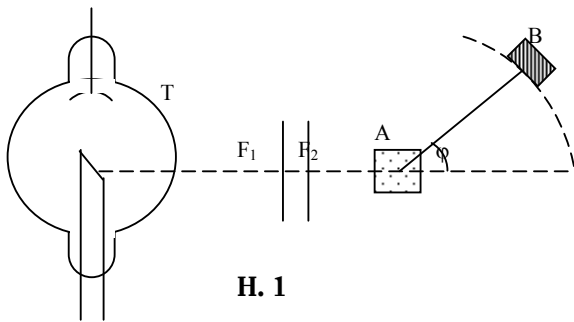
Chương X

HIỆU ỨNG COMPTON

§§1. KHẢO SÁT THỰC NGHIỆM.

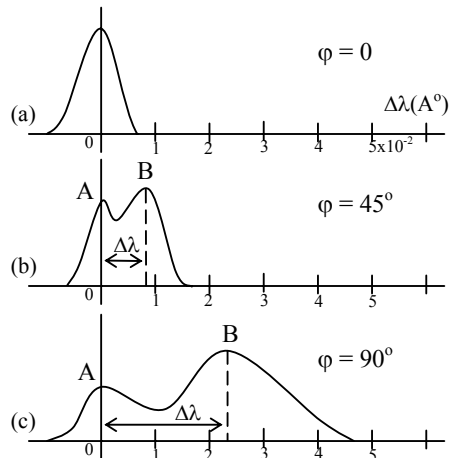
Là một hiện tượng nổi bật về bản tính hạt của ánh sáng. Hiện tượng này được khảo cứu đầu tiên bởi Compton vào năm 1923, khi ông nghiên cứu sự khuếch tán (háy tán xạ) tia X bởi graphit (than chì). Khi cho một chùm tia x có độ dài sóng λ (đi qua một khối graphit, chùm tia bị khuếch tán. Khi khảo sát chùm tia khuếch tán ở một góc khuếch tán ϕ (nhờ một máy quang phổ, người ta thấy ngoài vạch ứng với độ dài sóng λ (còn một vạch ứng với độ dài sóng λ' lớn hơn λ . Compton đã giải thích hiện tượng này bằng sự đụng giữa photon với electron của chất khuếch tán, trong đó ông coi photon như một hạt có tính cơ học.

Sơ đồ thí nghiệm khảo sát hiệu ứng compton như hình vẽ 1. Chùm tia X phóng ra từ ống T được chuẩn trực nhờ hai khe F1 và F2, do đó chùm tia tới A (vật tán xạ) coi như song song. Một phần của chùm tia này đi thẳng qua A, một phần bị tán xạ. Các chùm tia tán xạ ứng với các góc khác nhau, được thu vào máy quang phổ B, máy này có thể di chuyển trên một cung tròn xung quanh vật tán xạ A. Ứng với một góc tán xạ ϕ , máy quang phổ ghi được hai vạch ứng với hai độ dài sóng λ (và λ' như trên đã nói.



H. 1

Thí nghiệm cho thấy độ lệch về độ dài sóng $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ (không tùy thuộc năng lượng của photon X và chất tán xạ, mà chỉ tùy thuộc góc tán xạ ϕ . Hình vẽ 2 là kết quả của hiệu ứng compton thực hiện với vạch K(của Molybden, tán xạ bởi Carbon, đo ở các góc $\phi = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ Tia X phát ra từ nguồn chứa nhiều độ dài sóng. Do đó muốn chỉ có một độ dài sóng, thí dụ chỉ có một vạch K(, ta phải cho tia X đi qua một bộ phận lọc, trước khi tới vật tán xạ.



Ngoài ra, ta cũng nhắc lại, vạch K (tia X) do sự di chuyển của electron từ tầng L xuống tầng K của nguyên tử chất dùng làm đối âm cực trong ống phóng tia X (trong thí dụ của chúng ta là molybden).

Đỉnh A ứng với độ dài sóng λ , đỉnh B ứng với độ dài sóng λ' . Ta thấy trong trường hợp $\lambda = 0$, $\lambda' = 0$, không có hiệu ứng Compton.

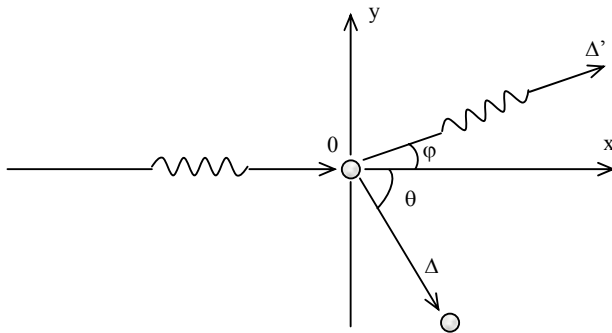
Ngoài ra λ' tăng theo góc tán xạ.

Thí nghiệm cũng cho thấy cường độ vạch Compton (ứng với đỉnh B) mạnh đối với các nguyên tử nhẹ làm chất tán xạ.

§§2. KHẢO SÁT LÝ THUYẾT CỦA HIỆU ỨNG COMPTON.

Xét một chùm tia X đi vào chất tán xạ, đụng phải một electron, giả sử lúc ban đầu đang đứng yên ở O, phương truyền của photon tới là Ox. Sau khi đụng, phương truyền của photon lệch đi một góc φ (đối với phương tới Ox) và điện tử bắn đi theo một phương hợp với Ox một góc θ .

Trước khi đụng, electron có động lượng bằng 0, năng lượng là m_0c^2 , photon có động lượng $\frac{h}{\lambda}$ theo phương Ox, năng lượng $h\nu$.



Sau khi đụng, electron có động lượng mv theo phương (θ) , năng lượng mc^2 , photon có động lượng $\frac{h}{\lambda'}$ theo phương (φ) năng lượng $h\nu'$.

- Sự bảo toàn động lượng cho ta :

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} + m\vec{v} \quad (2.1)$$

Chiếu xuống trục x, ta được :

$$\frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda'} \cos \varphi + mv \cos \theta$$

Với
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$$

Do đó :
$$\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} \cos \varphi = \frac{m_0 \cdot V}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}} \cos \theta \quad (2.2)$$

Chiếu hệ thức (2.1) xuống trục y, ta có :

$$0 = \frac{h}{\lambda'} \sin \varphi - \frac{m_0 \cdot V}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}} \sin \theta$$

Suy ra
$$\frac{h}{\lambda} \sin \varphi = \frac{m_0 \cdot V}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}} \sin \theta \quad (2.3)$$

Bình phương các phương trình (2.2), (2.3) và cộng lại ta được:

$$\frac{h^2}{\lambda^2} + \frac{h^2}{\lambda'^2} - \frac{2h^2}{\lambda\lambda'} \cos \varphi = \frac{m_0^2 V^2}{1 - \frac{V^2}{C^2}} = m_0^2 C^2 \left(\frac{1}{1 - \frac{V^2}{C^2}} - 1 \right)$$

hay
$$\frac{h^2}{\lambda^2} + \frac{h^2}{\lambda'^2} - \frac{2h^2}{\lambda\lambda'} \cos \varphi = \frac{m_0^2 C^2}{1 - \frac{V^2}{C^2}} - m_0^2 C^2 \quad (2.4)$$

Xét sự bảo toàn năng lượng :

$$\frac{hc}{\lambda} + m_0 C^2 = \frac{hc}{\lambda'} + m C^2 = \frac{hc}{\lambda'} + \frac{m_0 C^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$$

suy ra :
$$\frac{hc}{\lambda} - \frac{hc}{\lambda'} + m_0 C^2 = \frac{m_0 C^2}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}}$$

hay
$$\frac{h}{\lambda} - \frac{h}{\lambda'} + m_0 C = \frac{m_0 C}{\sqrt{1 - \frac{V^2}{C^2}}} \quad (2.5)$$

Đem bình phương phương trình (2.5), ta được :

$$\frac{h^2}{\lambda^2} + \frac{h^2}{\lambda'^2} + m_0^2 C^2 - \frac{2h^2}{\lambda\lambda'} + 2hm_0 C \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right) = \frac{m_0^2 C^2}{1 - \frac{V^2}{C^2}}$$

Đem so sánh với phương trình (2.4) suy ra :

$$\frac{2h^2}{\lambda\lambda'} (\cos \varphi - 1) + 2hm_0 C \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda'} \right) = 0$$

Sau cùng ta được

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{m_0 C} (1 - \cos \varphi)$$

hay
$$\Delta \lambda = \frac{2h}{m_0 C} \sin^2 \frac{\varphi}{2} = 0,0484 \sin^2 \frac{\varphi}{2} \quad (A) \quad (2.6)$$

Ta thấy công thức trên phù hợp với các kết quả thực nghiệm. ((tăng theo góc tán xạ và không tùy thuộc bản chất vật tán xạ cũng như không tùy thuộc độ dài sóng (của tia X.

Các electron đề cập tới ở trên phải là các electron tự do hoặc liên kết yếu với nhân nguyên tử. Nếu photon X đập một electron liên kết chặt với nhân thì cả nguyên tử đều chịu tác dụng của sự đập và khối lượng mô phải coi là khối lượng của nguyên tử hơn là khối lượng của electron. Trong trường hợp này, mô rất lớn (so với trường hợp đập electron tự do) nên ((rất nhỏ, không thể phát hiện được. Đó là trường hợp của các photon X tạo thành đỉnh A (trong hình vẽ 2). Trái lại, các photon đập với các electron tự do, hoặc liên kết yếu với nhân, ứng với đỉnh B trong hình vẽ.

Sự liên kết mạnh hay yếu đề cập tới ở đây có ý nghĩa tương đối. Với các tia X có năng lượng lớn thì đa số các electron bị đập tác dụng lại photon như các electron tự do, nhưng với các tia X có năng lượng nhỏ thì nó tác dụng như những electron bị buộc, trừ trường hợp nguyên tử tán xạ có nguyên tử số thấp. Chính vì vậy, các photon của ánh sáng thấy được không thể gây ra hiệu ứng Compton, vì đối với các photon này, các electron đều coi như liên kết chặt với nhân nguyên tử tán xạ.

§§3. SÓNG VÀ HẠT.

Sóng hay hạt? Đó là một cuộc tranh chấp đã kéo dài từ lâu về bản chất của ánh sáng. Nhận thức của loài người đã trải qua các chuyển biến lớn và sâu sắc về vấn đề này. Từ quan điểm hạt đàn hồi của Newton, nhận thức đó đã tiến một bước dài khi chấp nhận quan điểm sóng đề ra đầu tiên bởi Huyghen. Sau một loạt các thí nghiệm về giao thoa, nhiễu xạ, phân cực ánh sáng và sự giải thích dựa trên thuyết quang học sóng của Young, Fresnel, Arago, Malus, Cornu,... nhất là sau công trình của Maxwell chứng tỏ rằng ánh sáng là một loại sóng điện từ có độ dài sóng ngắn, thì quan điểm sóng về bản chất ánh sáng đã lên tới đỉnh cao nhất của nó.

Quan điểm hạt của Newton hoàn toàn bị thay thế bởi thuyết sóng khi Foucault chứng tỏ vận tốc ánh sáng trong một môi trường nhỏ hơn vận tốc trong chân không (ngược với quan điểm Newton), và sau khi thuyết ánh sáng là sóng điện từ độ dài sóng ngắn của Maxwell được Hertz kiểm chứng vào năm 1888 khi ông dùng một mạch dao động kích thước nhỏ làm phát sinh sóng điện từ có độ dài sóng ngắn (viba) và chứng tỏ bằng thí nghiệm, sóng ngắn này có các tính chất của ánh sáng : giao thoa, nhiễu xạ, phân cực, ...

Nhưng cũng chính Hertz là người phát hiện hiệu ứng quang điện vào năm 1887, một hiện tượng không thể giải thích bằng thuyết sóng. Năm 1900, khi khảo sát về sự bức xạ của vật đen, Planck đề ra thuyết điện tử. Năm 1905 Einsteins khai triển thuyết điện tử của Planck, đưa ra thuyết photon để giải thích hiệu ứng quang điện của Hertz. Chúng ta lại đi dần về quan điểm hạt về bản chất của ánh sáng. Quan điểm này nổi lên rất rõ rệt, như ta đã thấy, trong công trình khảo cứu về sự tán xạ của tia X bởi Compton vào năm 1923.

Muốn giải các hiện tượng liên quan đến sự truyền của ánh sáng (như giao thoa, nhiễu xạ, ...) ta không thể gạt bỏ thuyết sóng điện từ của Maxwell, để giải thích được các hiện tượng tương tác giữa ánh sáng và vật chất (phát xạ, hấp thụ) ta phải chấp nhận quan điểm hạt photon của Einstein. Vấn đề ở đây bây giờ không phải là sự tranh chấp giữa hai quan điểm mà lại sự thống nhất chúng lại. Ngày nay chúng ta công nhận ánh sáng có bản chất lưỡng tính sóng và hạt. Hai tính chất này cùng tồn tại trong một thể thống nhất là ánh sáng và tùy

điều kiện của hiện tượng khảo sát, bản chất này hay bản chất kia của ánh sáng được thể hiện ra. Ta có thể coi: sóng và hạt là hai tính hỗ bổ, hai tính phụ nhau của ánh sáng.

Giữa hai mặt sóng và hạt có những liên hệ, có tính thống nhất, chứ không thể là hai mặt độc lập với nhau. Thí dụ, khi xét về cường độ sáng tại một vị trí nào đó, vào một thời điểm nào đó, ta đã biết cường độ sáng tỷ lệ với bình phương biên độ của sóng. Mặt khác theo thuyết photon của Einstein thì cường độ sáng tỷ lệ với số photon tới vị trí đó vào cùng một thời điểm. Chúng ta sẽ thấy sự thống nhất của hai quan điểm khi thừa nhận rằng bình phương biên độ của sóng biểu diễn xác suất tìm thấy một photon ở vị trí và thời điểm khảo sát.

Khi thực hiện vân giao thoa trên một màn E chẳng hạn, ta được một hệ thống vân ứng với các vị trí có bình phương biên độ sóng cực đại và cực tiểu. Điều đó cũng có nghĩa là sự phân bố các photon tới màn E không theo một xác suất đều nhau, mà có những vị trí xác suất này cực đại (vân sáng), có những vị trí khác xác suất này cực tiểu (vân tối).

Theo thuyết sóng người ta không thừa nhận các photon có những quỹ đạo xác định như trong quang hình học. Ta có thể lấy một ví dụ quen thuộc, thí nghiệm về vân nhiễu xạ ở vô cực tới hai khe young. Khi ta dùng cả 2 khe, trên màn ảnh ta được các vân giao thoa trong ảnh nhiễu xạ. Nếu ta che một khe đi thì các vân giao thoa biến mất chỉ còn lại ảnh nhiễu xạ mà thôi. Nghĩa là, các photon đã tới màn E, tại các vị trí mà chúng không tới được khi còn mở cả hai khe. Ta có thể kiểm nghiệm điều này bằng cách giảm dần cường độ ánh sáng chiếu tới các khe young. Tới một mức yếu nào đó, ta có thể coi như không còn sự tương tác nữa. Nhưng thí nghiệm cho thấy hệ thống vân giao thoa vẫn không có gì thay đổi (dĩ nhiên hệ thống vân này không thể quan sát trực tiếp bằng mắt, mà phải in lên một phim ảnh). Như vậy, ta phải kết luận rằng : các photon, cũng như một photon riêng lẻ, không có một quỹ đạo xác định. Chúng có thể tới một vị trí này, nhiều hơn một vị trí khác theo một quy luật nào đó. Quy luật đó được thiết lập bằng thuyết sóng như ta đã khảo sát trong các chương giao thoa, nhiễu xạ,... Như vậy, phương trình sóng không cho ta biết vị trí xác định, quỹ đạo xác định của một photon, cũng như không cho ta biết photon chuyển động cụ thể như thế nào. Nó chỉ biểu diễn một cách thống kê các đặc tính trong sự chuyển động của photon.

Sự kết hợp hai bản chất sóng và hạt đã giúp chúng ta hiểu được một cách bao quát các đặc tính của ánh sáng. Hơn thế nữa, từ bản chất lưỡng tính của ánh sáng, người ta đã suy rộng ra cho các hạt vật chất khác, như ta đã biết trong lý thuyết của Louis De Broglie.

§§4. ÁP SUẤT ÁNH SÁNG (ÁP SUẤT BỨC XẠ).

Nếu ánh sáng gồm những hạt mang năng lượng và chuyển động thì có thể nghĩa rằng : khi một chùm tia sáng đập vào một bề mặt S, các photon sẽ truyền cho bề mặt này một động lượng, nghĩa là sẽ tác dụng lên bề mặt đó một áp suất, tương tự như khi ta tác dụng một lực nén lên diện tích S. Áp suất ánh sáng này đã được Maxwell đoán trước năm 1874, nhưng không phải dựa trên thuyết photon, mà suy ra từ thuyết sóng điện từ. Tới năm 1900, mới được kiểm chứng lần đầu tiên bởi Lebedew.

Ta có thể giải thích hiện tượng áp suất ánh sáng một cách đơn giản dựa trên quan điểm photon. Xét một chùm tia sáng có tần số ν , mật độ photon là n (số photon trong một đơn vị thể tích) ứng với một năng lượng là $u = n h \nu$ (Số photon tới thẳng góc một đơn vị diện tích S trong một đơn vị thời gian là nC ứng với một năng lượng là :

$$p = nC \frac{h \nu}{c} = nC \frac{h \nu}{c} = nh \nu = u$$

- Nếu bề mặt có tính hấp thụ hoàn toàn thì động lượng p được hoàn toàn truyền cho một đơn vị diện tích S của bề mặt đó. Áp dụng định luật căn bản về động lượng và xét với một đơn vị diện tích trên bề mặt của vật được chiếu sáng, ta có :

$$\frac{\Delta P'}{\Delta t} = f$$

f là lực do chùm tia sáng tác dụng lên một đơn vị diện tích bề mặt của vật. (P' là sự biến thiên động lượng ứng với một đơn vị diện tích bề mặt của vật trong thời gian (t = 1s. vậy

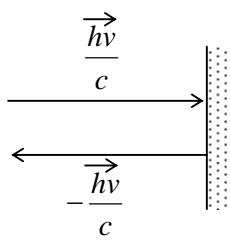
$$\Delta P' = p = u = f$$

Ta thấy f chính là áp suất ánh sáng p, vậy $\boxed{p = u}$ (4.1)

- Nếu bề mặt phản xạ một phần với hệ số phản chiếu là (thì trong nC photon tới diện tích đơn vị S có nC (1 - () photon bị hấp thụ và nC (photon phản xạ trở lại.

nC (1 - () photon bị S hấp thụ nên truyền cho diện tích đơn vị S một động lượng là $nC(1-\zeta)\frac{hv}{c} = u(1-\zeta)$.

Xét các photon phản xạ. Một photon khi tới diện tích đơn vị S có động lượng là $\frac{hv}{c}$ khi phản xạ trở lại, theo định luật bảo toàn động lượng, có động lượng là $\frac{hv}{c}$ (bằng và ngược chiều với động lượng khi đến) vậy nếu chỉ xét riêng photon độ biến thiên động lượng có trị số là $2\frac{hv}{c}$ động lượng được truyền cho diện tích đơn vị S. Động lượng



do nC(, photon phản xạ truyền cho diện tích S là : $\frac{2hv}{C} \times nC\zeta = 2\zeta u$

Vậy áp suất ánh sáng là :

$$P = f = \frac{\Delta P'}{\Delta t} \quad \text{Với (t = 1 giây}$$

$$\text{Và (P' = (1 - () u + 2 (u = (1 + () u}$$

Do đó có $\boxed{P = (1 + \zeta) u}$ (4.2)

- Nếu bề mặt phản xạ toàn phần, ta có (= 1. Vậy

$$\boxed{P = 2u}$$
 (4.3)

- Với bề mặt hấp thụ hoàn toàn, (= 0, ta tìm lại được công thức : P = u

Nhận xét công thức (4.2), ta thấy u là mật độ năng lượng của chùm tia tới, (u là mật độ của chùm tia phản xạ. Do đó ta có thể viết công thức tổng quát cho 3 trường hợp trên dưới dạng :

$$P = \Sigma u$$

(u là tổng số mật độ năng lượng của các chùm tia tới và phản xạ ở phía trước bề mặt S.

Bây giờ ta xét trường hợp chùm tia sáng tới bề mặt của vật dưới một góc i . Để đơn giản, ta vẫn chỉ xét diện tích đơn vị S . Thiết diện thẳng của chùm tia là $S \cos i = \cos i$. Số photon tới S trong một đơn vị thời gian là $nc \cdot \cos i$ ứng với một động lượng có trị số là :

$$P = nc \cos i \cdot \frac{h\nu}{c} = u \cos i$$

và có phương là phương truyền của tia sáng.

Thành phần của P trên phương thẳng góc với S là :

$$P_N = P \cos i = u \cos^2 i$$

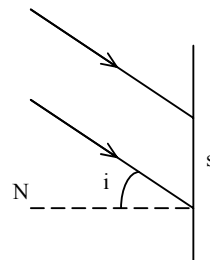
Áp suất ánh sáng bây giờ là :

$$P = \Delta P_N$$

Lập lại cách chứng minh tương tự trường hợp tia tới thẳng góc, ta được :

$$P = (\Sigma u) \cdot \cos^2 i$$

Áp suất ánh sáng rất nhỏ. Áp suất ánh sáng do mặt trời tác dụng vào một bề mặt trong các điều kiện tốt nhất (giữa trưa, chiếu thẳng góc, bề mặt phản xạ hoàn toàn) cũng chỉ vào khoảng 10^{-5} N/m^2 nghĩa là chỉ bằng 10^{-10} lần áp suất khí quyển chuẩn định (76 CmHg (105 N/m^2)).

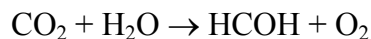


§§5. TÁC DỤNG HÓA HỌC CỦA ÁNH SÁNG.

Rất nhiều phản ứng hóa học chỉ xảy ra dưới tác dụng của ánh sáng như tác dụng trên phim ảnh, sự cấu tạo chất ozon từ oxi do tác dụng của ánh sáng tử ngoại, một số lớn phản ứng thế của các hydrocarbon với Clor, v.v... Tác dụng của ánh sáng trong các phản ứng hóa học như vậy được gọi là tác dụng quang hóa.

Vai trò của ánh sáng có thể chỉ là khơi mào, sau đó phản ứng hóa học tự nó tiếp diễn. Cũng có nhiều phản ứng chỉ xảy ra trong thời gian được chiếu sáng, và phản ứng sẽ ngưng khi sự chiếu sáng chấm dứt.

Một trong những phản ứng quang hóa đặc biệt quan trọng là phản ứng quang tổng hợp bởi cây xanh với carbon rút từ khí carbonic (CO_2) trong không khí để tạo thành các hợp chất hữu cơ như glucoz, celuloz, tinh bột, v.v... là những chất rất quan trọng trong đời sống thực vật và động vật. Sự tổng hợp này phóng thích khí O_2 theo phản ứng:



Chất Aldehyd formic tạo thành (HCOH) lại trùng hợp để thành glucoz hay các hidrad carbon khác.

Theo Einstein, trong các phản ứng quang hóa mỗi một phân tử vật chất được hình thành hay bị phân tích chỉ hấp thụ năng lượng của một photon mà thôi.

Từ các kết quả thí nghiệm, người ta rút ra được các định luật sau :

* Định luật 1 :

Khối lượng m của các chất được tạo thành trong phản ứng quang hóa thì tỷ lệ với quang thông (của ánh sáng kích thích và với thời gian chiếu sáng t

$$m = K \cdot (\cdot t; \quad K = \text{hằng số tỷ lệ}$$

* Định luật 2 :

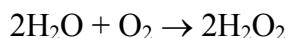
Năng lượng của photon kích thích trong phản ứng quang hóa phải lớn hơn một trị số w , đó là năng lượng cần thiết để phân tích hay tạo thành một phân tử trong phản ứng:

$$hv \geq w \text{ hay} \\ \Rightarrow \lambda \leq \frac{hc}{w} \quad \frac{hc}{\lambda} \geq w$$

Như vậy ta thấy các ánh sáng có độ dài sóng ngắn (tia tử ngoại) đóng vai trò đặc biệt quan trọng trong các phản ứng quang hóa.

Có nhiều trường hợp năng lượng của photon không phải được hấp thụ một cách trực tiếp bởi các chất tham gia trong phản ứng, mà phải qua một chất trung gian, chất trung gian này được gọi là chất nhạy hóa.

Thí dụ phản ứng tạo thành nước nặng (H_2O_2) bởi H_2O và O_2



Là phản ứng quang hóa do tác dụng của bức xạ 2536Å của thủy ngân. Nhưng hơi nước và Oxigen đều không hấp thụ được bức xạ này, nên người ta phải trộn vào với hơi nước và Oxigen một ít hơi thủy ngân. Hơi thủy ngân là chất trung gian, hấp thụ mạnh năng lượng của photon 2536 Å và truyền năng lượng lại cho chất chính trong phản ứng. Do quá trình trung gian này phản ứng trên xảy ra rất nhanh.

Chương XI

SỰ PHÁT QUANG

§§1. ĐỊNH NGHĨA.

Nhiều chất có tính chất khi được rọi tới một chùm tia sáng thích hợp thì sẽ phát ra ánh sáng theo mọi phương. Ánh sáng phát ra có bước sóng khác với bước sóng của ánh sáng kích thích.

Tùy theo cách kích thích, người ta phân biệt nhiều hiện tượng phát quang. Thí dụ :

- Nhiệt phát quang sự phát sáng do bị đốt nóng.
- Điện phát quang, phát sáng do sự phóng điện trong khí kém, do tác dụng của hiệu điện thế.
- Cathod phát quang, kích thích bởi tia âm cực.
- Xạ phát quang: kích thích bởi tia X, tia γ , ...
- Hóa chất quang: do phản ứng hóa học.

Trong chương này, ta chỉ giới hạn trong sự khảo sát hiện tượng quang - phát quang.

§§2. PHÁT HUỖNH QUANG VÀ PHÁT LÂN QUANG.

Trong hiện tượng quang phát quang, ta phân biệt hai trường hợp: phát huỳnh quang và phát lân quang.

Trước kia, người ta phân biệt như sau: danh từ phát huỳnh quang dùng để chỉ các hiện tượng mà sự phát quang chỉ xảy ra trong thời gian kích thích. Khi ngừng kích thích thì sự phát huỳnh quang cũng lập tức chấm dứt. Trái lại, sự phát lân quang chỉ các hiện tượng phát quang mà thời gian phát quang còn kéo dài sau khi sự kích thích chấm dứt.

Thí dụ : Sự phát quang của flluorescein là phát huỳnh quang, trong khi sự phát quang của Culfur kẽm là phát lân quang.

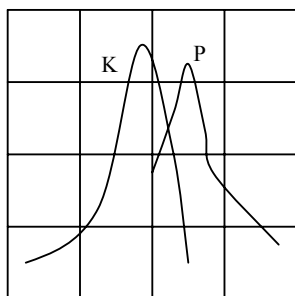
Ngày nay, với kỹ thuật đo được các thời lượng rất nhỏ, người ta thấy rằng, thực ra hiện tượng phát huỳnh quang không phải chấm dứt ngay cùng với sự kích thích mà còn kéo dài một thời gian, dù là rất ngắn. Ngược lại, người ta lại thấy nhiều hiện tượng phát lân quang có thời gian kéo dài (sau khi ngừng kích thích) thực ngắn ngủi. Như vậy ta không thể có một sự phân biệt rõ ràng hai hiện tượng nếu chỉ dựa vào thời gian phát quang kéo dài nói trên.

Hiện nay người ta phân biệt được hai hiện tượng là nhờ tác dụng của nhiệt độ. Với một chất phát huỳnh quang, thời gian phát quang không tùy thuộc nhiệt độ. Trái lại, với một chất phát lân quang thời gian này bị chi phối rõ rệt bởi nhiệt độ : thời gian này giảm khá nhanh khi ta tăng nhiệt độ, và ngược lại nếu ta hạ nhiệt độ xuống thấp tới một độ nào đó thì có thể làm ngưng hoàn toàn sự phát lân quang. Hàm lượng hấp thụ được trong thời gian kích thích được tích trữ lại trong môi trường trong một thời gian vô hạn định, và được phóng thích khi ta tăng nhiệt độ của môi trường. Như vậy, với hiện tượng phát lân quang, người ta có thể giữ lại ánh sáng trong một môi trường bằng cách “ướp lạnh“, nghĩa là người ta có thể “đề

dành“ ánh sáng. Qua sự khảo sát ảnh hưởng của nhiệt độ đối với thời gian phát quang, ta thấy rằng phát huỳnh quang và phát lân quang là hai hiện tượng phân biệt, xảy ra với hai cơ chế khác nhau.

§§3. ĐỊNH LUẬT STOKES.

Trong hiện tượng quang phát quang, phổ phát quang mang tính đặc trưng của chất khảo sát. Với các chất hơi phát quang, nói chung phổ gồm những dải có thể phân li thành các vạch, nhưng với chất lỏng hay chất rắn thì sự phân li này không thể thực hiện được. Ngoài ra, như ta đã đề cập trong phần định nghĩa, với một chất khảo sát nhất định, sự phát quang chỉ xảy ra khi ta kích thích bằng ánh sáng thích hợp, thí dụ: khảo sát hiện tượng phát quang của eosin, ta thấy phổ phát xạ như hình vẽ 1.



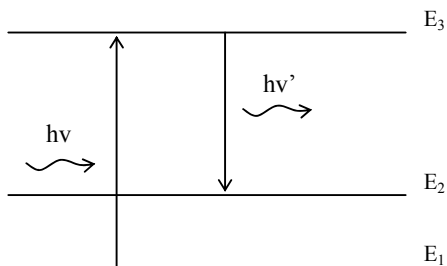
H. 1

Năng lượng mang bởi ánh sáng kích thích bị hấp thụ bởi chất khảo sát. Phổ hấp thụ được biểu diễn bởi đường cong K. Một phần của năng lượng hấp thụ này chuyển thành năng lượng phát xạ. Sự biến thiên của năng lượng phát xạ theo bước sóng được biểu diễn bởi đường cong P.

Các thí nghiệm cho thấy, bước sóng ứng với cực đại của đường phát xạ bao giờ cũng lớn hơn bước sóng ứng với cực đại của đường hấp thụ. Đó là định luật Stokes. Chính vì định luật này nên muốn gây ra sự phát quang ánh sáng thấy được, thường ta phải dùng ánh sáng kích thích ở trong vùng tím hay tử ngoại.

§§4. KHẢO SÁT LÝ THUYẾT HIỆN TƯỢNG PHÁT HUỖNH QUANG.

Trong hiện tượng phát huỳnh quang, các hạt phát xạ (nguyên tử, phân tử, ion) được kích thích từ trạng thái căn bản (bền) lên trạng thái kích thích có mức năng lượng cao hơn, trạng thái này không bền, nên sau một thời gian các hạt tự động trở về trạng thái căn bản, trả lại năng lượng chúng đã hấp thụ (khi được kích thích) dưới dạng ánh sáng. Hiện tượng này được gọi là sự phát xạ ngẫu sinh.



H. 2

Giả sử khi hấp thụ năng lượng $h\nu = E_3 - E_1$, hạt từ trạng thái căn bản ứng với mức năng lượng E_1 nhảy lên E_3 . Sau một thời gian t ở mức năng lượng E_3 (t là đời sống của hạt ở trạng thái kích thích E_3), hạt tự động rơi xuống mức năng lượng E_2 và phát ra photon có năng lượng $h\nu' = E_3 - E_2$.

Khi được chiếu bởi chùm tia sáng kích thích, không phải tất cả các hạt của chất phát quang chịu sự tác động của photon kích thích, mà chỉ có một phần, giả sử N hạt (N tỷ lệ với cường độ của ánh sáng kích thích).

Để đơn giản, ta xét trường hợp sự trao đổi năng lượng xảy ra giữa hai mức năng lượng E (căn bản) và E^* (kích thích). Vào một thời điểm bất kỳ trong thời gian phát quang, N gồm n hạt ở trạng thái cơ bản và n^* hạt ở trạng thái kích thích.

$$N = n + n^*$$

Trong thời gian dt , số hạt đi từ trạng thái căn bản lên trạng thái kích thích (tỷ lệ với n và thời gian dt) là $a.n.dt$, số hạt từ trạng thái kích thích rơi trở về trạng thái căn bản (tỷ lệ với n^* và dt) là $b.n^*.dt$, trong đó a và b là các hằng số tỷ lệ, có trị số dương. Như vậy trong thời gian dt , số hạt ở trạng thái kích thích biến thiên là:

$$\begin{aligned} dn^* &= an \, dt - bn^* \, dt \\ &= [aN - (a+b)n^*] \, dt \end{aligned}$$

hay
$$\frac{dn^*}{dt} + (a+b)n^* = aN$$

Giải phương trình này, ta được :
$$n^* = \frac{aN}{a+b} [1 - e^{-(a+b)t}]$$

Thời gian t tính từ lúc bắt đầu kích thích. Khi $t = 0$, ta có $n^* = 0$. Khi thời gian kích thích tăng, số hạt ở trạng thái kích thích tăng theo và tiến tới một trị số giới hạn là \bar{G} . Khi đó số hạt từ trạng thái căn bản nhảy lên trạng thái kích thích thì bằng số hạt từ trạng thái kích thích rơi trở về trạng thái căn bản tính trong cùng một thời gian: $an = bn^*$. Ta nói sự phát quang đạt tới chế độ ổn định.

Cường độ ánh sáng phát quang I tỷ lệ với số hạt rơi trở về mức cơ bản trong một đơn vị thời gian. Ta có thể viết

$$I = bn^*$$

ứng với chế độ ổn định, ta có :

$$I = N \frac{ab}{a+b}$$

Mà ta biết N tỷ lệ với cường độ I_0 của ánh sáng kích thích, do đó I cũng tỷ lệ với I_0 . Tuy nhiên N không thể lớn hơn tổng số hạt phát quang có trong chất khảo sát, do đó khi tăng I_0 , cường độ phát quang I không thể tăng mãi mà sẽ đạt tới chế độ bão hòa.

Khi ta ngưng kích thích, sự phát xạ ngẫu sinh vẫn tiếp tục trong một thời gian. Số hạt ở trạng thái kích thích giảm dần theo hệ thức.

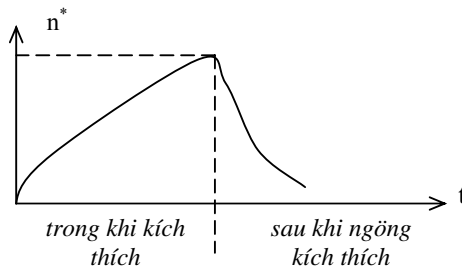
Hay
$$\frac{dn^*}{dt} = -bn^*$$

$$\frac{dn^*}{n^*} = -b \cdot dt$$

Suy ra
$$n^* = n_0^* e^{-bt}$$

Với \bar{G} = số hạt ở trạng thái kích thích vào lúc $t = 0$, thời gian t tính từ lúc ngưng kích thích.

Hình vẽ 3 biểu diễn sự biến thiên của n^* theo thời gian



H. 3

- Thời sống trung bình ở trạng thái kích thích.

Xét một thời điểm t ($t = 0$ lúc ngưng kích thích). Trong thời gian dt kế tiếp, số hạt từ trạng thái kích thích tự nhiên rơi trở về trạng thái căn bản là bn^*dt . Vì dt rất nhỏ nên ta có thể coi các hạt này đã ở trạng thái kích thích trong cùng một thời gian là t . Vậy thời gian tổng cộng ứng với số hạt trên là $bn^*dt.t$. Thời gian t có thể lấy từ 0 tới ∞ , do đó thời sống trung bình của hạt ở trạng thái kích thích là :

$$\begin{aligned} \tau &= \frac{1}{n_b^*} \int_0^{\infty} b.n^* .t.dt \\ \text{Suy ra} \quad \tau &= \frac{1}{b} \int_0^{\infty} e^{-bt} .t.dt \end{aligned}$$

b được gọi là xác suất phát xạ

$$\text{Vậy} \quad n^* = n_0^* e^{-t/\tau}$$

§§5. HIỆU SUẤT PHÁT HUỖNH QUANG.

Ta thấy các hạt phát quang có vai trò như các máy biến đổi ánh sáng : hấp thụ ánh sáng kích thích và biến đổi thành ánh sáng phát quang. Thực ra, không phải tất cả các hạt đã bị kích thích, khi rơi trở về mức căn bản, đều phát huỳnh quang, mà một phần của các hạt này nhường năng lượng mà chúng đã hấp thụ cho các hạt xung quanh dưới dạng chuyển động. Do đó các hạt này khi trở về mức căn bản sẽ không phát xạ. Như vậy, trong một đơn vị thời gian, số hạt rơi trở về mức căn bản không phải chỉ gồm bn^* hạt phát huỳnh quang mà là $bn^* + cn^*$ (cn^* là số hạt rơi về mức căn bản trong một đơn vị thời gian mà không phát huỳnh quang, c là một hệ số dương).

Do đó, thời sống trung bình của hạt ở trạng thái kích thích không phải là τ mà thực ra là τ_c

Hiệu suất phát huỳnh quang được định nghĩa là :

$$\zeta = \frac{bn^*}{bn^* + cn^*} = \frac{b}{b + c}$$

$$\text{Hay} \quad \boxed{\zeta = b\tau_c}$$

Ta thấy τ_c hằng số. Vậy tỷ lệ ζ đặc trưng cho hiện tượng phát huỳnh quang đơn giản.

§§6. ẢNH HƯỞNG CỦA NHIỆT ĐỘ.

Hiệu suất phát quang trên có thể viết là :

$$\zeta = \frac{J}{A} = \frac{b}{b + c}$$

Trong đó J là quang thông phát quang, A là quang thông hấp thụ hay

$$\frac{J}{A} = \frac{1}{1 + c/b}$$

Giả sử các hạt trở về trạng thái căn bản mà không phát quang là do sự độn thì trong công thức trên, b là hằng số đối với nhiệt độ trong khi c thay đổi theo nhiệt độ.

Nếu ta thừa nhận rằng, trong một khoảng nhiệt độ giới hạn nào đó quang thông hấp thụ A độc lập với nhiệt độ và thừa nhận $c = 0$ ở nhiệt độ $T = 0\text{ok}$ thì :

ở Với J_0 là quang thông phát quang ở 0ok

hay $A = J_0$

Suy ra $\frac{J'}{j} = 1 + \frac{c}{b}$

Vậy G là một hàm bậc nhất theo c khi nhiệt độ tăng thì c tăng, do đó cường độ phát quang giảm.

§§7. ĐO THỜI GIAN PHÁT QUANG.

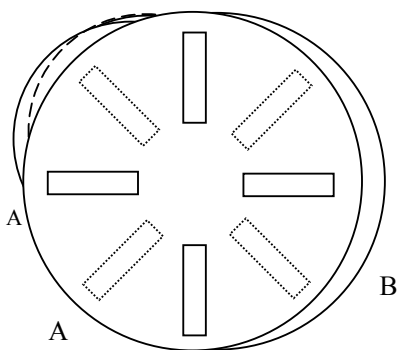
Ta xét trường hợp quang phát quang đơn giản có cường độ phát quang giảm đi theo công thức :

$$I = I_0 \cdot e^{-t/\tau}$$

t = thời gian tính từ lúc ngưng kích thích

(= thời gian phát quang trung bình

Máy đầu tiên để đo thời gian là lân quang nghiệm Becquerel. Máy gồm hai đĩa tròn A và B, trên mỗi đĩa có đục các lỗ thủng cách đều nhau. Các lỗ thủng trên hai đĩa không đối diện nhau mà xen kẽ. Hai đĩa A và B gắn trên cùng một trục quay. Chất phát quang để giữa hai đĩa và là lớp mỏng để ánh sáng truyền qua được. Chất phát quang được chiếu sáng (kích thích) qua một lỗ của đĩa này, giả sử đĩa A, và được quan sát qua một lỗ của đĩa kia (đĩa B). Giả sử mỗi đĩa có n lỗ và quay với vận tốc N vòng/s. Chất phát quang được kích thích khi một lỗ thủng của đĩa A quay đến trước nó và được quan sát khi một lỗ thủng của đĩa B quay đến trước đó. Bề rộng của các lỗ thủng khá hẹp để sự kích thích và sự quan sát được coi như tức thời.



Thời gian từ lúc kích thích tới lúc quan sát là :

$$t = \frac{1}{2Nn}$$

Từ công thức $I = I_0 e^{-t/(\tau)}$, suy ra:

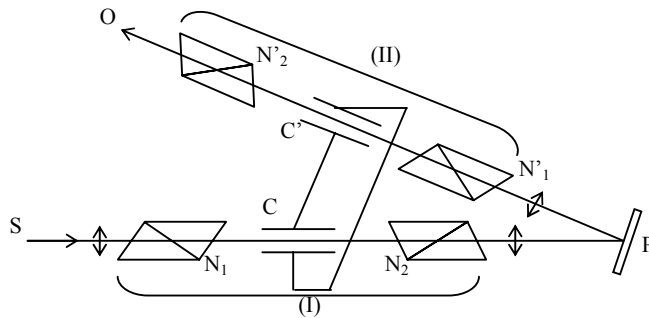
$$\text{Log} I = \text{log} I_0 - \frac{1}{2Nn\tau}$$

Cho N thay đổi một loạt trị số và đo các cường độ I tương ứng. Vẽ đường biểu diễn của $\text{Log} I$ theo \bar{G} , ta được một đường thẳng. Biết được hệ số góc của đường này ta suy ra thời gian (τ) .

Với lân quang nghiệm này, người ta đã có thể đo được những thời gian (τ) khá ngắn (10-4s).

Các thí nghiệm sau này thực hiện bởi Wood có thể đo được những thời gian (τ) ngắn hơn nhiều. Wood để chất phát quang trên một đĩa quay và tạo trên chất này ảnh điểm của nguồn sáng kích thích. Nếu sự phát quang xảy ra tức thời, khi quan sát đĩa quay ta chỉ thấy một điểm sáng. Nếu sự phát quang kéo dài, ta được một cung sáng. Dựa vào chiều dài của cung này, Wood xác định được thời gian. Thí dụ, trong một thí nghiệm với platino cyanua barium, Wood đo được $\tau = 10^{-8}$ giây.

Những thời gian phát quang cực ngắn của các chất lỏng có thể đo bằng phương pháp của Gaviola, các dụng cụ thiết bị như hình vẽ 5.



H. 5

Ánh sáng kích thích phát xạ từ nguồn S, đi qua tế bào Ker C chứa nitrobenzen đặt giữa hai nicol chéo góc N_1 và N_2 , tới chất phát quang P. Ánh sáng từ P phát ra đi qua tế bào Ker C' (chứa nitrobenzen) đặt giữa nicol chéo góc N'_1 và N'_2 tới quan sát viên ở O. Các tế bào Ker C và C' được đặt đồng bộ với một điện trường cao tần, giả sử có tần số $N = 5.10^6$ hertz. Như vậy đối với chùm tia kích thích và chùm tia phát quang, các hệ thống (I) và (II) cho ánh sáng đi qua một cách đồng bộ với chu kỳ là \bar{G} giây. Gọi (τ) = thời gian ánh sáng đi qua quãng đường CPC' ($(\tau < T)$).

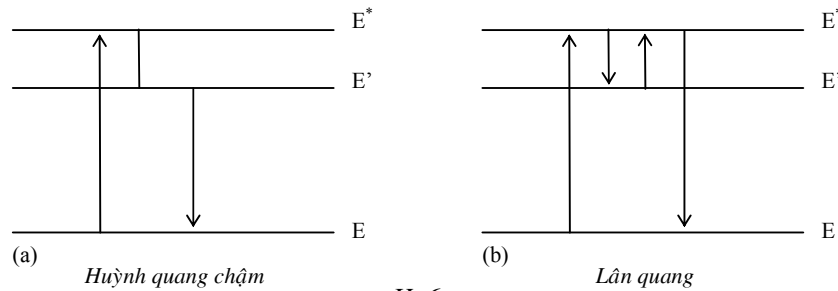
Nếu sự phát quang xảy ra tức thời thì sẽ không có ánh sáng tới O. Nếu hiện tượng phát quang kéo dài thì chính ánh sáng phát ra bởi P, sau khi P bị kích thích một thời gian $t = T - (\tau)$, sẽ tới C' sau khi ánh sáng kích thích tới C một thời gian là T, do đó đi qua được hệ thống (II) và tới O. Bằng cách giảm quãng đường CPC', nghĩa là giảm (τ) , ta làm tăng t. Khi không còn ánh sáng tới O, ta có $t = (\tau)$. Với phương pháp này ta có thể đo được các thời gian (τ) khá nhỏ so với chu kỳ T.

Khảo sát dung dịch fluoresein, Gaviola đo được thời gian phát quang trung bình vào khoảng từ 10^{-8} giây tới 10^{-9} giây.

§§8. HIỆN TƯỢNG PHÁT HUỖNH QUANG CHẬM VÀ PHÁT LÂN QUANG.

Trong phần trên, ta đã xét một loại phát quang trong đó chỉ có sự tham gia của các mức năng lượng thường (mức căn bản và mức kích thích). Các hiện tượng phát quang như vậy được gọi là phát huỳnh quang đơn giản. Một loại hiện tượng phát quang thứ hai trong đó có sự tham gia của mức năng lượng giới ản (metastable), đó là trường hợp phát huỳnh quang chậm, hoặc phát lân quang.

Một hạt không thể trực tiếp từ mức năng lượng cơ bản E nhảy lên mức năng lượng giới ản E' mà phải qua trung gian của một mức năng lượng kích thích E^* cao hơn. Từ mức năng lượng giới ản, hai cơ chế sau đây có thể xảy ra.



- Hoặc hạt tự động rơi trở về mức căn bản (hình 6a). Đó là một loại hiện tượng phát huỳnh quang, nhưng có thời gian phát quang kéo dài hơn (so với phát huỳnh quang đơn giản). Vì vậy được gọi là phát huỳnh quang chậm. Thời gian phát huỳnh quang trung bình ứng với hiện tượng phát quang chậm ở vào khoảng từ 10^{-4} giây tới 1 phút, trong khi thời gian này ứng với hiện tượng phát huỳnh quang đơn giản ở trong khoảng từ 10^{-10} giây tới 10^{-4} giây.

- Hoặc hạt do tác động bên ngoài, nhảy lên mức kích thích E^* cao hơn, rồi tự động rơi trở về mức căn bản. Đó là hiện tượng phát lân quang (hình 6b), trong hiện tượng này, mức năng lượng giới ản được coi là hoàn toàn bền nếu không có tác động của bên ngoài. Ngoài ra, ta thấy từ mức căn bản lên mức giới ản, hay từ mức giới ản xuống mức căn bản, đều xảy ra một cách gián tiếp. Thời gian hạt nằm ở mức giới ản có thể kéo dài vô hạn. Ta thấy mức này giống như một cái “bẫy” năng lượng.

Nếu ta hạ nhiệt độ xuống thấp để làm giảm tần số đụng giữa các hạt, thời gian phát lân quang sẽ tăng lên. Đời sống trung bình của hạt ở mức giới ản có thể kéo dài vô hạn nếu ta hạ nhiệt độ xuống tới một mức nào đó.

Người ta còn phân biệt hai loại phát lân quang

- Phát lân quang Perrin, xảy ra với chất lỏng và chất khí. Giữa hai quá trình hấp thụ và phát xạ, các phân tử trải qua một trạng thái trung gian và chỉ phát lân quang khi nhận được một sự cung cấp năng lượng của môi trường.
- Phát lân quang Becquerel - Lenard, xảy ra với các chất rắn kết tinh. Trong quá trình phát lân quang này có một sự “ion hóa nội”. Một điện tử bị bứt ra khỏi nguyên tử phát quang để có một độ tự do nào đó. Khi điện tử này tái hợp với nguyên tử thì sự phát xạ lân quang xảy ra.

§§9. CHẤT TĂNG HOẠT - TÂM ĐỘC.

Khi khảo sát sự phát quang của một chất, người ta thấy rằng nếu trộn vào chất này một chất kim thích hợp thì sự phát quang mạnh hơn rất nhiều so với chất phát quang nguyên chất lúc đầu.

Thí dụ : Trộn thật đều bột CdI_2 và PbI_2 trong aceton và để cho kết tinh. Ta được một phẩm vật có tính phát quang mạnh hơn nhiều so với CdI_2 tinh chất. Ta bảo chất CdI_2 đã được tăng hoạt chất kim đưa vào (Pb) được gọi là chất tăng hoạt. Chất ban đầu (CdI_2) được gọi là chất căn bản. Một chất phát quang có chất tăng hoạt, thí dụ trường hợp CdI_2 tăng hoạt bởi chì, được ký hiệu như sau : $CdI_2(Pb)$.

Tương tự ta có thể tăng hoạt CdI_2 bởi đồng hay Mn. Sulfur kẽm có thể tăng hoạt bởi Ag, Cu,

Tỷ lệ của chất tăng hoạt trong chất căn bản có ảnh hưởng rõ rệt tới cường độ phát quang và ta có một tỷ lệ xác định để cường độ phát quang mạnh nhất. Sự hiện diện của chất tăng hoạt không những làm tăng cường độ phát quang mà còn có thể làm thay đổi phổ phát quang.

Ngược lại với sự tăng hoạt, sự hiện diện của các chất như Fe, Co, Ni có thể làm mất tính phát quang của một chất. Các kim chất trên được gọi là các "tâm độc". Thí nghiệm cho thấy rõ hiện tượng này nhưng người ta chưa thể giải thích được tại sao.

§§10. SỰ NHẠY HÓA.

Ta xét sự phát quang của phốt phát calci $Ca_3(PO_4)_2$. Nếu chất tăng hoạt là Mangan và nếu kích thích bằng tia âm cực thì phát quang ánh sáng đỏ. Nhưng khi kích thích bằng tia tử ngoại 2500Ao thì lại không phát quang.

Nếu tăng hoạt bằng Sêri (Ce) và kích thích bằng tia tử ngoại trên (2500Ao) thì thấy phát quang ánh sáng tử ngoại 3500Ao.

Bây giờ tăng hoạt cả Ce và Mn và kích thích bằng ánh sáng 2500Ao thì ta thấy ánh sáng phát quang gồm cả vạch 3500Ao và vạch đỏ nói trên.

Người ta giải thích như sau: Khi được kích thích bằng tia 2500Ao, Ce chuyển năng lượng kích thích cho chất tăng hoạt Mn, như vậy, một cách gián tiếp, phốt phát calci với chất tăng hoạt là Mn đã bị kích thích bởi tia 2500Ao. Sự chuyển năng lượng giữa hai tâm sáng như trên (từ tâm sáng có chứa Ce sang tâm sáng có chứa Mn) được gọi là sự nhạy hóa. Ce được gọi là chất nhạy hóa.

Chương XII

LASER

§§1. SỰ PHÁT MINH LASER.

Việc phát minh ra tia Laser bắt nguồn từ các cố gắng của các nhà khoa học muốn tìm được cách sản xuất các luồng sóng vô tuyến có bước sóng thật ngắn. Trong kỹ thuật vô tuyến, người ta biết rằng : Muốn tạo được các luồng sóng vô tuyến có bước sóng càng ngắn thì phải có các máy phát sóng có kích thước càng nhỏ. Như vậy, các kỹ thuật gia trước một vấn đề nan giải là : Không thể chế tạo được các máy phát sóng có kích thước quá nhỏ. Để giải quyết khó khăn này, người ta đã nghĩ tới loại máy phát sóng vô cùng nhỏ có sẵn trong thiên nhiên : Đó là các nguyên tử, các phân tử vật chất. Thực vậy, chúng ta đã biết ánh sáng là loại sóng điện từ có độ dài sóng ngắn phát ra bởi các nguyên tử hay phân tử. Vậy sự bế tắc nói trên của ngành vô tuyến, trên nguyên tắc có thể được giải quyết. Tuy nhiên, một vấn đề rất khó đặt ra trước các nhà khoa học, kỹ thuật là: Làm thế nào bắt các máy phát sóng tí hon đó hoạt động theo ý muốn của con người. Vì chúng ta đã biết, sự phát sóng ánh sáng của các nguyên tử, phân tử xảy ra hoàn toàn ngẫu nhiên, tự phát, không điều khiển được. Các nguyên tử trong một nguồn sáng phát ra ánh sáng theo tất cả mọi phương với vô số bước sóng khác nhau. Các sóng được phát ra không có liên hệ gì với nhau về biên độ cũng như về pha. Một nguồn sáng như vậy không có lợi ích gì trong kỹ thuật vô tuyến.

Quá trình giải quyết vấn đề này (điều khiển được các bức xạ phát ra bởi các nguyên tử, phân tử) đưa đến sự phát minh ra MASER (viết tắt của Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation) và LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation).

Hai nhà bác học Liên Xô Prôkhôpôp và Basôp và nhà bác học Mỹ Townes là những người đã đóng góp rất nhiều trong việc đưa đến các phát minh trên (lãnh chung giải Nobel về vật lý năm 1964).

Máy Maser đầu tiên được thực hiện năm 1954 ở Mỹ và Liên Xô.

Tháng 7/1960, máy Laser đầu tiên xuất hiện do công trình của Maimain.

§§2. SỰ PHÁT XẠ KÍCH ĐỘNG.

Ta đã biết rằng sự phát xạ bởi các hạt (nguyên tử, phân tử, ion) trong các nguồn sáng thông thường là các quá trình xảy ra một cách tự phát, hoàn toàn ngẫu nhiên. Khi nhận được một năng lượng thích hợp, hạt sẽ từ trạng thái bền nhảy lên trạng thái kích thích có mức năng lượng cao hơn. Sau một thời gian, hạt sẽ rơi trở về trạng thái bền và phóng thích năng lượng (đã hấp thụ) dưới dạng ánh sáng, nghĩa là phát ra photon.

Năm 1917, khi nghiên cứu quá trình tương tác giữa ánh sáng và vật chất, Einstein cho rằng : Không những các hạt phát xạ một cách ngẫu nhiên như trên mà còn có thể phát xạ do tác động của bên ngoài. Khi ta chiếu vào hệ một bức xạ, thì các hạt đang ở mức năng lượng kích thích E2 sẽ rơi trở về căn bản E1 và phát ra bức xạ : Đó là hiện tượng bức xạ kích thích động (hay bức xạ ứng, bức xạ cưỡng bức). Đây là cơ sở hoạt động của máy Laser.

Bây giờ ta xét trường hợp đơn giản : các hạt thay đổi giữa hai mức năng lượng E1 (căn bản) và E2 (kích thích). Khi ta kích thích bằng quang tử (photon) có năng lượng.

$$h\nu = E_2 - E_1$$

Thì các hạt từ mức E1 sẽ nhảy lên mức E2. Giả sử vào một thời điểm t, hệ khảo sát có n1 hạt ở mức căn bản E1 và n2 hạt ở mức kích thích E2. Số hạt từ mức E1 nhảy lên mức E2 trong thời gian từ thời điểm t tới thời điểm t' = t + dt là :

$$- dn_1 = Bn_1 \zeta dt$$

B : là một hệ số dương, được gọi là xác suất hấp thụ.

(ζ : là mật độ năng lượng kích thích.

Số hạt ngẫu nhiên rơi trở về mức căn bản trong thời gian trên là:

$$- dn_2 = A n_2 dt$$

A : hệ số dương, được gọi là xác suất phát xạ tự nhiên.

Số hạt phát xạ do kích động trong cùng thời gian trên là:

$$- dn_2^* = Bn_2 \zeta dt$$

B: xác suất phát xạ kích động, giả thuyết bằng xác suất hấp thụ.

Khi hệ đạt tới sự cân bằng nhiệt động lực học, số hạt ở mức E2 không thay đổi, vậy số hạt đi lên mức E2 phải bằng số hạt rơi trở về mức căn bản.

$$- dn_1 = - dn_2 - dn_2^*$$

Hay $Bn_1 \zeta dt = A n_2 dt + Bn_2 \zeta dt$

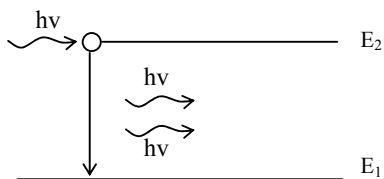
Suy ra $Bn_1 \zeta = (A + B \zeta) n_2$

Vậy $n_2 < n_1$

Nghĩa là số hạt ở mức năng lượng kích thích E2 (cao hơn) bao giờ cũng ít hơn ở mức năng lượng căn bản E1 (thấp hơn).

Tóm lại, khi ta chiếu vào hệ một chùm tia sáng kích thích có năng lượng photon là h(thì trong một thời gian dt sẽ làm cho một số hạt từ trạng thái cơ bản E1 nhảy lên trạng thái kích thích E2 (sự hấp thụ), trong thời gian đó, một số hạt từ mức E2 tự phát rơi trở về E1, một số hạt khác bị đụng với photon kích thích cũng rơi trở về E1 (sự phát xạ ngẫu nhiên và phát xạ kích động). Nhưng luôn luôn $n_2 < n_1$. Do đó, các photon kích thích h(gặp các hạt ở mức E1 nhiều hơn gặp các hạt ở mức E2, nghĩa là hiện tượng hấp thụ mạnh hơn hiện tượng phát xạ ánh sáng. Vì vậy, ở điều kiện bình thường, khi đi qua một môi trường vật chất bao giờ ánh sáng cũng bị yếu đi.

Khi một photon h(gặp một hạt ở trạng thái kích thích và làm hạt này rơi trở về mức căn bản thì photon được hạt phóng thích cũng là h((năng lượng do hạt hấp thụ khi đi từ E1 lên E2), photon mới sinh ra này hoàn toàn giống photon kích động (về hướng đi, bước sóng, sóng, pha, tính phân cực). Như vậy kết quả của sự kích động là từ một photon tới hạt, ta được hai photon phát xạ.



H. 1

§§3. SỰ KHUYÉCH ĐẠI ÁNH SÁNG ĐI QUA MỘT MÔI TRƯỜNG.

Bây giờ ta thử giả thuyết có một trường hợp: Trong một môi trường số hạt ở trạng thái kích thích lớn hơn số hạt ở trạng thái căn bản : $n_2 > n_1$. Trong trường hợp này, photon kích động sẽ gặp các hạt ở trạng thái kích thích nhiều hơn ở trạng thái căn bản. Khi đó hiện tượng bức xạ sẽ mạnh hơn hiện tượng hấp thụ và kết quả ngược với trường hợp trên, khi truyền qua môi trường, ánh sáng mạnh hơn lên. Thực vậy, khi một photon kích động gặp một hạt ở trạng thái kích thích và gây ra sự phát xạ thì một photon thành hai. Cứ như thế số photon tăng lên rất nhanh, và khi truyền qua môi trường, ta được một chùm tia sáng có cường độ mạnh.

Như vậy, vấn đề là: Muốn có một chùm tia sáng cực mạnh bằng cách được khuếch đại lên như trên, ta phải làm cách nào có $n_2 > n_1$. Đó là sự “đảo ngược dân số”. Môi trường khi bị đảo ngược dân số như vậy được gọi là môi trường hoạt tính.

Để số hạt có năng lượng cao nhiều hơn hạt số hạt có năng lượng thấp, người ta phải cung cấp năng lượng cho môi trường, phải “bơm” năng lượng cho nó. Một trong các cách làm nghịch đảo dân số là phương pháp “bơm” quang học. Kỹ thuật này đưa đến giải Nobel về vật lý cho nhà bác học Pháp Kastler năm 1966 (công trình này của Kastler được thực hiện từ năm 1950). Kastler dùng một chùm tia sáng có cường độ mạnh làm bơm để bơm năng lượng cho môi trường khiến nó trở thành hoạt tính. Phương pháp bơm quang học thường được dùng với các chất rắn và chất lỏng. Với laser khí, người ta thường nghịch đảo dân số bằng cách phóng điện trong khí kềm.

§§4. BỘ CỘNG HƯỞNG.

Với điều kiện $n_2 > n_1$, môi trường cho khả năng có thể thực hiện sự khuếch đại cường độ ánh sáng, nhưng muốn có được một chùm tia Laser có đặc tính định hướng cao độ thì chỉ có môi trường hoạt tính thì chưa đủ, mà còn cần một bộ phận gọi là bộ cộng hưởng. Bộ phận này vừa có tác dụng tăng cường cường độ ánh sáng, vừa có tác dụng định hướng chùm tia laser khi nó phóng ra khỏi máy. Trong trường hợp đơn giản nhất, bộ phận cộng hưởng gồm hai gương phẳng M1 và M2, thiết trí ở hai đầu máy.

Các photon có phương di chuyển thẳng góc với hai gương sẽ dội đi, dội lại nhiều lần trong môi trường hoạt tính. Như vậy bộ phận cộng hưởng đóng vai trò như một cái bẫy ánh sáng. Trong khi phản chiếu qua lại như thế, các photon đập vào các hạt ở trạng thái kích thích, làm phóng thích các photon khác. Các photon này lại phản chiếu qua lại giữa M1 và M2, đập vào các hạt ở trạng thái kích thích và lại làm bật ra các photon mới nữa, cứ như thế cường độ ánh sáng tăng lên rất mạnh.

Các photon này không di chuyển thẳng góc với hai gương thì sau một hồi di chuyển, chúng bị lọt ra ngoài máy.

§§5. THÊM PHÁT XẠ KÍCH ĐỘNG.

Ta nhận thấy trong cách cấu tạo trên của máy laser, có thể một phần năng lượng sẽ bị mất đi do sự phản chiếu trên hai gương M1, M2 và do sự nhiễu xạ làm lệch phương di chuyển của các photon. Do đó, ta chỉ thực sự có hiện tượng khuếch đại cường độ ánh sáng nếu công suất P sinh ra do sự phát xạ kích động lớn hơn công suất P' bị mất đi

Ta có
$$P = \frac{dw}{dt} = \frac{dn}{dt} h\nu$$

dn/dt là số photon phát ra do sự phát xạ kích động trong một đơn vị thời gian.

$$\frac{dn}{dt} = -\frac{dn_2^*}{dt} - \frac{(-dn_1)}{dt} = (n_2 - n_1)B\zeta$$

Vậy $P = (n_2 - n_1)B(h\nu)$

* Mất năng lượng do phản chiếu :

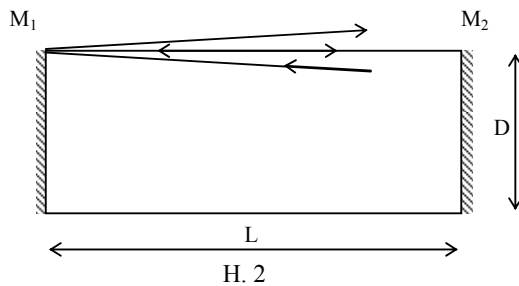
Trên thực tế, năng suất phản xạ (α) của các gương bao giờ cũng nhỏ hơn 1. Do đó một phần ánh sáng bị mất đi do sự phản xạ trên các gương. Cường độ ánh sáng mất đi trong một đơn vị thời gian do sự phản xạ là :

$$\frac{dI}{dt_{px}} = \frac{-I}{T_1} \quad \text{với} \quad T_1 = \frac{L}{C(1-\alpha)}$$

L = chiều dài giữa hai gương M_1 và M_2

C = vận tốc truyền sáng.

* Mất năng lượng do nhiễu xạ :



Một phần ánh sáng cũng bị mất đi do hiện tượng nhiễu xạ khi ánh sáng tới các gương M_1 và M_2 . Cường độ ánh sáng mất đi trong một đơn vị thời gian do hiện tượng này là :

$$\frac{dI}{dt_{nx}} = \frac{-I}{T_2} \quad \text{với}$$

Cường độ giảm tổng cộng là :

$$\frac{dI}{dt} = -I \left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \right) = \frac{-I}{T}$$

$$\text{Với} \quad \frac{1}{T} = \frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2} \quad T_2 = \frac{D^2}{C\lambda}$$

Máy càng tốt thì T có trị số càng lớn, năng lượng mất đi do các hiện tượng trên càng nhỏ.

Từ điều kiện $P > P'$ hay $(n_2 - n_1)B(h\nu) > P'$, ta suy ra

$$n_2 - n_1 > \frac{P'}{B\zeta h\nu} \quad (\text{trị số dương})$$

$$P' = \frac{\zeta}{T} \Rightarrow n_2 - n_1 > \frac{1}{Bh\nu T}$$

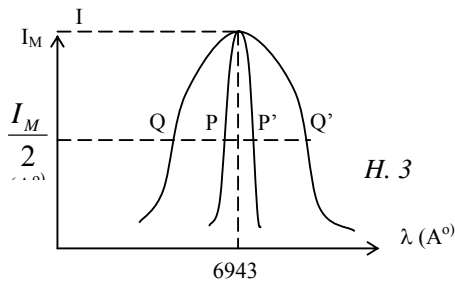
P' được tính bởi công thức

Như vậy muốn có được sự khuếch đại cường độ ánh sáng, không những ta phải có điều kiện đầu tiên $n_2 > n_1$ mà $n_2 - n_1$ phải lớn hơn một trị số (dương) xác định. Trị số này được gọi là thêm phát xạ kích động. Ta có trị số càng lớn thì thêm phát xạ kích động càng thấp. Chỉ khi vào $n_2 - n_1$ vượt qua thêm, thì mới có ánh sáng laser phát ra.

§§6. CÁC ĐẶC TÍNH CỦA TIA LASER.

1. Tính đơn sắc.

Các photon phát xạ kích động mang cùng một năng lượng $h\nu$ (nên ánh sáng rất đơn sắc. Nếu xét ánh sáng phát ra bởi ngọc hồng tảo thì trong trường hợp laser, bề rộng PP' của vạch 6943Å hẹp khoảng 10^{-4} lần so với bề rộng QQ' của vạch này trong trường hợp phát xạ thông thường.



2. Tính điều hợp.

Với một nguồn sáng thông thường, ánh sáng phát ra bởi các hạt là ánh sáng không điều hợp nhau, nghĩa là không có một sự liên hệ nào về pha giữa các chấn động phát ra bởi các hạt. Trong trường hợp nguồn sáng laser, các photon phát ra đều đồng pha nên ánh sáng laser là một chùm ánh

sáng điều hợp. Chính vì vậy, chùm tia laser có thể gây ra những tác dụng rất mạnh (tổng hợp các chấn động đồng pha).

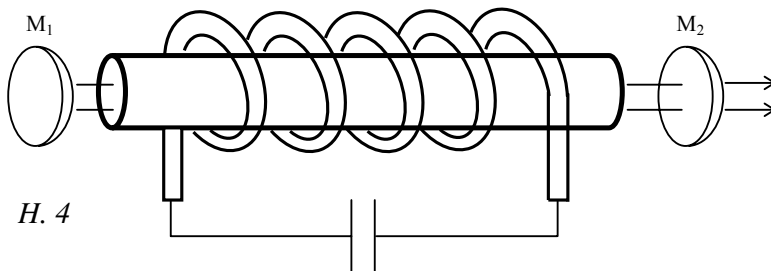
3. Tính song song.

Chùm tia laser phát ra song song với trục, với một góc loe rất nhỏ.

Năm 1962, một chùm tia laser được chiếu lên mặt trăng có góc loe là 3×10^{-5} rad.

§§7. CHẾ TẠO LASER.

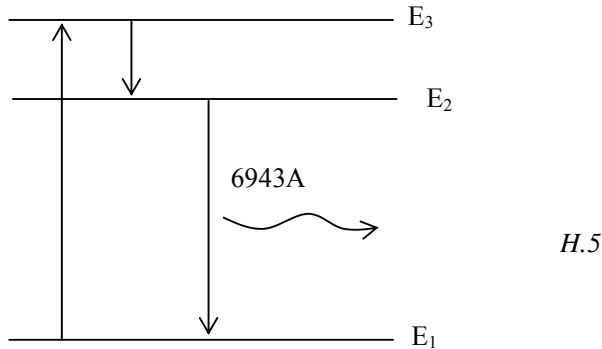
1. Laser hồng ngọc (Ngọc hồng tảo).



Hồng ngọc (Rubis) là tinh thể oxid nhôm Al_2O_3 có lẫn một lượng nhỏ ion Cr^{+++} , chính các ion Cr^{+++} này đóng vai trò hạt hoạt tính. Loại máy này gồm một thanh hồng ngọc hình trụ dài vài cm, đường kính vài mm (gần đây người ta dùng thanh hồng ngọc tới 20cm) để làm đảo ngược dân số.

Khi máy tụ điện phóng điện vào đèn Xênon, đèn phát ra xung ánh sáng có cường độ rất mạnh rơi vào thanh hồng ngọc trong một thời gian ngắn. Các xung phát ra liên tiếp này đã bơm năng lượng để biến môi trường thành hoạt tính. Các photon do đèn phát ra tới thẳng góc với thanh hồng ngọc. Các ion Cr^{+++} hấp thụ ánh sáng trong vùng vàng lục của đèn chiếu tới, nhảy từ mức năng lượng cơ bản E_1 lên mức năng lượng E_3 . Thời sống ở mức này rất ngắn nên gần như tức thời các hạt Cr^{+++} rơi xuống mức năng lượng E_2 có thời sống khá dài ($\approx 5 \cdot 10^{-3}\text{s}$), chính vì vậy hạt ở mức E_2 mới có thể lớn hơn số hạt ở mức E_1 .

Khi bị kích thích, các ion Cr^{+++} từ E_2 rơi trở về mức căn bản E_1 và phát ánh sáng đỏ có độ dài sóng 6.943Å . Các photon này di chuyển song song với trục của thanh hồng ngọc, bị dội đi dội lại giữa hai gương M_1 và M_2 khiến số photon tăng lên nhanh và gấp bội, khi đã vượt qua thêm phát xạ kích thích, tia laser bắn ra ngoài.



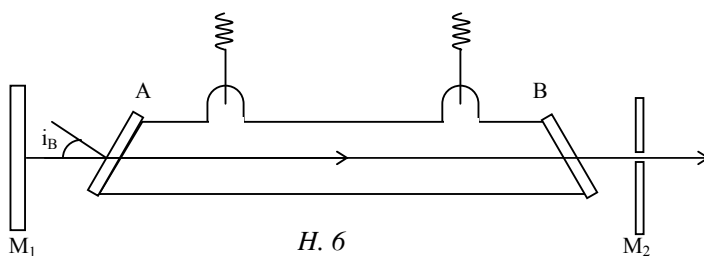
Như vậy ta thấy laser hồng ngọc tạo độ hoạt động theo chế độ phát xung. Tia laser bắn ra cách nhau chừng vài phút, tác động mỗi lần trong một thời gian rất ngắn ($\approx 10^{-6}\text{s}$) và phát ra một năng lượng (0,1 joule, nghĩa là có công suất 105 watt (trong thời gian đó tiêu thụ tới 1.000J).

Người ta cũng chế tạo được laser hồng ngọc phát xạ liên tục nhưng công suất rất yếu.

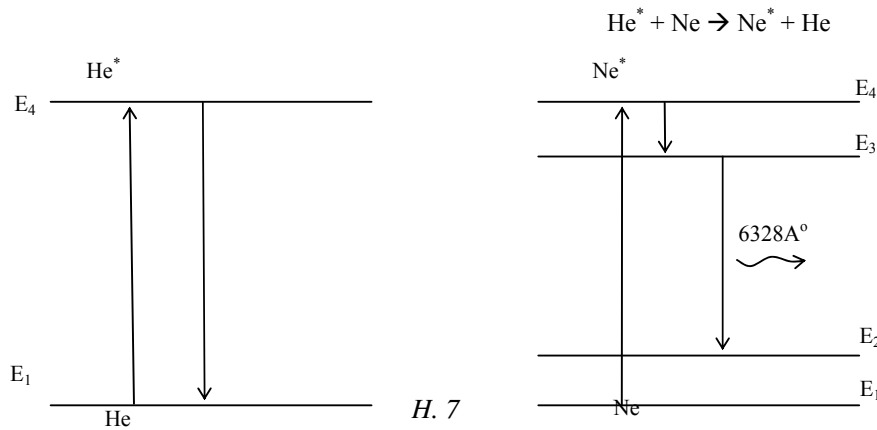
2. Laser khí He – Ne.

Trong hỗn hợp này, Ne là chất chính, còn He chỉ đóng vai trò trung gian (chất môi). Sở dĩ phải cần chất môi vì năng suất hấp thụ của Ne kém và nhất là mức năng lượng của Ne hẹp nên nếu kích thích trực tiếp Ne thì gặp phải khó khăn là phải có ánh sáng kích thích rất đơn sắc.

Ống chứa hỗn hợp khí He – Ne có hình trụ dài 1m. đường kính 25mm. Hai đầu ống là hai tấm kính trong suốt A và B nghiêng sao cho góc tới của tia sáng là góc tới Brewster (để làm giảm ánh sáng mất đi do phản chiếu).



Nguyên tử He bị kích thích nhảy từ mức cơ bản E_1 lên mức E_4 và chuyển năng lượng của nguyên tử Ne đang ở mức cơ bản.



Các nguyên tử Ne ở mức năng lượng kích thích nhảy xuống mức E3 rồi rơi xuống E2 phát ra ánh sáng đỏ 6328Å. Số hạt ở mức E2 nhỏ nên sự đảo ngược dân số dễ thực hiện hơn và sự phát xạ chỉ đòi hỏi một thêm năng lượng tương đối nhỏ hơn trường hợp Laser hồng ngọc.

Laser He – Ne hoạt động theo hệ độ phát xạ liên tục nhưng công suất rất yếu (vài miliwatt). Tia sáng Laser bắn ra qua lỗ thủng ở gương M2.

Ngày nay, người ta thực hiện được sự phát xạ laser với rất nhiều môi trường khác nhau : rắn, lỏng hay khí chất bán dẫn.

§§8. ỨNG DỤNG CỦA LASER.

- Dùng để tạo các mật độ năng lượng rất lớn, nhiệt độ cao.
 - Vì tính đơn sắc nên rất đặc dụng trong việc áp dụng vào giao thoa kế học .
 - Áp dụng vào ngành vô tuyến điện.
 - Đo khoảng cách và định vị trí
 - Trong y khoa để giải phẫu các tế bào.
 - Hướng dẫn mục tiêu.
 - Chụp ảnh toàn ký.
- v.v.....

§§9. GIỚI THIỆU VỀ QUANG HỌC PHI TUYẾN.

Quang học khảo sát với các nguồn sáng thông thường (không phải là nguồn laser) được gọi là quang học tuyến tính. Các nguồn sáng thông thường này cho ta các chùm bức xạ với cường độ điện trường tương đối yếu (khoảng 10³ V/cm) so với cường độ điện trường bên trong nguyên tử (từ 10⁷ V/cm đến 10⁹ V/cm). Khi các chùm tia bức xạ này truyền qua một môi trường thì sẽ tạo ra vectơ phân cực điện \vec{P} là một hàm tuyến tính theo điện trường \vec{E} của bức xạ truyền qua.

$$\vec{P}(\vec{\gamma}, t) = \lambda \vec{E}(\vec{\gamma}, t)$$

Trong môi trường đẳng hướng, ϵ là một vô hướng và được gọi là độ cảm điện môi tuyến tính của môi trường.

Trong một môi trường dị hướng tự nhiên, ta phải thay thế biểu thức trên bởi biểu thức tensor. Với một thành phần P_i của \vec{G} , ta có:

$$\bar{P}_i(\vec{\gamma}, t) = \lambda_{ij} E_j(\vec{\gamma}, t)$$

Trong đó (ij) là các phân tử của một tensor cấp 2, gọi là tensor độ cảm điện môi tuyến tính.

Trong quang học tuyến tính, ta đã thấy các tính chất quang học của môi trường tùy thuộc vào tần số của bức xạ truyền qua và không tùy thuộc vào cường độ điện trường của bức xạ này.

Sau sự ra đời của bức xạ laser, với các chùm tia laser có cường độ điện trường khá mạnh (từ 105 V/cm tới 108 V/cm), xấp xỉ với cường độ điện trường bên trong nguyên tử. Người ta thấy các tính chất quang học của môi trường không những tùy thuộc vào tần số của bức xạ tương tác mà còn tùy thuộc cường độ điện trường của bức xạ này. Đồng thời ghi nhận được nhiều hiệu ứng quang học mới do sự tương tác của các chùm tới laser với môi trường. Từ đó, hình thành một ngành quang học mới, được gọi là quang học phi tuyến tính. Danh từ này bắt nguồn từ biểu thức phi tuyến tính giữa vectơ phân cực điện \vec{G} và điện trường \vec{E} . Ở đây ta có biểu thức tổng quát hơn giữa \vec{G} và \vec{E}

$$P_i = \sum_j \lambda_{ij}(\vec{E}) E_j$$

Trong đó tensor độ cảm điện môi λ_{ij} (phụ thuộc vào điện trường \vec{E}).

Khai triển $\lambda_{ij}(E)$ theo các lũy thừa của cường độ điện trường với sự gần đúng bậc nhất, ta có :

$$\lambda_{ij}(\vec{E}) = \lambda_{ij} + \sum_k \lambda_{ijk} E_k$$

Vậy ta có biểu thức phi tuyến tính giữa \vec{G} và \vec{E} như sau:

$$P_i = \sum_j \lambda_{ij} E_j + \sum_{jk} \lambda_{ijk} E_j E_k$$

Trong đó (ij) là các phân tử của tensor độ cảm điện môi tuyến tính. (ijk) là các phân tử của tensor độ cảm điện môi phi tuyến.

$$P_i^l = \sum_j \lambda_{ij} E_j \text{ là thành phần của vectơ phân cực tuyến tính.}$$

$$P_i^{pt} = \sum_{j,k} \lambda_{ijk} E_j E_k \text{ là thành phần của vectơ phân cực phi tuyến.}$$

$$\text{Ta có} \quad P_i = P_i^l + P_i^{pt}$$

§§10. SƠ LƯỢC VỀ MỘT SỐ HIỆU ỨNG QUANG PHI TUYẾN.

1. Sự phát sinh sóng họa tần bậc hai (SHH).

Đó là hiện tượng khi chiếu vào môi trường một chùm laser có tần số ω (thì khi bức xạ ló ra khỏi môi trường, ta thấy xuất hiện thêm một bức xạ mới có tần số 2ω). Ta có thể thực hiện sự phát SHH bằng cách cho một chùm tia laser hồng ngọc có công suất trung bình ((10 kw) hội tụ vào mặt một bản tinh thể thạch anh. Trong ánh sáng ló, người ta thấy xuất hiện một bức xạ mới có bước sóng bằng một nửa bước sóng của laser hồng ngọc. SHH này, trong các thí nghiệm đầu tiên có cường độ rất yếu (≈ 1 miliwat).

Cần lưu ý là không phải mọi môi trường đều có khả năng phát SHH. Thí dụ không thể tạo ra sự phát SHH với một môi trường đẳng hướng hoặc với một tinh thể có tâm đối xứng nghịch đảo.

Lý thuyết và thực nghiệm cho thấy để làm tăng hiệu suất biến đổi từ sóng cơ bản (laser chiếu tới môi trường) thành SHH, người ta phải cho chùm tia laser (song song hoặc hội tụ yếu) đi qua một tinh thể theo một phương đặc biệt sao cho chiết suất của sóng cơ bản và của SHH bằng nhau. Điều kiện này được gọi là sự điều hợp chiết suất. Trong các thí nghiệm của nhóm Maker và Giordmaine thực hiện với tinh thể KDP (KH_2PO_4) và với laser hồng ngọc, người ta thấy phương đặc biệt này làm với trục quang học của tinh thể một góc (50°).

2. Sự phát sóng họa tần bậc ba (SHB).

Hiện tượng phát sóng họa tần bậc ba đã được thực hiện với calcit bởi nhóm nghiên cứu Terhune, sóng mới phát sinh có tần số gấp ba lần tần số bức xạ laser cơ bản.

3. Sự tổ hợp tần số.

Đây được coi là hiệu ứng biến đổi tổng quát hơn về tần số bức xạ do tương tác với môi trường.

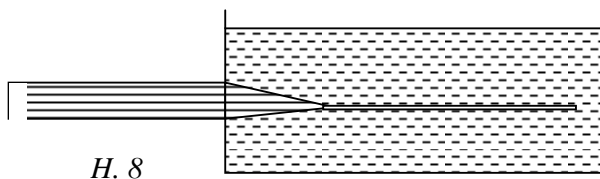
Các thí nghiệm đầu tiên về tổ hợp tần số đã được thực hiện trong tinh thể TGS (Triglycine Sulphate) ở nhiệt độ của N_2 lỏng với hai chùm tia laser có hiệu số bước sóng là $(= 8\lambda_0)$, người ta ghi nhận được, ngoài các SHH, một bức xạ tổng tần $((1 + 2)$

Người ta cũng thực hiện được các thí nghiệm trong đó ghi nhận được sự phát sinh của bức xạ hiệu tần $(\nu_1 - \nu_2)$.

Các thí nghiệm trên được thực hiện lần đầu tiên năm 1962.

4. Sự hội tụ của chùm tia sáng.

Khi chiếu một chùm tia laser song song đi qua một môi trường, thí dụ CS_2 , chùm tia laser làm cho môi trường trở thành không đồng tính; chiết suất của môi trường tăng dần khi đi từ ngoài vào trung tâm chùm tia, khiến chùm tia laser bị hội tụ lại. Năng lượng của chùm tia thay vì bị tiêu tán như trường hợp thông thường, thì ở đây được tập trung lại trong một con kênh ánh sáng có thiết diện hẹp.



5. Sự biến mất giới hạn đỏ trong hiệu ứng quang điện.

Với các chùm tia laser có cường độ đạt tới giá trị đủ mạnh, hiệu ứng quang điện ngoài xảy ra với những tần số thấp hơn tần số ngưỡng.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. Optique, G. Bruhat, Masson. Paris, 1959.
2. Cours de Physique, Devore & Annequin, VuiBert. Paris, 1965,
3. Optics, Francis Weston Sears, Addison – Wesley Publishing Company, INC London, 1964
4. Fundamental University Physics, Alonso – Finn, Addison – Wesley Publishing, Company, INC London, 1970.
5. Giao thoa, Nguyễn Chung Tu, Trung tâm Học liệu Bộ Giáo dục (Sài gòn), 1969.
6. Nhiễu xạ, Nguyễn Chung Tu, Trung tâm Học liệu Bộ Giáo dục (Sài gòn), 1969.
7. Phân cực, Nguyễn Chung Tu, Trung tâm Học liệu Bộ Giáo dục (Sài gòn), 1969.
8. Phổ học, Nguyễn Chung Tu, Trung tâm Học liệu Bộ Giáo dục (Sài gòn), 1969.
9. Luminescence, G. Monod – Herzen, Dunod. Paris. 1966
10. Holography And Its Application, Yu. I. Ostrovsky, Mir Pulishers Moscow, 1977.
11. Bases Physiques De' Electronique, L. Tarassov, Quantique - Mir Moscow, 1979.

“GIÁO TRÌNH QUANG HỌC” của khoa Vật Lý, trường Đại học Sư phạm Tp. Hồ Chí Minh, đăng ký phát hành nội bộ năm 2001. Ban Ấn bản phát hành nội bộ ĐHSP đánh máy và sao chụp 300 cuốn khổ 14 x 20,5, xong ngày 10 tháng 01 năm 2002.

QUANG ĐIỆN TỬ VÀ THÔNG TIN QUANG SỢI

VLKT 2007

1.2 Linh kiện dẫn sóng quang, sự lan truyền của ánh sáng trong linh kiện dẫn sóng quang

1.2.1 Hệ sợi quang - Mạch quang tích hợp và những đặc điểm

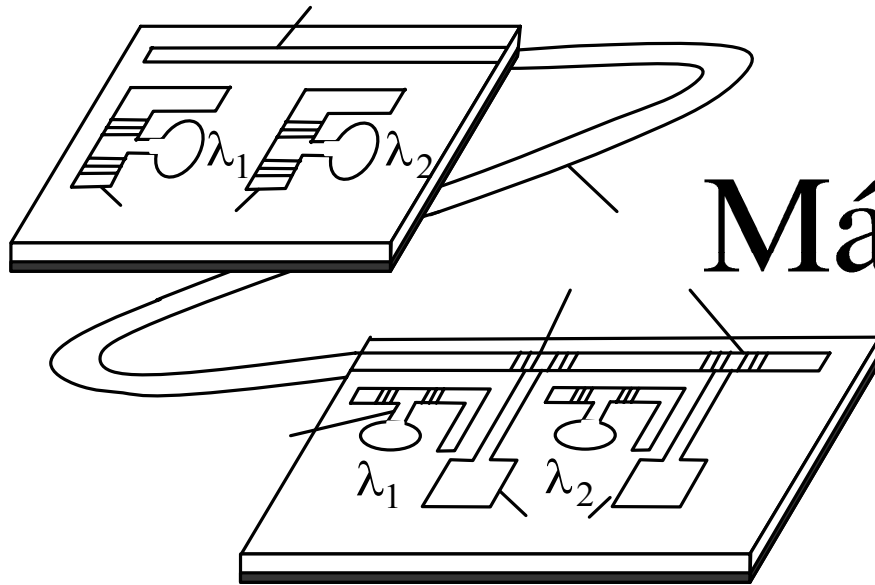
➤ Cuối thập kỷ 60, khái niệm “quang học tích hợp” (integrated optics) xuất hiện

➤ Quang học tích hợp là phương pháp truyền và xử lý tín hiệu bằng tia sáng

➤ Một số ưu điểm và nhược điểm của phương pháp truyền dẫn bằng sợi quang so với các phương pháp truyền dẫn truyền thống: ưu điểm:

- Tránh được sự giao thoa của sóng điện từ.
- Tránh được sự chập mạch điện hay bị nối đất.
- An toàn trong truyền tin, tránh được “nghe trộm”
- Tổn hao nhỏ (có thể đạt $0,2dB/km$).
- Dải thông rộng, khả năng phức hợp cao.
- Kích thước nhỏ, trọng lượng nhẹ.
- Vật liệu rẻ, dồi dào

Nhược điểm: Không chuyển tải được năng lượng điện.



Máy phát

Sơ đồ hệ sợi quang,
mạch quang tích hợp

Bộ

⇒ Ưu điểm của mạch quang tích hợp:

- Tăng độ rộng dải thông.
- Mở rộng sự phức hợp phân tần (frequency division multiplexing).
- Khớp nối ít tổn hao.
- Mở rộng chuyên mạch đa cực.
- Kích thước nhỏ, trọng lượng nhẹ, công suất tiêu thụ ít.
- Tiết kiệm trong sản xuất.
- Độ lặp lại cao.

⇒ Nhược điểm: Cần đầu tư đổi mới công nghệ cao tốn kém.

DFB Diode Laser

1.2.2 Phương thức truyền sóng (*mode*) trong linh kiện dẫn sóng bản phẳng (lý thuyết quang sóng)

-*Mode* quang học là cách thức phân bố theo không gian của năng lượng quang trong một hay nhiều chiều tọa độ.

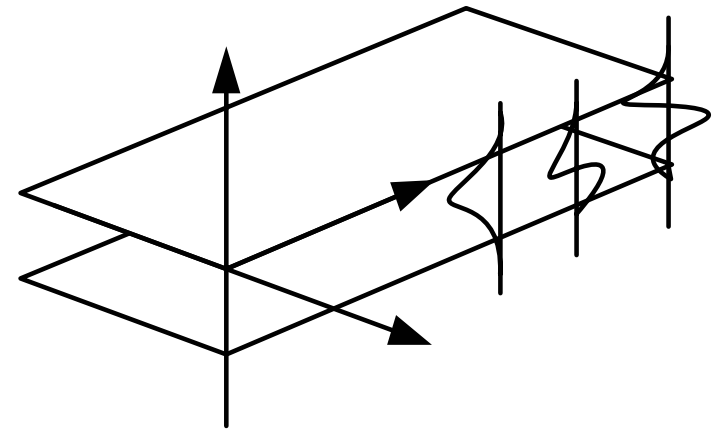
-Về toán học *mode* là điện trường thoả mãn phương trình sóng *Maxwell* với những điều kiện biên nhất định

-Linh kiện dẫn sóng bản phẳng là linh kiện dẫn sóng gồm ba lớp có ba vùng chiết suất khác nhau:

+Lớp một và ba là nửa vô hạn theo trục x ,

+Lớp hai có bề dày giới hạn theo trục x là d_g ,

+Ba lớp đều vô hạn theo hai trục y và z .



Mô hình linh kiện dẫn sóng bản phẳng

Phương trình sóng *Maxwell*

$$\nabla^2 \vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) = \frac{n^2(\vec{r})}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t)}{\partial t^2}; \quad n^2(\vec{r}) = \mu\epsilon \quad 1$$

Trường hợp sóng đơn sắc

$$\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}, t) = \vec{\mathcal{E}}(\vec{r}) e^{i\omega t} \quad 2$$

$$\nabla^2 \vec{\mathcal{E}}(\vec{r}) + k^2 \cdot n^2(\vec{r}) \cdot \vec{\mathcal{E}}(\vec{r}) = 0 \quad 3$$

Giả sử sóng lan truyền theo trục z

$$\vec{\mathcal{E}}(\vec{r}) = \vec{\mathcal{E}}(x, y, z) = \vec{\mathcal{E}}(x, y) \exp(-i\beta z) \quad 4$$

Trong đó β là hệ số lan truyền

$$\frac{\partial^2 \vec{\mathcal{E}}(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \vec{\mathcal{E}}(x, y)}{\partial y^2} + \left[k^2 n^2(\vec{r}) - \beta^2 \right] \vec{\mathcal{E}}(x, y) = 0 \quad 5$$

Linh kiện dẫn sóng được giả thiết vô hạn theo y

$$\frac{\partial^2 \mathcal{E}(x, y)}{\partial x^2} + \left(k^2 n_1^2 - \beta^2 \right) \mathcal{E}(x, y) = 0$$

vùng 1

6

$$\frac{\partial^2 \mathcal{E}(x, y)}{\partial x^2} + \left(k^2 n_2^2 - \beta^2 \right) \mathcal{E}(x, y) = 0$$

vùng 2

7

$$\frac{\partial^2 \mathcal{E}(x, y)}{\partial x^2} + \left(k^2 n_2^2 - \beta^2 \right) \mathcal{E}(x, y) = 0$$

vùng 3

8

Trường hợp sóng điện ngang (TE) là sóng phẳng truyền theo trục z : \mathcal{E}_x và \mathcal{E}_z bằng không, nghĩa là $\vec{\mathcal{E}}(x, y) = \mathcal{E}_y(x, y)$ sóng phân cực theo trục y .

\mathcal{E}_y không phụ thuộc vào y và z , vì theo các trục đó các lớp vật liệu là vô hạn nên không có sự phản xạ, không tạo thành sóng đứng

Trong ba vùng trên ta có lời giải

$$\varepsilon_y(x) = \begin{cases} A \exp(-qx) & 0 \leq x \leq \infty \\ B \cos(hx) + C \sin(hx) & -d_g \leq x \leq 0 \\ D \exp[p(x + d_g)] & -\infty \leq x \leq -d_g \end{cases} \quad 9$$

Các hằng số A, B, C và D có thể được xác định từ các điều kiện liên tục của $\frac{\partial \varepsilon_y}{\partial x}$ và của ε_y tại $x = 0$ và $x = -d_g$,

$$\varepsilon_y(x) = \begin{cases} c \exp(-qx) \\ c [\cos(hx) - (q/h) \sin(hx)] \\ c [\cos(hd_g) + (q/h) \sin(hd_g)] \exp[p(x + d_g)] \end{cases} \quad 10$$

Để xác định q, h và p chúng ta thay ε_y vào phương trình sóng

$$q = (\beta^2 - n_1^2 k^2)^{1/2} \quad 11$$

$$h = (k^2 n_2^2 - \beta^2)^{1/2} \quad 12$$

$$p = (\beta^2 - n_3^2 k^2)^{1/2} \quad 13$$

Dùng điều kiện liên tục của $\frac{\partial \mathcal{E}_y}{\partial x}$ tại $x = -dg$

$$-h \sin(-hd_g) - q \cos(-hd_g) = p \left[\cos(hd_g) + (q/h) \sin(hd_g) \right]$$

$$\operatorname{tg}(hd_g) = \frac{q + p}{h(1 - qp/h^2)} \quad 14$$

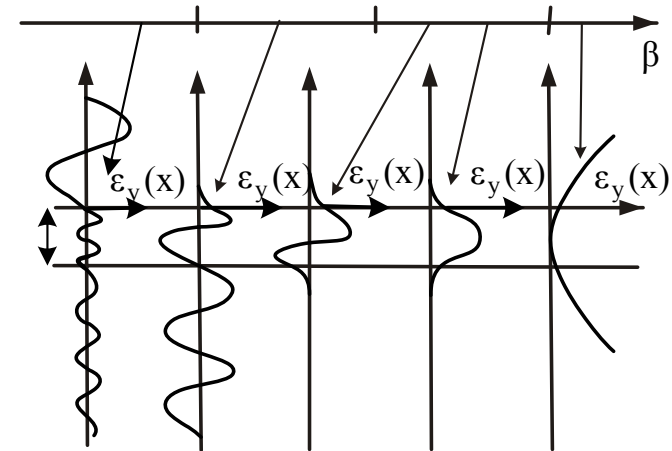
Phương trình siêu việt này giải bằng phương pháp đồ thị (vẽ hai vế theo β). Kết quả cho ta một tập hợp các giá trị gián đoạn cho phép của β ứng với các mode cho phép, kí hiệu là β_m

➤ Đối với trường hợp $n_2 > n_3 > n_1$ ta có thể nhận được các mode có dạng như ở hình bên.

Một linh kiện dẫn sóng làm từ vật liệu có chiết suất n_2 trên đế có chiết suất n_3 và bao quanh là không khí có chiết suất n_1 .

➤ Điều kiện cần thiết của linh kiện dẫn sóng là $n_2 > n_1$ và n_3 .

- *Mode (a)* không có ý nghĩa vật lý, vì tăng không giới hạn khi $x \rightarrow \begin{matrix} +\infty \\ -\infty \end{matrix}$
- *Mode (b)* và (c) là sóng được dẫn truyền (guided mode). Sóng ngang điện trường bậc không và bậc một: TE_0 và TE_1 .
- *Mode (d)* giảm theo exp khi ra ngoài nhưng tồn tại theo hàm sin trong đế và gọi là *mode bức xạ đế* (substrate radiation mode). Nó không có lợi trong việc truyền tín hiệu, nhưng có thể rất có lợi trong việc dùng để ghép nối, ví dụ trong khớp hình nêm (tapered coupler).
- *Mode (e)* là *mode* không truyền được trong linh kiện dẫn sóng



Sự phụ thuộc vào x trong các mode khác nhau

➤ Chỉ có những giá trị β nằm trong khoảng $kn_3 < \beta < kn_2$ mới ứng với các *mode* có thể dẫn truyền được trong linh kiện dẫn sóng

- Số *mode* cho phép phụ thuộc vào bề dày của linh kiện dẫn sóng và các đại lượng ω , n_1 , n_2 và n_3 .
- Khi cho trước bước sóng ánh sáng, chiết suất của các lớp vật liệu trong linh kiện dẫn sóng phải được chọn như thế nào để có thể truyền dẫn một *mode* cho trước
- Linh kiện bất đối xứng với $n_1 \ll n_3$ thì điều kiện đối với chiết suất sẽ là:

$$\Delta n = n_2 - n_3 \geq (2m + 1)^2 \cdot \lambda_0^2 / (32n_2 d_g^2) \quad 15$$

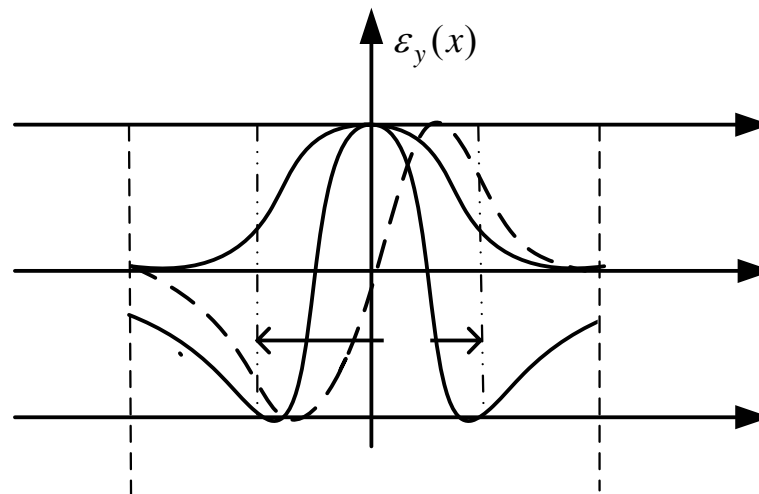
Δn : độ chênh chiết suất

$$d_g = \frac{1}{2} \frac{(m+1)\lambda_0}{(n_2^2 - n_3^2)^{1/2}}$$

16

- Trường hợp cấu trúc đối xứng: $n_2 > n_1 = n_3$

$$d_g = \frac{1}{2} \frac{m\lambda_0}{(n_2^2 - n_3^2)^{1/2}}$$

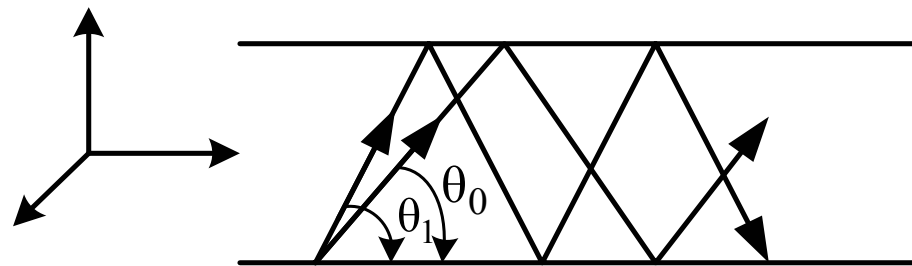


1.2.3 Phương thức truyền sóng trong linh kiện dẫn sóng quang theo mô hình quang học-tia (ray optic).

➤ Trong phương pháp quang học-tia sự lan truyền ánh sáng theo trục z được xem như tạo nên bởi sự lan truyền của các sóng phẳng theo **đường zig-zag** trong mặt phẳng $x-y$ do sự **phản xạ toàn phần** từ các mặt phân cách tạo nên linh kiện dẫn sóng.

➤ Các sóng phẳng bao gồm những mode chuyển động với **cùng một vận tốc pha**. Tuy nhiên do góc phản xạ tạo bởi các đường **zig-zag** là khác nhau đối với từng *mode*, cho nên **thành phần z của vận tốc pha của chúng khác nhau**

➤ Sơ đồ tia ứng với hai *mode* TE_0 và TE_1 lan truyền trong linh kiện dẫn sóng ba lớp với $n_2 > n_3 > n_1$.



a- Sự liên quan giữa hai phương pháp quang lý và quang hình

Lời giải phương trình sóng có dạng

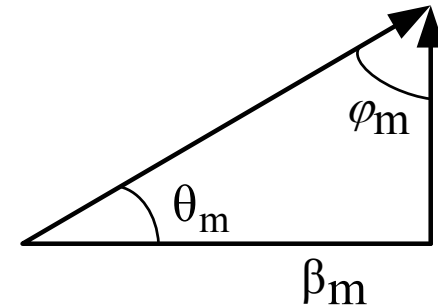
$$\mathcal{E}_y(x, y) \approx \sin(hx + \gamma) \quad 17$$

Thay vào phương trình 7

$$\frac{\partial^2 \mathcal{E}_y(x, y)}{\partial x^2} + (k^2 n^2 - \beta^2) \mathcal{E}_y(x, y) = 0$$

$$-h^2 \sin(hx + \gamma) + (k^2 n^2 - \beta^2) \sin(hx + \gamma) = 0$$

$$\beta^2 + h^2 = k^2 n_2^2$$



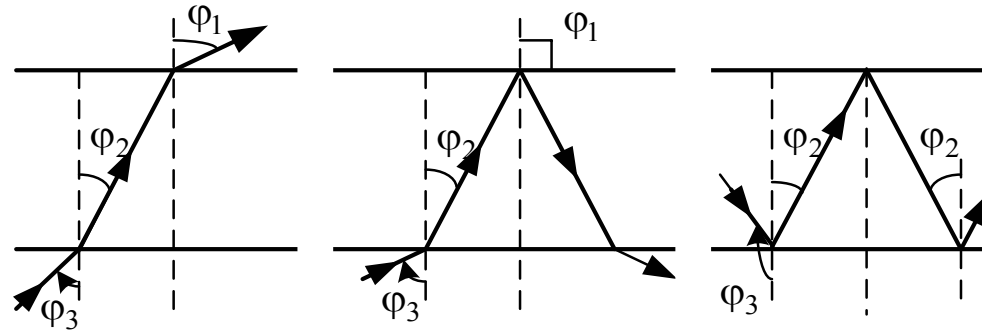
18

β , h và kn_2 đều là các hệ số lan truyền

Một *mode* với hệ số lan truyền theo trục z là β_m và hệ số lan truyền theo trục x là h , có thể biểu diễn bằng một sóng phẳng lan truyền theo phương làm thành với trục z góc

$$\theta_m = \arctan(h / \beta_m) \quad \text{có hệ số lan truyền } kn_2$$

➤ Xét tia sáng lan truyền trong một linh kiện dẫn sóng ba lớp bằng mô hình quang học-tia



Tia ở hình a ứng với *mode* bức xạ (*mode a*), ở hình b là *mode* đế (substrate mode), ở hình c là *mode* được dẫn truyền (guided mode)

$$\sin \varphi_1 / \sin \varphi_2 = \frac{n_2}{n_1} \quad 19$$

$$\sin \varphi_2 / \sin \varphi_3 = \frac{n_3}{n_2} \quad 20$$

n_1

n_2

➤ Nếu từ giá trị φ_3 rất nhỏ (gần bằng không) và tăng dần, chúng ta sẽ thấy sự diễn biến sau:

- Khi φ_3 nhỏ tia sáng sẽ đi xuyên qua cả hai mặt phân cách, chỉ xảy ra hiện tượng khúc xạ ở mặt phân cách đó. Trường hợp đó ứng với *mode* bức xạ (radiation mode), hình a.

- Khi φ_3 tăng lên đạt đến giá trị góc tới hạn của hiện tượng phản xạ toàn phần bên trong ở mặt phân cách $n_2 - n_1$ thì tia sáng đã bị nhốt lại một phần, ứng với *mode* đế, hình b

Điều kiện phản xạ toàn phần là:

$$\varphi_2 \geq \arcsin(n_1 / n_2) \quad 21$$

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} \cdot \frac{\sin \varphi_2}{\sin \varphi_3} = \frac{n_3}{n_1} \quad \text{hay} \quad \varphi_3 \geq \arcsin(n_1 / n_3) \quad 22$$

- Khi φ_3 tiếp tục tăng lên để cho đạt đến góc tới hạn của hiện tượng phản xạ toàn phần bên trong ở mặt phân cách $n_2 - n_3$ thì tia sáng bị nhốt lại hoàn toàn, ứng với *mode* truyền dẫn hình c

$$\varphi_2 \geq \arcsin(n_3 / n_2); \quad \left(\sin \varphi_2 > \frac{n_3}{n_2} \right) \quad 23$$

Từ lý thuyết quang lý: $\sin \varphi_2 = \beta / kn_2$ 24

- **Mode bức xạ xuất hiện khi $\beta \leq kn_1$**

$$\sin \varphi_2 \leq kn_1 / kn_2 = n_1 / n_2$$
 25

Điều kiện này phù hợp với (21).

- **Nếu β lớn hơn kn_1 và nhỏ hơn kn_3 thì có thể duy trì *mode* để.**

- **Chỉ khi $\beta \geq kn_3$ mới có thể duy trì *mode* truyền dẫn**

$$\sin \varphi_2 = \beta / kn_2 \geq (kn_3 / kn_2) = n_3 / n_2$$
 26

Điều kiện này phù hợp với (23).

- **Nếu $\beta \geq kn_2$ $\sin \varphi_2 = \beta / kn_2 \geq 1$** 27

Trường hợp này không có ý nghĩa vật lí.

Như vậy những kết quả nghiên cứu bằng quang hình và quang lí là phù hợp với nhau.

b. Bản chất gián đoạn của hệ số lan truyền β .

↪ Điều kiện tự hợp

- Sóng truyền trong linh kiện dẫn sóng sẽ lặp lại chính nó sau hai lần phản xạ liên tiếp trên mặt phân biên $n_1 \div n_2$ và $n_3 \div n_2$.
- Độ dịch pha của sóng tới khi truyền từ A đến B phải bằng hoặc khác biệt cỡ số nguyên lần 2 độ dịch pha của sóng phản xạ và truyền từ A đến C rồi phản xạ một lần nữa.

Do $\overline{AC} - \overline{AB} = 2d \sin \theta$ 28

nên độ dịch pha tổng cộng có dạng:

$$\frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 2d \sin \theta_m - \delta_{21} - \delta_{23} = 2m\pi \quad 29a$$

với $m = 1, 2, 3, \dots$

δ_{23} và δ_{21} là góc dịch pha khi phản xạ toàn phần

Hay $2kn_2 d \cos \varphi_m - \delta_{21} - \delta_{23} = 2m\pi$ 29b

Với $k = \frac{2\pi}{\lambda_0}$

- Trường hợp sóng TE

$$\operatorname{tg} \delta_{23} = \left(n_2^2 \sin^2 \varphi_2 - n_3^2 \right)^{1/2} / (n_2 \cos \varphi_2) \quad 30$$

$$\operatorname{tg} \delta_{21} = \left(n_2^2 \sin^2 \varphi_2 - n_1^2 \right)^{1/2} / (n_2 \cos \varphi_2) \quad 31$$

- Đối với m cho trước có thể tính được φ_m (hay θ_m) nếu biết n_1, n_2, n_3 và d_g .

Như vậy ta được một số giới hạn các giá trị φ_m gián đoạn ứng với các $mode$ được phép khác nhau.

Đối với mỗi $mode$ được phép, ta có giá trị β_m tương ứng

$$\beta_m = kn_2 \sin \varphi_m = kn_2 \cos \theta_m \quad 32$$

- Vận tốc lan truyền của ánh sáng theo phương của linh kiện dẫn sóng:

$$v_m = \frac{c}{n_2} \sin \varphi_m = \frac{c}{n_2} \cdot \left(\frac{kn_2}{\beta_m} \right)^{-1} = \frac{c}{n_2^2} \cdot \left(\frac{k}{\beta_m} \right)^{-1} \quad 33$$

Chiết suất hiệu dụng của linh kiện dẫn sóng :

$$n_{\text{eff}} = c / v_m = (\beta_m / k)^{-1} \cdot n_2^2 = \frac{n_2}{\sin \varphi_m} \quad 34$$

↪ Điều kiện mặt biên

Để được dẫn truyền theo phương vuông góc với mặt biên (phương x trong ví dụ), phải có sự phản xạ toàn phần và tạo thành sóng đứng.

Điện trường của sóng ánh sáng trên các mặt biên phải bằng không, do sự cộng hưởng sóng tới và sóng phản xạ .

Hệ số truyền sóng hướng biên:

$$h = \frac{2\pi}{\lambda_{\perp}}, \lambda_{\perp} \text{ là bước sóng của sóng hướng biên} \quad 35$$

Điều kiện tạo sóng đứng theo phương hướng biên

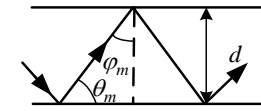
$$d = m \frac{\lambda_{\perp}}{2} = \frac{m}{2} \cdot \frac{2\pi}{h} \quad 36$$

$$h = kn_2 \cos \varphi_m = kn_2 \sin \theta_m \quad 37$$

$$kn_2 = \frac{2\pi}{\lambda}; \lambda \text{ là bước sóng ánh sáng lan truyền theo đường zig-zag}$$

$$h = \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_m = \frac{2\pi}{\lambda_{\perp}} \quad 38$$

$$d = \frac{m}{2} \cdot \frac{2\pi}{\frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta_m} \rightarrow 2d \sin \theta_m = m\lambda \quad 39$$



Tính đến độ lệch pha do hiện tượng phản xạ

$$2 \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 d \sin \theta_m - \delta_{23} - \delta_{21} = 2m\pi \quad 40$$

trong đó: $m = 0, 1, 2, \dots$

Để tìm θ_m , ta giải phương trình điều kiện mặt biên bằng phương pháp vẽ đồ thị

Đối với mode $m = 0$ (mode cơ bản)

$$2 \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 d \sin \theta = \delta_{23} + \delta_{21} \quad 41$$

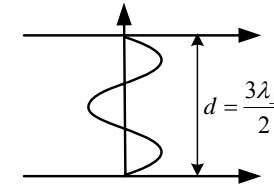
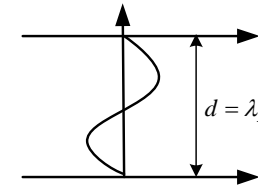
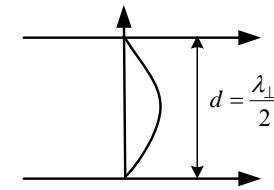
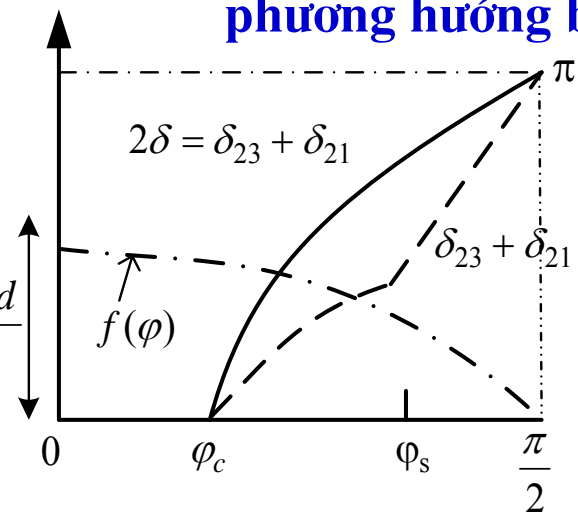
$$f(\varphi) = 2 \frac{2\pi}{\lambda_0} n_2 d \cos \varphi = \delta_{23} + \delta_{21} \quad 42$$

Sự phân bố cường độ điện trường theo phương hướng biên

φ_c là góc tới hạn phản xạ toàn phần (1-2).

φ_s là góc tới hạn phản xạ toàn phần (2-3).

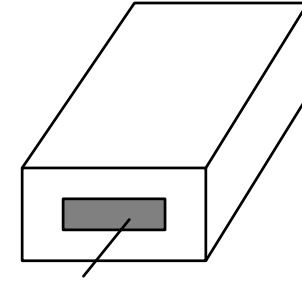
$$\frac{2\pi n_2 d}{\lambda_0}$$



1.2.4 Cấu trúc linh kiện dẫn sóng trong mạch quang tích hợp.

1. Linh kiện dẫn sóng dạng kênh.

Linh kiện dẫn sóng dạng kênh có kênh dẫn sóng **tiết diện ngang hình chữ nhật**, chiết suất n_2 , được bao quanh bởi một vật liệu có chiết suất n_1 nhỏ hơn n_2 .

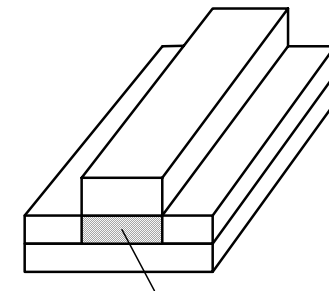


Sơ đồ linh kiện dẫn sóng dạng kênh

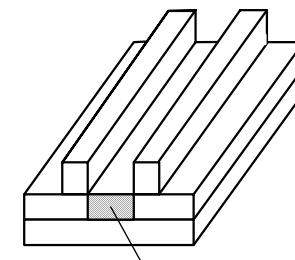
2. Linh kiện dẫn sóng dạng có dải phủ (strip-loaded waveguide).

-Linh kiện dẫn sóng này tạo thành bằng cách phủ một dải vật liệu có chiết suất n_3 nhỏ hơn lên phía trên một lớp dẫn sóng phẳng với chiết suất n_2 , nằm trên đế có chiết suất n_1 nhỏ hơn n_2

-Do điện áp đặt vào dải phủ, chiết suất của lớp nằm phía dưới dải phủ sẽ khác với hai phần bên cạnh tạo nên một kênh dẫn sóng



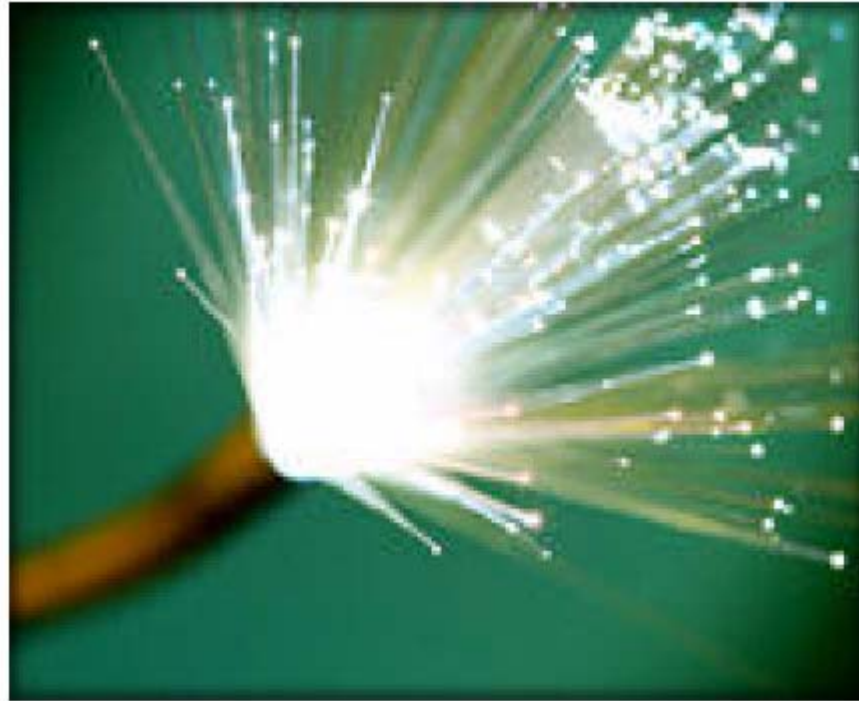
Sơ đồ linh kiện dẫn sóng dạng dải phủ



Sơ đồ linh kiện dẫn sóng dạng hai dải phủ kim loại

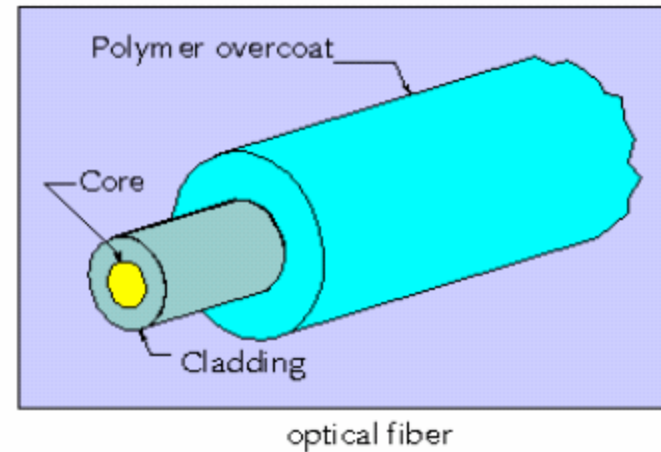
Để tạo các linh kiện dẫn sóng quang, trong công nghệ vi điện tử đã dùng rất nhiều giải pháp công nghệ khác nhau:

- Phương pháp phủ màng mỏng dẫn quang (thuỷ tinh, nitrit, oxit...).**
- Bắn phá bằng ion (cấy ion) khuếch tán tạp chất để tạo lớp dẫn quang.**
- Phát triển lớp epitaxy dị chất dẫn quang.**
- Tạo lớp kém dẫn (làm giảm nồng độ hạt dẫn bằng các hiệu ứng tiếp xúc), bằng epitaxy, khuếch tán tạp, cấy ion.**



1.3 Sợi quang.

1.3.1 Tính chất, phân loại và công nghệ chế tạo.

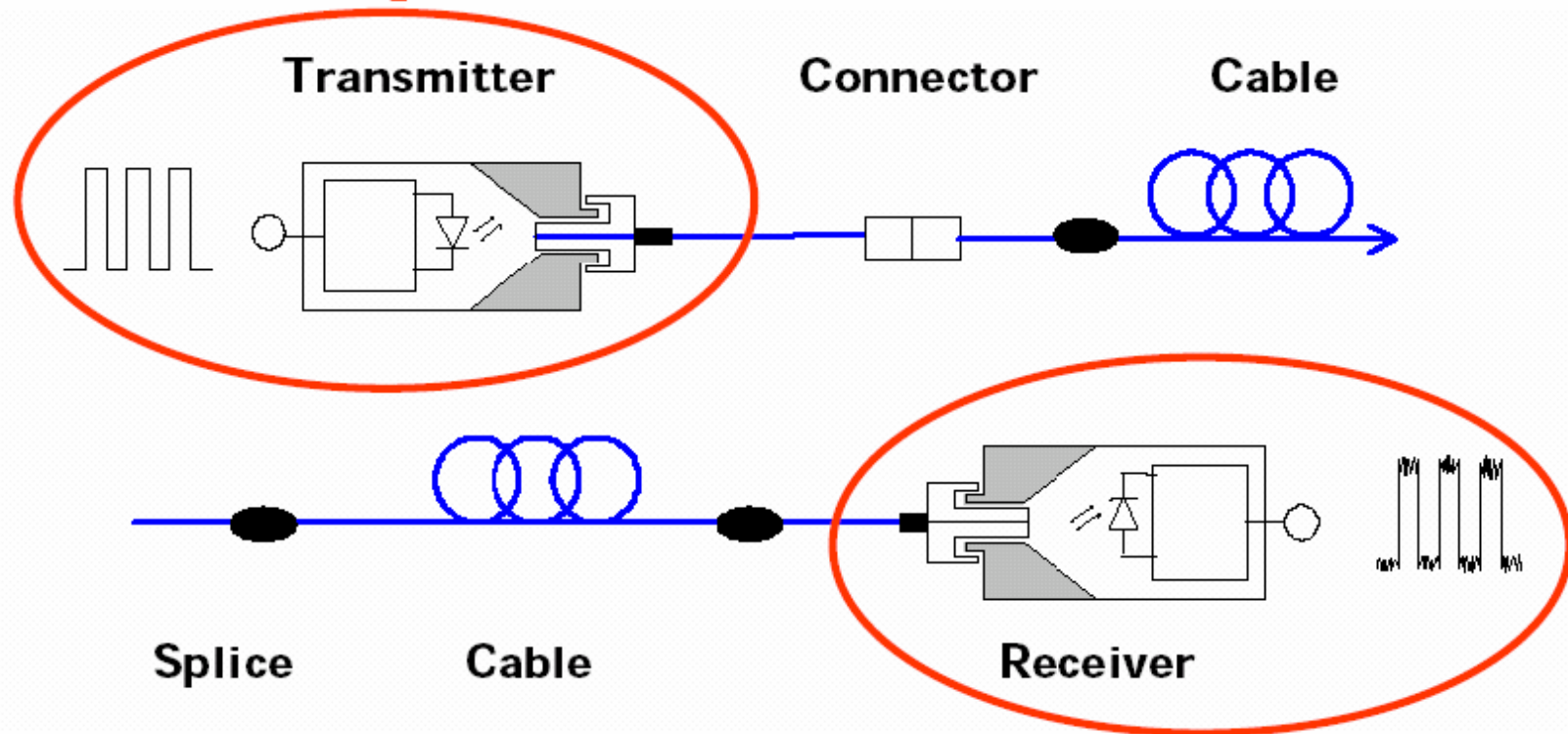


1. Tính chất cần thiết của sợi quang.

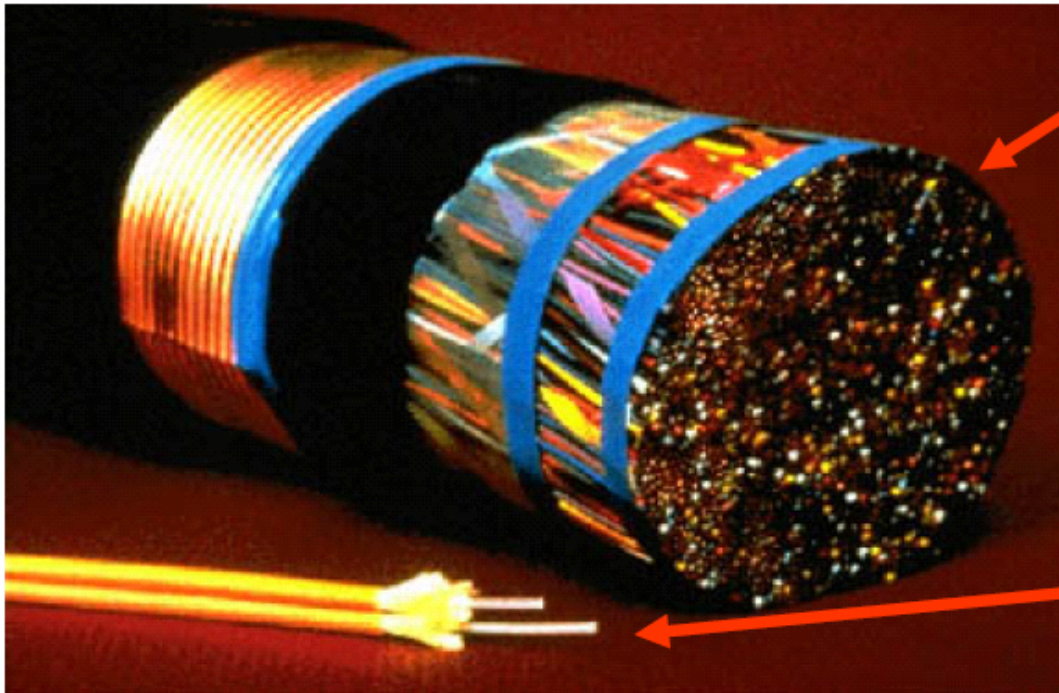
- Sợi quang phải có **độ tổn hao thấp**. độ tổn hao chủ yếu bao gồm hai quá trình: hấp thụ bức xạ và tán xạ bức xạ. Như vậy để giảm tổn hao phải lựa chọn vật liệu và bước sóng laser tương ứng sao cho hệ số hấp thụ thấp nhất, phải nâng cao chất lượng vật liệu và giảm thiểu sự tán xạ của bức xạ.
- Sợi quang phải có **tính chất cơ học thích hợp**, phải có độ bền, độ chịu mỏi do rung động cao.
- Sợi quang phải có **tính lão hoá thấp**, có thể sử dụng ổn định trong nhiều chục năm.

Basic Optical Link Design

Electrical-to-Optical Conversion



Cable Size Comparison: Copper vs. Fiber



This is a standard copper cable used for telephone service. This carries about 300 phone calls

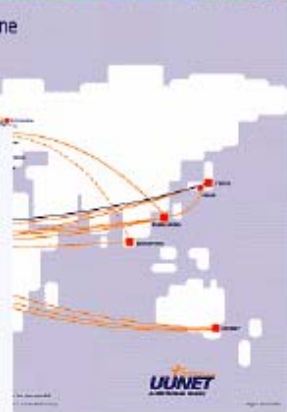
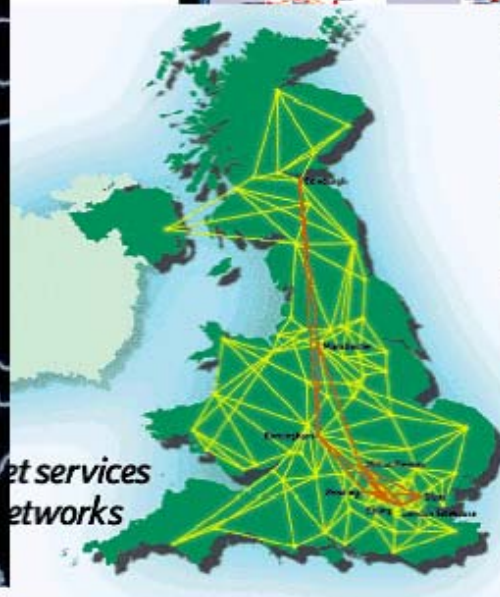
One of these fibers can carry up to 10 million telephone calls



AT&T IP BACKBONE NETWORK 2Q2000



UUNET's Global Internet Backbone



2. Cấu tạo và phân loại sợi quang.

➤ Sợi quang thường có tiết diện tròn, gồm hai phần: lõi và vỏ; đường kính khoảng $100\mu m \div 400\mu m$.

- Lớp vỏ có chiết suất không đổi n_2 nhỏ hơn chiết suất lớp lõi n_1 .

➤ Phân loại theo cấu tạo

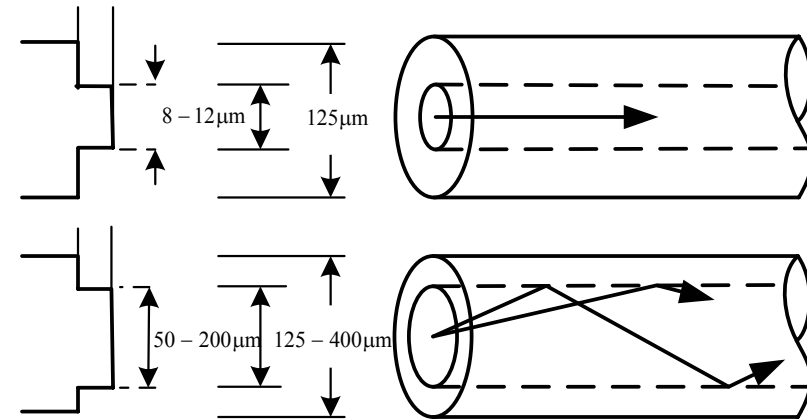
-Loại sợi quang dẹt cấp
:chiết suất bậc thang.

-Loại sợi quang liên tục
:chiết suất giảm dần.

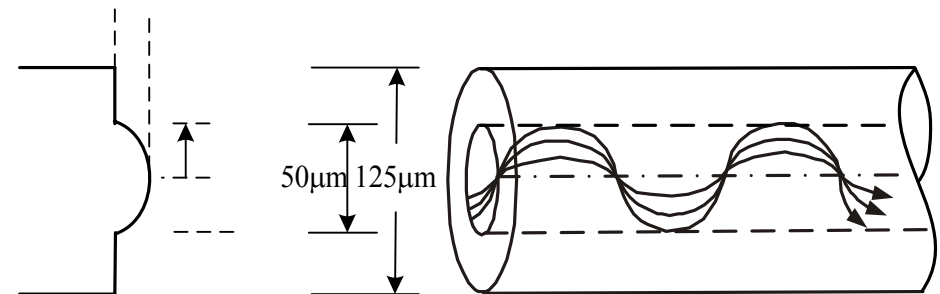
➤ Phân loại theo số mode

- Sợi quang đơn mode

- Sợi quang đa mode



Sợi quang dẹt cấp. a. Đơn mode.
b. Đa mode



Sợi quang liên tục

3. Các thông số quan trọng của sợi quang

a. Độ chênh chiết suất

Người ta biểu diễn độ chênh chiết suất bằng đại lượng Δ :

$$\Delta = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (1.43)$$

-Đối với sợi quang đơn *mode*, $\Delta = 0,005$.

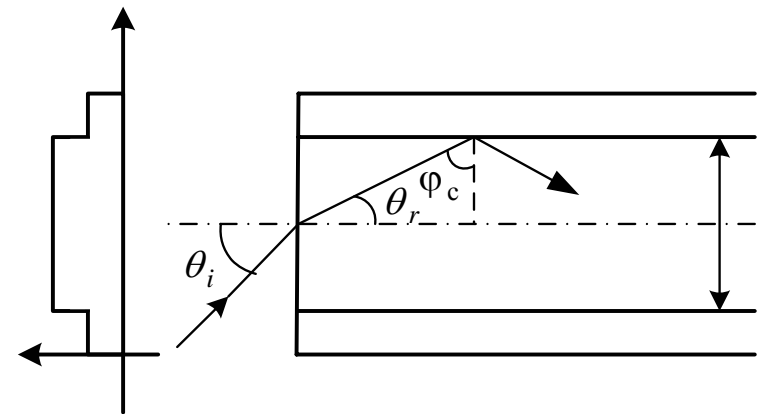
-Đối với sợi quang đa *mode*, $\Delta = 0,02$.

b. Khẩu độ số *NA* (numeral aperture).

$$NA = \sin \theta_{i_{\max}} = \left(n_1^2 - n_2^2 \right)^{1/2} \quad (1.44)$$

trong đó $\theta_{i_{\max}}$ là góc tới lớn nhất để tia khúc xạ vào lõi còn gây nên hiện tượng phản xạ toàn phần ở ranh giới lõi và vỏ

$$NA = \left(n_1^2 - n_2^2 \right)^{1/2} \quad (1.45)$$



*Sơ đồ mô tả đại lượng
khẩu độ số NA*

Khẩu độ số đặc trưng cho sự ghép nối hiệu quả giữa nguồn laser với sợi quang

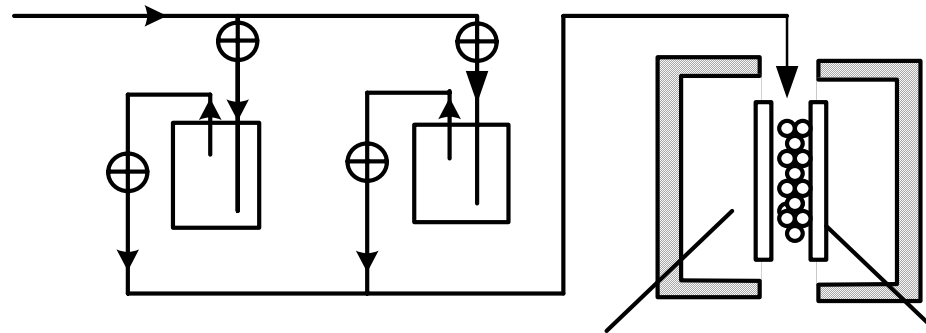
4. Công nghệ chế tạo sợi quang.

Công nghệ chế tạo sợi quang được chia làm hai giai đoạn: giai đoạn chế tạo phôi (preform) và giai đoạn kéo sợi.

➤Giai đoạn chế tạo phôi: phương pháp lắng đọng hoá học từ pha hơi (chemical vapour deposition/ *CVD*).

-Dòng khí mang H_2 thổi qua các bình đựng $SiCl_4$ và $GeCl_4$ để tạo dòng hơi thổi vào một ống thạch anh (SiO_2) tinh khiết quay tròn đều.

-Dòng khí $H_2 + O_2$ cháy tạo nhiệt gây phản ứng với các hơi $SiCl_4$ và $GeCl_4$ tạo thành HCl và các oxit SiO_2 và GeO_2 . Các hạt SiO_2 pha tạp GeO_2 ngưng tụ lên thành ống, trở thành một lõi đặc. Phôi với sự phân bố chiết suất (sự phân bố tạp GeO_2) cần thiết theo thiết kế.

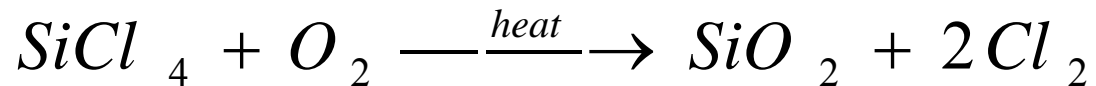


Sơ đồ phương pháp công nghệ CVD.

CVD of optical fiber



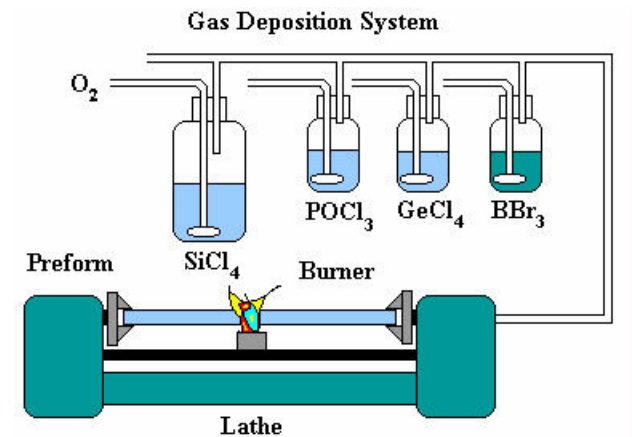
- Prepare a silica tube (glass extrusion).
- Heat the tube
- Inject SiCl_4 and O_2 into the tube
- At the heated portion, the SiCl_4 is oxidized



- Ultra pure SiO_2 is deposited on the inner walls of the tube

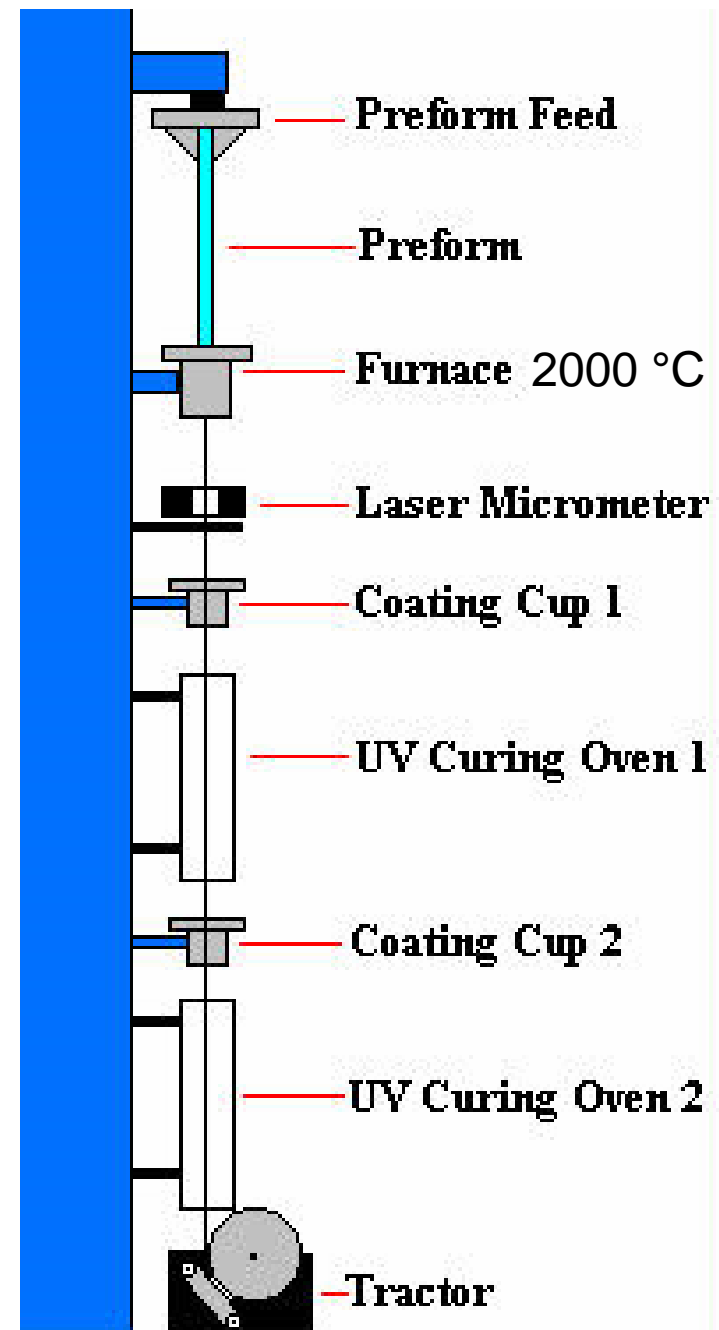
- Draw the tube through the furnace, continuously coating the inner walls

- SiO_2 particles deposit and sinter along the tube, leaving a hollow core [for now].

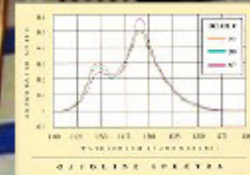
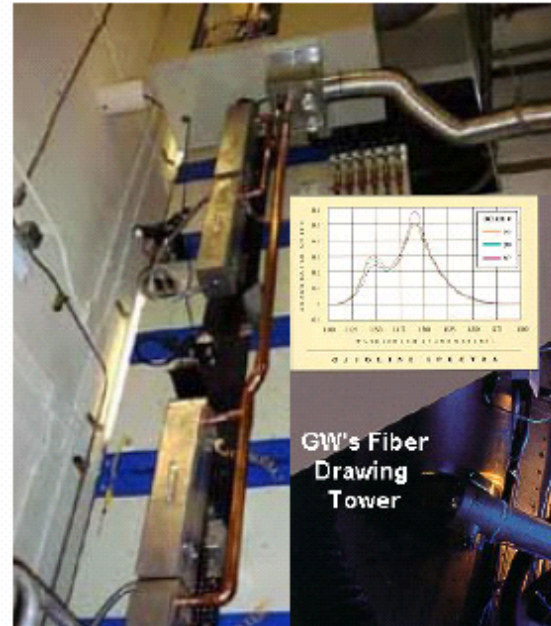
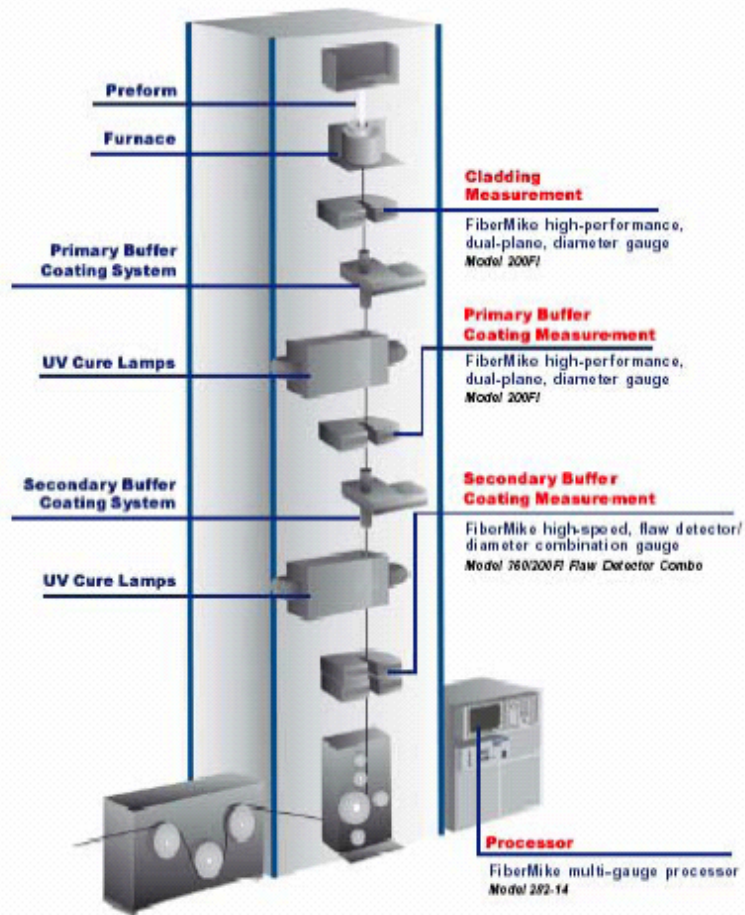


Continuous production

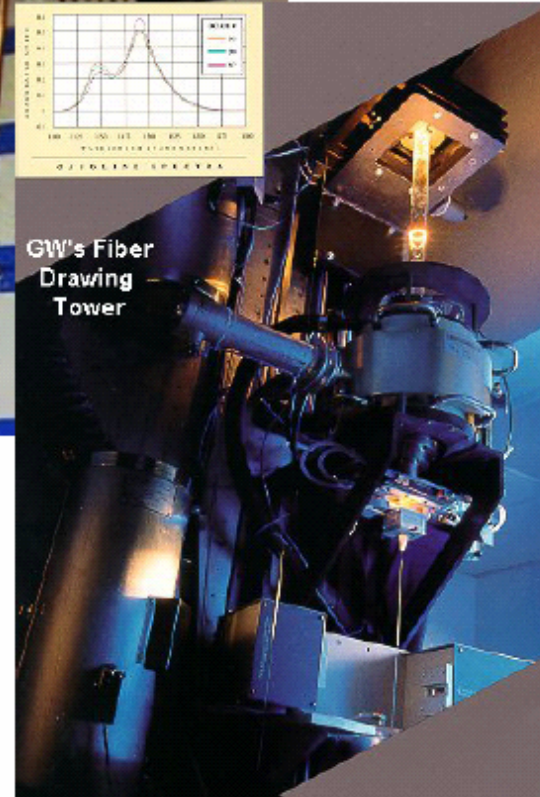
- Fibers are drawn at 30 to 60 *feet per second*.
- Multiple polymer coatings may be applied
 - Thermoplastic (buffer)
 - Aramid (strength)
 - PVC or fluoride co-polymer
- Spools of up to *several kilometers* are wound.



Manufacturing Fiber: Draw Tower



GW's Fiber Drawing Tower

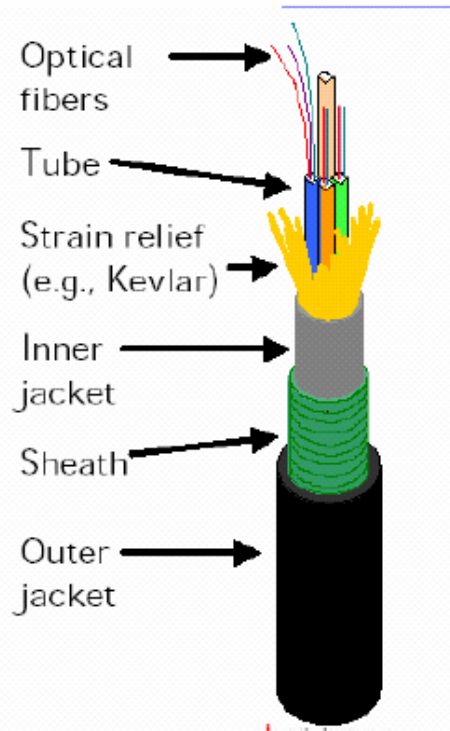


➤ **Giai đoạn kéo sợi:**

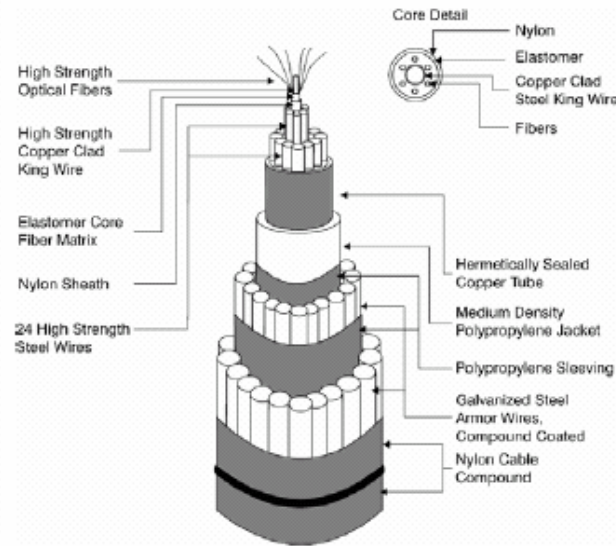
Từ các thỏi phôi có phân bố chiết suất xác định, người ta kéo ra các sợi quang có phân bố chiết suất theo thiết kế trước. Các thỏi phôi được đặt trong các lò nung để nâng cao nhiệt độ, phôi đặt thẳng đứng, ở đầu cuối của phôi đạt nhiệt độ nóng chảy và từ đó kéo ra sợi quang, gồm lõi và vỏ. Sợi quang kéo xuống phía dưới được bọc lớp bảo vệ polyme. Những sợi quang như thế này thường có độ dài từ vài km đến hàng chục km.

➤ Cáp quang được chế tạo từ vài sợi quang đến vài chục sợi quang, có lõi thép để hạn chế độ cong xoắn và có thể có một số dây dẫn điện để tải dòng cung cấp cho nguồn của các bộ hồi phục trên đường dây.

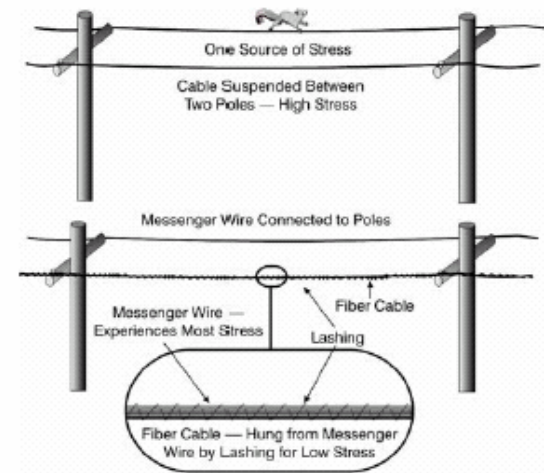
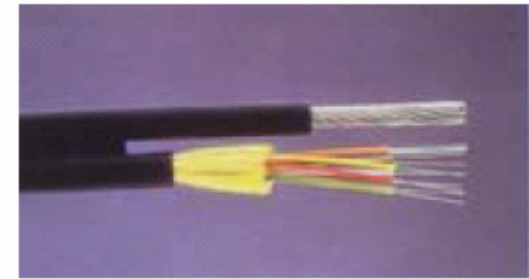
Fiber Cables



Multi-purpose Cable

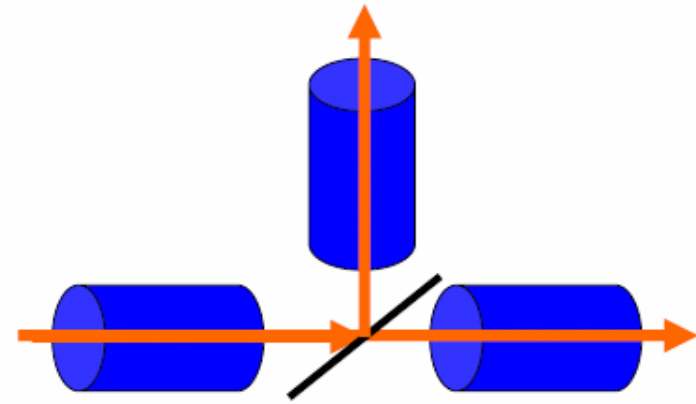
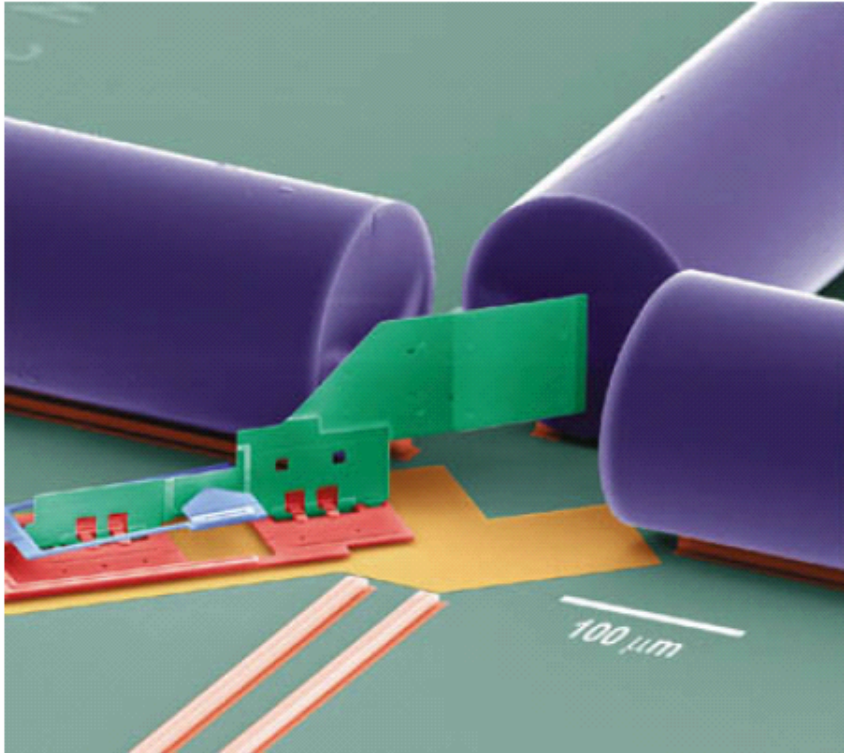


Submarine Cable

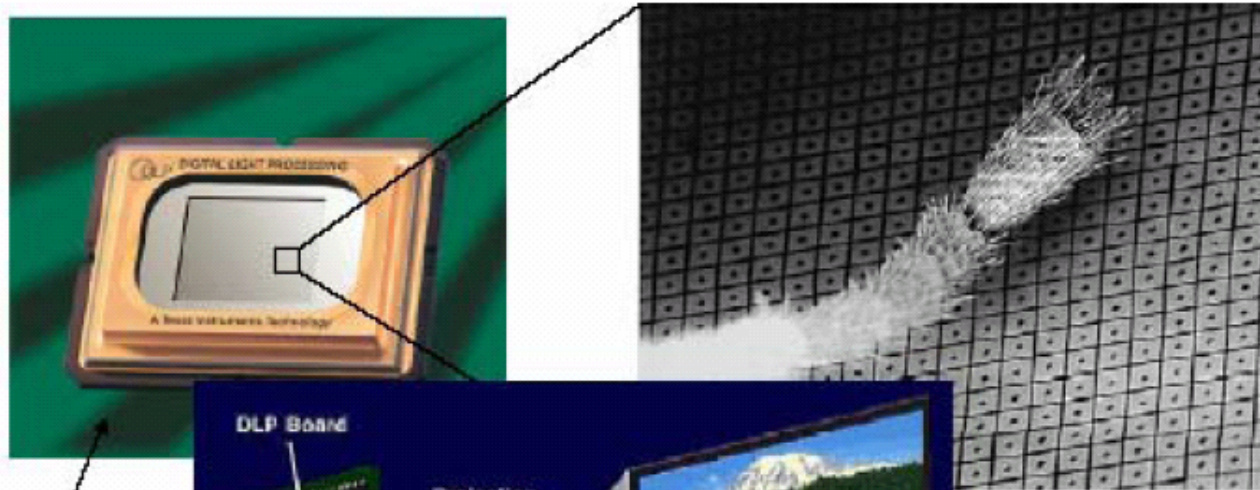


Telephone Pole Mounted Cable

Optical Switch



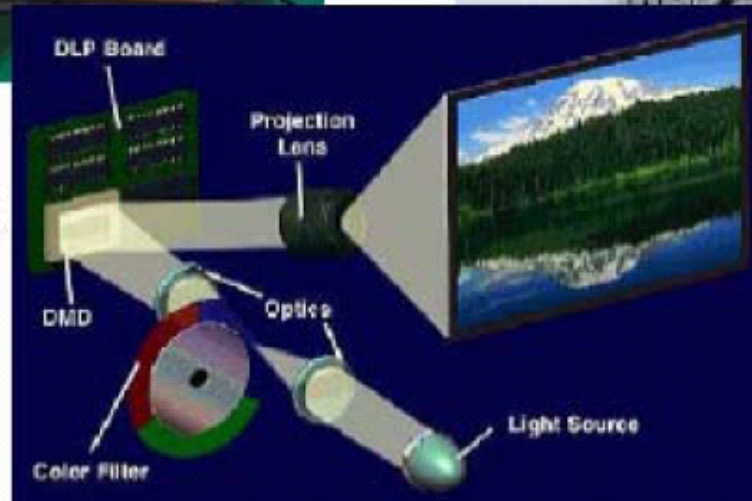
MEMS Mirror Array for Projectors Digital Light Processing (DLP)



Packaged digital mirror device

Arrays of mirrors with control circuits underneath

Digital projector based on DMD



Texas Instruments

1.3.2 Các mode dẫn truyền trong sợi quang dẹt cấp.

Để một mode sóng dẫn truyền được trong sợi quang dẹt cấp, cần thoả mãn các điều kiện sau:

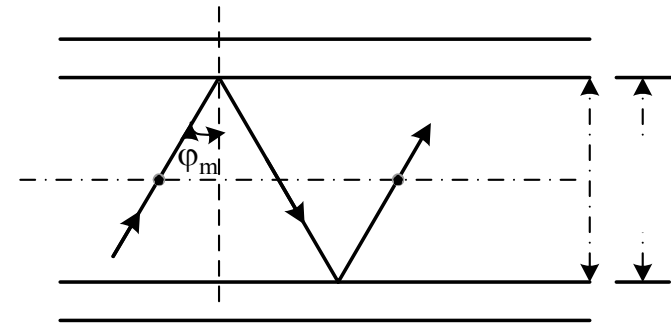
1. Điều kiện phản xạ toàn phần.

Để được dẫn truyền trong sợi quang tia sáng phải có góc tới đáp ứng điều kiện phản xạ toàn phần:

$$\varphi_m > \varphi_c = \arcsin \frac{n_2}{n_1} \quad (1.46)$$

2. Điều kiện tự hợp/tự bền vững.

-Sóng truyền trong sợi quang lặp lại chính nó sau hai lần phản xạ liên tiếp trên mặt phân biên giữa vùng lõi và vùng vỏ



- Độ lệch pha tổng cộng sau hai lần lan truyền và phản xạ qua lại trên mặt phân cách phải bằng một số nguyên lần 2π .

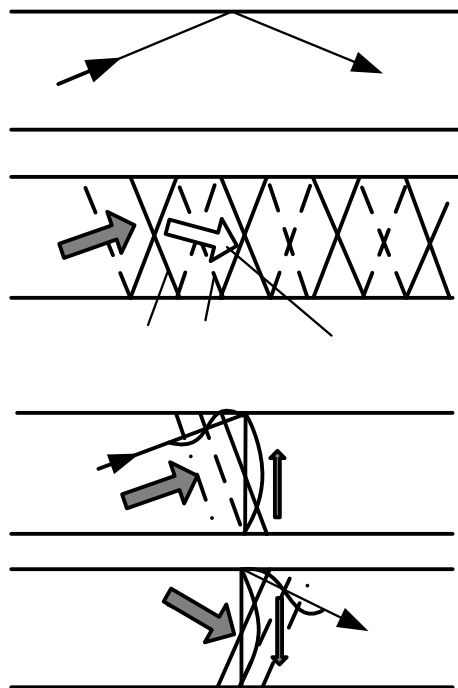
$$\frac{2\pi}{\lambda_0} \cdot 2n_1 d \cos \varphi_m - 2\delta = 2m\pi \quad (1.47)$$

$$\cos \varphi_m = \frac{m + (\delta / \pi)}{2n_1 (d / \lambda_0)} \quad (1.48)$$

$$\cos \varphi_m \cong \frac{m}{2n_1} \cdot \frac{\lambda_0}{d} \quad (1.49)$$

3. Điều kiện mặt biên.

- Điện trường bị giới hạn trong lõi của sợi quang.
- Tại mặt biên của lõi, cường độ điện trường phải bằng không.
- Điều kiện mặt biên: tồn tại một sóng đứng theo hướng vuông góc với hai mặt biên (sóng hướng biên) do có hiện tượng giao thoa giữa ánh sáng tới và ánh sáng phản xạ.



Sự phản xạ sóng ánh sáng ở mặt biên.

- Hướng của sóng tới và sóng phản xạ.*
- Các mặt đẳng pha của sóng tới và sóng phản xạ.*
- Sóng tới và sóng phản xạ được quan sát theo hướng mặt biên.*

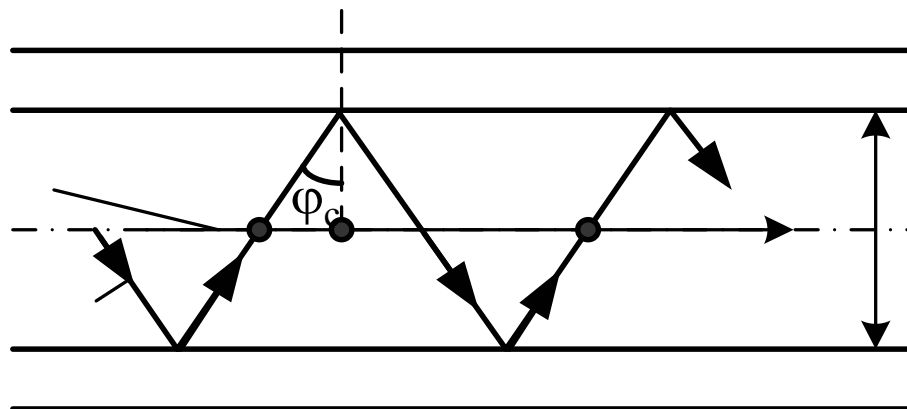
$$d \sin \theta_m = d \cos \varphi_m = m\lambda / 2 \quad (1.50)$$

1.3.3 Sự hạn chế độ rộng dải thông do tán sắc giữa các mode trong sợi quang dẹt cấp đa mode.

-Một xung sáng được chiếu vào đầu của sợi quang đa mode, năng lượng tổng cộng của xung sẽ là kết hợp của nhiều *mode* được dẫn truyền trong sợi quang, trong đó mỗi *mode* có hướng lan truyền khác nhau với khác nhau.

-Quang lộ mà mỗi *mode* đi qua sẽ khác nhau, trong khi đó vận tốc lan truyền theo các quang lộ zig-zag của các *mode* lại giống nhau. Như vậy vận tốc lan truyền của các *mode* theo chiều song song với trục sợi quang sẽ khác nhau, dẫn đến khoảng thời gian cần thiết để các *mode* đi qua một chiều dài sợi quang như nhau sẽ khác nhau.

-Xét hai *mode*: *mode* đi theo trục sợi quang gọi là *mode* trục; *mode* thứ hai lan truyền với góc bằng góc tới hạn phản xạ toàn phần là *mode* tới hạn.



Sự giãn xung sáng.

- Thời gian truyền từ thiết diện A đến B: cực tiểu đối với *mode* trực và cực đại đối với *mode* tới hạn

$$t_{\min} = \frac{AB}{v} = \frac{ABn_1}{c} \quad (1.51)$$

$$t_{\max} = \frac{AB}{v \sin \varphi_c} = \frac{ABn_1}{\sin \varphi_c c} \quad (1.52)$$

$$\sin \varphi_c = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\Delta t = (t_{\max} - t_{\min}) \quad (1.53)$$

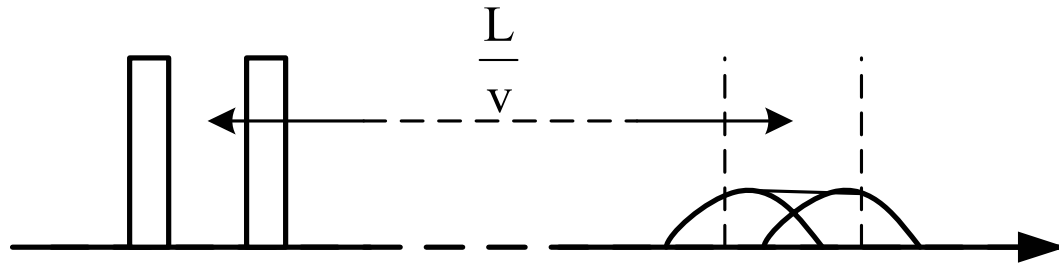
- Độ giãn xung sáng Δt

$$\Delta t = \frac{ABn_1}{c} \left(\frac{1}{\sin \varphi_c} - 1 \right) = t_{\min} \left(\frac{n_1}{n_2} - 1 \right) \quad (1.54)$$

-Hiện tượng tán sắc giữa các *mode* là hiện tượng xung sáng bị giãn ra do thời gian mà các *mode* đi qua cùng một chiều dài sợi quang là khác nhau.

- Nếu chiều dài sợi quang L , kí hiệu thời gian lan truyền của *mode* trực qua chiều dài L là $\tau = t_{\min}$ gọi là thời gian dẫn truyền.

$$\Delta t = \tau \left(\frac{n_1 - n_2}{n_2} \right) = \frac{Ln_1}{cn_2} (n_1 - n_2) \quad (1.55)$$



- Sự giãn các xung sáng dẫn đến sự giới hạn độ rộng dải thông của sợi quang:

Do sự giãn xung sáng, để tránh các xung chập nhau phải truyền các xung thưa ra, nghĩa là tốc độ truyền giảm xuống. Điều đó dẫn tới độ rộng dải thông giảm xuống.

- B là độ rộng dải thông cực đại

$$B \leq \frac{1}{4\Delta t} = \frac{cn_2}{4Ln_1} \cdot \frac{1}{n_1 - n_2} \quad (1.56)$$

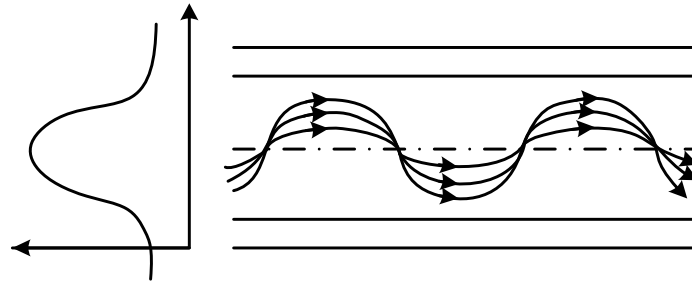
Với: $L = 1\text{km}$; $\Delta = 0,01$; $n_1 = 1,5$; $B = 5\text{MHz}$.

Giá trị 5MHz rất nhỏ so với độ rộng dải thông có thể 20.000GHz

- Để nâng cao B có thể giảm $(n_1 - n_2)$ /độ chênh chiết suất. Nhưng giảm Δ sẽ làm giảm khẩu độ của sợi quang, việc giảm Δ xuống dưới 1% sẽ gặp khó khăn về mặt công nghệ.
- Để giảm sự tán sắc giữa các mode và từ đó nâng cao độ rộng dải thông, người ta chế tạo ra sợi quang liên tục đa *mode*, trong đó giá trị chiết suất n_1 của lõi thay đổi đến n_2 một cách liên tục.

1.3.4 Sợi quang liên tục đa *mode*.

- Sợi quang trong đó chiết suất của lõi n_1 thay đổi liên tục sang chiết suất của vỏ n_2 , gọi là sợi quang liên tục



Sợi quang liên tục đa mode

- Trong sợi quang liên tục đa *mode* bằng quy luật thay đổi chiết suất tạo ra điều kiện để những *mode* sóng có quang lộ dài sẽ chuyển động với vận tốc cao hơn các *mode* sóng có quang lộ ngắn.

Bằng cách này có thể giảm được Δt ,

Vận tốc lan truyền của ánh sáng $v = \frac{c}{n}$, cho nên nếu thay đổi chiết suất một cách liên tục thì các *mode* có quang lộ dài sẽ chuyển động trong vùng có chiết suất nhỏ và do đó vận tốc lớn hơn.

- Theo tính toán quy luật chiết suất thay đổi theo bán kính có dạng *parabol* sẽ làm giảm Δt đến tối thiểu.

- Tuy nhiên việc khống chế quy luật thay đổi chiết suất một cách chính xác trong công nghệ là một việc khó, nên người ta chưa thể khắc phục hoàn toàn hiện tượng tán sắc thời gian

1.3.5 Sợi quang dẹt cấp đơn *mode*.

1. Điều kiện đơn *mode*.

- Sợi quang dẹt cấp chỉ truyền dẫn một *mode* sóng duy nhất
- Thông số tần số chuẩn hoá:

Tần số chuẩn hoá V còn được gọi là số V hay thông số V (V-number, V-parameter) của sợi quang dẹt cấp):

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1.57)$$

Trong đó: a là bán kính lõi, n_1 và n_2 là chiết suất của lõi và vỏ, λ_0 là bước sóng ánh sáng trong lõi.

-Điều kiện đơn *mode* trong sợi quang dẹt cấp là:

$$V = \frac{2\pi a}{\lambda_0} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \leq 2,405 \quad (1.58)$$

Nếu $V > 2,405$ sợi quang dẫn truyền đa *mode* đối với bước sóng λ_0 .

- Ứng dụng có thể xác định được “bước sóng cắt” (cut-off wavelength) λ_c . Nếu $\lambda_0 < \lambda_c$ ta có đa *mode*:

$$\lambda_c = \frac{2\pi a}{2,405} (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \quad (1.59)$$

Có thể tìm được điều kiện đơn *mode* và bước sóng cắt từ:

- Điều kiện dẫn truyền các *mode* theo quang học tia:

$$d \sin \theta_m = m\lambda / 2 \quad (1.60)$$

- Điều kiện phản xạ toàn phần

$$\sin \theta_{i_{\max}} = \sin \theta_c n_1 \quad (1.61)$$

trong đó $\sin \theta_{i_{\max}} = NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ là khẩu độ số của sợi quang.

Từ đây ta có

$$\sin \theta_c = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} / n_1 \quad (1.62)$$

. Gọi N là số *mode* có thể dẫn truyền được trong sợi quang:

$$d \sin \theta_c \leq N\lambda / 2 \quad (1.63)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{n_1}$$

$$d \sin \theta_c \leq \frac{N\lambda_0}{2n_1} \quad (1.64)$$

$$N \geq \frac{2n_1}{\lambda_0} d \sin \theta_c = \frac{2n_1}{\lambda_0} \frac{d\sqrt{n_1^2 - n_2^2}}{n_1} \quad \text{hay} \quad N \geq \frac{2d}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.65)$$

Các công thức trên đây đều được tính cho linh kiện dẫn sóng phẳng.

Đối với trường hợp sợi quang, lõi có tiết diện tròn công thức này có dạng

$$N \geq \frac{2\pi a}{2,405\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.66)$$

Điều kiện đơn *mode* thu được khi $N = 1$

$$2,405 \geq \frac{2\pi a}{\lambda_0} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.67)$$

Bước sóng cắt $\lambda_c = \frac{2\pi d}{2,405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (1.68)$

-Sợi quang dật cấp sẽ là sợi quang đơn *mode* đối với bước sóng lớn hơn hoặc bằng λ_c và sẽ là sợi quang đa *mode* đối với bước sóng nhỏ hơn λ_c .

2. Cấu tạo.

-Nếu $n_1 = 1,53$, độ chênh chiết suất là 0,002 : $(n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \approx 0,08$
để có được sợi quang dật cấp đơn *mode* cần thỏa mãn điều kiện $\frac{d}{\lambda_0} \leq 6$ hay $d \leq 6\lambda_0$

- Vì điều kiện này: thế hệ sợi quang thứ nhất hoạt động ở bước sóng $\lambda_0 = 0,8\mu m$ là không thích hợp do một số nguyên nhân sau:- Nguồn sáng *LED* có độ rộng phổ lớn, gây nên sự tán sắc (chromatic dispersion). -Sự tổn hao lớn.- Vì kích thước lõi nhỏ ($4\mu m$) khó chế tạo.

Ngày nay sợi quang dật cấp đơn *mode* hoạt động ở bước sóng $1,3\mu m$ hay $1,5\mu m$, $d = 6-10\mu m$, vò ngoài có kích thước $125\mu m$.

1.3.6 Tổn hao trong sợi quang.

Tổn hao trong sợi quang có thể chia làm hai loại: tổn hao do cơ cấu và tổn hao do vật liệu.

+ Tổn hao do cơ cấu có thể có các nguyên nhân sau:

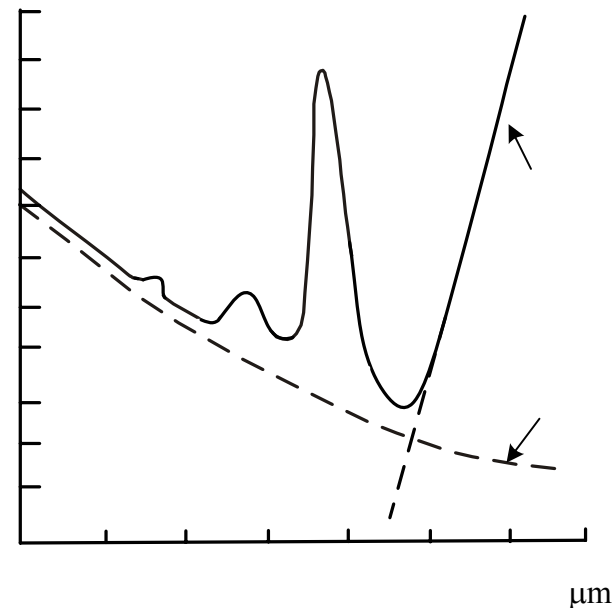
- Do uốn cong sợi quang (microbending losses).
- Do khớp nối (coupling losses).
- Do hàn nối (splicing losses).

+ Tổn hao do vật liệu chủ yếu do hai nguyên nhân: hấp thụ và tán xạ.

1. Hấp thụ bức xạ

+ Nguyên nhân hấp thụ thường gồm ba loại chủ yếu:

- Hấp thụ riêng do các chuyển mức của điện tử: hấp thụ tử ngoại
- Hấp thụ do các tạp chất, các gốc OH^- và các ion nguyên tố thuộc các lớp chuyển tiếp: 1.37; 1.23; 0.95 μm
- Hấp thụ do kích thích các mức dao động của liên kết $Si-O$: hấp thụ hồng ngoại : đỉnh 7 và 12 μm



Sự phụ thuộc độ tổn hao của bức xạ hồng ngoại vào bước sóng

2. Tán xạ gây tổn hao trong sợi quang.

Có hai loại tán xạ:

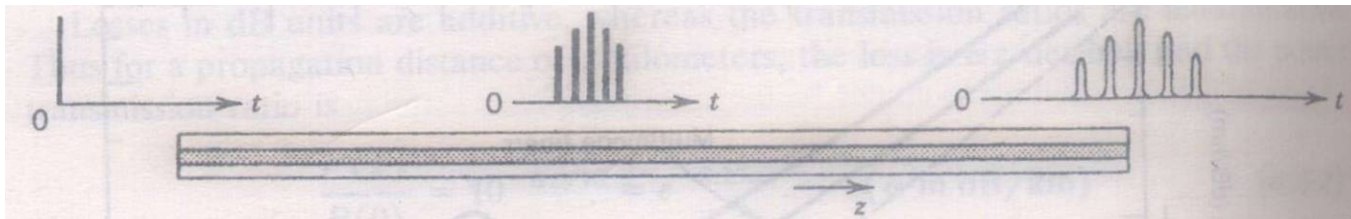
- Tán xạ trên các bất hoàn hảo của sợi quang, như các mặt biên giữa lõi và vỏ có độ gồ ghề (sự phân bố chiết suất) và gây ra tán xạ.**
- Tán xạ trên các bất đồng nhất trong vật liệu sợi quang, tức là tán xạ do các thăng giáng của chiết suất, loại tán xạ này được gọi là tán xạ Rayleigh. Đây là loại tán xạ quan trọng nhất.**

Nghiên cứu các quá trình hấp thụ và tán xạ gây tổn hao trong sợi quang giúp ta chọn bước sóng quang làm việc thích hợp, chọn công nghệ và vật liệu chế tạo sợi quang tối ưu nhất.

1.3.7 Các cơ chế tán sắc

a. Tán sắc thời gian

- Sự mở rộng xung truyền do sự khác biệt tốc độ nhóm của các mode trong quang sợi đa mode



Thời gian truyền của các mode

$$\tau_q = L / v_q \quad 1.85$$

L: chiều dài sợi quang; $q=1,2,\dots,M$; v_q tốc độ nhóm của mode q

$$v_q = \frac{d\omega}{d\beta_q} \quad 1.86$$

- Độ mở rộng xung do tán sắc thời gian

$$\sigma_\tau = \frac{1}{2} \left(L / v_{q_{\min}} - L / v_{q_{\max}} \right) \quad 1.87$$

Trường hợp quang sợi bậc

$$v_q \approx c_1 \left(1 - \frac{q}{M} \Delta \right) \quad 1.88$$

$$v_{q\min} \approx v(1 - \Delta) \quad 1.89 \quad v_{q\max} \approx v \quad 1.90$$

$$\sigma_\tau \approx \frac{L \Delta}{v 2} \quad 1.91$$

Trường hợp quang sợi liên tục

$$v_q \approx v \left(1 - \frac{q}{M} \frac{\Delta^2}{2} \right) \quad 1.92 \quad v_{q\min} \approx v \left(1 - \Delta^2 / 2 \right) \quad 1.93$$

$$\sigma_\tau \approx \frac{L \Delta^2}{v 4} \quad 1.94$$

Độ mở rộng xung nhỏ hơn cỡ $\Delta/2$ lần

b. Tán sắc vật liệu

- Sự mở rộng xung truyền do vận tốc góc là đại lượng phụ thuộc vào bước sóng thông qua chiết suất

- Xét một xung quang truyền trong môi trường tán sắc: $n=n(\lambda)$ với tốc độ nhóm

$$v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad 1.95$$

$$v_g = \frac{c_0}{N} \quad 1.96$$

$$N = n - \lambda_0 \frac{dn}{d\lambda_0} \quad 1.97$$

-Xung quang là bó sóng có phổ gồm các thành phần với các bước sóng khác nhau. Chúng truyền với các vận tốc nhóm khác nhau và dẫn tới sự mở rộng xung truyền.

- Nếu độ rộng phổ của xung quang là σ_λ , độ mở rộng xung sau quãng đường truyền L:

$$\sigma_\tau = \left| \left(\frac{d}{d\lambda_0} \right) \left(\frac{L}{v_g} \right) \right| \sigma_\lambda = \left| \left(\frac{d}{d\lambda_0} \right) \left(\frac{LN}{c_0} \right) \right| \sigma_\lambda \quad 1.98$$

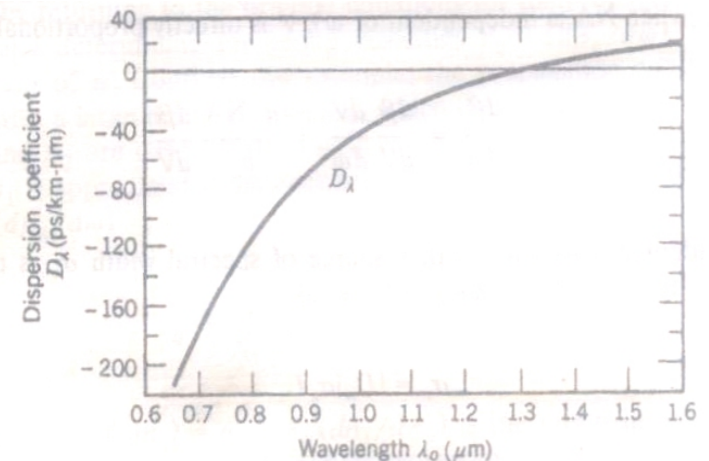
$$\sigma_\tau = |D_\lambda| L \sigma_\lambda \quad 1.99$$

$$D_\lambda = -\frac{\lambda_0}{c_0} \frac{d^2 n}{d\lambda_0^2} \quad 1.100$$

Hệ số tán sắc vật liệu có đơn vị: ps/km.nm

-Độ mở rộng xung tỷ lệ tuyến tính theo quãng đường truyền

-Đối với vật liệu silica hệ số tán sắc vật liệu bằng không tại $\lambda \approx 1,3 \mu\text{m}$. Ở điều kiện trên hiệu ứng tán sắc vật liệu có thể bỏ qua.



c. Tán sắc dẫn sóng

- Sự mở rộng xung truyền do hằng số truyền sóng β là đại lượng phụ thuộc vào bước sóng thông qua thông số V của quang sợi

- Xét sợi quang đơn mode . Tín hiệu quang có bước sóng $\lambda \approx 1,3 \mu\text{m}$.
Tán sắc thời gian và tán sắc vật liệu có thể bỏ qua.

$$\text{Vận tốc nhóm} \quad v_g = \frac{d\omega}{d\beta} \quad 1.101$$

$$\text{Thông số } V \quad V = 2\pi(a/\lambda_0)NA = (a.NA/c_0)\omega \quad 1.102$$

$$\frac{1}{v_g} = \frac{d\beta}{d\omega} = \frac{d\beta}{dV} \frac{dV}{d\omega} = \frac{a.NA}{c_0} \frac{d\beta}{dV} \quad 1.103$$

$$\text{Độ mở rộng xung} \quad \sigma_\tau = \left| \left(\frac{d}{d\lambda_0} \right) \left(L/v_g \right) \right| \sigma_\lambda \quad 1.104$$

$$\sigma_\tau = \left| D_w \right| L \sigma_\lambda \quad 1.105$$

$$\text{Hệ số tán sắc dẫn sóng} \quad D_w = \frac{d}{d\lambda_0} \left(\frac{1}{v_g} \right) = -\frac{\omega}{\lambda_0} \frac{d}{d\omega} \left(\frac{1}{v_g} \right) \quad 1.106$$

$$D_{\omega} = -\frac{1}{2\pi c_0} V^2 \frac{d^2\beta}{dV^2} \quad 1.107$$

-Hệ số tán sắc dẫn sóng là hàm của V nên cũng là hàm của bước sóng

- Sự phụ thuộc của hệ số tán sắc dẫn sóng vào bước sóng có thể điều khiển nhờ thay đổi kích thước lõi sợi quang

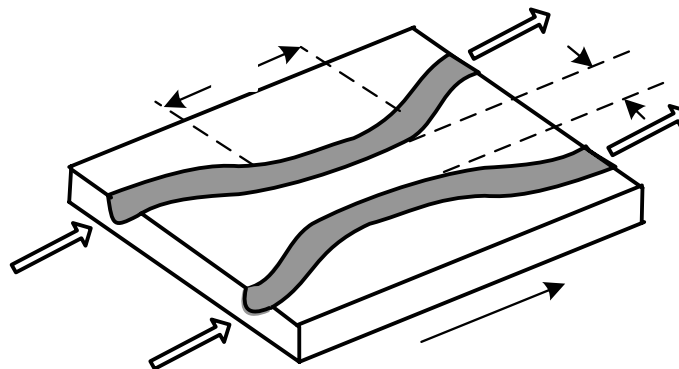
1. 4 Bộ nối quang/ linh kiện nối quang (coupler).

1.4.1 Lí thuyết *mode* ghép nối và linh kiện nối quang định hướng

+ Trong linh kiện nối quang định hướng năng lượng quang được truyền từ một linh kiện dẫn này sang linh kiện dẫn sóng khác nhờ sự lan truyền sóng trong một vùng đệm (cladding region).

+ Xét linh kiện nối quang định hướng dạng cơ bản gồm 2 linh kiện dẫn sóng có hai đầu vào quang I_1 và I_2 và hai đầu ra O_1 và O_2

+ Hai linh kiện dẫn sóng, đều là đơn *mode*, song song với nhau và cách nhau một khe g , trong một khoảng dài L . Trong khoảng L hai linh kiện gần nhau để có thể xảy ra sự liên kết giữa những *mode* sóng trong hai linh kiện dẫn sóng.



Linh kiện nối định hướng dạng cơ bản.

1. Trường hợp hai linh kiện dẫn tương hợp về pha : $\beta_1 = \beta_2 = \beta$

- Trong mỗi linh kiện có một *mode* đặc trưng bởi hàm sóng ψ_1 (và ψ_2) với biên độ A_1 và A_2 tham gia dẫn truyền xung sáng.
- Nếu không có tương tác giữa hai linh kiện (khe b lớn) thì biên độ hai *mode* là hàm của z có dạng:

$$\frac{dA_1}{dz} = -i\beta A_1(z) \rightarrow A_1(z) = A_1(0)e^{-i\beta z} \quad 1.69$$

$$\frac{dA_2}{dz} = -i\beta A_2(z) \rightarrow A_2(z) = A_2(0)e^{-i\beta z} \quad 1.70$$

Ta thấy biên độ hai *mode* không đổi về độ lớn.

- Nếu khe g trong cấu trúc nhỏ thì các sóng rìa (evanescent waves) của các *mode* ψ_1 và ψ_2 không triệt tiêu và chồng chất lên nhau. Sự chồng chất đó là thành phần nhiễu loạn (perturbation) liên kết hai *mode* lại với nhau.

-Giả sử K là hệ số liên kết đối với hai *mode*, khi đó các phương trình của *mode* liên kết sẽ là:

$$\frac{dA_1}{dz} = -i\beta A_1(z) - iKA_2(z) \quad 1.71$$

$$\frac{dA_2}{dz} = -i\beta A_2(z) - iKA_1(z) \quad 1.72$$

- Hệ số lan truyền β :

$$\beta = \beta_r - \frac{i\alpha_{los}}{2} \quad 1.73$$

Trong đó β_r là phần thực của β và α_{los} là hệ số tổn hao trong linh kiện dẫn.

-Giả sử lúc đầu ánh sáng chỉ có trong linh kiện dẫn một, tại $z = 0$:

$$A_1(0) = 1$$

$$A_2(0) = 0$$

Tính toán lý thuyết:

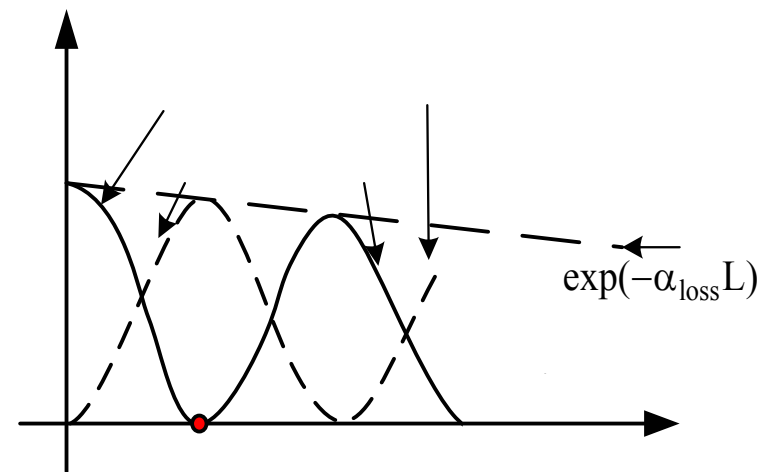
$$A_1(z) = \cos(Kz)e^{i\beta z} \quad 1.74$$

$$A_2(z) = -i \sin(Kz)e^{i\beta z} \quad 1.75$$

-Năng lượng quang trong các linh kiện dẫn ở điểm z là:

$$P_1(z) = A_1 \cdot A_1^* = \cos^2(Kz)e^{-\alpha_{los}z} \quad 1.76$$

$$P_2(z) = A_2 \cdot A_2^* = \sin^2(Kz)e^{-\alpha_{los}z} \quad 1.77$$



Năng lượng quang trao đổi qua lại giữa hai linh kiện khi tín hiệu quang lan truyền trong linh kiện

- Độ dài tương tác ngắn nhất cần thiết để sự chuyển giao công suất xảy ra khi tín hiệu lan truyền là:

$$z = L_1 = \frac{\pi}{2K} \quad \text{khi} \quad Kz = KL_1 = \frac{\pi}{2} \quad 1.78$$

Ở điều kiện này công suất quang truyền hoàn toàn từ kênh 1 sang kênh 2

- Khi $z=L_1/2$ một nửa công suất quang được truyền từ kênh 1 sang kênh 2: linh kiện ghép nối 3 dB

2. Trường hợp hai linh kiện dẫn không tương hợp về pha (phase matched), nghĩa là: $\beta_1 \neq \beta_2$

Xét trường hợp $A_1(0) = 1$; $A_2(0) = 0$

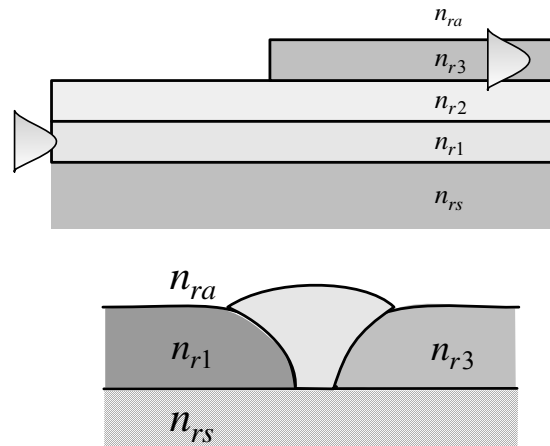
Tỷ số truyền công suất
$$\frac{P_2(z)}{P_1(0)} = \frac{K^2}{K^2 + \Delta^2} \sin^2 \left[\left(K^2 + \Delta^2 \right)^{1/2} \cdot z \right] \quad 1.79$$

Trong đó
$$2\Delta = |\beta_1 - \beta_2| \neq 0 \quad 1.80$$

Khi $\Delta^2 \gg K^2$ Tỷ số trên cỡ bằng không

- Trường hợp $z=L_1$ tỷ số trên đạt giá trị cực đại khi $\Delta.L_1=0$, giảm dần khi $\Delta.L_1$ tăng và đạt giá trị bằng 0 khi $\Delta.L_1 = \pi(3/4)^{1/2}$

1.4.2 Bộ nối linh kiện bản phẳng/ linh kiện bản phẳng.



1. Trường hợp hai linh kiện bản phẳng chế tạo trên cùng một đế (substrate).

Có thể có hai phương án:

a. Hai vùng lõi (core region), hình (a), của hai linh kiện dẫn sóng là lớp n_{r1} và n_{r3} phải lớn hơn chiết suất hai lớp nằm cạnh:

$$n_{r1} > n_{rs} > n_{r2} ; \quad n_{r3} > n_{r2} \text{ và } n_{ra}$$

Điều kiện chuyển giao được công suất quang là:

$$Kz = \frac{\pi}{2} \quad 1.81$$

trong đó: K là hệ số liên kết; z là khoảng phủ của hai vùng lõi dẫn sóng.

b. Hai đầu cuối của hai linh kiện dẫn sóng, hình (b), có lớp lõi n_{r1} và n_{r3} , ghép nối với nhau bằng một lớp nôm n_{r2} . Lớp $n_{r2} > n_{rs}$ dùng để kết nối hai linh kiện dẫn sóng.

-Khi bức xạ lan truyền trong n_{r1} , nó ló qua lớp nôm, nhưng bức xạ không đi vào để mà được “ngấm” qua lớp nôm đi vào linh kiện dẫn sóng bên phải n_{r3} .

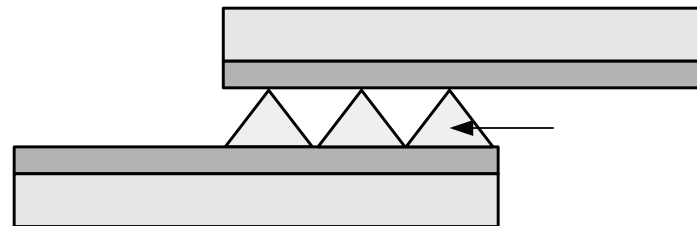
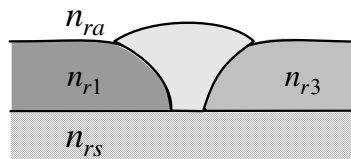
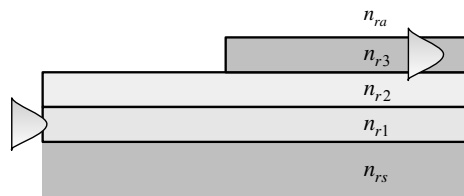
2. Trường hợp hai linh kiện dẫn sóng riêng rẽ có thể ghép nối quang với nhau bằng cách chồng lên nhau với một lớp gọi là môi trường ghép nối (coupling medium).

-Môi trường ghép nối có thể là một lớp có chiết suất nhỏ hoặc là một lớp dạng cách tử (grating), bước cách tử phải lựa chọn thích hợp.

$$\beta_{gr} = \beta_0 + \frac{2\pi m}{d}$$

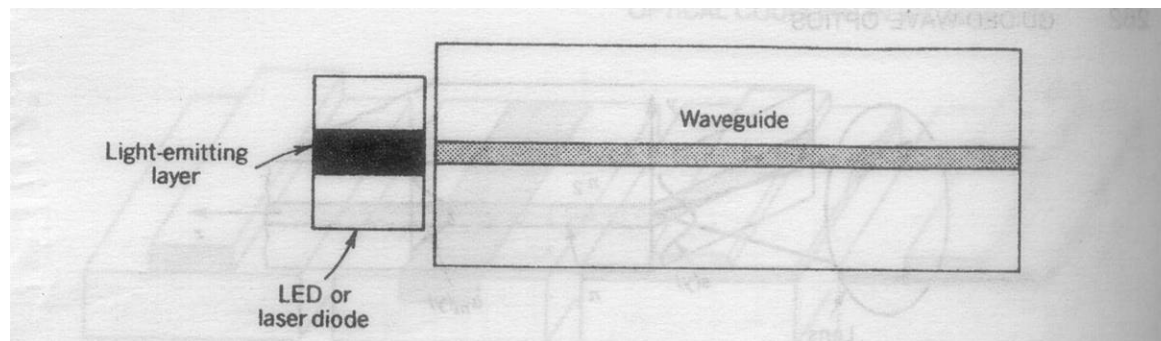
d: chu kỳ cách tử ; $m=0; \pm 1; \pm 2$

1.82



1.4.4 Linh kiện dẫn sóng ghép nối sợi quang.

- **Dạng cuống (butt):** sợi quang được đặt thẳng hàng và cho tiếp xúc với linh kiện dẫn sóng. Sợi quang được cố định bởi *epoxy* và một cơ cấu xiết chặt.
- **Dạng thấu kính:** giữa sợi quang và linh kiện dẫn sóng đặt một vi thấu kính.



1.4.5 Ghép nối tín hiệu quang vào linh kiện dẫn sóng

- Ghép nối nhờ lăng kính

- Lăng kính có chiết suất $n_p > n_2$ đặt cách linh kiện dẫn sóng một khoảng d_p . Tín hiệu quang đi vào lăng kính và phản xạ toàn phần bên trong nó với góc θ_p

- Hằng số truyền sóng theo phương z là

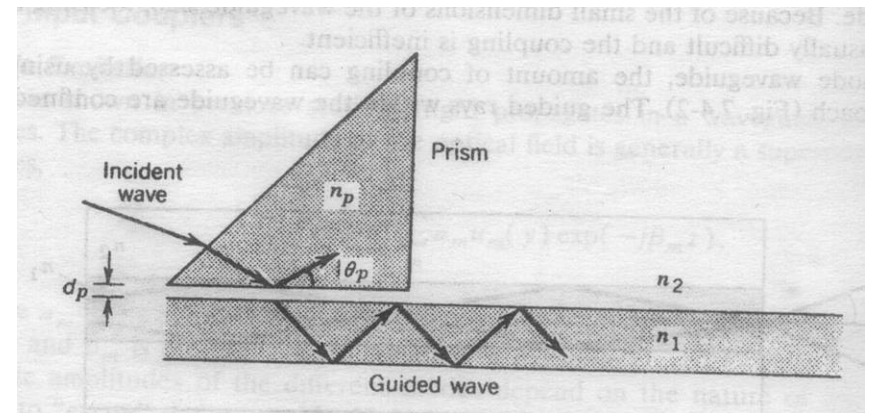
$$\beta_p = n_p k_0 \cos \theta_p \quad 1.83$$

- Điện trường rìa giảm theo hàm mũ trong không gian giữa lăng kính và linh kiện dẫn sóng. Nếu khoảng cách d_p đủ nhỏ, sóng quang sẽ ghép với mode của linh kiện dẫn sóng nếu có sự phù hợp về hằng số truyền

$$\beta_p \approx \beta_m \quad 1.84$$

- Như vậy nếu chọn khoảng cách d_p thích hợp, năng lượng quang có thể được ghép đưa vào linh kiện dẫn sóng bản phẳng.

- Lăng kính cũng có thể được sử dụng để lấy tín hiệu ra khỏi linh kiện dẫn sóng.



**TÓM TẮT BÀI GIẢNG MÔN HỌC
QUANG ĐIỆN TỬ VÀ QUANG ĐIỆN**

TÓM TẮT BÀI GIẢNG MÔN HỌC
QUANG ĐIỆN TỬ VÀ QUANG ĐIỆN
(Optoelectronic and Photoelectronic Devices)

CHƯƠNG 1 CƠ SỞ QUANG ĐIỆN TỬ

§ 1.1. MỘT SỐ KHÁI NIỆM CƠ BẢN

1) Tia (Ray):

- + Đường truyền của 1 tia bức xạ (beam of radiation) điện từ (invisible, ultraviolet, visible, infrared)
- + Thường được biểu diễn bởi một mũi tên hay đường thẳng, chỉ thị đường không gian mà bức xạ sẽ đi qua.
- + Chùm bức xạ phân kỳ (expanding beam) được mô tả bởi nhiều tia (ray).

2) chiết suất và phản xạ:

* Chiết xuất của môi trường: $n = c/v$ với c: vận tốc ánh sáng trong chân không; v: vận tốc truyền sóng trong môi trường đang xét.

* Góc khúc xạ: $\sin \phi = \frac{n}{n'} \sin \theta$, với n: chiết suất của môi trường chứa tia tới; n': chiết suất của môi trường khúc xạ.

* Với liquid or glass: $n = 1.3 - 1.8$

Glass: $n = 1.47 - 1.7$; thủy tinh tinh khiết (grown glass) $n = 1.51$; (thủy tinh quang học $n = 1.53$)

* Tinh thể và bán dẫn: $n > 1.8$

* Đa phản xạ nội: (multiple internal reflection): giữ hai mặt song song của một môi trường, có một số đặc trưng sau:

+ Khoảng cách tách các tia phản xạ lần một và lần 2 (2 lần liên tiếp) d phụ thuộc góc tới và chiều dày của môi trường, ví dụ : thủy tinh quang học ($n=1,5$) dày 1 cm có $d \approx 0,73$ cm khi góc tới $\theta \approx 40^\circ$ và $d \downarrow$ khi $\theta \downarrow$.

+ Cường độ tia phản xạ và tia truyền qua:

- Tỷ số cường độ tia phản xạ lần 1 tia tới: $r = \frac{I_{r1}}{I_0} = \frac{(n'-1)^2}{(n'+1)^2}$, khi $\theta < 40^\circ$ với thủy

tinh.

- Giả thiết hầu hết năng lượng phản xạ tập trung ở các chùm tia phản xạ I_{r1} và I_{r2} thì năng lượng chùm tia phản xạ cho bởi $\bar{r} \approx 2r - 2r^2 + r^3$

với \bar{r} : tỉ số phản xạ hiệu dụng tổng (net effective reflected ratio)

- Khi đó số truyền qua: $T = I_{T1}/I_0 = 1 - \bar{r}$

Ví dụ: Cho $n = 1$, $n' = 1.52$, $\theta = 0$, tìm \bar{r} , T , và tính lỗi gần đúng.

3) Gương và bộ phản xạ lùi (retro reflector)

* Gương:

- Là linh kiện quang phản xạ hầu hết bức xạ tới.

- Có 1 mặt được mài bóng và được phủ một lớp vật liệu phản xạ ở vùng bước sóng quan tâm. Với ánh sáng khả kiến, thường dùng bề mặt phủ bạc hoặc nhôm; với vùng hồng ngoại thường dùng mặt phủ vàng. Các loại gương đặc biệt có phủ điện môi.

- Các hệ gương quang học tường gọi là các gương mặt thứ nhất, lớp phản xạ ở trên mặt hướng về phía nguồn.

- Các gương ô tô, phòng tắm là gương mặt thứ hai: mặt phản xạ ở phía khác của tia tới, khi đó có hai sự phản xạ từ mặt glass và từ mặt phủ sau.

* Bộ phản xạ lùi (retro-reflector)

- Là linh kiện quang luôn phản xạ tia bức xạ về chính đường tới của nó

- Thường được sử dụng trong các hệ đo không tiếp xúc (non-contact), khi bộ thu và nguồn phát cách xa vật thể cần theo dõi.

- Có dạng kim tự tháp, nhưng chỉ có 3 mặt, mặt đáy hình tròn, còn gọi là corner cubes.

- Tia tới đi vào mặt đáy và bị đa phản xạ nội từ 3 mặt tam giác, rời ra khỏi mặt đáy theo đường song song với tia tới.

- Các mặt tam giác có thể được phủ vật liệu phản xạ hoặc dùng hiện tượng phản xạ nội toàn phần (góc tới hạn $=42^{\circ}$ với chiết suất 1,5).

§1.2. CÁC DỤNG CỤ GIAO THOA VÀ NHIỄU XẠ

1) Các dạng phân cực sóng: phân loại tùy theo kiểu dao động của vector cường độ điện trường; có các dạng sau (dựa vào vết đầu nút của \vec{E})

- Phân cực thẳng: dao động (trong mặt phẳng y) theo phương cố định so với trục y, z, sóng lan truyền theo trục x.

- Phân cực tròn

- Phân cực elip

- Phân cực ngẫu nhiên (từ các vật nóng sáng): là hỗn hợp các dạng phân cực

* Các hiện tượng quang học phụ thuộc vào tương tác điện trường với các cấu phần quang học, do đó từ trường thường không cần quan tâm.

* Tần số \rightarrow màu sắc; biên độ điện trường \rightarrow độ sáng

* Tần số sóng không bị thay đổi, nhưng biên độ và dạng phân cực có thể bị ảnh hưởng bởi các hiệu ứng truyền qua và phản xạ

* Bước sóng là thông số rất quan trọng:

$$\lambda = v/f$$

2) Tán sắc: (chromatic dispersing)

-Lăng kính tán sắc cho phép quan sát sự thay đổi của góc khúc xạ theo tần số.

Các khái niệm cần nắm: Qui luật tán sắc, sai sắc dọc, sai sắc đứng.

3) Nhiễu xạ qua khe hẹp: Khi chiếu ánh sáng đơn sắc qua khe hẹp sẽ tạo ra ảnh với dạng khe có cường độ phân bố về 2 phía của 2 mép khe trung tâm.

* Các đặc trưng quan trọng là:

-Vị trí của các ảnh (cực tiểu-vân)

-Khoảng cách của các cực tiểu

+Vị trí cực tiểu:

$D\sin\alpha = m\lambda$, với m nguyên, D là độ rộng khe hẹp

+Nếu khoảng cách từ khe tới vị trí y trên màn quan sát xấp xỉ khoảng cách từ khe tới màn quan sát $H \approx R \rightarrow \sin\alpha \approx y/R$, sai số $< 2\%$ với $\alpha < 20^\circ$

Khi đó

$$y \approx m\lambda R/D$$

=>Khoảng cách vân:

$$\Delta y = \lambda R/D$$

=>Độ rộng vân trung tâm:

$$W = 2y|_{m=1} = 2 \lambda R/D$$

Độ rộng cường độ $\frac{1}{2}$ của vân trung tâm:

$$W_{1/2} = 0.89 \lambda R/D$$

* Với nhiễu xạ qua lỗ hẹp: Công thức tìm các cực tiểu tương tự như khe hẹp nhưng chỉ số nguyên m được thay bởi các chỉ số m không nguyên. Vị trí vân tối:

$r = m\lambda R/D$, tính từ tâm, với D là đường kính lỗ hẹp, R là khoảng cách đến màn thu.

Đường kính vân tối $d = 2r$

* Cách tử nhiễu xạ: Kết hợp hiện tượng giao thoa và nhiễu xạ qua nhiều khe hẹp.

+Với trường hợp 2 khe độ rộng D , cách nhau đoạn $= a$

→ Cực tiểu giao thoa cho bởi:

$$a\sin\theta = (m + \frac{1}{2})\lambda, \text{ hay}$$

$$ay/R = (m + \frac{1}{2})\lambda$$

→ Khoảng cách 2 vân tới liên tiếp:

$$\Delta y = \lambda R/a$$

§ 1.3. CÁC LỚP PHỦ VÀ CÁC DỤNG CỤ

1) Các lớp phủ: là các lớp vật liệu phủ trên bề mặt của các cấu phần quang học, nhằm tăng cường hoặc cố định các đặc trưng truyền qua và phản xạ.

- Hiệu quả của lớp phủ thay đổi theo bước sóng, góc tới và dạng phân cực của sóng đến.

- Các đặc trưng quan trọng của lớp phủ là chiều dày và độ đồng nhất.

- Đặc điểm cơ học: rất dễ bị phá hủy, do đó thường được làm sạch nhờ thổi khí khô áp suất thấp hoặc dòng nước khử ion, cồn hoặc thuốc tẩy nhẹ.

* Lớp phủ tăng truyền qua (hay chống phản xạ): giảm phản xạ ở biên giữa không khí và thủy tinh → cải thiện độ nét của ảnh (nhờ hạn chế ảnh ảo do đa phản xạ).

Thường dùng MgF_2 cho vùng khả kiến (có chiết suất khoảng 1,38 ở 550 nm) với độ dày $\frac{1}{4}\lambda$, để cho trễ pha giữa sóng phản xạ lần thứ nhất (biên không khí / lớp phủ) và

sóng phản xạ lần 2 (biên lớp phủ / thủy tinh) $= \pi$. Khi đó biên độ sóng phản xạ sẽ triệt tiêu và có thể coi biên độ sóng truyền qua đạt 100%. Áp dụng cho thấu kính, lăng kính và bộ phân cực.

Hệ số phản xạ lúc này là:

$$r = \frac{(n_0 n_g - n_c^2)^2}{(n_0 n_g + n_c^2)^2}, \text{ với } n_0: \text{chiết suất không khí; } n_g: \text{chiết suất thủy tinh; } n_c: \text{chiết}$$

suất lớp phủ.

Ví dụ: cho $n_g=1.5$, $n_c(MgF_2) = 1.38$, $\rightarrow r = 1.4\%$ với bước sóng 400-700 nm

* Có thể dùng nhiều lớp phủ chống phản xạ để giảm r đến $<0,3\%$.

* Multilayer coating có thể được thiết kế để làm việc trong dải rất rộng của bước sóng hoặc để đạt được hệ số truyền qua tối đa ở một bước sóng xác định.

* Hệ số phản xạ tăng theo góc tới. Các góc tới có thể chấp nhận cho lớp phủ chống phản xạ là $< 30^\circ$.

* Các lớp phủ tăng phản xạ (dùng cho gương phản xạ) :

- Có thể phủ trên mặt trước hoặc mặt trong của gương.

- Có thể là kim loại hoặc điện môi (Transparent oxides)

- Thường dùng lớp phủ điện môi có chiều dày $\frac{\lambda}{2}$ để phủ lên lớp phủ kim loại (chống oxi hoá và tăng độ bền)
- Chiều dày $\frac{\lambda}{2}$ nhằm đạt trễ pha 2π của 2 lần phản xạ.
- Thường dùng nhôm, bạc, vàng (nhôm+điện môi cho vùng cực tím; bạc có hệ số phản xạ > 95% và vàng > 98% trong vùng khả kiến và hồng ngoại)

3) Các bộ lọc quang học

a) Transmission bandpass interference filters:

- Bộ lọc giao thoa thông dải, cấu tạo từ tổ hợp nhiều lớp điện môi.
- Cấu trúc điển hình gồm dãy luân phiên các lớp low index và high index có chiều dày $\lambda/4$ đóng vai trò các reflect stacks xen kẽ các lớp rỗng dày $\lambda/2$ và các lớp coupling.

* Lớp phân cách (Lớp trống) $\frac{\lambda}{2}$ + các lớp $\frac{1}{4}\lambda$ có tác dụng sao cho các tia phản xạ nội trong lớp trống ra khỏi lớp sẽ đồng pha với sóng đến tại bước sóng mong muốn.

* Độ rộng băng 50% điển hình là 10-15 nm quanh tần số trung tâm.

* Nhược điểm: tổn hao cao, hệ số suy hao tại tần số mong muốn khoảng 70% trong miền khả kiến, và còn cao hơn ở vùng cực tím.

b) Edge filter: thay đổi rất nhanh từ truyền qua đến phản xạ tại một bước sóng xác định.

- Tùy thuộc vào cấu trúc, có thể truyền qua một dải khá rộng trên hoặc dưới bước sóng biên xác định.

c) Bộ lọc hấp thụ: Điều khiển hệ số truyền qua nhờ hấp thụ bức xạ ở các bước sóng không mong muốn. Có thể dùng kính màu hoặc các bộ lọc hấp thụ nhiệt (cần chú ý vấn đề quá nhiệt)

d) Neutral density filter: là bộ suy giảm tia sử dụng mặt phản xạ để điều khiển hệ số truyền qua, thường dùng ở vùng khả kiến và có hệ số suy hao gần như không đổi cho cả vùng. Hệ số suy hao:

$$D = \log_{10} \frac{1}{T}$$

§ 1.4. CÁC BỘ PHÂN CỰC

1) Phương pháp

- Quá trình phản xạ có thể làm thay đổi dạng phân cực sóng.
- Các tia phản xạ chính là các tia tái bức xạ do dao động của các hạt tải điện tại bề mặt phản xạ. Các hạt tải này bị kích thích bởi điện trường tia tới.
- Kim loại có rất nhiều điện tử tự do trên bề mặt, chúng có thể chuyển động theo mọi hướng song song với bề mặt, do đó có thể tái bức xạ tự do theo mọi hướng trong vùng khả kiến.
- Với thủy tinh một số hướng điện trường gây dao động hạt tải tại bề mặt, do đó tái bức xạ tia phản xạ, còn một số hướng khác sẽ không gây dao động và chỉ truyền qua.
- Hầu hết điện trường được định hướng theo các góc vừa gây phản xạ vừa tạo truyền qua.

* ~~Mặt phân cực của sóng phân cực thẳng~~: tạo bởi trục y và tia phản xạ (trục y vuông góc mặt phản xạ). Xét trường hợp mặt phân cực chứa trục x:

a) Nếu vector điện trường \mathbf{E} vuông góc với mặt phân cực $\rightarrow //$ trục z (gọi là phân cực s) \rightarrow toàn bộ vector \mathbf{E} đến bề mặt cùng một lúc \rightarrow gây dao động cực đại trên bề mặt \rightarrow phản xạ mạnh.

b) Nếu vector $\mathbf{E} //$ mặt phân cực (gọi là phân cực p) $\rightarrow \mathbf{E}$ đến bề mặt từng phần \rightarrow gây dao động tối thiểu \rightarrow phản xạ yếu, truyền qua mạnh.

c) Nếu \mathbf{E} tạo góc $0 < \theta < 90^\circ$ với mặt phân cực:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_p + \mathbf{E}_s$$

* Góc Brewster: (David Brewster)

-Với bất kỳ mặt phân cách giữa hai môi trường có chiết suất n_0, n_1 , tồn tại một góc tới mà tại đó hệ số phản xạ của thành phần phân cực p bằng không. Tại góc tới, tia phản xạ và tia khúc xạ vuông góc với nhau, gọi là góc Brewster, B. Tại góc B tia phản xạ bị phân cực s hoàn toàn. Nếu tia tới phân cực ngẫu nhiên và góc tới bằng góc B, tia phản xạ sẽ phân cực s và tia truyền qua có cả thành phần phân cực s và p.

$$B = \text{tg}^{-1} (n_1/n_0), \text{ với thủy tinh quang học } B \approx 57^\circ.$$

2/ Bộ phân cực

* Brewster Window: là dạng đơn giản nhất trong các bộ phân cực, là tấm mỏng có 2 mặt song song đặt ở góc B so với tia tới. Khoảng 14% vector phân cực s bị phản xạ trên bề mặt và gần như toàn bộ vector phân cực p sẽ truyền qua.

* Lưới dây song song: đặt rất gần nhau so với bước sóng (bước sóng phải lớn)

- Vector điện trường \vec{E} song song dây sẽ bị “khóa” (blocked).
- Vector điện trường \vec{E} vuông góc dây sẽ “cho qua” (passed).
- Thường dùng tấm Polyvinyl, khi đó các chuỗi cao phân tử song song đóng vai trò lưới dây.

* Bộ phân cực tinh thể (hay lưỡng chiết): dùng các tinh thể có vận tốc truyền sóng phân cực s và phân cực p khác nhau \rightarrow chiết suất sẽ khác nhau với hai dạng phân cực \rightarrow góc khúc xạ khác nhau, tạo ra 2 tia :

O-Ray: Khúc xạ mạnh (tia thường)

E-Ray : khúc xạ yếu (tia dị thường)

-Quang trục của tinh thể \equiv phương tia tới mà tia O và tia E có cùng chiết suất \rightarrow không tách.

§1.5 BỨC XẠ VÀ BỨC XẠ KẾ

1/ Các nguồn bức xạ

-Nguồn đơn sắc: Lasers, LE Ds

-Nguồn phổ liên tục: Đèn nóng sáng

-Nguồn phổ vạch: đèn hồ quang

* Incoherent or noise sources: Đèn nóng sáng; LEDS; Đèn hồ quang.

→ không có quan hệ pha cố định giữa các sóng bức xạ

* Coherent sources: Laser khí hoặc laser bán dẫn.

* Đèn hồ quang: Hồ quang hình thành giữa các điện cực trong khí hiếm khi áp đặt điện thế ban đầu lớn. Khi dòng ion được thiết lập trong hồ quang, điện áp giảm mạnh và hồ quang được duy trì. Phổ phát xạ phụ thuộc loại khí.

-Khi dòng hồ quang đi qua khí, các điện tử trong các ion khí sẽ thay đổi mức năng lượng và phát xạ photon có bước sóng cho bởi:

$$\lambda = hc/\Delta E = 1.24 \times 10^3 \text{ (eV.nm)} / \Delta E,$$

với ΔE là chênh lệch năng lượng giữa các mức được phép, phụ thuộc vào các nguyên tố → bước sóng bức xạ bởi mỗi nguyên tố là cố định.

*Đèn huỳnh quang: là trường hợp riêng của đèn hồ quang, khi ống đèn được phủ bột huỳnh quang (chủ yếu là phosphor). Bột huỳnh quang sẽ tái bức xạ trong vùng khả kiến khi bị chiếu xạ bởi năng lượng tại các bước sóng ngoài vùng khả kiến.

Trong đèn huỳnh quang, hồ quang được tạo ra trong hơi thủy ngân. Hơi thủy ngân phát xạ photon ở vùng khả kiến và cực tím. Các tia cực tím sẽ tạo ra huỳnh quang.

-Với cùng 1 điện năng cung cấp, đèn huỳnh quang phát xạ năng lượng cao hơn đèn nóng sáng

*Các vùng bức xạ:

Extreme UV (ultraviolet)	10 – 200 (nm)
Far UV	200 - 300
Near UV	300 – 380
Visible	380 - 770
Near IR (infrared)	770 – 1500

Middle IR	1500 – 6000
Far IR	6000 – 40000
Far- Far IR	40000 – 1000 000

2) Các khái niệm cơ bản:

- Radiant energy (năng lượng bức xạ): Q_e Joule (J)
- Radiant Flux (dòng bức xạ) $\Phi_e = (dQ_e/dt)|_{\text{qua diện dA}}$ Watt (W)
- Flux density (mật độ dòng quang tới / đvdt) còn gọi là irradiance (độ rọi năng lượng): $H_e = d \Phi_e/dA$ (W/m²)
- Radiant Emittance (độ trung năng lượng) là mật độ dòng kích thích trên bề mặt của nguồn được kiểm tra: $M_e = d \Phi_e/dA$ (W/m²)
- Radiant Intensity (cường độ bức xạ): $I_e = d \Phi_e/d\omega$ (W/sr),
với $d\omega = dA/R^2$ Steradian (sr)

Chú ý trường hợp nguồn điểm đẳng hướng:

$$I_e = \Phi_e/4\pi = H_e R^2.$$

- Radiance (công suất bức xạ trên đơn vị góc đặc và trên đơn vị diện tích)

$$L_\lambda = d \Phi_e/d\omega dA \cos\theta \quad (\text{W/sr.m}^2)$$

- Spectral Radiant Power (công suất bức xạ trên đơn vị bước sóng):

$$\Phi_\lambda = dQ_e/d\lambda \quad (\text{W/nm})$$

- Spectral Emittance (phổ kích thích, độ rọi phổ)

$$W_\lambda = dM_e/ d\lambda \quad (\text{W/m}^2.\text{nm})$$

- Spectral Radiant Intensity: $I_\lambda = dI_e/ d\lambda$ (W/sr.nm)

- Spectral Radiance: $L_\lambda = dL_e/ d\lambda$ (W/sr.m².nm)

3) Nóng sáng và vật đen (Incandescent and Blackbodies)

- Các chất rắn và chất lỏng bức xạ ánh sáng khả kiến khi nhiệt độ $\geq 500^\circ\text{C}$
- Bề mặt hấp thụ toàn bộ năng lượng bức xạ đến một cách lý tưởng gọi là vật đen
- Vật bức xạ nóng sáng có đặc trưng tương tự như vật đen
- Bản chất bức xạ từ vật đen được nghiên cứu bởi Max Planck: Năng lượng bức xạ từ vật đen phân bố trong khoảng tần số rộng, theo dạng toán học xác định và thay đổi theo nhiệt độ của vật đen

- Độ trung năng lượng tổng cộng $M_e \equiv$ diện tích giới hạn bởi đường phân bố năng lượng theo bước sóng :

$$\Delta M_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} W_\lambda d\lambda,$$

với $W_\lambda = C_1 \lambda^{-5} / (e^{C_2/\lambda} - 1)$, trong đó $C_1 = 3.74 \times 10^{-16} \text{W.m}^2$,

$C_2 = 1.4385 \times 10^{-2} \text{m.K}$

-Độ rọi năng lượng tổng cộng:

$$\Delta M_e = \int_0^\infty W_\lambda d\lambda = \sigma T^4, \text{ với } \sigma = 5.672 \times 10^{-8} \text{ (W/m}^2\text{K}^4)$$

→ Tính được bước sóng ứng với độ rọi phổ cực đại

→ Tính được độ rọi năng lượng của nguồn có diện tích A

* Nóng sáng của vật thể thực

- Vật thể thực không bức xạ nhiều công suất như vật đen ở cùng một nhiệt độ

- Tỷ số giữa độ trung năng thực trên độ trung năng của vật đen lý tưởng gọi là độ phát xạ (emissivity, e) = Tỷ số công suất hấp thụ của vật với công suất hấp thụ của vật đen lý tưởng: a .

$$M_e = e \sigma T^4, e = a$$

Công suất hấp thụ từ công suất đến:

$$\Phi_e = aHA$$

Ví dụ : Xét đèn nóng sáng có vật bức xạ ở nhiệt độ T , đặt trong vỏ được hút chân không, nhiệt độ làm việc ổn định của vỏ là T_1

Gọi P là công suất cung cấp cho vật bức xạ = công suất bức xạ toàn phần

ϕ_e : công suất phát bởi vật bức xạ

P_a : Công suất hấp thụ bởi vật bức xạ, do phản xạ năng lượng từ vỏ đèn

- Khi nhiệt độ hoạt động cân bằng đạt được, thì công suất thoát khỏi vỏ đèn phải bằng công suất cung cấp, từ đó tính được:

$$P = Ae \sigma (T^4 - T_1^4), \text{ với } \sigma \text{ là hằng số vật lý } = 5.672 \times 10^{-8} \text{ WK}^{-4}/\text{cm}^2.$$

* Lưu ý: Trong thực tế với một vật liệu, ở một nhiệt độ cho trước, hệ số phát xạ, e , thay đổi theo bước sóng.

- Với 1 vật liệu cho trước và ở một bước sóng cố định thì e là hàm số của nhiệt độ.

- **Nhiệt độ màu** (Color temperature) của 1 nguồn sáng là nhiệt độ tuyệt đối mà tại đó một vật đen khi hoạt động sẽ có một cân bằng màu giống như nguồn sáng

Bài tập ví dụ: cho bóng đèn có diện tích dây tóc: $0,1\text{cm}^2$; $e = 0,35$, nhiệt độ dây tóc là 2700°K , nhiệt độ vỏ đèn là $100^\circ\text{C}(373^\circ\text{K})$. Tìm công suất cần cung cấp.

ĐS: $10,5\text{W}$

CHƯƠNG 2

PHÉP TRẮC QUANG, ĐÈN NÓNG SÁNG VÀ ĐÈN KHÍ

§ 2.1 HỆ TRẮC QUANG

1) Giới thiệu :

- Các hệ đo ánh sáng dựa trên cơ sở mô phỏng đáp ứng của mắt người với ánh sáng.
- Trắc quang là phép đo các đại lượng liên quan với ánh sáng trong vùng 400-700 nm.
- Phép trắc quang và quang kế sử dụng các đại lượng và đơn vị khác với bức xạ kế.
- Các hệ trắc quang dựa trên cơ sở các bộ thu có đáp ứng với năng lượng bức xạ theo kiểu như đáp ứng của mắt người.
- Dùng một số rất lớn dữ liệu thống kê để tạo ra **đường cong chuẩn** mô tả đáp ứng phổ của mắt, gọi là đường quan sát chuẩn (hay đường độ trung cho quan sát chuẩn) (Standard observer curve hay Luminosity curve for the Standard observer) hay còn gọi là đường cong CIE (viết tắt tên tiếng Pháp “Commission Internationale de l’Eclairage” của Hội đồng “International Commission on Illumination”).
 - * Một số lưu ý trên đồ thị đường cong chuẩn (độ trung tương đối / bước sóng):
 - Bước sóng 555nm là sáng nhất
 - Một nguồn có thể bức xạ một năng lượng bức xạ như nhau ở 555nm và 610nm, sẽ có độ sáng 0,5 khi hoạt động ở 610nm so với độ sáng 1 khi hoạt động ở 555 nm
 - * Dòng công suất quang được đo theo Lumen và ký hiệu F_V . Lumen có nghĩa tương tự như đơn vị của công suất Watt nhưng dùng trong vùng bước sóng khả kiến
 - * Quan hệ giữa dòng công suất bức xạ và dòng công suất quang :

$$F_V = \Phi_e \times 683(\text{lm/W}) \times \eta$$

Với : F_V : Dòng quang (lumen)

ϕ_2 : Dòng bức xạ (Watt)

683 lm/W : Hằng số vật lý

η : Độ trung tương đối ở bước sóng đang xét

BẢNG ĐỘ TRUNG TƯƠNG ĐỐI η ($\eta = 1$ Tại bước sóng 555 nm)

Bước sóng (nm)	Độ trung tương đối	Bước sóng (nm)	Độ trung tương đối
410	0,001	570	0,952
420	0,004	585	0,870
430	0.012	595	0,757
443	0,023	600	0,631
450	0,038	610	0,503
460	0,060	621	0,381
470	0,091	630	0,265
480	0,193	640	0,175
490	0,208	650	0,107
500	0,323	660	0,061
510	0,503	670	0,032
520	0,710	680	0,017
530	0,862	690	0,008
540	0,954	700	0,004
550	0,995	710	0,002
560	0,995	720	0,001

*** Các đặc trưng cơ bản:**

- Năng lượng quang trung (Luminous Energy): Q_v lumen.second (lm.s)
- Dòng quang trung: $F_v = dQ_v/dt$ lumen (lm)
- Mật độ dòng quang trung chiếu xạ : $E_v = dF_v/dA$ lm/m²
- Kích thích quang trung: $M_v = dF_v/dA$ lm/m²
- Cường độ quang trung (độ sáng): $I_v = dF_v/d\omega = E_v.R^2$ lm/sr
- Độ quang trung: $L_v = dF_v/ d\omega dA \cos\theta$ lm/sr.m²

* Thường không dễ chuyển đổi mật độ dòng bức xạ (W/m^2) thành mật độ dòng quang trung (lm/m^2). Việc này chỉ dễ dàng khi nguồn là đơn sắc và bước sóng đã biết.

Để thu được kết quả nhanh hơn, người ta dùng đầu thu quang

- Mật độ dòng quang trung có thể biểu diễn theo đơn vị footcandle (fc)

1 footcandle = 1 lm/ft^2 .

Bảng chuyển đổi

To:	From:		
	fc	lux	phot
fc (lm/ft^2)	1	10.7639	1.08×10^{-3}
lux (lm/m^2)	0.0929	1	1×10^{-4}
phot (lm/cm^2)	929	1×10^{-4}	1

2) Luminance (độ trung, độ sáng – Brightness) và Radiance (công suất bức xạ trên đơn vị góc đặc và trên đơn vị diện tích)

- **Luminance** là thuật ngữ dùng để mô tả bức xạ khả kiến từ một bề mặt có kích thước đáng kể so với khoảng cách quan sát và so với đầu thu (phép đo tương ứng gọi là phép đo trường gần)

Độ trung của một nguồn có cường độ $I_{(\theta)}$ tại vị trí của đầu thu:

$$L_v = I_{(\theta)} / a_t \cos \theta$$

$I_{(\theta)}$: Cường độ bức xạ, là hàm số theo θ (góc giữa tia tới và pháp tuyến của diện tích bị chiếu xạ)

a_t : Diện tích của nguồn bức xạ.

• Các đơn vị đo độ trung:

$$lm/m^2 sr = cd/m^2 \equiv nit$$

$$Stilb \equiv cd/cm^2$$

$$Lambert \equiv (1/\pi) stilb$$

millilambert \equiv apostilb

Footlamberrt $\equiv (1/\pi)\text{cd}/\text{ft}^2$

Bảng các hệ số chuyển đổi

	stilb	nit	lambert	footlamberrt
stilb	1	0,0001	$1/\pi$	0,00034
nit	10000	1	$10000/\pi$	3,426
lambert	π	$\pi/10000$	1	0,00012
footlamberrt	2919	0,2919	0,9294	1

§2.2 ĐẾN NÓNG SÁNG

1) Đèn nóng sáng :

- Được dùng để cân chỉnh, chiếu xạ và chiếu ảnh và dùng làm đèn nháy. Thường dùng dây Tungsten, Tungsten – Halogen và Carbon.

- Phân bố của dây tóc rất giống với của vật đen ở cùng nhiệt độ màu

- Điện trở suất (và điện trở) của dây tóc thay đổi rất nhanh theo nhiệt độ

- Vật liệu làm bóng đèn ảnh hưởng đến ánh sáng cực tím. Bóng thạch anh cho qua gần như toàn bộ tia cực tím, trong khi thủy tinh sẽ làm suy yếu các bước sóng < 320 nm

- Công suất điện cung cấp cho đèn : $P \sim AT^4$ với A là diện tích bề mặt bức xạ, T là nhiệt độ màu

* Data sheet ví dụ : Model UV – 40Lamp

Specification

Lamp	Deuterium (40 Watts)
Wavelength range	200 to 400 nm
Operating Current	500mA

Irradiance @ 250nm (30cm)	0,2 μ W/cm ² nm (typ.)
Uncertainty	\pm 3 to 10%
Long term Stability	50 hours for less than \pm 2% change

Ví dụ: Cho các thông số phổ của đường cong độ trung phổ: λ , W_λ

Tìm độ trung năng lượng xấp xỉ giữa 250 và 340 nm

Giải: Tính phân diện tích giới hạn đường W_λ và trực bước sóng λ

• **Thông số MSCP** (Mean Spherical Candlepower - cường độ sáng): Giá trị trung bình của cường độ trung đo theo mọi hướng

$$\text{MSCP} = F_v/4\pi$$

F_v : Dòng quang trung đo theo Lumen

* Đánh giá đặc trưng hoạt động của đèn khi biết giá trị danh định và giá trị thực tế

Ví dụ : Cho bảng dữ liệu của đèn: V_0 , I_0 , MSCP, Life (hours), Tìm các đặc trưng mới tại điện áp làm việc $84V = V_N$

2) **Đèn nháy:** (thường dùng trong ứng dụng chụp ảnh)

- Có dây tóc nóng chảy khi nháy
- Thông số Light output: thời gian để độ sáng đạt cực đại
- Các thông số của đặc tuyến ra tiêu biểu:

+ T_0 : Time to peak

+ T : Pulsse Width

+ D : Duration of pulse

+ Luminous Energy (lumen second) = D(s) x (Luminousoutyout)_{peak}

§2.3 ĐÈN KHÍ

1) Giới thiệu:

* **Hiệu ứng quang điện**: Phát xạ điện tử từ vật rắn (thường là kim loại hoặc Oxide) khi vật liệu bị chiếu sáng bởi bức xạ (1887- Heinrich Hertz) có 3 đặc trưng cơ bản :

1) Số điện tử bị phát xạ, xác định dòng điện, tỷ lệ với cường độ bức xạ tại một bước sóng cố định.

2) Mỗi vật liệu có một bước sóng ngưỡng của bức xạ. Nếu bức xạ tới có bước sóng $>$ bước sóng ngưỡng thì sẽ không có điện tử bị phát xạ.

3) Vận tốc tối đa của các điện tử phát xạ không phụ thuộc vào cường độ bức xạ mà tỷ lệ nghịch với bước sóng bức xạ.

- Các đặc trưng 2 và 3 dẫn tới khái niệm photon (hay lượng tử ánh sáng)

+ Năng lượng photon :

$$E = hf = hc/\lambda \quad \text{với } h : \text{hằng số Planck,} \quad f : \text{Tần số Hz}$$

+ Động năng của điện tử bị kích thích:

$$(1/2)mv^2 = hf - W$$

Với W : Năng lượng cần thiết để điện tử thoát khỏi bề mặt gọi là công thoát điện tử.

* **Hấp thụ chọn lọc**: Khi chùm ánh sáng trắng đi qua môi trường chứa khí áp suất thấp thì chùm ánh sáng thu được trên phổ kế thể hiện một số bước sóng bị suy giảm đáng kể.

- Tương tự, nếu khí áp suất thấp phát xạ thì cho phổ vạch có vị trí các vạch tương tự vị trí bị suy giảm ở hiện tượng hấp thụ. Mỗi loại khí có phổ vạch khác nhau.

- Khi áp suất khí tăng lên thì bức xạ và hấp thụ xảy ra trong dải rộng hơn các bước sóng và giá trị của các bước sóng thay đổi nhẹ.

* **Mô hình Bohr**

- Ở áp suất thấp, các nguyên tử khí biểu hiện gần như các nguyên tử cô lập

- Trong đó các điện tử chuyển động trên các quỹ đạo được phép xác định tương ứng với các mức năng lượng rời rạc và các năng lượng ion hóa rời rạc E_I

- Với nguyên tử Hydro:

$$E_I = E_0/N^2,$$

với E_I : năng lượng ion hóa, là mức năng lượng cung cấp để điện tử chuyển từ một quỹ đạo nào đó ra không gian tự do, E_0 : Hằng số năng lượng, N : Số nguyên gọi là số quỹ đạo \rightarrow Khi hấp thụ năng lượng chưa đủ mức E_I thì điện tử sẽ chuyển lên mức năng lượng cao hơn với điều kiện:

$\Delta E = E_a - E_b = E_0/N_a^2 - E_0/N_b^2$, Trong đó ΔE : Sự thay đổi năng lượng giữa mức a và b

E_a : Năng lượng ion hóa của mức a

E_b : Năng lượng ion hóa của mức b

N_a : Số quỹ đạo của mức a

N_b : Số quỹ đạo của mức b

- Nếu năng lượng nhận được chỉ đủ để chuyển điện tử lên một mức cao hơn mức kích thích thì dưới điều kiện không có năng lượng nào được nhận thêm, nó sẽ chuyển về trạng thái nền sau một thời gian xác định và giải phóng năng lượng. Việc chuyển từ trạng thái kích thích về trạng thái nền có thể trực tiếp hoặc qua các mức trung gian

Ví dụ: từ trạng thái 4 đến 1 có thể có 6 chuyển mức khả dĩ tương ứng với các năng lượng giải phóng $\Delta E = E_0(135/144)$, $E_0(128/144)$, $E_0(108/144)$, $E_0(27/144)$, $E_0(20/144)$, $E_0(7/144)$.

- Khi áp suất khí tăng hoặc khi khí chứa các phân tử có thể sử dụng mô hình Bohk nhưng các mức năng lượng đơn lẻ rời rạc được phép cần được thay bằng các dải (band) năng lượng được phép. Do đó, phổ hấp thụ và phát xạ sẽ xuất hiện các vùng phổ thay cho phổ vạch rời rạc.

2) Hoạt động của đèn khí :

* Các thành phần chính : Vỏ đèn, anode (+), cathode (-), gas

* Quá trình làm việc :

1- Một điện áp cao được đặt vào 2 đầu

2- Gia tốc các ion và các e^- đến động năng lớn

3- Quá trình va chạm tạo ra thêm nhiều ion và hình thành sự phóng điện phát xạ

4- Dòng phóng điện đạt đến một giá trị xác định và sụt áp qua đèn giảm đến một giá trị danh định

- Thời gian ổn định ≈ 30 phút.

- Có thể có loại đèn mà khí áp suất thấp được bay hơi từ chất lỏng hoặc rắn.

- Thời gian lên (turn-on time) của loại này thường lâu hơn. Các loại đèn này có thể sử dụng một loại khí thứ hai để tạo ra sự phóng điện và đốt nóng chất lỏng hoặc chất rắn.

* Có 4 quá trình (giai đoạn) của sự phóng điện giữa các điện cực trong khí áp suất thấp:

- Leakage Stage: Dẫn điện do điện tử tự do và ion khí có mặt lúc đầu trong khí do sự hấp thụ năng lượng bức xạ từ ngoài đèn. Độ dẫn gần như không đổi trong khoảng điện áp $E_a \rightarrow E_b$, dòng rất bé, phóng điện tự phát.

- Mức điện áp E_b là mức ion hóa, tạo ra hiệu ứng thác lũ \rightarrow dòng tăng đáng kể trong khoảng điện áp từ $E_b \rightarrow E_c$. Ở điện áp E_c sự thay đổi điện áp ở vùng cathode rất lớn và gia tốc mạnh các ion dương về phía cathode làm phát xạ điện tử từ cathode. Khi quá trình này chiếm ưu thế, đèn được coi là làm việc ở đánh thủng và E_c gọi là thế môi

- Glow discharge (phóng điện phát sáng) là giai đoạn dẫn điện ở thế đánh thủng, dòng tăng vọt, thế gần như không đổi, đây là giai đoạn làm việc không ổn định và cần duy trì dòng điện. Bức xạ gần như đồng đều trên chiều dài của đèn.

- Giai đoạn hồ quang: Mật độ dòng cao và nhiệt độ cao, đèn làm việc ở chế độ nóng sáng và có đặc trưng điện trở âm.

CHƯƠNG III. LASER

§ 3.1. LASER KHÍ

-Laser viết tắt của “light amplification by stimulated emission”, nghĩa là KĐ ánh sáng nhờ phát xạ kích thích.

-Phần tử trung tâm của laser khí là một ống khí (gần giống với đèn khí) là nơi mà sự phát xạ kích thích và khuếch đại ánh sáng xảy ra.

- Ống khí áp suất thấp được kích thích để phát xạ nhờ cao áp dc hoặc nguồn thế RF. Có một số dạng điển hình:

a) dc current flow, điển hình như đèn Low-power helium-neon laser có thể tạo hồ quang 7000V và thế hoạt động 1800V; dòng hoạt động 5mA; bức xạ công suất 3mW với công suất vào 9W.

b) RF capacitive coupled current flow, các nguyên tử bị kích thích bởi điện hoặc từ trường biến thiên nhanh ở tần số RF (20_30 kHz). Điện áp RF nhỏ hơn nhiều so với điện áp dc, nhưng dòng lại cao hơn nhiều.

c) RF inductive coupling

- Các phần tử quang trọng khác là các gương phản xạ đặt ở hai đầu của ống khí kích thích. Một trong hai gương được thiết kế cho phép một phần ánh sáng phát xạ được truyền qua và coi như là đầu ra của laser. Các tia phản xạ gây ra quá trình khuếch đại bức xạ đã được kích thích do các nguyên tử hấp thụ photon $h\nu$.

- Laser khí có thể chứa hai hoặc nhiều loại khí, điện trường áp đặt sẽ kích thích một trong các loại khí này. Va chạm của khí kích thích với khí khác dẫn đến trạng thái kích thích và phát xạ. Chẳng hạn laser helium-neon:

+ Quá trình phóng điện làm cho các điện tử của nguyên tử helium chuyển lên mức năng lượng cao hơn gọi là trạng thái nửa bền.

+ Qua quá trình va chạm, các nguyên tử helium kích thích tiếp tục làm cho các nguyên tử neon bị kích thích.

+ Khi quá trình dẫn điện được xác lập, đa số các nguyên tử khí sẽ ở dạng nửa bền: điều kiện này được gọi là đảo lộn mật độ “population inversion”(vì với khí không bị kích thích, đa số nguyên tử ở trạng thái nền).

+ Các điện tử của các nguyên tử neon bị kích thích có thể tạo ra các chuyển mức khác nhau và bức xạ năng lượng với các bước sóng khác nhau.

+ Bức xạ từ các nguyên tử neon ở 1 bước sóng xác định sẽ được tăng cường nhờ phản xạ từ các gương và nhờ đó bức xạ ở bước sóng này sẽ chiếm ưu thế.

+ Hoạt động liên tục của laser sẽ đạt được khi các gương phản xạ ở hai đầu ống tạo thành 1 hốc cộng hưởng, có tác dụng giữ hầu hết photon để tạo ra quá trình đa phản xạ trong ống, qua đó tăng xác suất va chạm của photon với nguyên tử neon.

§3.2 CÁC NGUYÊN LÝ LASER TỔNG QUÁT

Hiện tượng laser xảy ra do sự tương tác của hai hệ thống:

- Hệ nguyên tử có chuyển mức năng lượng của điện tử làm phát sinh photon.
- Hốc cộng hưởng tạo bởi các gương đầu cuối .

a) Tương tác giữa bức xạ với hệ nguyên tử

- 1 photon sẽ phát sinh khi 1 điện tử chuyển từ 1 mức năng lượng cao xuống 1 mức năng lượng thấp hơn:

$$hf = E_2 - E_1$$

- Trong thực tế có sự mở rộng vạch phổ do 2 quá trình sau:

+ Homogeneous broadening: đặc trưng cho tất cả các nguyên tử trong hệ, là hàm của thời gian sống hữu hạn của trạng thái bức xạ τ , nếu quá trình này là duy nhất khi laser làm việc, thì phân bố vạch bức xạ được cho bởi :

$$A(\omega) = K/[(\omega - \omega_0)^2 + (1/\tau)^2]$$

$A(\omega)$: biên độ bức xạ tại tần số ω

K : hệ số tỷ lệ

$$\omega_0 = 2\pi(E_2 - E_1)/h$$

+ Inhomogeneous broadening: vạch phổ bị mở rộng do các hiệu ứng nguyên tử riêng biệt. Trong tinh thể các nguyên tử khác nhau có thể có các chuyển mức năng lượng khác nhau ít do các nguyên tử lân cận. Các nguyên tử trong khí chuyển động theo các hướng khác nhau với các vận tốc khác nhau, do đó gây ra các dịch chuyển Doppler khác nhau lên tần số:

$$f = f_0 + vf_0/c,$$

với $f_0 = (E_2 - E_1)/h$

v thành phần vận tốc theo phương người quan sát

Độ rộng bán phổ gây bởi hiệu ứng Doppler là:

$$\Delta f = 2f_0(KT/M)^{1/2},$$

với $K = \text{const.} = 165,8 \times 10^{-15}$ (amu/K), T : nhiệt độ của hốc, M : khối

lượng nguyên tử tính theo amu.

* Quá trình này chiếm ưu thế với laser khí; laser Helium-neon có độ rộng bán phổ $\approx 1.1 \times 10^9$ Hz đến 1.4×10^9 Hz

* Phổ của laser thực có thể bị ảnh hưởng do tổn hao phản xạ bởi gương và tán xạ không khí

b) Hốc cộng hưởng tạo bởi các gương đầu cuối

-Điều kiện cộng hưởng: hành trình qua hốc $2L =$ số nguyên lần bước sóng

$$2L = M\lambda$$

→ Có rất nhiều tần số laser được phép, cách nhau các khoảng

$$\Delta f = c/2L,$$

gọi là các mode hốc cộng hưởng (cavity modes)

→ Người thiết kế laser phải tối ưu hoá thiết kế cho tần số mong muốn nhờ việc điều khiển hỗn hợp khí, các đặc trưng kích thích và phản xạ của hốc và có thể dùng bộ lọc, hoặc tăng khoảng cách giữa các gương (tăng L).

- Trong thực tế chỉ có những chuyển mức năng lượng với thời gian sống tương đối lớn mới có thể tạo ra các vạch phổ có thể sử dụng được.

- Năng lượng laser khả dụng nhận được khi độ lợi của hốc được điều chỉnh để chọn 1 trong các vạch laser khả dĩ. Với laser khí, do sự mở rộng doppler, chiều dài của hốc sẽ xác định số cộng hưởng hốc chứa trong 1 vạch phổ. Độ lợi đầu ra của laser lúc này sẽ là tích của độ lợi vạch phổ mở rộng với cavity modes. Phát xạ đồng thời này được gọi là longitudinal modes.

- Ngoài ra, hốc laser có thể tạo ra một số modes không gian hay TEM modes. Trong thực tế, mode mong muốn là TEM_{00} , là tia đơn với phân bố năng lượng theo phân bố Gauss.

c) Kích thước vệt laser

- Bức xạ laser có thể ở dạng liên tục (continuous_wave laser) hoặc dạng xung (pulsed laser).

- Bức xạ laser có thể được hội tụ thành vệt nhỏ để tăng mật độ dòng quang.

- Kích thước vệt laser có thể được hội tụ là hàm của đường kính chùm laser:

$$D = (16/3)(\lambda F/\pi D_0)$$

với F: tiêu cự của thấu kính

D_0 : độ rộng chùm laser tính từ điểm có cường độ 13.5% cường độ cực đại.

- Công suất chùm laser có thể bị giảm bởi 1 miêng tròn có đường kính nhỏ hơn đường kính chùm laser. Tỷ số dòng truyền qua / dòng tới là:

$$\Phi_e/\Phi_i = 1 - \exp(-2D^2/w^2),$$

với D: đường kính miêng tròn

w: đường kính chùm tia tới, được xác định như D_0 .

§3.3 LASER BÁN DẪN

1/ Giới thiệu

* Các cấu phần cơ bản:

- Photon source: tái hợp điện tử lỗ trống phát sinh photon.

- Feedback: Các photon được đưa ngược lại vào miền tái hợp nhờ phản xạ để tạo ra phát xạ kích thích

- Energy source: dòng tiêm hạt tải, cung cấp công suất

* Chuyển mức năng lượng xảy ra giữa vùng dẫn và vùng hoá trị

* Bán dẫn vùng cấm thẳng (direct bandgap): cực đại vùng hoá trị và cực tiểu vùng dẫn ở cùng 1 giá trị xung lượng → điện tử chuyển từ cực tiểu vùng dẫn về cực đại vùng hoá trị mà không thay đổi xung lượng → trao đổi năng lượng giữa các điện tử và các photon feedback xảy ra dễ hơn vì không cần trao đổi xung lượng. Các vật liệu: GaAs, InAs.

* Bán dẫn vùng cấm xiên: cực đại và cực tiểu các vùng không cùng giá trị xung lượng → để xảy ra hấp thụ hay phát xạ photon thì sự chênh lệch xung lượng giữa trạng thái đầu và cuối phải được trao đổi với dao động mạng tinh thể → sự trao đổi năng lượng giữa điện tử và Photon phải qua quá trình 2 bước → không thích hợp cho cơ chế laser feedback (trương tự với tình huống một mạch có độ lợi vòng quá thấp, không đủ để duy trì dao động). Các vật liệu: Si, Ge, GaP có vùng cấm xiên.

* Trạng thái đảo lộn mật độ: đa số các mức năng lượng được phép gần đáy vùng dẫn bị chiếm bởi e- và đa số các trạng thái được phép gần đỉnh vùng hoá trị bị trống e- hay bị chiếm bởi lỗ trống.

- Các điện tử chuyển mức từ vùng dẫn về vùng hoá trị có thể do tái hợp tự phát hoặc do phát xạ kích thích

- Công suất ngoài cung cấp có tác dụng thay thế các điện tử trong vùng dẫn

- Ở chế độ dòng thấp: quá trình tái hợp tự phát chiếm ưu thế tương tự LED

- Khi dòng tăng, số điện tử được tiêm vào miền tái hợp của chuyển tiếp PN tăng → tăng số photon phát xạ

- Cơ chế phản xạ feedback hầu hết số photon này vào chuyển tiếp. Khi đó dòng tiêm điện tử chủ yếu dùng thay thế các điện tử thay đổi trạng thái do phát xạ kích thích. Chuyển tiếp bắt đầu phát xạ 1 khoảng bước sóng rất hẹp bức xạ laser.

- Dòng ngưỡng: bắt đầu quá trình laser,

+ phụ thuộc vật liệu chế tạo diode laser

+ phụ thuộc mức pha tạp

+ dạng hình học của chuyển tiếp

+ nhiệt độ linh kiện (rất quan trọng)

* Homojunction: miền p và n cùng loại vật liệu, hoạt động ở dòng thuận rất lớn → chỉ làm việc khi được làm lạnh với nitơ lỏng.

* Diode laser thực: có 1 hoặc 2 heterostructure (nhiều loại vật liệu) sắp xếp theo kiểu pn luân phiên đổi loại vật liệu.

+ Ưu điểm có thể fine-tune các độ rộng vùng cấm → điều chỉnh các đặc trưng phổ của laser. Vì các lớp vật liệu khác nhau rất mỏng và gần nhau về các đặc trưng vật lý nên các đặc trưng điện của chúng sẽ tương tác và thiết lập các dải vùng cấm xác định cho cấu trúc toàn bộ.

2) Đặc trưng cơ bản

- Các laser diode hoạt động ở chế độ dòng tiêm thường chế tạo từ GaAs và GaAlAs, hoạt động ở bước sóng dài 1180-1580 nm

- Diode laser đơn thường có chế độ turn-on trong khoảng 1,5 - 2,5 V

- Ở chế độ xung, thế phân cực thuận short-term trong khoảng 5 – 25 V
- Một số lưu ý trong đồ thị sự phụ thuộc của công suất bức xạ và thế phân cực thuận vào dòng thuận của diode laser GaAlAs:

- + Nhiệt độ được giữ không đổi
- + Công suất bức xạ tăng nhẹ trong khoảng 0 → 18 mA
- + Trong khoảng này linh kiện hoạt động tương tự LED.
- + Trên 1,8 mA công suất bức xạ tăng vọt, diode hoạt động như 1 laser
- + Trong khoảng 20 → 30 mA công suất bức xạ tăng gần như tuyến tính

theo dòng với độ dốc được gọi là hiệu suất vi phân.

- + Dòng ngưỡng nhạy với nhiệt độ

$$I_{th} = I_0 \exp[(T - T_0)/K], \quad K \text{ là hằng số của linh kiện.}$$

- Laser diodes thường làm việc ở chế độ xung. Để thời gian chuyển mạch nhanh và biên độ bức xạ lớn, các diode thường được phân cực bởi 1 dòng \geq dòng ngưỡng. Tín hiệu dòng xung là lượng gia tăng của dòng cần thiết để đạt được mức công suất bức xạ xác định

- + Yêu cầu khi hoạt động:

- nhiệt độ của linh kiện phải được điều khiển
- hoặc dòng phân cực phải thay đổi được, đáp ứng với mỗi dòng ngưỡng cho mỗi nhiệt độ làm việc.

- + Tuy nhiên, nếu dòng phân cực tăng → linh kiện nóng hơn → cần dòng phân cực lớn hơn để đạt công suất mong muốn, do đó trạng thái làm việc ổn định cuối cùng thường ở nhiệt độ rất cao.

- + Độ sạch phổ và giá trị của bước sóng ưu thế phụ thuộc dòng qua diode và nhiệt độ làm việc. Khi dòng thay đổi, có 2 hiện tượng xảy ra:

- 1- Tại giá trị dòng thấp, gần dòng ngưỡng, phổ bức xạ bao gồm các vạch phổ phân bố trong một vùng bước sóng do longitudinal mode và cấu trúc vùng của bán dẫn.

2- Khi dòng tăng số vạch phổ giảm và tâm của phân bố bị dịch về phía bước sóng dài hơn do đặc trưng feedback (tập trung) và nhiệt độ tăng (dời bước sóng). Bước sóng trung tâm có thể bị dịch từ 0,1 → 20 nm, tùy loại diode.

* Vấn đề nhiễu:

+ Modal noise: phát sinh do longitudinal mode

+ Reflection noise: do bức xạ bị phản xạ ngược vào kênh laser từ các mặt bên

* Phổ laser: Được quan sát trong thời gian rất dài so với tốc độ thay đổi xảy ra trong diode. Có 2 cách giải thích phổ laser:

(1) Laser là bộ phát xạ đa mode: bức xạ đồng thời tất cả các thành phần phổ, hiển thị với biên độ tương đối xác định.

(2) Laser là linh kiện đơn mode: bức xạ chỉ một bước sóng tại một thời điểm cho trước bất kỳ. Các thành phần phổ quan sát thể hiện sự tổng hợp của tất cả các bước sóng riêng rẽ mà diode bức xạ trong quá trình quan sát. Biên độ của các thành phần phổ thể hiện tần suất xảy ra của nó trong thời gian quan sát.

- Sự thay đổi bước sóng trong trường hợp (2) gọi là mode hop (nhảy mode). Nhảy mode có thể gây ra sự thay đổi biên độ ở đầu ra của quang hệ do sự suy hao và vận tốc truyền sóng khác nhau với các bước sóng khác nhau. Nhảy mode là hiện tượng ngẫu nhiên và gây ra sự thay đổi ngẫu nhiên của biên độ bức xạ và tạo ra nhiễu biên độ.

- Trong trường hợp đa mode (1) các thành phần phổ luôn tồn tại, nhưng công suất ổn định cho chúng có thể thay đổi theo thời điểm. Máy phân tích phổ chỉ ra biên độ trung bình theo thời gian của các thành phần phổ. Đầu ra của quang hệ cũng thay đổi theo thời gian

* Các yếu tố ảnh hưởng đến tuổi thọ của Laser

1/ Lắp đặt và thử nghiệm

2/ Các xung điện từ phát sinh bên ngoài trong thời gian ngắn

3/ Mức dòng

4/ Nhiệt độ

5/ Mức bức xạ cực đại

6/ Sự già hoá linh kiện

Các yếu tố (1) và (2) do kích thước linh kiện rất nhỏ → dễ bị phá huỷ bởi xung áp hoặc xung dòng, hoặc quá trình phóng tĩnh điện ngắn xảy ra khi lắp đặt, thử nghiệm và từ môi trường → chú ý vấn đề nối đất cho người, phương tiện và thiết bị. Các mạch điện liên quan cần được bảo vệ và lọc từ.

- Thời gian sống của laser có thể giảm 4 lần khi mật độ dòng làm việc tăng 2 lần
- Mức bức xạ cao thường làm suy giảm các đặc trưng phản xạ của các mặt phản xạ của laser do hiện tượng ăn mòn.

- Khi diode được chế tạo, có các khuyết tật rất nhỏ trong vật liệu của kênh laser, của các lớp bán dẫn, các mặt phản xạ và các tiếp xúc điện. Các khuyết tật này sẽ lớn dần theo thời gian sử dụng.

* Laser data sheets: ví dụ loại LT015MD/MF

3) Điều khiển Laser

- Công suất bức xạ, bước sóng, dòng hoạt động và thời gian sử dụng của Laser đều thay đổi theo nhiệt độ, do đó cần có các vòng điều khiển điện và điều khiển nhiệt.

+ Vòng điều khiển điện:

- chống các xung dòng và thế phá huỷ

- điều chế dòng laser

- điều chỉnh dòng ngưỡng

+ Vòng điều khiển nhiệt:

- tiếp xúc nhiệt với vỏ laser

- thường chứa linh kiện bơm nhiệt bán dẫn gọi là thermoelectric cooler hoặc Peltier device có tác dụng thu nhiệt (bơm nhiệt từ laser ra vỏ ngoài của đầu laser).

- Bơm nhiệt điện: dùng điện tử chuyển nhiệt lượng từ mặt hấp thụ nhiệt ra mặt truyền nhiệt thông qua dãy các bán dẫn BiTe (Bismuth Telluride) loại N và P ghép luân phiên với kim loại tiếp xúc với các mặt truyền nhiệt và mặt hấp thụ nhiệt.

Nguồn điện ngoài, E, tạo ra dòng điện tử theo chiều từ N → P và sau đó từ P → N.

Khi các e- chuyển động từ $P \rightarrow N$, chúng phải chuyển từ một trạng thái năng lượng thấp tới 1 trạng thái năng lượng cao hơn, do đó các e- sẽ cần hấp thụ năng lượng từ phía “cold” surface và nhả nhiệt lượng cho phía “hot” surface để chuyển mức khi từ $N \rightarrow P$.

_____o0o_____

CHƯƠNG IV PHOTODETECTORS

§ 4.1 VACUUM PHOTODETECTORS

- Dòng hiệu ứng quang điện tạo ra dòng và áp tỷ lệ với mật độ dòng công suất sóng tới.

- Độ nhạy cao, đáp ứng nhanh .
- Chủ yếu dùng trong phòng thí nghiệm.

1) Nguyên lý

- Cathode cấu tạo từ bề mặt kim loại cong có phủ lớp oxide.
- Anode: ống mỏng đặt tại tiêu điểm của cathode.
- Phát xạ điện tử từ bề mặt cathode đòi hỏi năng lượng photon đến phải đủ để kéo điện tử ra khỏi các lực liên kết của e- với nguyên tử và với bề mặt cathode (do các điện tích dương tạo ra bởi các điện tử rời khỏi bề mặt).

$$E_{k\max} = hf - W$$

W: công thoát điện tử

h: hằng số planck

f: tần số photon

2) Các đặc trưng cơ bản

- Stopping voltage: thế áp đặt để làm triệt tiêu $E_{k\max} \rightarrow$ độ dẫn = 0
- Tần số ngưỡng: khi sóng đến có tần số nhỏ hơn tần số ngưỡng sẽ không phát xạ điện tử từ cathode, là tần số ứng với $E_k = 0$.

* Đặc trưng thuận:

- Tồn tại điện áp “knee voltage” mà trên đó dòng sẽ bão hoà, photodiode hoạt động trong miền này.

- Dòng bão hoà tỷ lệ thuận với mật độ dòng quang tới H.

- Thế stop giống nhau với các mật độ dòng quang tới khác nhau (chỉ là hàm của tần số photon)

* Đặc tuyến ra: có tải dùng để tính gần đúng dòng qua ống I_T , thế rơi trên ống V_T khi biết tải R và mật độ dòng quang (lm)

* Các tính chất cơ bản của vacuum photodetector:

1/ Dòng photodiode tăng tuyến tính theo mật độ dòng quang nếu trở tải nhỏ.

2/ Trường hợp lý tưởng, độ nhạy dòng $S_I = \frac{\Delta I}{\Delta F_v} = \text{const.}$ và không phụ thuộc

tải

3/ Các mạch thực tế lệch khỏi lý tưởng khi dòng lớn và bé .

4/ Thế anode giảm khi mật độ dòng quang tăng.

5/ Độ nhạy điện áp $S_v = \frac{\Delta V}{\Delta F_v}$ tỷ lệ với trở tải .

6/ Với trở tải R_L nhỏ, độ nhạy điện áp gần không đổi và dòng, thế thay đổi gần tuyến tính theo mật độ dòng quang.

§ 4.2 THERMAL DETECTORS

1) **Giới thiệu:** là lớp linh kiện hoạt động nhờ chuyển đổi năng lượng bức xạ tới thành nhiệt năng và sau đó thành các đại lượng điện có thể đo được.

- Dùng các bề mặt phủ có đặc trưng gần với vật đen lý tưởng.
- Ứng dụng làm đầu thu bức xạ trong phòng thí nghiệm và trong các thiết bị cân chỉnh.

- Có 4 loại chính:
- (1) Bolometer (xạ nhiệt kế)
 - (2) Thermistors (tecmisto)
 - (3) Thermopiles (pin nhiệt điện, cột nhiệt điện)
 - (4) Pyroelectric detector (đầu thu hỏa điện)

→ (1) và (2) thay đổi điện trở khi chiếu xạ.

→ (3) có thể đầu cuối tỷ lệ với cường độ chiếu xạ, nhưng có tần số cutoff thấp không thích hợp theo rời sự thay đổi nhanh của bức xạ.

→ (4) có thể đầu cuối thay đổi theo sự thay đổi của bức xạ.

→ (2) và (3) có cấu trúc vững chắc thích hợp cho các ứng dụng công nghiệp

2) **Các đặc trưng chung:** độ nhạy, đáp ứng phổ, hằng số thời gian, công suất nhiễu tương đương (NEP: noise equivalent power), khả năng thu, khả năng thu chuẩn hóa D^* , góc thu.

a) **Độ nhạy:** tỷ số đầu ra điện của detector/đầu vào quang, thường cho dưới dạng amperes/watt hoặc volts/watt của công suất đến.

$$R = dr/d\Phi_e$$

với dr là số gia của dòng hoặc thế ở đầu thu, $d\Phi_e$ là số gia của mật độ dòng tới ở đầu thu.

b) **Đáp ứng phổ (đặc trưng nhạy phổ):** quan hệ giữa độ nhạy bức xạ và bước sóng của bức xạ tới dưới cùng điều kiện chiếu xạ (tia tới chuẩn trực).

- Các bộ thu nhiệt có đáp ứng phổ bằng phẳng, rộng, giới hạn bởi đặc trưng truyền qua của cửa sổ dùng ở vỏ đầu thu. Các đầu thu bán dẫn và đèn chân không có đáp ứng phổ phụ thuộc vật liệu chế tạo đầu thu.

c) **Hằng số thời gian:** mô tả đáp ứng bước của đầu thu của đầu thu với bước thay đổi của mức chiếu xạ (dùng chùm tia ngắt đoạn nhờ tấm chắn quay hoặc nhờ điều biến công suất nguồn). Đầu thu sẽ biểu hiện như mạch lọc thông thấp và cho lỗi ra khác nhau với tốc độ điều biến hoặc tốc độ ngắt khác nhau. Có thể đặc trưng hóa bởi thời gian lên.

- Nếu quá trình quá độ có dạng $A \exp(-t/T)$ thì T là hằng số thời gian với đầu ra của 1 hệ thống bậc 1 bị kích thích bởi xung, hằng số thời gian T là thời gian cần để đạt 63,2 % toàn bộ sườn lên hoặc sườn xuống .

- Hằng số thời gian đôi khi còn gọi là thời gian $1/e$ hoặc $(1 - 1/e)$

- Trên giản đồ Bode của bộ lọc thông cấp bậc 1, tần số -3dB , f_b , liên quan với hằng số thời gian:

$$f_b = \frac{1}{2\pi T}$$

- Thời gian lên của xung: t_r (khoảng thời gian từ 10% \rightarrow 90% đỉnh xung) với bộ lọc thông thấp RC: $t_r = 2,2RC = 2,2T$

d) **Công suất nhiễu tương đương (NEP):** là công suất bức xạ tạo ra tỷ số $S/N = 1$ ở đầu ra của detector (ở một tần số cho trước, và với một độ rộng băng nhiễu cho trước), đơn vị là watts per (hertz)^{1/2}.

- Một số nhà cung cấp định nghĩa NEP là công suất bức xạ tạo ra tỷ số tín hiệu / nhiễu dòng tối = 1

+ Vì hằng số thời gian ảnh hưởng lên biên độ đầu ra của linh kiện, do đó tần số điều chế và dạng sóng phải được xác định trước.

+ Biên độ tín hiệu thu, công suất nhiễu, dòng nhiễu và điện áp nhiễu phụ thuộc vào độ rộng băng tần số điện của hệ đo, được gọi là độ rộng băng nhiễu hiệu dụng. Chỉ có các giá trị NEP đo hoặc chỉnh với cùng độ rộng băng mới có thể được so sánh trực tiếp .

+ NEP mô tả mức tín hiệu hữu ích nhỏ nhất mà linh kiện có thể phân biệt được.

e) **Detectivity**: là nghịch đảo của NEP

+ Đôi khi người ta dùng độ thu chuẩn hóa:

$$D^* = [A(\Delta f)]^{1/2}/NEP$$

với $NEP/[A(\Delta f)]^{1/2}$ là NEP chuẩn hóa theo đơn vị diện tích và đơn vị độ rộng băng.

A: diện tích miền nhạy quang của detector, Δf : effective noise bandwidth

f) **The field of view (trường quan sát)**: là diện tích trong không gian mà từ đó detector nhận công suất bức xạ.

- Góc quan sát (the angle of view): là góc đo từ bề mặt của detector xác định biên của một thể tích trong không gian mà từ đó năng lượng có thể đến được detector.

- Chỉ có nguồn bức xạ trong vùng quan sát (the field of view) mới là nguồn cần kiểm tra. Các nguồn nền là các nguồn khác với nguồn kiểm tra (test source) mà công suất có đến đầu thu .

3) **Tính toán nhiễu:**

+ Trước tiên cần xác định độ rộng băng của nhiễu, thường \approx độ rộng băng điện của hệ thống, bao gồm đầu thu, các bộ khuếch đại và thiết bị đo có mặt trên đường đo tín hiệu .

- Nếu độ rộng băng điện tổng có đường cong đáp ứng với độ dốc ≥ -18 (dB/octave) ở trên tần số cắt trên thì độ rộng băng nhiễu \approx độ rộng băng điện .

- Nếu độ dốc là -6 hay -12 (dB/octave) thì độ rộng băng nhiễu = độ rộng băng điện f_b x hệ số chỉnh độ rộng băng

$$\Delta f = K_b \cdot f_b,$$

$K_b = 1.571(\pi/2)$ với độ dốc -6 (dB/octave) hay -20 dB/decade.

= 1.222 với độ dốc -12 (dB/octave).

* với các pin nhiệt điện, NEP được định nghĩa theo IEEE

$$NEP = P_0,$$

với P_0 là công suất sóng tới mà điện áp tín hiệu $V_S =$ điện áp nhiễu V_N .

Có thể viết:

$$NEP = (V_N/V_S).P_i$$

Tong đó P_i là công suất sóng tới :

$$P_i = H.A$$

*Trong các data sheet thường dùng NEP chuẩn hoá:

$$NEP = (V_N/V_S)[H.A/(\Delta f)^{1/2}]$$

*Trong data sheet

$$D^* = (V_N/V_S)[(\Delta f/A)^{1/2}(1/H)]$$

§4.3 PN JUNCTION DETECTORS

1) Giới thiệu:

- Photo diode là các detector tạo ra dòng điện phụ thuộc vào bức xạ.
- Có 4 dạng cơ bản: Planar PN junction, Schottky barrier photodiode, PIN photodiode, và Avalanche photodiode (APD)

- Có 2 mode hoạt động:

+ Mode quang dẫn: → phân cực ngược + tải nối tiếp

→ ngắn mạch, nối với OP-AMP

+ Mode quang thế: → nối tải, không có thể phân cực

2) Các đặc trưng cơ bản

+ Được cấu tạo với một phía của cấu trúc bán dẫn được mở cho bức xạ đi qua 1 cửa sổ hoặc một lớp phủ bảo vệ.

+ Cấu trúc planar diffused photodiode: rất mỏng, diện tích bề mặt rộng, để N dày hơn lớp bề mặt P (nhận bức xạ tới), được chế tạo theo phương pháp khuếch tán khí vào bán dẫn.

+ Schottky barrier photodiode: dùng lớp màng vàng mỏng phủ lên để bán dẫn loại N. Biên phân cách giữa Au/N-Semiconductor hình thành 1 rào thế. Đáp ứng phổ phẳng hơn PN photodiode trong vùng IF, visible, và nhạy hơn trong vùng UV.

-Tuy nhiên schottky barrier photodiode nhạy với nhiệt độ hơn PN photodiode do đó không thường xuyên hoạt động đáng tin cậy ở mức bức xạ cao.

+ PIN photodiode: Lớp I (intrinsic) có tác dụng làm rộng miền nghèo \rightarrow giảm điện dung miền nghèo \rightarrow giảm thời gian đáp ứng của photodiode.

+ Kích thước linh kiện và vỏ phụ thuộc ứng dụng \rightarrow cỡ 1 vài mm cho ứng dụng cáp quang, \rightarrow một vài inch cho ứng dụng pin mặt trời \rightarrow cỡ 1 cm^2 cho các thiết bị đo.

+ Hoạt động ở chế độ phân cực ngược, nối trực tiếp với tải và nguồn phân cực. Các photon có năng lượng thích hợp, đến được vùng nghèo sẽ bị hấp thụ và làm phát sinh các cặp điện tử lỗ trống \rightarrow tăng dòng ngược đáng kể

+ Điện trường nội của miền nghèo sẽ tách các e^- và h^+ về 2 phía N và P

+ Có 4 trường hợp khả dĩ:

(1) Nếu photodiode hở mạch: thế hở mạch phụ thuộc dạng hàm mũ vào mật độ dòng quang tới.

(2) Nếu một điện trở khép kín mạch ngoài của photodiode: sẽ phát sinh dòng và sụt áp trên trở.

(3) Nếu photodiode ngắn mạch: dòng ngắn mạch tỷ lệ với mật độ dòng quang tới.

(4) Nếu photodiode được phân cực ngược: dòng ngược tỷ lệ với mật độ dòng quang tới.

+ Các solar diode là photodiode hoạt động ở mode quang thế.

+ Các đầu thu trong kỹ thuật thông tin và thiết bị đo hoạt động ở mode quang dẫn.

+ **Dòng rò tối**: dòng ngược phát sinh do các cặp e^- , h^+ tạo ra bởi kích thích nhiệt, nhỏ hơn dòng phát sinh bởi photon rất nhiều.

+ Ở một bước sóng cố định hoặc nhiệt độ màu xác định, dòng quang phát sinh của photodiode tỷ lệ trực tiếp với mật độ dòng quang tới và diện tích tích cực của photodiode.

+ **Hiệu suất lượng tử**: tỷ số giữa số điện tử phát xạ trên số photon bị hấp thụ, ký hiệu η . Hiệu suất lượng tử của diode thực < 1 và thay đổi theo bước sóng, có thể được tính như sau:

$$\eta = I_p / i_p$$

với I_p là dòng photodiode trung bình, i_p là dòng của đầu thu lý tưởng có $\eta = 1$.

Dòng công suất sóng đến P qua diện tích tích cực A:

$$P = H_0 \cdot A$$

Năng lượng photon đến:

$$E_p = hc / \lambda$$

Dòng photon phát sinh của diode lý tưởng:

$$i_p = (P/E_p) \cdot e, \quad e = \text{điện tích điện tử}$$

+ Đáp ứng của photodiode lý tưởng:

$$R = i_p / P = e \lambda / hc = \lambda \cdot (8.06 \times 10^{-4} \text{ A/W.nm})$$

với λ là bước sóng tính theo nm.

+ Đáp ứng của photodiode thực:

$$R = \eta (e \lambda / hc)$$

* Các yếu tố ảnh hưởng lên hiệu suất lượng tử

(1) *Phản xạ*: các bán dẫn dùng chế tạo photodiode có chiết suất khoảng 3,5 → hệ số phản xạ $\approx 30\%$ tại bề mặt bán dẫn.

(2) *Sự suy giảm hệ số hấp thụ ở bước sóng dài*: hệ số hấp thụ ở bước sóng ngắn gấp $\approx 10^4$ lần so với các bước sóng gần giới hạn vùng cấm. Hệ số hấp thụ biểu thị khả năng 1 photon có thể bị hấp thụ khi đi qua một đơn vị khoảng cách trong vật liệu.

(3) *Sự hấp thụ sóng ngắn*: do các photon ngắn bị hấp thụ sớm ở lớp trên của photodiode trước khi có thể tới được vùng nghèo, do đó không đóng góp vào dòng thu. Có thể khắc phục nhờ việc giảm độ dày lớp trên

(4) *Giới hạn vùng cấm*: các photon phải có đủ năng lượng để gây chuyển mức e- qua vùng cấm.

* **Diode thác lũ (APD Avalanche Photodiode)**: được thiết kế để nâng cao hiệu suất lượng tử, cho phép tạo ra dòng có tốc độ lớn hơn tốc độ dòng photon tới. APD được phân cực ngược với điện áp lớn để gia tốc các e- phát sinh do photon đến vận

tốc lớn và va chạm với cấu trúc nguyên tử trong miền nghèo tạo ra các cặp e- lỗ trống mới, kết quả là dòng tổng có thể tăng hàng trăm lần so với diode PN đơn giản.

Độ lợi dòng = Dòng APD / Dòng do photon khi $\eta = 1$

- Độ lợi dòng của các APD chế tạo từ silicon rất nhạy với sự thay đổi điện áp rơi trên diode và với nhiệt độ \rightarrow các mạch ứng dụng rất phức tạp, đòi hỏi ổn định điện áp và bù nhiệt.

- Độ lợi dòng của APD phản ánh số trung bình các e- được tạo ra trên 1 photon đến. Số e- được phát sinh bởi 1 photon bất kỳ thay đổi một cách ngẫu nhiên, tạo ra một tín hiệu nhiễu chồng lên giá trị trung bình. Nhiễu này khác với nhiễu nhiệt vì nó liên quan đến hiện tượng hấp thụ và nhân. Độ lợi có thể rất nhỏ ở mức công suất thấp.

3) Đặc trưng đường tải

* Hoạt động mode quang thể tự thiên áp

- Sụt áp trên tải và dòng quan hệ theo định luật Ohm, trong khi quan hệ giữa sụt áp trên photodiode và dòng tuân theo đặc trưng diode.

- Điểm làm việc \equiv giao điểm đường tải và đường cong (I-V) của diode

* Các đường cong quang thể (photovoltaic curves):

- Nằm ở góc 1/4 thứ tư của đặc tuyến $I_d(V_d)$.

- Thế hở mạch qua photodiode trên trục V_d :

$$V_0 = K_1 \ln(K_2 H_0)$$

K_1 : hằng số phụ thuộc nhiệt độ

K_2 : hằng số phụ thuộc bước sóng và cấu trúc của photodiode

H_0 : mật độ dòng quang tới

* Chế độ hoạt động ngắn mạch:

- dòng thay đổi tuyến tính theo mật độ dòng quang tới

- V_0 tỷ lệ với dòng qua trở feedback \rightarrow tỷ lệ với mật độ dòng quang

- có thể offset do dòng rò (rất nhỏ).

* Chế độ phân cực ngược: (mode quang dẫn)

- Điện dung diode giảm \rightarrow giảm thời gian đáp ứng

- Thế thiên áp V_B tiêu biểu $\approx 10V$

- Quan hệ dòng áp:

$$V_0 = V_B - V_D$$

hay $I_p R_L = V_B - V_D$

- Để tránh phá huỷ diode khi $I_p=0$, thế phân cực ngược phải $<$ thế đánh thủng

- Khi $V_d = 0 \rightarrow I_p = I_{\text{ngắn mạch}} = I_{\text{max}} = \frac{V_B}{R_L}$ gọi là dòng bão hoà I_{SAT}

*Đường tải Qua các điểm $(V_B, 0)$ và $(0, V_B/R_L)$ trên họ đặc tuyến ngược $I_d(V_d)$.

Ý nghĩa: khi mật độ dòng quang đến, ví dụ, $= H_2 \rightarrow$ dòng I_2 qua diode

-Để tăng khoảng dòng thì cần tăng V_B hoặc giảm R_L .

- Tích của áp và dòng đi qua diode cần luôn nhỏ hơn khả năng tiêu tán công suất của diode .

\rightarrow Đường tải nằm trong *đường công suất cực đại cho phép*.

- Công suất tiêu tán cực đại cho phép xảy ra khi mật độ dòng quang tạo ra dòng điện $= \frac{1}{2}$ dòng bão hoà, khi đó $V_d = \frac{1}{2} V_B$

4) Mô hình tín hiệu nhỏ cho photodiode:

* Nguồn dòng I_p : dòng trung bình gây bởi sóng tới.

$$I_p = RP$$

R: đáp ứng của photodiode (Ampere/Watt)

P: công suất sóng tới tổng cộng.

* Điện dung Shunt C: điện dung chuyển tiếp phân cực ngược

$$C = KA/[\rho(V_0 - V_D)]^{1/2}$$

K: hệ số tỷ lệ ≈ 19000 , khi đơn vị của các đại lượng khác như sau:

A: diện tích tích cực (cm^2),

ρ : điện trở suất ($\Omega.\text{cm}$), nhận giá trị từ 10-10000,

V_0 : thế khuếch tán của miền nghèo $\approx 0.6V$ với Si,

V_D : thế phân cực ngược, nhận giá trị âm.

* Trở Shunt: được chú ý khi tính toán nhiễu, còn gọi là trở kênh (channel resistance) nằm trong khoảng $100k\Omega \rightarrow$ vài $M\Omega$, giảm khi nhiệt độ hoặc diện tích linh kiện tăng, tăng khi thể phân cực tăng. Được định nghĩa = độ dốc của đường cong I_V tại thế zero hay = tỷ số của thế phân cực ngược qua diode / dòng tối.

* Dòng nhiễu I_n tính cho tất cả các hiệu ứng nhiễu.

+ Nhiều lượng tử (quantum noise): gây bởi quá trình hấp thụ photon, quan trọng khi mức công suất sóng tới thấp. Các photon đến có thể được hấp thụ hoặc không \rightarrow tại một thời điểm, dòng thu có thể $>$ hoặc $<$ dòng trung bình. Quá trình này là ngẫu nhiên và tạo ra dòng nhiễu lượng tử = công suất tín hiệu tạo bởi dòng trung bình được cho bởi:

$$P_m = (H_0 A)_m \approx (hc/\lambda)(\Delta f/\eta)$$

với P_m : công suất sóng tới khi $(S/N) = 1$,

Δf : độ rộng băng nhiễu

+ Shot noise (nhiều bắn): xem dòng là tổng của rất nhiều xung dòng nhỏ gây bởi chuyển động của hạt tải trong các bước rời rạc, làm cho dòng thay đổi quanh giá trị trung bình. Sự thay đổi này gọi là shot noise current.

$$I_s = [2e\Delta f(I_d + I_p)]^{1/2}$$

với I_d : dòng tối

I_p : dòng quang trung bình

+ Nhiều nhiệt: có thể chiếm ưu thế khi hoạt động ở mode ngắn mạch

$$I_t = (4kT\Delta f/R_{SH})^{1/2}$$

với R_{SH} : điện trở shunt của photodiodode

Trở tải R_L làm tăng nhiễu nhiệt:

$$I_t = [4kT\Delta f(1/R_{SH} + 1/R_L)]^{1/2}$$

* Dòng nhiễu tổng I_n :

$$I_n = (I_s^2 + I_t^2)^{1/2}$$

* Công suất nhiễu tương đương: (NEP)

$$NEP = I_n/R$$

Ví dụ: Tính phân bố nhiễu khi cho biết: H_0 , A , λ , R , R_L , Δf , R_{SH} , I_d .

* Trở nối tiếp (R_s): bao gồm trở của vật liệu và các tiếp xúc, đóng vai trò quan trọng với thời gian lên và tính tuyến tính, nhận giá trị từ $0,1 \Omega \rightarrow$ vài trăm Ohm

* Trường hợp $R_L + R_s \ll R_{SH}$ và $R_L > R_s$, (giả thiết $I_p \gg I_n$)

\rightarrow Sơ đồ tương đương tín hiệu nhỏ sẽ gọn hơn

\rightarrow Hằng số thời gian của hệ đầu thu:

$$\tau_{RC} \equiv (R_s + R_L)(C + C_p)$$

với C_p là các điện dung song song khác

* Đáp ứng của detector bắt đầu phi tuyến khi dòng $\approx 1/3$ dòng bão hoà

\rightarrow Dòng tuyến tính tối đa:

$$I_{\max} = I_{\text{sat}}/3 = (1/3)V_B/(R_s + R_L)$$

CHƯƠNG V

MỘT SỐ LINH KIỆN QUANG ĐIỆN TỬ THÔNG DỤNG

§5.1 RADIATING DIODES AND DISPLAY DEVICES

1) Radiating junction devices

- Khi có dòng thuận qua LED hoặc IRED, các photon được bức xạ từ diode junction do tái hợp điện tử và lỗ trống tại miền chuyển tiếp (junction).

- Bước sóng photon là hàm của chuyển mức năng lượng xảy ra trong quá trình tái hợp.

- Đa số linh kiện LED và IRED chế tạo từ các vật liệu trên cơ sở gallium.

Bảng LED materials and wavelengths

<u>Material</u>	<u>wavelength (nm)</u>	<u>Comments</u>
GaP (gallium phosphide)	520—570	Green
GaP (gallium phosphide)	630—790	Red
GaAsP (gallium arsenide phosphide)	640—700	Orange-red
GaAlAs (gallium aluminum arsenide)	650—700	Red
GaAs (gallium arsenide)	920—950	Infrared

- Các LED hoặc IRED tiêu biểu có lớp vật liệu N tương đối dày được phủ vàng ở mặt đáy. Mặt trên của linh kiện là lớp P rất mỏng (cỡ vài μm) cho phép các photon bức xạ ra ngoài. Lớp N có thể gồm một số lớp của các vật liệu chứa Ga được pha tạp khác nhau để cho bước sóng mong muốn.

- Các diode trên cơ sở Ga có thể thuận tương đối cao so với Si và Ge. Đặc trưng dòng thế của LED ít dốc hơn nhiều so với Si diode.

* Data sheets:

- Các đặc tả của LED (HLMP-3000):

+ Introductory comments: Red solid state lamps

+ Absolute maximum ratings (at $T_A = 25^\circ\text{C}$): power dissipation (100mW); DC forward current (50 mA, derating linearly from 50°C at $0.2 \text{ mA}/^\circ\text{C}$); Peak forward current (1Amp, 1μsec pulse width, 300pps: 1-A current is applied to the device for a 1-μs interval once every 3333 μs, hay tần số 300 Hz).

- Quan hệ giữa công suất đỉnh (peak power) của xung được phép (không phá hủy linh kiện) và công suất trung bình:

$$P_{\text{avg}} = P_{\text{peak}} \times (\text{pulse width} / \text{period})$$

Tốc độ được phép liên quan với hằng số thời gian nhiệt, là hàm của khối lượng, diện tích bề mặt, bức xạ và độ dẫn. Công thức trên áp dụng khi độ rộng xung công suất điện áp đặt nhỏ hơn nhiều so với hằng số thời gian nhiệt. Hằng số thời gian nhiệt thường không được cho trong data sheet, khi cần phải đo thực nghiệm. Đa số LED package có hằng số thời gian nhiệt nhỏ hơn 1 phút → tần số xung thường cần lớn hơn 1kHz.

- Cần chú ý bảng các đặc trưng điện: luminous intensity, wavelength at peak, speed of response: 10-90% time interval, diode capacitance (to develop the circuitry to turn device on and off, forward voltage, reverse breakdown voltage, thermal resistance (from the junction (chip) to cathode lead, included angle between the half luminous intensity points.

§5.2 TINH THỂ LỎNG VÀ ĐÈN ĐIỆN PHÁT QUANG

- Bộ hiển thị tinh thể lỏng là linh kiện tạo ra ảnh khả kiến nhờ điều khiển sự truyền sáng qua một quá trình phân cực. Các đèn điện phát quang thường được dùng như các nguồn ánh sáng đen cho ứng dụng hiển thị tinh thể lỏng.

- Trong các máy tính bỏ túi, thông tin alphanumeric từ calculator được hiển thị như các ký tự đen trên nền xám. Module hiển thị thực sự được làm từ một số các phần tử tinh thể lỏng riêng biệt (segment hay dot). Khi áp đặt tín hiệu điện thích hợp, các phần tử này có thể hiển thị màu đen hoặc xám.

- Vật liệu tinh thể lỏng là vật liệu hữu cơ mà ở nhiệt độ phòng có màu trắng đục và ở trạng thái lỏng ở nhiệt độ phòng. Ở nhiệt độ thấp trở thành trạng thái tinh thể rắn. Vật liệu tinh thể lỏng được kẹp giữa 2 tấm phẳng dẫn điện, một trong hai là trong suốt.

- Khi ánh sáng phân cực đi qua một phân tử được thiên áp với điện áp nhỏ hơn giá trị tới hạn V_c , dạng phân cực quay góc 90° . Khi điện áp lớn hơn giá trị bão hòa V_{sat} , ánh sáng phân cực sẽ truyền qua mà không thay đổi dạng phân cực. Trong khoảng điện áp giữa V_c và V_{sat} , phân cực ánh sáng sẽ quay một góc từ $0-90^\circ$. Có 2 kỹ thuật cho phép dùng hiện tượng này để hiển thị: dùng nguồn sáng khuếch tán ở phía sau phân tử hiển thị và dùng gương, kết hợp với 2 bộ phân cực. Khi điện áp phân cực nhỏ hơn V_c , sẽ thấy một đốm sáng. Khi điện áp phân cực lớn hơn V_{sat} , sẽ thấy một đốm tối. Độ truyền qua của ánh sáng sẽ là hàm của điện áp thiên áp.

- V_c và V_{sat} đều phụ thuộc nhiệt độ. V_{sat} có thể nhỏ cỡ 3V và thường không vượt quá 20V. Tần số tín hiệu thiên áp có thể vài kHz, nhưng thường cỡ 30, 60 hay 100Hz. Biên độ điện áp một chiều trong thiên áp không được vượt quá vài mV.

- Để phân tích mạch, tinh thể lỏng có thể được mô hình hóa như một điện dung nhỏ // với một điện trở lớn. Thành phần dòng điện dung gấp cỡ 50 lần thành phần dòng điện trở. Mạch thiên áp cần được thiết kế để chịu tải điện dung.

- Diện tích của mỗi phân tử xác định giá trị trở và điện dung. Giá trị trở giảm và điện dung tăng khi diện tích tăng. Giá trị điện trở sheet và điện dung sheet tiêu biểu: 3400 pF/in^2 , $44\text{M}\Omega.\text{in}^2$.

Ví dụ: tính dòng cung cấp cho phân tử hiển thị tinh thể lỏng biết diện tích = 0.032 in^2 , điện áp = $5 V_{rms}$, tần số = 60 Hz.

- Thường dùng 7 segment cho 1 ký tự, và ít nhất 4 ký tự \rightarrow 28 segments.

* **Quá trình phân cực**: Phân cực của bức xạ gây bởi tương tác của bức xạ với các phân tử. Nếu vector phân cực của phân tử và vector cường độ trường nằm trong cùng một mặt phẳng thì vector cường độ trường của bức xạ sẽ có xu hướng định hướng theo các phân tử. Nếu vector phân cực của phân tử // với vector vận tốc của bức xạ thì sẽ không có tương tác.

- Khi thế phân cực = 0, vector phân cực của các phân tử sẽ quay từ từ 1 góc 90° giữa 2 bản cực \rightarrow gây ra sự quay của vector trường của bức xạ.
 - Khi $V > V_c$, vector phân cực của các phân tử sẽ định hướng theo điện trường áp đặt.
 - Khi $V > V_{sat}$, vector phân cực của các phân tử sẽ định hướng đồng loạt theo điện trường áp đặt \rightarrow không có tương tác xảy ra.
 - Các đèn điện phát quang được dùng ở dạng phẳng, nhiệt độ làm việc thấp, bức xạ khuếch tán. Một số tính năng quan trọng:
 - + Kích thước: chiều dày một vài phần mười in, nhiều dạng chữ nhật và tròn, tiện dùng cho việc hiển thị.
 - + Nhiệt độ làm việc: gần nhiệt độ môi trường
 - + Tính đồng nhất của độ sáng: nguồn sáng khuếch tán đồng nhất, gần như đèn Lambert lý tưởng.
 - Các linh kiện này chứa lớp phosphor dielectric kẹp giữa 2 bản điện cực, một trong 2 bản là polymer trong suốt, bản còn lại mờ đục và được phủ màng kim loại mỏng. Lớp điện môi phosphor gồm các hạt phosphor rất mịn, nhúng trong vật liệu liên kết trong suốt và được cách ly với nhau.
 - Khi áp đặt dòng xoay chiều qua linh kiện, vật liệu phosphor bị kích thích bởi điện trường và gây bức xạ. Với mạch ngoài, đèn điện phát quang tương đương một tải gồm tụ // trở \rightarrow dòng tăng theo tần số. Các đèn thương mại hoạt động ở 115 V ac 60 Hz và 11 V ac 400 Hz và sáng gấp 3 lần ở 400 Hz so với ở 60 Hz. Bức xạ giảm rất nhanh theo điện áp và gần như bằng không ở khoảng 40-60 V ac.
-

§5.3 PHOTOTRANSISTORS VÀ OPTO-ISOLATORS

1) Phototransistors.

- Là transistor có dòng base gây bởi bức xạ tới và do đó dòng C-E cũng phụ thuộc bức xạ tới. Chuyển tiếp C-B hoạt động như photodiode và chuyển các photon thành các hạt tải, tạo ra dòng base gây bởi photon, I_p . Dòng này gây ra dòng collector:

$$I_C = H_{FE} \times I_p$$

- Đôi khi tiếp xúc điện được lấy ra từ miền base, khi đó có thêm thành phần dòng I_B :

$$I_C = H_{FE} (I_B + I_p)$$

- Phototransistor có thể được dùng như một bộ khuếch đại tuyến tính, nhưng thường dùng như một chuyển mạch. Tốc độ chuyển mạch thường $10\mu s$ hoặc hơn \rightarrow dùng làm detector trong các hệ thống chậm.

- Có một số cấu hình linh kiện:

+ Single phototransistor per package với simple lens ở window

+ Photo-Darlington (gồm 1 phototransistor và một transistor thông thường)

+ Photon-coupled isolator, chứa IRED và một detector như phototransistor, photo-Darlington hoặc photodiode.

- So với photodiode, phototransistor có độ lợi dòng H_{FE} lớn. Dòng C-E lớn hơn so với planar diffused photodiode với cùng diện tích tích cực. Phototransistor và APD đều sử dụng quá trình nhân số hạt tải phát sinh do photon \rightarrow tăng dòng.

2) Đặc tả của Phototransistor.

- Data sheet điển hình sẽ cho biết điều kiện làm việc tối đa: áp, dòng, mức công suất, và nhiệt độ phá hỏng linh kiện.

- Voltage rating: có một số chỉ số đặc biệt, ví dụ $V_{(BR)CEO}$ với BR chỉ reverse breakdown voltages

Rating

V_{CEO}

meaning

Điện áp E-C với cực base open hoặc base-emitter junction bị che tối.

V_{CBO} Điện áp base-collector với cực E open

V_{EBO} Điện áp base-emitter khi cực C open, ở thiên áp ngược

- Các đặc trưng quang trong data sheet gồm đáp ứng dòng của phototransistor: dòng collector I_L khi đáp ứng với một mật độ dòng bức xạ đến, và dòng tối. Nguồn dòng quang là một đèn có nhiệt độ màu gần 2870 K, đôi khi là đèn đơn sắc hoặc LED hoặc IRED.

- Đáp ứng dòng thường không tuyến tính \rightarrow cần được đặc tả bởi đường cong đáp ứng.

- Đáp ứng phổ và đáp ứng góc cũng có trong data sheet. Đáp ứng phổ của phototransistor gần tương tự với photodiode của cùng loại vật liệu.

2) Optoisolator

- Các linh kiện được mounted trong một case cho phép dễ dàng kết nối với mạch in. Thường có 2 transistor mounted trong case và nối với nhau theo kiểu Darlington sao cho chuyên tiếp base-emitter của transistor đầu tiên (là phototransistor) nhận bức xạ và emitter của nó được đưa vào base của transistor thứ hai \rightarrow gain dòng collector lớn, tuy nhiên, đáp ứng chậm hơn khi dùng 1 transistor.

- Thay cho một cặp Darlington, một opto-isolator có thể có một phototransistor hoặc một photodiode làm nhiệm vụ phần tử detector. Nguồn thường là GaAs IRED. Một xung điện áp áp đặt qua IRED gây ra xung photon để ghép với detector \rightarrow thường ứng dụng trong y sinh và điều khiển công nghiệp

- Đặc trưng cách li của linh kiện thường biểu thị theo 3 cách: điện trở, điện dung và thể đánh thủng, được đo giữa IRED và detector.

- Tùy theo cách nhìn nhận mà linh kiện có thể được coi là mạch ghép tín hiệu quang hoặc mạch cách li điện.

- Vấn đề nhiệt: opto-isolator có chứa 2 nguồn nhiệt: IRED và detector \rightarrow ngoài sự tự nung nhiệt đơn giản do tổn hao công suất riêng lẻ, chúng còn làm nóng lẫn nhau. Nhiệt năng sẽ truyền từ bán dẫn nóng hơn sang bán dẫn nguội hơn. Người thiết kế cần giữ cả 2 bán dẫn dưới nhiệt độ cho phép theo phương trình sau:

$$\Delta T = \theta(P_H + KP_C)$$

với ΔT : chênh lệch nhiệt độ giữa môi trường và nhiệt độ hoạt động cực đại cho phép

θ : Trở nhiệt giữa junction-to-ambient

P_H : công suất tổn hao lớn nhất, bán dẫn nóng nhất

K : hệ số ghép nhiệt

P_C : công suất tổn hao của bán dẫn nguội hơn

- Thường 2 linh kiện không tổn hao công suất giống nhau \rightarrow cần biết trước bán dẫn nào nóng hơn.

- Phương pháp đánh giá tổn hao trung bình cho IRED:

+ Khi dòng, áp không đổi: $P = I_d V_d$

+ Chế độ xung: lấy trung bình $P = V_{CE} I_c$ khi biết độ rộng xung và tần số làm việc.

CHƯƠNG VI

CẤP QUANG

§ 6.1 TRUYỀN SÓNG TRONG CẤP SỢI QUANG

- Năng lượng điện từ bị “nhốt” trong lõi sợi quang nhờ cơ chế phản xạ và khúc xạ
- Khi năng lượng có thể lan truyền theo nhiều đường khác nhau trong sợi quang thì sợi quang được gọi là sợi đa mode

- Nếu chỉ có một đường truyền năng lượng khả dĩ (dọc theo trục giữa), sợi quang gọi là sợi đơn mode.

- Lõi sợi quang thường có dạng ống tiết diện tròn; chiết suất lõi $n_1 >$ chiết suất lớp bảo vệ n_2

- Lan truyền đa mode có thể đượ mô hình hoá nhờ hiện tượng phản xạ nội toàn phần, khi góc tới của tia tới làm với pháp tuyến của mặt phân cách lõi/lớp bảo vệ 1 góc \geq góc tới hạn θ_c (các tia không phản xạ toàn phần sẽ mất dần năng lượng và suy giảm nhanh)

$$\sin\theta_c = n_2/n_1$$

- Nguồn năng lượng đưa vào sợi quang từ môi trường ngoài có chiết suất n_0

- Góc vào của một tia sẽ xác định góc tới của nó với mặt phân cách lõi/ vỏ của cáp sợi quang. Góc vào tương ứng với góc tới hạn θ_c được gọi là góc được phép (acceptance angle)

$$n_0 \sin\theta_a = n_1 \sin(90^\circ - \theta_c)$$

hay

$$\begin{aligned} \sin\theta_a &= (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}/n_0 \\ &= (n_1^2 - n_2^2)^{1/2} \text{ khi môi trường vào là không khí.} \end{aligned}$$

với $\theta_a < 20^\circ$ có thể tính gần đúng:

$$\theta_a \approx (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}$$

$$\theta_c = \pi/2 - \theta_a/n_1$$

* Góc lan truyền cực đại θ_p :

Là góc lớn nhất trong sợi quang, so với trục giữa, vẫn gây ra phản xạ toàn phần

$$\theta_p = 90^\circ - \theta_c$$

$$\theta_p \approx (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}/n_1$$

* Khẩu độ số (numerical aperture- NA) $\equiv \sin\theta_a$

Với cáp quang dùng trong thông tin quang, θ_a nhỏ $\rightarrow NA \approx \theta_a$ (rad)

* Có 3 loại sợi quang cơ bản :

+ Sợi chiết suất bước (step-index fiber): thay đổi đột biến chiết suất lõi và vỏ.

+ Sợi chiết suất thay đổi từ từ (graded-index fiber)

$$n(r) = n_0[1 - (n_1^2 - n_2^2)/n_0^2(r/r_0)^2]^{1/2}, \text{ với } 0 < r < r_0$$

Chiết suất giảm dần từ tâm ra biên phân cách với vỏ (n_2)

+ Step- index- multimode fiber:

- đường kính lõi 50 \rightarrow 1000 μm

- $0.2 \leq NA \leq 0.5$

- đường kính ngoài từ 125 ÷ 1100 μm

+ Graded - index - multimode fiber :

- đường kính lõi 50 ÷ 100 μm

- $0.2 \leq NA \leq 0.3$

- đường kính ngoài từ 125 ÷ 150 μm

\rightarrow thông tin khoảng cách xa

+ Single mode fiber:

- đường kính lõi: 4 ÷ 10 μm

- $0.1 \leq NA \leq 0.15$

- đường kính ngoài từ 75 ÷ 125 μm

\rightarrow long-distance communication

- Các xung công suất được tải dọc theo các đường khác nhau sẽ tới đầu cuối tại những thời điểm khác nhau (mode trực tới trước tiên, mode ứng với góc NA đến sau cùng) \rightarrow trễ mode .

- Do trễ mode, xung dòng tổng thu được sẽ rộng hơn xung bức xạ gốc.

\rightarrow quá trình mở rộng xung này gọi là méo mode (modal distortion).

\rightarrow Graded - index fiber có méo mode nhỏ hơn so với step-mode fiber.

- Biên độ xung truyền qua cáp bị suy giảm do hấp thụ, tán xạ và bức xạ.

- Cơ chế tổn hao hấp thụ: chuyển đổi năng lượng bức xạ thành nhiệt năng, phụ thuộc vật liệu và tạp chất.

- Cơ chế tổn hao tán xạ: các tia năng lượng bị lệch khỏi đường truyền mong muốn, do phản xạ từ defect và tán xạ Rayleigh bởi vật liệu. Tán xạ Rayleigh do tương tác sóng điện từ bức xạ với các điện tử của vật liệu, các điện tử này sẽ hấp thụ và tái bức xạ sóng → gây ra dời pha so với tín hiệu gốc. Một phần năng lượng bị thoát ra ngoài do bức xạ tán xạ, tổn hao tán xạ $\sim \lambda^{-4}$.

- Tổn hao bức xạ: năng lượng thoát ra khỏi sợi quang khi vi phạm góc tới hạn do cáp bị bẻ cong quá nhiều, do thay đổi đường kính lõi và thay đổi chiết suất.

§ 6.2 CÁC ĐẶC TRƯNG VÀ CÁC THÔNG SỐ CƠ BẢN

1) Các thông số cơ bản:

* Khoảng cách giữa các góc được phép (hay góc tách được phép):

$$\Delta\theta = \lambda / d = \lambda_0 / n_1 d \quad (\text{rad})$$

với d : đường kính sợi quang

n_1 : chiết suất lõi sợi quang

λ_0 : bước sóng trong không gian tự do

* Số mode có thể tồn tại trong sợi quang phụ thuộc $\Delta\theta$ và góc tới lan truyền, với cáp tròn:

$$n = (\pi T)^2 / 2$$

với $T = \theta_p / \Delta\theta$

θ_p : góc lan truyền cực đại

n : số mode khi $\pi T > 2.405$

* Thông số V (hay tần số chuẩn hoá), khi $\pi T < 2,405$:

$$V = \pi T = \pi 2r[(n_1^2 - n_2^2)^{1/2}] / \lambda_0$$

với r : bán kính lõi sợi quang

n_2 : chiết suất vỏ

2) Méo mode và tán sắc

Gọi t_0 : trễ trực với khoảng cách L
 t_m : trễ dọc theo đường truyền ứng với θ_p

$$\rightarrow t_0 = n_1 L / c$$

$$t_m = n_1 L / c \cdot \cos \theta_p$$

$$\Delta t = t_m - t_0 = (Ln_1/c)(n_1 - n_2)/n_2$$

* Hiện tượng tán sắc xảy ra khi nguồn bức xạ nhiều bước sóng trong một khoảng $\Delta\lambda$, khi đó xung tín hiệu sẽ bị mở rộng 1 lượng:

$$t = K_{(\lambda)} \cdot \Delta\lambda \cdot L$$

với $K_{(\lambda)}$: hệ số tán sắc, phụ thuộc vật liệu và bước sóng.

L: chiều dài cáp sợi quang

3) Công suất thu

-Công suất bức xạ sẽ ra khỏi ống dẫn sóng theo 1 hình nón tương tự như qua lỗ hẹp .

-Khi khoảng cách giữa đầu thu và miệng sợi quang giảm, kích thước vật chiếu từ miệng sẽ đạt tới đường kính lõi sợi quang. Nếu diện tích đầu thu nhỏ hơn diện tích vật chiếu, thì tỷ số dòng bức xạ thu được /dòng rời khỏi sợi quang = tỷ số diện tích:

$$\theta_e / \theta_0 = (D_d / D_c)^2 (NA_{det} / NA_{fiber})^2$$

với NA_{det} : khẩu độ số đầu thu

NA_{fiber} : khẩu độ số sợi quang

θ_e : dòng bức xạ đến đầu thu

θ_0 : dòng bức xạ rời khỏi miệng sợi quang

D_d : đường kính miệng đầu thu

D_c : đường kính lõi sợi quang

4) Độ rộng băng:

$$BW = 0.35 / T$$

với $T = (t_1^2 - t_2^2)^{1/2}$

T: hệ số mở rộng xung

t_2 : độ rộng xung đầu ra sợi quang

t_1 : độ rộng xung đầu vào sợi quang

§ 6.3 COMMUNICATIONS LINKS

1) Thiết bị

Một tuyến thông tin quang bao gồm một nguồn, một đầu thu và cáp quang kết nối tuyến. Nguồn có thể là LED, IRED hoặc laser diode. Nguồn có thể được điều chế với tín hiệu tương tự, nhưng thường được kích bởi các xung số.

Detector thường dùng PIN hoặc APD. Tuyến thông tin có thể xem là thông tin khoảng cách ngắn, trung bình hoặc xa. Thông tin khoảng cách ngắn thường trong phạm vi vài m và dùng cho:

- Thiết bị điều khiển quá trình và thiết bị công nghiệp
- Cảm biến y tế, đưa vào cơ thể bệnh nhân và nối với thiết bị ghi
- Máy tính và thiết bị ngoại vi
- Các cấu phần có độ chính xác cao cho mục đích quảng cáo

Hệ thống khoảng cách trung bình thường lớn hơn vài m và dưới 1 km, còn gọi là mạng LAN, thường dùng sợi thủy tinh đa mode (băng rộng và tổn hao thấp) hoặc plastic đa mode. Nguồn điển hình là IRED hoạt động ở bước sóng 850 nm. Khẩu độ số thường từ $0.2 \div 0.5$ và đường kính lõi $50 \div 100 \mu\text{m}$ để tiện cho việc ghép với bức xạ từ IRED. Đường kính lõi lớn hơn sẽ giảm chi phí lắp đặt, kết nối, nhưng độ rộng băng giảm.

Hệ thống khoảng cách xa dễ thiết kế hơn do yêu cầu hạn chế sự lựa chọn cấu phần. Hệ thống khoảng cách xa dùng để tải dữ liệu băng rộng và có thể dùng sợi chiết suất graded. Ở khoảng cách rất xa thì chỉ dùng sợi đơn mode để bảo đảm độ rộng băng và mức tổn hao cho phép. Có thể dùng nguồn communication-grade laser diode hoặc edge-emitting IRED để ghép năng lượng vào các sợi quang này.

Kỹ thuật hàn cáp sợi quang thường được dùng hơn so với các bộ đầu nối cơ để bao đảm tổn hao thấp và độ ổn định cao.

2) Các cấu trúc ống dẫn sóng và các linh kiện khác

Integrated optics là các ống dẫn sóng và các cấu phần quang được tích hợp trên các đế vật liệu dùng kỹ thuật tương tự mạch tích hợp bán dẫn. Các linh kiện tích hợp

quang thường là các bộ tách tín hiệu, các bộ dời pha, các bộ điều chế và các bộ chuyển mạch. Tất cả các linh kiện tích hợp quang đều dùng các cấu trúc ống dẫn sóng được tạo bởi các đường dẫn của vật liệu có chiết suất lớn hơn chiết suất của vật liệu đế. Các ống dẫn sóng hoạt động tương tự cáp sợi quang và được xem xét như các bộ tách hoặc ghép tín hiệu.

Bằng cách điều khiển tiết diện ống dẫn sóng, chiết suất của vật liệu, khoảng cách giữa các lõi và chiều dài của miền ghép, sẽ thiết lập được tỷ phần ghép năng lượng.

Các thông số của bộ ghép quang:

<u>Thông số</u>	<u>Bộ ghép 4 cổng</u>	<u>Bộ ghép N-part</u>
Tỷ số ghép	$P_2 / (P_2 + P_3)$	P_N / P_o
Tổn hao dư thừa	$P_2 + P_3 / P_1$	P_o / P_i
Tổn hao chèn	P_2 / P_1	P_N / P_i
Độ đồng nhất	P_2 / P_3	P_h / P_s
Độ định hướng	P_4 / P_1	P_x / P_i

Trong đó: P_N : công suất ra khỏi cổng N bất kỳ

P_i : công suất vào tổng

P_o : công suất ra tổng

P_h : công suất ra lớn nhất

P_s : công suất ra nhỏ nhất

P_x : công suất ra cổng không ghép

Quá trình ghép dùng mạng 4 cổng có thể kết hợp với hiệu ứng quang điện (electro-optic effect) để tạo ra các chuyển mạch quang. Các vật liệu có hiệu ứng quang điện sẽ thay đổi chiết suất khúc xạ khi có mặt điện trường do áp đặt điện áp. Sự kết hợp của điện áp thiên áp và điện áp chuyển mạch sẽ xác định đầu ra truyền bức xạ.

Các vật liệu tinh thể (chẳng hạn GaAs) có hiệu ứng quang điện. Vật liệu đế: LiNbO có hiệu ứng quang điện rất mạnh. Thế chuyển mạch cỡ 5—10V. Hệ số định hướng cỡ 100:1 đến 3000:1.

Chiết suất của vật liệu ảnh hưởng đến vận tốc truyền sóng \rightarrow thay đổi chiết suất có thể thay đổi pha tương đối. Các bộ di pha và điều chế pha cấu tạo từ một ống dẫn sóng đặt trong tinh thể quang điện, giữa 2 điện cực. Lượng di pha phụ thuộc độ lớn điện áp và chiều dài ống dẫn sóng.



HỌC VIỆN CÔNG NGHỆ BƯU CHÍNH VIỄN THÔNG



BÀI GIẢNG MÔN

**CẤU KIỆN ĐIỆN TỬ &
QUANG ĐIỆN TỬ**

Giảng viên:

ThS. Trần Thục Linh

Điện thoại/E-mail:

0914932955/thuclinh_dt@yahoo.com

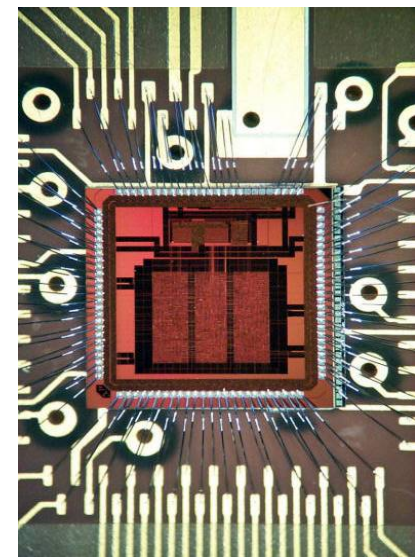
Bộ môn:

Kỹ thuật điện tử - Khoa Kỹ thuật điện tử 1

Học kỳ/Năm biên soạn: 2/2009

Nội dung môn học

- ❖ Chương 1- Giới thiệu chung
- ❖ Chương 2- Cấu kiện thụ động
- ❖ Chương 3- Vật lý bán dẫn
- ❖ Chương 4- Diode (Điốt)
- ❖ Chương 5- BJT (Transistor lưỡng cực)
- ❖ Chương 6- FET (Transistor hiệu ứng trường)
- ❖ Chương 7- Thyristors: SCR – Triac – Diac - UJT
- ❖ Chương 8- Cấu kiện quang điện tử



Tài liệu học tập

❖ Tài liệu chính:

- *Slide bài giảng*
- *Bài giảng Cấu kiện điện tử và quang điện tử, Đỗ Mạnh Hà, Học viện CNBCVT, 2009-2010*

❖ Tài liệu tham khảo:

- ***Electronic Devices and Circuit Theory***, Ninth edition, Robert Boylestad, Louis Nashelsky, Prentice - Hall International, Inc, 2006.
- *Linh kiện bán dẫn và vi mạch*, Hồ Văn Sung, NXB GD, 2005
- *Giáo trình Cấu kiện điện tử và quang điện tử*, Trần Thị Cẩm, Học viện CNBCVT, 2002

Yêu cầu môn học

- ❖ Sinh viên phải đọc trước các **slide bài giảng** trước khi lên lớp
- ❖ Tích cực trả lời và đặt câu hỏi trên lớp hoặc qua email của GV
- ❖ Làm bài tập thường xuyên, nộp vở bài tập bất cứ khi nào Giảng viên yêu cầu
- ❖ Tự thực hành theo yêu cầu với các phần mềm EDA

❖ Điểm môn học:

- Chuyên cần : 10 %
- Kiểm tra giữa kỳ: 10 %
- Thí nghiệm : 10 %
- Thi kết thúc : 70 %

Kiểm tra :

- Câu hỏi ngắn
- Bài tập

Thi kết thúc:

- Lý thuyết: + Trắc nghiệm
+ Câu hỏi ngắn
- Bài tập

Chương 1- Giới thiệu chung

1. Giới thiệu chung về cấu kiện điện tử
2. Phân loại cấu kiện điện tử
3. Giới thiệu về vật liệu điện tử
4. Giới thiệu các phần mềm EDA hỗ trợ môn học

1. Giới thiệu chung về Cấu kiện điện tử

- ❖ Cấu kiện điện tử là các phần tử linh kiện rời rạc, mạch tích hợp (IC) ... tạo nên mạch điện tử, hệ thống điện tử
- ❖ Cấu kiện ĐT ứng dụng trong nhiều lĩnh vực. Nổi bật nhất là ứng dụng trong lĩnh vực điện tử - viễn thông, CNTT
- ❖ Cấu kiện ĐT rất phong phú, nhiều chủng loại đa dạng
- ❖ Công nghệ chế tạo linh kiện điện tử phát triển mạnh mẽ, tạo ra những vi mạch có mật độ rất lớn (Vi xử lý Pentium 4: > 40 triệu Transistor,...)
- ❖ Xu thế các cấu kiện điện tử có mật độ tích hợp ngày càng cao, tính năng mạnh, tốc độ lớn...

Vi mạch và ứng dụng

❖ Processors

- CPU, DSP, Controllers

❖ Memory chips

- RAM, ROM, EEPROM

❖ Analog

- Thông tin di động, xử lý audio/video

❖ Programmable

- PLA, FPGA

❖ Embedded systems

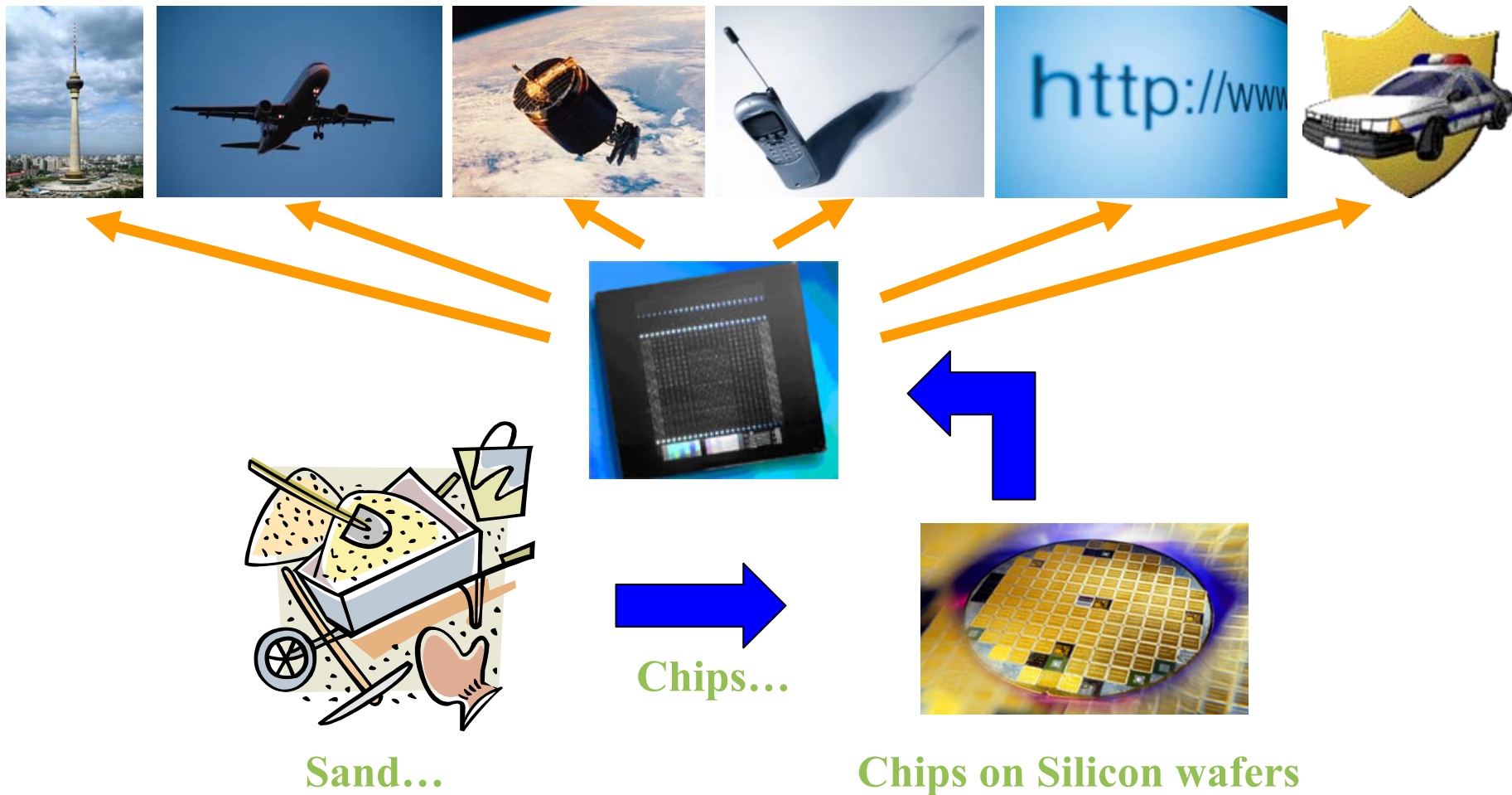
- Thiết bị ô tô, nhà máy
- Network cards

❖ System-on-chip (SoC)



Ảnh: amazon.com

Ứng dụng của linh kiện điện tử



Sand...

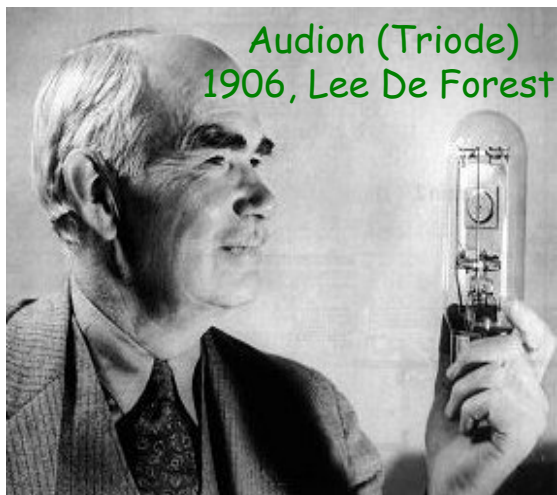
Chips...

Chips on Silicon wafers

Lịch sử phát triển công nghệ (1)

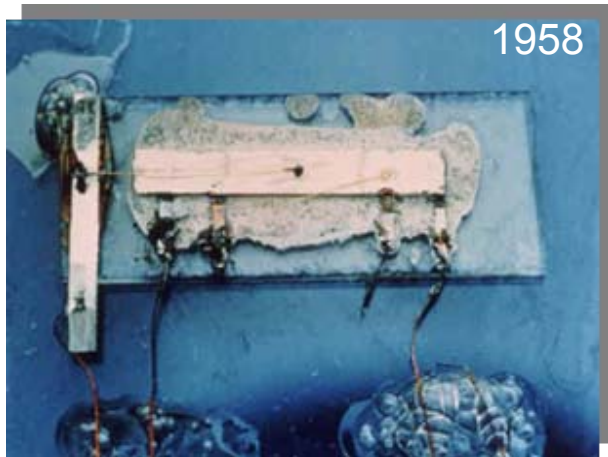
- ❖ Các cấu kiện bán dẫn như diodes, transistors và mạch tích hợp (ICs) có thể tìm thấy khắp nơi trong cuộc sống (Walkman, TV, ô tô, máy giặt, máy điều hoà, máy tính,...). Những thiết bị này có chất lượng ngày càng cao với giá thành rẻ hơn
- ❖ PCs minh hoạ rất rõ xu hướng này
- ❖ Nhân tố chính đem lại sự phát triển thành công của nền công nghiệp máy tính là việc thông qua các kỹ thuật và kỹ năng công nghiệp tiên tiến người ta chế tạo được các transistor với kích thước ngày càng nhỏ → giảm giá thành và công suất
- ❖ Bài học khám phá các đặc tính bên trong của thiết bị bán dẫn → SV hiểu được mối quan hệ giữa cấu tạo hình học và các tham số của vật liệu; hiểu được các đặc tính về điện của chúng

Lịch sử phát triển công nghệ (2)



- ❖ 1883 Thomas Alva Edison (“*Edison Effect*”)
- ❖ 1904 John Ambrose Fleming (“*Fleming Diode*”)
- ❖ 1906 Lee de Forest (“*Triode*”)
Vacuum tube devices continued to evolve
- ❖ 1940 Russel Ohl (*PN junction*)
- ❖ 1947 Bardeen and Brattain (*Transistor*)
- ❖ 1952 Geoffrey W. A. Dummer (*IC concept*)
- ❖ 1954 First commercial silicon transistor
- ❖ 1955 First field effect transistor - *FET*

Lịch sử phát triển công nghệ (3)



First integrated circuit
(germanium), 1958
Jack S. Kilby, Texas
Instruments

Contained five components,
three types:
Transistors, resistors and
capacitors

- ❖ 1958 Jack Kilby (**Integrated circuit**)
- ❖ 1959 Planar technology invented
- ❖ 1960 First MOSFET fabricated
 - At Bell Labs by Kahng
- ❖ 1961 First commercial ICs
 - Fairchild and Texas Instruments
- ❖ 1962 TTL invented
- ❖ 1963 First PMOS IC produced by RCA
- ❖ 1963 CMOS invented
 - Frank Wanlass at Fairchild Semiconductor
 - U. S. patent # 3,356,858

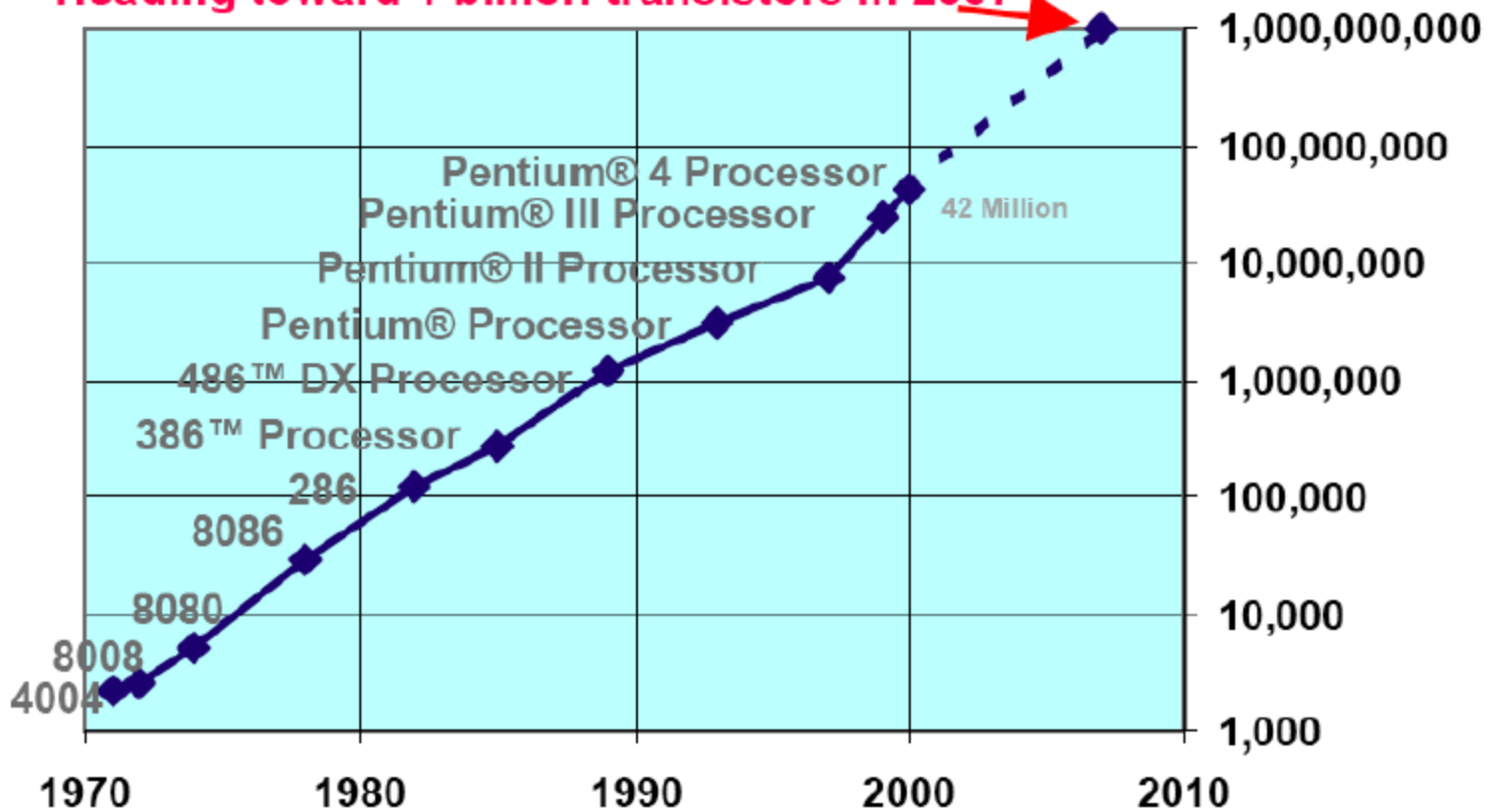
Đặc điểm phát triển của mạch tích hợp (IC)

- ❖ Tỷ lệ giá thành/tính năng của IC giảm 25% –30% mỗi năm.
- ❖ Số chức năng, tốc độ, hiệu suất cho mỗi IC tăng:
 - Kích thước wafer hợp tăng
 - Mật độ tích hợp tăng nhanh

Định luật MOORE

The # of transistors doubles every 18 months

Heading toward 1 billion transistors in 2007



2. Phân loại cấu kiện điện tử

2.1 Phân loại dựa trên đặc tính vật lý

2.2 Phân loại dựa trên chức năng xử lý tín hiệu

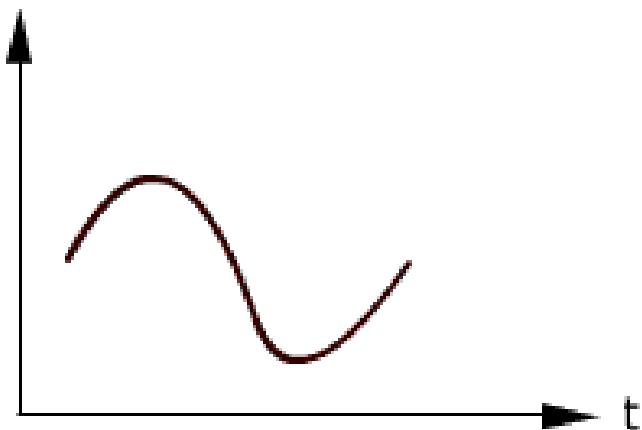
2.3 Phân loại theo ứng dụng

2.1 Phân loại dựa trên đặc tính vật lý

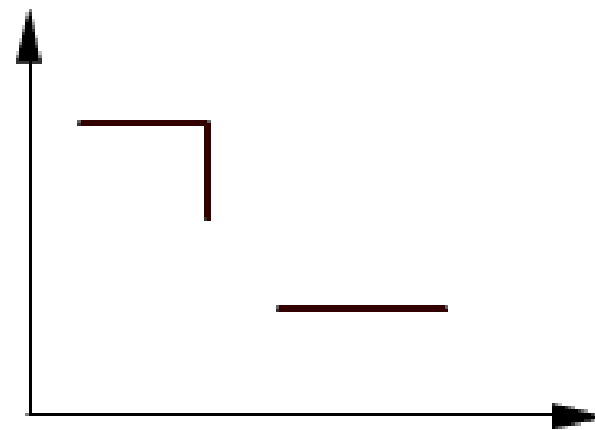
- ❖ **Linh kiện hoạt động trên nguyên lý điện tử và hiệu ứng bề mặt:** điện trở bán dẫn, DIOT, BJT, JFET, MOSFET, điện dung MOS... IC từ mật độ thấp đến mật độ siêu cỡ lớn UVLSI
- ❖ **Linh kiện hoạt động trên nguyên lý quang điện:** quang trở, Photodiode, PIN, APD, CCD, họ linh kiện phát quang LED, LASER, họ linh kiện chuyển hoá năng lượng quang điện như pin mặt trời, họ linh kiện hiển thị, IC quang điện tử
- ❖ **Linh kiện hoạt động dựa trên nguyên lý cảm biến:** họ sensor nhiệt, điện, từ, hoá học; họ sensor cơ, áp suất, quang bức xạ, sinh học và các chủng loại IC thông minh dựa trên cơ sở tổ hợp công nghệ IC truyền thống và công nghệ chế tạo sensor
- ❖ **Linh kiện hoạt động dựa trên hiệu ứng lượng tử và hiệu ứng mới:** các linh kiện được chế tạo bằng công nghệ nano có cấu trúc siêu nhỏ: Bộ nhớ một điện tử, Transistor một điện tử, giếng và dây lượng tử, linh kiện xuyên hầm một điện tử, ...

2.2 Phân loại dựa trên chức năng xử lý tín hiệu

Cấu kiện điện tử
tương tự (Analog)



Cấu kiện điện tử số
(Digital)



2.3 Phân loại theo ứng dụng

- ❖ Linh kiện thụ động: R,L,C...
- ❖ Linh kiện tích cực: DIOT, BJT, JFET, MOSFET...
- ❖ Vi mạch tích hợp IC: IC tương tự, IC số, Vi xử lý...
- ❖ Linh kiện chỉnh lưu có điều khiển
- ❖ Linh kiện quang điện tử: Linh kiện thu quang, phát quang

3. Giới thiệu về vật liệu điện tử

3.1. Chất cách điện

3.2. Chất dẫn điện

3.3. Vật liệu từ

3.4. Chất bán dẫn (Chương 3)

Cơ sở vật lý của vật liệu điện tử

- ❖ Lý thuyết vật lý chất rắn
- ❖ Lý thuyết vật lý cơ học lượng tử
- ❖ Lý thuyết dải năng lượng của chất rắn
- ❖ Lý thuyết vật lý bán dẫn

Lý thuyết vật lý chất rắn

- ❖ Vật liệu để chế tạo phần lớn các linh kiện điện tử là loại vật liệu tinh thể rắn
- ❖ **Cấu trúc đơn tinh thể:** trong tinh thể rắn nguyên tử được sắp xếp theo một trật tự nhất định, chỉ cần biết vị trí và một vài đặc tính của một số ít nguyên tử ta có thể đoán vị trí và bản chất hóa học của tất cả các nguyên tử trong mẫu
- ❖ Ở một số vật liệu người ta nhận thấy rằng các sắp xếp chính xác của các nguyên tử chỉ tồn tại chính xác tại cỡ **vài nghìn nguyên tử**. Những miền có trật tự như vậy được ngăn cách bởi bờ biên và dọc theo bờ biên này không có trật tự - **cấu trúc đa tinh thể**
- ❖ Tính chất tuần hoàn của tinh thể có ảnh hưởng quyết định đến các tính chất điện của vật liệu

Lý thuyết vật lý cơ học lượng tử

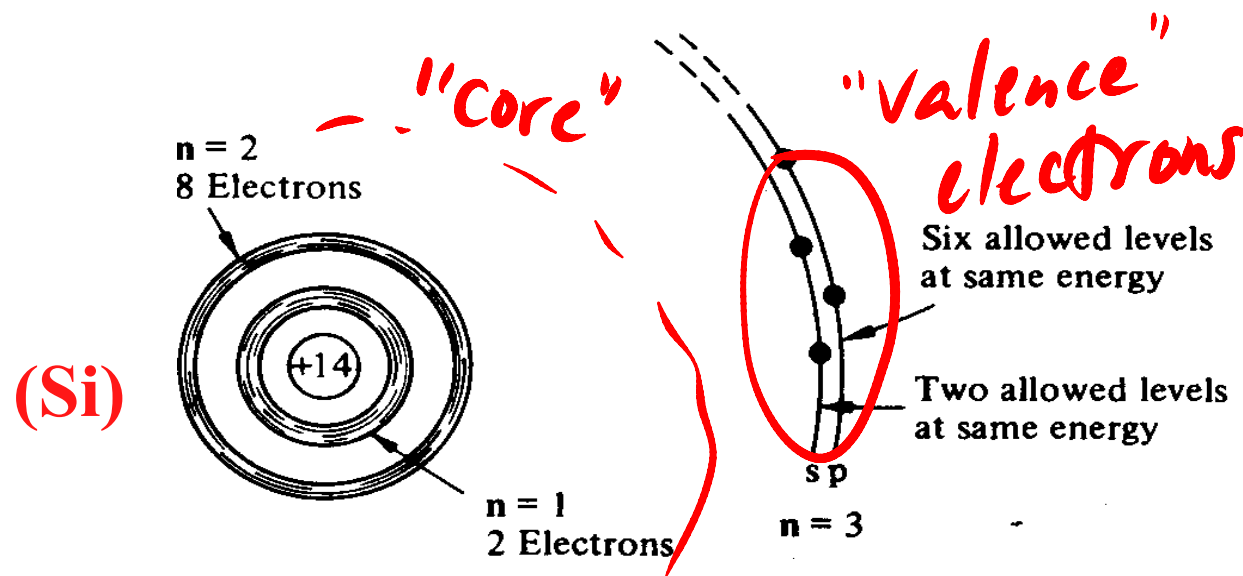
- ❖ Trong cấu trúc nguyên tử, điện tử chỉ có thể nằm trên các mức năng lượng gián đoạn nhất định nào đó - các mức năng lượng nguyên tử
- ❖ Nguyên lý Pauli: mỗi điện tử phải nằm trên một mức năng lượng khác nhau
- ❖ Một mức năng lượng được đặc trưng bởi một bộ 4 số lượng tử:
 - n – số lượng tử chính: 1, 2, 3, 4....
 - l – số lượng tử quỹ đạo: 0, 1, 2, (n-1) {s, p, d, f, g, h...}
 - m_l – số lượng tử từ: 0, ± 1 , ± 2 , ± 3 ..., $\pm l$
 - m_s – số lượng tử spin: $\pm 1/2$
- ❖ n , l tăng thì mức năng lượng của nguyên tử tăng, e- được sắp xếp ở lớp, phân lớp có năng lượng nhỏ trước

Sự hình thành vùng năng lượng (1)

- ❖ Để tạo thành vật liệu giả sử có N nguyên tử giống nhau ở xa vô tận tiến lại gần liên kết với nhau:
 - Nếu các NT cách xa nhau đến mức có thể coi chúng là hoàn toàn độc lập với nhau thì vị trí của các mức năng lượng của chúng là hoàn toàn trùng nhau (một mức trùng chập)
 - Khi các NT tiến lại gần nhau đến khoảng cách cỡ A° thì chúng bắt đầu tương tác với nhau \rightarrow không thể coi chúng là độc lập nữa. Kết quả là các mức năng lượng nguyên tử không còn trùng chập nữa mà tách ra thành các mức năng lượng rời rạc khác nhau. VD: mức $1s$ sẽ tạo thành $2N$ mức năng lượng khác nhau
- ❖ Nếu số lượng các NT rất lớn và gần nhau thì các mức năng lượng rời rạc đó rất gần nhau và tạo thành một vùng năng lượng gần như liên tục
- ❖ Sự tách một mức năng lượng NT ra thành vùng năng lượng rộng hay hẹp phụ thuộc vào sự tương tác giữa các điện tử thuộc các NT khác nhau với nhau

Sự hình thành vùng năng lượng (2)

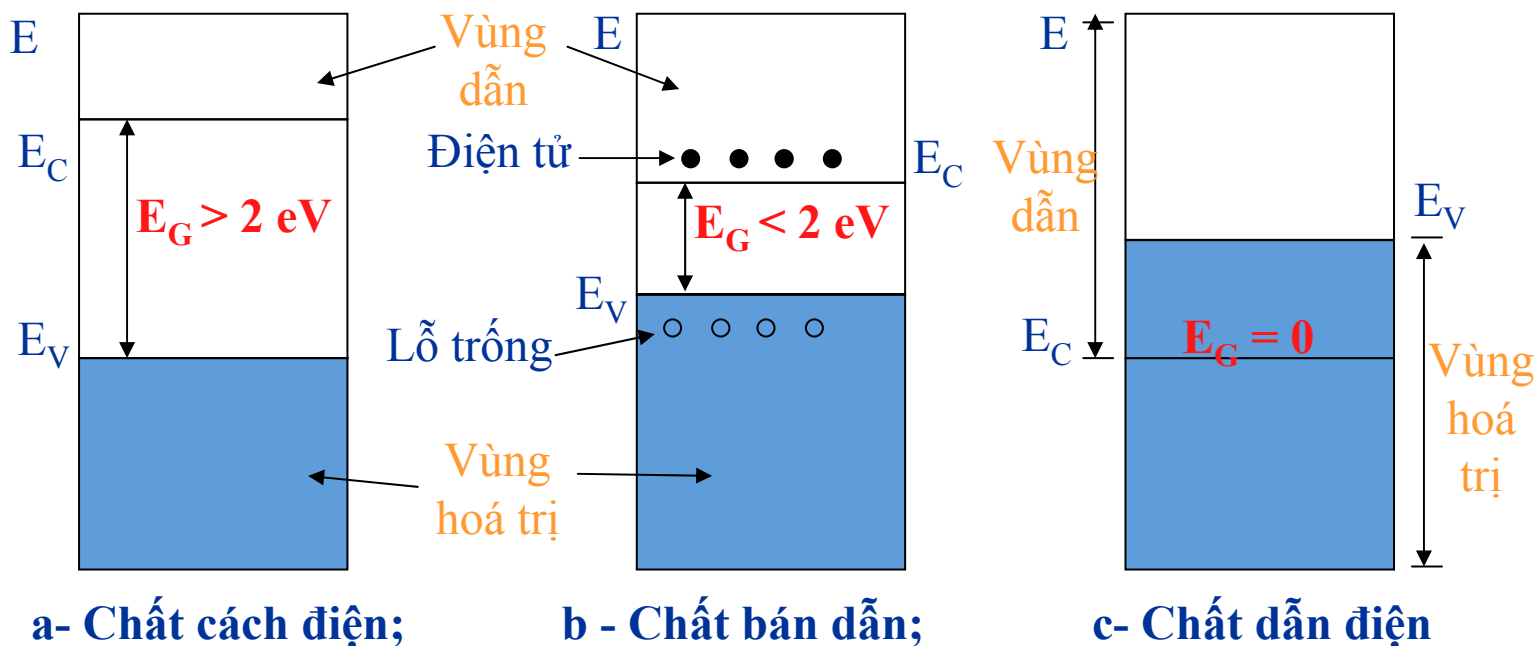
C	6	$1s^2 2s^2 2p^2$
Si	14	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$
Ge	32	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^2$
Sn	50	$1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4s^2 4p^6 4d^{10} 5s^2 5p^2$



Sự hình thành vùng năng lượng (3)

- ❖ Các vùng năng lượng cho phép xen kẽ nhau, giữa chúng là vùng cấm
- ❖ Các điện tử trong chất rắn sẽ điền đầy vào các mức năng lượng trong các vùng cho phép từ thấp đến cao
- ❖ Xét trên lớp ngoài cùng:
 - Vùng năng lượng đã được điền đầy các điện tử hóa trị - **“Vùng hóa trị”**
 - Vùng năng lượng trống hoặc chưa điền đầy trên vùng hóa trị - **“Vùng dẫn”**
 - Vùng không cho phép giữa Vùng hóa trị và Vùng dẫn - **“Vùng cấm”**
- ❖ Tùy theo sự phân bố của các vùng mà tinh thể rắn có tính chất điện khác nhau: Chất cách điện, Chất dẫn điện, Chất bán dẫn

Cấu trúc vùng năng lượng của vật chất



- Độ dẫn điện của vật chất cũng tăng theo nhiệt độ
- Chất bán dẫn: sự mất 1 điện tử trong vùng hóa trị sẽ hình thành một lỗ trống
- Cấu trúc vùng năng lượng của kim loại không có vùng cấm, dưới tác dụng của điện trường ngoài các e- tự do có thể nhận năng lượng và di chuyển lên các trạng thái cao hơn, sự di chuyển này tạo nên dòng điện

Các loại vật liệu điện tử

- Chất cách điện (chất điện môi)
- Chất dẫn điện
- Vật liệu từ
- **Chất bán dẫn (Chương 3)**

3.1 CHẤT CÁCH ĐIỆN (CHẤT ĐIỆN MÔI)

a. Định nghĩa

- ❖ Là chất dẫn điện kém, là các vật chất có điện trở suất cao ($10^7 \div 10^{17} \Omega.m$) ở nhiệt độ bình thường. Chất cách điện gồm phần lớn các vật liệu vô cơ cũng như hữu cơ
- ❖ Tính chất ảnh hưởng rất lớn đến chất lượng của linh kiện

b. Các tính chất của chất điện môi

b.1 Độ thẩm thấu điện tương đối (hằng số điện môi - ϵ)

b.2 Độ tổn hao điện môi (P_a)

b.3 Độ bền về điện của chất điện môi ($E_{đ.t}$)

b.4 Nhiệt độ chịu đựng

b.5 Dòng điện trong chất điện môi (I)

b.6 Điện trở cách điện của chất điện môi

b.1 Hằng số điện môi

$$\varepsilon = \frac{C_d}{C_0}$$

- ❖ C_d : điện dung của tụ điện sử dụng chất điện môi
- ❖ C_0 : điện dung của tụ điện sử dụng chất điện môi là chân không hoặc không khí
- ❖ ε biểu thị khả năng phân cực của chất điện môi.

Chất điện môi dùng làm tụ điện cần có hằng số điện môi (ε) lớn, còn chất điện môi dùng làm chất dẫn điện có ε nhỏ

b.2 Độ tổn hao điện môi (P_a)

- ❖ là công suất điện tổn hao để làm nóng chất điện môi khi đặt nó trong điện trường, được xác định thông qua dòng điện rò.

$$P_a = U^2 \omega C \operatorname{tg} \delta$$

- ❖ Trong đó:

U là điện áp đặt lên tụ điện (V)

C là điện dung của tụ điện dùng chất điện môi (F)

ω là tần số góc (rad/s)

$\operatorname{tg} \delta$ là góc tổn hao điện môi

- ❖ Nếu tổn hao điện môi trong tụ điện cơ bản là do điện trở của các bản cực, dây dẫn và tiếp giáp (vd: lớp bạc mỏng trong tụ mica và tụ gốm) thì tổn hao điện môi sẽ tăng tỉ lệ với bình phương của tần số:

$$P_a = U^2 \omega^2 C^2 R$$

- ❖ Thực tế, các tụ điện làm việc ở tần số cao cần phải có các bản cực, dây dẫn và tiếp giáp được tráng bạc để giảm điện trở của chúng

b3. Độ bền về điện của chất điện môi ($E_{đ.t}$)

- ❖ Đặt một chất điện môi vào trong một điện trường, khi tăng cường độ điện trường lên quá một giá trị giới hạn thì chất điện môi đó mất khả năng cách điện \rightarrow hiện tượng đánh thủng chất điện môi
- ❖ Cường độ điện trường tương ứng với điểm đánh thủng gọi là độ bền về điện của chất điện môi đó ($E_{đ.t}$)

$$E_{đ.t} = \frac{U_{đ.t}}{d} \quad [KV / mm; KV / cm]$$

$U_{đ.t}$ - điện áp đánh thủng chất điện môi

d - độ dày của chất điện môi

- ❖ Hiện tượng đánh thủng chất điện môi có thể do nhiệt, do điện và do quá trình điện hóa

b5. Dòng điện trong chất điện môi (I)

- ❖ **Dòng điện chuyển dịch $I_{c.M}$** (dòng điện cảm ứng):
được tạo ra do quá trình chuyển dịch phân cực của các điện tích liên kết trong chất điện môi xảy ra cho đến khi đạt được trạng thái cân bằng
- ❖ **Dòng điện rò $I_{rò}$** : được tạo ra do các điện tích tự do và điện tử phát xạ ra chuyển động dưới tác động của điện trường
- ❖ Nếu dòng rò lớn sẽ làm mất tính chất cách điện của chất điện môi
- ❖ Dòng điện tổng qua chất điện môi sẽ là: $I = I_{c.M} + I_{rò}$
- ❖ Sau khi quá trình phân cực kết thúc thì qua chất điện môi chỉ còn dòng điện rò

Phân loại và ứng dụng của chất điện môi

- ❖ **Chất điện môi thụ động** (vật liệu cách điện và vật liệu tụ điện): là các vật chất được dùng làm chất cách điện và làm chất điện môi trong các tụ điện như mi ca, gốm, thủy tinh, pôlyme tuyến tính, cao su, sơn, giấy, bột tổng hợp, keo dính,...
- ❖ **Chất điện môi tích cực** là các vật liệu có ϵ có thể điều khiển được bằng:
 - Điện trường (VD: gốm, thủy tinh,..)
 - Cơ học (chất áp điện như thạch anh)
 - Ánh sáng (chất huỳnh quang)
 - ...

3.2 CHẤT DẪN ĐIỆN

a. Định nghĩa

- ❖ là vật liệu có độ dẫn điện cao. Trị số điện trở suất của nó (khoảng $10^{-8} \div 10^{-5} \Omega\text{m}$) nhỏ hơn so với các loại vật liệu khác
- ❖ Trong tự nhiên chất dẫn điện có thể là chất rắn – kim loại, chất lỏng – kim loại nóng chảy, dung dịch điện phân hoặc chất khí ở điện trường cao

b. Các tính chất của chất dẫn điện

b.1 Điện trở suất

b.2 Hệ số nhiệt của điện trở suất (α)

b.3 Hệ số dẫn nhiệt : λ

b.4 Công thoát của điện tử trong kim loại

b.5 Điện thế tiếp xúc

b.1 Điện trở suất

- ❖ Điện trở của vật liệu trong một đơn vị thiết diện và chiều dài:

$$\rho = R \frac{S}{l} \quad [\Omega.m] , [\Omega.mm] , [\mu\Omega.m]$$

b.2 Hệ số nhiệt của điện trở suất (α)

- ❖ biểu thị sự thay đổi của điện trở suất khi nhiệt độ thay đổi 10°C . Khi nhiệt độ tăng thì điện trở suất cũng tăng lên theo quy luật:

$$\rho_t = \rho_0(1 + \alpha t)$$

b.3 Hệ số dẫn nhiệt : λ [w/ (m.K)]

- ❖ là lượng nhiệt truyền qua một đơn vị diện tích trong một đơn vị thời gian khi gradien nhiệt độ bằng đơn vị

$$Q = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta l} S t$$

b.4 Công thoát của điện tử trong kim loại:

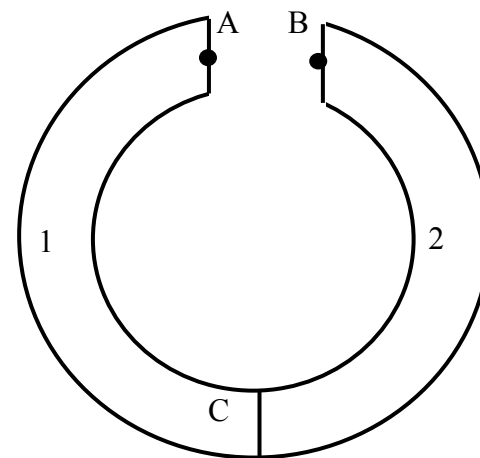
- ❖ Công thoát của kim loại biểu thị năng lượng tối thiểu cần cung cấp cho điện tử đang chuyển động nhanh nhất ở 0^0K để điện tử này có thể thoát ra khỏi bề mặt kim loại.

$$E_W = E_B - E_F$$

b.5 Điện thế tiếp xúc

- ❖ Sự chênh lệch thế năng E_{AB} giữa điểm A và B được tính theo công thức:

$$V_{AB} = E_{AB} = E_{W2} - E_{W1}$$



Phân loại và ứng dụng của chất dẫn điện

- ❖ **Chất dẫn điện có điện trở suất thấp** – Ag, Cu, Al, Sn, Pb... và một số hợp kim: thường dùng làm vật liệu dẫn điện
- ❖ **Chất dẫn điện có điện trở suất cao** - Hợp kim Manganin, Constantan, Niken-Crôm, Cacbon: thường dùng để chế tạo các dụng cụ đo điện, các điện trở, biến trở, các dây may so, các thiết bị nung nóng bằng điện

3.3 VẬT LIỆU TỪ

a. Định nghĩa

- ❖ Vật liệu từ là vật liệu khi đặt vào trong một từ trường thì nó bị nhiễm từ

b. Các tính chất đặc trưng cho vật liệu từ

b.1 Từ trở và từ thẩm

b.2 Độ từ thẩm tương đối (μ_r)

b.3 Đường cong từ hóa

Phân loại và ứng dụng của vật liệu từ

- ❖ Vật liệu từ mềm có độ từ thẩm cao và lực kháng từ nhỏ (μ lớn và H_c nhỏ) để làm lõi biến áp, nam châm điện, lõi cuộn cảm...
- ❖ Vật liệu từ cứng có độ từ thẩm nhỏ và lực kháng từ cao
- ❖ Theo ứng dụng thì vật liệu từ cứng có 2 loại:
 - Vật liệu để chế tạo nam châm vĩnh cửu.
 - Vật liệu từ để ghi âm, ghi hình, giữ âm thanh, v.v..
- ❖ Theo công nghệ chế tạo thì chia vật liệu từ cứng thành:
 - Hợp kim thép được tôi thành Martenxit (là vật liệu đơn giản và rẻ nhất để chế tạo nam châm vĩnh cửu)
 - Hợp kim lá từ cứng
 - Nam châm từ bột
 - Ferit từ cứng: Ferit Bari ($BaO.6Fe_2O_3$) để chế tạo nam châm dùng ở tần số cao
 - Băng, sợi kim loại và không kim loại dùng để ghi âm thanh

4. Các phần mềm EDA hỗ trợ môn học

- ❖ **OrCAD**: Phân tích, mô phỏng cấu kiện và mạch điện tử dùng Pspice. Cài đặt các tool sau:

- + OrCAD Capture CIS
- + OrCAD Capture CIS Option
- + PSpice A/D
- + PSpice Optimizer
- + PSpice Advanced Analysis
- + SPECCTRA 6U for OrCAD

(Hướng dẫn sử dụng Pspice: Tutorial on Pspice (McGill), Pspice Tutorial (UIUC), CircuitMaker User Manual ...)

- ❖ **Multisim (R 7)-Electronic Workbench, Circuit Maker, Proteus ...**

- ❖ **TINA 7**

- ❖ *(Sinh viên nên sử dụng **Tina/Circuit Maker/ OrCAD (R 9.2)** để thực hành phân tích, mô phỏng cấu kiện và mạch điện tử ở nhà)*

Chương 2- Cấu kiện thụ động

1. Điện trở (Resistor)
2. Tụ điện (Capacitor)
3. Cuộn cảm (Inductor)
4. Biến áp (Transformer)

1. Điện trở (Resistors)

1.1. Định nghĩa

1.2. Các tham số kỹ thuật đặc trưng của điện trở

1.3. Ký hiệu của điện trở

1.4 Cách ghi và đọc tham số trên thân điện trở

1.5. Điện trở cao tần và mạch tương đương

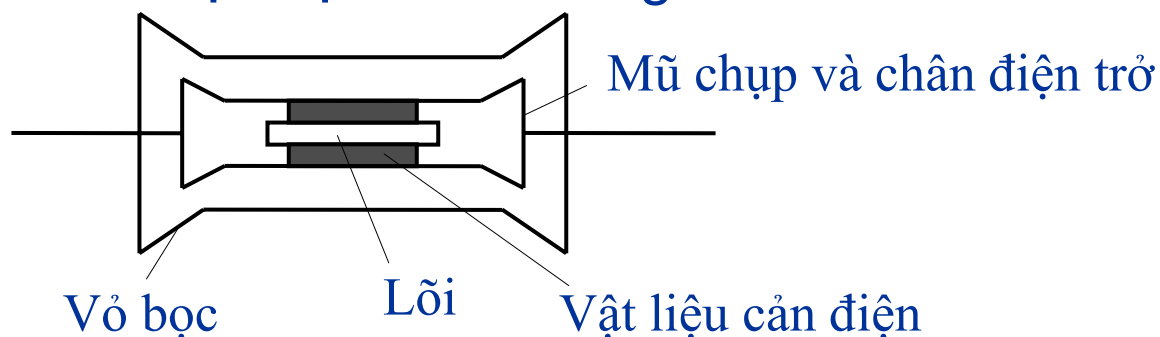
1.6. Phân loại

1.1 Định nghĩa

- ❖ Điện trở - phần tử có chức năng ngăn cản dòng điện trong mạch
- ❖ Mức độ ngăn cản dòng điện được đặc trưng bởi trị số điện trở

$$R = \frac{U}{I}$$

- ❖ Đơn vị đo: $\mu\Omega$, $m\Omega$, Ω , $k\Omega$, $M\Omega$, $G\Omega$, $T\Omega$
- ❖ Ứng dụng: định thiên cho các cấu kiện bán dẫn, điều khiển hệ số khuếch đại, cố định hằng số thời gian, phối hợp trở kháng, phân áp, tạo nhiệt ...
- ❖ Kết cấu đơn giản của một điện trở thường:



1.2 Các tham số kỹ thuật và đặc tính của điện trở

- ❖ Trị số điện trở và dung sai
- ❖ Hệ số nhiệt của điện trở
- ❖ Công suất tiêu tán danh định
- ❖ Tạp âm của điện trở

a. Trị số điện trở và dung sai

- ❖ Công thức tính trị số của điện trở:

$$R = \rho \frac{l}{S} \quad (\Omega)$$

ρ - điện trở suất của v/liệu dây dẫn cản điện
 l - chiều dài dây dẫn
 S - tiết diện của dây dẫn

- ❖ Dung sai hay sai số (**Resistor Tolerance**): biểu thị mức độ chênh lệch của trị số thực tế của điện trở so với trị số danh định và được tính theo %

$$\frac{R_{t.t} - R_{d.d}}{R_{d.d}} 100\%$$

- ❖ 5 cấp chính xác của điện trở (**tolerance levels**):

Cấp 005: sai số $\pm 0,5$ %

Cấp I: sai số ± 5 %

Cấp 01: sai số ± 1 %

Cấp II: sai số ± 10 %

Cấp III: sai số ± 20 %

b. Hệ số nhiệt của điện trở - TCR

- ❖ TCR (**temperature coefficient of resistance**): biểu thị sự thay đổi trị số của điện trở theo nhiệt độ

$$TCR = \frac{1}{R} \cdot \frac{\Delta R}{\Delta T} \cdot 10^6 \quad [\text{ppm}/^\circ\text{C}] \quad \rightarrow \quad \Delta R = \frac{R}{10^6} TCR \Delta T$$

- ❖ TCR có thể âm, bằng 0 hoặc dương tùy loại vật liệu:
- Kim loại thuần thường có $TCR > 0$
 - Một số hợp kim (constantin, manganin) có $TCR = 0$
 - Carbon, than chì có $TCR < 0$

c. Công suất tiêu tán danh định của điện trở ($P_{t.t \max}$)

- ❖ $P_{t.t \max}$: công suất điện cao nhất mà điện trở có thể chịu đựng được trong điều kiện bình thường, làm việc trong một thời gian dài không bị hỏng

$$P_{t.t \max} = R \cdot I_{\max}^2 = \frac{U_{\max}^2}{R} \quad [W]$$

- $P_{t.t \max}$ tiêu chuẩn cho các điện trở dây quấn nằm trong khoảng từ 1W đến 10W hoặc cao hơn nhiều. Để tỏa nhiệt cần yêu cầu diện tích bề mặt của điện trở phải lớn → các điện trở công suất cao đều có kích thước lớn
- Các điện trở than là các linh kiện có công suất tiêu tán danh định thấp, khoảng 0,125W; 0,25W; 0,5W; 1W và 2W

d. Tạp âm của điện trở

❖ Tạp âm của điện trở gồm:

- Tạp âm nhiệt (**Thermal noise**): sinh ra do sự chuyển động của các hạt mang điện bên trong điện trở do nhiệt độ

$$E_{RMS} = \sqrt{4.k.R.T.\Delta f}$$

E_{RMS} = the *Root-Mean-Square* hay điện áp hiệu dụng

k = Hằng số Boltzman ($1,38.10^{-23}$)

T = nhiệt độ tính theo độ Kelvin (nhiệt độ phòng = $27^{\circ}\text{C} = 300^{\circ}\text{K}$)

R = điện trở

Δf = Băng thông của mạch tính theo Hz ($\Delta f = f_2 - f_1$)

- Tạp âm dòng điện (**Current Noise**): sinh do các thay đổi bên trong của điện trở khi có dòng điện chạy qua nó

$$E_{RMS} = U_{DC} \cdot 10^{NI/20} \sqrt{\log\left(\frac{f_2}{f_1}\right)}$$

$$NI = 20 \log_{10}\left(\frac{U_{noise}}{U_{DC}}\right)$$

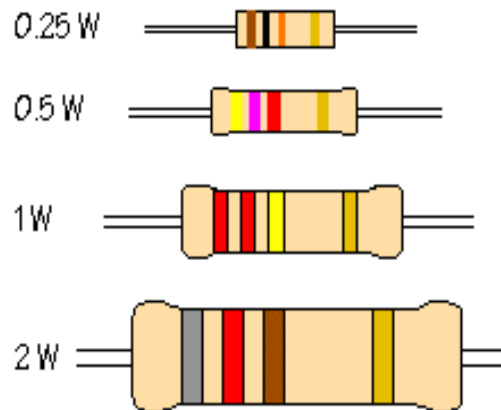
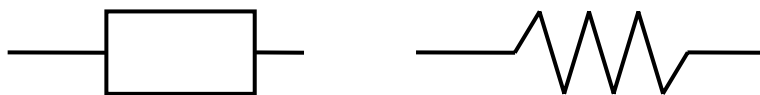
Trong đó:

- + NI: Noise Index (Hệ số nhiễu)
- + U_{DC} : điện áp không đổi đặt trên 2 đầu điện trở
- + U_{noise} : điện áp tạp âm dòng điện
- + $f_1 \rightarrow f_2$: khoảng tần số làm việc của điện trở

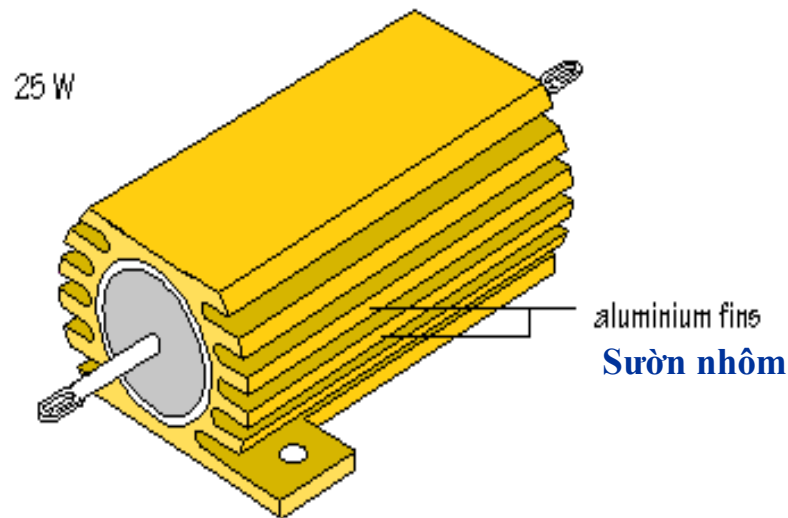
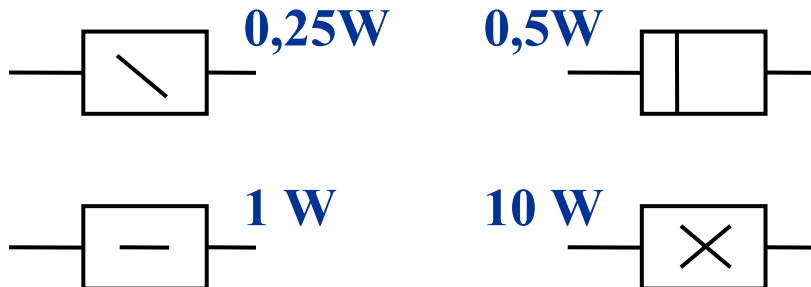
Mức tạp âm phụ thuộc chủ yếu vào loại vật liệu cản điện. Bột than nén có mức tạp âm cao nhất. Màng kim loại và dây quấn có mức tạp âm rất thấp.

1.3 Ký hiệu của điện trở trên các sơ đồ mạch

Điện trở thường



Điện trở công suất



Biến trở



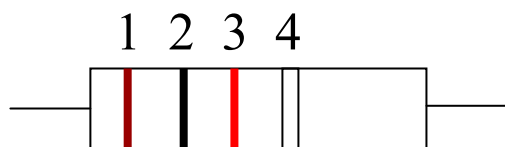
1.4 Cách ghi và đọc tham số trên thân điện trở (1)

- ❖ **Ghi trực tiếp:** ghi đầy đủ các tham số chính và đơn vị đo trên thân của điện trở, vd: 220KΩ 10%, 2W
- ❖ **Ghi theo quy ước:** có rất nhiều các quy ước khác nhau. Xét một số quy ước thông dụng:
 - **Quy ước đơn giản:** Không ghi đơn vị Ôm, R (hoặc E) = Ω,
M = MΩ, K = KΩ
Ví dụ: 2M=2MΩ, 0K47 =0,47KΩ = 470Ω, 100K = 100 KΩ,
220E = 220Ω, R47 = 0,47Ω
 - **Quy ước theo mã:** Mã này gồm các chữ số và một chữ cái để chỉ % dung sai. Trong các chữ số thì chữ số cuối cùng chỉ số số 0 cần thêm vào. Các chữ cái chỉ % dung sai qui ước gồm: F = 1 %, G = 2 %, J = 5 %, K = 10 %, M = 20 %
Vd: 103F = 10000 Ω ± 1% = 10K ± 1%
153G = ... 4703J = ...

1.4 Cách ghi và đọc tham số trên thân điện trở (2)

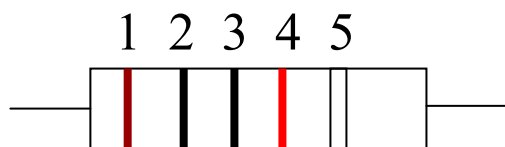
- Quy ước màu:

- ❖ Loại 4 vòng màu:



(Nâu-đen-đỏ-Không màu) =

- ❖ Loại 5 vạch màu:

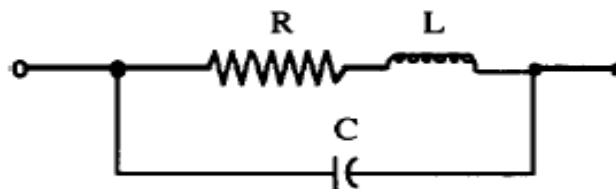


(Nâu-cam-vàng-đỏ-Bạch kim) =

Màu	Giá trị
Đen	0
Nâu	1
Đỏ	2
Cam	3
Vàng	4
Lục	5
Lam	6
Tím	7
Xám	8
Trắng	9
Vàng kim	0,1 / 5%
Bạch kim	0,001 / 10%
Không màu	- / 20%

1.5 Điện trở cao tần và mạch tương đương

- ❖ Khi làm việc ở tần số cao điện cảm và điện dung ký sinh là đáng kể, Sơ đồ tương đương của điện trở ở tần số cao như sau:



- ❖ Tần số làm việc hiệu dụng của điện trở được xác định sao cho sự sai khác giữa trở kháng tương đương của nó so với giá trị điện trở danh định không vượt quá dung sai
- ❖ Đặc tính tần số của điện trở phụ thuộc vào cấu trúc, vật liệu chế tạo... Kích thước điện trở càng nhỏ thì đặc tính tần số càng tốt, điện trở cao tần thường có tỷ lệ kích thước là từ 4:1 đến 10:1

1.6 Phân loại điện trở (1)

- ❖ Điện trở có trị số cố định
- ❖ Điện trở có trị số thay đổi

a. Điện trở cố định

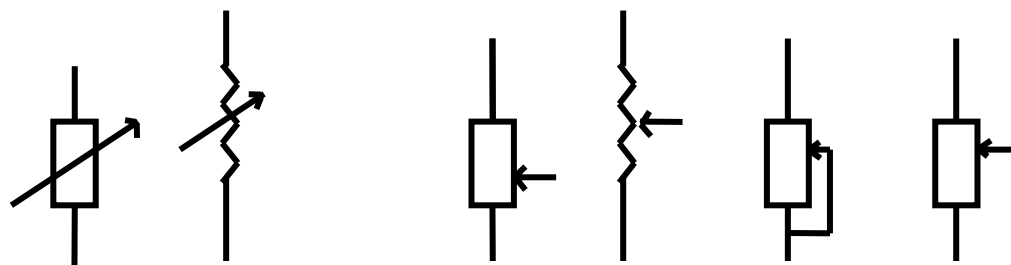
Thường được phân loại theo vật liệu cản điện

- Điện trở than tổng hợp (than nén): cấu trúc từ hỗn hợp bột cacbon (bột than chì) được đóng thành khuôn, kích thước nhỏ và giá thành rất rẻ
 - Điện trở than nhiệt giải hoặc than màng (màng than tinh thể)
 - Điện trở dây quấn
 - Điện trở màng hợp kim, màng oxit kim loại hoặc điện trở miếng.
 - Điện trở cermet (gốm kim loại)
- Ngoài ra còn phân loại theo kết cấu đầu nối để phục vụ lắp ráp; phân loại theo loại vỏ bọc để dùng ở những môi trường khác nhau; phân loại theo loại ứng dụng....

1.6 Phân loại điện trở (2)

b. Biến trở

- Dạng kiểm soát dòng công suất lớn dùng dây quấn (ít gặp trong các mạch điện trở)
- Chiết áp: so với điện trở cố định thì chiết áp có thêm một kết cấu con chạy gắn với một trục xoay để điều chỉnh trị số điện trở. Con chạy có kết cấu kiểu xoay (chiết áp xoay) hoặc theo kiểu trượt (chiết áp trượt). Chiết áp có 3 đầu ra, đầu giữa ứng với con trượt còn hai đầu ứng với hai đầu của điện trở

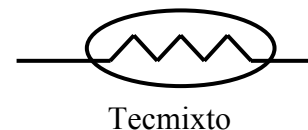
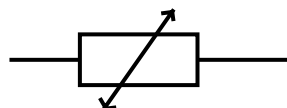
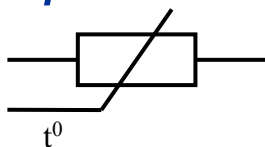


a. loại kiểm soát dòng

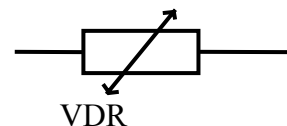
b. loại chiết áp

Một số điện trở đặc biệt

- ❖ *Điện trở nhiệt: Tecmixto*



- ❖ *Điện trở Varixto:*



- ❖ *Điện trở Mêgôm:* có trị số điện trở từ $10^8 \div 10^{15} \Omega$
- ❖ *Điện trở cao áp:* điện trở chịu được điện áp cao 5 KV \div 20 KV
- ❖ *Điện trở chuẩn:* các điện trở dùng vật liệu dây quấn đặc biệt có độ ổn định cao
- ❖ *Mạng điện trở:* là một loại vi mạch tích hợp có 2 hàng chân. Một phương pháp chế tạo là dùng công nghệ màng mỏng, trong đó dung dịch chất dẫn điện được lắng đọng trong một hình dạng theo yêu cầu.

2. Tụ điện (Capacitors)

2.1. Định nghĩa

2.2. Các tham số kỹ thuật đặc trưng của tụ điện

2.3. Ký hiệu của tụ điện

2.4. Cách ghi và đọc tham số trên tụ điện

2.5. Sơ đồ tương đương

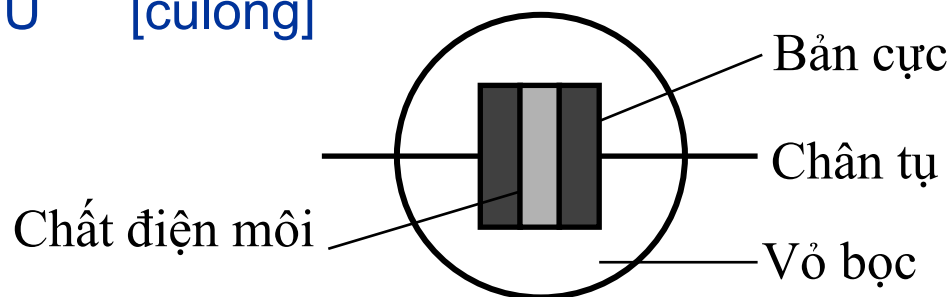
2.6. Phân loại

2.1 Định nghĩa

- ❖ Tụ điện là linh kiện dùng để chứa điện tích. Một tụ điện lý tưởng có điện tích ở bản cực tỉ lệ thuận với hiệu điện thế đặt trên nó theo công thức:

$$Q = C \cdot U \quad [\text{culông}]$$
- ❖ Điện dung của tụ điện C [F]

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 \cdot S}{d}$$



Đơn vị đo C : F, μF , nF, pF ...

ϵ_r - hằng số điện môi của chất điện môi

ϵ_0 - hằng số điện môi của không khí hay chân không

$$\epsilon_0 = \frac{1}{36\pi \cdot 10^9} = 8,84 \cdot 10^{-12}$$

S – d/tích hữu dụng của bản cực [m^2]; d – kh/cách giữa 2 bản cực [m]

2.2 Các tham số kỹ thuật đặc trưng của tụ điện

- ❖ Trị số dung lượng và dung sai
- ❖ Điện áp làm việc
- ❖ Hệ số nhiệt
- ❖ Dòng điện rò
- ❖ Sự phân cực

a. Trị số dung lượng (C)

Dung sai của tụ điện: là tham số chỉ độ chính xác của trị số dung lượng thực tế so với trị số danh định của nó

Dung sai của tụ điện:

$$\frac{C_{t.t} - C_{d.d}}{C_{d.d}} \cdot 100\%$$

b. Điện áp làm việc: Điện áp cực đại có thể cung cấp cho tụ điện hay còn gọi là "**điện áp làm việc một chiều**", nếu quá điện áp này lớp cách điện sẽ bị đánh thủng và làm hỏng tụ

c. Hệ số nhiệt của tụ điện

- ❖ Mỗi một loại tụ điện chịu một ảnh hưởng với khoảng nhiệt độ do nhà sản xuất xác định. Khoảng nhiệt độ tiêu chuẩn thường từ:

-200C đến +650C

-400C đến +650C

-550C đến +1250C

- ❖ Để đánh giá sự thay đổi của trị số điện dung khi nhiệt độ thay đổi người ta dùng hệ số nhiệt của tụ điện TCC

$$TCC = \frac{1}{C} \frac{\Delta C}{\Delta T} \cdot 10^6 \quad [\text{ppm}/^{\circ}\text{C}]$$

d. Dòng điện rò

- ❖ Do chất cách điện đặt giữa 2 bản cực nên sẽ có một dòng điện rò rất bé chạy qua giữa 2 bản cực của tụ điện. Trị số $I_{rò}$ phụ thuộc vào điện trở cách điện của chất điện môi
- ❖ Tụ điện màng Plastic có điện trở cách điện cao hơn 100000 $M\Omega$, còn tụ điện điện giải thì dòng điện rò có thể lên tới vài μA khi điện áp đặt vào 2 bản cực của tụ chỉ 10 V
- ❖ Đối với điện áp xoay chiều, tổn hao công suất trong tụ được thể hiện qua hệ số tổn hao D:

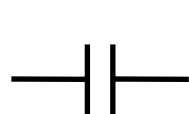
$$D = \frac{1}{Q} = \frac{P_{th}}{P_{pk}}$$

- ❖ Tụ tổn hao nhỏ dùng sơ đồ tương đương nối tiếp
- ❖ Tụ tổn hao lớn dùng sơ đồ tương đương song song

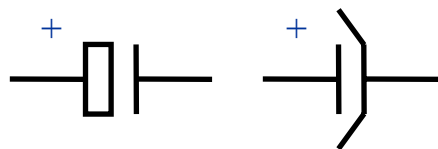
e. Sự phân cực

- Các tụ điện điện giải ở các chân tụ thường có đánh dấu cực tính dương (dấu +) hoặc âm (dấu -) gọi là sự phân cực của tụ điện
- Khi sử dụng phải đấu tụ vào mạch sao cho đúng cực tính của tụ. Như vậy chỉ sử dụng loại tụ này vào những vị trí có điện áp làm việc không thay đổi cực tính

2.3 Ký hiệu của tụ



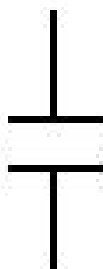
Tụ thường



Tụ điện giải



Tụ có điện dung thay đổi



SYMBOL



0.001 μ F
 $10 \times 10^2 \times 10^{-6}$



0.01 μ F
 $10 \times 10^3 \times 10^{-6}$



22 μ F



2.2 μ F

Tụ điện lớn thường có tham số điện dung ghi trực tiếp, tụ điện nhỏ thường dùng mã: $XYZ = XY * 10^Z$ pF

2.4 Cách đọc và ghi trị số trên tụ

- ❖ Hai tham số quan trọng nhất thường được ghi trên thân tụ điện là trị số điện dung (kèm theo dung sai sản xuất) và điện áp làm việc (điện áp lớn nhất). Có 2 cách ghi cơ bản:

Ghi trực tiếp: cách ghi đầy đủ các tham số và đơn vị đo của chúng. Cách này chỉ dùng cho các loại tụ điện có kích thước lớn.

Ví dụ: trên thân một tụ mi ca có ghi: $5.000\text{PF} \pm 20\% \quad 600\text{V}$

Ghi gián tiếp theo qui ước:

+ **Qui ước số:** Cách ghi này thường gặp ở các tụ Pôlystylen

Ví dụ 1: Trên thân tụ có ghi 47/ 630: tức giá trị điện dung là 47 pF, điện áp làm việc một chiều là 630 Vdc.

Ví dụ 2: Trên thân tụ có ghi 0.01/100: tức là giá trị điện dung là 0,01 μF và điện áp làm việc một chiều là 100 Vdc.

+ **Quy ước theo mã:** Giống như điện trở: $123\text{K}/50\text{V} = 12000 \text{ pF} \pm 10\%$ và điện áp làm việc lớn nhất 50 Vdc

+Quy ước theo màu:

- Loại có 4 vạch màu:

Hai vạch đầu là số có nghĩa thực của nó

Vạch thứ ba là số nhân (đơn vị pF) hoặc số số 0 cần thêm vào

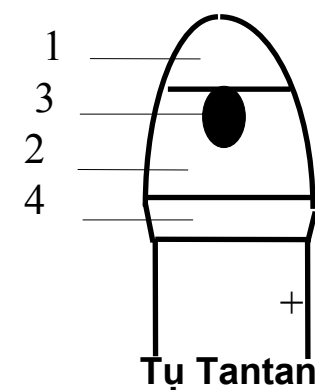
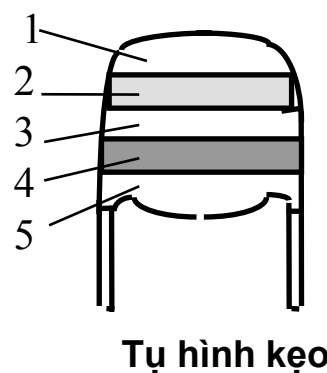
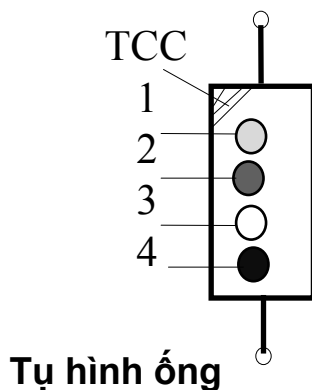
Vạch thứ tư chỉ điện áp làm việc.

- Loại có 5 vạch màu:

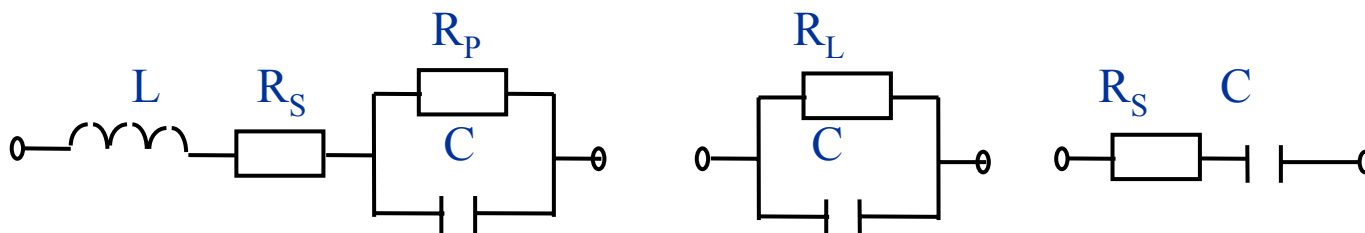
Ba vạch màu đầu giống như loại 4 vạch màu

Vạch màu thứ tư chỉ % dung sai

Vạch màu thứ 5 chỉ điện áp làm việc



2.5 Sơ đồ tương đương của tụ



a. Sơ đồ tương đương tổng quát

b. Sơ đồ tương đương song song

c. sơ đồ tương đương nối tiếp

L - là điện cảm của đầu nối, dây dẫn (ở tần số thấp $L \approx 0$)

R_S - là điện trở của đầu nối, dây dẫn và bản cực (R_S thường rất nhỏ)

R_P - là điện trở rò của chất cách điện và vỏ bọc.

R_L, R_S - là điện trở rò của chất cách điện

C - là tụ điện lý tưởng

2.6 Phân loại tụ điện

- ❖ Tụ điện có trị số điện dung cố định
- ❖ Tụ điện có trị số điện dung thay đổi được

a. Tụ điện có trị số điện dung cố định:

- **Tụ giấy:** chất điện môi là giấy, thường có trị số điện dung khoảng từ 500 pF đến 50 μ F và điện áp làm việc đến 600 Vdc. Tụ giấy có giá thành rẻ nhất so với các loại tụ có cùng trị số điện dung.

Ưu điểm: kích thước nhỏ, điện dung lớn.

Nhược điểm: Tổn hao điện môi lớn, TCC lớn.

- **Tụ màng chất dẻo:** chất điện môi là chất dẻo, có điện trở cách điện lớn hơn 100000 M Ω . Điện áp làm việc cao khoảng 600V. Tụ màng chất dẻo nhỏ hơn tụ giấy nhưng đắt hơn. Giá trị điện dung của tụ tiêu chuẩn nằm trong khoảng từ 5 pF đến 0,47 μ F

- **Tụ mi ca:** chất điện môi là mi ca, tụ mi ca tiêu chuẩn có giá trị điện dung khoảng từ 1 pF đến 0,1 μ F và điện áp làm việc cao đến 3500V Nhược điểm: giá thành của tụ cao.

Ưu điểm: Tổn hao điện môi nhỏ, Điện trở cách điện rất cao, chịu được nhiệt độ cao.

- **Tụ gốm:** chất điện môi là gốm. Giá trị điện dung của tụ gốm tiêu chuẩn khoảng từ 1 pF đến 0,1 μ F, với điện áp làm việc một chiều đến 1000 Vdc.

Đặc điểm của tụ gốm là kích thước nhỏ, điện dung lớn, có tính ổn định rất tốt, có thể làm việc lâu dài mà không lão hoá.

- **Tụ dầu:** chất điện môi là dầu. Tụ dầu có điện dung lớn, chịu được điện áp cao

Có tính năng cách điện tốt, có thể chế tạo thành tụ cao áp

Kết cấu đơn giản, dễ sản xuất

- **Tụ điện giải nhôm:** Cấu trúc cơ bản giống tụ giấy. Hai lá nhôm mỏng làm hai bản cực đặt cách nhau bằng lớp vải mỏng được tẩm chất điện phân (dung dịch điện phân), sau đó được quấn lại và cho vào trong một khối trụ bằng nhôm để bảo vệ.

Thường làm việc với điện áp một chiều > 400 Vdc, trong trường hợp này điện dung không quá $100 \mu\text{F}$. Điện áp làm việc thấp và dòng rò tương đối lớn

- **Tụ tantan** (chất điện giải Tantan): là một loại tụ điện giải. Bột tantan được cô đặc thành dạng hình trụ, sau đó được nhúng chìm vào một hộp chứa chất điện phân. Dung dịch điện phân sẽ thấm vào chất tantan. Khi đặt một điện áp một chiều lên hai chân tụ thì một lớp oxit mỏng được tạo thành ở vùng tiếp xúc của chất điện phân và tantan.

Tụ tantan có điện áp làm việc lên đến 630 Vdc nhưng giá trị điện dung chỉ khoảng $3,5 \mu\text{F}$.

b. Tụ điện có trị số điện dung thay đổi

- **Loại đa dụng còn gọi là tụ xoay:** Tụ xoay được dùng làm tụ điều chỉnh thu sóng trong các máy thu thanh, v.v.. Tụ xoay có thể có 1 ngăn hoặc nhiều ngăn. Mỗi ngăn có các lá động xen kẽ, đối nhau với các lá tĩnh (lá giữ cố định) chế tạo từ nhôm. Chất điện môi có thể là không khí, mica, màng chất dẻo, gốm...
- **Tụ vi điều chỉnh (Trimcap)** có nhiều kiểu. Chất điện môi cũng dùng nhiều loại như không khí, màng chất dẻo, thủy tinh hình ống... Trong các loại Trimcap chuyên dùng, thường gặp nhất là loại chất điện môi gốm. Để thay đổi trị số điện dung ta thay đổi vị trí giữa hai lá động và lá tĩnh. Khoảng điều chỉnh của tụ từ 1,5 pF đến 3 pF, hoặc từ 7 pF đến 45 pF và từ 20 pF đến 120 pF tùy theo hệ số nhiệt cần thiết

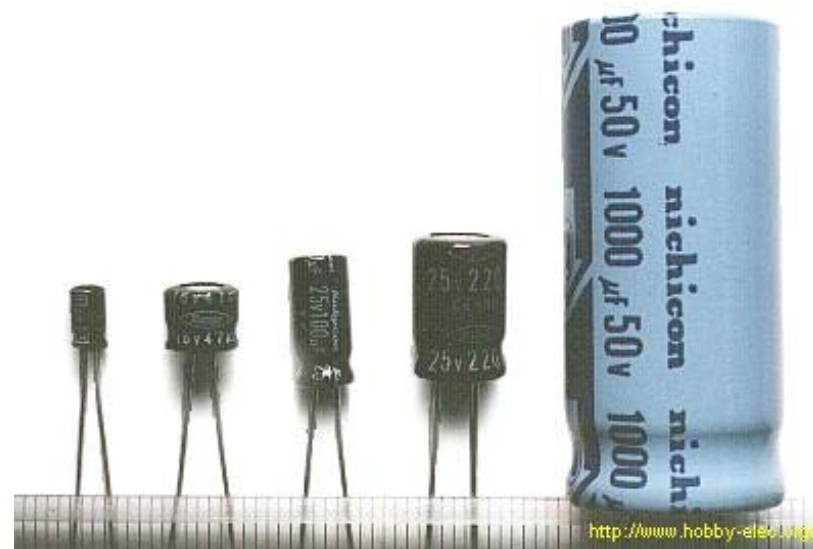
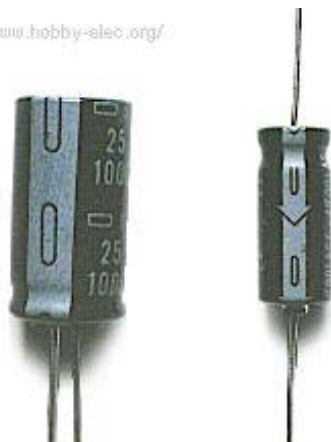
Ứng dụng

- ❖ **Tụ liên lạc:** ngăn cách được dòng một chiều giữa mạch này với mạch khác nhưng lại dẫn dòng điện xoay chiều đi qua
- ❖ **Tụ thoát:** dùng để triệt bỏ tín hiệu không cần thiết từ một điểm trên mạch xuống đất (ví dụ: tạp âm)
- ❖ **Tụ cộng hưởng:** dùng làm phần tử dung kháng trong các mạch cộng hưởng LC
- ❖ **Tụ lọc:** dùng trong mạch lọc.
- ❖ **Các tụ trong nhóm đa dụng** dùng để liên lạc, lọc nguồn điện, thoát tín hiệu ... ngoài ra tụ còn dùng để trữ năng lượng, định thời...
- ❖ Do có tính nạp điện và phóng điện, tụ còn dùng để tạo mạch định giờ, mạch phát sóng răng cưa, mạch vi phân và tích phân.

Một số hình ảnh của Tụ điện

❖ Tụ hoá (Electrolytic Capacitors)

<http://www.hobby-elec.org/>



<http://www.hobby-elec.org/>

❖ Tụ Tantan (Tantalum Capacitors)



<http://www.hobby-elec.org/>



<http://www.hobby-elec.org/>

❖ Tụ gốm (Ceramic Capacitors)

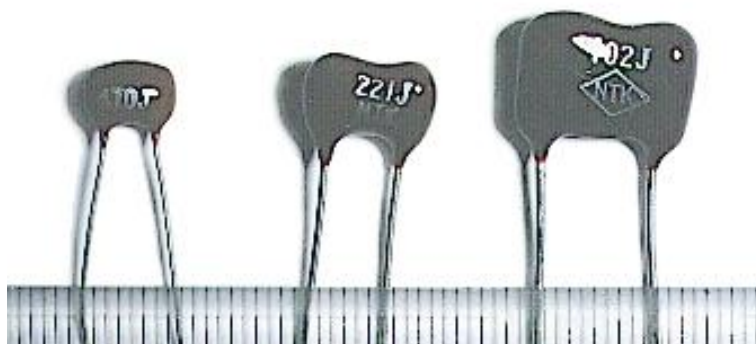


❖ Tụ gốm nhiều tầng (Multilayer Ceramic Capacitors)

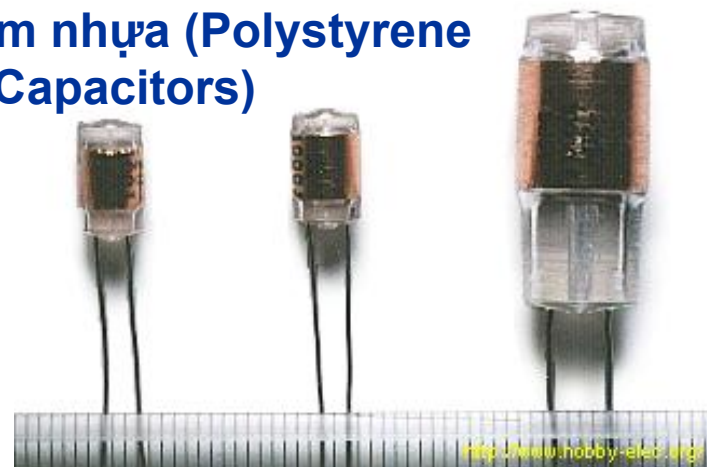


❖ Tụ Mica

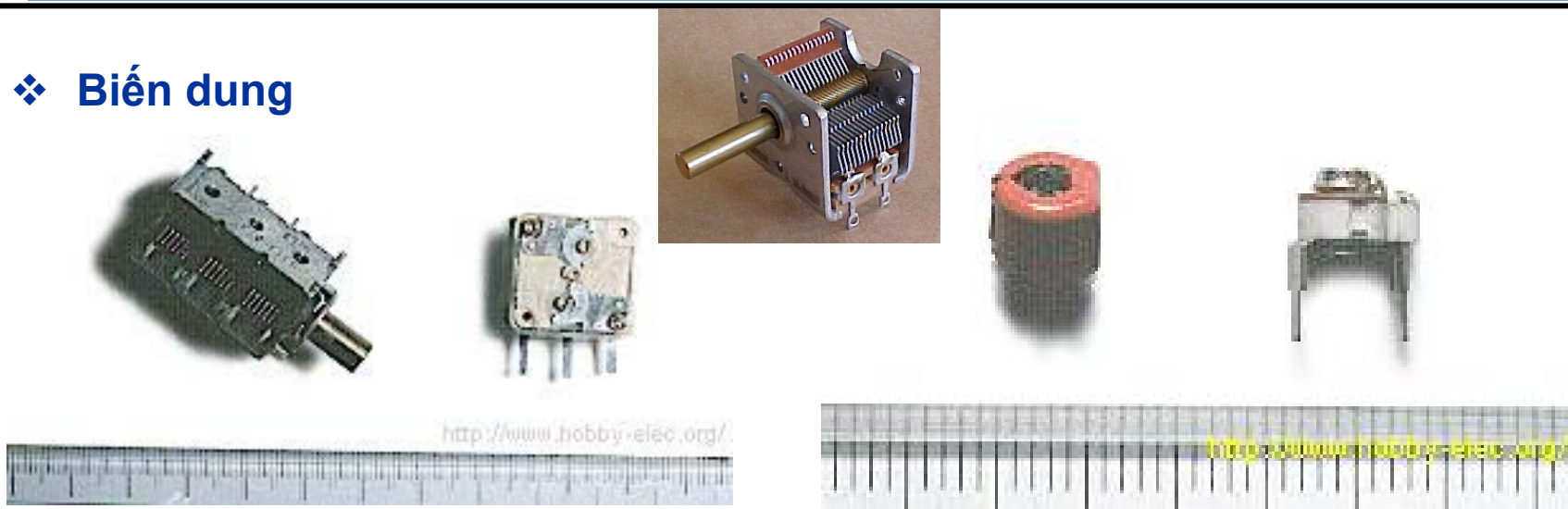
<http://www.hobby-elec.org/>



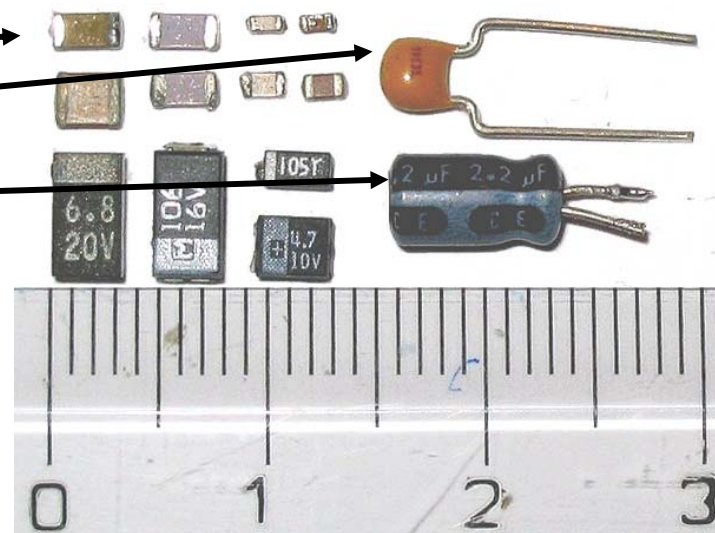
❖ Tụ film nhựa (Polystyrene Film Capacitors)



❖ **Biến dung**



- ❖ **Tụ gốm dán bề mặt**
- ❖ **Tụ Tantan**
- ❖ **Tụ hóa**



3. Cuộn cảm (Inductor)

3.1. Định nghĩa

3.2 Ký hiệu của cuộn cảm

3.3 Các tham số kỹ thuật đặc trưng của cuộn cảm

3.4 Cách ghi và đọc tham số trên cuộn cảm

3.5 Mạch tương đương

3.6 Phân loại

3.1 Định nghĩa

- ❖ Cuộn cảm là phần tử sinh ra hiện tượng tự cảm khi dòng điện chạy qua nó biến thiên.
- ❖ Khi dòng điện qua cuộn cảm biến thiên sẽ tạo ra từ thông thay đổi và một sức điện động được cảm ứng ngay trong cuộn cảm hoặc có thể cảm ứng một sức điện động sang cuộn cảm kề cận với nó
- ❖ Mức độ cảm ứng trong mỗi trường hợp phụ thuộc vào độ tự cảm của cuộn cảm hoặc sự hỗ cảm giữa hai cuộn cảm. Các cuộn cảm được cấu trúc để có giá trị độ cảm ứng xác định.
- ❖ Cuộn cảm cũng có thể đấu nối tiếp hoặc song song. Ngay cả một đoạn dây dẫn ngắn nhất cũng có sự cảm ứng.

3.2 Ký hiệu của cuộn cảm

L



Cuộn dây lõi Ferit

L



Cuộn dây lõi sắt từ

L



Cuộn dây lõi không khí



3.3 Các tham số kỹ thuật đặc trưng của cuộn cảm

- ❖ Độ tự cảm (L)
- ❖ Hệ số phẩm chất của cuộn cảm (Q)
- ❖ Tần số làm việc giới hạn ($f_{g.h}$)

a. Độ tự cảm (L)

$$L = \mu \cdot N^2 \cdot \frac{S}{l}$$

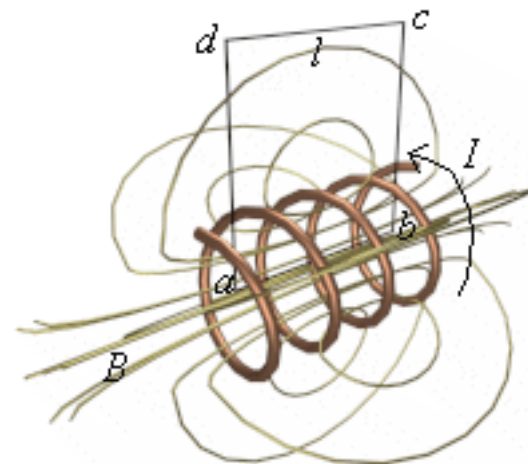
Trong đó: S - tiết diện của cuộn dây (m²)

N - số vòng dây

l - chiều dài của cuộn dây (m)

μ - độ từ thẩm tuyệt đối của vật liệu lõi (H/ m);

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$



- ❖ Đơn vị đo: ... μ H, mH, H...
- ❖ Độ từ thẩm tuyệt đối của một số loại vật liệu:

Chân không: $4\pi \times 10^{-7}$ H/m

Ferrite T38 1.26×10^{-2} H/m

Không khí: 1.257×10^{-6} H/m

Ferrite U M33 9.42×10^{-4} H/m

Nickel 7.54×10^{-4} H/m

Iron 6.28×10^{-3} H/m

Silicon GO steel 5.03×10^{-2} H/m

supermalloy 1.26 H/m

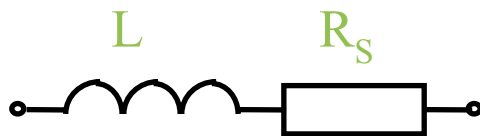
- ❖ **Dung sai của độ tự cảm:** là tham số chỉ độ chính xác của độ tự cảm thực tế so với trị số danh định của nó

$$\frac{L_{t.t} - L_{d.d}}{L_{d.d}} \cdot 100\%$$

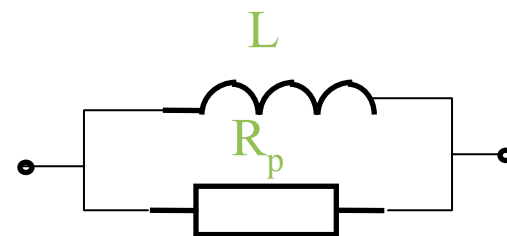
- ❖ Một cuộn cảm lý tưởng không có tổn hao khi có dòng điện chạy qua, thực tế luôn có tổn hao do công suất điện tổn hao để làm nóng cuộn dây. Tổn hao này biểu thị bởi điện trở tổn hao R_S

b. Hệ số phẩm chất của cuộn cảm (Q)

- ❖ Q dùng để đánh giá chất lượng của cuộn cảm. Cuộn cảm tổn hao nhỏ dùng sơ đồ tương đương nối tiếp, cuộn cảm tổn hao lớn dùng sơ đồ tương đương song song.



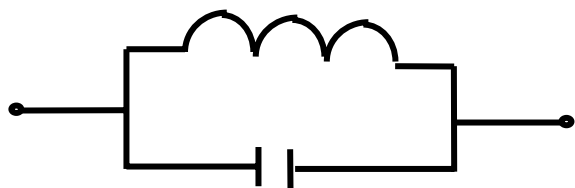
$$Q_{nt} = \frac{1}{D} = \frac{P_{pk}}{P_{th}} = \frac{X_L}{R_S} = \frac{\omega L}{R_S}$$



$$Q_{//} = \frac{1}{D} = \frac{P_{pk}}{P_{th}} = \frac{R_P}{X_L} = \frac{R_P}{\omega L}$$

c. Tần số làm việc giới hạn ($f_{g,h}$)

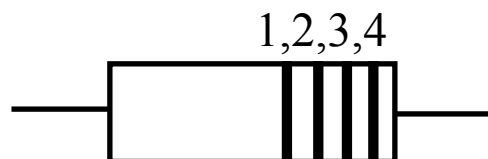
- ❖ Khi tần số làm việc nhỏ, bỏ qua điện dung phân tán giữa các vòng dây của cuộn cảm, nhưng khi làm việc ở tần số cao điện dung này là đáng kể
- ❖ Do đó ở tần số đủ cao cuộn cảm trở thành một mạch cộng hưởng song song. Tần số cộng hưởng của mạch cộng hưởng song song này gọi là tần số cộng hưởng riêng của cuộn dây f_0
- ❖ Nếu cuộn dây làm việc ở tần số $>$ tần số cộng hưởng riêng này thì cuộn dây mang dung tính nhiều hơn. Do đó tần số làm việc cao nhất của cuộn dây phải thấp hơn tần số cộng hưởng riêng của nó.



$$f_{lv\max} < f_{gh} = f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

3.4 Cách ghi và đọc tham số trên cuộn cảm

- ❖ **Ghi trực tiếp:** cách ghi đầy đủ các tham số độ tự cảm L, dung sai, loại lõi cuộn cảm... Cách này chỉ dùng cho các loại cuộn cảm có kích thước lớn.
- ❖ **Ghi gián tiếp theo qui ước :**
 - *Quy ước theo màu:* Dùng cho các cuộn cảm nhỏ



Vòng màu 1: chỉ số có nghĩa thứ nhất hoặc chấm thập phân

Vòng màu 2: chỉ số có nghĩa thứ hai hoặc chấm thập phân

Vòng màu 3: chỉ số 0 cần thêm vào, đơn vị đo là μH

Vòng màu 4: chỉ dung sai %.

3.5 Phân loại và ứng dụng

❖ Dựa theo ứng dụng:

- *Cuộn cộng hưởng* – cuộn cảm dùng trong các mạch cộng hưởng LC
- *Cuộn lọc* – cuộn cảm dùng trong các bộ lọc một chiều.
- *Cuộn chặn* dùng để ngăn cản dòng cao tần, v.v..

❖ Dựa vào loại lõi của cuộn cảm:

- *Cuộn dây lõi không khí*: Loại cuộn dây không lõi hoặc cuốn trên các cốt không từ tính, thường dùng là các cuộn cộng hưởng làm việc ở tần số cao và siêu cao. Các yêu cầu chính: điện cảm phải ổn định ở tần số làm việc, Q cao, điện dung riêng nhỏ, hệ số nhiệt của điện cảm thấp

- *Cuộn cảm lõi sắt bụi*: Dùng bột sắt nguyên chất trộn với chất dính kết không từ tính là lõi cuộn cảm, thường dùng ở tần số cao và trung tần. Cuộn dây lõi sắt bụi có tổn thất thấp, đặc biệt là tổn thất do dòng điện xoáy ngược, và độ từ thẩm thấp hơn nhiều so với loại lõi sắt từ
- *Cuộn cảm lõi Ferit* : thường là các cuộn cảm làm việc ở tần số cao và trung tần. Lõi Ferit có nhiều hình dạng khác nhau như: thanh, ống, hình chữ E, chữ C, hình xuyên, hình nôi, hạt đậu, v.v.. Dùng lõi hình xuyên để tạo điện cảm cao, tuy vậy lại dễ bị bão hòa từ khi có thành phần một chiều
- *Cuộn cảm lõi sắt từ*: Lõi của cuộn cảm thường hợp chất sắt - silic, hoặc sắt- niken Đây là các cuộn cảm làm việc ở tần số thấp. Dùng dây đồng đã được tráng men cách điện quấn thành nhiều lớp có cách điện giữa các lớp và được tẩm chống ẩm

4. Biến áp (Transformer)

4.1. Định nghĩa

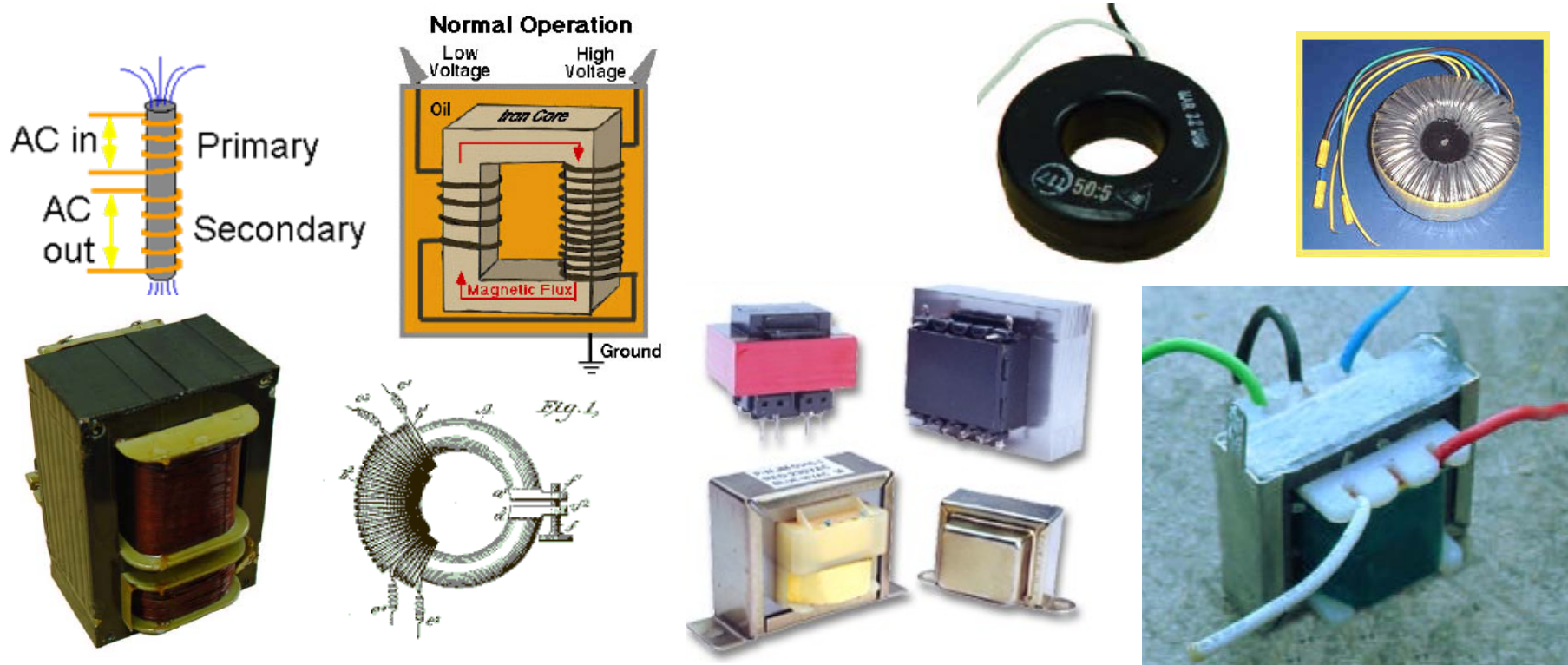
4.2. Các tham số kỹ thuật của biến áp

4.3. Ký hiệu của biến áp

4.6. Phân loại và ứng dụng

4.1. Định nghĩa

- ❖ Biến áp là thiết bị gồm 2 hay nhiều cuộn dây ghép hồ cảm với nhau để biến đổi điện áp. Cuộn dây đấu vào nguồn điện gọi là cuộn sơ cấp, các cuộn dây khác đấu vào tải gọi là cuộn thứ cấp

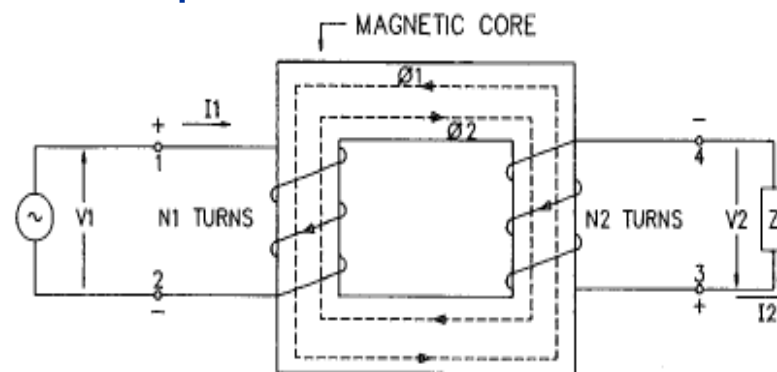


Nguyên lý hoạt động của biến áp

- ❖ Hoạt động dựa theo nguyên lý cảm ứng điện từ
- ❖ Hệ số tự cảm của cuộn sơ cấp, thứ cấp:

$$L_1 = \mu \cdot N_1^2 \frac{S}{l}$$

$$L_2 = \mu \cdot N_2^2 \frac{S}{l}$$



- ❖ Khi dòng điện I_1 biến thiên tạo ra từ thông biến thiên, từ thông này liên kết sang cuộn thứ cấp và tạo ra điện áp cảm ứng e_L trên cuộn thứ cấp theo hệ số tỉ lệ - hệ số hổ cảm M . Lượng từ thông liên kết giữa cuộn sơ cấp sang cuộn thứ cấp được đánh giá bằng hệ số ghép biến áp K

4.2. Các tham số kỹ thuật của biến áp

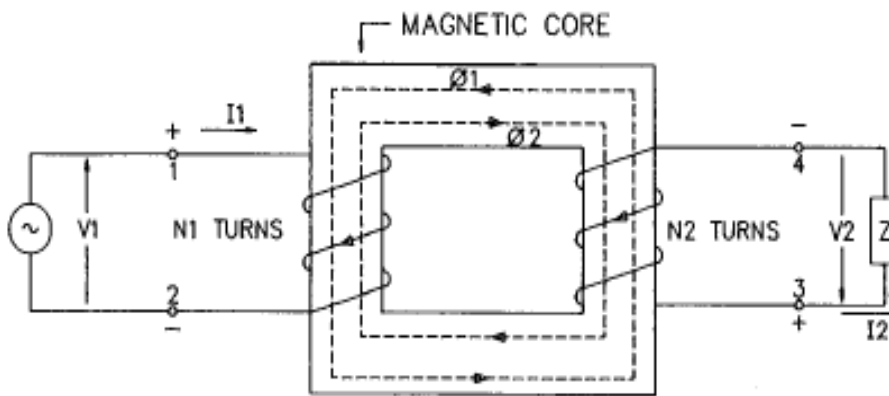
- ❖ Hệ số ghép biến áp K
- ❖ Điện áp cuộn sơ cấp và cuộn thứ cấp
- ❖ Dòng điện sơ cấp và dòng điện thứ cấp
- ❖ Hiệu suất của biến áp

a. Hệ số ghép biến áp K

$$K = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

- ❖ M - hệ số hỗ cảm của biến áp
- ❖ L1 và L2 - hệ số tự cảm của cuộn sơ cấp và cuộn thứ cấp tương ứng
- ❖ Khi K = 1 là trường hợp ghép lý tưởng, khi đó toàn bộ số từ thông sinh ra do cuộn sơ cấp được đi qua cuộn thứ cấp và ngược lại
- ❖ Thực tế, khi K ≈ 1 gọi là hai cuộn ghép chặt
K << 1 gọi là hai cuộn ghép lỏng

b. Điện áp cuộn sơ cấp và cuộn thứ cấp



- ❖ Điện áp cảm ứng ở cuộn sơ cấp và thứ cấp quan hệ với nhau theo tỉ số:

$$\frac{U_2}{U_1} = K \frac{N_2}{N_1} \approx \frac{N_2}{N_1}$$

$\frac{N_2}{N_1}$: Hệ số biến áp

- ❖ $N_1 = N_2$ thì $U_1 = U_2 \rightarrow$ biến áp 1 : 1
- $N_2 > N_1$ thì $U_2 > U_1 \rightarrow$ biến áp tăng áp
- $N_2 < N_1$ thì $U_2 < U_1 \rightarrow$ biến áp hạ áp

c. Dòng điện sơ cấp và dòng điện thứ cấp

d. Hiệu suất của biến áp

- ❖ Quan hệ giữa dòng điện ở cuộn sơ cấp và cuộn thứ cấp:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1} = K \frac{N_2}{N_1} \approx \frac{N_2}{N_1}$$

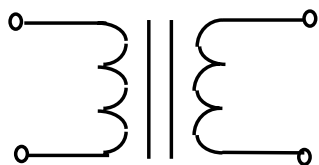
- ❖ Hiệu suất của biến áp là tỉ số giữa công suất ra và công suất vào tính theo %:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\% = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{tôn thất}}} \cdot 100\%$$

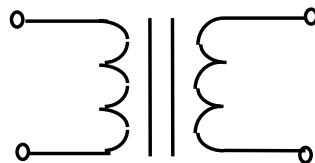
P_1 - công suất đưa vào cuộn sơ cấp
 P_2 - công suất thu được ở cuộn thứ cấp
 $P_{\text{tôn thất}}$ - CS điện mất mát do tổn thất của lõi & của dây cuốn

- ❖ Để giảm tổn hao năng lượng trong lõi sắt từ, dây đồng và từ thông rò người ta dùng loại lõi làm từ các lá sắt từ mỏng, có quét sơn cách điện, dùng dây đồng có tiết diện lớn & ghép chặt

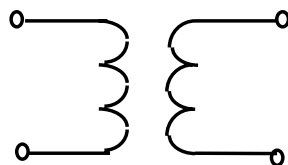
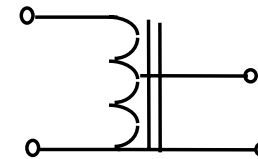
4.3. Ký hiệu của biến áp



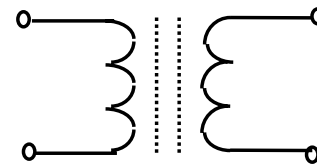
a. Biến áp âm tần



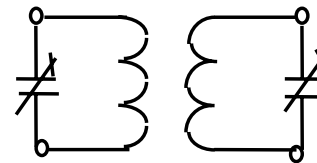
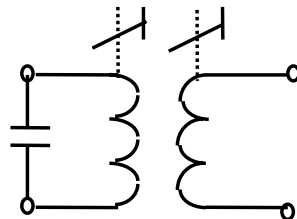
b. Biến áp nguồn lõi sắt và biến áp tự ngẫu



c. Biến áp cao tần không lõi



d. Biến áp lõi Ferit



e. Biến áp trung tần

4.4 Phân loại và ứng dụng

❖ Ứng dụng:

- biến đổi điện áp xoay chiều
- dùng để cách ly giữa mạch các mạch điện (dùng loại biến áp có hai cuộn dây sơ cấp và thứ cấp cách điện với nhau)
- biến đổi tổng trở: dùng biến áp ghép chặt
- biến áp cao tần: dùng để truyền tín hiệu có chọn lọc (dùng loại ghép lỏng)

❖ Phân loại theo ứng dụng:

- ***Biến áp cộng hưởng***
- ***Biến áp cấp điện (biến áp nguồn)***
- ***Biến áp âm tần***
- ***Biến áp xung***

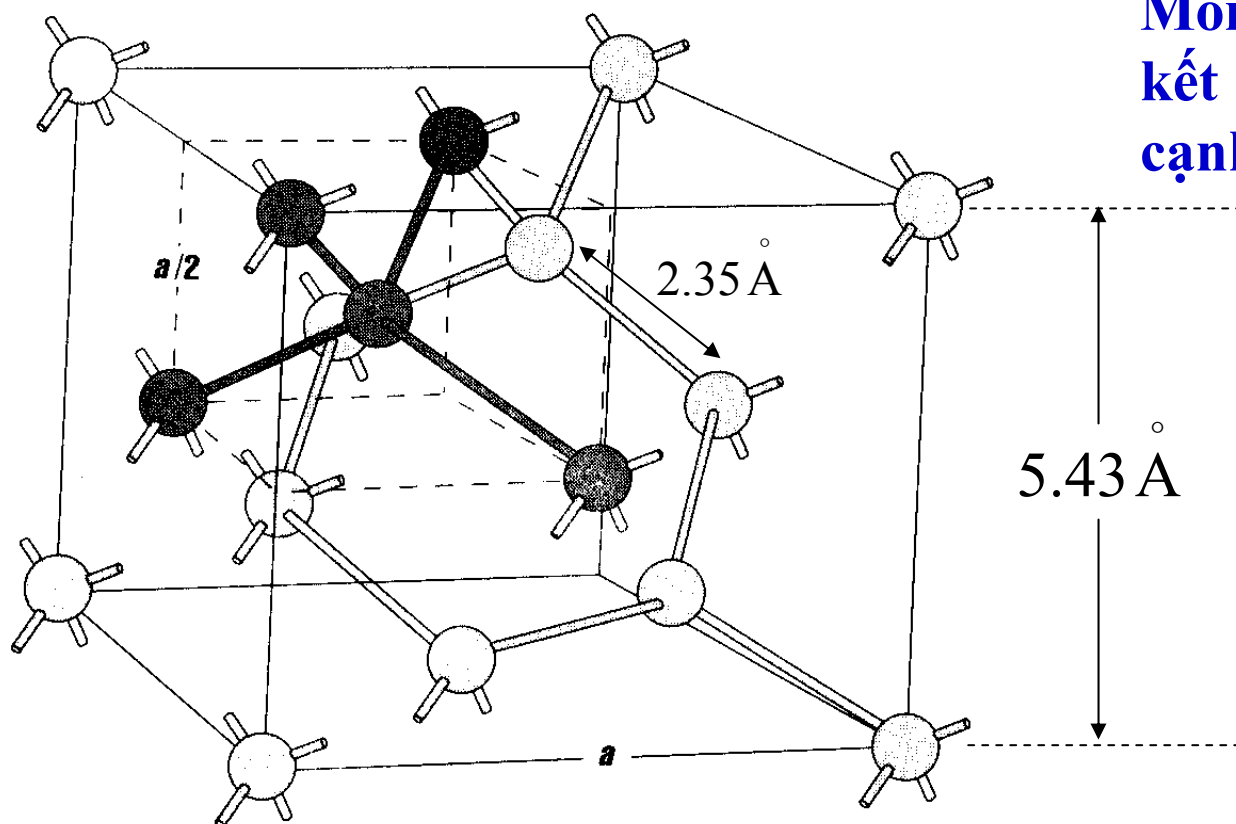
Chương 3- Chất bán dẫn (Semiconductor)

- Định nghĩa chất bán dẫn
- Cấu trúc mạng tinh thể chất bán dẫn
- Chất bán dẫn thuần
- Chất bán dẫn không thuần
- Dòng điện trong chất bán dẫn
- Độ dẫn điện của chất bán dẫn

1. Định nghĩa

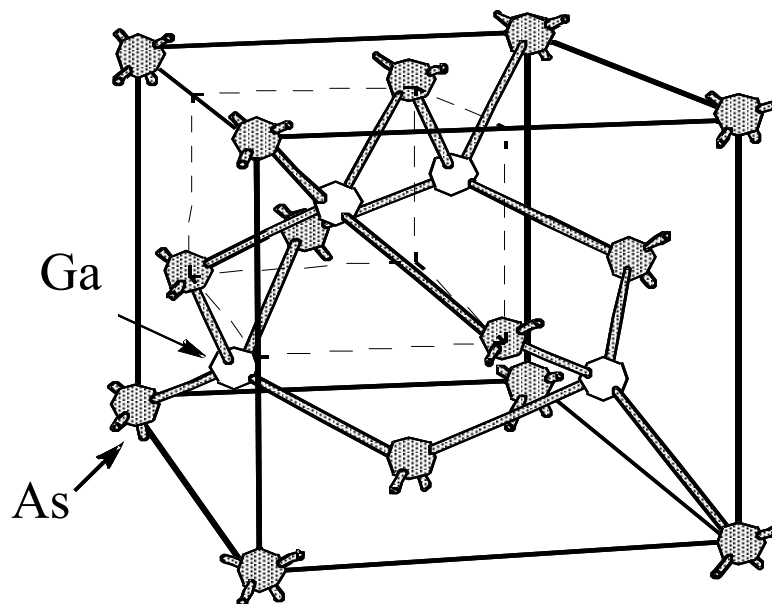
- ❖ Chất bán dẫn là vật chất có điện trở suất nằm ở giữa trị số điện trở suất của chất dẫn điện và chất điện môi khi ở nhiệt độ phòng, $\rho = 10^{-4} \div 10^7 \Omega.m$
- ❖ Chất bán dẫn là chất mà trong cấu trúc dải năng lượng có độ rộng vùng cấm là $0 < E_G < 2eV$.
- ❖ Chất bán dẫn trong tự nhiên: Bo (B), Indi (In), Gali (Ga) ở nhóm 3, Silic (Si), Gecmani (Ge) thuộc nhóm 4, Asen (As), P, Sb (Antimony) thuộc nhóm 5, Selen (Se), lưu huỳnh (S) ở nhóm 6,... hoặc hợp chất như clorua đồng (CuCl), Asenic Canxi CaAs, Oxit đồng CuO, ...
- ❖ Trong kỹ thuật điện tử hiện nay sử dụng một số chất bán dẫn có cấu trúc đơn tinh thể. Quan trọng nhất là hai nguyên tố Gecmani và Silic.
- ❖ Đặc điểm của cấu trúc mạng tinh thể này là độ dẫn điện của nó rất nhỏ khi ở nhiệt độ thấp và sẽ tăng theo lũy thừa với sự tăng của nhiệt độ và tăng gấp bội khi có trộn thêm ít tạp chất. Do đó đặc điểm cơ bản của chất bán dẫn là độ dẫn điện phụ thuộc nhiều vào nhiệt độ môi trường và nồng độ tạp chất, ngoài ra còn phụ thuộc vào ánh sáng, bức xạ ion hóa, ...

2. Cấu trúc mạng tinh thể chất bán dẫn đơn Si



Mỗi nguyên tử Si liên kết với 4 nguyên tử bên cạnh

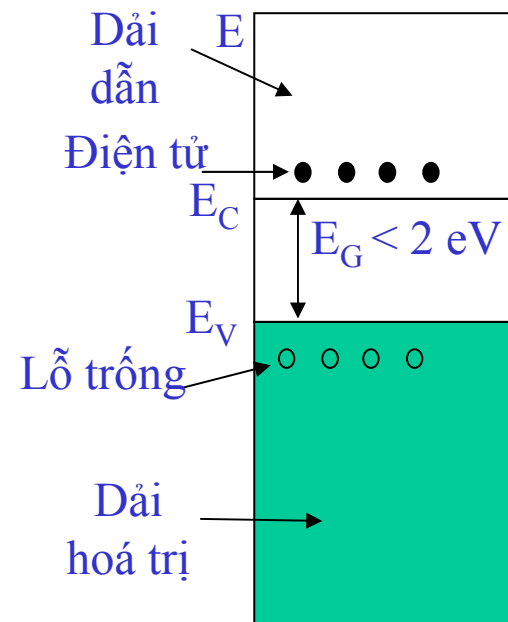
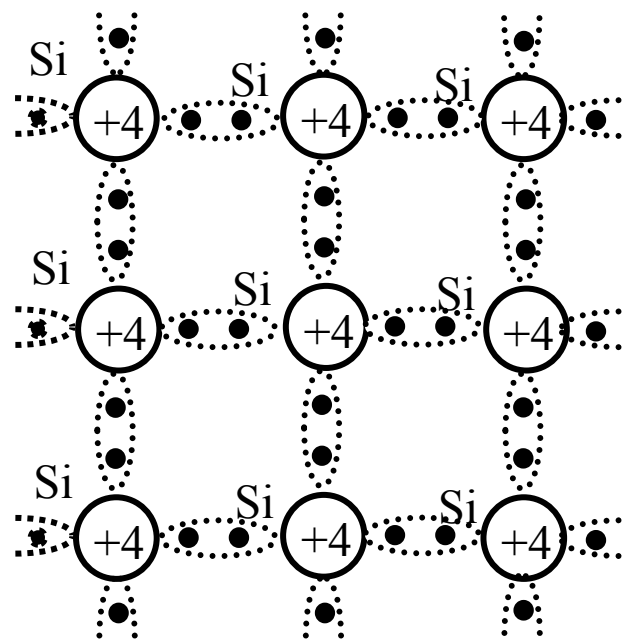
Cấu trúc mạng tinh thể của chất bán dẫn ghép



Chất bán dẫn ghép: Hợp chất của các nguyên tử thuộc phân nhóm chính nhóm III và phân nhóm chính nhóm V: GaAs, GaP, GaN,... Chúng có ứng dụng quan trọng trong các cấu kiện quang điện và IC tốc độ cao

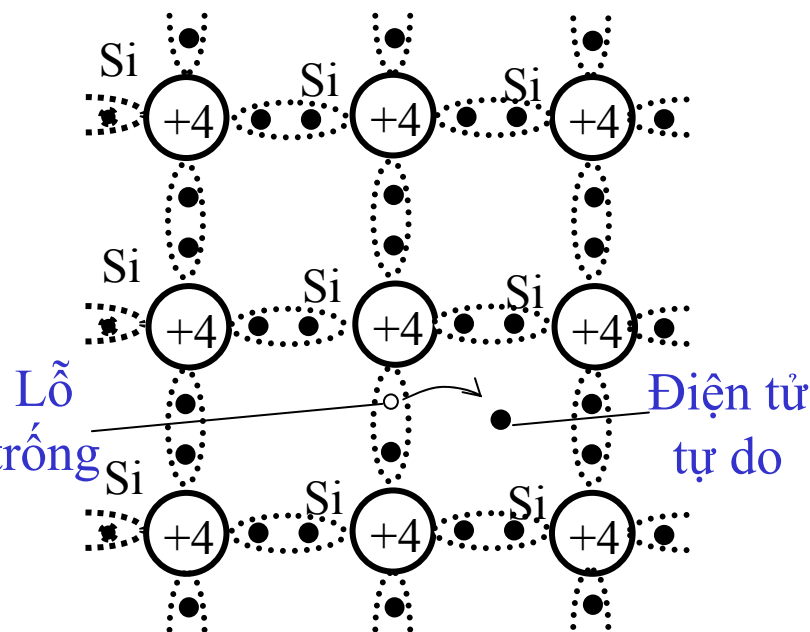
3. Chất bán dẫn thuần (Intrinsic semiconductor)

- ❖ Chất bán dẫn mà ở mỗi nút của mạng tinh thể của nó chỉ có nguyên tử của một loại nguyên tố, ví dụ như các tinh thể Ge (gemanium) Si (silic) nguyên chất ...
- ❖ VD: tinh thể Si, $E_G = 1,1\text{eV}$ (tại nhiệt độ 300^0K)



Sự tạo thành lỗ trống và điện tử tự do

- Ở nhiệt độ phòng một số liên kết cộng hóa trị bị phá vỡ tạo ra **điện tử tự do** và **lỗ trống**
- Lỗ trống cũng có khả năng dẫn điện như điện tử tự do
- Bán dẫn thuần có nồng độ hạt dẫn lỗ trống và nồng độ hạt dẫn điện tử bằng nhau: $p = n = p_i = n_i$
- Độ dẫn điện của chất bán dẫn σ :
 - μ_n - độ linh động của điện tử tự do
 - μ_p - độ linh động của lỗ trống
 - q - điện tích của điện tử $q=1,6 \cdot 10^{-19}C$
- J - mật độ dòng điện khi chất bán dẫn đặt trong điện trường ngoài E :



$$\sigma = (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \cdot q$$

$$J = (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \cdot q \cdot E = \sigma \cdot E$$

Các thuật ngữ

- Nồng độ điện tử tự do trong chất bán dẫn (Electron Concentration):
 n [cm^{-3}] - số lượng điện tử tự do trong một đơn vị thể tích chất bán dẫn (n_i , n_n , n_p)
- Nồng độ lỗ trống trong chất bán dẫn (Hole Concentration): p [cm^{-3}] - số lượng lỗ trống trong một đơn vị thể tích chất bán dẫn (p_i , p_n , p_p)
- Độ linh động của điện tử tự do (Electron Mobility): μ_n [$\text{cm}^2/(\text{V.s})$] – Tham số xác định mức độ phân tán của điện tử trong chất bán dẫn, tỉ lệ thuận với vận tốc khuếch tán của điện tử và cường độ trường điện từ, cũng như tỉ lệ giữa nồng độ điện tử và độ dẫn điện của chất bán dẫn
- Độ linh động của lỗ trống (Hole Mobility) : μ_p [$\text{cm}^2/(\text{V.s})$] - Tham số xác định mức độ phân tán của lỗ trống trong chất bán dẫn, tỉ lệ thuận với vận tốc khuếch tán của lỗ trống và cường độ trường điện từ, cũng như tỉ lệ giữa nồng độ lỗ trống và độ dẫn điện của chất bán dẫn
- Độ dẫn điện (Electrical conductivity): σ [$\Omega.\text{m}$] $^{-1}$ - tham số đo khả năng dẫn dòng điện thông qua một đơn vị vật liệu, $\sigma = 1/\rho$

Quá trình tạo hạt tải điện và quá trình tái hợp

- ❖ Quá trình tạo ra hạt tải điện trong chất bán dẫn thuần:
 - do **năng lượng nhiệt** “*thermal generation*”
 - do năng lượng quang học “*optical generation*”
- ❖ Quá trình tái hợp giữa điện tử tự do và lỗ trống và giải phóng năng lượng 2 theo cách:
 - Tạo ra nhiệt lượng làm nóng chất bán dẫn: “**thermal recombination**”- Tái hợp toả nhiệt
 - Phát xạ ra photon ánh sáng : “**optical recombination**”- Tái hợp phát quang

“**Optical recombination**” rất hiếm xảy ra trong trong chất bán dẫn thuần Si, Ge mà chủ yếu xảy ra trong các loại vật liệu bán dẫn ghép
- ❖ Quá trình tạo và tái hợp liên tục xảy ra trong chất bán dẫn, và đạt trạng thái **cân bằng** khi tốc độ của 2 quá trình đó bằng nhau

- Tốc độ tạo hạt tải điện phụ thuộc vào T nhưng lại độc lập với n và p - nồng độ của điện tử tự do và của lỗ trống :

$$G = G_{thermal}(T) + G_{optical}$$

- Trong khi đó tốc độ tái hợp lại tỷ lệ thuận với cả n và p

$$R \propto np$$

- Trạng thái ổn định xảy ra khi tốc độ tạo và tái hợp cân bằng

$$G = R \quad \Rightarrow \quad np = f(T)$$

- Nếu trong trường hợp không có các nguồn quang và nguồn điện trường ngoài, trạng thái ổn định được gọi là trạng thái **cân bằng nhiệt** “**thermal equilibrium**”

$$np = n_i^2(T)$$

Hàm phân bố Fermi-Dirac

- Xét một hệ gồm nhiều hạt giống hệt nhau có thể nằm trên nhiều mức năng lượng khác nhau → hàm phân bố, bởi vì để xét các tính chất khác nhau của hệ trước hết ta cần phải biết các hạt này phân bố theo các mức năng lượng trên như thế nào?
- Xét hệ gồm N điện tử tự do nằm ở trạng thái cân bằng nhiệt tại nhiệt độ T. Phân bố các điện tử đó tuân theo nguyên lý loại trừ Pauli. Tìm phân bố của các điện tử theo các mức năng lượng?
- Áp dụng nguyên lý năng lượng tối thiểu: “xác suất để một hệ gồm N hạt giống hệt nhau nằm trong trạng thái năng lượng E tỷ lệ nghịch với E theo hàm mũ exp, cụ thể là:

$$P_N(E) \sim \exp(-E/kT)$$

Hàm phân bố Fermi-Dirac (1)

➤ Xác suất mức năng lượng E [eV] bị điện tử lấp đầy tại nhiệt độ T tuân theo hàm phân bố Fermi-Dirac:

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{KT}\right) + 1}$$

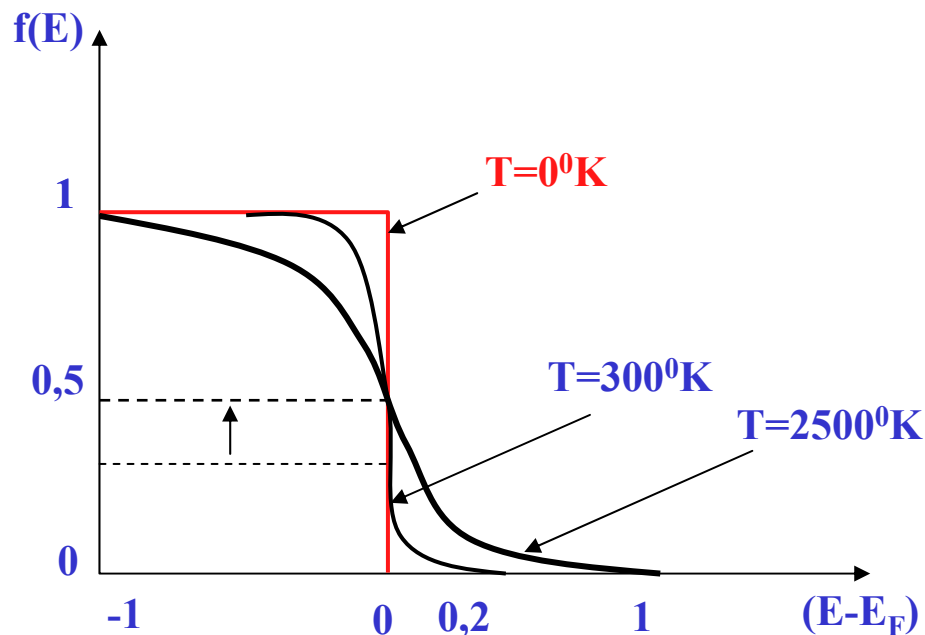
K : Hằng số Boltzmann (eV/°K)

$$K = 8,62 \times 10^{-5} \text{ eV/}^\circ\text{K}$$

T - Nhiệt độ đo bằng °K

E_F - Mức Fermi (eV)

➤ E_F - mức năng lượng Fermi là mức năng lượng lớn nhất còn bị e^- lấp đầy tại $T=0^\circ\text{K}$



Hàm phân bố Fermi-Dirac (2)

$$f(E) = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - E_F}{KT}\right) + 1}$$

T = 0⁰K

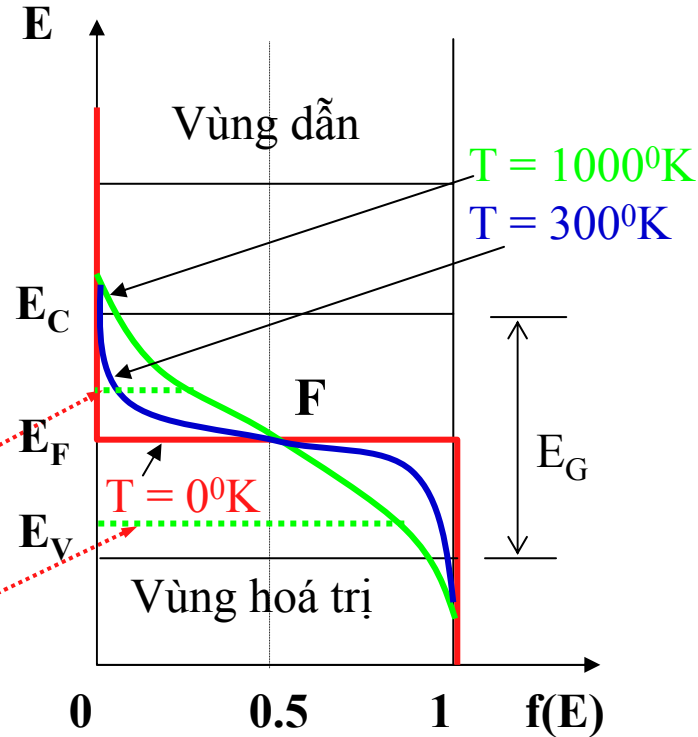
E > E_F ⇒ f(E) = 0 **E < E_F ⇒ f(E) = 1**

T > 0⁰K (T=300⁰K; KT=26.10⁻³eV)

E - E_F >> KT ⇒ f(E) ≈ e^{(E_F-E)/KT}

E - E_F << -KT ⇒ f(E) ≈ 1 - e^{(E-E_F)/KT}

$$f(E_F) = \frac{1}{2} \quad \forall T$$



E_C [eV]- Đáy của vùng dẫn
 E_V [eV]- Đỉnh của vùng hóa trị
 E_F [eV]- Mức năng lượng Fermi

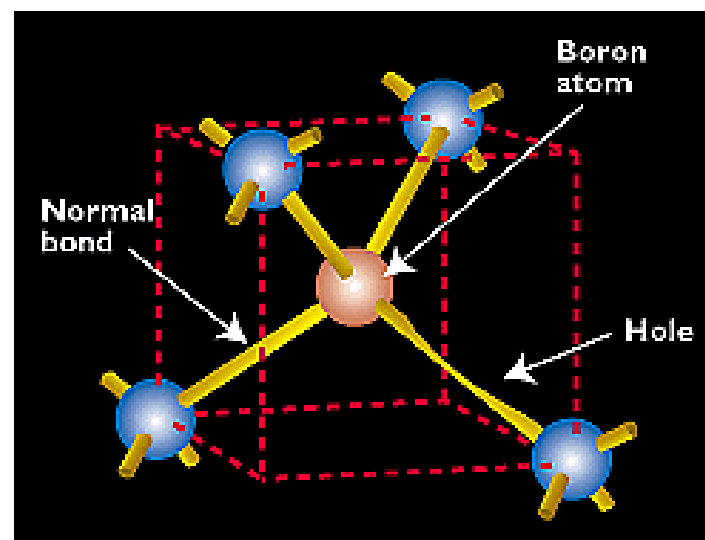
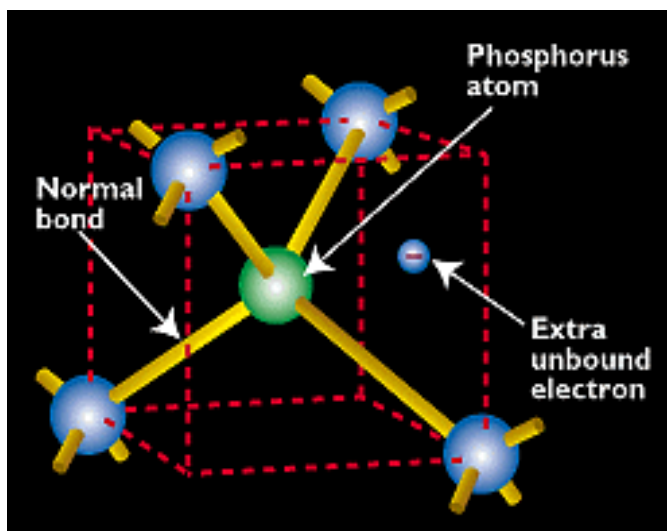
4. Chất bán dẫn không thuần

❖ Chất bán dẫn mà một số nguyên tử ở nút của mạng tinh thể của nó được **thay thế** bằng nguyên tử của **chất khác** gọi là chất bán dẫn không thuần. Có hai loại chất bán dẫn không thuần:

- Chất bán dẫn không thuần **loại N** – gọi tắt là Bán dẫn loại N
- Chất bán dẫn không thuần **loại P** – gọi tắt là Bán dẫn loại P

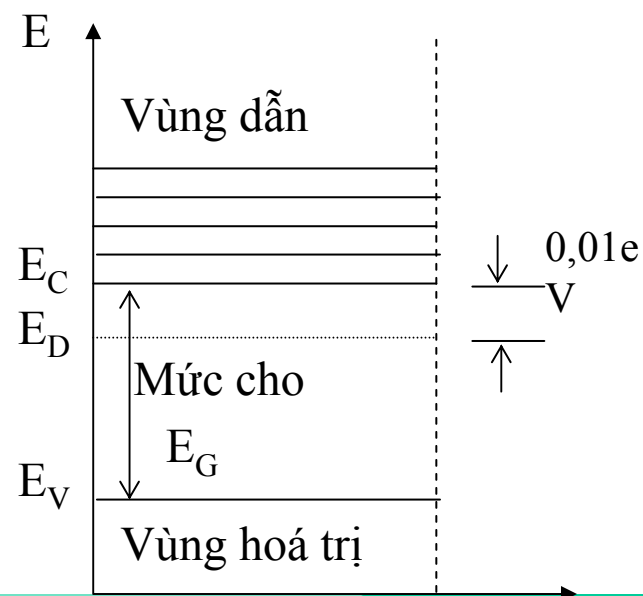
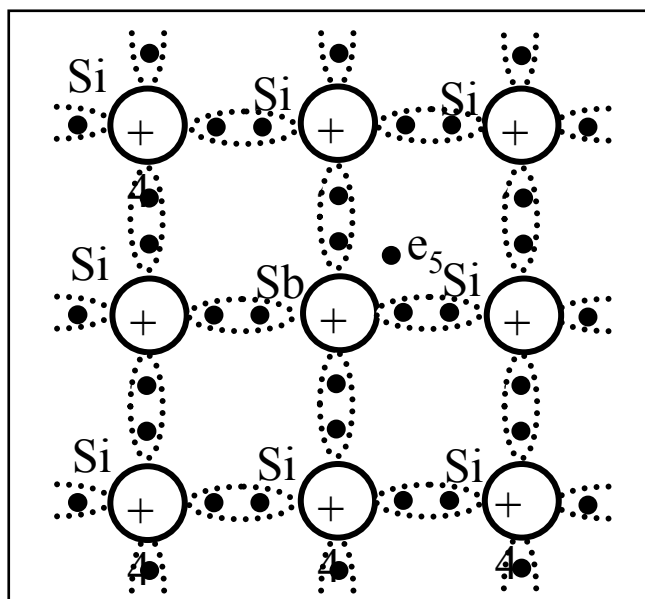
Donors: P, As, Sb

Acceptors: B, Al, Ga, In



a. Chất bán dẫn loại N (1)

- Thêm một ít tạp chất là nguyên tố thuộc nhóm 5 (As, P, Sb...) vào chất bán dẫn thuần Ge (Si). Trong nút mạng nguyên tử tạp chất sẽ đưa 4 điện tử trong 5 điện tử hóa trị của nó tham gia vào liên kết cộng hóa trị với 4 nguyên tử Ge (hoặc Si) ở bên cạnh; còn điện tử thứ 5 sẽ thừa ra và liên kết của nó trong mạng tinh thể là rất yếu, ở nhiệt độ phòng cũng dễ dàng tách ra trở thành điện tử tự do trong tinh thể và nguyên tử tạp chất cho điện tử trở thành các ion dương cố định



a. Chất bán dẫn loại N (2)

- Nồng độ điện tử tự do trong chất bán dẫn loại N **tăng nhanh** nhưng tốc độ tái hợp tăng nhanh nên nồng độ lỗ trống **giảm xuống** nhỏ hơn nồng độ có thể có trong bán dẫn thuần
- Trong chất bán dẫn loại N, nồng độ hạt dẫn điện tử (n_n) nhiều hơn nhiều nồng độ lỗ trống p_n và điện tử được gọi là **hạt dẫn đa số**, lỗ trống được gọi là **hạt dẫn thiểu số**.

$$n_n \gg p_n$$

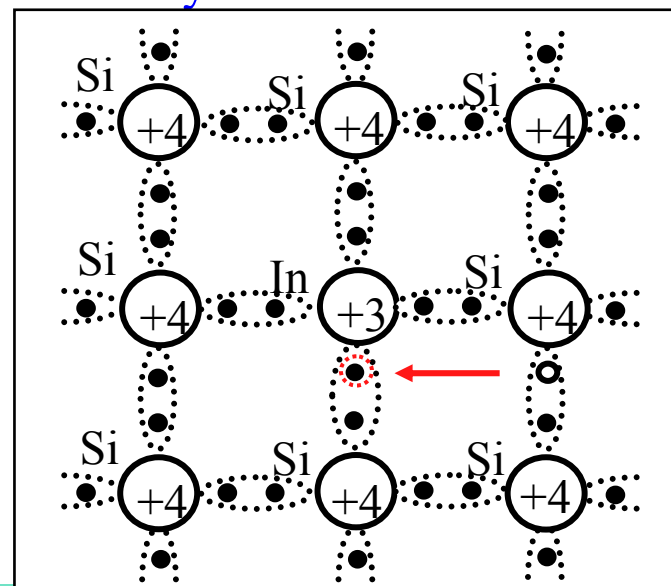
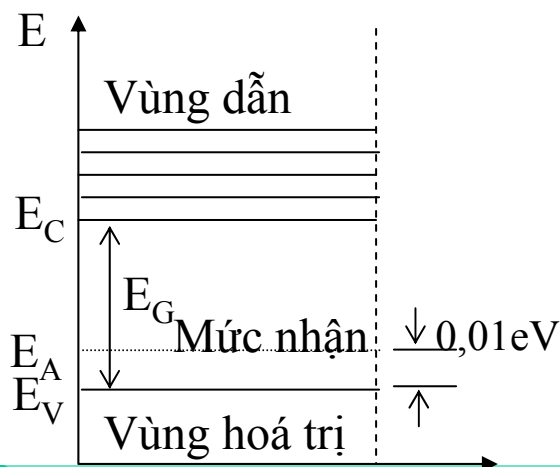
$$n_n = N_d + p_n \approx N_d$$

$$p_n = \frac{n_i^2}{n_n} = \frac{n_i^2}{N_d}$$

N_d – Nồng độ ion nguyên tử tạp chất cho (Donor)

b. Chất bán dẫn loại P

- Thêm một ít tạp chất là nguyên tố thuộc **nhóm 3** (In, Bo, Ga...) vào chất bán dẫn thuần Ge (Si). Trong nút mạng, nguyên tử tạp chất chỉ có 3 điện tử hóa trị đưa ra tạo liên kết cộng hóa trị với 3 nguyên tử Ge (Si) ở bên cạnh, mỗi liên kết thứ 4 để trống và tạo thành một lỗ trống. Điện tử của mỗi liên kết gần đó có thể nhảy sang để hoàn chỉnh mỗi liên kết thứ 4 còn để trống đó. Nguyên tử tạp chất vừa nhận thêm điện tử sẽ trở thành ion âm và ngược lại ở nguyên tử Ge/Si vừa có 1 điện tử chuyển đi sẽ tạo ra một **lỗ trống** và nguyên tử này sẽ trở thành **ion dương cố định**



b. Chất bán dẫn loại P

- Nồng độ lỗ trống trong chất bán dẫn loại P **tăng nhanh** nhưng tốc độ tái hợp tăng nhanh nên nồng độ điện tử tự do **giảm xuống** nhỏ hơn nồng độ có thể có trong bán dẫn thuần
- Trong chất bán dẫn loại P, nồng độ hạt dẫn lỗ trống (p_p) nhiều hơn nhiều nồng độ điện tử tự do n_p và **lỗ trống** được gọi là hạt dẫn đa số, **điện tử tự do** được gọi là hạt dẫn thiểu số

$$p_p \gg n_p$$
$$p_p = N_a + n_p \approx N_a$$

$$n_p = \frac{n_i^2}{p_p} = \frac{n_i^2}{N_a}$$

N_a – Nồng độ ion nguyên tử tạp chất nhận (Acceptor)

Nồng độ hạt tải điện trong bán dẫn không thuần (1)

- ❖ Thực tế Silicon thường được pha tạp cả chất Donor và Acceptor. Giả sử nồng độ pha tạp tương ứng là N_d, N_a .
- ❖ Để tạo thành bán dẫn N thì $N_d > N_a$, điện tử cho của nguyên tử Donor sẽ ion hóa tất cả các nguyên tử Acceptor để hoàn thành liên kết còn thiếu điện tử \rightarrow quá trình bù “Compensation”. Điện tích trong chất bán dẫn N trung hòa nên: $N_d - N_a + p - n = 0$

$$\rightarrow n_n = \frac{(N_d - N_a)}{2} + \frac{(N_d - N_a)}{2} \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{(N_d - N_a)^2}}$$

- ❖ Nếu $N_d \gg N_a$ nên $N_d - N_a \gg n_i$ thì có thể tính gần đúng nồng độ các loại hạt tải điện như sau:

$$n \cong N_d - N_a; \quad p \cong \frac{n_i^2}{N_d - N_a}$$

Nồng độ hạt tải điện trong bán dẫn không thuần (2)

- ❖ Tương tự để tạo thành bán dẫn P thì $N_a > N_d$, trong bán dẫn cũng xảy ra quá trình bù, tính toán tương tự ta có nồng độ lỗ trống trong trường hợp này được tính như sau:

$$p_p = \frac{(N_a - N_d)}{2} + \frac{(N_a - N_d)}{2} \sqrt{1 + \frac{4n_i^2}{(N_a - N_d)^2}}$$

- ❖ Nếu $N_a \gg N_d$ nên $N_a - N_d \gg n_i$ thì có thể tính gần đúng nồng độ các loại hạt tải điện như sau:

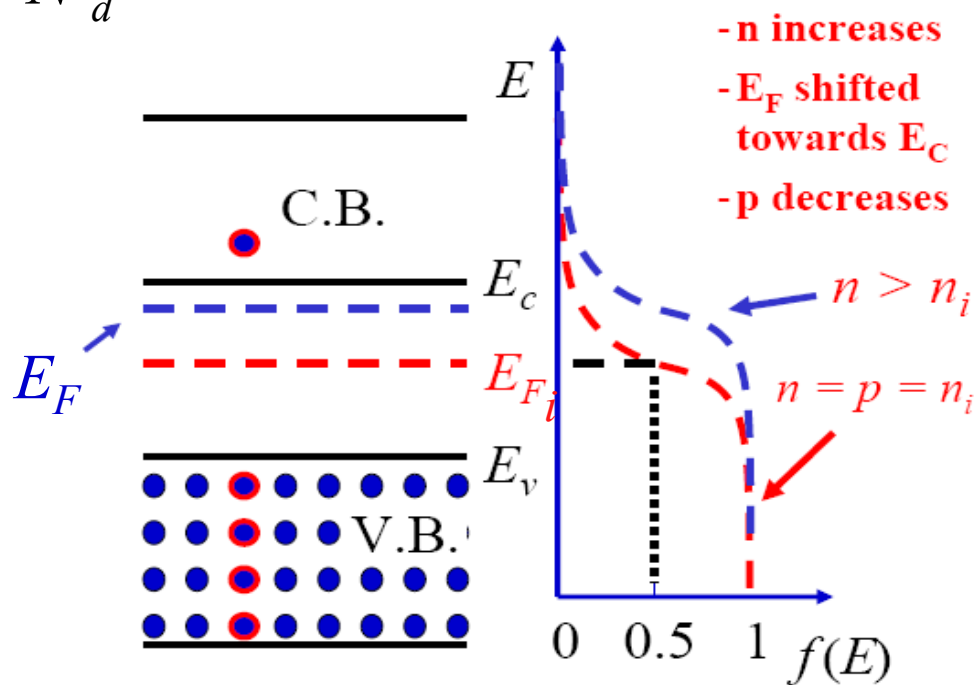
$$p_p \cong N_a - N_d \quad n_p \cong \frac{n_i^2}{N_a - N_d}$$

Mức Fermi trong chất bán dẫn không thuần (1)

➤ Mức Fermi trong chất bán dẫn N (N_d càng tăng mức Fermi càng tiến gần tới đáy của dải dẫn):

$$n_n = N_C \cdot e^{(E_F - E_C)/KT} = N_d$$

$$\rightarrow E_F = E_C - KT \ln \frac{N_C}{N_d}$$

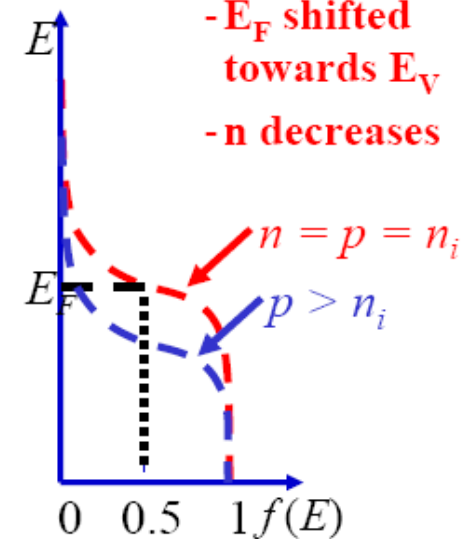
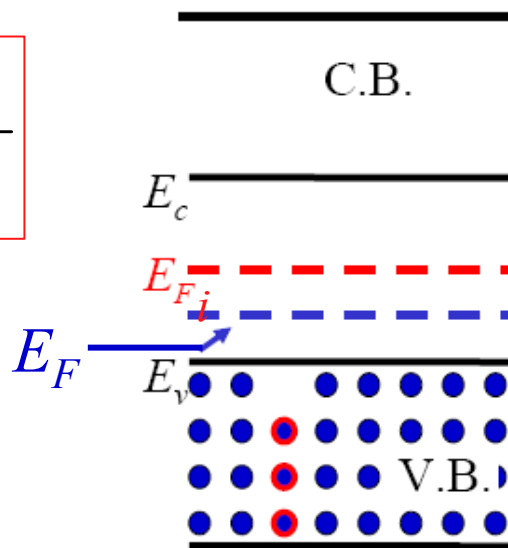


Mức Fermi trong chất bán dẫn không thuần (2)

➤ Mức Fermi trong chất bán dẫn P (N_a càng tăng mức Fermi càng tiến gần xuống đỉnh của dải hóa trị):

$$p = N_V \cdot e^{(E_V - E_F)/KT} = N_a$$

$$\rightarrow E_F = E_V + KT \ln \frac{N_V}{N_a}$$

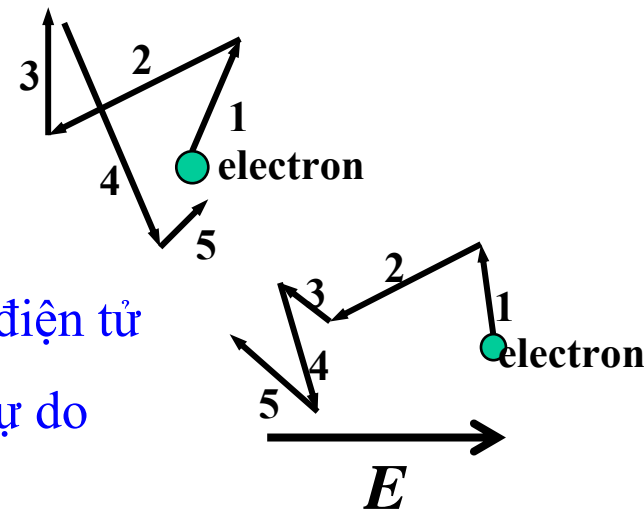


5. Dòng điện trong chất bán dẫn (1)

- Dòng điện khuếch tán:** tạo ra do sự chuyển động **ngẫu nhiên** do nhiệt của các hạt tải điện (thường có giá trị trung bình =0) và **sự khuếch tán** các hạt tải điện từ vùng có **mật độ cao** sang vùng có **mật độ thấp** hơn:

$$J_{diff(n)} = q \cdot D_n \frac{dn}{dx} \quad J_{diff(p)} = -q \cdot D_p \frac{dp}{dx}$$

D_p, D_n [m²/sec] - là hệ số khuếch tán của lỗ trống; điện tử
 $dp/dx, dn/dx$ gradient nồng độ lỗ trống và điện tử tự do



- Dòng điện trôi (Dòng điện cuốn):** Dòng chuyển dịch của các hạt tải điện do **tác động** của điện trường E:

$$J_{drift} = J_{drift(n)} + J_{drift(p)} = \sigma \cdot E = q(n\mu_n + p\mu_p) \cdot E$$

5. Dòng điện trong chất bán dẫn (2)

- Dòng tổng cộng trong chất bán dẫn:

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_{\text{drift}} + \mathbf{J}_{\text{diff}} = \mathbf{J}_n + \mathbf{J}_p$$

$$J_n = J_{\text{drift}(n)} + J_{\text{diff}(n)} = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = J_{\text{drift}(p)} + J_{\text{diff}(p)} = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$

- **“Einstein Relation”**: Độ linh động μ và hệ số khuếch tán D được xác theo mô hình vật lý dựa trên cơ sở một số lượng lớn hạt tải chịu những chuyển động nhiệt ngẫu nhiên với sự va chạm thường xuyên, 2 hằng số này tỉ lệ với nhau theo “Einstein Relation” như sau:

$$\frac{D}{\mu} = \frac{kT}{q}$$

- **Điện áp nhiệt “Thermal Voltage”**:

$$V_{th} = \frac{kT}{q}$$

k - hằng số Boltzmann, $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ [J/°K]
 q [C] – điện tích hạt tải, T [°K]

6. Độ dẫn điện của chất bán dẫn

- Độ dẫn điện của chất bán dẫn khi có cả 2 hạt tải điện tham gia:

$$\sigma = q(n\mu_n + p\mu_p)$$

- Với bán dẫn loại n, $n \gg p$, độ dẫn điện là: $\sigma_n = qN_D\mu_n \quad [(\Omega.m)^{-1}]$
- Với bán dẫn loại p, $p \gg n$, độ dẫn điện là: $\sigma_p = qN_A\mu_p \quad [(\Omega.m)^{-1}]$
- Tạp chất càng nhiều thì điện trở suất càng giảm, tuy nhiên độ linh động μ_n và μ_p lại giảm khi nồng độ chất pha tạp tăng, như vậy cơ chế dẫn điện trong vùng pha tạp mạnh tương đối phức tạp
- Nồng độ giới hạn các nguyên tử tạp chất muốn đưa vào tinh thể bán dẫn được quyết định bởi giới hạn hòa tan của tạp chất ấy. Nếu vượt quá giới hạn này thì hiện tượng kết tủa sẽ xảy ra, khi đó tạp chất sẽ không còn có các tính chất như mong muốn nữa

Tổng kết

- Chất bán dẫn thuần, không thuần
- Hàm phân bố Fermi-Dirac, Mức Fermi...
- Nồng độ hạt tải trong chất bán dẫn:

$$n \cdot p = n_i^2 = p_i^2$$

$$p = n_i e^{(E_{Fi} - E_F) / kT}$$

$$n = n_i e^{(E_F - E_{Fi}) / kT}$$

- Mức Fermi trong chất bán dẫn thay đổi theo nồng độ pha tạp
- Chất bán dẫn thuần có độ dẫn điện nhỏ, chất bán dẫn không thuần độ dẫn điện lớn

$$\sigma = q(n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p)$$

$$J_n = J_{drift(n)} + J_{diff(n)} = qn\mu_n E + qD_n \frac{dn}{dx}$$

$$J_p = J_{drift(p)} + J_{diff(p)} = qp\mu_p E - qD_p \frac{dp}{dx}$$

$$J = J_n + J_p$$

$$D_n = \mu_n \frac{kT}{q}$$

$$D_p = \mu_p \frac{kT}{q}$$

$$V_{th} = \frac{kT}{q}$$

Chương 5- Điốt (Diode)

Điốt bán dẫn

3.0 Giới thiệu chung

3.1 Cấu tạo của điốt và kí hiệu trong sơ đồ mạch

3.2 Nguyên lý hoạt động của điốt

3.3 Đặc tuyến Vôn-Ampe của điốt bán dẫn

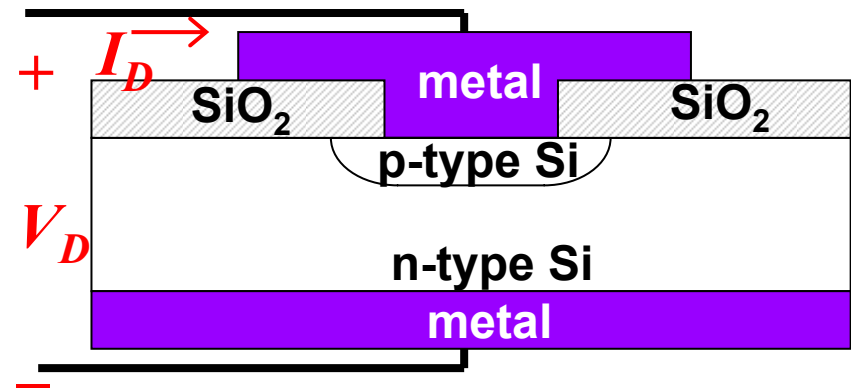
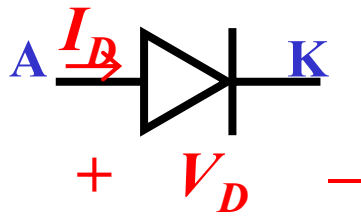
3.4 Các tham số tĩnh của điốt

3.5 Sự phụ thuộc của đặc tuyến Vôn- Ampe vào nhiệt độ

3.6 Phân loại điốt

3.7 Ứng dụng của điốt

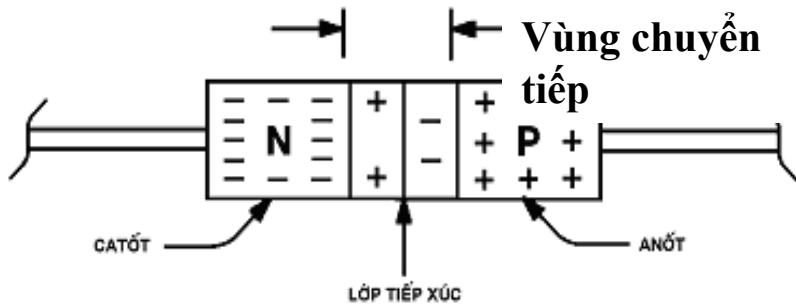
3.0 Giới thiệu chung



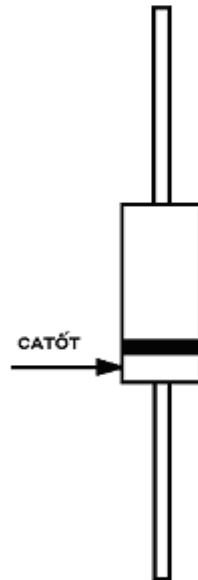
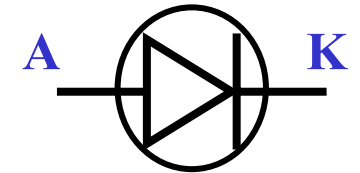
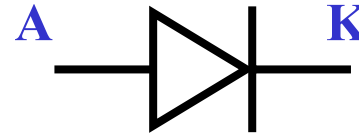
- Điốt bán dẫn là cấu kiện điện tử có một chuyển tiếp p-n
- Theo công nghệ chế tạo cấu kiện bán dẫn, người ta lấy một mẫu tinh thể bán dẫn loại p có nồng độ pha tạp N_A , sau đó cho khuếch tán vào mẫu bán dẫn đó tạp chất Donor với nồng độ $N_D > N_A$ từ một phía bề mặt tinh thể với độ sâu phụ thuộc vào quá trình khuếch tán tạo ra một lớp bán dẫn n có nồng độ pha tạp $N'_D = N_D - N_A$ tạo thành tiếp giáp PN

- ❖ Nguyên lý làm việc dựa trên các hiệu ứng vật lý của chuyển tiếp PN:
- **Điốt chỉnh lưu:** dựa vào hiệu ứng chỉnh lưu của chuyển tiếp PN
- **Điốt ổn áp Zener:** Dựa vào hiệu ứng đánh thủng thác lũ và đánh thủng Zener
- **Điốt ngược, Điốt tunen:** Dựa vào hiệu ứng xuyên hầm trên chuyển tiếp PN pha tạp nhiều
- **Điốt Varicap:** Dựa vào hiệu ứng điện dung của chuyển tiếp PN thay đổi khi điện áp phân cực ngược thay đổi
- ❖ Nguyên lý làm việc, đặc tuyến V-A, ứng dụng của mỗi loại điốt là rất khác nhau

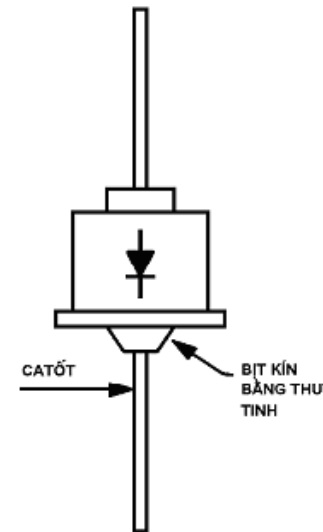
3.1 Cấu tạo và kí hiệu của điốt chỉnh lưu



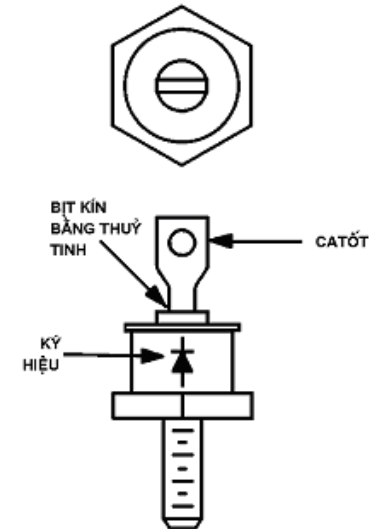
(a) CẤU TRÚC ĐIỐT



(a) ĐIỐT 1A VỎ NHỰA
ĐIỂN HÌNH

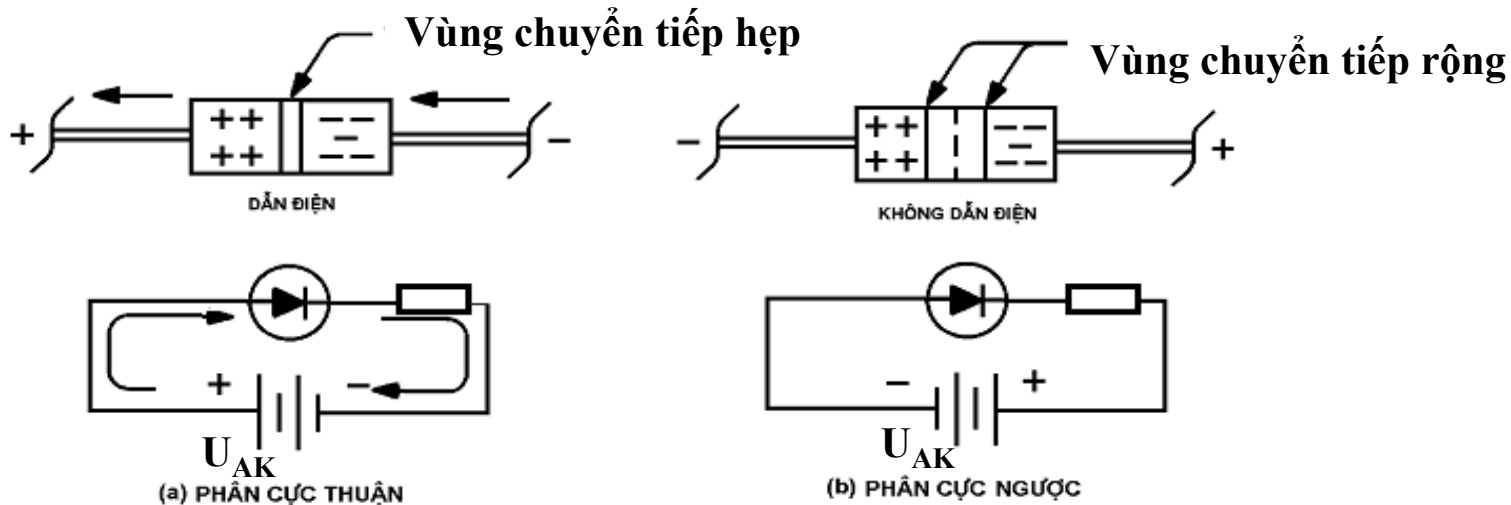


(b) ĐIỐT 3A VỎ KIM LOẠI
ĐIỂN HÌNH



(c) ĐIỐT 30A VỎ KIM LOẠI
ĐIỂN HÌNH

3.2 Nguyên lý hoạt động của điôt



- **Phân cực thuận ($U_{AK} > 0$):** thúc đẩy các e^- trong bán dẫn n và các lỗ trống trong bán dẫn p tái hợp với các ion gần đường bao của vùng chuyển tiếp và làm giảm độ rộng của vùng chuyển tiếp. Thông thường $U_{AK} < 1V$
- **Phân cực ngược ($U_{AK} < 0$):** số lượng các ion dương trong vùng chuyển tiếp của bán dẫn n tăng lên do một số lượng lớn các e^- tự do bị kéo về cực (+) của điện áp cung cấp. Số lượng các ion âm trong vùng chuyển tiếp của bán dẫn p cũng tăng lên. Vùng chuyển tiếp được mở rộng. Dòng điện trong đk phân cực ngược - dòng bão hoà ngược I_s

3.3 Đặc tuyến Vôn-Ampe của điôt bán dẫn

$$I_D = f(U_{AK}) = I_S \left(e^{U_D / \eta U_{th}} - 1 \right)$$

- U_T - Điện áp ngưỡng của điôt (Đ/áp thông thuận)

$$U_T = 0,5V - 0,8V \text{ (điôt Si)}$$

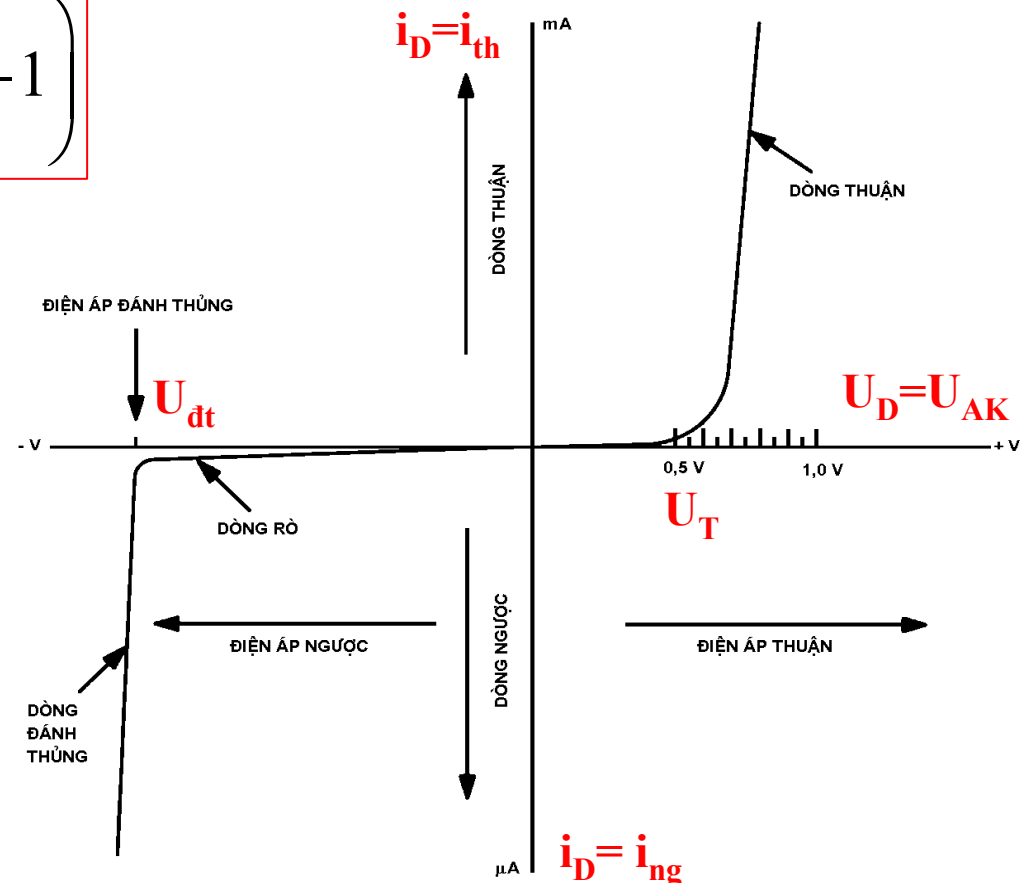
$$= 0,2 - 0,4V \text{ (điôt Ge)}$$

- U_{th} - điện áp nhiệt

- η - hệ số phát xạ:

$$\eta = 1 \div 2 \text{ đối với điôt Si}$$

$$\eta \approx 1 \text{ đối với điôt Ge, GaAs}$$



Cơ chế đánh thủng trong chuyển tiếp PN

- Dòng phân cực ngược rất nhỏ, nhưng khi Ungược đặt trên chuyển tiếp PN tăng vượt qua một giá trị nhất định dòng ngược sẽ tăng đột ngột → hiện tượng đánh thủng, hiện tượng này có thể làm hỏng dụng cụ nhưng có một số loại dụng cụ hoạt động dựa trên cơ chế này
- Hai cơ chế đánh thủng chuyển tiếp PN:
 - **Cơ chế thác lũ:** Ungược tăng → E trong miền điện tích không gian tăng, hạt dẫn thiểu số bị cuốn qua điện trường có động năng ngày càng lớn, khi chuyển động chúng va đập với các nguyên tử làm bắn ra điện tử lớp ngoài của chúng, số điện tử tự do mới phát sinh do va chạm này cũng được điện trường mạnh gia tốc và tiếp tục đập vào các NT mới làm bắn ra điện tử tự do. Hiện tượng này xảy ra liên tục và nhanh → số hạt dẫn trong bán dẫn tăng đột ngột, điện trở suất chuyển tiếp giảm đi, dòng qua chuyển tiếp PN tăng đột ngột
 - **Cơ chế xuyên hầm:** E ngược tăng lên cung cấp năng lượng cho các điện tử lớp ngoài cùng của NT bán dẫn, nếu các điện tử này có năng lượng đủ lớn chúng tách ra khỏi NT tạo thành điện tử tự do, NT bị ion hóa. Nếu điện trường ngược đủ lớn hiện tượng ion hóa xảy ra nhiều dẫn đến số lượng hạt dẫn trong bán dẫn tăng đột ngột, làm cho dòng ngược tăng nhanh

3.4 Tham số cơ bản của điốt (1)

a. *Điện trở một chiều hay còn gọi là điện trở tĩnh (R_o)*

Là điện trở của điốt khi làm việc ở chế độ nguồn một chiều hoặc tại chế độ tĩnh (tại điểm làm việc tĩnh trên đặc tuyến)

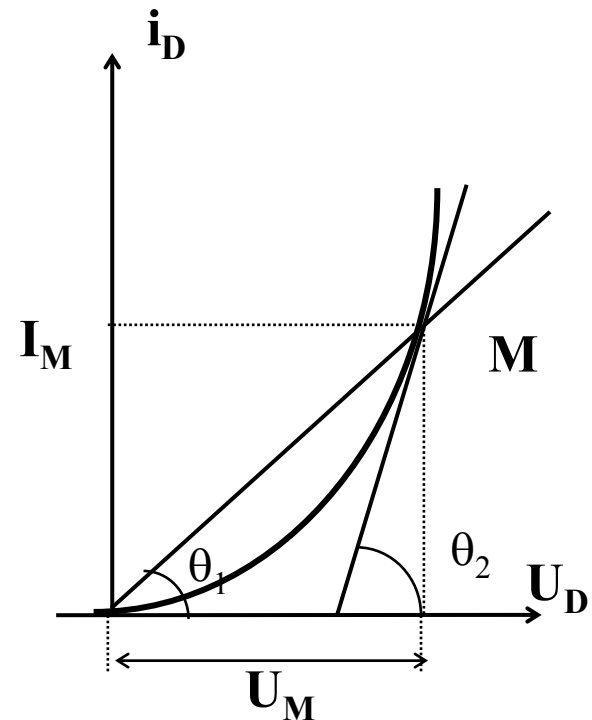
$$R_o = \frac{U_M}{I_M} = \cot \theta_1$$

b. *Điện trở động (R_i):*

$$R_i = \frac{dU}{dI} \rightarrow R_i = \frac{\eta V_{th}}{\frac{U}{I_0 e^{\eta V_{th}}}} = \frac{\eta V_{th}}{I_M + I_0}$$

Do ở chế độ phân cực thuận $I_M \gg I_0$ và $\frac{U}{\eta V_{th}} \gg 1$

$$R_i = \frac{\eta V_{th}}{I_M}$$



3.4 Tham số cơ bản của điốt (2)

c. Hệ số chỉnh lưu: k

Là thông số đặc trưng độ phi tuyến của điốt và được xác định bằng biểu thức sau:

$$k = \frac{I_{th}}{I_0} = \frac{R_{0nguc}}{R_{0thuan}}$$

d. Điện dung chuyển tiếp: C_0

Điện dung chuyển tiếp PN khi phân cực ngược

e. Điện áp ngược cực đại cho phép: $U_{nguc\ max}$

Là giá trị điện áp ngược lớn nhất có thể đặt lên điốt mà nó vẫn làm việc bình thường. Thông thường trị số này được chọn khoảng $0,8U_{đ.t}$.

Điện áp ngược cực đại $U_{ng. ma x}$ được xác định bởi kết cấu của điốt và nó nằm trong khoảng vài V đến 10.000 V

3.4 Tham số cơ bản của điôt (3)

f. Khoảng nhiệt độ làm việc:

Là khoảng nhiệt độ đảm bảo điôt làm việc bình thường. Tham số này quan hệ với công suất tiêu tán cho phép của điôt

$$P_{ttmax} = I_{max} U_{AKmax}$$

Điôt Ge : - 60°C đến +85°C

Điôt Si : - 60°C đến +150°C.

3.5. Các mô hình tương đương của điốt

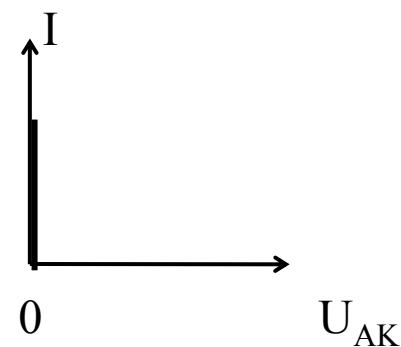
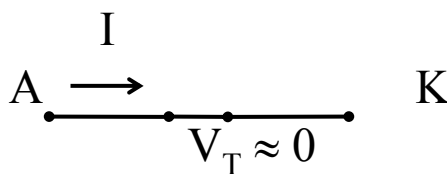
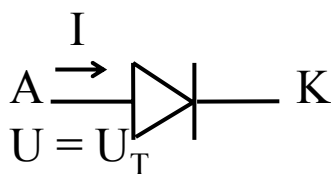
➤ 3.5.1. Mô hình tương đương trong chế độ một chiều và xoay chiều tín hiệu lớn:

- a. Các mô hình tương đương của điốt phân cực thuận
- b. Các mô hình tương đương của điốt phân cực ngược

3.5.2 Mô hình tương đương xoay chiều tín hiệu nhỏ

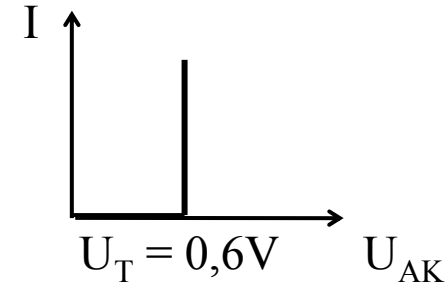
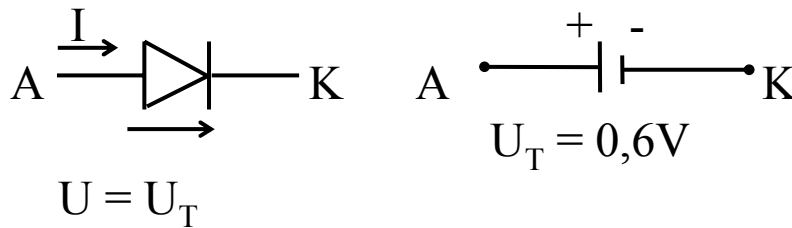
Các mô hình tương đương của điốt phân cực thuận (1)

1. Sơ đồ một khóa điện tử ở trạng thái đóng: Điốt làm việc ở **điện áp lớn, tần số nhỏ**. Điện áp phân cực thuận có thể bỏ qua vì $U_T = 0,6V$ cho điốt Si, và $U_T = 0,2V$ cho điốt Ge là quá nhỏ. Đặc tuyến Vôn-Ampe lúc này coi như trường hợp ngắn mạch. Đặc tuyến Vôn-Ampe là đường thẳng trùng với trục I

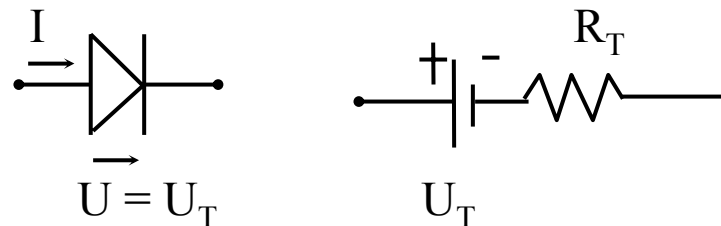


Các mô hình tương đương của điốt phân cực thuận (2)

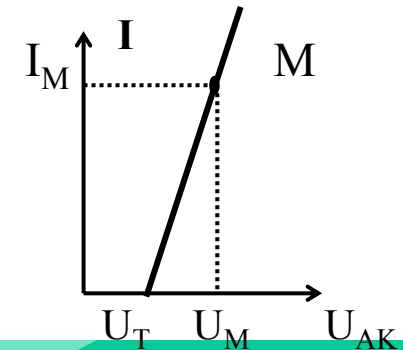
2. Sơ đồ một nguồn áp lý tưởng :



3. Sơ đồ một nguồn điện áp thực: điốt được coi như một nguồn điện áp thực gồm có nguồn điện áp và nội trở của nó chính là R_T (điện trở trong của điốt và nó là điện trở thuận)

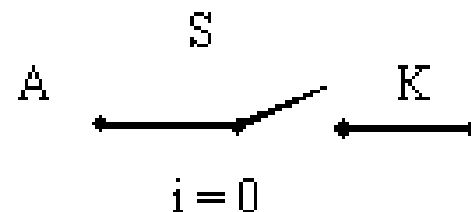
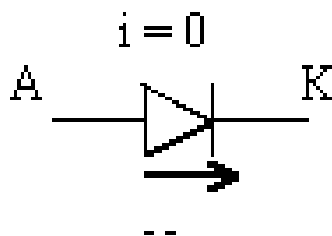


$$R_T = \frac{\Delta U_D}{\Delta I_D} = \frac{U_M - U_T}{I_M}$$

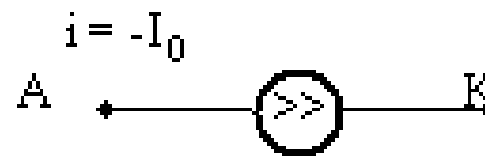
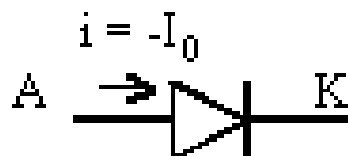


Các mô hình tương đương của điốt phân cực ngược

Sơ đồ một khóa ở trạng thái hở

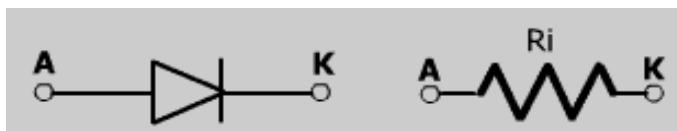


Sơ đồ một nguồn dòng lý tưởng

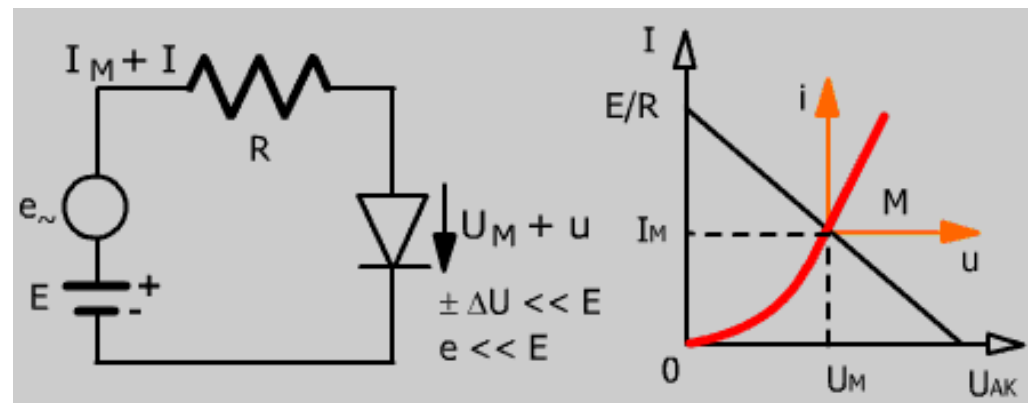


Các mô hình tương đương xoay chiều tín hiệu nhỏ (1)

a. *Sơ đồ một điện trở động R_i ở chế độ tín hiệu nhỏ tần số thấp:* Trong trường hợp này Điốt luôn phân cực thuận, đối với tín hiệu xoay chiều biên độ nhỏ đáp ứng của điốt được coi như một phần tử tuyến tính:



$$u = R_i i = R_i \frac{e}{R + R_i}$$



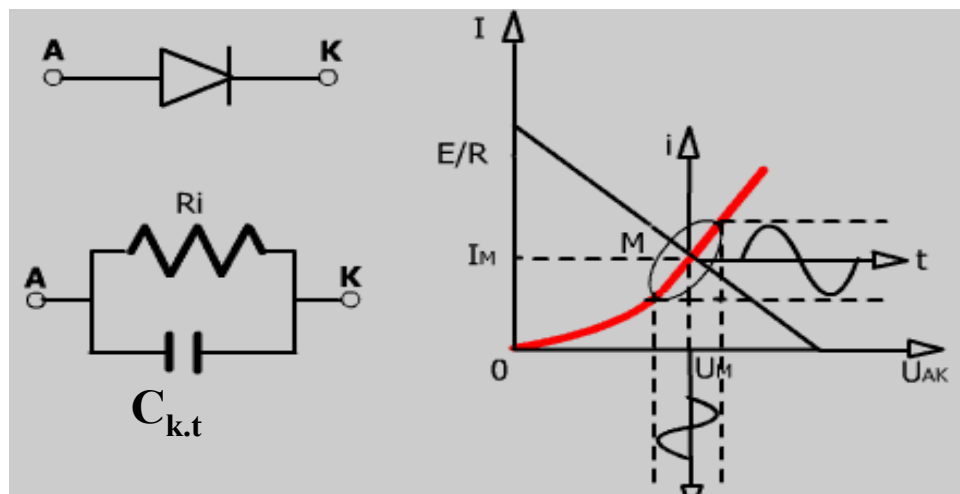
$$R_i = \frac{dU}{dI} \rightarrow R_i = \frac{\eta V_{th}}{I_0 e^{\frac{U}{\eta V_{th}}}} = \frac{\eta V_{th}}{I_M + I_0} \rightarrow R_i \approx \frac{\eta V_{th}}{I_M}$$

Các mô hình tương đương xoay chiều tín hiệu nhỏ (2)

b. Sơ đồ tương đương ở chế độ tín hiệu nhỏ tần số cao: Ở chế độ này điốt được coi như một điện trở thuận R_i mắc song song với một điện dung khuếch tán $C_{k.t.}$. $C_{k.t.}$ xuất hiện trong khoảng thời gian τ là khoảng thời gian lệch pha giữa i và u . $C_{k.t.}$ là điện dung khuếch tán của tiếp xúc P-N và được xác định:

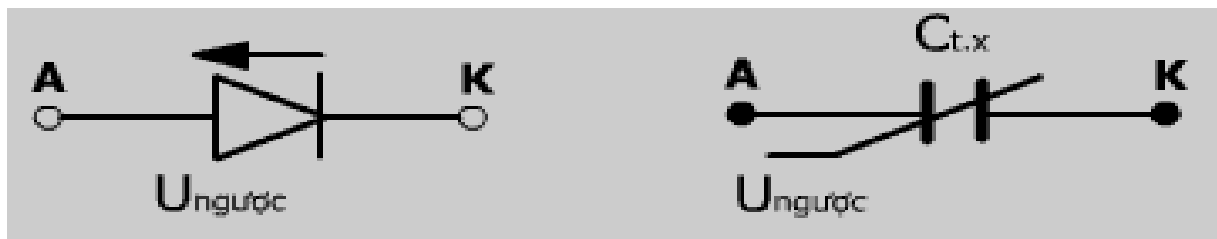
$$C_{k.t} = \frac{\tau}{R_i}$$

$$\tau = \text{vài ns} \div \mu\text{s}$$



Các mô hình tương đương xoay chiều tín hiệu nhỏ (3)

*c. Sơ đồ một điện dung chuyển tiếp ở chế độ tín hiệu nhỏ
(Phân cực ngược)*



$$C_{tx} = \frac{C_0}{\left| V_{nguooc} \right|^{\frac{1}{n}}} \quad n = 2 \div 3$$

3.6 Phân loại điốt (1)

- **Điốt chỉnh lưu:** sử dụng tính dẫn điện một chiều để chỉnh lưu dòng điện xoay chiều thành một chiều



- **Điốt xung:** Ở chế độ xung, điốt được sử dụng như khóa điện tử gồm có hai trạng thái: "dẫn" khi R điốt rất nhỏ và "khóa" khi R điốt rất lớn. Yêu cầu thời gian chuyển từ trạng thái này sang trạng thái khác phải thật nhanh. Thời gian chuyển trạng thái xác định tốc độ hoạt động của điốt và do đó xác định tốc độ làm việc của thiết bị

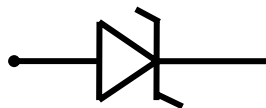
Gồm: điốt hợp kim, điốt mêza, điốt Sôtky. Trong đó điốt Sôtky được dùng rộng rãi nhất. Điốt Sôtky sử dụng tiếp xúc bán dẫn - kim loại. Thời gian phục hồi chức năng ngắt của điốt Sôtky có thể đạt tới 100psec. Điện áp phân cực thuận cho điốt Sôtky khoảng $U_D = 0,4V$, tần số làm việc cao đến 100 GHz



3.6 Phân loại điốt (2)

- **Điốt ổn áp:** Người ta sử dụng chế độ đánh thủng về điện của chuyển tiếp P-N để ổn định điện áp. Điốt ổn áp được chế tạo từ bán dẫn Silíc vì nó bảo đảm được đặc tính kỹ thuật cần thiết

VD: điốt Zener



- **Điốt biến dung (varicap):** Là loại điốt bán dẫn được sử dụng như một tụ điện có trị số điện dung điều khiển được bằng điện áp. Nguyên lý làm việc của điốt biến dung là dựa vào sự phụ thuộc của điện dung rào thế của tiếp xúc P-N với điện áp ngược đặt vào nó



3.4 Phân loại điốt (3)

- **Điốt tunen (hay điốt xuyên hầm):** được chế tạo từ chất bán dẫn có nồng độ tạp chất rất cao thông thường $n = (10^{19} \div 10^{23})/\text{cm}^3$. Loại điốt này có khả năng dẫn điện cả chiều thuận và chiều ngược.



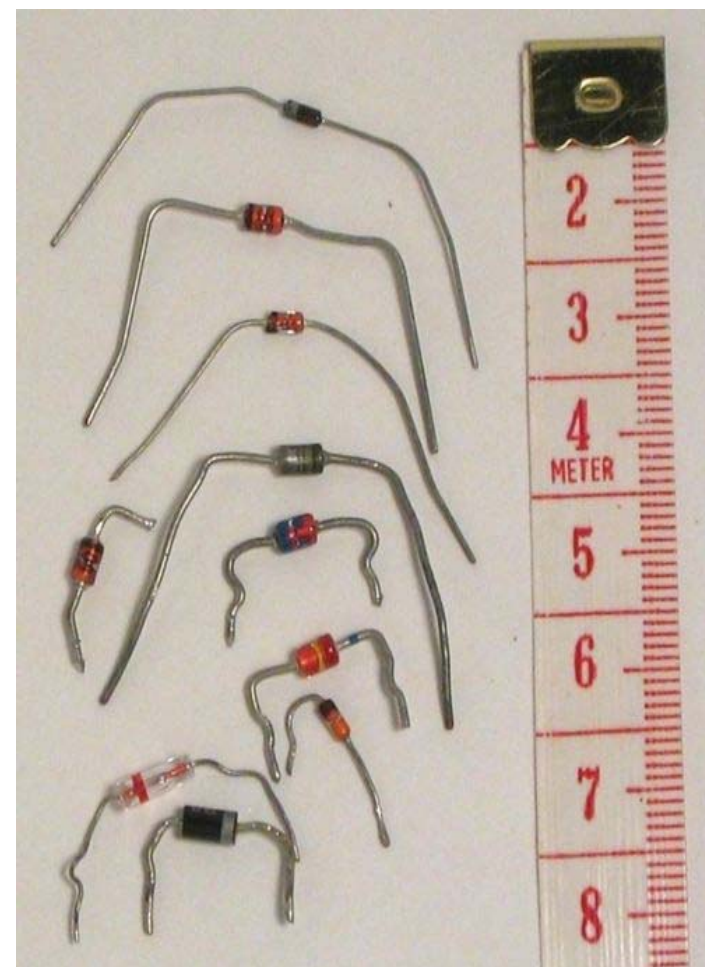
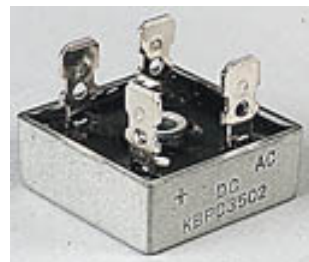
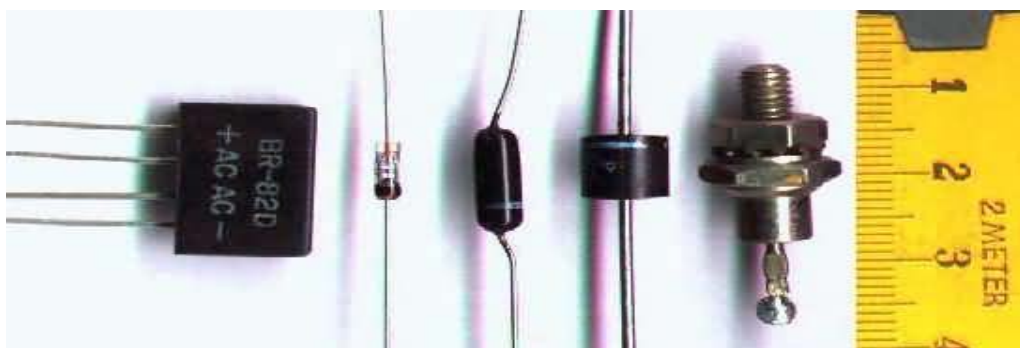
- **Điốt cao tần:** xử lý các tín hiệu cao tần

- Điốt tách sóng
- Điốt trộn sóng
- Điốt điều biến

Các điốt cao tần thường là loại điốt tiếp điểm



Một số hình ảnh của Điốt

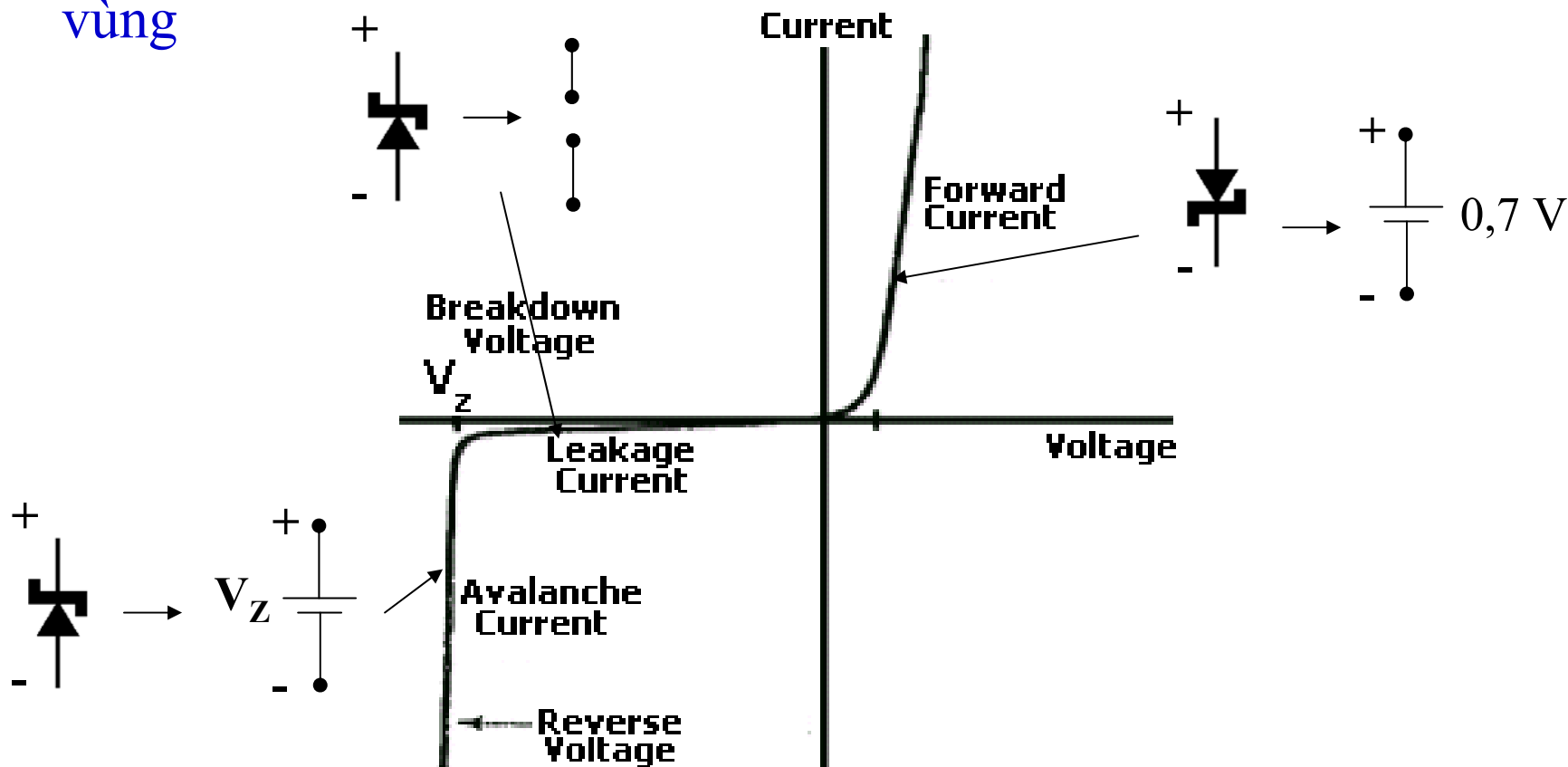


Điốt Zener (1)

- Vùng Zener được dùng để thiết kế điốt Zener
- Điện áp Zener (V_Z): là điện áp phân cực ngược mà tại đó dòng điện có xu hướng tăng đột biến trong khi điện áp tăng không đáng kể
- Điện áp Zener rất nhạy cảm đối với nhiệt độ làm việc

Điốt Zener (2)

- Các đặc tính của điốt Zener với mô hình tương đương ở mỗi vùng



3.7 Một số ứng dụng của Điốt (1)

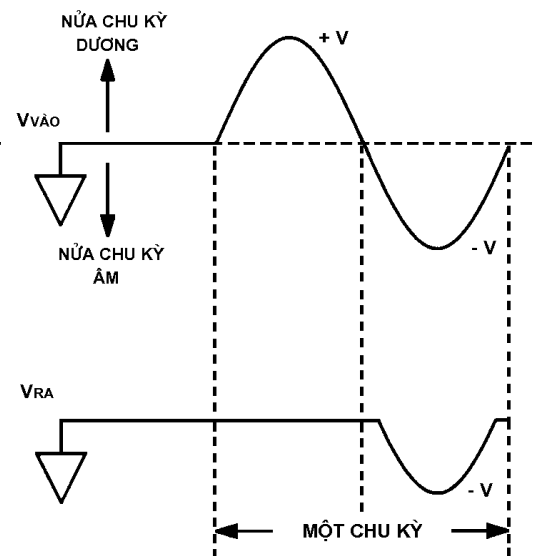
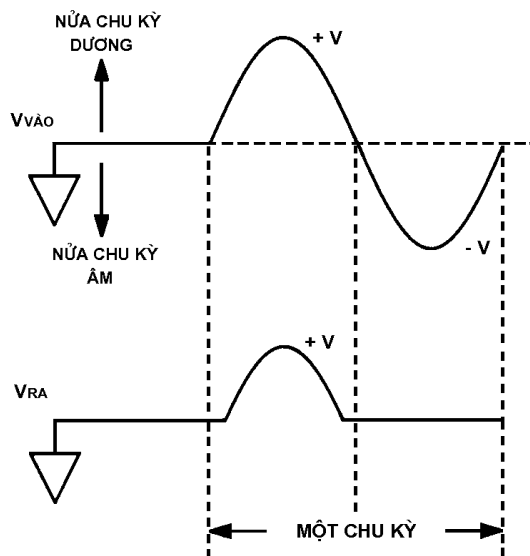
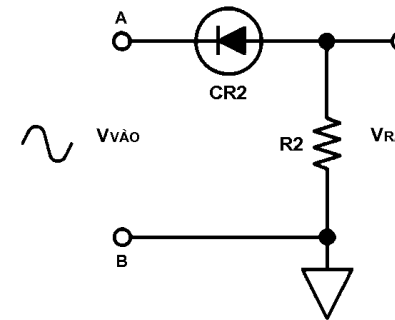
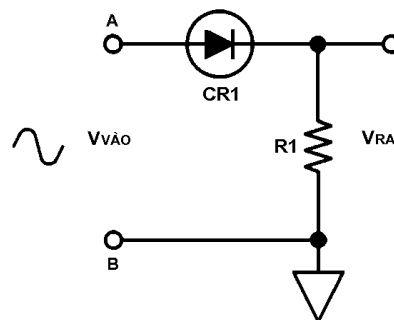
Điốt được sử dụng trong nhiều ứng dụng khác nhau.

Một số ứng dụng đơn giản của điốt:

- Mạch chỉnh lưu điện áp xoay chiều
- Mạch nhân đôi điện áp
- Mạch ghim và mạch hạn biên
- Mạch ổn áp
- Mạch tách sóng
- Mạch logic
- ...

3.7 Một số ứng dụng của Điốt (2)

➤ Mạch chỉnh lưu một nửa chu kỳ đơn giản

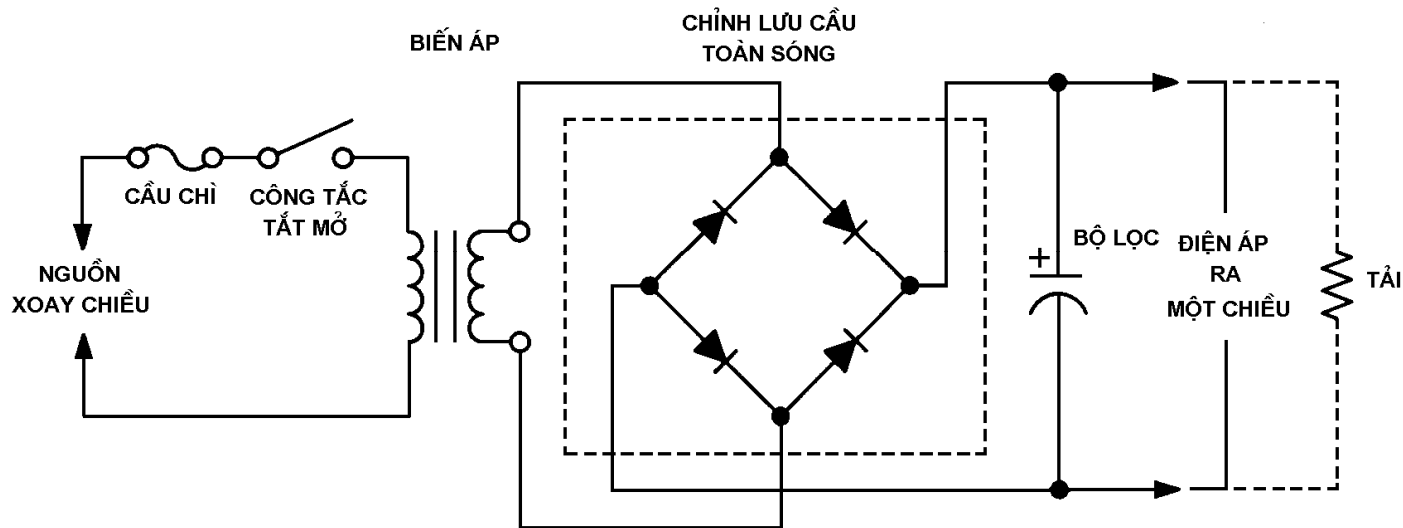


(a)

(b)

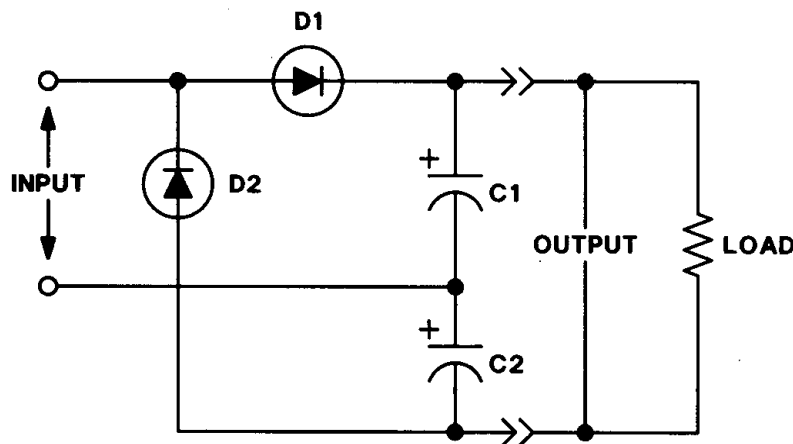
3.7 Một số ứng dụng của Điốt (3)

➤ Chỉnh lưu 2 nửa chu kỳ



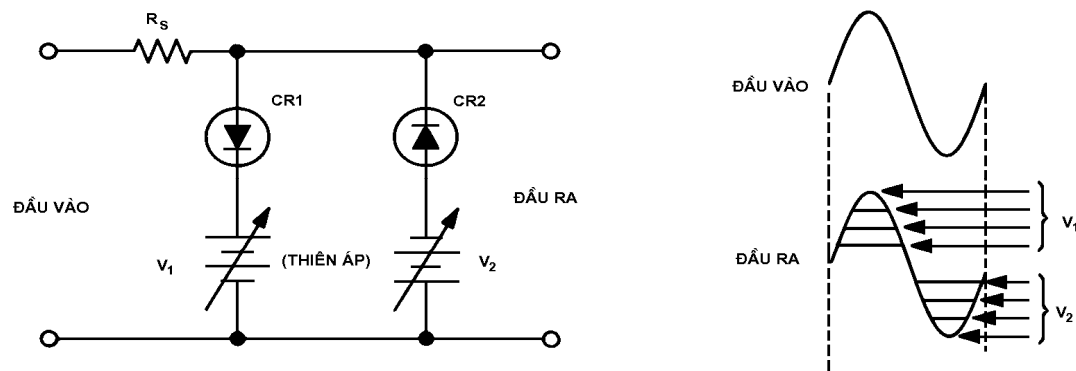
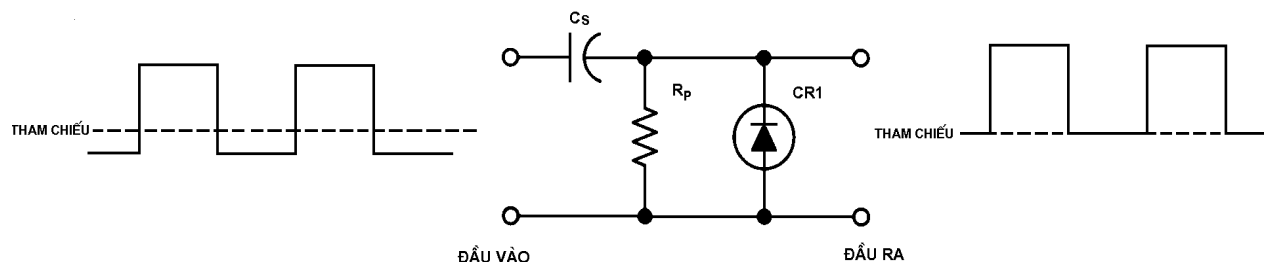
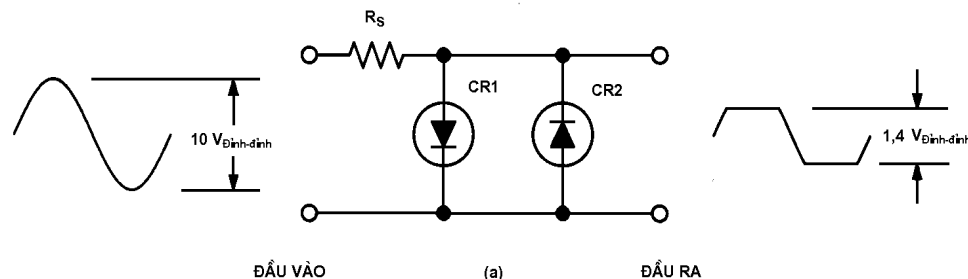
3.7 Một số ứng dụng của Điốt (5)

➤ Mạch nhân đôi biên độ điện áp



3.7 Một số ứng dụng của Điốt (6)

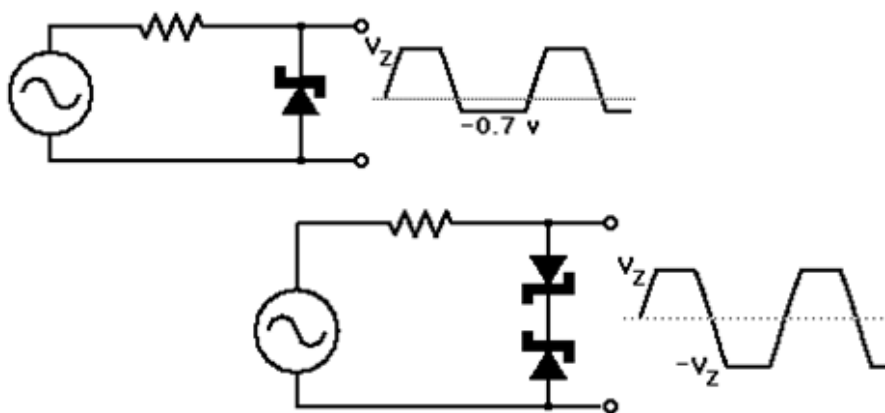
➤ Mạch dịch mức và mạch hạn chế (ghim đỉnh)



3.7 Một số ứng dụng của Điốt (7)

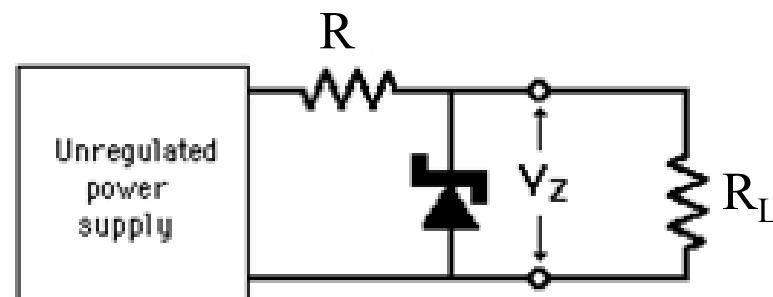
Mạch hạn chế dòng điốt Zener (Zener Limiter):

- Một điốt Zener có thể hạn chế 1 phía của một sóng sin tới điện áp Zener (V_Z), trong khi đó ghim phía kia tới gần giá trị 0
- Với hai điốt Zener mắc ngược nhau (hình), sóng sin có thể bị hạn chế cả 2 phía tới điện áp Zener



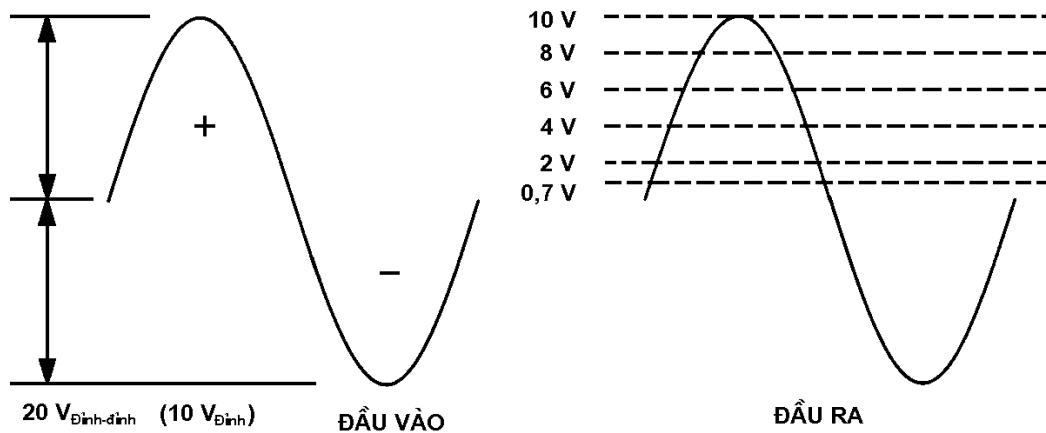
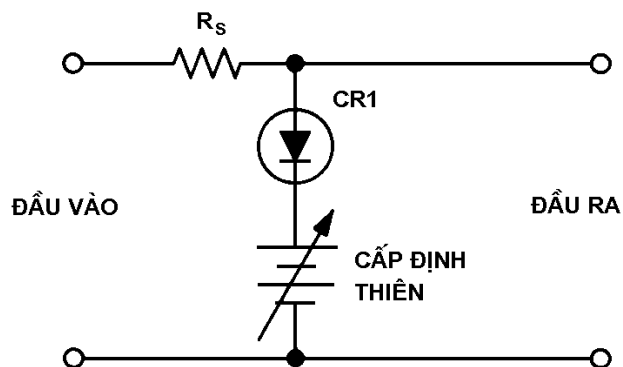
Mạch ổn áp dùng điốt Zener (Zener Regulator):

-Điện áp ngược không đổi (V_Z) của điốt Zener được dùng để ổn định điện áp ra chống lại sự thay đổi của điện áp đầu vào từ một nguồn điện áp thay đổi hay sự thay đổi của điện trở tải. I chạy qua điốt Zener sẽ thay đổi để giữ cho điện áp nằm trong giới hạn của ngưỡng của vùng làm việc của điốt Zener



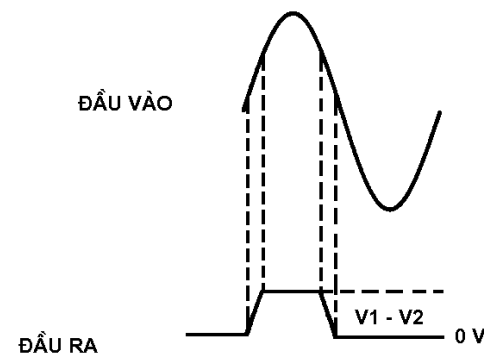
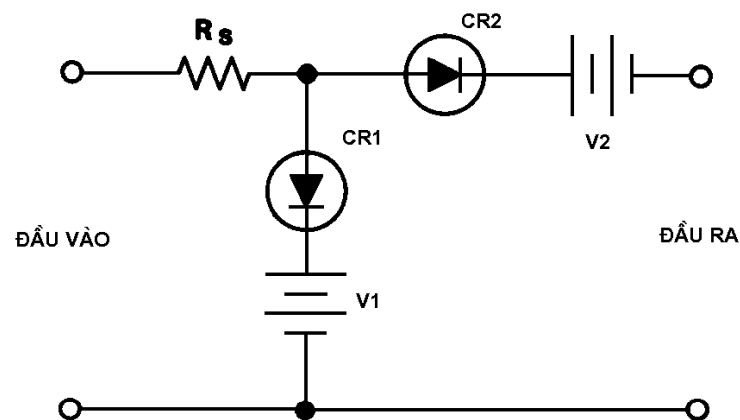
3.7 Một số ứng dụng của Điốt (8)

➤ Mạch hạn biên 1 phía



3.7 Một số ứng dụng của Điốt (9)

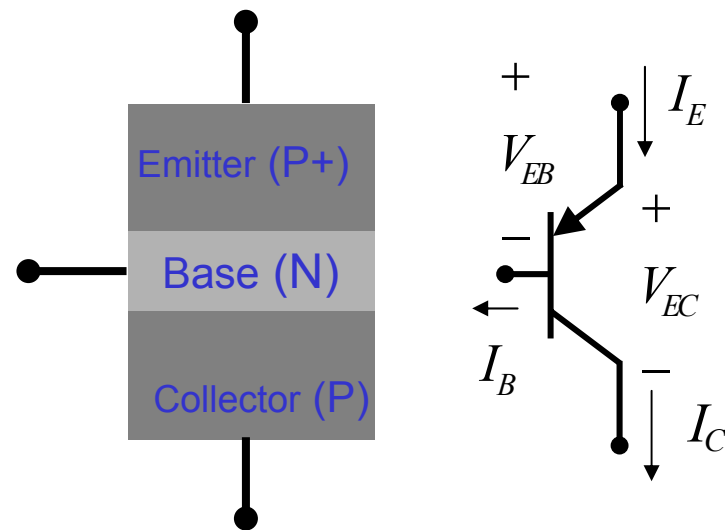
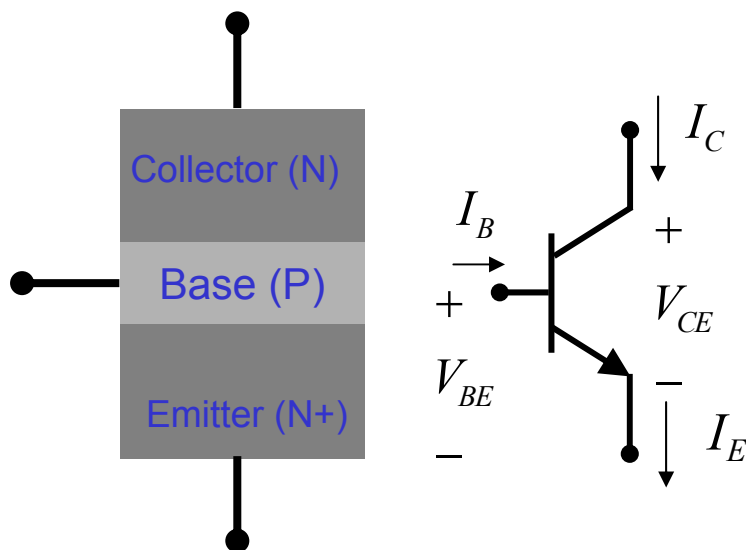
➤ Mạch giới hạn biên độ 2 phía



Chương 5 - BJT (Transistor lưỡng cực)

1. Cấu tạo và ký hiệu của Transistor lưỡng cực trong các sơ đồ mạch
 - 1.1. Cấu tạo BJT loại pnp, npn,
 - 1.2. Nguyên lý hoạt động của BJT
 - 1.3. Mô hình Ebers-Moll
2. Các cách mắc BJT và các họ đặc tuyến tương ứng
3. Phân cực cho BJT
4. Các mô hình tương đương của BJT.
5. Phân loại BJT
6. Một số ứng dụng của BJT

1.1. Cấu tạo BJT loại pnp, npn

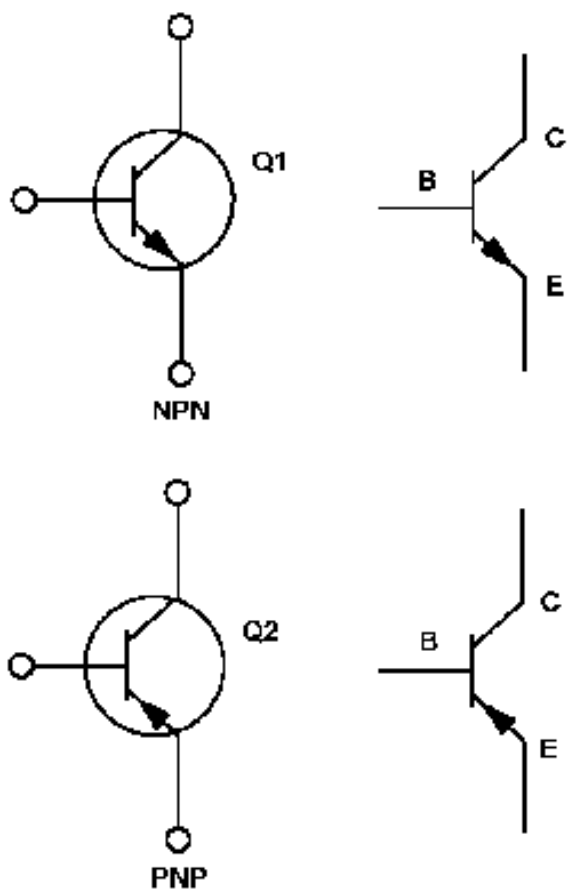


- Transistor gồm có 2 tiếp giáp PN do 3 lớp tương ứng 3 miền phát, gốc, góp và có 3 điện cực nối tới 3 miền: Cực Phát-E (Emitter), Cực Góc - B (Base), Cực Góp-C (Collector)
- BJT thuận có 3 miền PNP, BJT ngược có 3 miền NPN
- Chuyển tiếp PN giữa miền E-B là chuyển tiếp Emitter T_E , giữa B-C là chuyển tiếp collector T_C

1.1. Cấu tạo BJT loại pnp, npn

- Nồng độ pha tạp của miền E là khá cao, Miền B có nồng độ vừa phải kích thước khá mỏng, miền C có nồng độ pha tạp thấp. Miền phát có khả năng phát xạ các hạt dẫn sang miền gốc B, miền góp có khả năng thu nhận tất cả các hạt dẫn được phát xạ từ miền phát E qua miền gốc B tới
- Miền C thường được nuôi trên phiến bán dẫn đế, có lớp bán dẫn vùi sâu có nồng độ cao (Buried layer n++) để giảm trị số điện trở nối tiếp
- Độ rộng của miền B nhỏ hơn độ dài khuếch tán trung bình rất nhiều

Kí hiệu và các dạng đóng vỏ khác nhau của BJT



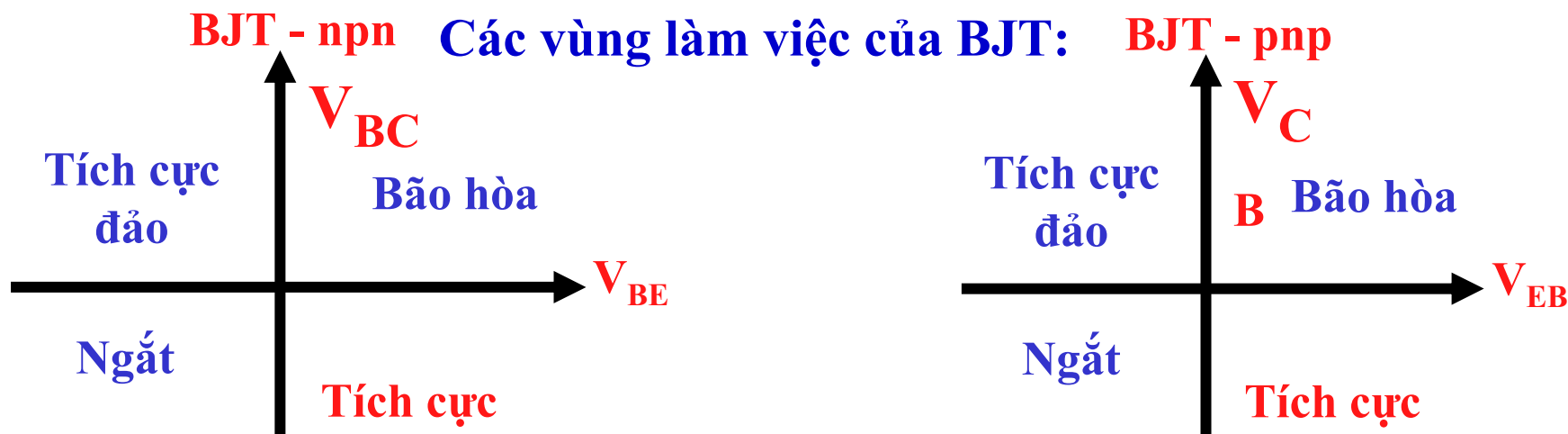
<p>TO-3</p> <p>E B C</p>	<p>TO-5</p> <p>E B C</p>	<p>TO-18</p> <p>E B C</p>
<p>TO-36</p> <p>E B C</p>	<p>TO-66</p> <p>E B C</p>	<p>TO-92</p> <p>E B C</p>
<p>TO-105</p> <p>B E C</p>	<p>TO-106</p> <p>B E C</p>	<p>TO-220</p> <p>B C E</p>

1.2. Nguyên lý hoạt động của BJT

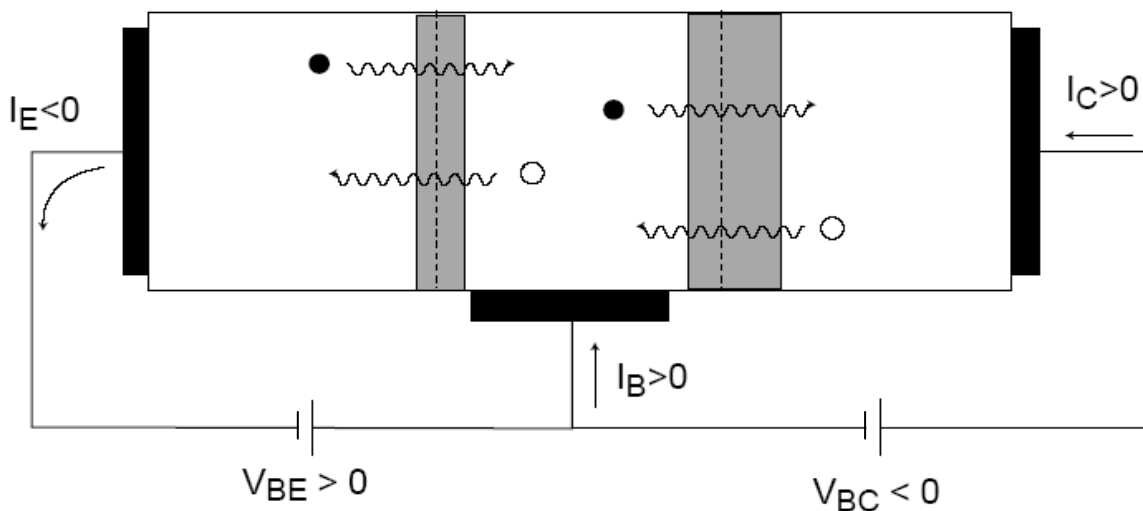
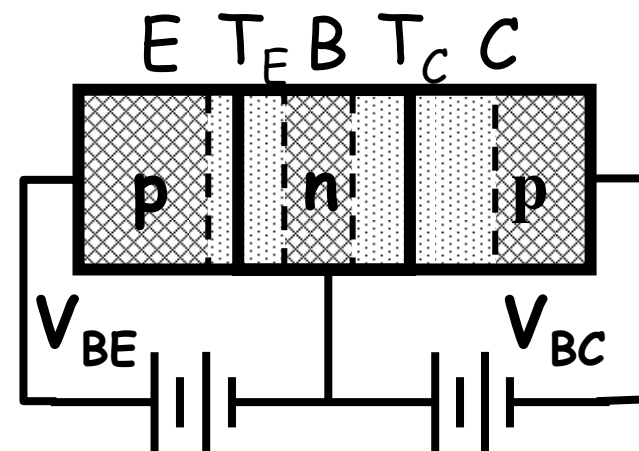
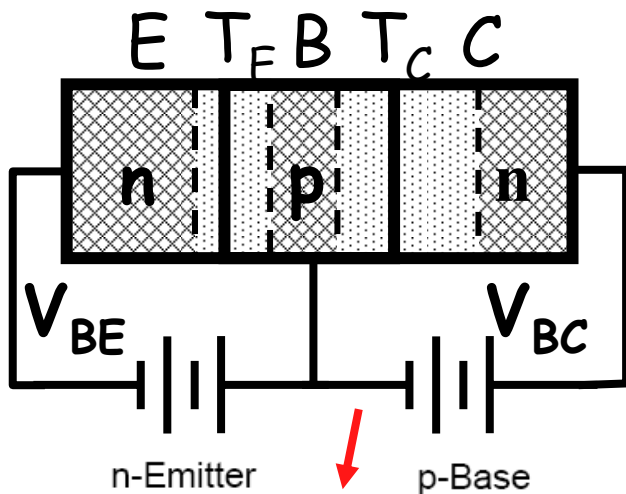
- Ở trạng thái cân bằng nhiệt, I qua các cực = 0
- Muốn cho Transistor làm việc ta phải cung cấp một điện áp một chiều thích hợp cho các chân cực. Tùy theo điện áp đặt vào các cực mà Transistor làm việc ở các chế độ khác nhau:
 - + **Chế độ ngắt:** Hai tiếp giáp PN đều phân cực ngược. Transistor có điện trở rất lớn và chỉ có một dòng điện qua các chân cực rất nhỏ.
 - + **Chế độ dẫn bão hòa:** Cả hai tiếp giáp PN đều phân cực thuận. Transistor có điện trở rất nhỏ và dòng điện qua nó là rất lớn.
 - + **Chế độ tích cực:** Tiếp giáp BE phân cực thuận, tiếp giáp BC phân cực ngược, Transistor làm việc như một phần tử tích cực, có khả năng khuếch đại, phát tín hiệu... Là chế độ thông dụng nhất của Transistor
 - + **Chế độ tích cực đảo (Chế độ đảo):** Tiếp giáp BE phân cực ngược, tiếp giáp BC phân cực thuận, đây là chế độ không mong muốn

1.2. Nguyên lý hoạt động của BJT

- Transistor pnp và npn có nguyên lý làm việc giống hệt nhau, chỉ có chiều nguồn điện cung cấp là ngược dấu nhau. Chỉ cần xét với BJT npn, với loại BJT pnp tương tự
- Ở chế độ ngắt và chế độ dẫn bão hòa, BJT làm việc như một phần tử tuyến tính trong mạch điện. Trong BJT không có quá trình điều khiển dòng điện hay điện áp. Transistor làm việc ở chế độ này như một **khóa điện tử** và nó được sử dụng trong các mạch xung, các mạch logic



a. BJT làm việc trong chế độ tích cực (1)



- Tiếp giáp BE phân cực thuận
- Tiếp giáp BC phân cực ngược

a. BJT làm việc trong chế độ tích cực (2)

- T_E phân cực thuận nên hạt dẫn đa số là điện tử từ miền E được khuếch tán sang miền B qua chuyển tiếp T_E , trở thành hạt dẫn thiểu số, do sự chênh lệch nồng độ chúng tiếp tục khuếch tán đến miền chuyển tiếp T_C , tại đây nó được cuốn sang miền C (do điện trường của tiếp giáp T_C có tác dụng cuốn hạt thiểu số)
- Hạt dẫn đa số là lỗ trống tại miền B cũng khuếch tán ngược lại miền E nhưng không đáng kể so với dòng khuếch tán điện tử do nồng độ lỗ trống ở miền B ít hơn rất nhiều (do nồng độ pha tạp miền B ít hơn nhiều)
- Điện tử khuếch tán từ E sang B làm cho mật độ điện tử rất cao ở miền B tại vị trí gần lớp tiếp xúc T_E và ở đây điện tử và lỗ trống sẽ tái hợp với nhau
- Để các điện tử bị tái hợp ít, người ta chế tạo phần phát (E) có nồng độ tạp chất lớn hơn rất nhiều so với phần gốc (B) \rightarrow thành phần dòng điện cực phát do các điện tử tạo nên lớn hơn nhiều thành phần dòng điện do các lỗ trống tạo nên

a. BJT làm việc trong chế độ tích cực (3)

- Hiệu suất của cực phát: γ - là tỉ số giữa thành phần dòng điện của hạt đa số với dòng điện cực phát:

$$BJT_{npn} : \quad \gamma = \frac{I_{nE}}{I_E} = \frac{I_{nE}}{I_{pE} + I_{nE}} \approx 0,98 \div 0,995$$

- Hệ số khuếch đại dòng điện cực phát tĩnh : α_F (α_0) hay còn gọi là hệ số truyền đạt dòng điện cực phát :

$$\alpha_F = \alpha_0 = \frac{I_C}{I_E}$$

a. BJT làm việc trong chế độ tích cực (4)

- Dòng điện I_B chủ yếu gồm dòng ngược của tiếp xúc góp T_C , dòng cuốn các hạt thiểu số qua tiếp xúc phát T_E và các thành phần dòng điện do hiện tượng tái hợp trong lớp tiếp xúc phát và trong miền gốc tạo nên

$$I_B = I_{pE} - I_{nE} - I_{nC} - I_{CB0}$$

- Quan hệ giữa 3 thành phần dòng điện trong BJT trong chế độ 1 chiều:

$$I_B = (1 - \alpha_0) I_E - I_{CB0}$$

$$I_C = I_{nC} + I_{CB0} = \alpha_0 I_E + I_{CB0}$$

$$I_E = I_C + I_B$$

- Thực tế thường dùng hệ số khuếch đại dòng điện cực phát tín hiệu nhỏ hay còn gọi là hệ số truyền đạt vi phân dòng điện cực phát α :

$$\alpha = \frac{\partial I_C}{\partial I_E}$$

a. BJT làm việc trong chế độ tích cực (5)

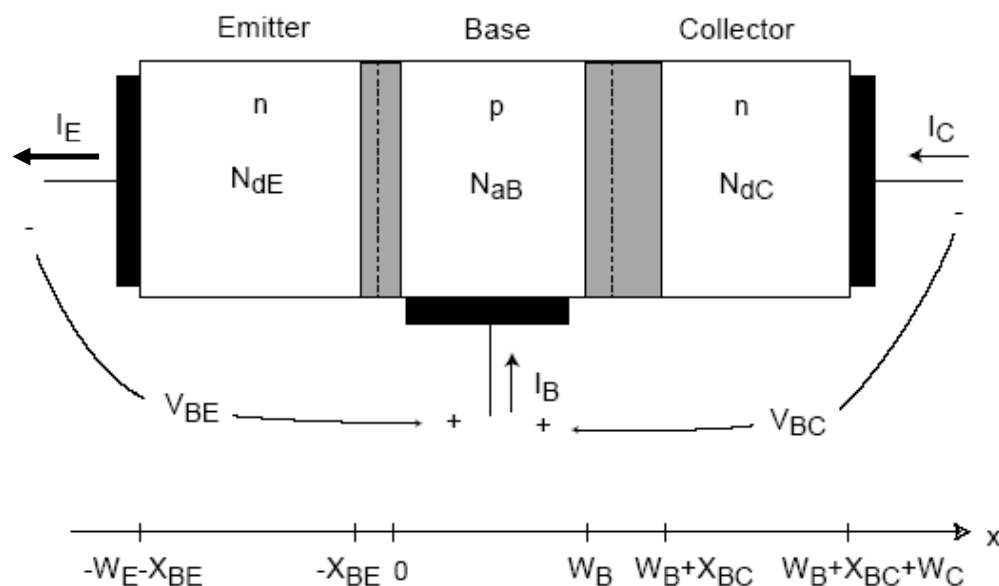
- Hệ số KD dòng Emitter chung (tĩnh) một chiều β_F (β_0):

$$\beta_0 = \frac{I_C}{I_B}, \text{ mà } I_E = I_B + I_C \Rightarrow \beta_0 = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F}$$

- Hệ số khuếch đại dòng Emitter chung tín hiệu nhỏ:

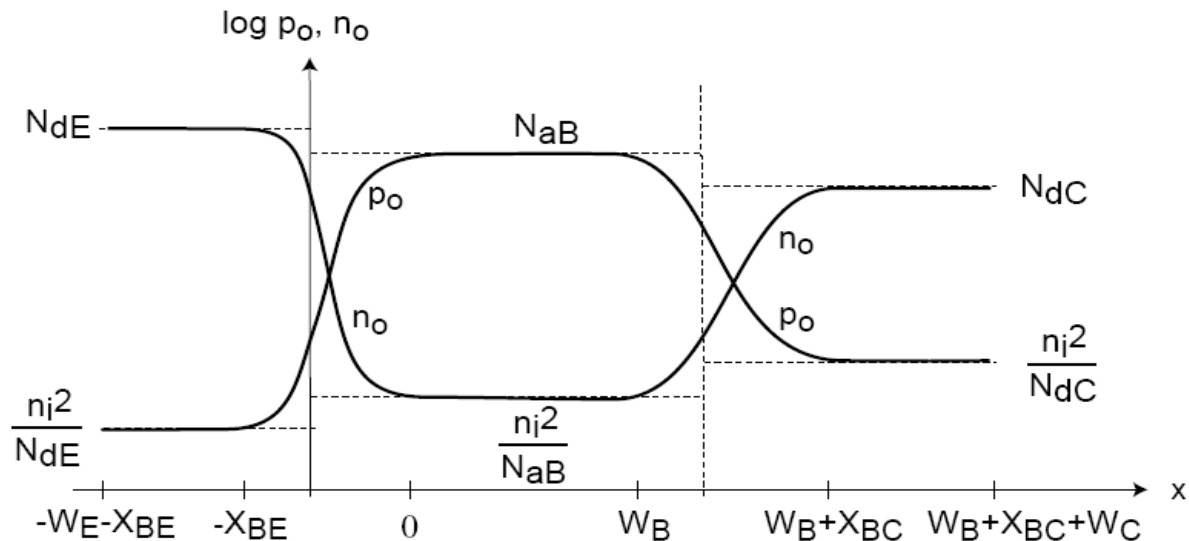
$$\beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

- Mô hình kích thước đơn giản của BJT npn:

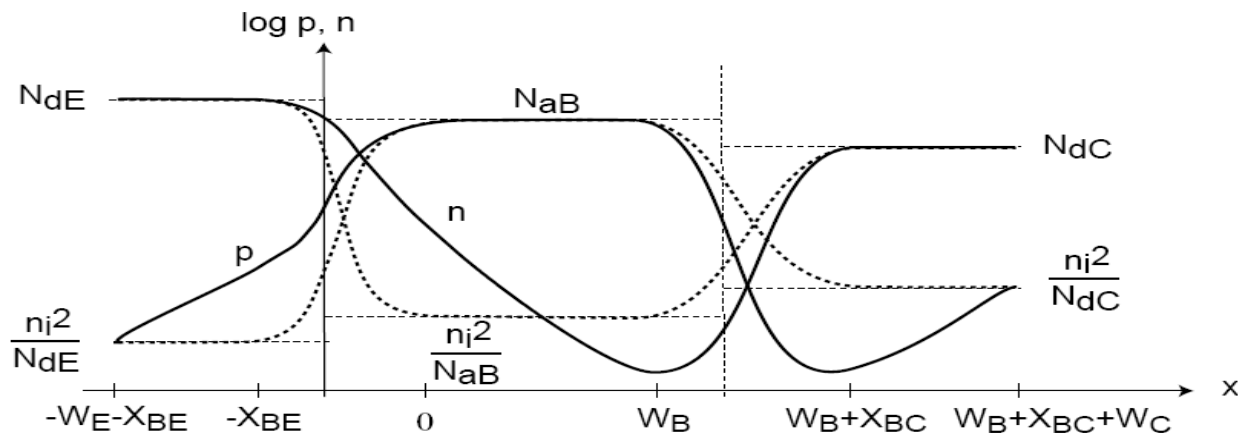


Phân bố nồng độ hạt dẫn trong BJT

➤ Ở điều kiện cân bằng nhiệt:



➤ Ở chế độ tích cực:



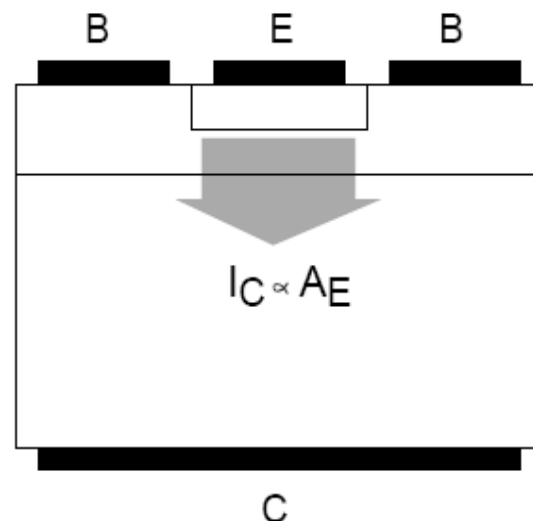
❖ Tính toán dòng Collector : I_C

- Dòng điện chủ yếu trong BJT là các dòng khuếch tán hạt dẫn
- Dòng I_C chủ yếu là dòng các hạt dẫn thiểu số khuếch tán trong miền B và được cuốn sang miền C qua chuyển tiếp collector

$$I_C = I_S \exp \frac{qV_{BE}}{kT}$$

$$I_S = \left(\frac{qD_n n_{pB0} A_E}{W_B} \right)$$

I_S - dòng Collector bão hòa



❖ Tính toán dòng Base : I_B

- I_B chủ yếu do dòng khuếch tán lỗ trống sang miền E và dòng tái hợp tại T_E và miền B, tính toán dòng điện trên cực B bỏ qua dòng tái hợp.
- Giả sử sự phân bố hạt thiểu số lỗ trống trong miền E là tuyến tính

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_0} \left(\exp \frac{qV_{BE}}{kT} - 1 \right)$$

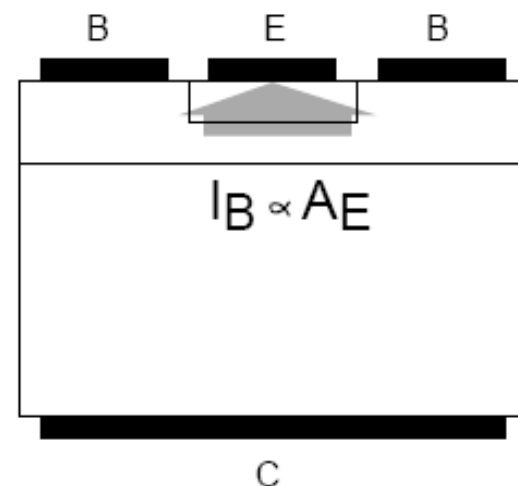
- Vì $V_{BE} \gg KT/q$ ta có $I_B = I_C / \beta_0$:

$$\beta_F = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\left(\frac{qD_n n_{pB0} A_E}{W_B} \right)}{\left(\frac{qD_p p_{nE0} A_E}{W_E} \right)} = \left(\frac{D_n}{D_p} \right) \left(\frac{n_{pB0}}{p_{nE0}} \right) \left(\frac{W_E}{W_B} \right)$$

$$\frac{n_{pB0}}{p_{nE0}} = \frac{N_{dE}}{N_{aB}}$$



$$\beta_F = \beta_0 = \frac{D_n N_{dE} W_E}{D_p N_{aB} W_B}$$



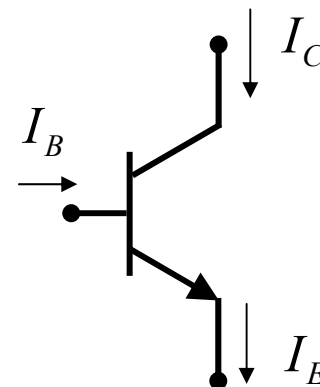
❖ Dòng điện trên cực phát I_E

- Với quy ước chiều các dòng điện như hình vẽ, dòng điện trên cực phát được xác định như sau:

$$I_E = I_C + I_B = I_S \exp \frac{qV_{BE}}{kT} + \frac{I_S}{\beta_F} \left(\exp \frac{qV_{BE}}{kT} - 1 \right)$$

$$\beta_F = \beta_0 = \frac{D_n N_{dE} W_E}{D_p N_{aB} W_B}$$

$$I_S = \left(\frac{q D_n n_{pB0} A_E}{W_B} \right)$$



a. BJT làm việc trong chế độ tích cực

$$\beta_F = \beta_0 = \frac{D_n N_{dE} W_E}{D_p N_{aB} W_B}$$

❖ Nhận xét β_0 :

- Để β_0 lớn chọn: $N_{dE} \gg N_{aB}$; $W_E \gg W_B$ hay giảm tối đa kích thước miền Base W_B và pha tạp tối đa miền Emitter N_{dE}
- Thực tế β_0 của npn luôn lớn hơn β_0 của pnp vì luôn có $D_n > D_p$
- Hiện nay người ta chế tạo được BJT có β_0 từ khoảng 50 ÷ 300
- β_0 độc lập với I_C
- Việc ổn định β_0 trong khi sản xuất rất khó do đó cần sử dụng kỹ thuật mạch điện tử để giải quyết

Tóm tắt: BJT làm việc trong chế độ tích cực

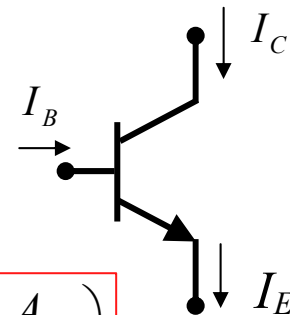
- Chế độ làm việc tích cực: tiếp giáp BE phân cực thuận, tiếp giáp BC phân cực ngược
- Quan hệ giữa các dòng điện trong BJT-npn là:

$$I_E = I_B + I_C$$

$$I_C = I_S \exp \frac{qV_{BE}}{kT}$$

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_0} \left(\exp \frac{qV_{BE}}{kT} - 1 \right)$$

$$I_S = \left(\frac{qD_n n_{pB0} A_E}{W_B} \right)$$



- Trong chế độ tĩnh (chế độ 1 chiều):

$$\alpha_F = \alpha_0 = \frac{I_C}{I_E}$$

$$\beta_F = \beta_0 = \frac{I_C}{I_B} = \frac{\alpha_F}{1 - \alpha_F}$$

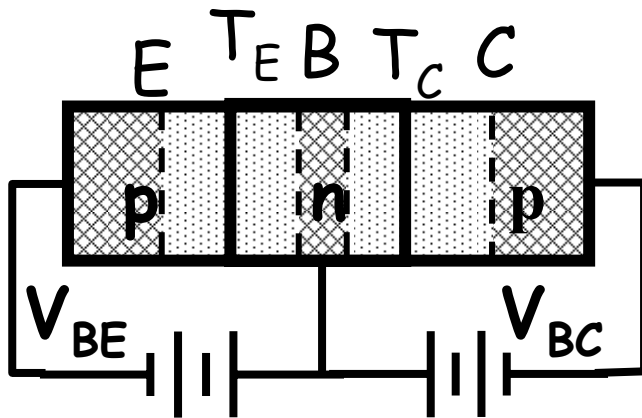
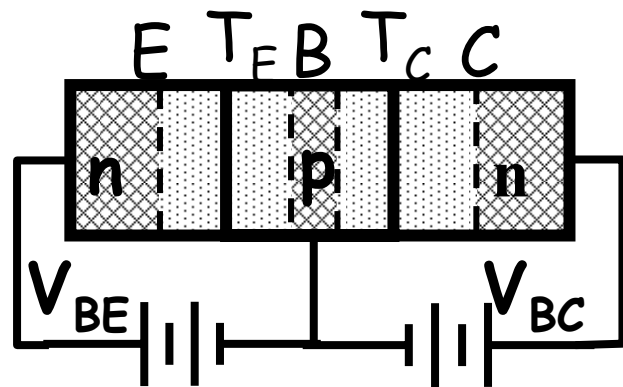
$$\beta_F = \frac{D_n N_{dE} W_E}{D_p N_{aB} W_B}$$

- Trong chế độ động:

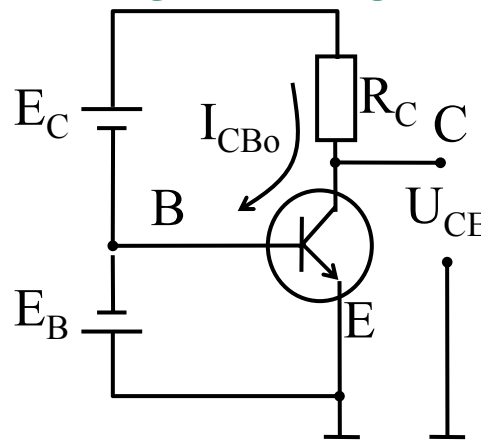
$$\alpha = \frac{\partial I_C}{\partial I_E}$$

$$\beta = \frac{\partial I_C}{\partial I_B} = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$$

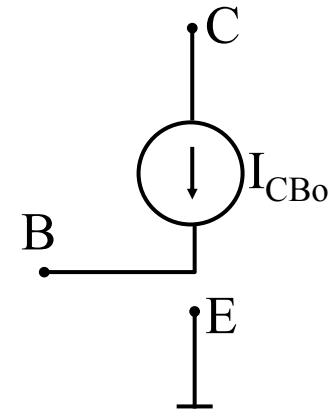
b. BJT ở chế độ ngắt (Cut-off)



Sơ đồ phân cực BJT npn trong chế độ ngắt



Sơ đồ tương đương đơn giản của BJT npn ở chế độ ngắt



▪ Cung cấp nguồn sao cho hai tiếp xúc PN đều được phân cực ngược. Điện trở của các chuyển tiếp rất lớn, chỉ có dòng điện ngược bão hòa rất nhỏ của tiếp giáp góp I_{CB0} . Còn dòng điện ngược của tiếp giáp phát I_{EB0} rất nhỏ so với I_{CB0} nên có thể bỏ qua. Như vậy, mạch cực E coi như hở mạch.

Dòng điện trong cực gốc B: $I_B = -I_{CB0}$

❖ Tính dòng điện trong BJT ở chế độ ngắt

- Dòng qua các tiếp giáp chủ yếu là dòng ngược - dòng cuốn các hạt thiểu số lỗ trống của các miền qua các tiếp giáp. Lỗ trống được cuốn từ miền B sang miền E tạo ra dòng I_{B1} , và lỗ trống từ miền B cuốn sang miền C tạo ra dòng I_{B2} , các dòng này rất nhỏ

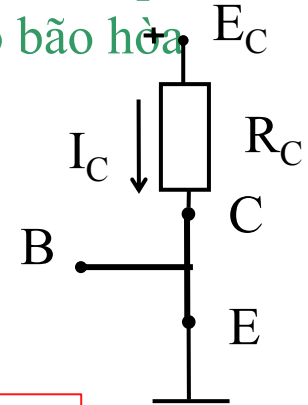
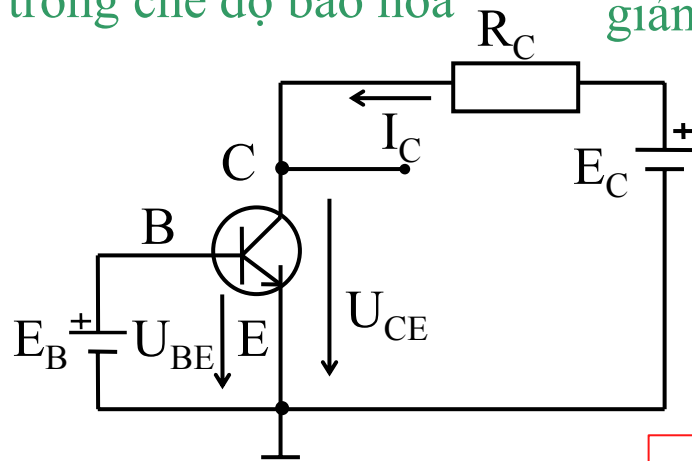
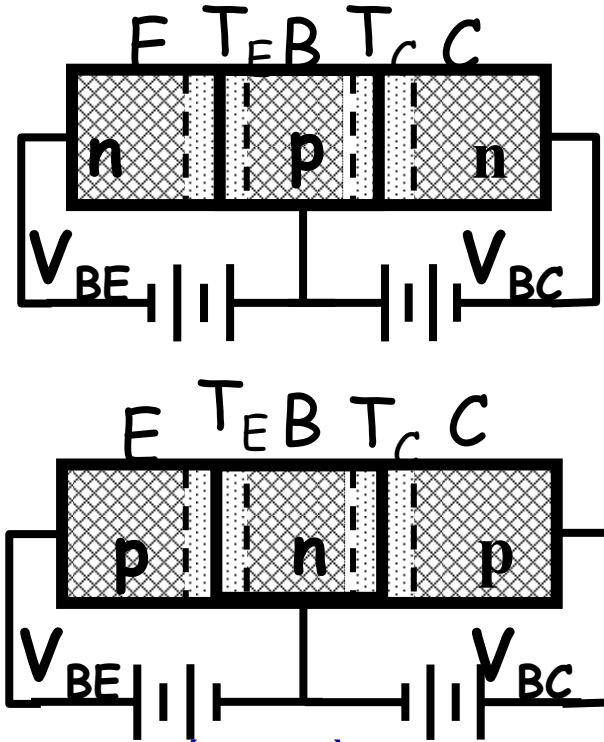
$$I_{B1} = -\frac{I_S}{\beta_F} = -I_E$$

$$I_{B2} = -\frac{I_S}{\beta_R} = -I_C$$

c. BJT ở chế độ bão hòa (Saturation)

Sơ đồ phân cực BJT npn trong chế độ bão hòa

Sơ đồ tương đương đơn giản của BJT npn ở chế độ bão hòa



$$U_{CE} \approx 0V$$

$$I_C \approx \frac{E_C}{R_C}$$

Cung cấp nguồn điện một chiều vào các cực của Transistor sao cho hai tiếp xúc PN đều phân cực thuận. Khi đó điện trở của hai tiếp xúc phát T_E và tiếp xúc góp T_C rất nhỏ nên có thể coi đơn giản là hai cực phát E và cực góp C được nối tắt. Dòng điện qua Transistor I_C khá lớn và được xác định bởi điện áp nguồn cung cấp E_C và không phụ thuộc gì vào Transistor đang sử dụng, thực tế $U_{CE} \approx 0,2V$

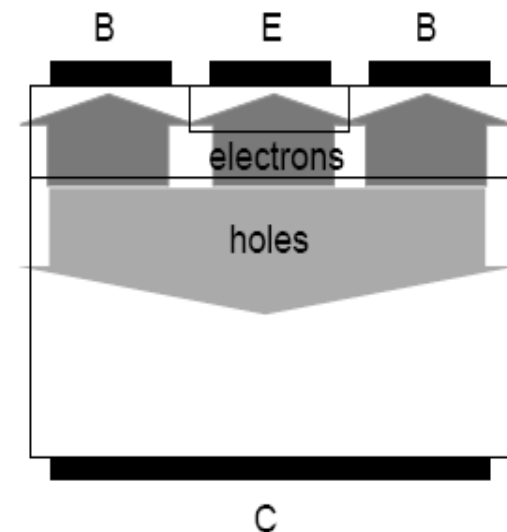
❖ Tính dòng trong BJT ở chế độ bão hòa

- Chế độ bão hòa có thể coi như là sự xếp chồng của 2 chế độ tích cực và chế độ đảo
- Dòng điện ở các cực ở chế độ bão hòa:

$$I_C = I_S \left(\exp \frac{qV_{BE}}{kT} - \exp \frac{qV_{BC}}{kT} \right) - \frac{I_S}{\beta_R} \left(\exp \frac{qV_{BC}}{kT} - 1 \right)$$

$$I_B = \frac{I_S}{\beta_F} \left(\exp \frac{qV_{BE}}{kT} - 1 \right) + \frac{I_S}{\beta_R} \left(\exp \frac{qV_{BC}}{kT} - 1 \right)$$

$$I_E = + \frac{I_S}{\beta_F} \left(\exp \frac{qV_{BE}}{kT} - 1 \right) + I_S \left(\exp \frac{qV_{BE}}{kT} - \exp \frac{qV_{BC}}{kT} \right)$$



Ở chế độ bão hòa miền B và C dư thừa các hạt dẫn thiểu số nên sẽ mất một thời gian trễ để BJT ra khỏi chế độ bão hòa

1.3 Mô hình Ebers-Moll (1)

❖ **Phương trình Ebers-Moll:** Viết biểu thức dòng trên E và C theo dòng qua các chuyển tiếp

$$I_E = -\frac{I_S}{\alpha_F} \left(e^{V_{BE}/V_{th}} - 1 \right) + I_S \left(e^{V_{BC}/V_{th}} - 1 \right)$$

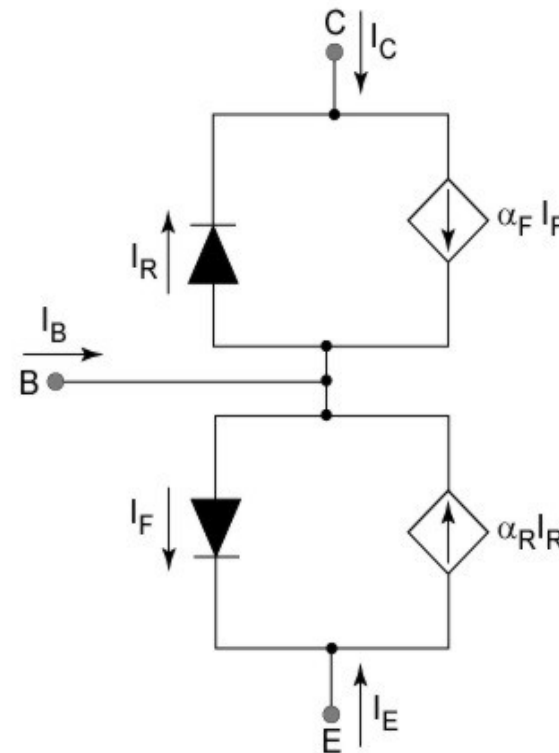
$$I_C = I_S \left(e^{V_{BE}/V_{th}} - 1 \right) - \frac{I_S}{\alpha_R} \left(e^{V_{BC}/V_{th}} - 1 \right)$$

❖ Đặt $I_S = \alpha_F I_{ES} = \alpha_R I_{CS}$, ta có hệ phương trình Ebers-Moll:

$$\begin{aligned} I_E &= -I_{ES} \left(e^{V_{BE}/V_{th}} - 1 \right) + \alpha_R I_{CS} \left(e^{V_{BC}/V_{th}} - 1 \right) \\ I_C &= \alpha_F I_{ES} \left(e^{V_{BE}/V_{th}} - 1 \right) - I_{CS} \left(e^{V_{BC}/V_{th}} - 1 \right) \end{aligned}$$

1.3 Mô hình Ebers-Moll (2)

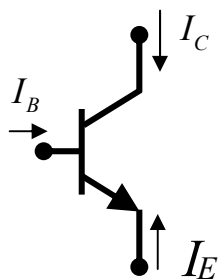
- Mô hình có thể sử dụng cho BJT ở cả 3 chế độ làm việc khác nhau: chế độ tích cực, chế độ ngắt, chế độ bão hòa
- Thường dùng cho các trường hợp một chiều và trường hợp tín hiệu lớn
- Được xây dựng trên từ hệ phương trình Ebers-Moll



Diode Currents:

$$I_F = I_{ES} (e^{V_{BE}/V_{th}} - 1)$$

$$I_R = I_{CS} (e^{V_{BC}/V_{th}} - 1)$$



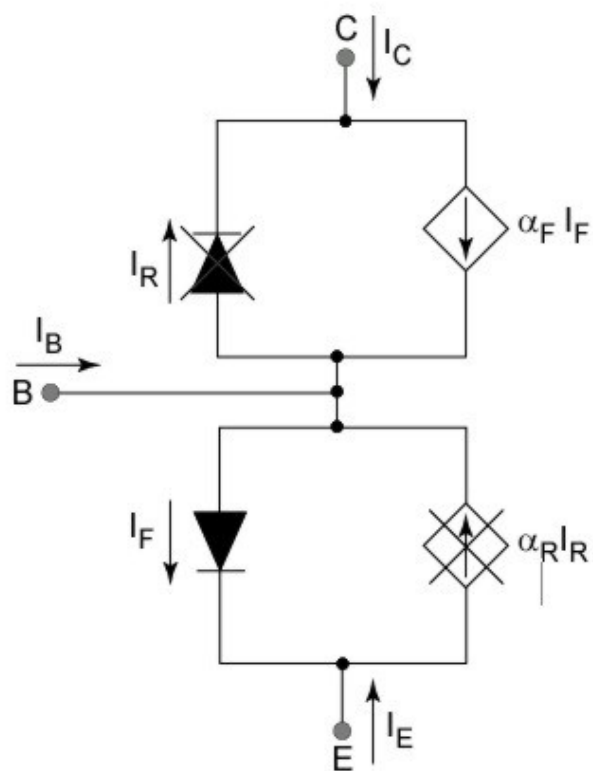
$$I_S = \alpha_F I_{ES} = \alpha_R I_{CS}$$

$$I_E = -I_{ES} (e^{V_{BE}/V_{th}} - 1) + \alpha_R I_{CS} (e^{V_{BC}/V_{th}} - 1)$$

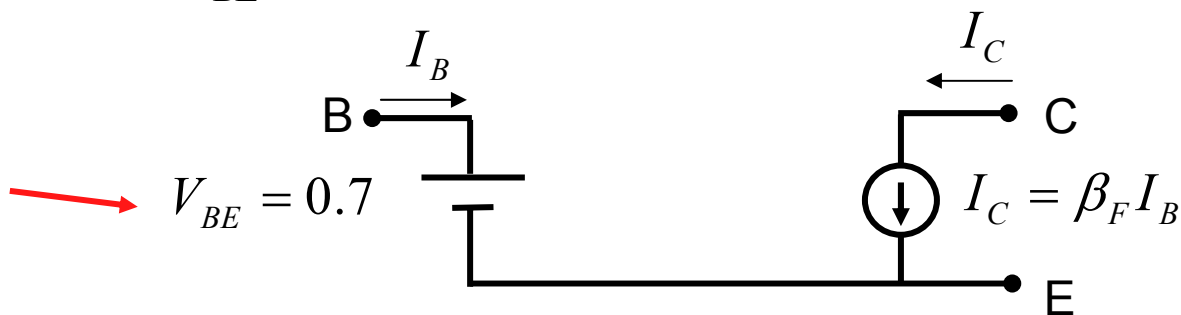
$$I_C = \alpha_F I_{ES} (e^{V_{BE}/V_{th}} - 1) - I_{CS} (e^{V_{BC}/V_{th}} - 1)$$

Mô hình Ebers-Moll đơn giản cho các CĐ làm việc

a. Mô hình Ebers-Moll đơn giản cho BJT npn trong chế độ tích cực:



$$V_{BE} = 0.7 \quad V_{CE} > 0.2$$

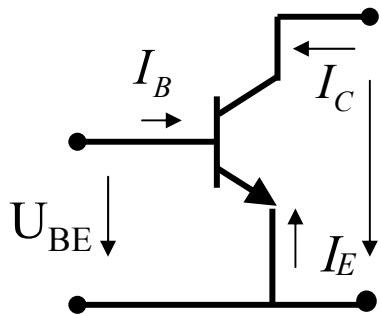
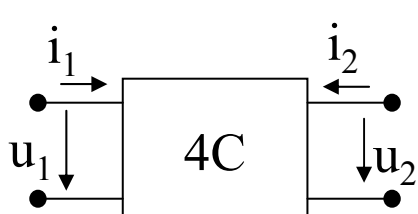


b. Mô hình Ebers-Moll đơn giản cho BJT npn trong chế độ bão hòa (2 điốt phân cực thuận):

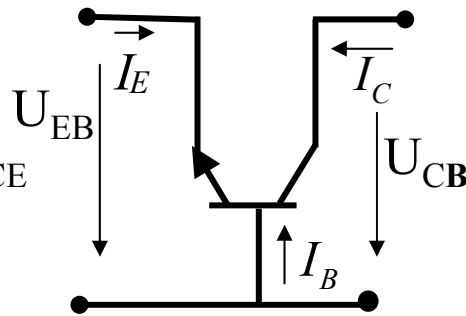


2. Các cách mắc BJT và các họ đặc tuyến tương ứng

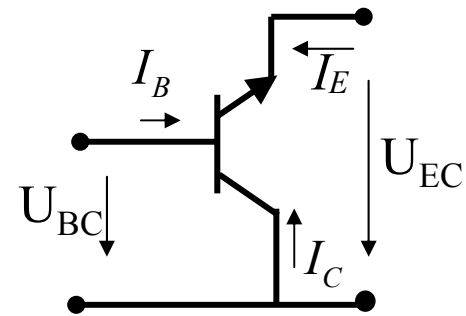
- Trong các mạch điện, BJT được xem như một mạng 4 cực: tín hiệu được đưa vào hai chân cực và tín hiệu lấy ra cũng trên hai chân cực
- BJT có 3 cực là E, B, C nên khi sử dụng ta phải đặt một chân cực làm dây chung của mạch vào và mạch ra. Ta có thể chọn một trong 3 chân cực để làm cực chung cho mạch vào và mạch ra. Do đó, Transistor có 3 cách mắc cơ bản là mạch cực phát chung (CE), mạch cực gốc chung (CB), và mạch cực góp chung (CC).



(CE)



(CB)

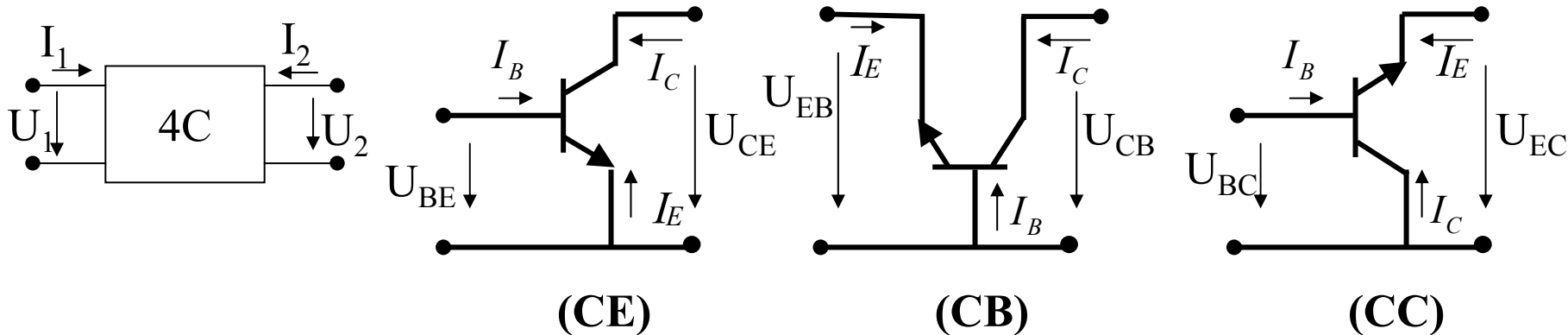


(CC)

- Đặc trưng của mạng 4 cực dùng hệ phương trình trở kháng, dẫn nạp, hỗn hợp. Hệ phương trình hỗn hợp:

$$\begin{cases} u_1 = f(i_1, u_2) \\ i_2 = f(i_1, u_2) \end{cases} \rightarrow \begin{cases} u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2 \\ i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2 \end{cases}$$

2. Các cách mắc BJT và các họ đặc tuyến tương ứng



Đặc tuyến	Tổng quát	CE	CB	CC
Đặc tuyến vào	$u_1 = f(i_1) _{u_2}$	$U_{BE} = f(I_B) _{U_{CE}}$	$U_{EB} = f(I_E) _{U_{CB}}$	$U_{BC} = f(I_B) _{U_{EC}}$
Đặc tuyến phản hồi	$u_1 = f(u_2) _{i_1}$	$U_{BE} = f(U_{CE}) _{I_B}$	$U_{EB} = f(U_{CB}) _{I_E}$	$U_{BC} = f(U_{EC}) _{I_B}$
Đặc tuyến truyền đạt	$i_2 = f(i_1) _{u_2}$	$I_C = f(I_B) _{U_{CE}}$	$I_C = f(I_E) _{U_{CB}}$	$I_E = f(I_B) _{U_{EC}}$
Đặc tuyến ra	$i_2 = f(u_2) _{i_1}$	$I_C = f(U_{CE}) _{I_B}$	$I_C = f(U_{CB}) _{I_E}$	$I_E = f(U_{EC}) _{I_B}$

2. Các cách mắc BJT và các họ đặc tuyến tương ứng

Các họ đặc tuyến đặc trưng cho tham số, đặc tính của BJT ở mỗi cách mắc, chúng có vai trò quan trọng trong việc xác định các điểm làm việc, định thiên, chế độ làm việc của BJT. Để vẽ các họ đặc tuyến này thường dùng mô hình BJT lý tưởng, với các đ/k:

- Đặc tuyến V-A của mỗi chuyển tiếp PN đều được mô tả bằng biểu thức: $I = I_S [\exp(U/U_{th}) - 1]$
- Cường độ điện trường trong chuyển tiếp PN nếu phân cực ngược phải nhỏ hơn nhiều điện trường gây ra đánh thủng
- Điện trở suất của các miền E, B, C coi như là rất nhỏ. Ngoài điện trường tồn tại ở các chuyển tiếp PN không có điện trường tồn tại ở các nơi khác
- Nồng độ phun các hạt dẫn thấp
- Trong BJT lý tưởng đặc tuyến của mỗi chuyển tiếp PN chịu ảnh hưởng tuyến tính của dòng điện đi qua chuyển tiếp kia

Các tham số đặc trưng cho BJT ở mỗi chế độ mắc (1)

Ngoài các đặc tuyến tương ứng với từng chế độ mắc, còn cần phải xác định các tham số đặc trưng như sau:

- Độ hỗ dẫn S : biểu thị mối quan hệ giữa dòng điện ra trên mạch và điện áp vào

$$S = \frac{dI_{ra}}{dU_{vao}} \quad khi \quad U_{ra} = const$$

- Điện trở ra vi phân r_{ra} : biểu thị quan hệ giữa dòng điện trên mạch ra với điện áp trên mạch ra.

$$r_{ra} = \frac{dU_{ra}}{dI_{ra}} \quad khi \quad I_{vao} = const$$

- Điện trở vào vi phân r_{vao} : biểu thị quan hệ giữa dòng điện trên mạch vào với điện áp trên mạch vào

$$r_{vao} = \frac{dU_{vao}}{dI_{vao}} \quad khi \quad U_{ra} = const$$

Các tham số đặc trưng cho BJT ở mỗi chế độ mắc (2)

- Hệ số khuếch đại dòng điện tĩnh: K_{i0}

$$K_{i0} = \frac{I_{ra}}{I_{vào}}$$

- Hệ số khuếch đại điện áp: K_u

$$K_u = \frac{dU_{ra}}{dU_{vào}}$$

- Hệ số khuếch đại công suất: K_p

$$K_p = \frac{P_{ra}}{P_{vào}}$$

2.1 Sơ đồ BJT npn mắc cực phát chung - CE

❖ **Xác họ định đặc tuyến ra tĩnh:** $I_C = f(U_{CE})|_{I_B}$

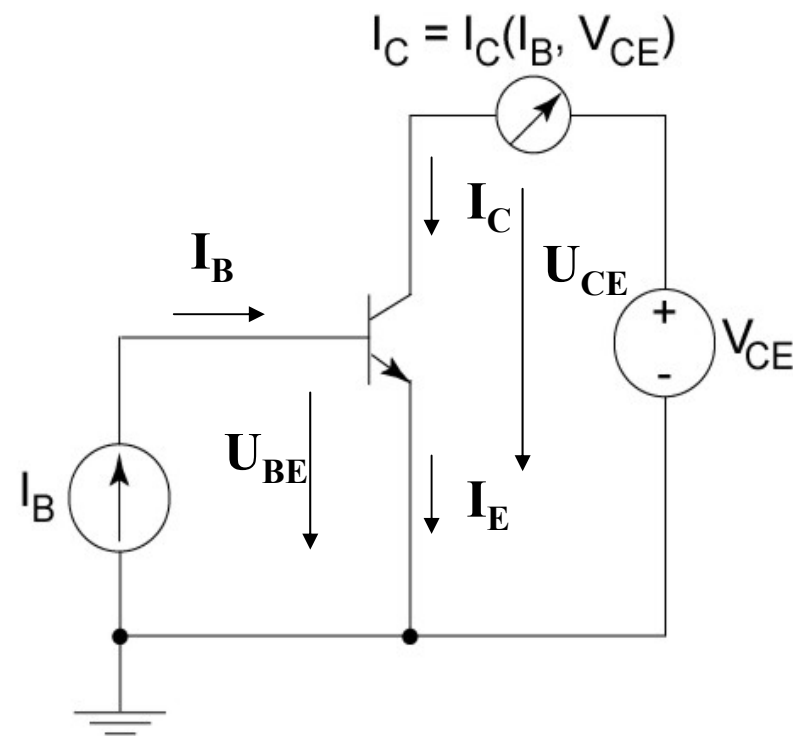
Giữ I_B ở một trị số cố định, thay đổi U_{CE} và ghi lại giá trị tương ứng của I_C , vẽ được đặc tuyến $I_C = f(U_{CE})$

Thay đổi I_B đến giá trị khác nhau và thực hiện tương tự, kết quả thu được là họ đặc tính ra tĩnh của BJT mắc CE

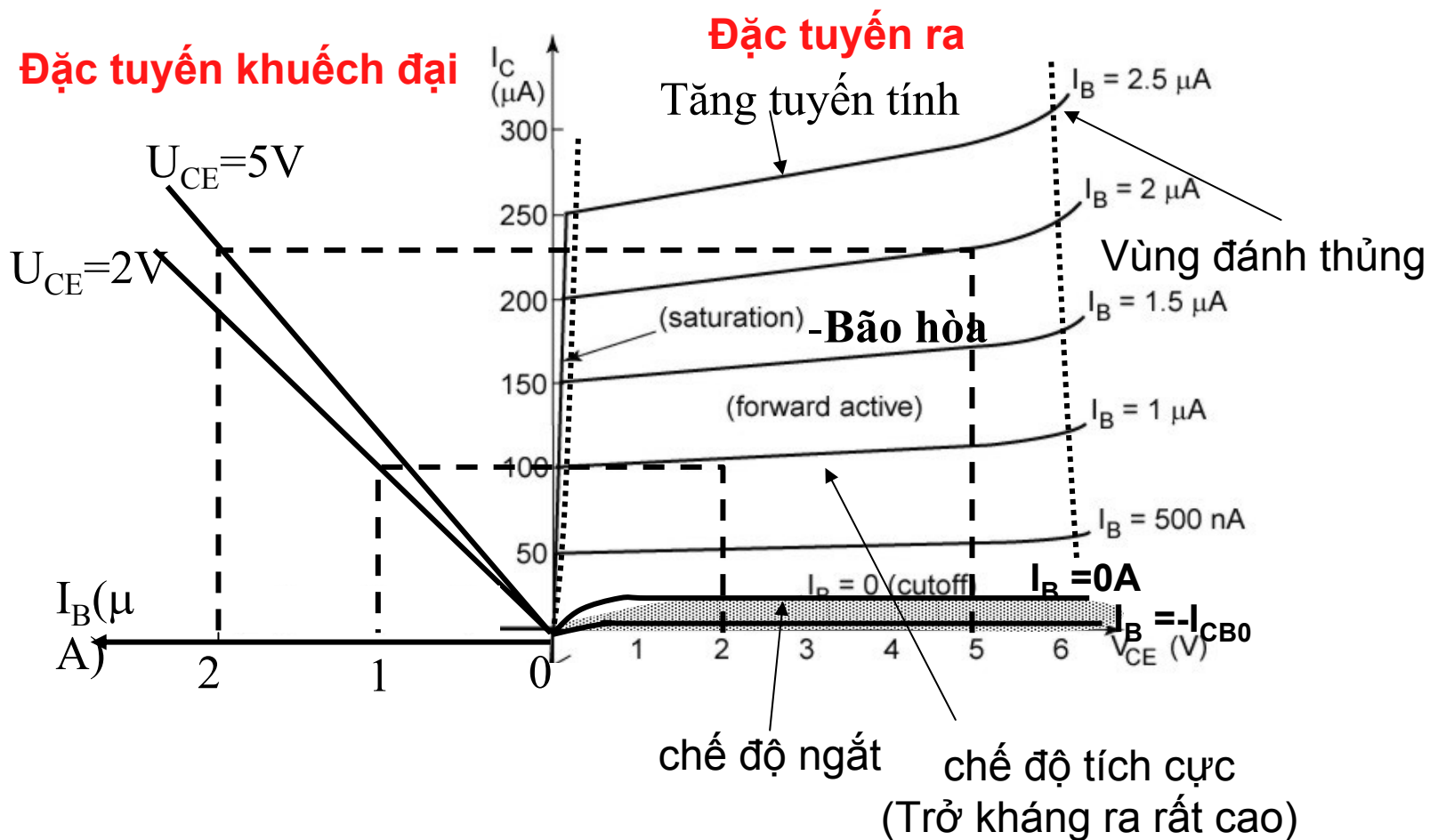
$$U_{BE} = f(I_B)|_{U_{CE}}$$

❖ **Xác định hệ số truyền đạt (đặc tuyến khuếch đại):**

Có thể được xác định từ đặc tuyến ra



Đặc tuyến ra và đặc tuyến khuếch đại (CE)



Nhận xét đặc tuyến ra

- Tại miền khuếch đại, độ dốc của đặc tuyến khá lớn. Khi U_{CE} tăng làm cho độ rộng hiệu dụng của miền B hẹp lại, làm cho số hạt dẫn được cuốn sang miền C càng nhiều, do đó dòng I_C tăng nhanh
- Khi U_{CE} giảm, đến điểm uốn của đặc tuyến khi đó $U_{CB}=U_{CE}-U_{BE}=0$, làm cho chuyển tiếp BC phân cực thuận, BJT chuyển sang chế độ làm việc bão hòa. Khi $U_{EC}=0$ thì điện áp phân cực thuận $U_{CB}=-U_{BE}$ đẩy hạt dẫn thiểu số ở miền C trở lại miền B do đó $I_C=0$, đặc tuyến cũng đi qua gốc tọa độ
- Khi U_{EC} tăng quá lớn, lúc đó U_{CB} quá lớn dẫn tới đánh thủng tiếp giáp T_C , làm cho dòng I_C tăng đột ngột

Nhận xét đặc tuyến truyền đạt:

- Đặc tuyến truyền đạt biểu thị mối qua hệ giữa dòng ra I_C và dòng vào I_B khi giữ U_{CE} cố định. Đặc tuyến này có thể suy ra từ họ đặc tuyến ra

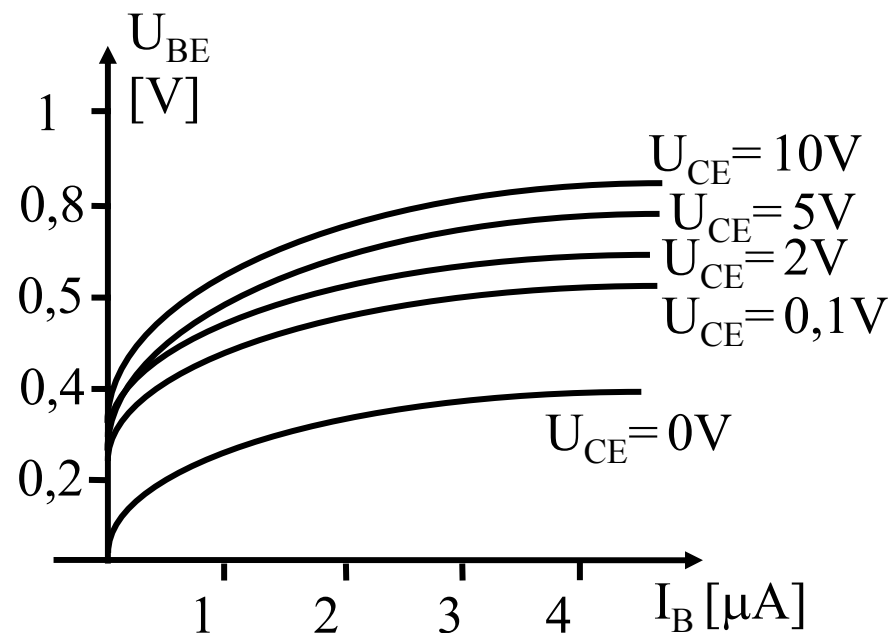
❖ **Xác họ định đặc tuyến vào tĩnh:** $U_{BE} = f(I_B)|_{U_{CE}}$

Giữ $U_{CE} = \text{const.}$, thay đổi U_{BE} và ghi lại giá trị tương ứng của I_B , vẽ được đặc tuyến $I_B = f(U_{BE})$, Thay đổi U_{CE} đến giá trị khác nhau là thực hiện tương tự, kết quả thu được họ đặc tính vào tĩnh của BJT mắc CE

❖ **Nhận xét đặc tuyến vào tĩnh:**

+ Khi $U_{BE} < 0$ thì tiếp xúc phát T_E phân cực ngược, trong lúc tiếp xúc góp phân cực ngược ($U_{CE} < 0$) \rightarrow Transistor làm việc ở chế độ ngắt $I_E = 0 \rightarrow I_B = -I_{CB0}$

+ Khi $U_{BE} > 0$ thì tiếp xúc phát T_E phân cực thuận, đặc tuyến giống như đặc tuyến của diốt phân cực thuận, vì dòng I_B là một phần của dòng I_E qua chuyển tiếp T_E phân cực thuận $I_B = (1 - \alpha)I_E - I_{CB0}$



Các tham số đặc trưng (CE)

➤ Độ hở dẫn S :
$$S = \frac{dI_{ra}}{dU_{Vao}} = \frac{dI_C}{dU_{BE}} \quad khi \quad U_{ra} = U_{CE} = const$$

$$I_C = I_S \cdot e^{U_{BE}/V_{th}} \Rightarrow S = \frac{I_S}{V_{th}} e^{U_{BE}/V_{th}}$$

➤ Điện trở ra vi phân r_{ra} :
$$r_{ra} = r_{CE} = \frac{dU_{CE}}{dI_C} \quad khi \quad I_{vào} = I_B = const$$

➤ Điện trở vào vi phân $r_{vào}$:
$$r_{vào} = r_{BE} = \frac{dU_{BE}}{dI_B} \quad khi \quad U_{ra} = U_{BE} = const$$

➤ Hệ số khuếch đại dòng điện tĩnh:
$$K_{i0} = \frac{I_{ra}}{I_{vào}} = \frac{I_C}{I_B} = \beta_{DC} = h_{FE}$$

➤ K_{i0} khá lớn, mạch CE có thể khuếch đại dòng điện

➤ Đặc điểm của mạch CE (Xem giáo trình)

2.2 Sơ đồ BJT npn mắc cực phát chung - CB

❖ **Xác họ định đặc tuyến ra tĩnh:** $I_C = f(U_{CB})|_{I_E}$

Giữ $I_E = \text{const.}$, thay đổi U_{CB} và ghi lại giá trị tương ứng của I_C , vẽ được đặc tuyến $I_C = f(U_{CB})$. Thay đổi I_E đến giá trị khác nhau và thực hiện tương tự, ta

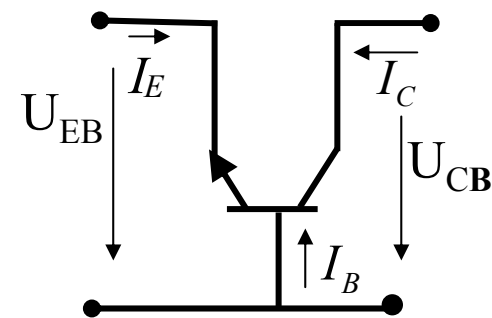
thu được là họ đặc tính ra tĩnh của BJT mắc B chung

❖ **Xác họ định đặc tuyến vào tĩnh:** $U_{EB} = f(I_E)|_{U_{CB}}$

Giữ $U_{CB} = \text{const.}$, thay đổi U_{EB} và ghi lại giá trị tương ứng của I_E , vẽ được đặc tuyến $I_E = f(U_{EB})$. Thay đổi U_{CB} đến giá trị khác nhau và thực hiện tương tự, ta thu được họ đặc tính vào tĩnh của BJT mắc B chung

❖ **Xác định hệ số truyền đạt:** $I_C = f(I_E)|_{U_{CB}}$

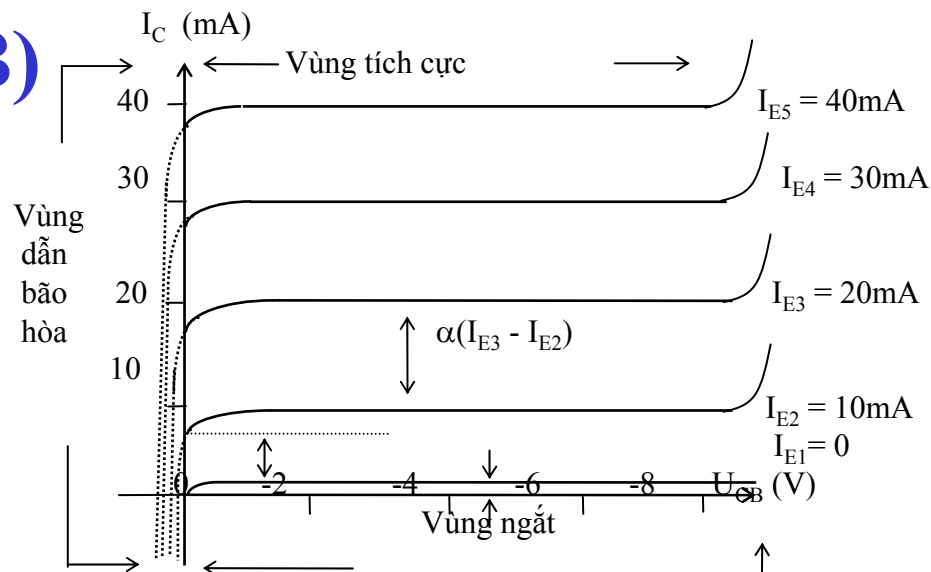
Có thể được xác định từ đặc tuyến ra



(CB)

❖ Đặc tuyến ra tĩnh (CB)

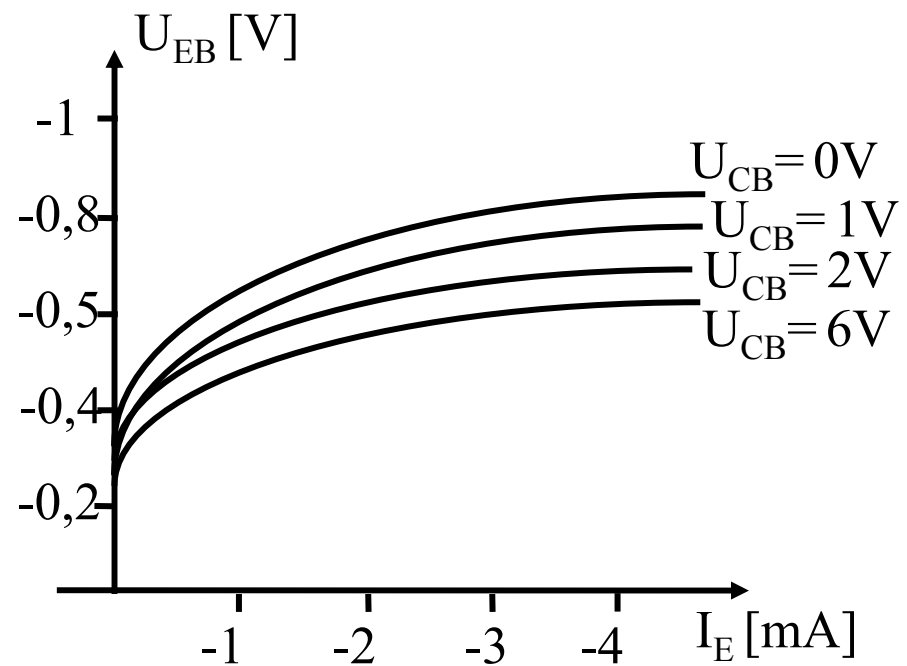
Đối với dòng I_E cố định, $I_C \approx I_E$, khi U_{CB} tăng lên, I_C tăng nhưng không đáng kể



- Khác so với đặc tuyến ra của BJT mắc CE, khi U_{CB} giảm tới 0, I_C vẫn chưa giảm tới 0, do bản thân chuyển tiếp T_C vẫn còn điện thế tiếp xúc, chính điện thế tiếp xúc này đã cuốn những hạt dẫn từ miền B sang miền C làm cho dòng I_C tiếp tục chảy. Để $I_C = 0$ thì T_C phải được phân cực thuận. Miền đặc tuyến trong đó T_C phân cực thuận gọi là miền bão hòa
- Khi U_{CB} tăng đến giá trị nào đó thì I_C tăng lên đột ngột do hiện tượng đánh thủng xảy ra

Nhận xét đặc tuyến vào tĩnh (CB)

- Chuyển tiếp EB luôn phân cực thuận nên đặc tuyến vào của mạch CB cơ bản giống như đặc tuyến thuận của điốt. Ứng với điện áp âm vào U_{EB} cố định dòng vào I_E càng lớn khi điện áp U_{CB} càng lớn, vì miền điện tích không gian của chuyển tiếp T_C phân cực ngược càng tăng, làm cho khoảng cách hiệu dụng giữa chuyển tiếp Emitter và Collector ngắn lại, do đó dòng IE tăng lên



Các tham số đặc trưng (CB)

■ Độ hở dẫn S :
$$S = \frac{dI_{ra}}{dU_{Vao}} = \frac{dI_C}{dU_{EB}} \quad khi \quad U_{ra} = U_{CB} = const$$

$$I_C = I_S \cdot e^{U_{BE}/V_{th}} \Rightarrow S = -\frac{I_S}{V_{th}} e^{U_{BE}/V_{th}}$$

■ Điện trở ra vi phân r_{ra} :
$$r_{ra} = r_{CB} = \frac{dU_{CB}}{dI_C} \quad khi \quad I_{vào} = I_E = const$$

■ Điện trở vào vi phân $r_{vào}$:
$$r_{vào} = r_{EB} = \frac{dU_{EB}}{dI_B} \quad khi \quad U_{ra} = U_{CB} = const$$

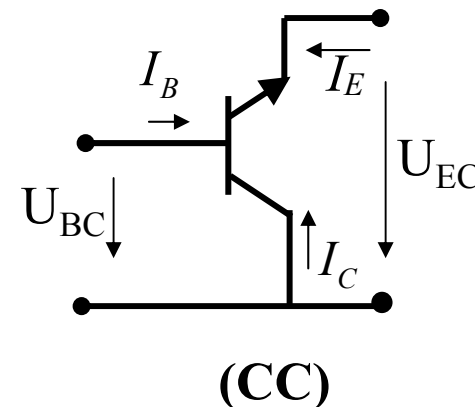
■ Hệ số khuếch đại dòng điện tĩnh:
$$K_{i0} = \frac{I_{ra}}{I_{vào}} = \frac{I_C}{I_E} = \alpha_0 < 1$$

- $K_{i0} < 1$, mạch CB không thể dùng làm mạch khuếch đại dòng điện
- Đặc điểm của mạch CB (Xem giáo trình)

2.3 Sơ đồ BJT npn mắc cực góp chung - CC

❖ **Xác định họ đặc tuyến ra tĩnh:** $I_E = f(U_{EC})|_{I_B}$

Giữ I_B ở một trị số cố định, thay đổi U_{EC} và ghi lại giá trị tương ứng của I_E , vẽ được đặc tuyến $I_E = f(U_{EC})$. Thay đổi I_B đến giá trị khác nhau là thực hiện tương tự, ta thu được họ đặc tính ra tĩnh của BJT mắc C chung



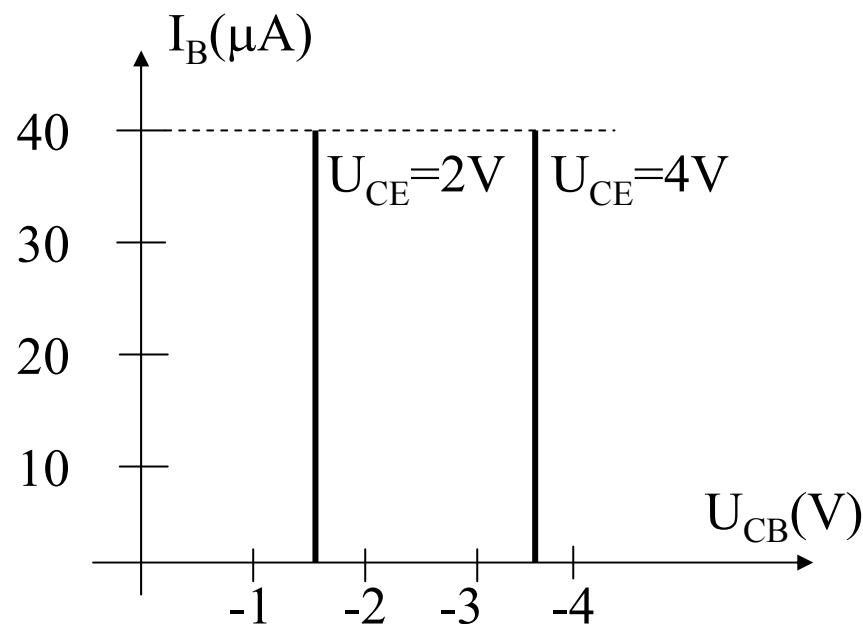
❖ **Xác họ định đặc tuyến vào tĩnh:** $U_{BC} = f(I_B)|_{U_{EC}}$

Giữ U_{EC} ở một trị số cố định, thay đổi U_{BC} và ghi lại giá trị tương ứng của I_B , vẽ được đặc tuyến $I_B = f(U_{BC})$. Thay đổi U_{EC} đến giá trị khác nhau là thực hiện tương tự, ta thu được họ đặc tính vào tĩnh của BJT mắc C chung

❖ **Xác định hệ số truyền đạt (đặc tuyến khuếch đại):** $I_E = f(I_B)|_{U_{EC}}$

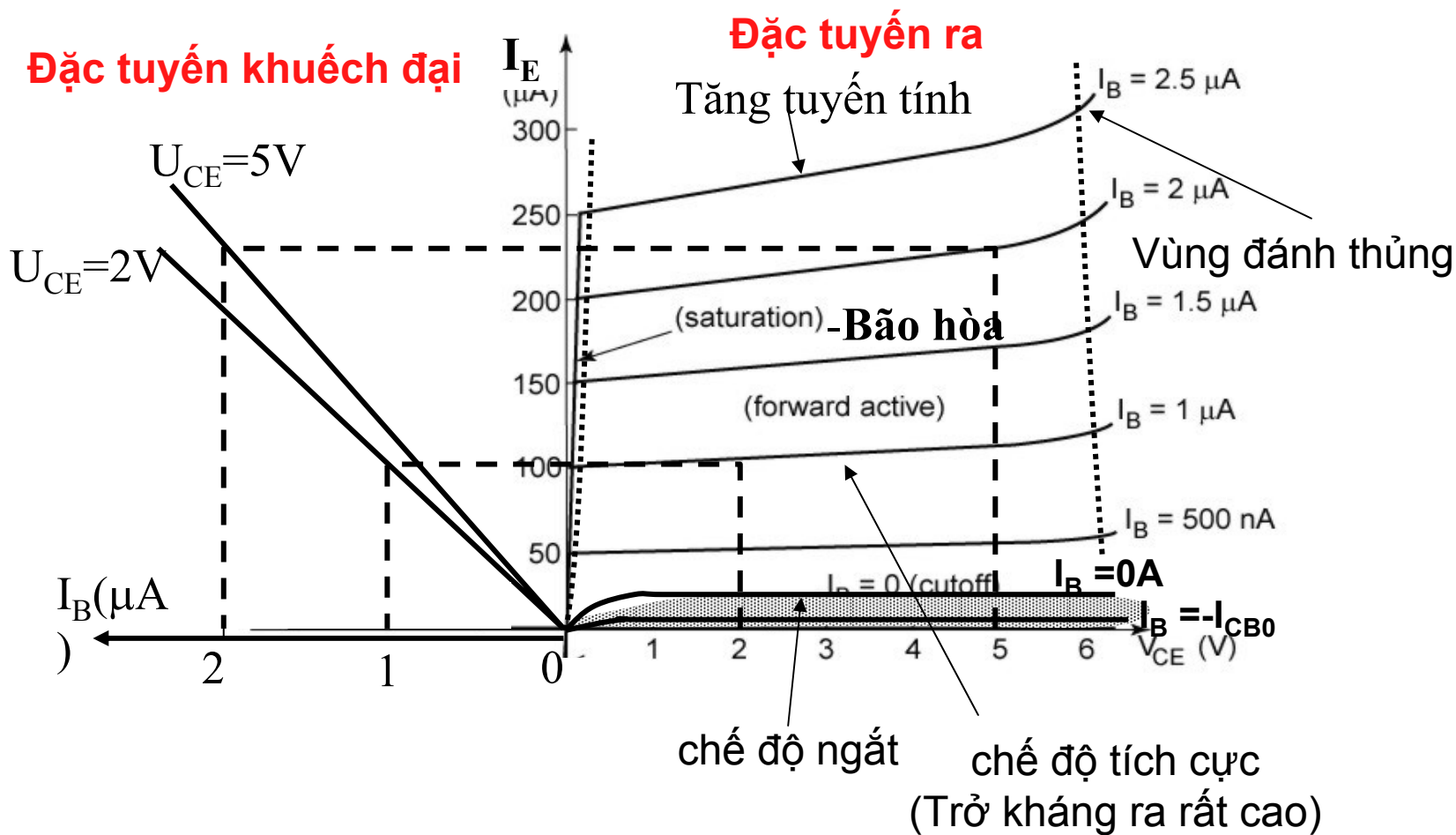
Có thể được xác định từ đặc tuyến ra

Đặc tuyến vào tĩnh (CC)



- Đặc tuyến vào của mạch mắc CC khác hẳn với trường hợp mắc CE và CB. Trường hợp này điện áp vào U_{CE} phụ thuộc rất nhiều vào điện áp ra U_{CB} ,

Đặc tuyến ra (CC)



Các tham số đặc trưng (CC)

- Độ hỗ dẫn S : $S = \frac{dI_{ra}}{dU_{vào}} = \frac{dI_E}{dU_{BC}}$ khi $U_{ra} = U_{EC} = const$
- Điện trở ra vi phân r_{ra} : $r_{ra} = r_{EC} = \frac{dU_{EC}}{dI_E}$ khi $I_{vào} = I_B = const$
- Điện trở vào vi phân $r_{vào}$: $r_{vào} = r_{BC} = \frac{dU_{BC}}{dI_B}$ khi $U_{ra} = U_{EC} = const$
- Hệ số khuếch đại dòng điện tĩnh: $K_{i0} = \frac{I_{ra}}{I_{vào}} = \frac{I_E}{I_B}$
- Hệ số khuếch đại điện áp : $K_U = \frac{dU_{ra}}{dU_{vào}}$
- Đặc điểm của mạch CC (Xem giáo trình)

3. Phân cực cho BJT

3.1. Khái niệm phân cực cho các chế độ làm việc của BJT

3.2. Phân cực bằng dòng cố định

3.3. Phân cực bằng hồi tiếp âm

3.4. Phân cực bằng mạch định thiên tự cấp

3.1 Khái niệm phân cực cho các CĐ làm việc của BJT

Phân cực (định thiên – Biasing) cho BJT:

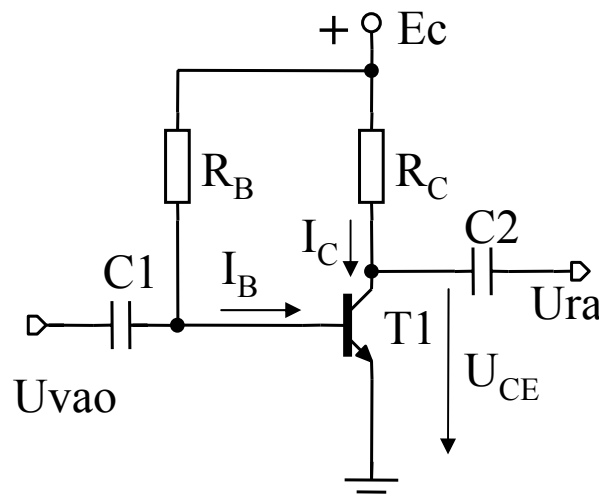
- Muốn BJT làm việc như một phần tử tích cực thì các tham số của BJT phải thỏa mãn đk thích hợp, những tham số này phụ thuộc nhiều vào điện áp phân cực các chuyển tiếp Collector và Emitter. Như vậy các tham số của BJT phụ thuộc nhiều vào điện áp định thiên ban đầu (điểm làm việc tĩnh) của nó
- Muốn BJT làm việc ở chế độ tích cực thì chuyển tiếp B-E phân cực thuận, chuyển tiếp B-C phân cực ngược (BJT npn: $U_E < U_B < U_C$, BJT pnp: $U_E > U_B > U_C$).
- Đường tải tĩnh, điểm làm việc tĩnh: Đường tải tĩnh (đường tải 1 chiều) được vẽ trên đặc tuyến ra tĩnh của BJT để nghiên cứu mối quan hệ giữa dòng điện ra và điện áp ra của BJT ở chế độ một chiều.
- Điểm làm việc tĩnh (điểm phân cực 1 chiều) là điểm nằm trên đường tải tĩnh, nó xác định dòng điện, điện áp 1 chiều trên BJT khi không có tín hiệu xoay chiều đặt vào
- Để minh họa xét ví dụ với mạch BJT npn mắc CE, xác định đường tải tĩnh và điểm làm việc của chúng

3.1 Khái niệm phân cực cho các CĐ làm việc của BJT

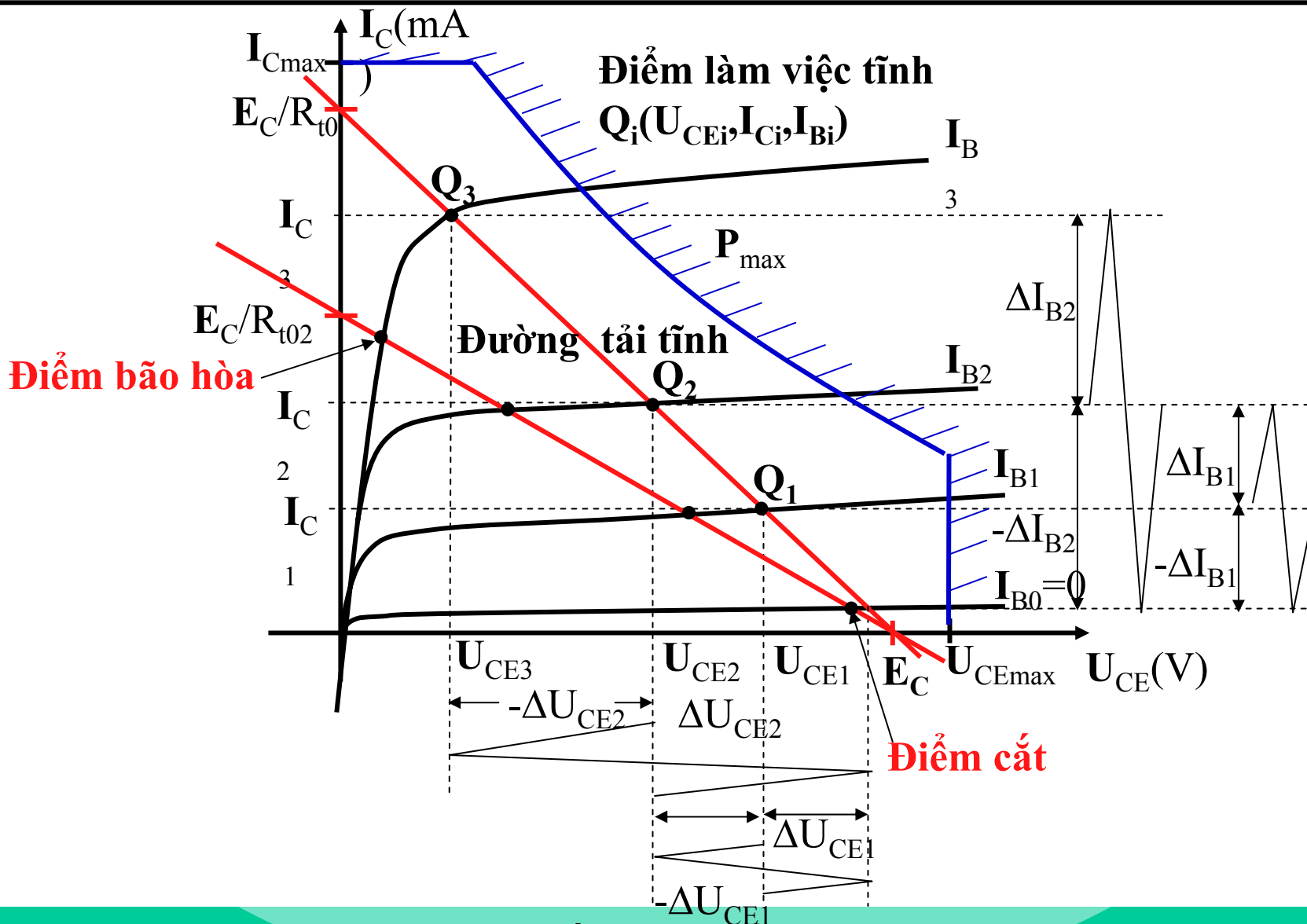
- Xét ví dụ với mạch BJTnpn mắc CE, xác định đường tải tĩnh và điểm làm việc
- Phương trình đường tải tĩnh:

$$U_{CE} = E_C - I_C \cdot R_C$$

(tải 1 chiều: $R_{t0} = R_C$), đồ thị như hình vẽ



- Tùy theo các giá trị phân cực mà điểm làm việc tĩnh có tọa độ khác nhau, điểm làm việc tĩnh $Q_i(U_{CEi}, I_{Ci}, I_{Bi})$ là giao điểm của đường tải tĩnh và đặc tuyến ra tương ứng với dòng phân cực $I_B = I_{Bi}$
- Khi có tín hiệu đặt vào, I_B biến đổi $\rightarrow I_C$ biến đổi, kết quả là U_{ra} trên tải biến đổi. Cần phải chọn điểm làm việc tĩnh Q để điện áp ra trên tải không bị méo. Thông thường để biên độ điện áp ra cực đại, không làm méo dạng tín hiệu, điểm làm việc tĩnh thường được chọn ở giữa đường tải tĩnh.



- Chú ý khi chọn điểm làm việc tĩnh cần quan tâm đến các giá trị danh định của BJT như: P_{cmax} , U_{Cmax} , I_{Cmax} , U_{BEmax} , dải nhiệt độ làm việc $T_{min} \div T_{max}$
- Điểm làm việc tĩnh phải lựa chọn nằm trong giới hạn đường P_{max} .
- Ổn định điểm làm việc tĩnh và ổn định nhiệt: BJT rất nhạy cảm với nhiệt độ, nhất là U_{BE} và I_{CB0} , mà $I_C = \beta_0 \cdot I_B + I_{CB0} / (1 - \alpha)$, nên khi nhiệt độ thay đổi điểm làm việc tĩnh cũng thay đổi.
- Hệ số ổn định nhiệt: $S = \frac{dI_C}{dI_{CB0}}$ Đạo hàm 2 vế theo I_C phương trình $I_C = \beta_0 \cdot I_B + I_{CB0} / (1 - \alpha)$, rút gọn ta có:

$$S = \frac{1 + \beta_0}{1 - \beta_0 \cdot \frac{dI_B}{dI_C}}$$

Mô hình tương đương một chiều

❖ Khi tính toán phân cực cho BJT có thể sử dụng mô hình tương đương một chiều. Thường sử dụng mô hình Ebers-Moll. Trong mỗi chế độ làm việc cụ thể sử dụng sơ đồ tương đương Ebers-Moll đơn giản.

❖ Khi tính toán chế độ 1 chiều để đơn giản có thể dùng các công thức:

+ **Chế độ tích cực:** $I_C = I_B \beta_0$

$$U_{BE} \approx \text{const}$$

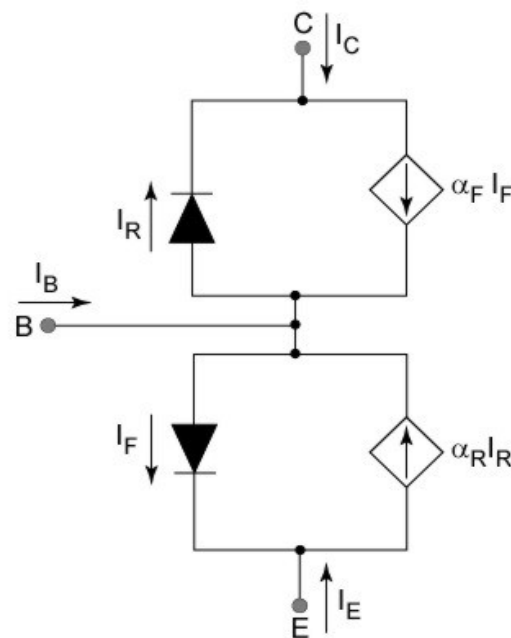
(eg. $0,7V - npnSi; -0,7V - pnpSi$)

+ **Chế độ bão hòa:**

$$U_{CE} \approx 0 \quad I_B > \frac{I_C}{\beta_0}$$

+ **Chế độ ngắt:**

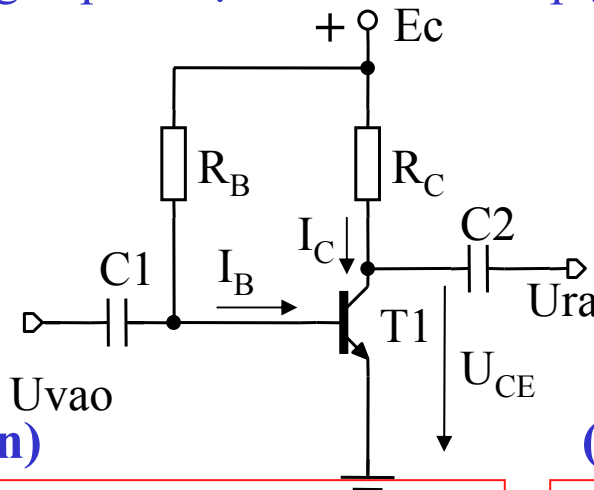
$$I_C \approx 0 \quad I_B \approx 0$$



Diode Currents:
 $I_F = I_{ES}(e^{V_{BE}/V_{th}} - 1)$
 $I_R = I_{CS}(e^{V_{BC}/V_{th}} - 1)$

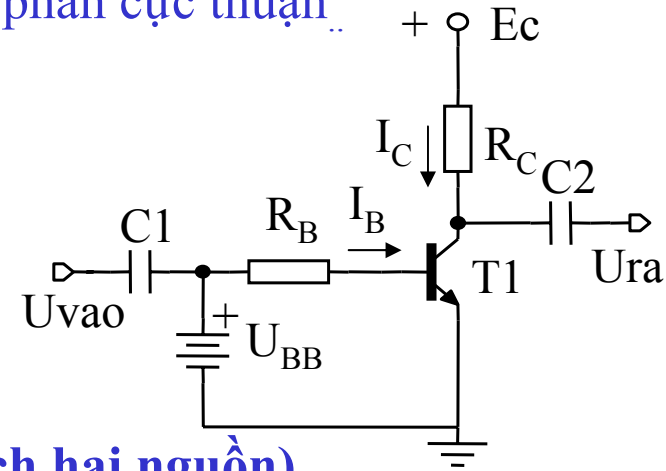
3.2 Mạch định thiên bằng dòng cố định (Đ/thiên cực gốc)

Dòng I_B từ nguồn một chiều cung cấp cho BJT không đổi, có thể dùng mạch 1 nguồn một chiều E_C hoặc hai nguồn một chiều U_{BB} và E_C . Điện trở R_B đấu từ cực + của nguồn cung cấp về cực B sao cho tiếp giáp BE phân cực thuận.



(a- Mạch 1 nguồn)

$$I_B = (E_C - U_{BE}) / R_B \approx E_C / R_B$$



(b – Mạch hai nguồn)

$$I_B = (U_{BB} - U_{BE}) / R_B \approx U_{BB} / R_B$$

+ Phương trình đường tải: $E_C = I_C \cdot R_{t0} + U_{CE}$ ($R_{t0} = R_C$)

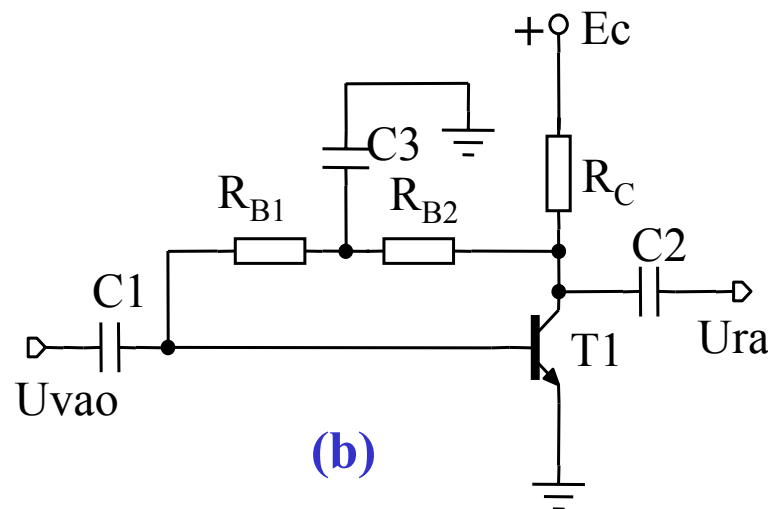
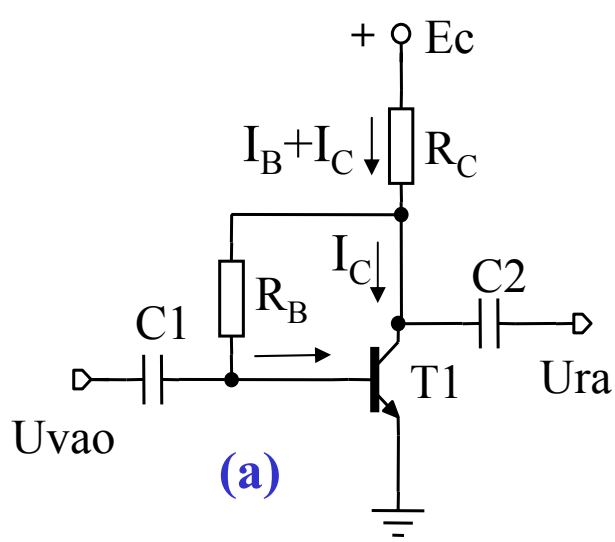
+ Mặc theo các sơ đồ trên $I_B = \text{const} \Rightarrow \Delta I_B / \Delta I_C = 0$

+ Hệ số ổn định nhiệt là: $S = \beta_0 + 1$, S phụ thuộc vào hệ số KĐ dòng Emitter tĩnh β , vậy S phụ thuộc vào từng loại BJT và thường lớn, độ ổn định kém nhất.

3.3 Mạch phân cực hồi tiếp âm

- Khi tín hiệu đầu ra thay đổi cũng sẽ tác động đến đầu vào làm thay đổi tín hiệu đầu vào gọi là mạch có hồi tiếp.
- Nếu tín hiệu ra tăng lại làm tín hiệu đầu vào giảm thì gọi là hồi tiếp âm.
- Với mạch phân cực cho BJT nếu giả sử khi nhiệt độ thay đổi làm cho dòng điện ra I_C và I_E tăng lên, sự tăng này nếu làm giảm điện áp đặt trên tiếp giáp BE hoặc CE thì sẽ làm cho I_B giảm, như vậy I_C và I_E giảm, điếm làm việc được ổn định.
- Tùy theo phương pháp dùng hồi tiếp âm điện áp mà có các loại mạch phân cực hồi tiếp âm khác nhau:
 - a. Mạch định thiên hồi tiếp âm Collector.*
 - b. Mạch định thiên hồi tiếp âm Emitter.*
 - c. Mạch định thiên hồi tiếp âm Collector và Emitter.*

a. Mạch định thiên hồi tiếp âm Collector



- Mạch định thiên cố định có độ ổn định nhiệt không cao, và khi dòng I_C tăng làm điện áp U_{CE} giảm, có thể dùng đặc tính này làm cho dòng I_B giảm do đó ổn định được dòng I_C bằng cách dùng điện trở hồi tiếp R_B từ cực C về B, ta có mạch Collector-Feedback Bias (CFB) hình (a).
- $I_B, I_C = ?$
- Phương trình đường tải tĩnh: $E_C = (I_C + I_B)R_C + U_{CE} = I_C R_C (\beta_0 + 1) / \beta_0 + U_{CE}$

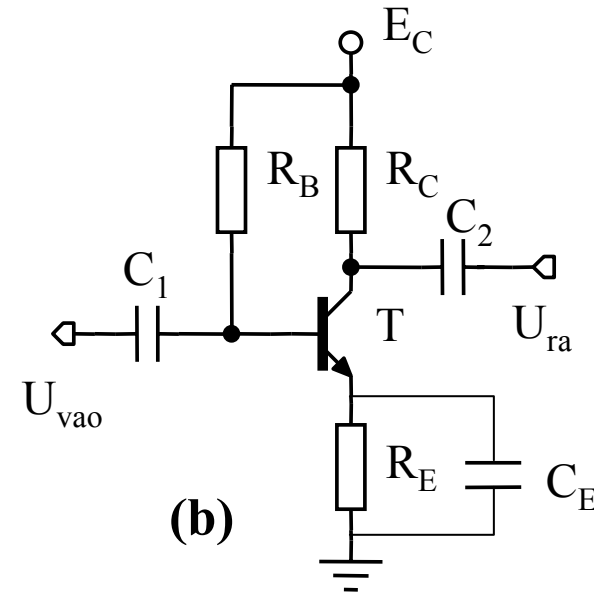
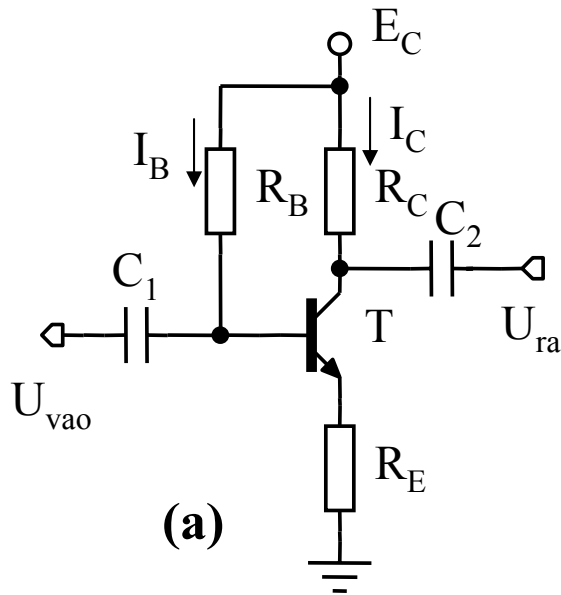
a. Mạch định thiên hồi tiếp âm Collector

- Hệ số ổn định nhiệt:

$$S = \frac{\beta_0 + 1}{1 + \beta_0 \frac{R_C}{R_B + R_C}}$$

- Như vậy $S < \beta_0 + 1$, đã cải thiện được tính ổn định nhiệt.
- Nếu chọn $R_B \ll R_C$ thì $S \rightarrow 1$.
- Điện áp phản hồi âm qua R_B trong mạch phân cực làm tăng độ ổn định nhiệt đồng thời lại làm giảm hệ số khuếch đại tín hiệu xoay chiều, R_B giảm thì độ ổn định tăng nhưng hệ số khuếch đại giảm. Như vậy để khắc phục mâu thuẫn này R_B được chia thành 2 phần R_1 và R_2 và dùng tụ nối đất điểm nối giữa 2 điện trở này như hình (b). Cỡ mạch đối với tín hiệu định thiên 1 chiều nhưng ngăn mạch tín hiệu xoay chiều không cho phản hồi trở lại đầu vào.
- Mạch định thiên hồi tiếp âm Collector vẫn không thể tăng được độ ổn định lên cao vì S và điểm công tác tĩnh phụ thuộc lẫn nhau.

b. Mạch định thiên hồi tiếp âm Emitter



Để dàng tính được:

$$I_B = \frac{(E_C - U_{BE})}{R_E (\beta_0 + 1) + R_B}$$

$$I_C = \frac{\beta_0 (E_C - U_{BE})}{R_E (\beta_0 + 1) + R_B}$$

Phương trình đường tải tĩnh ?

$U_{CE} = ?$

$S = ?$

c. Mạch định thiên hồi tiếp âm Collector và Emitter

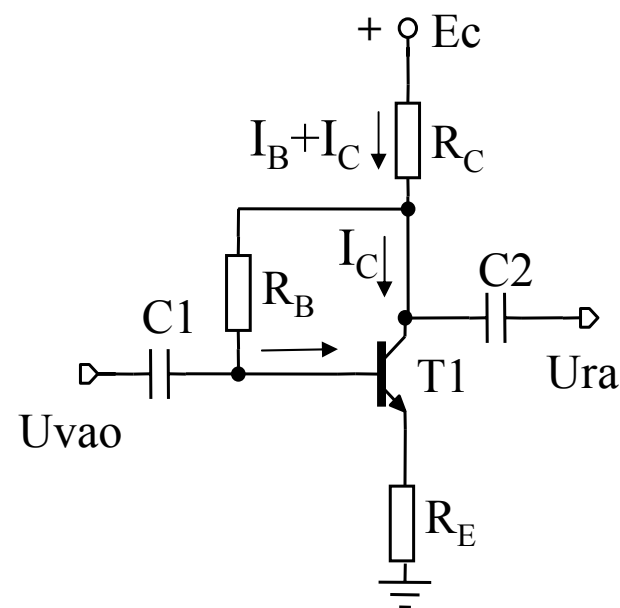
Phương trình đường tải tĩnh ?

$$I_B = ?$$

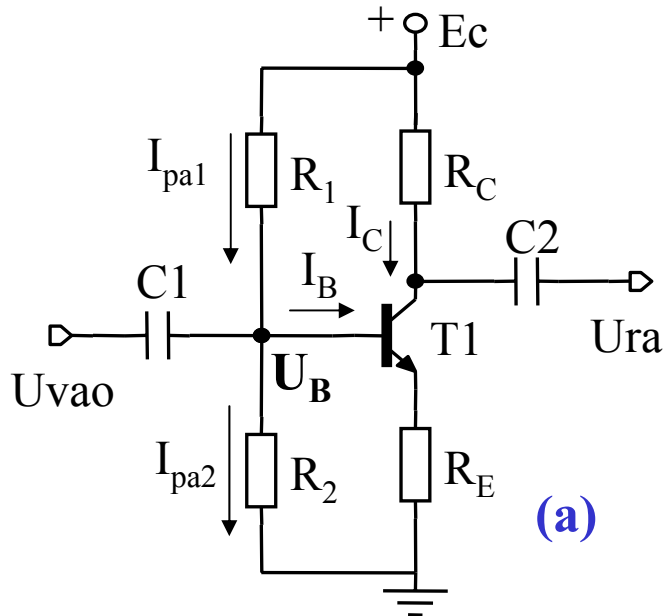
$$I_C = ?$$

$$S = ?$$

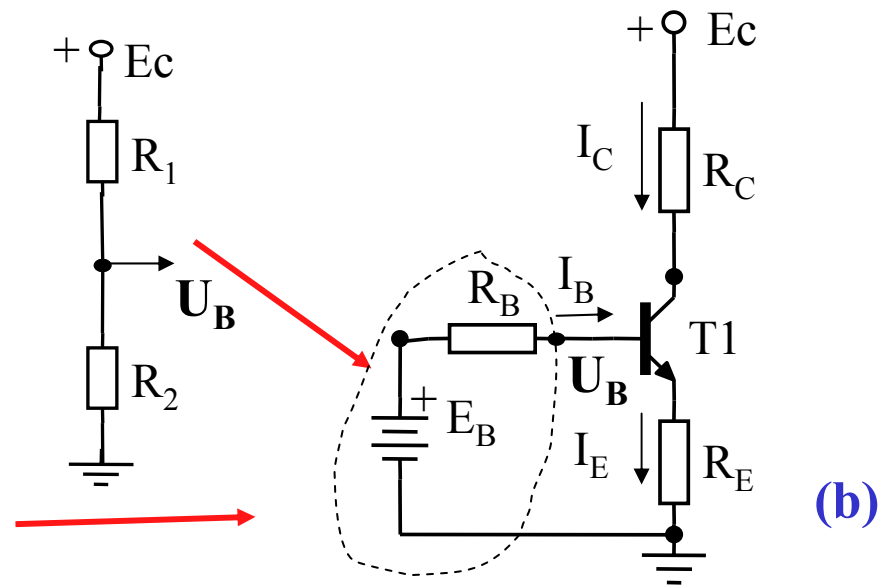
$$U_{CE} = ?$$



3.4 Phân cực bằng mạch định thiên tự cấp



(a)



(b)

- Mạch định thiên tự cấp (còn được gọi là mạch phân áp, mạch phân cực bằng dòng Emitter, mạch phân cực bằng hồi tiếp âm dòng điện) có sơ đồ như hình (a). Sơ đồ tương đương tĩnh như hình (b) (áp dụng biến đổi Norton, Thevenin với cơ cấu nguồn E_C và điện trở phân áp R_1, R_2).
- R_1, R_2 tạo thành mạch phân áp tạo điện áp U_B đặt vào cực B của BJT.

3.4 Phân cực bằng mạch định thiên tự cấp

- R_E hồi tiếp âm dòng điện. $U_{ht} = U_E = I_E \cdot R_E$

-Giá trị của nguồn biến đổi tương đương:

$$E_B = \frac{R_2 \cdot E_C}{R_1 + R_2} \quad \text{và} \quad R_B = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

-Cần chọn R_1, R_2 để đảm bảo U_B ổn định và $U_B \ll E_C$, nhưng R_B không lớn hơn nhiều R_E , nếu không thì sự phân cực của mạch giống như trường hợp phân cực dòng cố định. (Thông thường chọn $R_B = R_E$)

$$E_B = I_B R_B + U_{BE} + (I_C + I_B) R_E = U_{BE} + I_B (R_B + (\beta_0 + 1) R_E)$$

-Trong trường hợp này không được bỏ qua U_{BE}

-Tính toán điểm phân cực:

$$I_B = \frac{E_B - U_{BE}}{R_B + (\beta_0 + 1) R_E}; \quad I_C = \beta_0 I_B$$

- Phương trình đường tải tĩnh: $E_C = I_C (R_C + R_E) + U_{CE} + I_B \cdot R_E$ (bỏ qua $I_B \cdot R_E$)

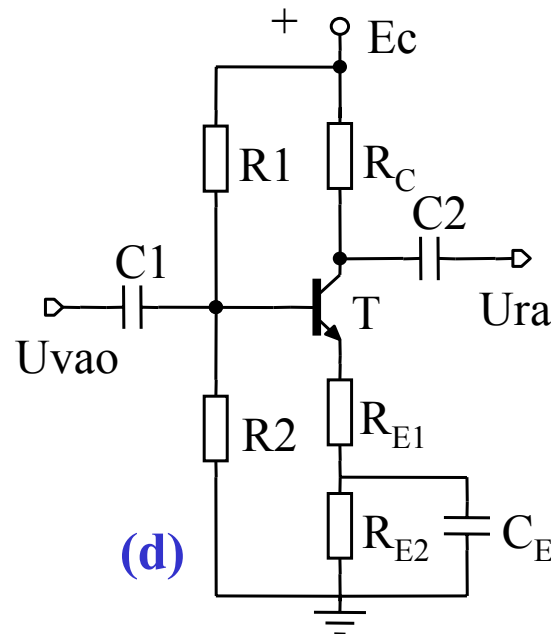
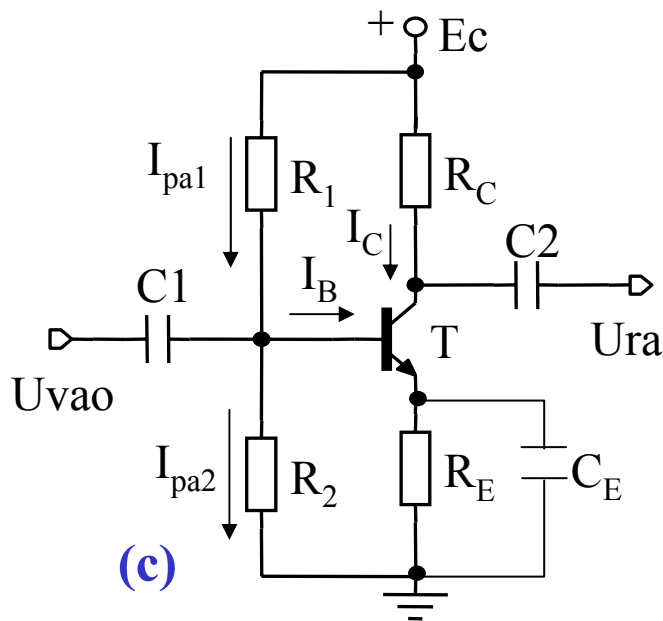
$$E_C = I_C (R_C + R_E) + U_{CE}$$

3.4 Phân cực bằng mạch định thiên tự cấp

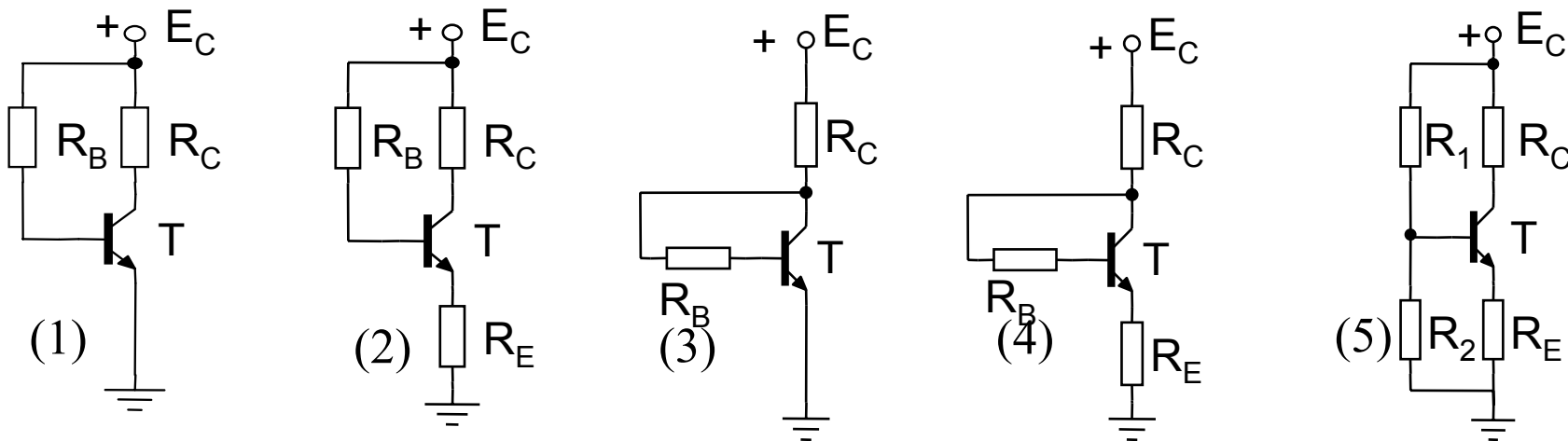
$$S = \frac{\beta_0 + 1}{1 + \beta_0 \frac{R_E}{R_E + R_B}} = (1 + \beta_0) \frac{1 + \frac{R_B}{R_E}}{1 + \beta_0 + \frac{R_B}{R_E}}$$

- $S \rightarrow 1$ khi $R_B \ll R_E$, và $S \rightarrow 1 + \beta_0$ khi $R_B \gg R_E$
- S không phụ thuộc vào $R_{t0} = R_C$.
- Bản chất của sự ổn định nhiệt của mạch định thiên tự cấp chính là dòng phản hồi âm qua điện trở R_E . Tăng R_E nghĩa là tăng phản hồi âm, do đó làm giảm hệ số khuếch đại tín hiệu xoay chiều của mạch. Có thể loại trừ phản hồi âm của tín hiệu xoay chiều bằng cách mắc thêm tụ điện C_E ngắn mạch đối với tín hiệu xoay chiều như hình c, d.
- Trong thực tế β_0 cũng thay đổi theo nhiệt độ, do đó cũng ảnh hưởng đến độ ổn định của điểm làm việc tĩnh

3.4 Phân cực bằng mạch định thiên tự cấp



Tổng kết sự cải thiện các mạch định thiên cho BJT



Độ ổn định tăng dần

(1) : BB - Base Bias

(2) : EFB - Emitter-Feedback Bias

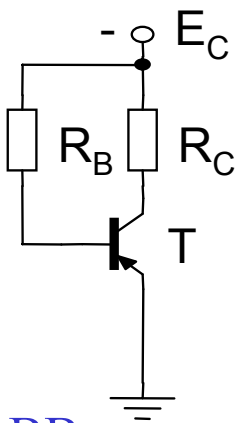
(3) : CFB - Collector-Feedback Bias

(4) : CEFB – Collector- and Emitter- Feedback Bias

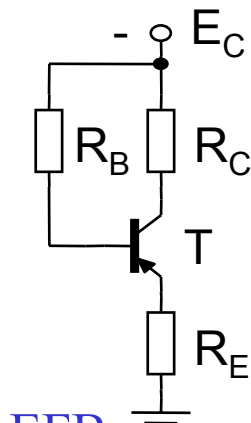
(5) : VDB – Voltage – Divider Bias

Mạch định thiên cho BJTnpn

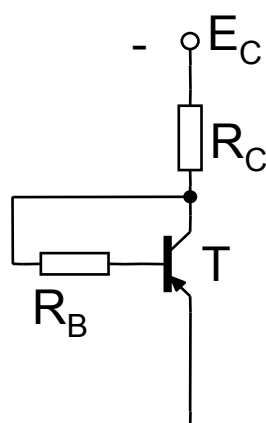
➤ Chú ý: Mạch phân cực cho BJTnpn cũng tương tự, chỉ khác nhau về chiều của nguồn cung cấp, và chú ý chiều dòng điện của các cực cũng ngược lại



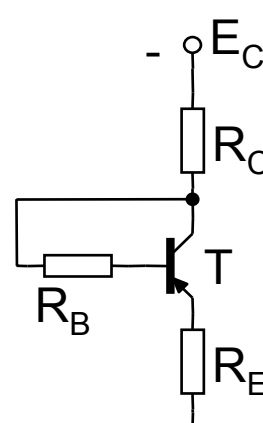
BB



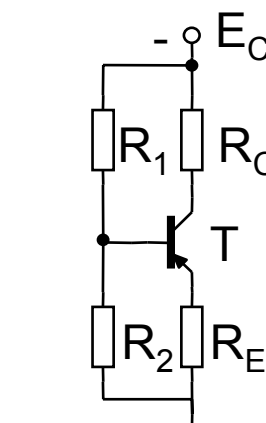
EFB



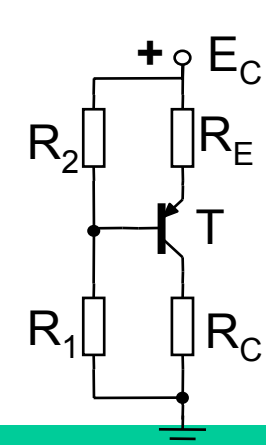
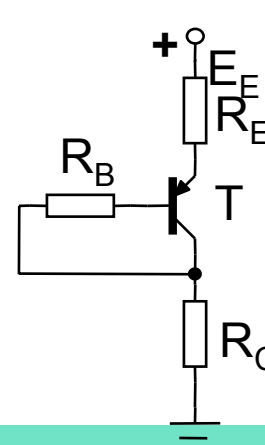
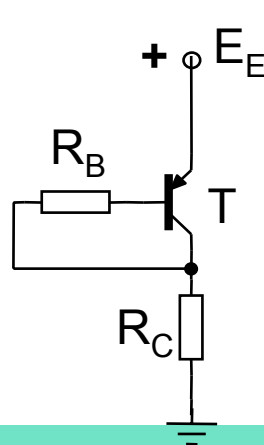
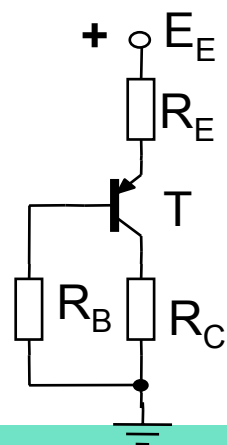
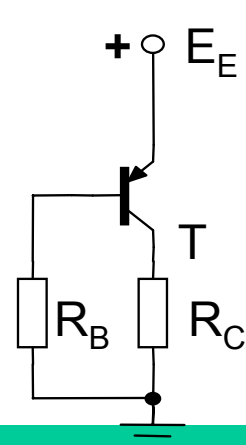
CFB



CEFB



VDB



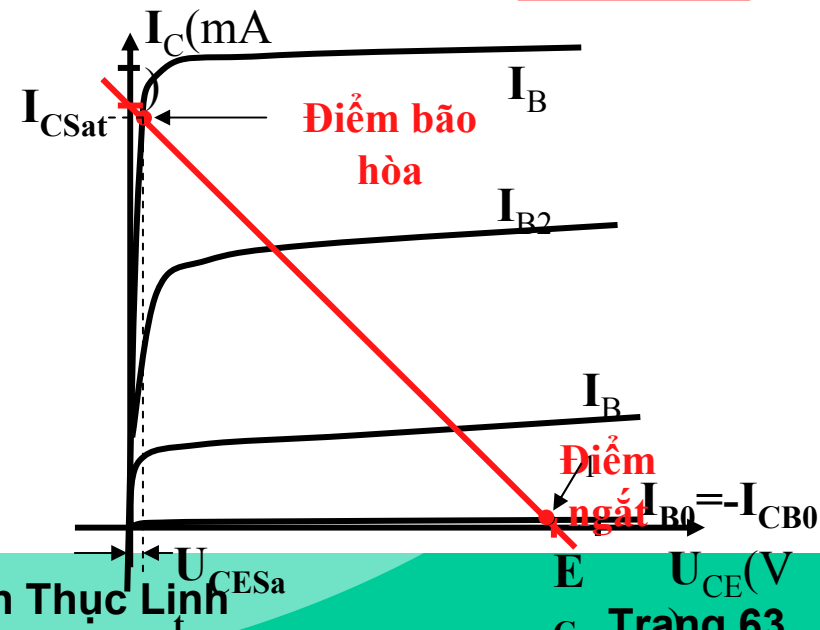
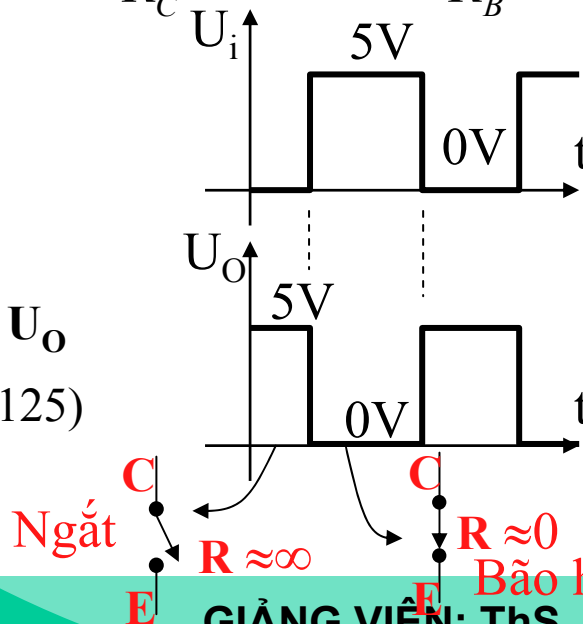
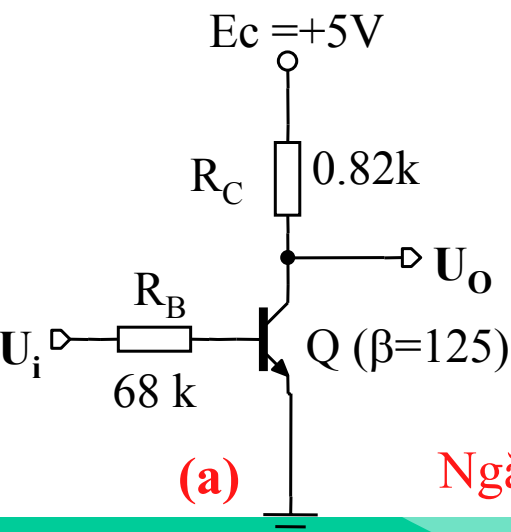
3.5 BJT trong chế độ chuyển mạch (chế độ xung)

- VD: BJT hoạt động trong các mạch xung, mạch số, mạch logic
- BJT trong trường hợp này làm việc như một khóa điện tử, BJT làm việc ở 2 chế độ: **đóng – chế độ ngắt** (ngắt mạch không có dòng đi qua BJT), **mở - chế độ dẫn bão hòa** (nối mạch cho dòng đi qua BJT)
- Do đó các tham số, đặc tính của BJT chuyên dùng cho các ứng dụng này cũng có nhiều đặc tính khác so với BJT chuyên hoạt động chế độ tích cực.
- Các tham số của BJT làm việc ở chế độ chuyển mạch :
 - + Điện áp thuận U_{BEbh} : là điện áp U_{BE} khi BJT mắc CE ở trạng thái bão hòa.
 - + Điện áp bão hòa U_{CEbh} : là điện áp U_{CE} khi BJT mắc CE ở trạng thái bão hòa
 - + Thời gian quá độ của BJT : t_{on} - thời gian quá độ khi BJT chuyển từ chế độ ngắt sang chế độ bão hòa, t_{off} – thời gian quá độ khi BJT chuyển từ chế độ bão hòa sang chế độ ngắt.

3.5 BJT trong chế độ chuyển mạch

- Vdụ mạch BJT làm việc ở chế độ chuyển mạch như hình (a)
 - Khi $U_i = 0V \Rightarrow$ tiếp giáp BE, BC phân cực ngược, Q làm việc ở chế độ ngắt, $I_B = I_{B0} = -I_{CB0} \approx 0, I_C \approx 0 \Rightarrow U_o = E_C = 5V$
 - Khi $U_i = 5V$, chọn R_C, R_B sao cho Q làm việc ở chế độ bão hòa, Khi đó: $U_o = U_{CE} \approx 0V$.
- Như vậy BJT làm việc chuyển đổi giữa 2 điểm bão hòa và ngắt.

$$I_{CSat} = \frac{E_C - U_{CESat}}{R_C} \approx \frac{E_C}{R_C} \quad I_B = \frac{U_i - U_{BE}}{R_B} \quad \text{Điều kiện để Q bão hòa: } I_B > \frac{I_{CSat}}{\beta}$$

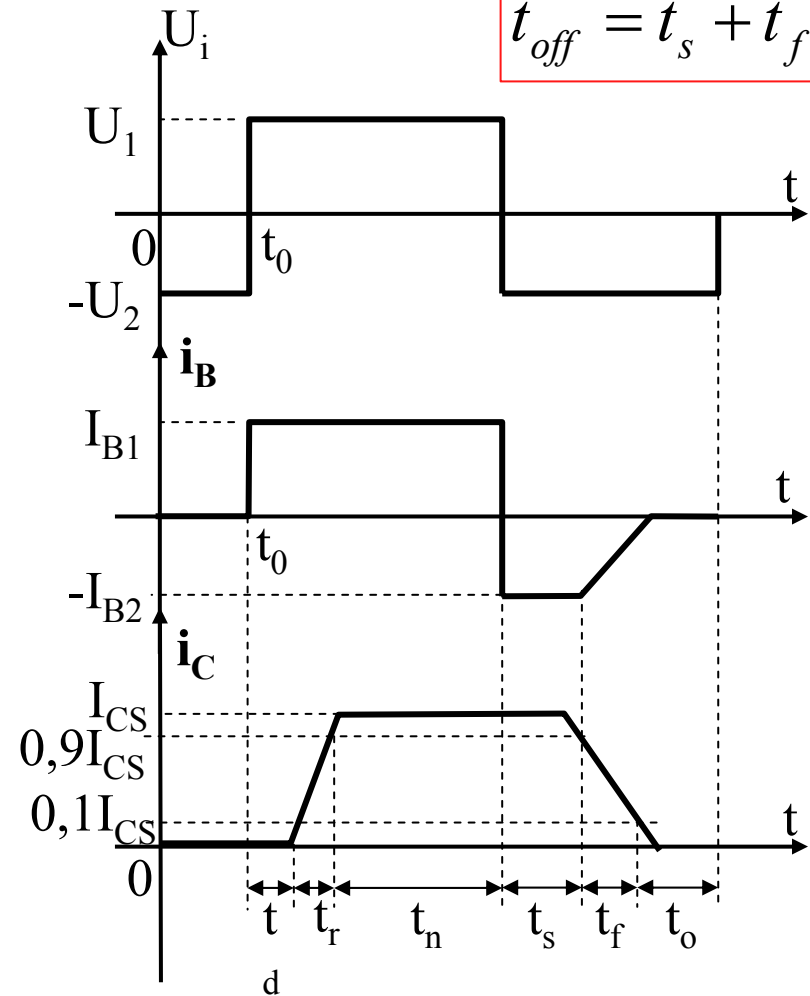


Thời gian quá độ của BJT

- Giảm đồ thời gian minh hoạt các thời gian quá độ của BJT làm việc ở chế độ chuyển mạch.
- Ban đầu BJT ở trạng thái ngắt, tại thời điểm t_0 khi có xung dương đặt vào, chuyển tiếp BE được phân cực thuận BJT mở, tuy nhiên I_C vẫn rất nhỏ như ở trạng thái ngắt trong **thời gian trễ t_d** , sau đó mới bắt đầu tăng và sau **thời gian tăng t_r** mới đạt giá trị bão hòa I_{CS} , và ở trạng thái bão hòa trong khoảng thời gian t_n , sau đó đột ngột xung vào mất $U_i=0$, và dòng I_B chảy theo chiều ngược lại, dòng I_C không giảm nhỏ ngay mà tiếp tục duy trì giá trị bão hòa trong **thời gian tồn tích t_s** , sau đó mất **thời gian hồi phục t_f** mới giảm dần đến giá trị ban đầu như ở trạng thái ngắt

$$t_{on} = t_d + t_r$$

$$t_{off} = t_s + t_f$$



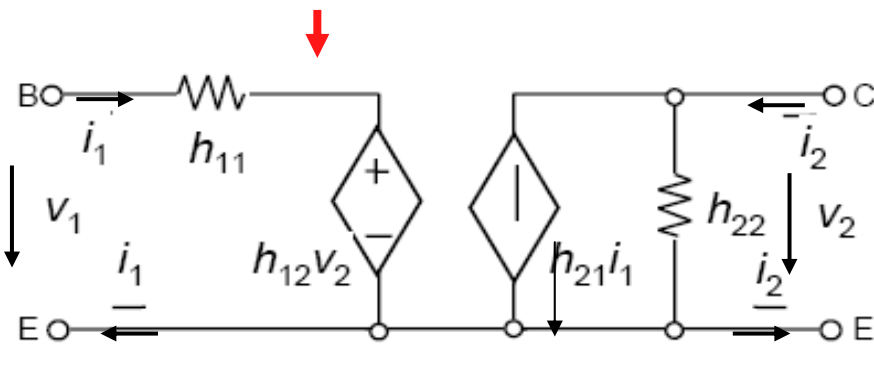
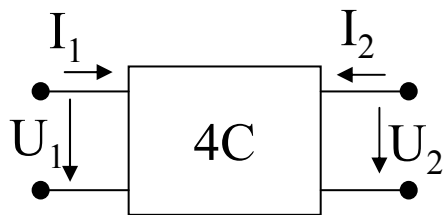
4. Các mô hình tương đương của BJT

- a. Mô hình tương đương một chiều
- b. Mô hình tham số Hybrid (Hybrid parameter/h-Parameter Model)
- c. Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ hybrid- π
- d. Mô hình tương đương r_e
- e. Mô hình Spice

b. Mô hình tham số Hybrid

- Từ hệ phương trình hỗn hợp H của 4C có thể suy ra mô hình tương đương của 4C như hình vẽ.

$$\begin{cases} u_1 = h_{11} \cdot i_1 + h_{12} \cdot u_2 \\ i_2 = h_{21} \cdot i_1 + h_{22} \cdot u_2 \end{cases}$$



$$h_{11} = h_i = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

Trở kháng vào khi đầu ra ngắn mạch

$$h_{12} = h_r = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0}$$

Độ khuếch đại điện áp ngược hở mạch

$$h_{21} = h_f = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

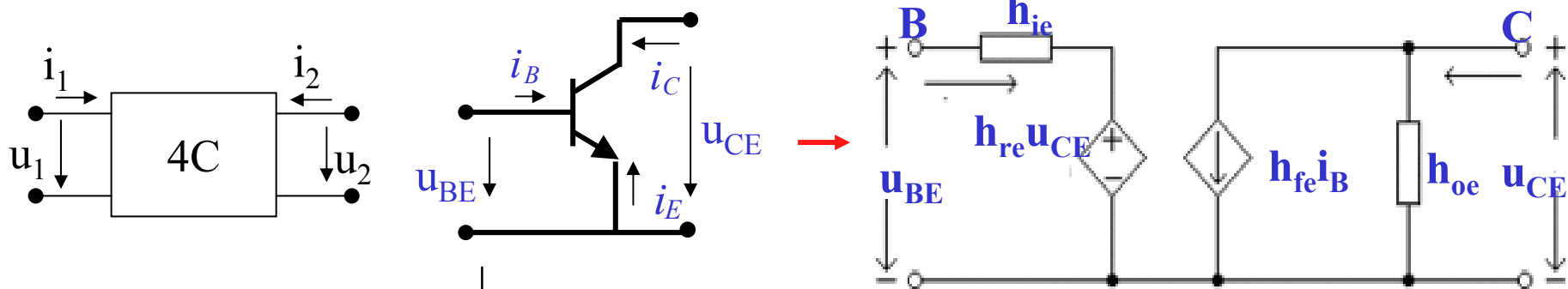
Hệ số khuếch đại dòng thuận ngắn mạch

$$h_{22} = h_o = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0}$$

Độ hở dẫn ra khi đầu vào hở mạch

Tham số h sẽ được ký hiệu và tính theo mỗi cách mắc BJT khác nhau

b1. Mô hình mạch tương đương Hybrid – mạch CE



$$h_{11} = h_{ie} = \left. \frac{u_{BE}}{i_B} \right|_{u_{CE}=0} = r_e$$

$$h_{12} = h_{re} = \left. \frac{u_{BE}}{u_{CE}} \right|_{i_B=0}$$

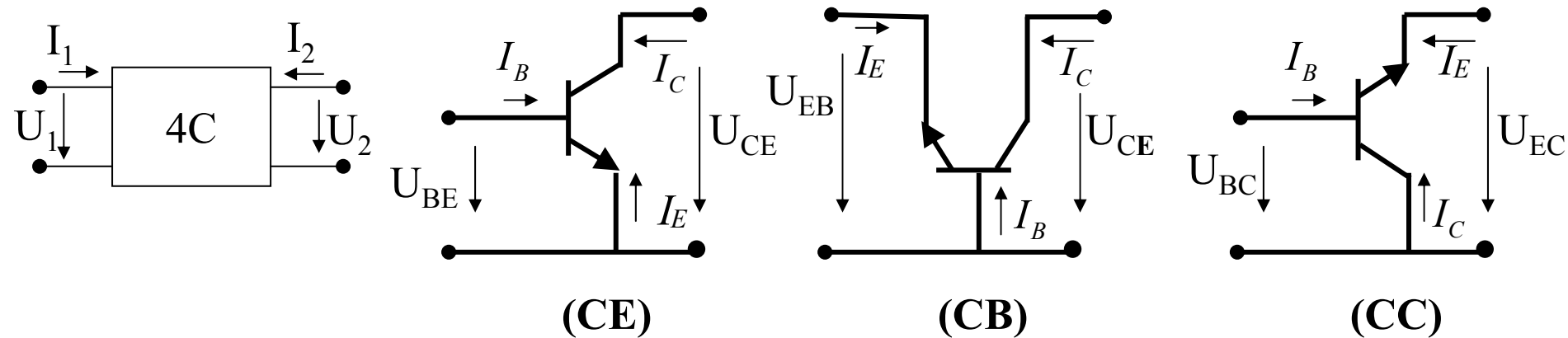
$$h_{21} = h_{fe} = \left. \frac{i_c}{i_b} \right|_{u_{CE}=0} = \beta_0$$

$$h_{22} = h_{oe} = \left. \frac{i_c}{u_{CE}} \right|_{i_B=0}$$

Trở kháng tiếp giáp emitter **E**

Chỉ số phụ thuộc của u_{BE} vào u_{CE} , h_{re} rất nhỏ thường bỏ qua

b2. Mô hình mạch tương đương Hybrid – mạch mắc CB,CC



Common-emitter <i>h</i> -parameters	Common-base <i>h</i> -parameters	Common-collector <i>h</i> -parameters
h_{ie}	$h_{ib} = h_{ie} / (h_{fe} + 1)$	$h_{ic} = h_{ie}$
h_{re}	$h_{rb} = h_{ie} h_{oe} / (h_{fe} + 1) - h_{re}$	$h_{rc} = 1$
h_{fe}	$h_{fb} = -h_{fe} / (h_{fe} + 1)$	$h_{fc} = -h_{fe} - 1$
h_{oe}	$h_{ob} = h_{oe} / (h_{fe} + 1)$	$h_{oc} = h_{oe}$

c. Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ hybrid- π

- Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ của BJT xác định mối quan hệ giữa tín hiệu xoay chiều biên độ nhỏ trong BJT: i_b, u_{be}, i_c, u_{ce} .
- Các phương trình đặc tính tương ứng để xác định các mô hình tương đương của BJT:

$$i_C = f(v_{BE}, v_{CE})$$

Tín hiệu lớn

$$I_C + \Delta i_C = f(V_{BE} + \Delta v_{BE}, V_{CE} + \Delta v_{CE})$$

Điểm làm việc tĩnh
(bias)

Tín hiệu nhỏ
DC (bias)

$$i_C = I_C + i_c = f(V_{BE} + v_{be}, V_{CE} + v_{ce})$$

Tín hiệu nhỏ

$$Q = (V_{BE}, V_{CE}) \rightarrow i_c \approx \left. \frac{\partial f}{\partial v_{BE}} \right|_Q v_{be} + \left. \frac{\partial f}{\partial v_{CE}} \right|_Q v_{ce} \rightarrow i_c = g_m u_{be} + g_o u_{ce}$$

Transconductance- Độ dẫn g_m

Output conductance
(Điện dẫn đầu ra g_o)

Độ hỗ dẫn g_m , Điện trở vào

- Độ hỗ dẫn g_m : Tương tự như độ dẫn của điốt, g_m là độ dốc của phương trình đặc tính $i_C = f(u_{BE})$ tại điểm làm việc tĩnh $Q(I_C, U_{BE}, U_{CE})$
- Ở chế độ tích cực: $i_C = I_S e^{(u_{BE}/V_{th})}$; $i_C = I_C + i_c$; $u_{BE} = U_{BE} + u_{be}$

$$\rightarrow g_m = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{BE}} \right|_Q = \frac{I_S}{V_{th}} e^{U_{BE}/V_{th}} = \frac{I_C}{V_{th}} = \frac{q}{kT} I_C$$

- g_m liên kết giữa cặp cực B-E và dòng collector, tỉ lệ thuận với dòng tĩnh I_C và tỉ lệ nghịch với nhiệt độ, nó là phần tử trung tâm trong mô hình

- Điện trở vào động r_π được xác định như sau:

$$r_\pi = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\beta \cdot V_{th}}{I_C}$$

- Điện trở vào tỉ lệ nghịch với dòng điện phân cực một chiều I_C và tỉ lệ thuận với hệ số khuếch đại dòng tín hiệu nhỏ β

Điện áp Early

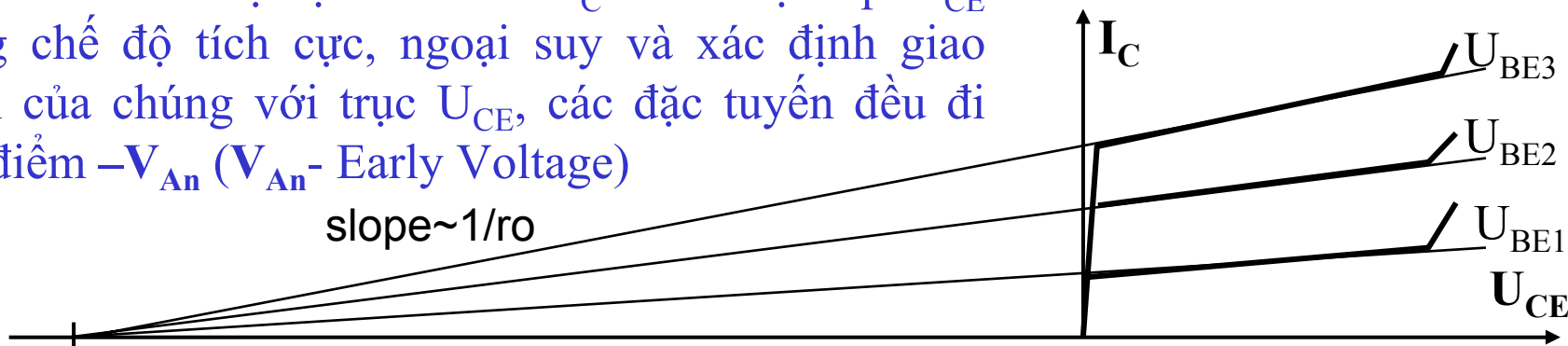
- Trong chế độ tích cực dòng điện i_C tăng không đáng kể khi điện áp u_{CE} tăng. Để xác định mối tương quan đó xét sự điều chế độ rộng hiệu dụng miền B.
- Khi u_{CE} tăng, điện áp phân cực ngược u_{CB} đặt trên chuyển tiếp BC tăng:

$$u_{CB} = u_{CE} - u_{BE} \approx u_{CE} - 0,7V$$

- Để xác định tác động của điện áp phân cực ngược đó đến dòng i_C thực hiện tính toán độ rộng của miền B thay đổi theo u_{CE} và thay vào biểu thức tính $i_C(u_{BE}, u_{CE})$, biểu thức này rất phức tạp. Để đơn giản hơn trong việc tính toán, người ta thường dùng xấp xỉ thuần túy theo kinh nghiệm để xác định sự phụ thuộc của dòng i_C vào điện áp u_{CE} .

- Dựa vào đồ thị đặc tính của I_C theo điện áp U_{CE} trong chế độ tích cực, ngoại suy và xác định giao điểm của chúng với trục U_{CE} , các đặc tuyến đều đi qua điểm $-V_{An}$ (V_{An} - Early Voltage)

slope $\sim 1/r_o$



Điện trở đầu ra

Từ đồ thị đặc tuyến I_C , hiệu chỉnh phương trình i_C như sau:

$$i_C = I_S e^{u_{BE}/V_{th}} \left(1 + \frac{u_{CE}}{V_{An}} \right)$$

- Điện dẫn đầu ra g_0 được xác định như sau:

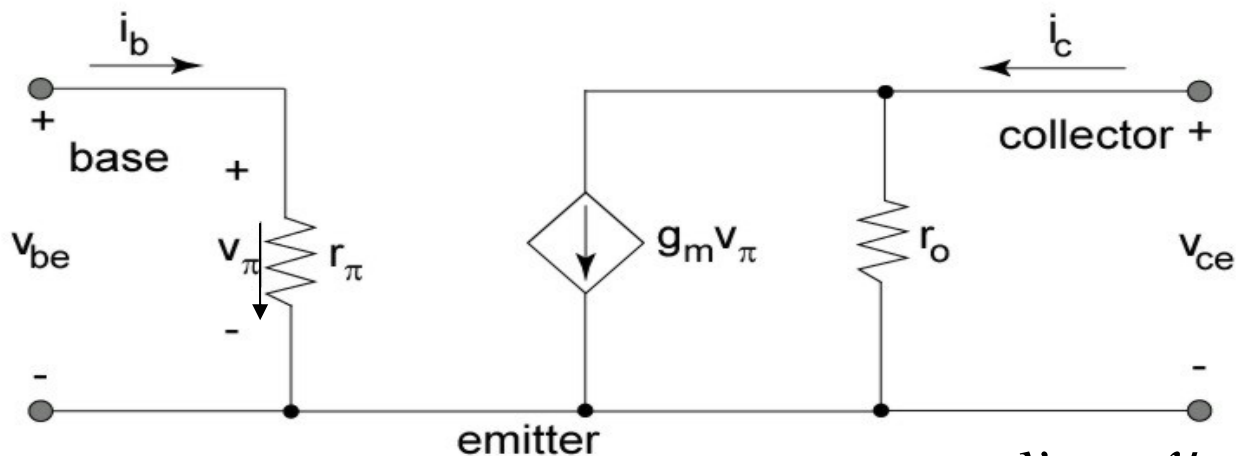
$$g_0 = \left. \frac{\partial i_C}{\partial u_{CE}} \right|_Q = \frac{1}{r_0} \quad r_0 : \text{điện trở đầu ra}$$

$$g_0 = \frac{1}{r_0} = I_S e^{(U_{BE}/V_{th})} \left(\frac{1}{V_{An}} \right) \cong \frac{I_C}{V_{An}} \quad \rightarrow \quad r_0 = \frac{V_{An}}{I_C}$$

- Mỗi loại BJT có điện áp V_{An} khác nhau, phụ thuộc vào cấu tạo của BJT, người ta thường xác định điện áp này bằng thực nghiệm và dùng phương pháp ngoại suy từ đồ thị đặc tuyến của BJT.

Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ hybrid- π

➤ Dựa vào các p/trình đặc tính và tham số xác định trong chế độ tín hiệu nhỏ, nếu bỏ qua các thành phần tích điện, ta có thể xây dựng mô hình BJT chế độ tín hiệu nhỏ như hình vẽ (mô hình này thường dùng cho BJT hoạt động ở tần số thấp):



Tại điểm làm việc tĩnh: $Q(U_{BE}/I_B, U_{CE}, I_C)$

$$r_{\pi} = \frac{\beta}{g_m} = \frac{\beta \cdot V_{th}}{I_C}$$

$$g_m = \frac{I_C}{V_{th}} = \frac{q}{kT} I_C$$

$$r_o = \frac{V_{An}}{I_C}$$

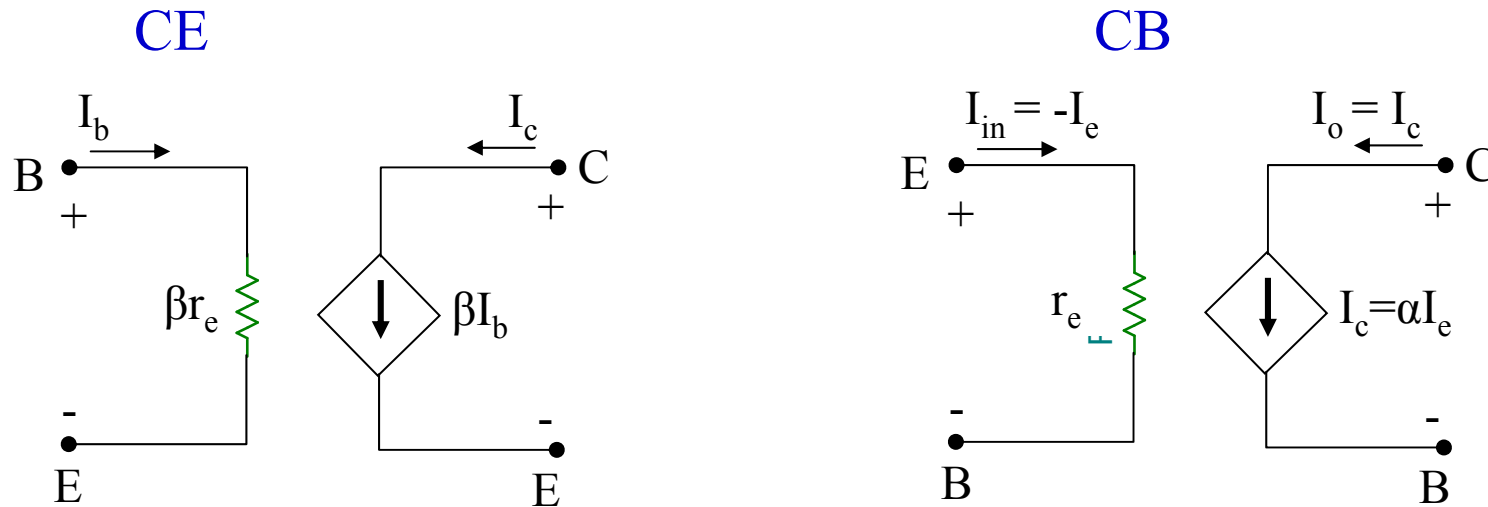
$$i_b = \frac{v_{be}}{r_{\pi}} = \frac{u_{\pi}}{r_{\pi}}$$

$$i_c = g_m v_{be} + \frac{1}{r_o} v_{ce}$$

Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ hybrid- π của BJT pnp

- Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ của BJT pnp có thể được suy ra từ mô hình của BJT npn đã trình bày. Sinh viên tự vẽ và tính tham số cho mô hình này?

d. Mô hình tương đương r_e



➤ Mọi quan hệ giữa các tham số của các mô hình tương đương (mắc CE):

$$r_e = \frac{26 \text{ mV}}{I_E}$$

$$r_\pi = \beta r_e$$

$$g_m = \frac{1}{r_e}$$

$$r_o = \frac{1}{h_{oe}}$$

Mô hình tương đương r_e của BJT pnp

- **Mô hình tương đương r_e của BJT pnp có thể được suy ra từ mô hình của BJT npn đã trình bày. Sinh viên tự vẽ và tính tham số cho mô hình này?**

5. Phân loại BJT

- Có nhiều cách phân loại BJT dựa trên các cơ sở khác nhau. Thông thường ta có thể phân loại BJT theo các chỉ tiêu sau
 - Dựa theo vật liệu chế tạo có các loại: BJT Gecmani, BJT Silic, v.v..
 - Dựa vào công nghệ chế tạo ta có: BJT khuếch tán, BJT trôi, BJT hợp kim.
 - Dựa vào tần số công tác có: BJT âm tần, BJT cao tần
 - Dựa vào chức năng làm việc có: BJT công suất, BJT chuyển mạch, v.v..
 - Dựa vào diện tích mặt tiếp xúc P-N có: BJT tiếp điểm, BJT tiếp mặt.
 - BJT được sử dụng nhiều trong các ứng dụng như trong mạch khuếch đại tín hiệu, trong các mạch tạo dao động, trong các mạch ổn áp, các mạch khuếch đại đặc biệt, các chuyển mạch điện tử...

6. Một số mạch ứng dụng dùng BJT

- BJT được sử dụng trong nhiều ứng dụng khác nhau. Ví dụ một số ứng dụng như sau:
 - Mạch khuếch đại điện áp, dòng điện
 - Mạch điều khiển Role.
 - Chuyển mạch điện tử.
 - Mạch tạo nguồn dòng không đổi
 - Mạch logic (cổng logic)
 - Mạch cảnh báo
 - Mạch nguồn
 - ...
 - Các mạch ứng dụng cụ thể SV có thể tham khảo phần bài tập

Chương 6- FET (Transistor hiệu ứng trường)

1. Giới thiệu chung về FET
2. Transistor trường loại tiếp giáp – JFET
3. Cấu trúc MOS
4. Transistor trường loại cực cửa cách ly – IGFET

1. Giới thiệu chung về FET

- Transistor hiệu ứng trường FET (Field Effect Transistor) là một dạng linh kiện bán dẫn ứng dụng hiệu ứng điện trở suất của bán dẫn được điều khiển bằng điện trường, đây là một loại cấu kiện điều khiển bằng điện thế.
- Nguyên lý hoạt động cơ bản của Transistor trường là dòng điện đi qua một môi trường bán dẫn có tiết diện dẫn điện, điện trở suất hoặc nồng độ hạt dẫn thay đổi dưới tác dụng của điện trường vuông góc với lớp bán dẫn đó, do đó điều khiển được dòng điện đi qua nó. Lớp bán dẫn này được gọi là kênh dẫn điện.
- Khác với BJT, FET chỉ có một loại hạt dẫn cơ bản tham gia dẫn điện.
- FET có ba chân cực là cực.

	FET		
BJT	S	Source	Cực nguồn: các hạt dẫn đa số đi vào kênh tạo ra dòng điện nguồn I_S .
E	G	Gate	Cực cửa: cực điều khiển dòng điện chạy qua kênh
B	D	Drain	Cực máng: các hạt dẫn đa số rời khỏi kênh tạo ra dòng I_D
C			

Phân loại chung về FET

- ❖ FET chia thành các loại theo cấu trúc của cực cửa và của kênh dẫn như sau:
 - JFET (*Junction FET*) : Transistor hiệu ứng trường điều khiển bằng chuyển tiếp PN, cực điều khiển G ngăn cách với kênh dẫn bằng vùng nghèo của chuyển tiếp PN phân cực ngược.
 - IGFET (*Isolated Gate FET*) : Transistor hiệu ứng trường cực cửa cách ly với kênh dẫn, điển hình là linh kiện MOSFET (*Metal-Oxide-Semiconductor FET*) và MESFET (*Metal-Semiconductor FET*).
 - * **MESFET**: cực điều khiển ngăn cách với kênh dẫn bằng vùng nghèo của chuyển tiếp kim loại-bán dẫn.
 - * **MOSFET** cực điều khiển cách ly hẳn với kênh dẫn thông qua một lớp điện môi (SiO_2). Đây mới đúng là Transistor trường theo đúng nghĩa của thuật ngữ này, vì chỉ có loại này dòng chảy qua kênh dẫn mới được điều khiển hoàn toàn bằng điện trường, dòng điều khiển hầu như bằng không tuyệt đối, trong khi đó dòng rò của chuyển tiếp PN hoặc Schottky phân cực ngược, chưa hoàn toàn bằng không).
- ❖ Mỗi loại FET còn được chia thành loại kênh N và kênh P.

Đặc điểm của FET

❖ Một số ưu điểm của FET:

- FET là loại linh kiện một loại hạt dẫn (*unipolar device*).
- FET có trở kháng vào rất cao.
- Nhiều trong FET ít hơn nhiều so với Transistor lưỡng cực.
- FET không bù điện áp tại dòng $I_D = 0$, do đó nó là linh kiện chuyển mạch tuyệt vời.
- Có độ ổn định về nhiệt cao.
- Tần số làm việc cao.
- Kích thước của FET nhỏ hơn của BJT nên có nhiều ưu điểm trong IC.

❖ Một số nhược điểm:

- Nhược điểm chính của FET là hệ số khuếch đại điện áp thấp hơn nhiều so với BJT

2. Transistor trường loại tiếp giáp - JFET

2.1. Cấu tạo của JFET

2.2. Nguyên lý hoạt động của JFET

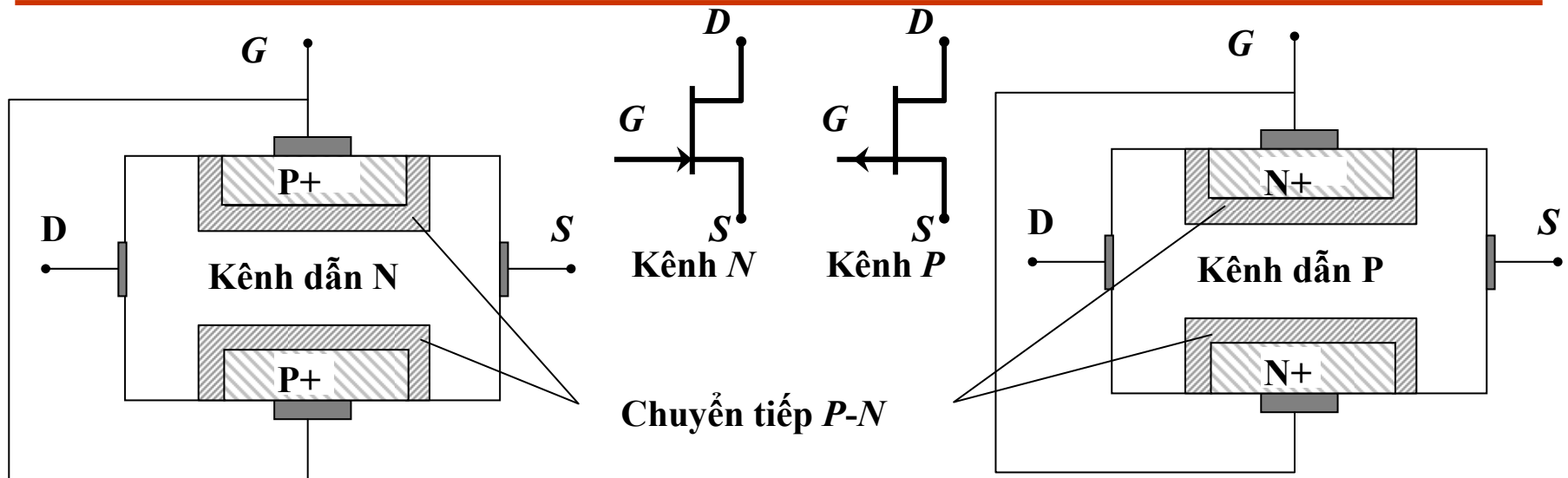
2.3. Các cách mắc và họ đặc tuyến của JFET

2.4. Phân cực cho JFET

2.5. Các mô hình tương đương của JFET

2.6. Một số ứng dụng của JFET

2.1 Cấu tạo của JFET (1)

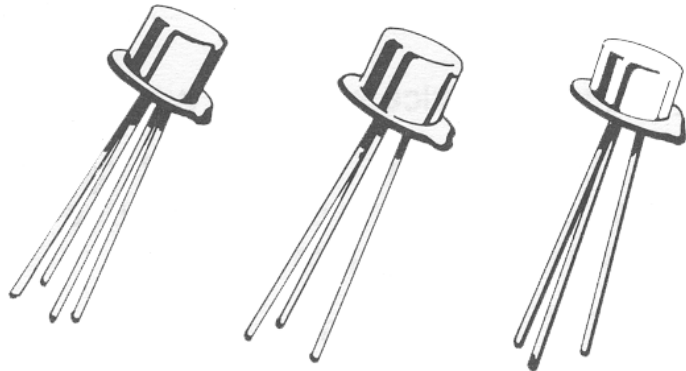


❖ JFET cấu tạo gồm:

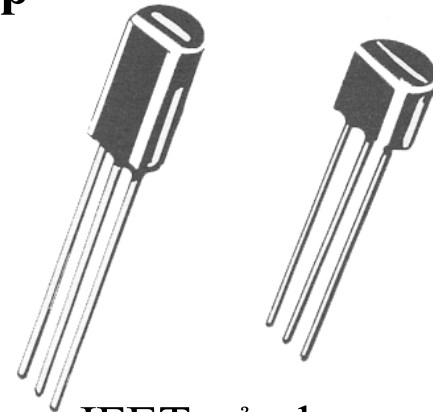
- Một kênh dẫn được làm từ bán dẫn N (JFET kênh dẫn N) hoặc P (JFET kênh dẫn P), có 2 điện cực 2 đầu là cực nguồn S và cực máng D.
 - Điện cực thứ 3 là cực cổng G, giữa cực này và kênh dẫn có một chuyển tiếp PN, trong đó miền bán dẫn cực cổng được pha tạp mạnh hơn nhiều so với kênh dẫn để vùng điện tích không gian (vùng nghèo) của chuyển tiếp PN lan chủ yếu về phía kênh dẫn.
- ❖ JFET hầu hết đều là loại đối xứng, có nghĩa là khi đầu trong mạch ta có thể đổi chỗ hai chân cực S và D cho nhau thì các tính chất và tham số của JFET không hề thay đổi

2.1 Cấu tạo của JFET (2)

JFET công suất thấp

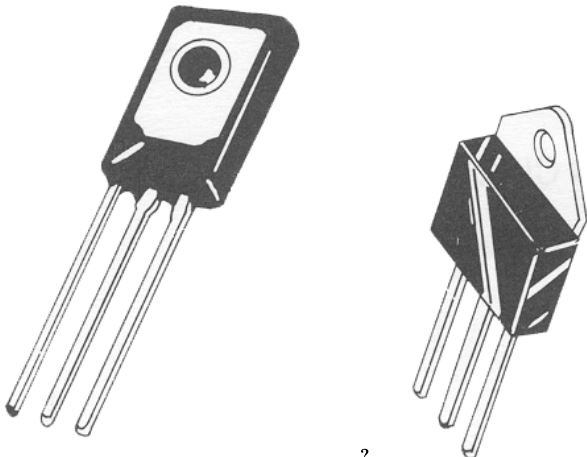


JFET vỏ kim loại

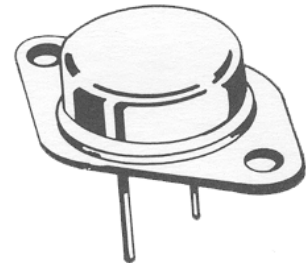
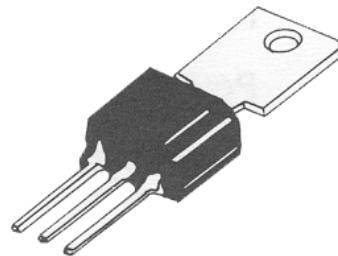


JFET vỏ nhựa

JFET công suất cao



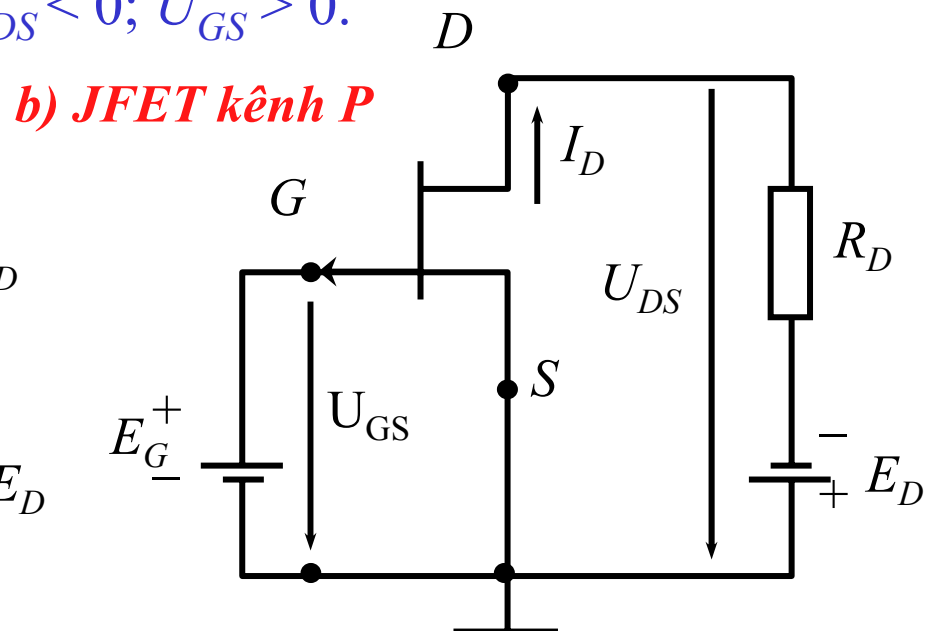
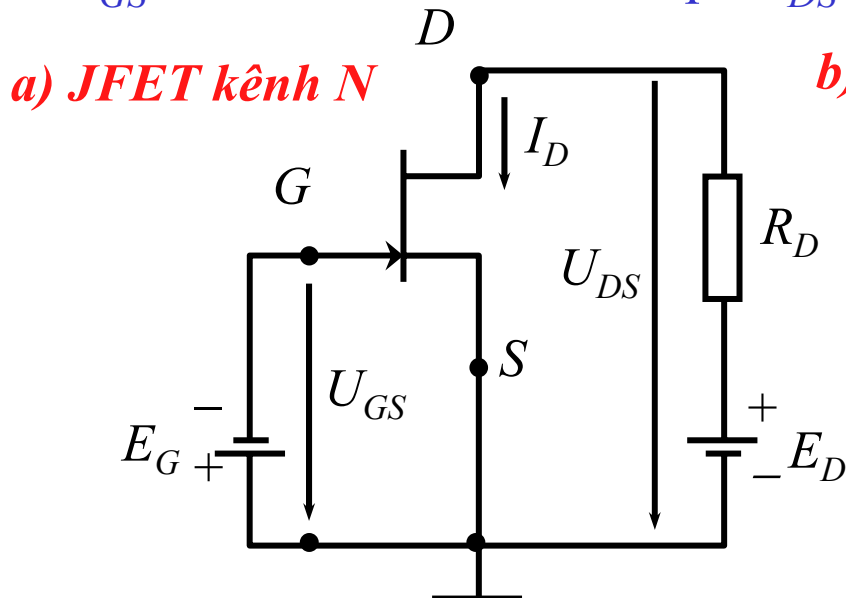
JFET vỏ nhựa tổng hợp với đầu
nhiệt kim loại



JFET vỏ hoàn toàn bằng kim loại

2.2 Nguyên lý hoạt động của JFET (1)

- Nguyên lý hoạt động của JFET kênh loại N và kênh loại P giống nhau. Chúng chỉ khác nhau về chiều của nguồn điện cung cấp là ngược dấu nhau.
- JFET được phân cực sao cho vùng chuyển tiếp PN bao quanh kênh dẫn luôn được phân cực ngược, và dòng các hạt dẫn đa số đi vào kênh tạo ra dòng I_S .
- Như vậy nguồn phân cực mắc sao cho: với JFET kênh n : $U_{DS} > 0$ và $U_{GS} < 0$ và với JFET kênh p : $U_{DS} < 0$; $U_{GS} > 0$.



2.2 Nguyên lý hoạt động của JFET (2)

- Trong phần này chúng ta sẽ trình bày về nguyên lý hoạt động của **JFET kênh N**, sau đó suy ra nguyên lý hoạt động của JFET kênh P.
- Do tác dụng của các điện áp U_{GS} và U_{DS} , trên kênh dẫn xuất hiện 1 dòng điện (là dòng điện tử với JFET kênh N) hướng từ cực D tới cực S gọi là dòng điện cực máng I_D . Dòng I_D có độ lớn tùy thuộc vào các giá trị U_{GS} và U_{DS} vì độ phân cực ngược của chuyển tiếp PN phụ thuộc mạnh vào cả 2 điện áp này nên độ dẫn điện của kênh phụ thuộc mạnh vào cả 2 điện trường này. Như vậy về cơ bản có thể nói rằng JFET là một điện trở có tiết diện thay đổi được, và tiết diện này được thay đổi bởi điện áp điều khiển.
- Nếu xét riêng sự phụ thuộc của I_D vào từng điện áp khi giữ cho điện áp còn lại không đổi (coi là một tham số) ta nhận được hai quan hệ hàm quan trọng nhất của JFET là:

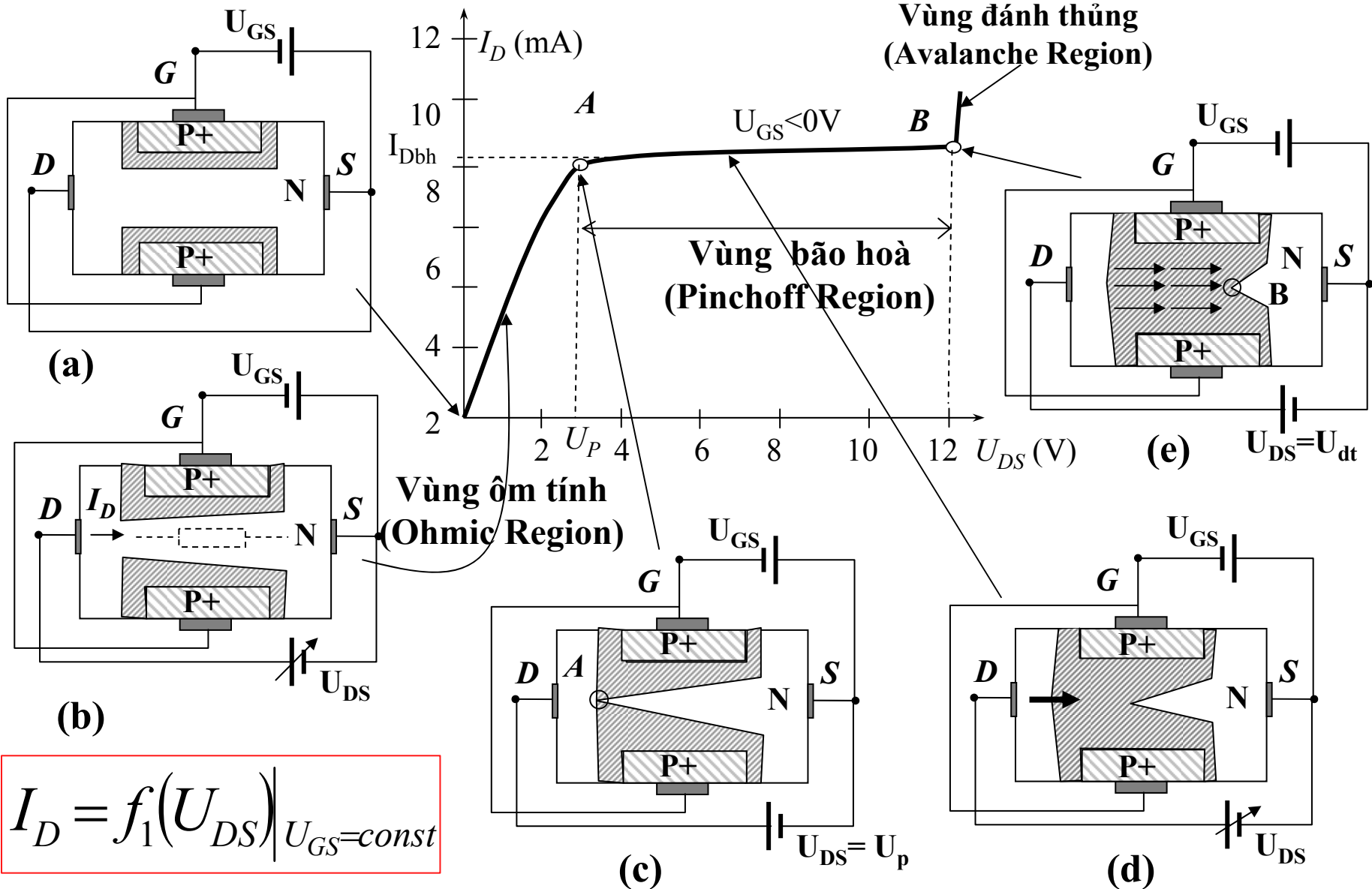
$$I_D = f_1(U_{DS})|_{U_{GS} = const}$$

→ **Đặc tuyến ra**

$$I_D = f_2(U_{GS})|_{U_{DS} = const}$$

→ **Đặc tuyến truyền đạt**

Đặc tuyến ra của JFET kênh N (1)



$$I_D = f_1(U_{DS}) \Big|_{U_{GS} = const}$$

Đặc tuyến ra của JFET kênh N (2)

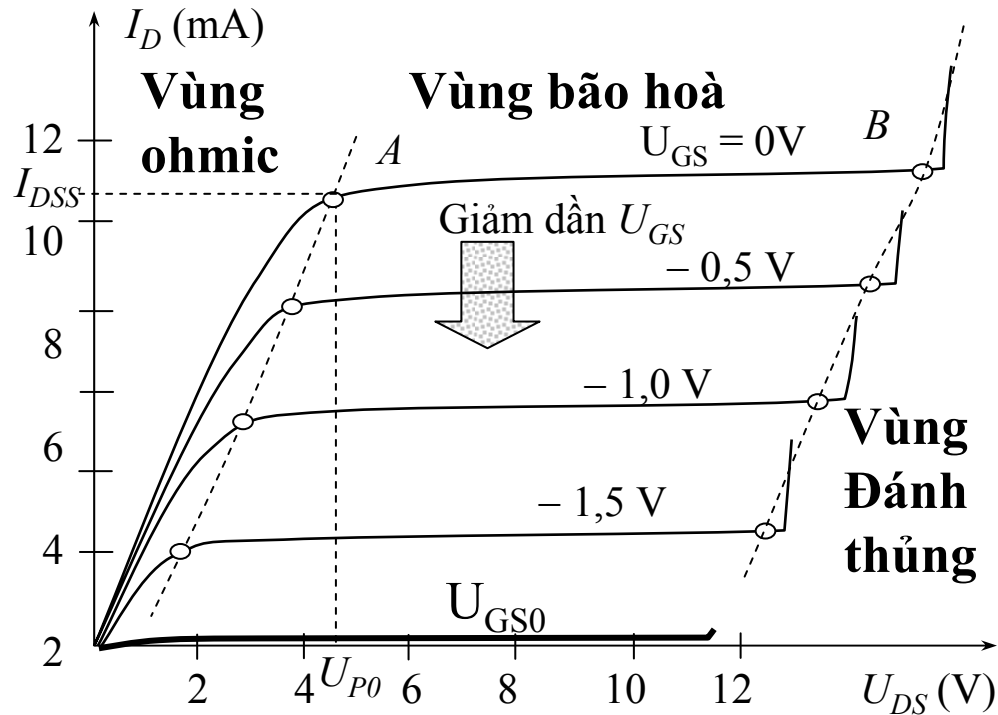
- a/ **Điểm 0:** Ứng với một giá trị nhất định nào đó của $U_{GS} \leq 0$ vùng chuyển tiếp PN giữa G và kênh phân cực ngược, nếu $U_{DS} = 0$ thì $I_D = 0$, độ rộng của miền điện tích không gian đồng đều và cố định
- b/ **Vùng ohmic (Vùng Triot):** Khi U_{DS} tăng dần, I_D tăng dần, lúc đầu U_{DS} còn nhỏ, sụt áp của nó gây trên điện trở kênh ảnh hưởng không đáng kể đến độ rộng của miền điện tích không gian (đã được xác định bởi U_{GS}), nên I_D tăng tuyến tính theo U_{DS} , vùng này được gọi là vùng ôhm tính, làm việc giống như điện trở thuần
- c/ **Điểm thắt A:** Khi U_{DS} tăng lên làm cho I_D lớn đến mức sụt áp do dòng này gây ra trên kênh làm tăng đáng kể U phân cực ngược chuyển tiếp PN giữa cực G và kênh, miền điện tích không gian lan sâu vào kênh, làm cho điện trở kênh tăng dần, $\rightarrow I_D$ tăng chậm lại. Nếu tiếp tục tăng U_{DS} đến thời điểm $U_{DS} = U_P$, thì hầu như I_D không tăng mặc dù tiếp tục tăng U_{DS} . Điểm $U_{DS} = U_P$ được gọi là điểm thắt A, U_P là **điện áp thắt** của kênh, dòng điện I_D ứng với điểm thắt gọi là **dòng bão hoà $I_{D_{bh}}$**
- d/ **Vùng bão hoà (vùng làm việc tích cực):** Khi U_{DS} tiếp tục tăng vượt qua điểm thắt A, $U_{DS} > U_P$, thì I_D hầu như không tăng, $I_D = I_{D_{bh}}$, do khi U_{DS} tăng vùng điện tích không gian càng lan sâu vào kênh và điện trở kênh càng tăng lên tỉ lệ với U_{DS} , do đó dòng không đổi. Nhưng giá trị dòng $I_{D_{bh}}$ lại tăng nhanh theo U_{GS} .

Đặc tuyến ra của JFET kênh N (3)

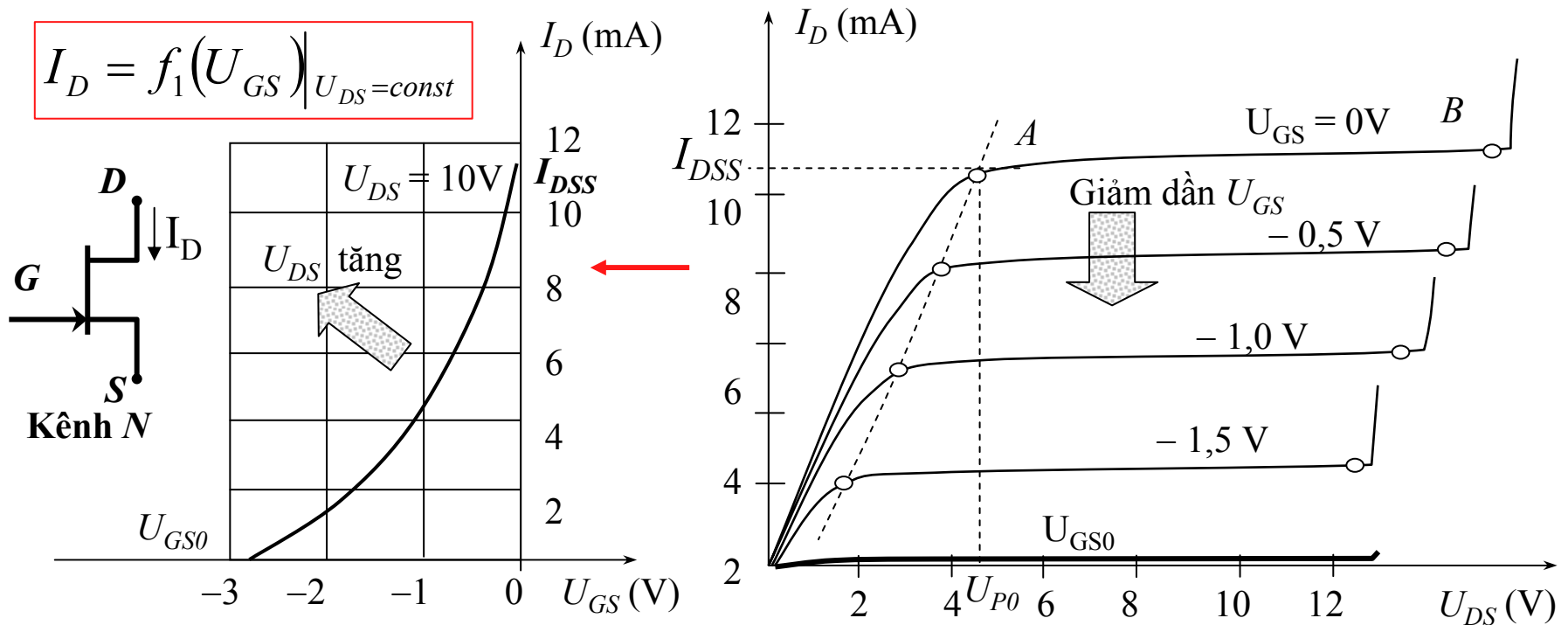
e/ **Điểm đánh thủng B:** Khi U_{DS} tăng quá lớn, điện áp phân cực ngược giữa G và kênh tăng mạnh, đến khi $U_{DS}=U_{dt}$ thì hiện đánh thủng theo hiệu ứng thác lũ xảy ra, do đó dòng I_D tăng đột ngột khi U_{DS} tăng. Điểm B gọi là điểm đánh thủng, vùng ngoài điểm B gọi là vùng đánh thủng của kênh

❖ Họ đặc tuyến ra của JFET

- Khi U_{GS} âm dần \rightarrow sự phân cực ngược của G và kênh càng tăng, điện áp thắt U_p để kênh đạt tới điểm thắt càng nhỏ, đường đứt nét trên họ đặc tuyến nối các điểm thắt với nhau
- Tương tự, với điểm đánh thủng B, khi U_{GS} càng âm việc đánh thủng chuyển tiếp PN xảy ra sớm hơn, điện áp đánh thủng càng nhỏ hơn



Đặc tuyến truyền đạt của JFET kênh N (1)



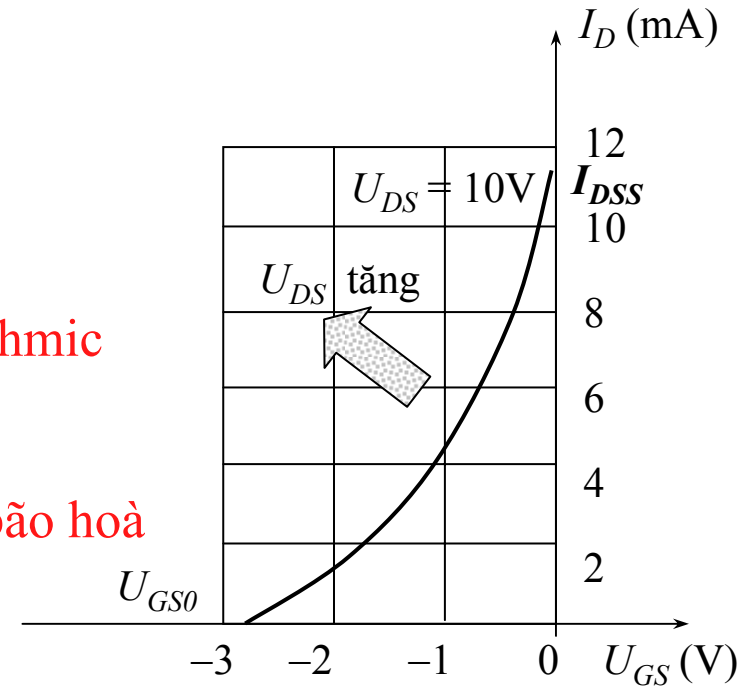
❖ Đặc tuyến truyền đạt của JFET mô tả mối quan hệ giữa I_D và điện áp U_{GS} ứng với một giá trị nhất định của U_{DS} . Dạng đặc tuyến truyền đạt khi JFET làm việc ở vùng bão hoà như hình bên trái. Đặc tuyến xuất phát từ một giá trị U_{GS0} , tại đó $I_D = 0$, gọi là **điện áp khoá**. Khi tăng U_{GS} , I_D tăng gần như tỷ lệ do độ dẫn điện của kênh tăng theo mức độ giảm phân cực ngược của tiếp giáp PN. Lúc $U_{GS} = 0$, tại vùng bão hoà $I_D = I_{DSS}$, vậy I_{DSS} là dòng tĩnh cực máng khi không có điện áp cực cửa

Đặc tuyến truyền đạt của JFET kênh N (2)

❖ Quan hệ giữa I_D và U_{GS} được xác định bởi phương trình Shockley:

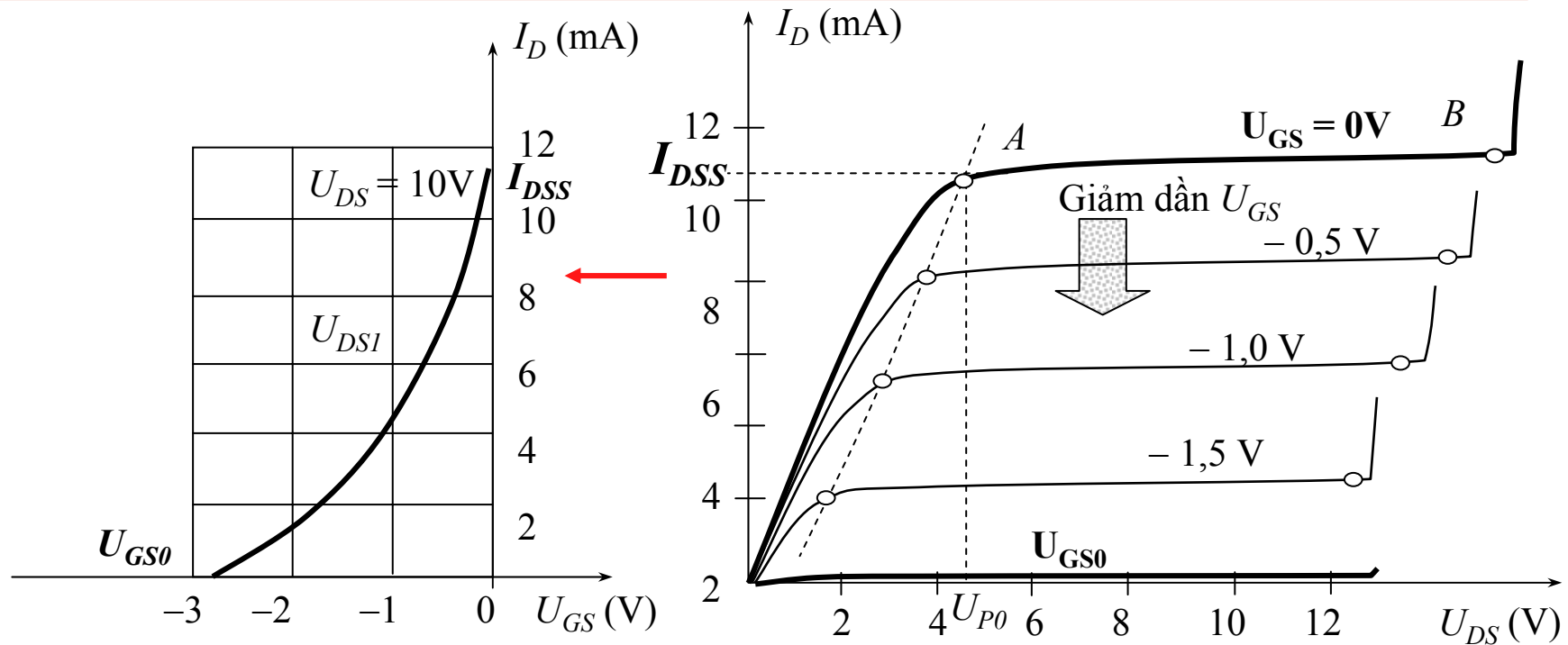
❖ Phương trình Shockley:

$$I_D = \begin{cases} I_{DSS} \left[-2 \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right) \frac{U_{DS}}{U_{GS0}} - \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 \right] & \rightarrow \text{Vùng ohmic} \\ I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 & \text{khi } U_{GS0} \leq U_{GS} \leq 0 \rightarrow \text{Vùng bão hoà} \end{cases}$$



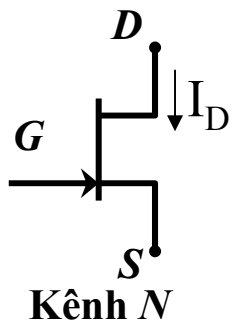
- Trong đó: I_{DSS} là dòng cực máng bão hoà khi $U_{GS} = 0$, khi đó kênh mở rộng nhất và lúc này I_D đạt giá trị lớn nhất của nó, nên như vậy có nghĩa là I_{DSS} là dòng cực máng cực đại có thể đạt được của JFET
- U_{GS0} là điện áp khoá kênh hay điện áp ngắt kênh, vì $I_D = 0$ khi độ rộng của kênh dẫn bằng 0, nên như vậy có nghĩa là U_{GS0} là thế áp đặt lên cực cổng làm cho JFET bị khoá lại hoàn toàn.
- I_{DSS} và U_{GS0} là 2 tham số quan trọng của JFET dùng nhiều khi thiết kế mạch.

Các họ đặc tuyến của JFET kênh N



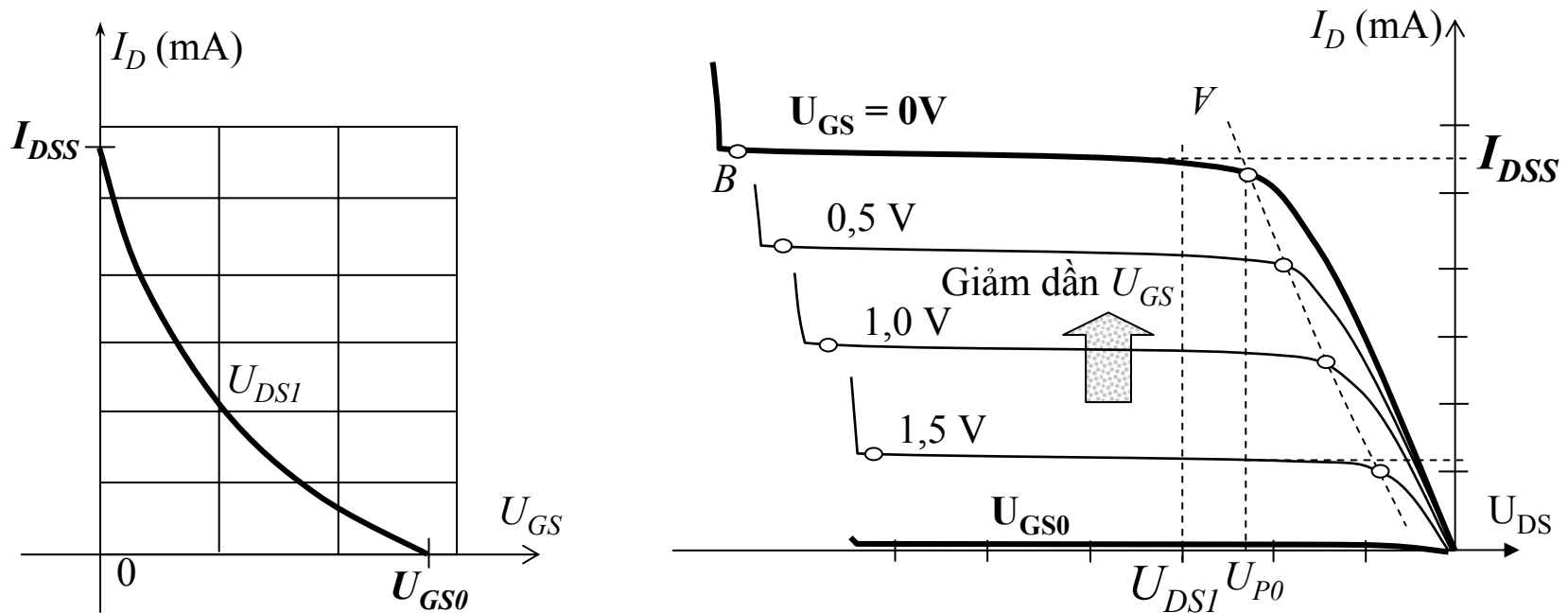
$I_{DSS} > 0$ – Dòng I_{Dbh} khi $U_{GS} = 0V$

$U_{GS0} < 0$ - Điện áp khóa kênh



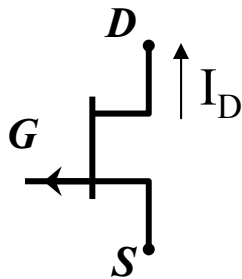
$$I_D = \begin{cases} I_{DSS} \left[-2 \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right) \frac{U_{DS}}{U_{GS0}} - \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 \right] & \rightarrow \text{Vùng ohmic} \\ I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 & \text{khi } U_{GS0} \leq U_{GS} \leq 0 \rightarrow \text{Vùng bão hoà} \end{cases}$$

Các họ đặc tuyến của JFET kênh P



$I_{DSS} > 0$ – Dòng $I_{D_{bh}}$ khi $U_{GS} = 0V$

$U_{GS0} > 0$ - Điện áp khóa kênh



$$I_D = \begin{cases} I_{DSS} \left[-2 \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right) \frac{U_{DS}}{U_{GS0}} - \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 \right] & \rightarrow \text{Vùng ohmic} \\ I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 & \text{khi } 0 \leq U_{GS} \leq U_{GS0} \rightarrow \text{Vùng bão hoà} \end{cases}$$

Tham số cơ bản của JFET kênh N

❖ Tham số giới hạn:

▪ Dòng cực máng cực đại cho phép: I_{Dmax} - là dòng điện ứng với điểm B trên đặc tuyến ra khi $U_{GS} = 0$; $I_{Dmax} \leq 50\text{mA}$.

▪ Dòng điện D - S cực đại cho phép và điện áp U_{DSmax}

$$U_{DS.max} = U_B / (1,2 \div 1,5) \text{ (cỡ vài chục vôn)}$$

U_B : điện áp đánh thủng tại điểm B

▪ Điện áp khoá cực đại U_{GS0} . Nếu $U_{GS} < U_{GS0}$, kênh bị khoá $I_D = 0$, $R_{DS} \approx \infty$

❖ Tham số làm việc gồm có:

▪ Điện trở trong hay điện trở vi phân đầu ra:

$$r_i = r_d = \left. \frac{\partial U_{DS}}{\partial I_D} \right|_{U_{GS} = \text{const}}$$

($\cong 0,5 \text{ M}\Omega$), r_i thể hiện độ dốc của đặc tuyến ra trong vùng bão hoà.

▪ Hồ dẫn của đặc tuyến truyền đạt:

$$S = g_m = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{U_{DS} = \text{const}}$$

(g_m cho biết khả năng điều khiển điện áp cực của tới dòng cực máng, giá trị điển hình $g_m = (7 \div 10) \text{ mA/V}$)

Tham số cơ bản của JFET kênh N

- Độ hỗ dẫn cực đại:

$$S_0 = g_{m0} = -\frac{2I_{DSS}}{U_{P0}}$$

- Điện trở vi phân đầu vào:

$$r_{vào} = \frac{\partial U_{GS}}{\partial I_G}$$

$r_{vào}$ do tiếp giáp P-N quyết định, có giá trị khoảng $10^9\Omega$

- Hệ số khuếch đại điện áp μ :

$$\mu = \left. \frac{\partial U_{DS}}{\partial U_{GS}} \right|_{I_D = \text{const}} \approx \frac{\Delta U_{DS}}{\Delta U_{GS}} \Big|_{I_D = \text{const}} = \left. \frac{u_{DS}}{u_{GS}} \right|_{I_D = \text{const}}$$

- So sánh các công thức tính độ hỗ dẫn g_m , điện trở trong r_i và hệ số khuếch đại điện áp μ , ta có công thức sau:

$$\mu = S \cdot r_i$$

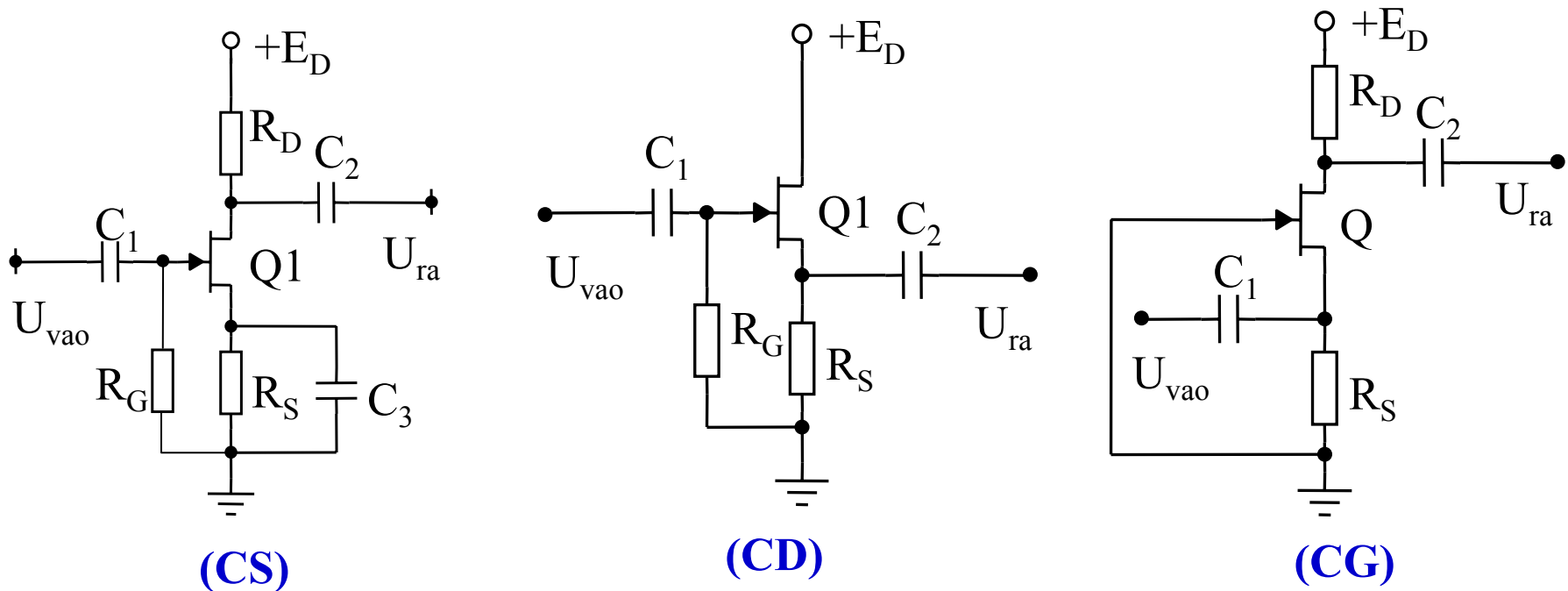
μ có trị số khoảng vài trăm lần (ở sơ đồ mắc S chung)

So sánh giữa BJT và FET

BJT	JFET
Sử dụng cả 2 loại hạt tải điện , hoạt động bằng cách phun hạt tải	Chỉ sử dụng 1 loại hạt dẫn chính , không có hiện tượng phun hạt tải
Linh kiện điều khiển bằng dòng (Dòng lồi vào điều khiển dòng lồi ra)	Linh kiện điều khiển bằng thế (Thế lồi vào điều khiển dòng lồi ra)
Điện trở lồi vào nhỏ (vì dòng lồi vào là dòng của chuyển tiếp PN phân cực thuận)	Điện trở lồi vào rất lớn (vì dòng ở lồi vào là dòng của chuyển tiếp PN phân cực ngược), I_G rất nhỏ ($1\text{pA} \div 1\text{nA}$)
Điện trở lồi ra nhỏ hơn	Điện trở lồi ra lớn hơn
Sử dụng cho các tín hiệu lớn hơn (các tầng đầu trong hệ khuếch đại)	Sử dụng cho các tín hiệu nhỏ (Các tầng cuối trong hệ khuếch đại)
Nhiều lớn hơn	Nhiều nhỏ
Độ ổn định nhiệt kém hơn	Độ ổn định nhiệt tốt

2.3 Các cách mắc và họ đặc tuyến của JFET

- Cũng tương tự như BJT, JFET cũng có 3 cách mắc chủ yếu là: Chung cực nguồn (CS), chung cực máng (DC), và chung cực cửa (CG)
- Trong đó kiểu CS thường được dùng nhiều hơn cả vì kiểu mắc này cho hệ số khuếch đại điện áp cao, trở kháng vào cao. Còn các kiểu mắc CD, CG thường được dùng trong tầng khuếch đại đệm và khuếch đại tần số cao



So sánh về chế độ làm việc giữa JFET và BJT

BJT	JFET
Vùng bão hoà	Vùng Ohmic
Vùng tích cực	Vùng bão hoà
Vùng cắt	Vùng cắt
Vùng đánh thủng	Vùng đánh thủng

Sơ đồ	CS	CG	CD
Đầu vào/ Đầu ra	G / D	S / D	G / S
Khuếch đại dòng	có	không	có
Khuếch đại áp	Có (=1/10 BJT)	có	không
Pha tín hiệu	Đảo pha	Đồng pha	Đồng pha
Trở kháng đầu vào	Rất lớn (R_{GS})	nhỏ	Rất lớn (R_{GD})
Trở kháng đầu ra	Nhỏ ($R_D//r_i$)	Lớn	Nhỏ ($R_S//1/g_m$)
Ứng dụng		Hầu như không sử dụng	

2.4 Phân cực cho JFET (1)

- Cũng giống như BJT, JFET cũng cần được thiết lập điểm làm việc một chiều trước khi được sử dụng. Việc phân tích, thiết kế mạch phân cực cho JFET đơn giản hơn của BJT. Và khi phân tích thiết kế cũng thường dùng phương pháp gần đúng bằng đồ thị.
- Đường tải tĩnh của JFET cũng được vẽ trên đặc tuyến ra của nó. Điểm làm việc cần xác định $Q(U_{GS}, U_{DS}, I_D)$. Điểm làm việc tích cực cần phải nằm trên vùng đặc tuyến bão hoà.
- Có nhiều kiểu mạch phân cực khác nhau, phân tích, tính toán mạch phân áp cho JFET sẽ được dựa trên các điều kiện sau:
 - Dòng cực cổng rất nhỏ, bỏ qua, coi như cực cửa hở mạch
 - Điện áp U_{DS} đủ lớn để JFET làm việc trong vùng bão hoà (*vùng pinch-off*), khi đó $I_D = I_{D_{bh}} \approx \text{const}$ ứng với mỗi giá trị U_{GS} xác định.
 - Đặc tính truyền đạt sẽ được sử dụng để phân tích theo phương pháp đồ thị, kết hợp với các phương pháp phân tích mạch KVL, KCL.
 - Sử dụng phương trình Schockley

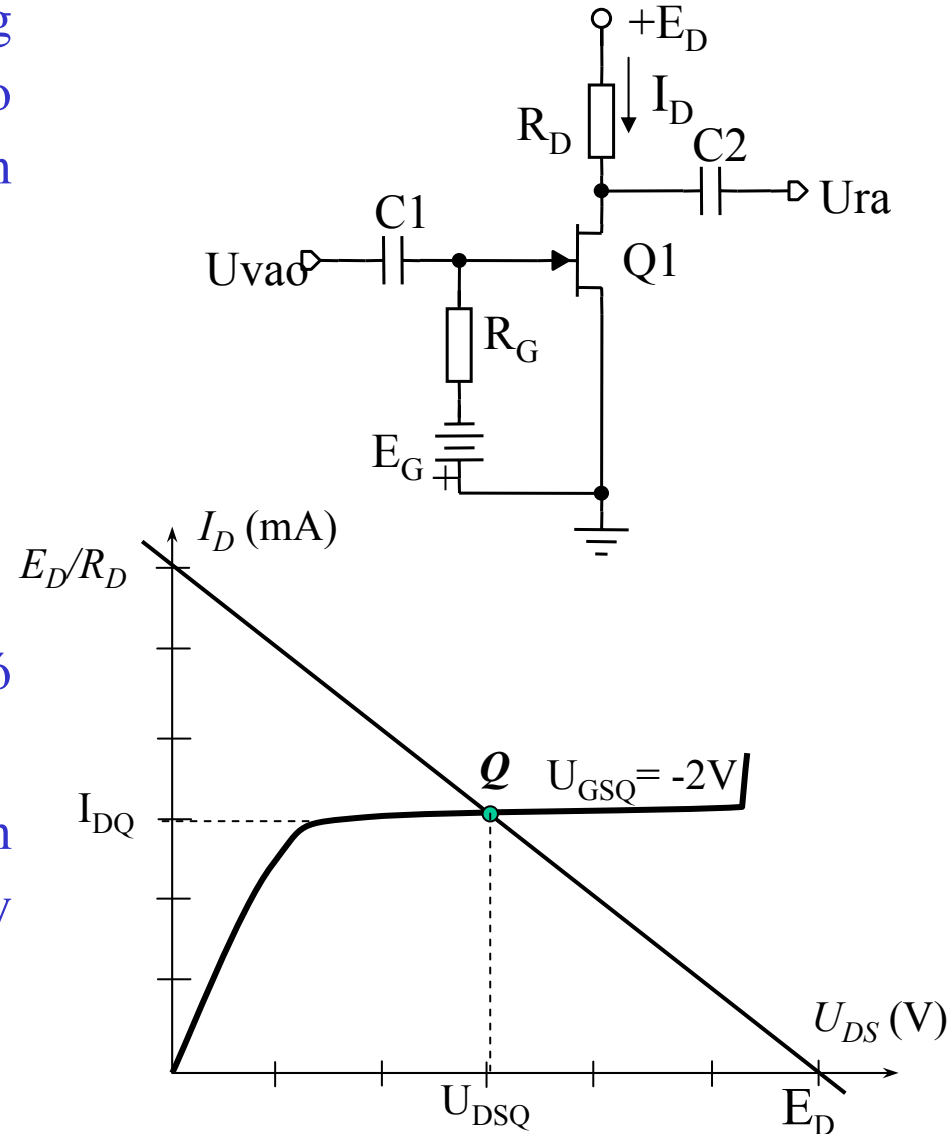
2.4 Phân cực cho JFET (2)

❖ Các phương pháp phân cực cho JFET (có so sánh với BJT) như sau:

BJT	JFET
Dòng I_B cố định	Định thiên cực cổng (Gate bias/ Fixed bias)
Định thiên tự cấp	Định thiên tự cấp (Voltage-divider bias)
Không tương đương	Tự định thiên (Self bias)
Định thiên hồi tiếp âm Emitter	Không tương đương
Định thiên hồi tiếp âm Collector	Không tương đương
Định thiên hồi tiếp âm E và C	Không tương đương

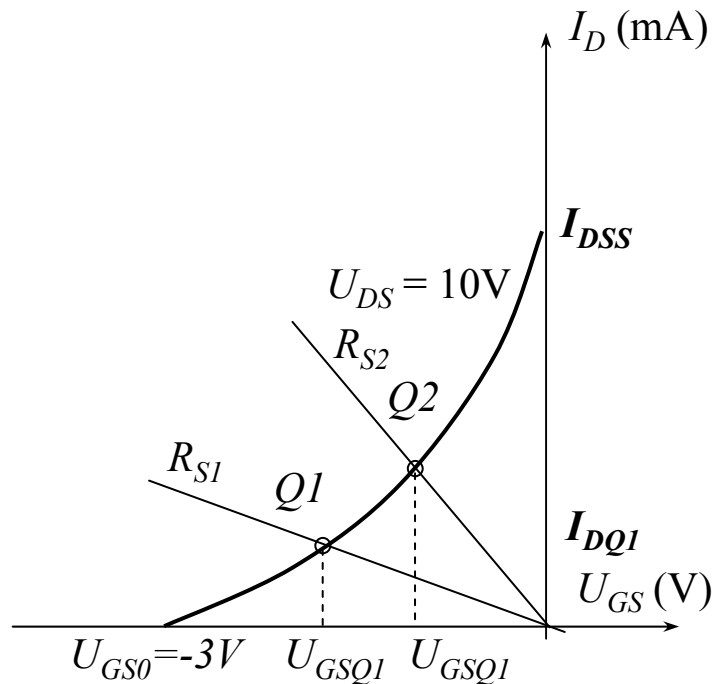
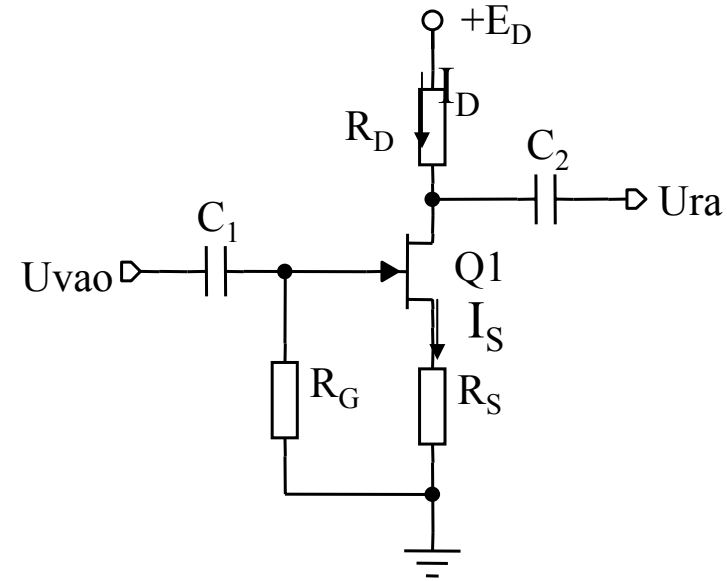
Định thiên điện áp cực G cố định (Gate bias/Fixed bias)

- Mạch định thiên như hình vẽ: Sử dụng nguồn áp E_G để phân cực ngược cho chuyển tiếp PN giữa cực G và kênh dẫn.
- Tham số của mạch:
 $E_G = -2V$; $E_D = +20V$
- Tham số của JFET:
 $U_{GS0} = -3,5V$; $I_{DSS} = 5mA$
- Tính toán điểm làm việc tĩnh để nó nằm giữa đường tải tĩnh.
- **Chú ý:** do phải dùng 2 nguồn và độ ổn định không cao nên mạch phân áp này ít được sử dụng.



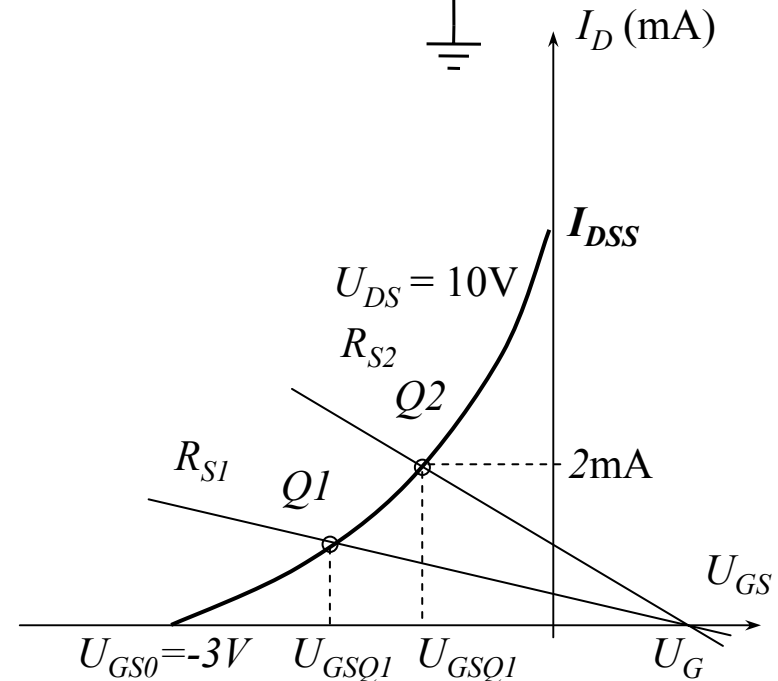
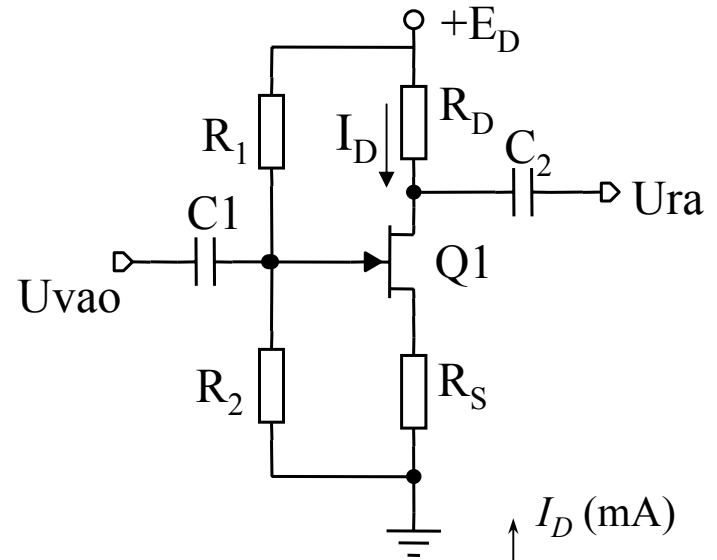
Mạch tự định thiên (Self bias)

- Mạch tự định thiên như hình vẽ: Sử dụng một điện trở thích hợp mắc nối tiếp với cực S để cung cấp điện áp cho cực G. $E_D = +20V$, Tham số của JFET: $U_{GS0} = -3,5V$; $I_{DSS} = 5mA$
- Tính toán điểm làm việc tĩnh nếu $U_{DSQ} = 10V$



Mạch định thiên tự cấp

- Sử dụng 2 điện trở phân áp R_1, R_2 tạo ra điện áp định thiên cho cực G.
- Cho $E_D = +20V$, Tham số của JFET:
 $U_{GS0} = -3,5V$; $I_{DSS} = 5mA$
Tính toán điểm làm việc tĩnh nếu $U_{DSQ} = 10V$

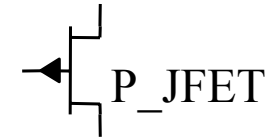
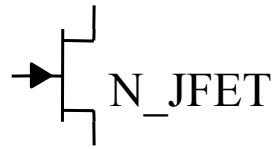


2.5 Mô hình tương đương của JFET

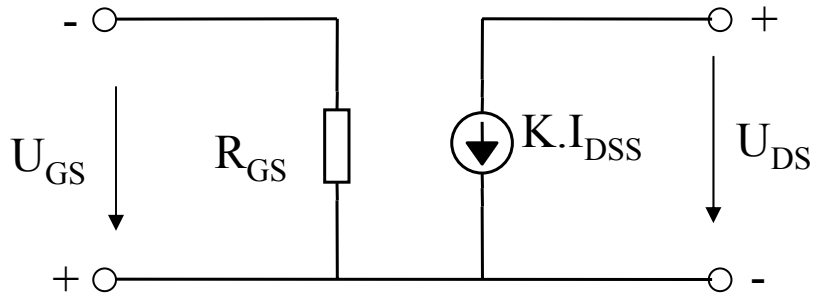
a/ Mô hình tương đương 1 chiều và tín hiệu lớn

b/ Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ

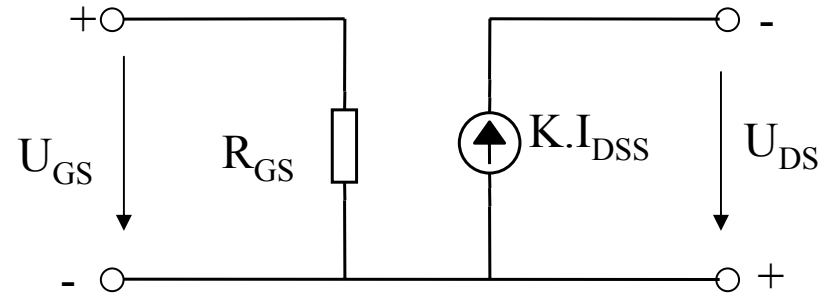
a/ Mô hình tương đương 1 chiều và tín hiệu lớn



a/ Mô hình tương đương JFET làm việc ở vùng bão hoà

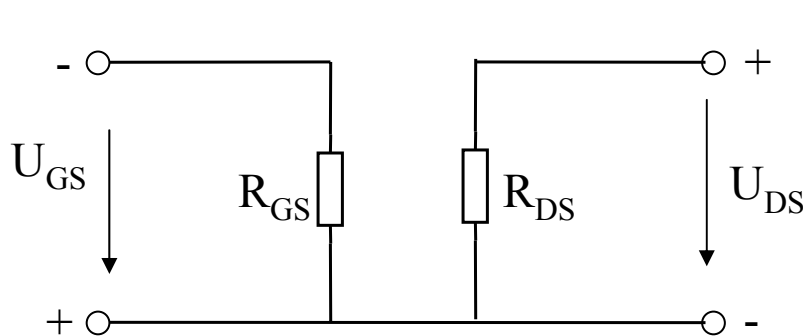


$$K = \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}}\right)^2$$

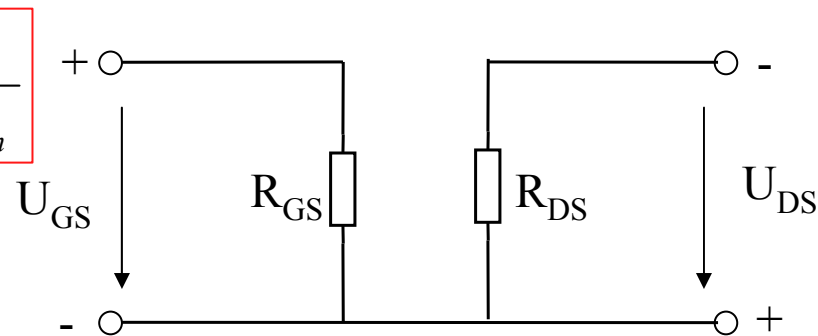


$$K = \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}}\right)^2$$

b/ Mô hình tương đương JFET làm việc ở vùng ohmic



$$R_{DS} = \frac{V_p}{I_{Dbh}}$$



b/ Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ tần thấp (1)

- Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ của JFET xác định mối quan hệ giữa tín hiệu xoay chiều biên độ nhỏ trong JFET: i_d , u_{gs} .
- Các phương trình đặc tính tương ứng để xác định các mô hình tương đương của JFET:

- Tổng quát :

$$i_D = f(u_{GS}, u_{DS}) = I_D + i_d = f(U_{GS} + u_{gs}, U_{DS} + u_{ds})$$

- Giả sử điểm làm việc $Q(U_{GS}, U_{DS}, I_D)$

$$\Rightarrow i_d = \left. \frac{\partial f}{\partial u_{GS}} \right|_Q u_{gs} + \left. \frac{\partial f}{\partial u_{DS}} \right|_Q u_{ds} = g_m u_{gs} + g_d u_{ds}$$

g_m - Độ hỗ dẫn vào, g_d - Độ hỗ dẫn ra

- Mà ta có:
$$i_D = f(u_{GS}) = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2$$

b/ Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ tần thấp (2)

- Độ hỗ dẫn vào:

$$g_m = \left. \frac{\partial f}{\partial u_{GS}} \right|_Q = \frac{-2I_{DSS}}{U_{GS0}} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right) = \frac{2\sqrt{I_{DS} \cdot I_{DSS}}}{-U_{GS0}}$$

- Điện áp U_{GS} cực đại là U_{GS0} , Như vậy Độ hỗ dẫn cực đại là :

$$g_{m0} = \frac{-2I_{DSS}}{U_{GS0}} \longrightarrow g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)$$

- Thực tế thì $I_{D_{bq}}$ cũng sẽ thay đổi theo U_{DS} mặc dù sự thay đổi này là không đáng kể. Phương trình tính dòng I_D được hiệu chỉnh có tính đến ảnh hưởng của điện áp U_{DS} như sau:

$$i_D = f(u_{GS}, u_{DS}) = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 \left(1 + \frac{u_{DS}}{V_{An}} \right) \quad V_{An} - \text{Điện áp Early} \\ (30 \div 300V)$$

b/ Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ tần thấp (3)

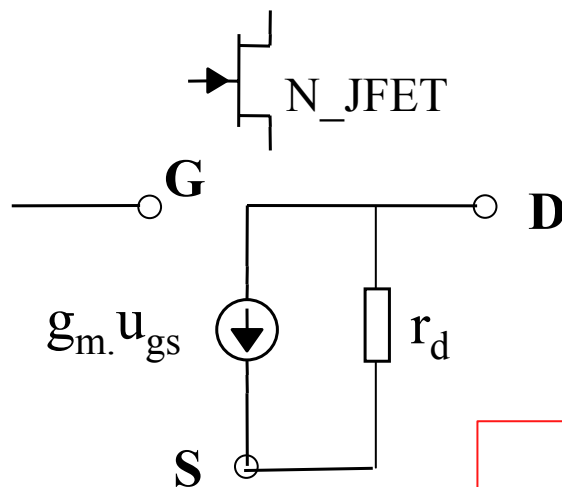
- Độ dẫn ra :

$$g_d = \left. \frac{\partial i_{DS}}{\partial u_{DS}} \right|_Q = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 \bigg|_Q \frac{1}{V_{An}} = \frac{I_D}{V_{An}}$$

- Điện trở vi phân đầu ra:

$$r_i = r_d = \left. \frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D} \right|_Q = \frac{1}{g_d} = \frac{V_{An}}{I_D}$$

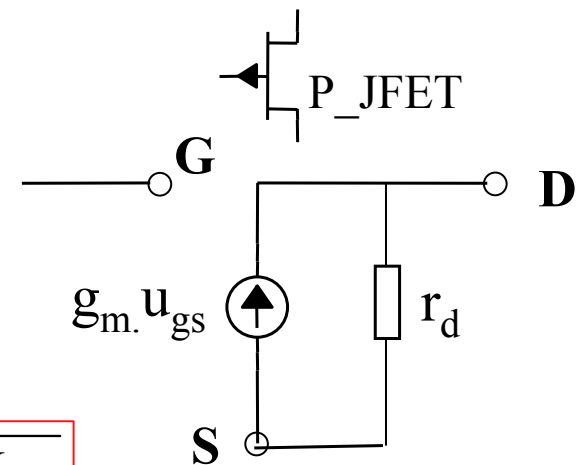
❖ Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ tần thấp của JFET



$$g_{m0} = \frac{-2I_{DSS}}{U_{GS0}}$$

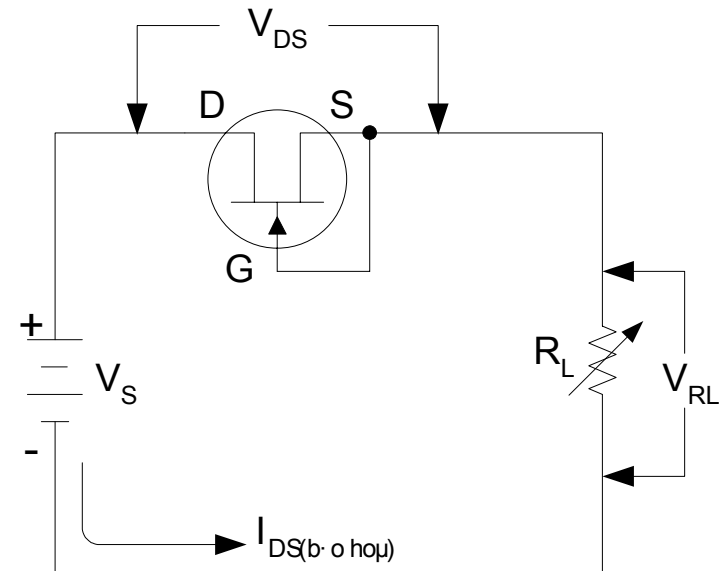
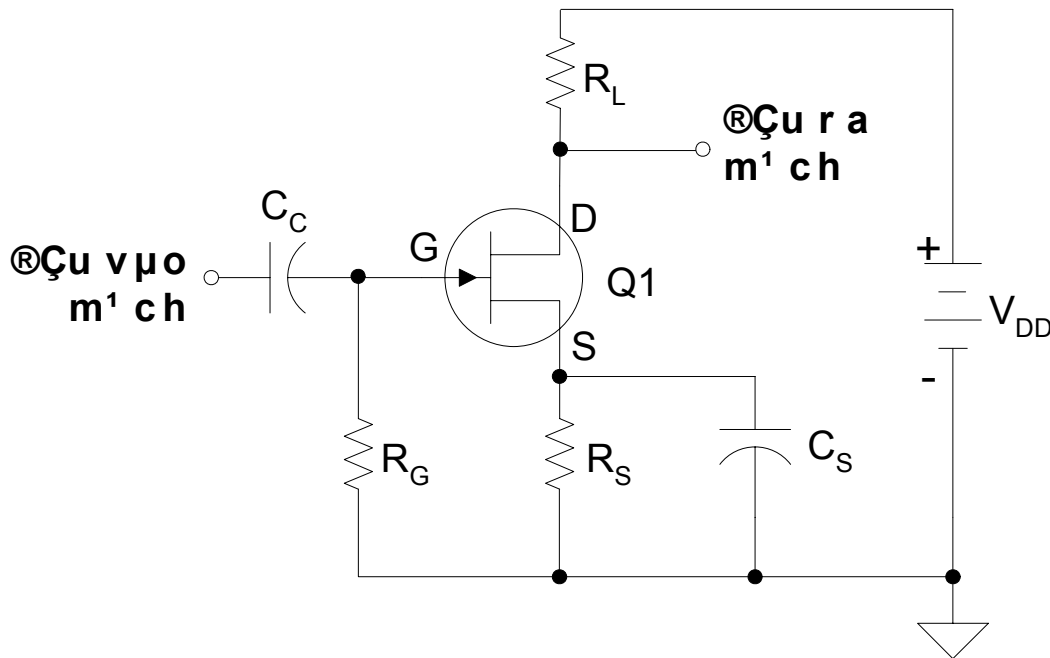
$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)$$

$$g_m = \frac{-2I_{DSS}}{U_{GS0}} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right) = \frac{2\sqrt{I_{DS} \cdot I_{DSS}}}{-U_{GS0}}$$



2.6 Một số mạch ứng dụng đơn giản của JFET

- Bộ khuếch đại xoay chiều dùng JFET
- Mạch ổn dòng dùng JFET



3. Cấu trúc MOS

3.1 Cấu trúc MOS trong điều kiện cân bằng nhiệt

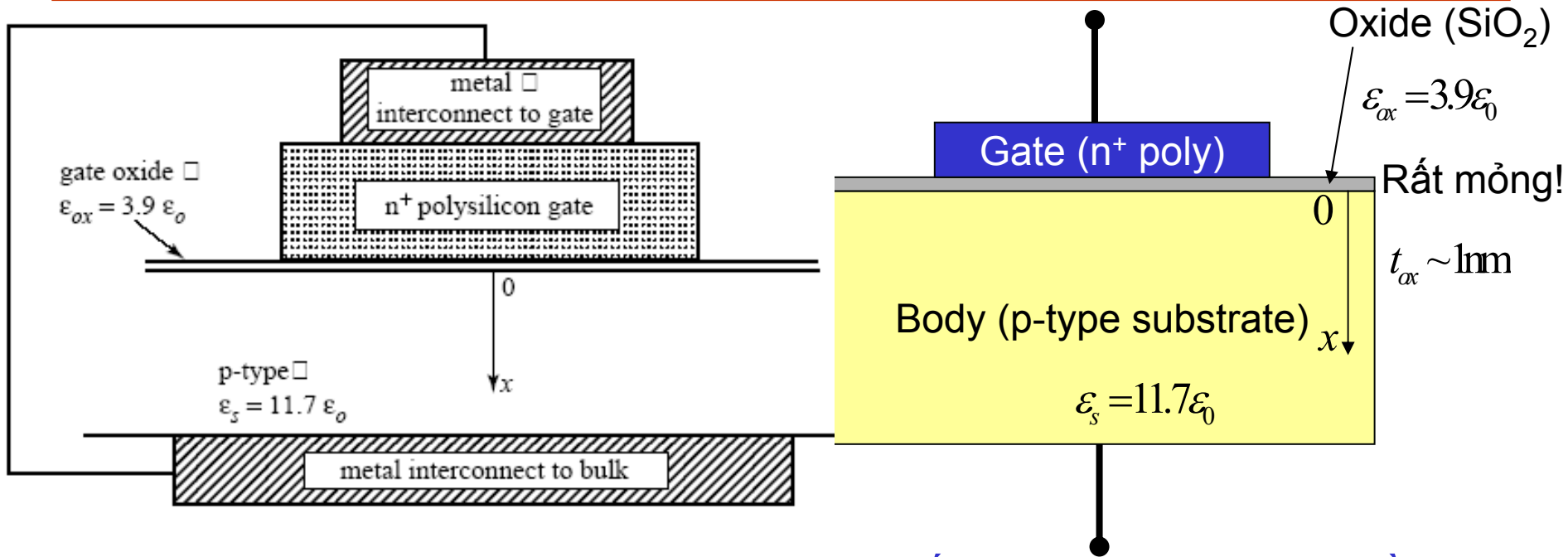
3.2 Cấu trúc MOS khi có điện áp phân cực

3.3. Đặc tuyến Q-V

3.4. Một số hiệu ứng bậc hai

3.5. Các mô hình dùng cho linh kiện MOS

3. Cấu trúc MOS



- **MOS = Metal-Oxide-Semiconductor:** Cấu trúc tụ điện MOS gồm có lớp điện cực kim loại phủ lên lớp bán dẫn có nồng độ pha tạp rất cao (n⁺ hoặc p⁺) tương đương như lớp “Metal” (Miền Gate), và lớp bán dẫn nền (loại p hoặc n)-lớp Semiconductor (miền Body), giữa chúng có lớp cách điện rất mỏng dùng Oxide SiO₂.
- Lớp kim loại “Metal” thường dùng lớp bán dẫn pha tạp cao n⁺ hoặc p⁺
- Lớp bán dẫn nền dùng loại p ta có cấu trúc **NMOS**, nếu dùng loại n ta có cấu trúc **PMOS**

Ứng dụng của cấu trúc MOS

- ❖ **Cấu trúc MOS đã và đang là công nghệ chủ đạo tạo ra cuộc cách mạng về lĩnh vực điện tử. Ứng dụng của cấu trúc MOS:**
 - Dùng trong nhiều vi mạch tương tự và số: MOSFET là phần tử cơ bản trong họ vi mạch CMOS
 - Dùng nhiều trong các vi mạch nhớ: DRAM, EPROM...
 - Dùng có các thiết bị ảnh như camera CCD (Charge-Couple Device)
 - Dùng trong các loại màn hình chỉ thị như Màn hình ma trận tinh thể lỏng tích cực...

3.1 Điện trường của N-MOS trong điều kiện cân bằng nhiệt (1)

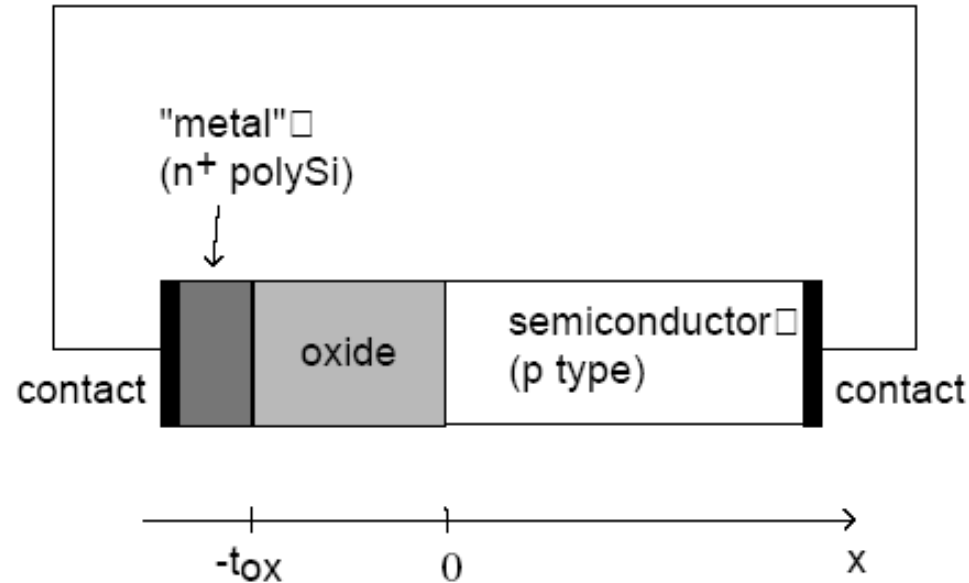
❖ Mô hình cấu trúc N-MOS lý tưởng như hình vẽ:

▪ Miền kim loại “Metal” (Miền Gate) không tạo thành một vùng tích điện mà nó chỉ tích điện trên bề mặt

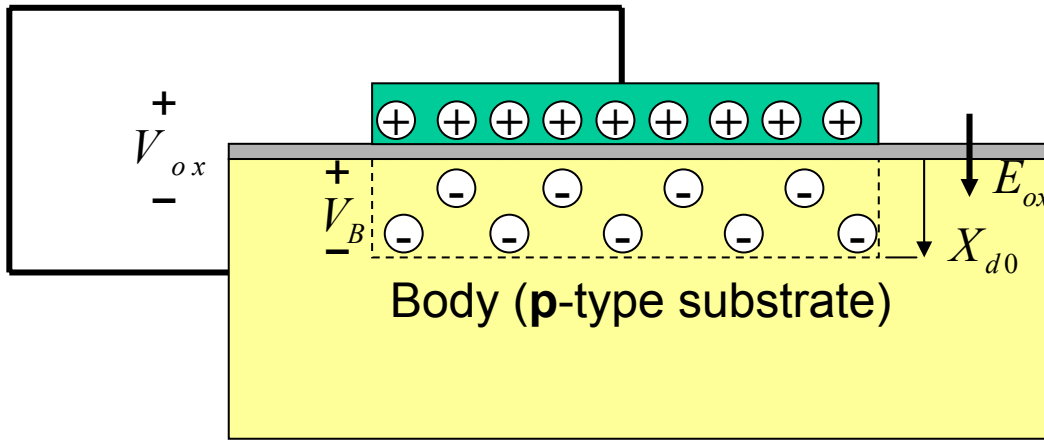
▪ Lớp oxide là chất điện môi, cách điện hoàn toàn, không tích điện

❖ Vùng bán dẫn nền (Miền Body): có thể hình thành vùng điện tích không gian.

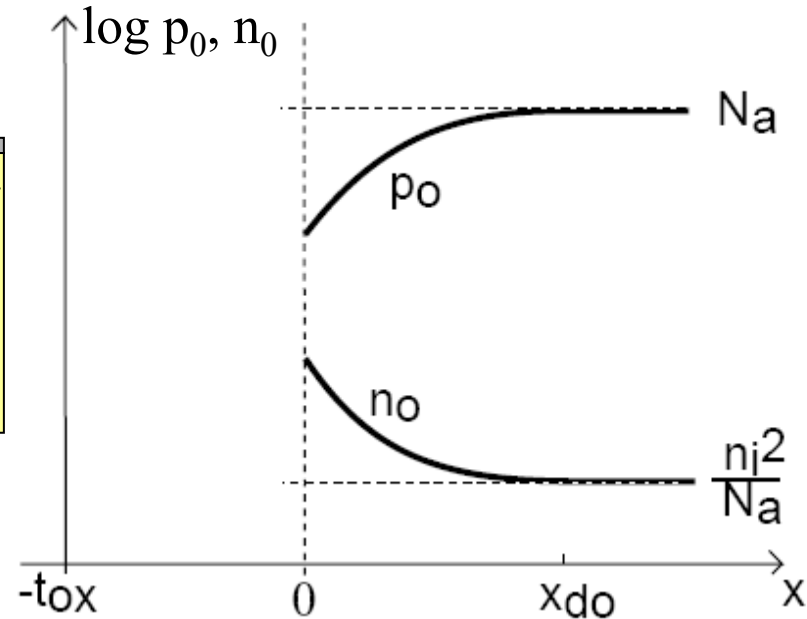
▪ Điều kiện cân bằng không thể được thiết lập thông qua lớp oxide nên cần phải có dây dẫn chuyển điện tích giữa lớp kim loại và lớp bán dẫn.



3.1 Điện trường của N-MOS trong điều kiện cân bằng nhiệt (2)



- ⊕ Ion Donor +
- ⊖ Ion Acceptor -



- Qua dây dẫn sẽ có sự khuếch tán điện tử từ miền kim loại G sang miền bán dẫn B và lỗ trống từ miền B sang miền G.
- Miền B sẽ tích điện -, miền G tích điện +, giữa chúng hình thành điện trường E_{ox} hướng từ G sang B. Điện trường này làm hình thành lớp điện tích dương ngay dưới đáy của miền G và miền điện tích âm trong miền B ngay dưới lớp oxide (Do E_{ox} cuốn điện tử và lỗ trống ngược với dòng kát)
- Miền điện tích - trong miền bán dẫn tạo ra một **vùng chuyển tiếp** có độ rộng X_{d0} ngay sát lớp oxide.

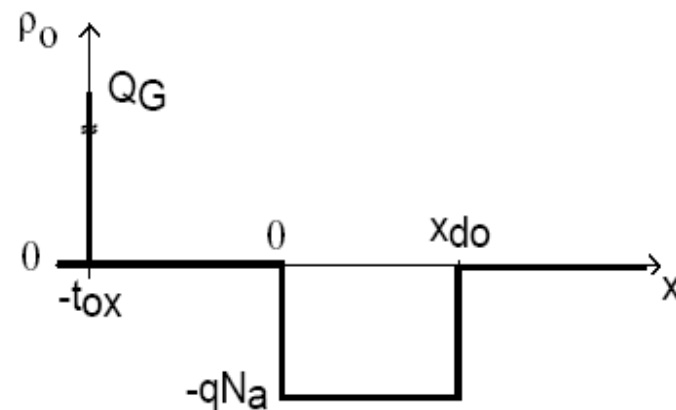
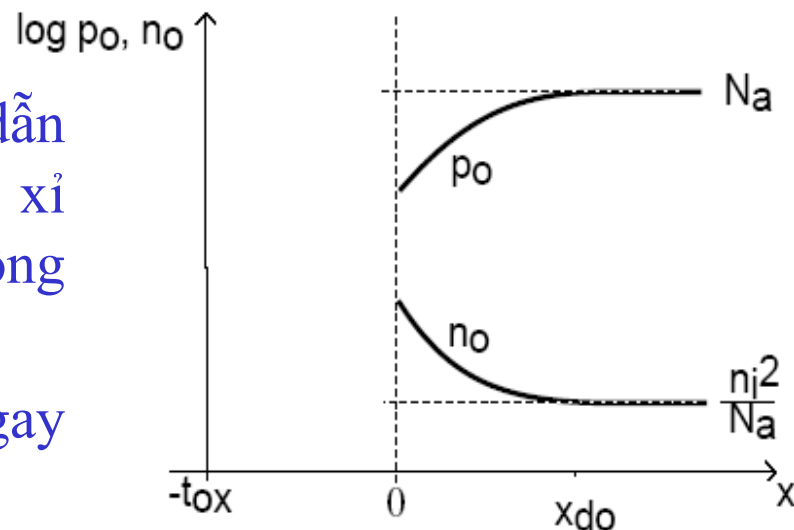
3.1 Điện trường của N-MOS trong điều kiện cân bằng nhiệt (3)

❖ Mật độ điện tích không gian:

- Vùng điện tích không gian tại lớp bán dẫn ngay sát lớp oxide được xấp xỉ (xấp xỉ chuyển tiếp) có nồng độ điện tích đồng đều là $-qN_a$
- Tại miền G có lớp điện tích + mỏng ngay sát tích điện Q_G (C/cm^2)

Vậy mật độ điện tích không gian trong MOS như sau:

$$\begin{array}{ll}
 x \leq -t_{ox} & \rho_o(x) = Q_G \delta(-t_{ox}) \\
 -t_{ox} < x < 0 & \rho_o(x) = 0 \\
 0 < x < x_{do} & \rho_o(x) = -qN_a \\
 x_{do} < x & \rho_o(x) = 0
 \end{array}$$



3.1 Điện trường của N-MOS trong điều kiện cân bằng nhiệt (4)

❖ Điện trường trong cấu trúc N-MOS

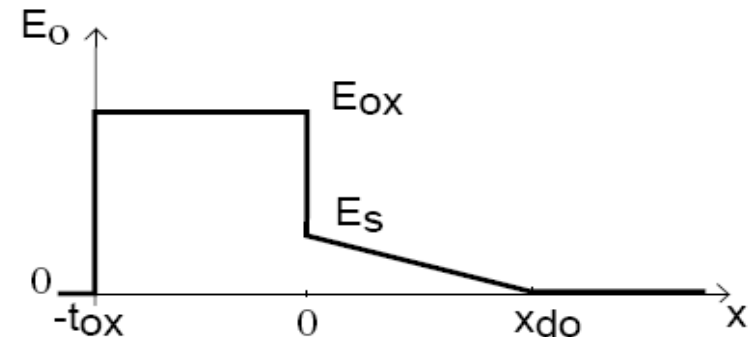
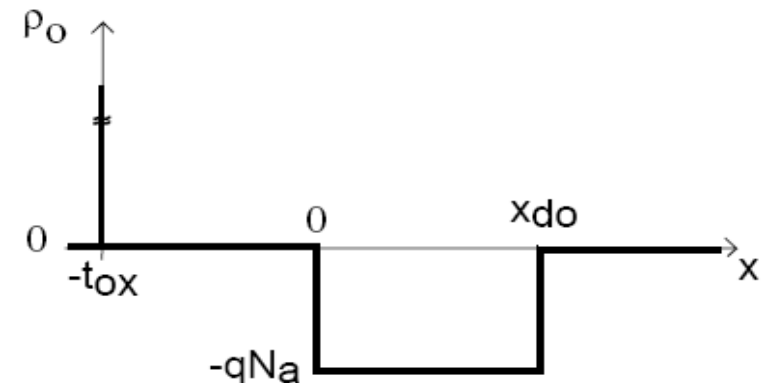
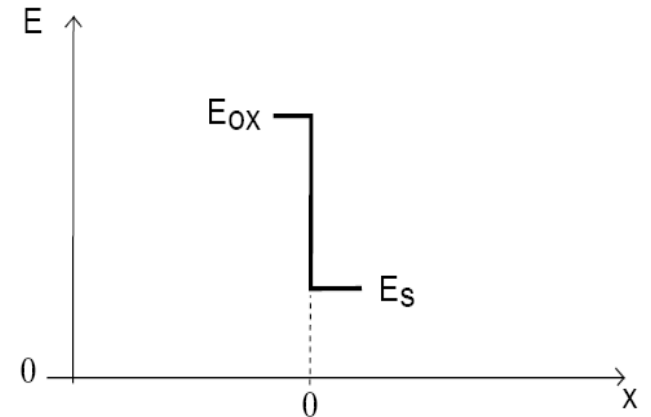
- Tích phân 2 về biểu thức Gauss ta có:

$$E_o(x_2) - E_o(x_1) = \frac{1}{\epsilon} \int_{x_1}^{x_2} \rho_o(x) dx$$

- Tại giao giới giữa bán dẫn và oxide, hằng số điện môi thay đổi, như vậy điện trường cũng thay đổi:

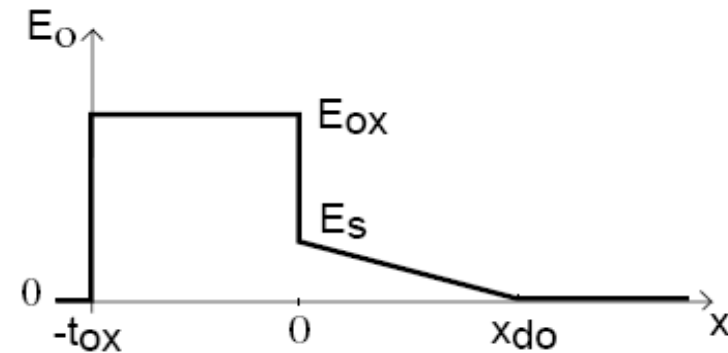
$$\epsilon_{ox} E_{ox} = \epsilon_s E_s \rightarrow \frac{E_{ox}}{E_s} = \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} \simeq 3$$

- Thay biểu thức của $\rho_o(x)$ vào biểu thức tích phân ta tính được biểu thức tính phân bố điện trường trong cấu trúc MOS:



3.1 Điện trường của N-MOS trong điều kiện cân bằng nhiệt (5)

$$E_0(x) = \begin{cases} 0 & \text{khi } x_{d0} < x \\ -\frac{qN_a}{\epsilon_s}(x-x_{d0}) & \text{khi } 0 < x < x_{d0} \\ \frac{\epsilon_s}{\epsilon_{ox}} E_0(x=0^+) = \frac{qN_ax_{d0}}{\epsilon_{ox}} & \text{khi } -t_{ox} < x < 0 \\ 0 & \text{khi } x < -t_{ox} \end{cases}$$



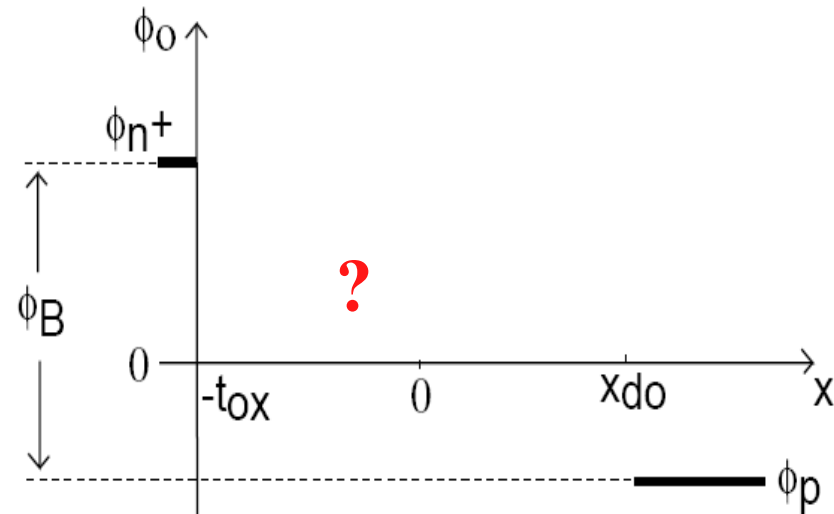
❖ Điện thế tĩnh điện:

- Điện thế tĩnh điện tại miền G (n+)

$$n_o = N_d^+ \Rightarrow \phi_g = \phi_{n^+}$$

- Điện thế tĩnh điện tại miền B:

$$p_o = N_a \Rightarrow \phi_p = -\frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}$$



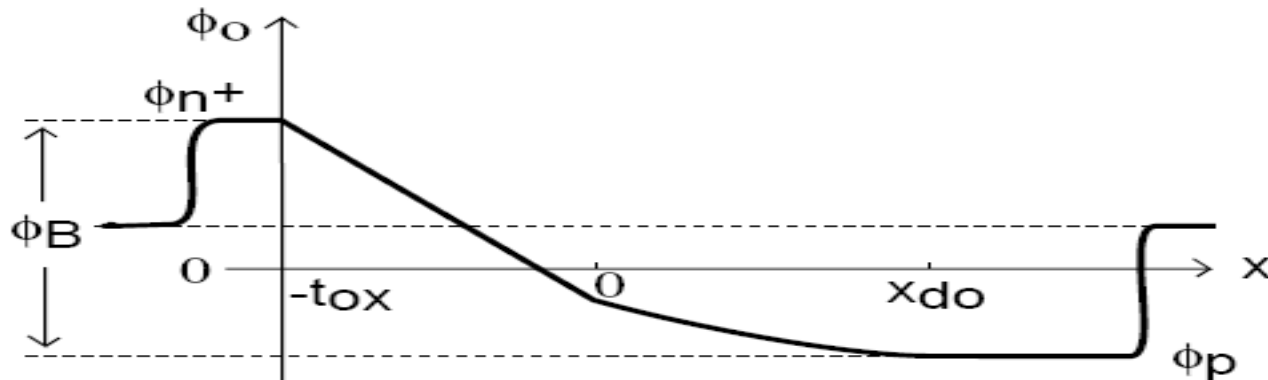
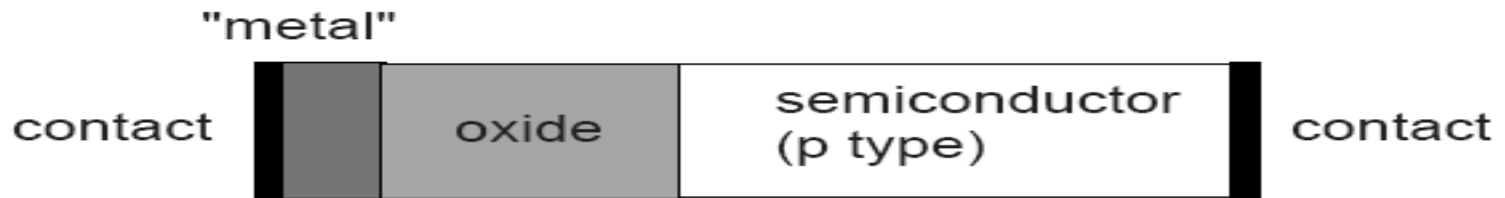
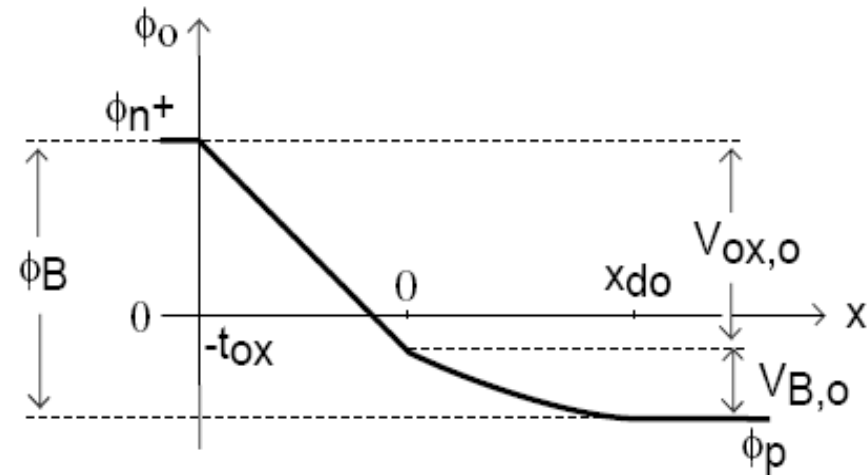
❖ Hiệu điện thế nội:

$$\phi_B = \phi_g - \phi_p = \phi_{n^+} + \frac{kT}{q} \ln \frac{N_a}{n_i}$$

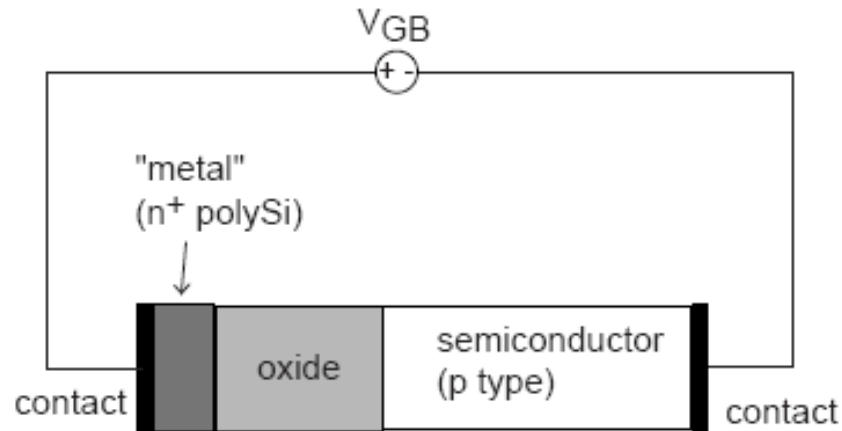
3.1 Điện trường của N-MOS trong điều kiện cân bằng nhiệt (6)

$$\phi_o(x_2) - \phi_o(x_1) = - \int_{x_1}^{x_2} E_o(x) dx$$

- Điện thế tiếp xúc



3.2 Điện trường của N-MOS khi được phân cực (1)



- Khi có điện áp phân cực U_{GB} đặt vào nMOS, tùy theo giá trị điện áp phân cực U_{GB} vùng điện tích không gian thay đổi và có thể tồn tại ở các trạng thái khác nhau.
- Khi có điện áp phân cực, điện thế nội đặt qua cấu trúc MOS thay đổi từ :

$$\phi_B \rightarrow \phi_B + U_{GB}$$

- Do lớp oxide cách điện nên dòng điện tại bất kỳ vị trí nào trong các lớp bán dẫn $J=0$, như vậy $J_{drift} = -J_{diff}$
- Tại biên giữa lớp oxide và bán dẫn, điện trường phía lớp oxide E_{ox} và điện trường phía bán dẫn nên E_S luôn thỏa mãn điều kiện sau:

$$E_{ox}/E_S \approx 3$$

3.2 Điện trường của N-MOS khi được phân cực (2)

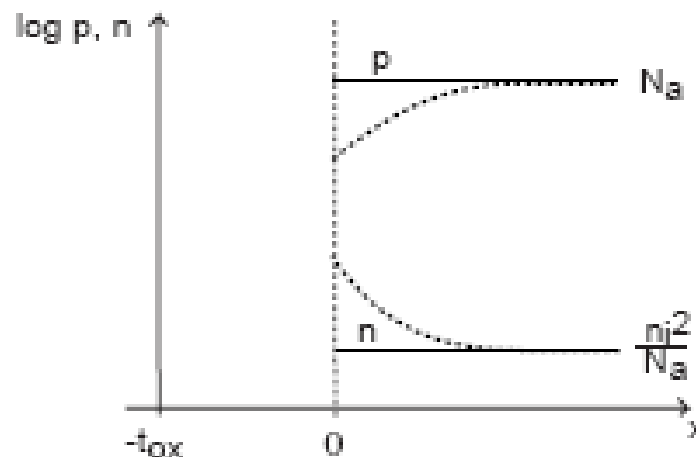
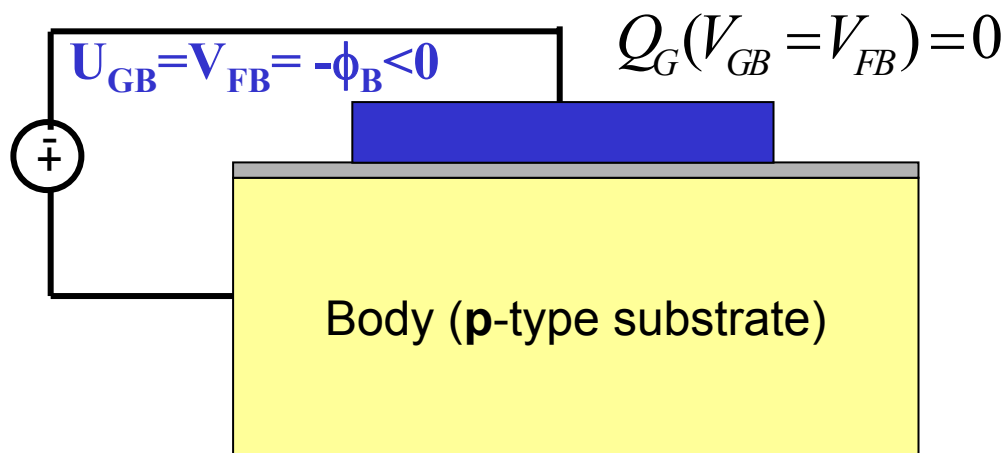
❖ Khi $U_{GB} > 0$, ban đầu nguồn cuốn điện tử tự do từ G sang B và lỗ trống từ B sang G, như vậy vùng chuyển tiếp sẽ được mở rộng hơn và không đổi khi đạt trạng thái cân bằng.

❖ Ngược lại nếu $U_{GB} < 0$, ban đầu nguồn cuốn điện tử tự do từ B sang G và lỗ trống từ G sang B, như vậy vùng chuyển tiếp sẽ thu hẹp và không đổi khi đạt trạng thái cân bằng.

❖ Như vậy tùy theo điện áp phân cực mà cấu trúc MOS có thể tồn tại ở các trạng thái như sau:

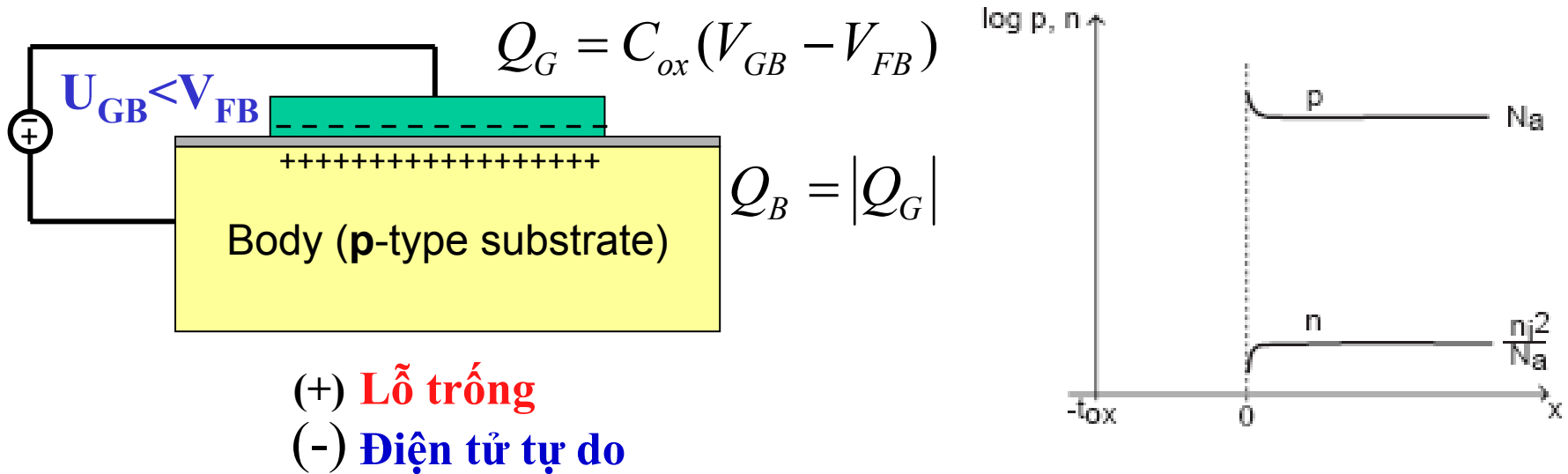
- Trạng thái bằng phẳng (Flatband): $U_{GB} = U_{FB} = -\phi_B$
- Trạng thái tích lũy (accumulation): $U_{GB} < U_{FB}$
- Trạng thái chuyển tiếp (depletion): $U_{FB} < U_{GB} < 0$
- Trạng thái chuyển tiếp (depletion): $0 < U_{GB} < U_T$
- Trạng thái ngưỡng (threshold): $U_{GB} = U_T$
- **Trạng thái đảo (inversion): $U_{GB} > U_T$**

Trạng thái năng lượng bằng phẳng (Flatband): $U_{GB} = U_{FB} = -\phi_B$



- Khi đặt điện áp phân cực $U_{GB} = V_{FB} = -\phi_B < 0$, điện áp phân cực bù với hiệu điện thế nội ϕ_B , có tác dụng cuốn điện tử từ miền B sang miền G, điện tích của các miền G và B giảm dần đến bằng 0, và các vùng tích điện biến mất.
- Với điện kiện phân cực như vậy MOS có dải năng lượng bằng phẳng “flatband”. Điện áp V_{FB} gọi điện áp flatband.
- Mật độ điện tích miền G: $Q_G(V_{FB}) = 0$.
- Trường hợp này ban đầu, dòng cuốn do U_{GB} tạo ra ngược với dòng khuếch tán.

Trạng thái tích lũy (accumulation): $U_{GB} < U_{FB}$



▪ Nếu điện áp phân cực giảm nhỏ hơn V_{FB} , cấu trúc nMOS giống như tụ điện 2 bản cực song song. Miền G tích điện – (điện tích do điện tử tự do tạo ra), miền B tích điện + (điện tích do lỗ trống tạo ra)

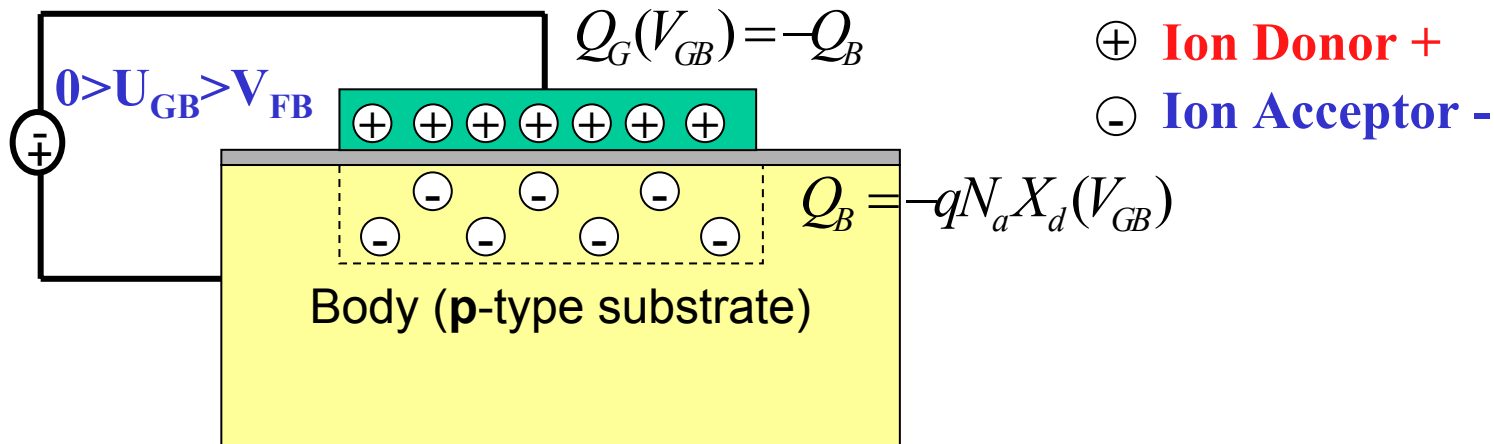
▪ Mật độ điện tích của miền G:

$$Q_G = C_{ox}(V_{GB} - V_{FB})$$

C_{ox} - mật độ điện dung của tụ MOS

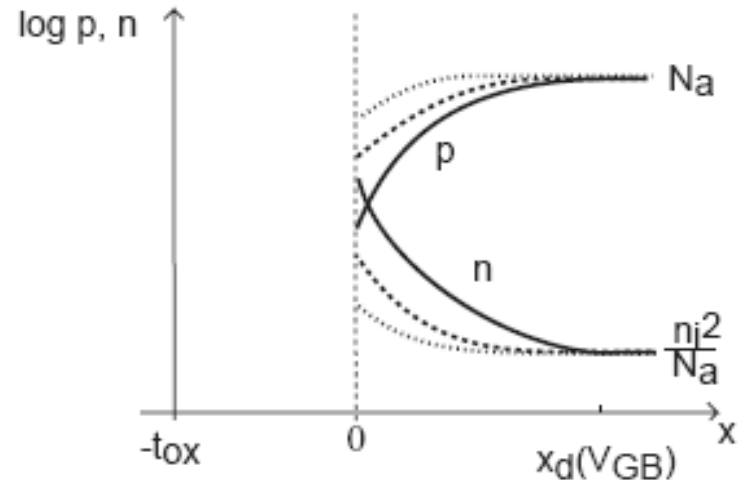
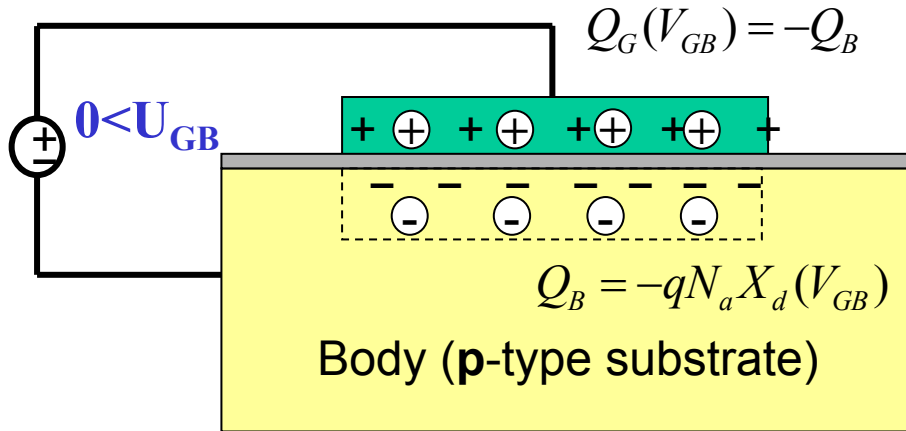
▪ Trường hợp này ban đầu dòng cuốn do U_{GB} tạo ra lớn hơn và ngược chiều dòng khuếch tán

Trạng thái chuyển tiếp (depletion): $U_{FB} < U_{GB} < 0$



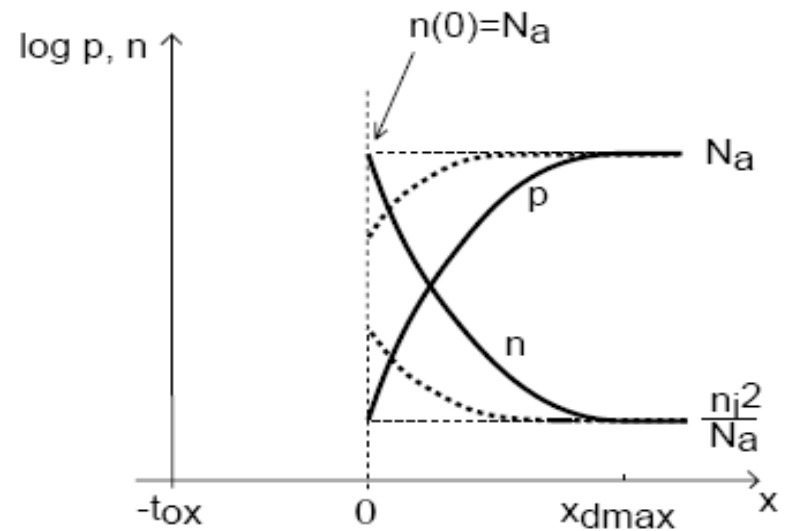
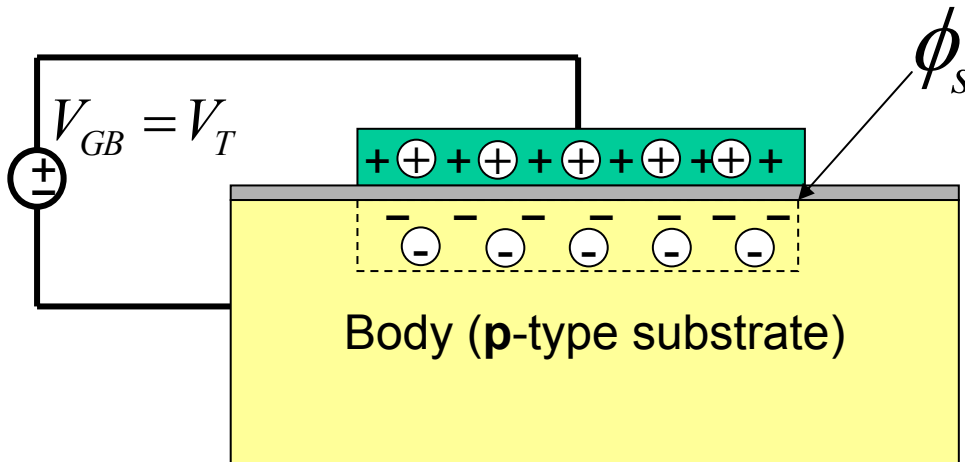
- Tương tự như ở điều kiện cân bằng nhiệt, mặc dù $U_{GB} < 0$, nhưng do $U_{GB} > V_{FB}$ nên vẫn tồn tại dòng khuếch tán điện tử từ miền kim loại G sang miền bán dẫn B và lỗ trống từ miền B sang miền G qua dây dẫn và vượt qua điện thế của nguồn cung cấp. Như vậy Miền B sẽ tích điện +, miền G tích điện -, giữa chúng hình thành điện trường E_{ox} hướng từ G sang B. Điện trường này làm hình thành lớp điện tích dương ngay dưới đáy của miền G và miền điện tích âm trong miền B ngay dưới lớp oxide tạo ra một **vùng chuyển tiếp** có độ rộng x_d ngay sát lớp oxide
- Trường hợp này ban đầu dòng cuốn do U_{GB} tạo ra ngược chiều và nhỏ hơn dòng khuếch tán.

Trạng thái chuyển tiếp (depletion): $0 < U_{GB} < U_T$



- Khi $0 < U_{GB} < U_T$, tương tự như trường hợp $U_{FB} < U_{GB} < 0$, **Vùng chuyển tiếp** được hình thành ngay sát lớp oxide có độ rộng được mở rộng hơn. Miền tích điện + được hình thành phía đáy của miền G ngay sát lớp oxide và miền điện tích - được hình thành phía đỉnh của miền B ngay sát lớp oxide. Điện tích âm tạo ra do các Ion Acceptor - và nồng độ điện tử tự do tăng lên.
- Khi U_{GB} tăng thì vùng chuyển tiếp cũng được mở rộng.
- Tại vùng chuyển tiếp phía miền B – bán dẫn p, khi U_{GB} tăng nồng độ điện tử tăng dần, nồng độ lỗ trống giảm dần.
- Trường hợp này ban đầu dòng cuốn do U_{GB} tạo ra cùng chiều với chiều dòng khuếch tán

Trạng thái ngưỡng (threshold): $U_{GB} = U_T$

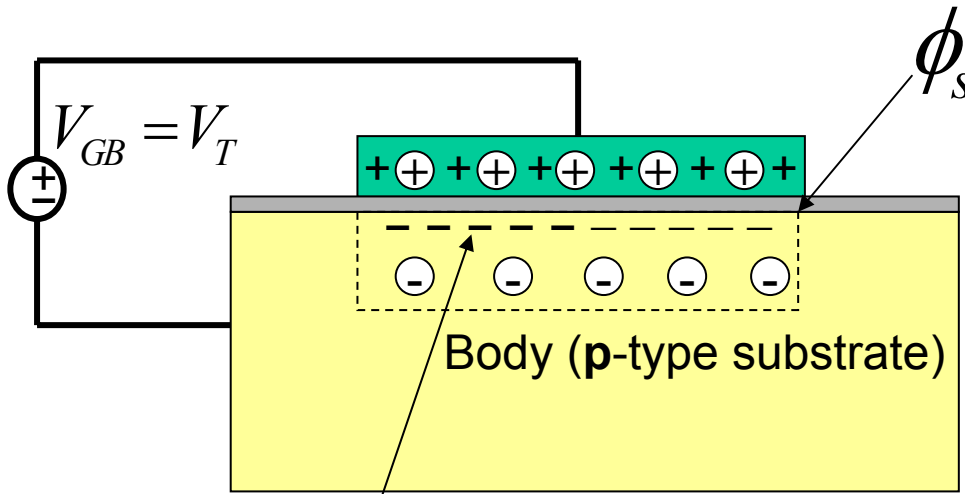


- Khi tăng U_{GB} , tại miền điện tích chuyển tiếp trên đỉnh miền B, nồng độ điện tử tăng dần, nồng độ lỗ trống giảm dần.
- Khi $U_{GB} = U_T$ tại đỉnh của miền B nồng độ điện tử bằng nồng độ lỗ trống ở vùng bán dẫn cận trung hoà $n(0) = N_a$, còn nồng độ lỗ trống bằng nồng độ điện tử ở vùng bán dẫn cận trung hoà $p(0) = n_i^2 / N_a$. Trạng thái này gọi là trạng thái ngưỡng - Bán dẫn đã bắt đầu chuyển từ loại p sang loại n.
- Điện áp U_T được gọi là điện áp ngưỡng.

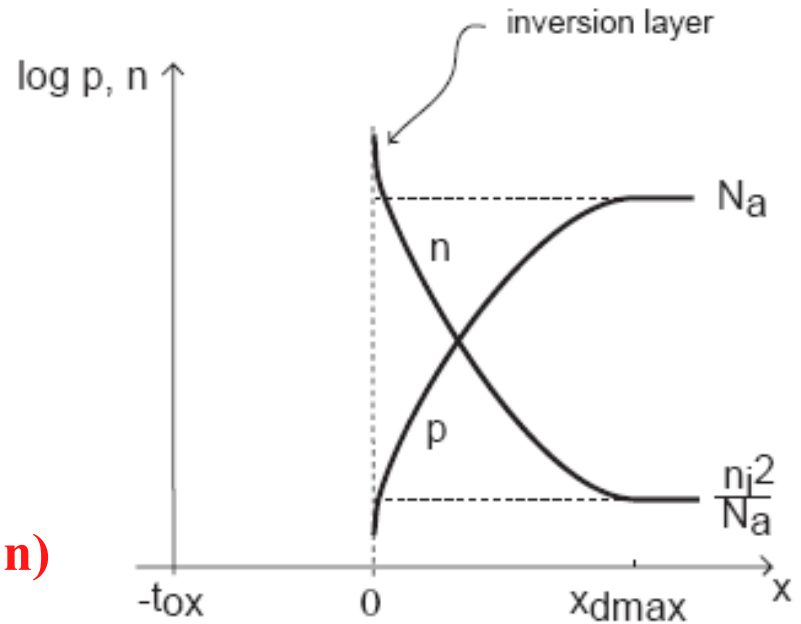
$$V_T = V_{FB} - 2\phi_p + \gamma\sqrt{-2\phi_p}$$

$$\gamma = \frac{1}{C_{ox}} \sqrt{2\epsilon_s q N_a} \quad \text{- Hệ số nền}$$

Trạng thái đảo (inversion): $U_{GB} > U_T$



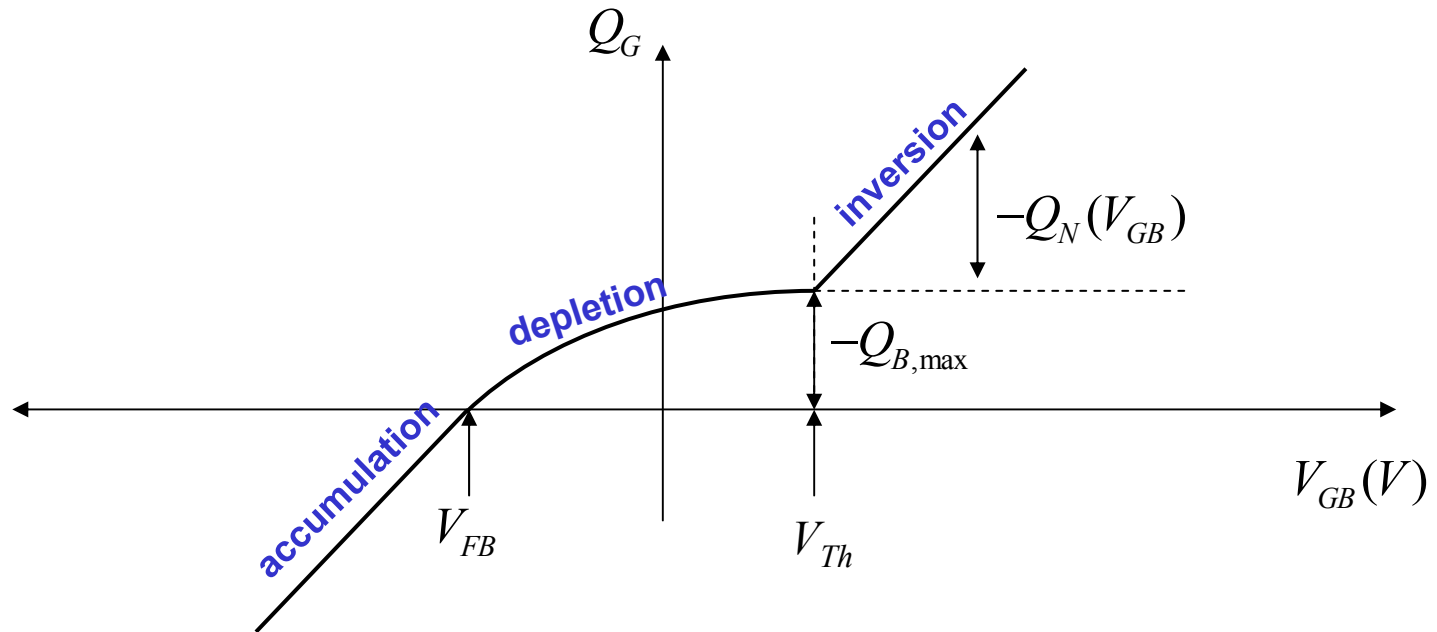
(Lớp đảo hạt dẫn, tương đương bán dẫn n)



- Khi $U_{GB} > U_T$ nồng độ điện tử tự do tại bề mặt của miền bán dẫn B tiếp giáp với lớp oxide tăng lớn hơn N_a , trạng thái đảo hạt dẫn xảy ra. Lớp điện tử tại bề mặt được gọi là lớp đảo, bán dẫn tại đó tương đương bán dẫn n
- Nồng độ điện tử tự do tại bề mặt được điều chế theo điện áp U_{GB} , nếu U_{GB} tăng thì $n(0)$ tăng \Rightarrow điện tích của lớp đảo Q_n tăng.

$$Q = CV \Rightarrow Q_n = -C_{ox}(V_{GB} - V_T) \quad \text{với } V_{GB} > V_T$$

3.3 Đường cong Q-V của cấu trúc N-MOS



- Trong trạng thái tích lũy và trạng thái đảo điện tích của vùng chuyển tiếp phía miền G tăng tuyến tính theo điện áp phân cực U_{GB} .
- Trong trạng thái chuyển tiếp điện tích tăng rất chậm do điện áp phân cực chủ yếu rơi trên điện trở của vùng điện tích chuyển tiếp.

4. Transistor trường loại cực cửa cách ly – IGFET

4.1 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động của MOSFET loại kênh đặt sẵn (Depletion Type MOSFET- DMOSFET)

4.2 Cấu tạo và nguyên lý hoạt động của MOSFET loại kênh cảm ứng (Enhancement Type MOSFET- EMOSFET)

4.3 Các cách mắc và họ đặc tuyến của MOSFET

4.4 Phân cực cho MOSFET

4.5 Các mô hình tương đương của MOSFET

4.6 Cấu trúc MOS

4.1 Cấu tạo của MOSFET (1)

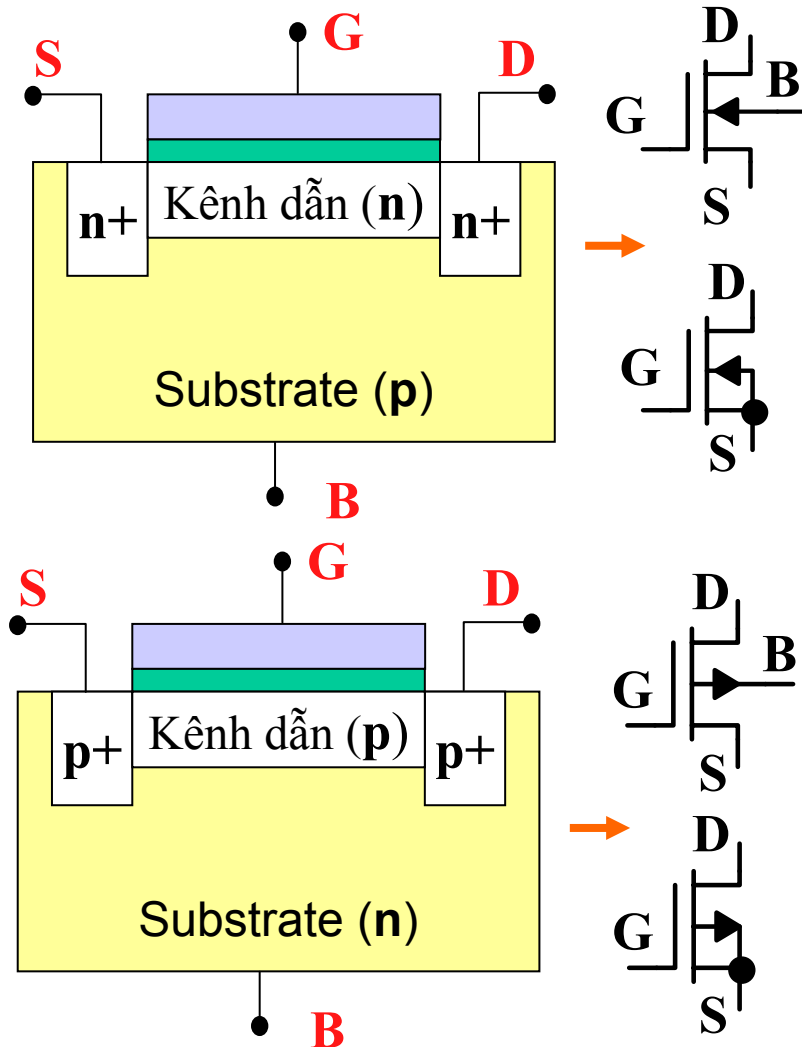
- ❖ MOSFET là loại linh kiện điển hình trong họ FET có cực cửa G cách ly. MOSFET về cơ bản có cấu tạo dựa trên cấu trúc MOS như sau:
 - Trên đế bán dẫn (bán dẫn nền B), người ta tạo ra 2 vùng bán dẫn khác với bán dẫn nền. Ví dụ loại nền loại p, thì tạo ra 2 vùng bán dẫn loại n⁺ cách nhau một khoảng nhất định, 2 vùng bán dẫn n này được dẫn ra ngoài thành 2 điện cực S và D
 - Vùng bán dẫn giữa S và D hoặc bằng cách pha tạp (MOSFET kênh đặt sẵn) hoặc do thiên áp trong khi hoạt động (MOSFET kênh cảm ứng) bao giờ cũng có loại hạt dẫn đảo so với đế. Vùng này được gọi là vùng kênh dẫn, như vậy tức là bao giờ ta cũng có một chuyển tiếp p-n giữa đế và kênh dẫn
 - Phía trên kênh dẫn người ta phủ lớp điện môi mỏng (SiO_2), và trên lớp điện môi này phủ tiếp lớp kim loại tạo ra điện cực G của MOSFET, G được cách ly hoàn toàn với kênh dẫn, tương tự như cấu trúc MOS

4.1 Cấu tạo của MOSFET (2)

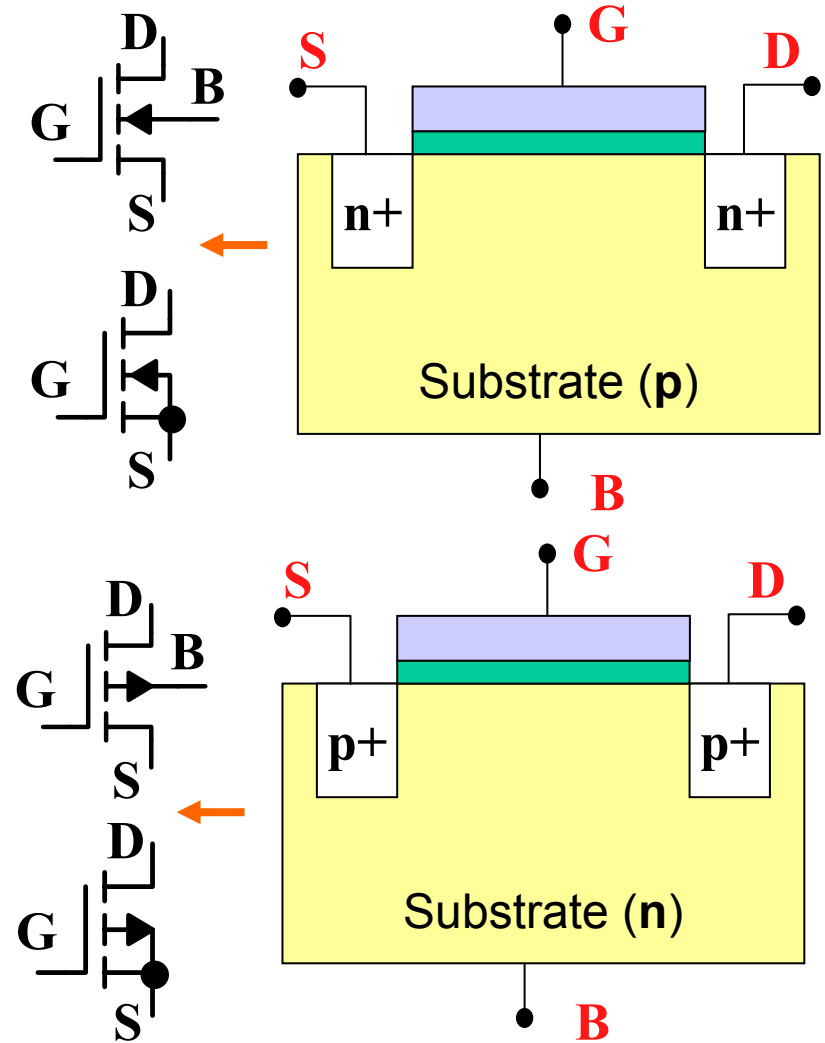
- + MOSFET thường có thêm điện cực thứ 4 gọi là cực đế B (substrate), cực đế (cực nền) ngăn cách với kênh dẫn bằng chuyển tiếp p-n nên cũng có thể dùng nó như một cực điều khiển nữa bên cạnh G. Tuy nhiên tích chất điều khiển của cực B thường không được sử dụng và nó thường được nối tắt với cực nguồn.
- Ngoài cách phân loại theo kênh dẫn loại n và p, MOSFET còn được phân loại theo cách tạo ra kênh dẫn như sau:
 - + **D-MOSFET** (Depletion MOSFET): MOSFET kênh đặt sẵn (MOSFET kiểu làm nghèo). Kênh dẫn được chế tạo sẵn là loại bán dẫn khác với bán dẫn nền. Điện áp giữa cực G và cực S làm nghèo một phần kênh dẫn (tương tự như JFET).
 - + **E-MOSFET** (Enhancement MOSFET): MOSFET kênh cảm ứng (MOSFET kiểu làm giàu), kênh dẫn chưa được chế tạo trước. Kênh dẫn sẽ được tạo ra khi điện áp đặt lên cực G thích hợp và có giá trị lớn hơn điện áp ngưỡng nào đó thì sẽ tạo lớp đảo hạt dẫn phía dưới cực cổng, lớp hạt dẫn đảo này tương tự như một kênh dẫn nối cực S và D.

4.1 Cấu tạo của MOSFET (3)

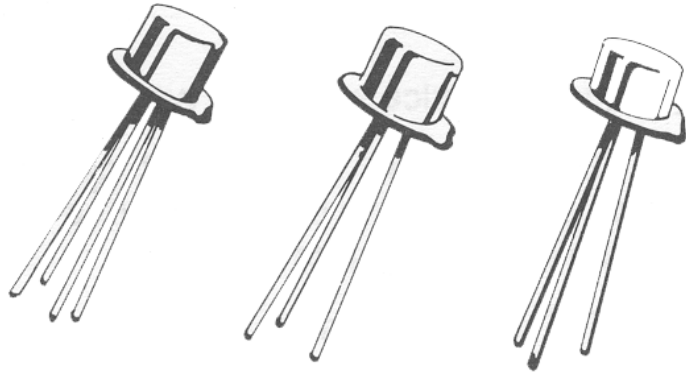
D-MOSFET



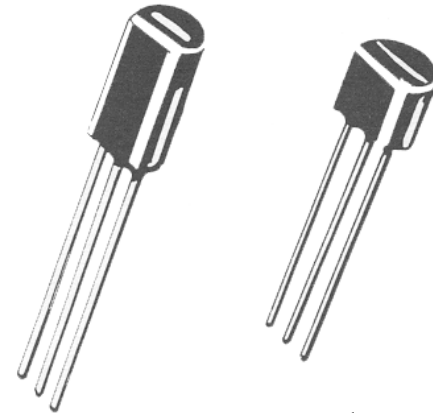
E-MOSFET



4.1 Hình ảnh của MOSFET

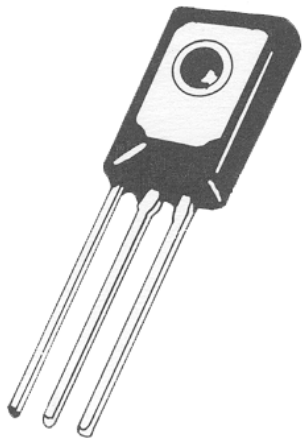


MOSFET vỏ kim loại

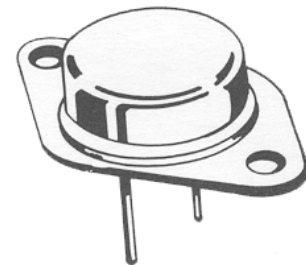
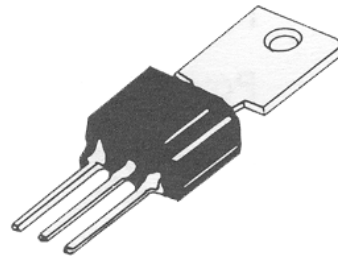
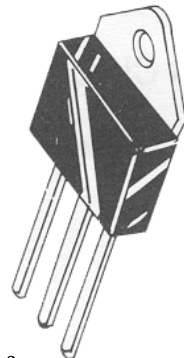


MOSFET vỏ nhựa

MOSFET công suất cao



MOSFET vỏ nhựa tổng hợp với đầu nhiệt kim loại



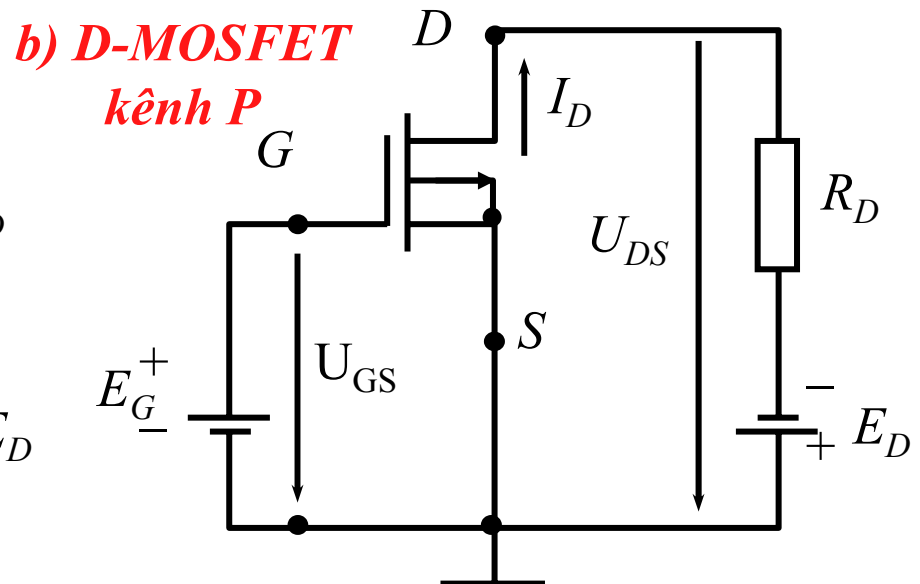
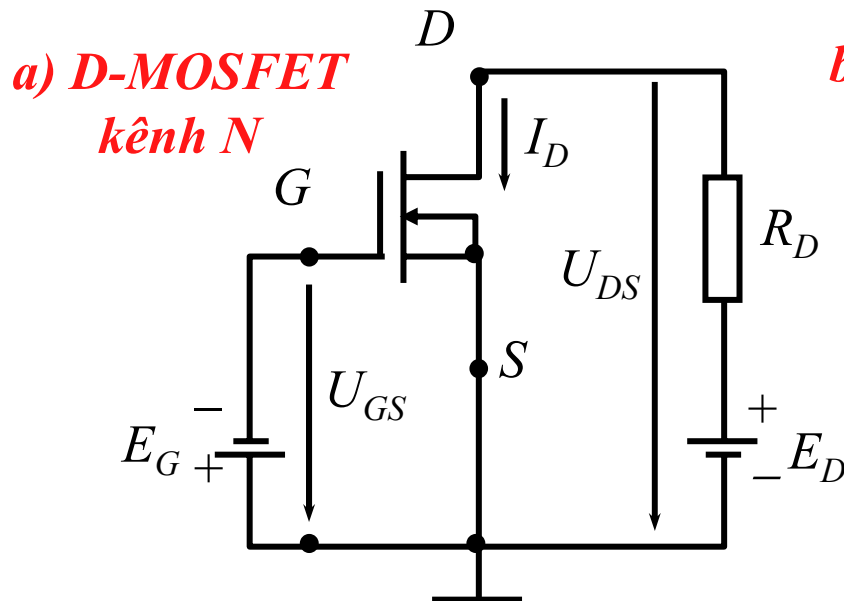
MOSFET vỏ hoàn toàn bằng kim loại

4.2 Nguyên lý làm việc của MOSFET

- Nguyên lý hoạt động của MOSFET kênh loại N và kênh loại P giống nhau. Chúng chỉ khác nhau về chiều của nguồn điện cung cấp là ngược dấu nhau.
- MOSFET được phân cực sao giữa đế (cực B) và kênh tạo ra vùng chuyển tiếp nghèo bao quanh kênh dẫn, và dòng các hạt dẫn đa số đi vào kênh từ cực S và ra khỏi kênh từ cực D tạo ra dòng I_D .
- Nguyên lý hoạt động cơ bản của MOSFET là cực cổng G kết hợp với lớp điện môi nằm dưới nó và kênh dẫn bán dẫn nằm dưới lớp điện môi chính là cấu trúc tụ điện MOS. Điện áp điều khiển tác dụng lên cực cổng sẽ tạo ra một điện trường làm biến thiên nồng độ hạt tải tự do trong kênh dẫn, hoặc thiết diện của kênh dẫn, độ dẫn của kênh sẽ thay đổi. Dòng điện I_D phụ thuộc vào điện áp U_{GS} và U_{DS} . Đặc tuyến quan trọng của MOSFET cũng là đặc tuyến ra và đặc tuyến truyền đạt tương tự như JFET.
- Đặc tính của MOSFET về cơ bản tương tự đặc tính của JFET nhưng có nhiều điểm ưu việt hơn.

Nguyên lý làm việc của D-MOSFET (1)

- Trong D-MOSFET bằng công nghệ đã chế tạo sẵn kênh dẫn bên dưới cực G, điện áp cực G điều khiển dòng giữa cực nguồn và cực máng bằng cách làm nghèo một phần kênh đó (thiết diện của kênh bị thu hẹp), tương tự như JFET. Vì khi D-MOSFET hoạt động kênh dẫn đã có sẵn đóng dần lại nên D-MOSFET còn được gọi là MOSFET thường mở.
- Thông thường cực nền B được nối tắt với cực nguồn S. Nguồn phân cực sao cho chuyển tiếp PN giữa cực bán dẫn nền và kênh dẫn luôn phân cực ngược, dòng hạt đa số của kênh dẫn đi ra ở cực D



Nguyên lý làm việc của D-MOSFET (2)

D-MOSFET kênh n làm việc theo 2 nguyên lý sau:

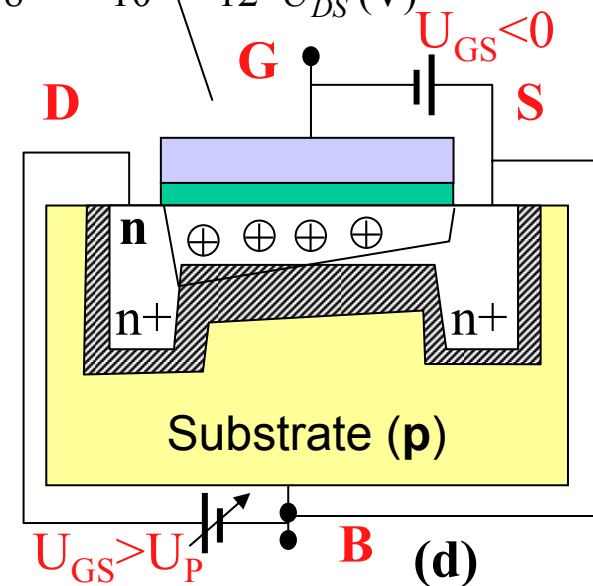
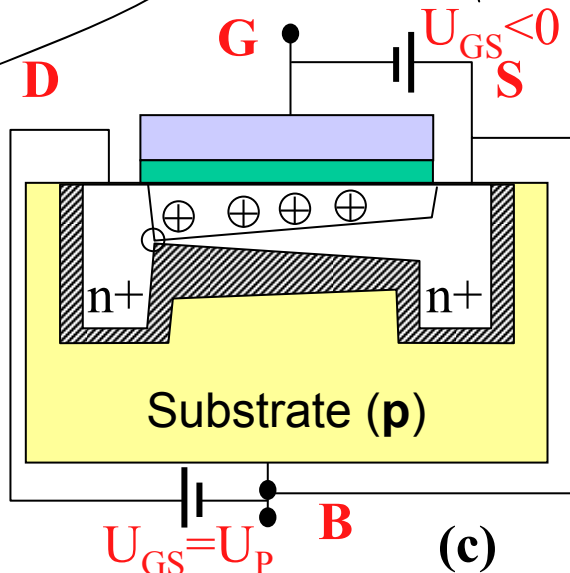
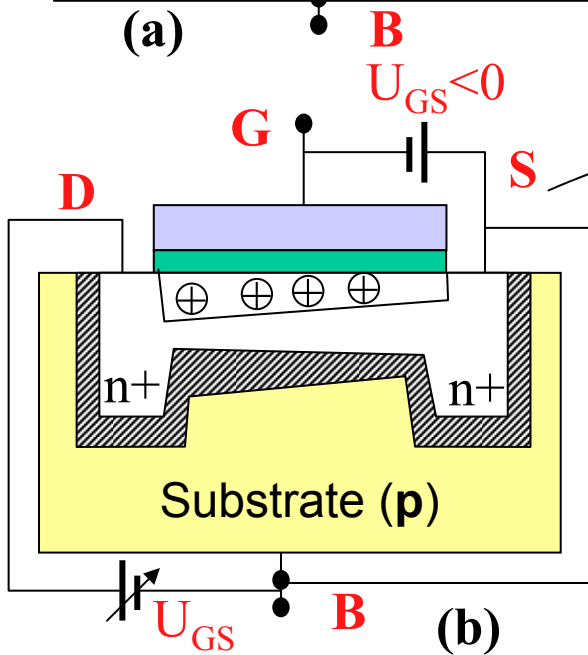
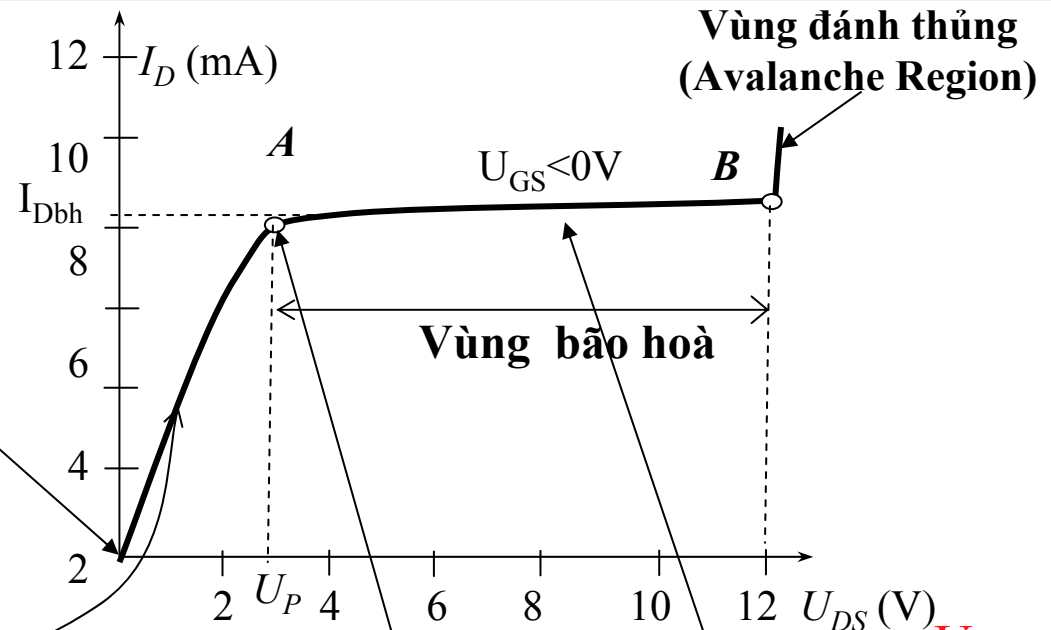
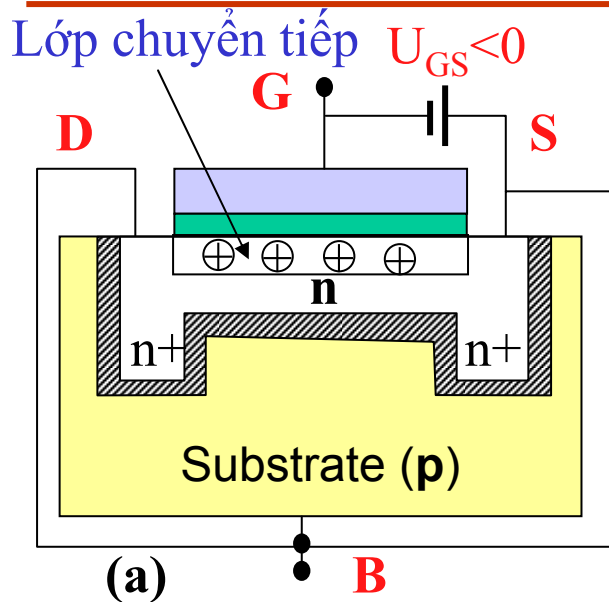
- **Nguyên lý tổn hao:** Khi $U_{GS} \leq 0$, những điện tích dương sẽ được cảm ứng vào kênh dẫn n, những điện tích dương này trung hoà bớt điện tử trong kênh n và hình thành một vùng chuyển tiếp nghèo hạt dẫn tại kênh ngay phía dưới cực G làm cho điện trở của kênh tăng lên, dòng I_D giảm xuống. U_{GS} càng giảm thì vùng chuyển tiếp càng mở rộng và I_D càng giảm. Sự thay đổi điện trở kênh dẫn do các hạt dẫn mới cảm ứng ra bởi điện trường cực G đã trung hoà bớt hạt dẫn vốn có của kênh – do điện tích trái dấu nhau – nghĩa là làm tổn hao hạt dẫn.

Với $U_{GS} = \text{const}$, khi U_{DS} tăng dần thì vùng chuyển tiếp PN giữa B và kênh phân cực ngược lan sâu hơn vào kênh và vùng chuyển tiếp nghèo hạt dẫn cũng sẽ mở rộng, kênh sẽ bị thắt dần về phía cực D. Đặc tuyến ra của D-MOSFET cũng tương tự như của JFET. Cấu trúc MOS giữa G và kênh làm việc ở trạng thái chuyển tiếp

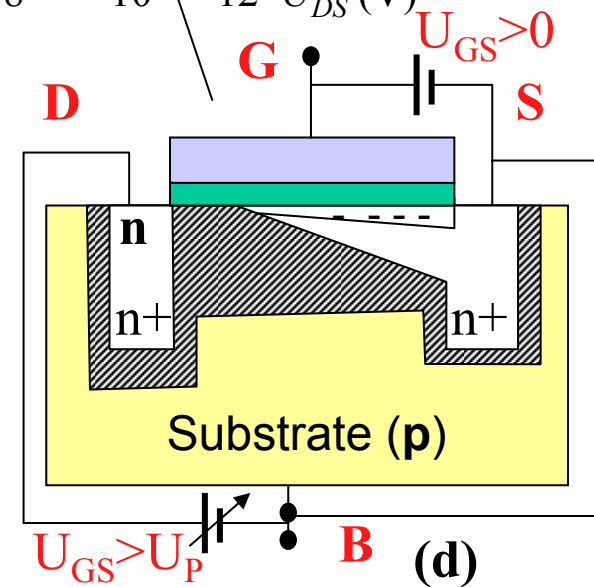
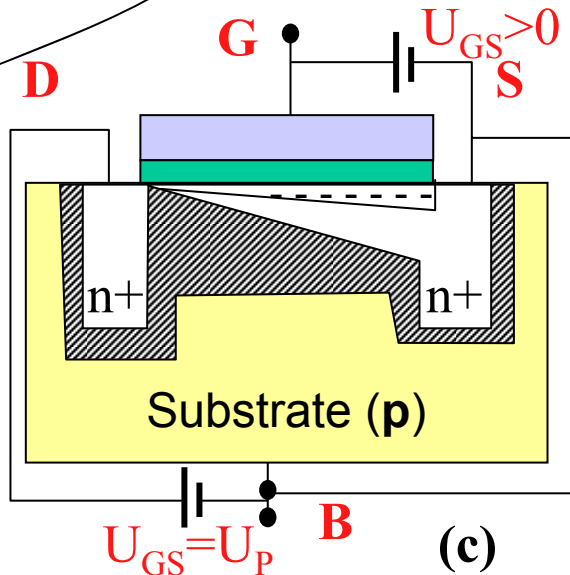
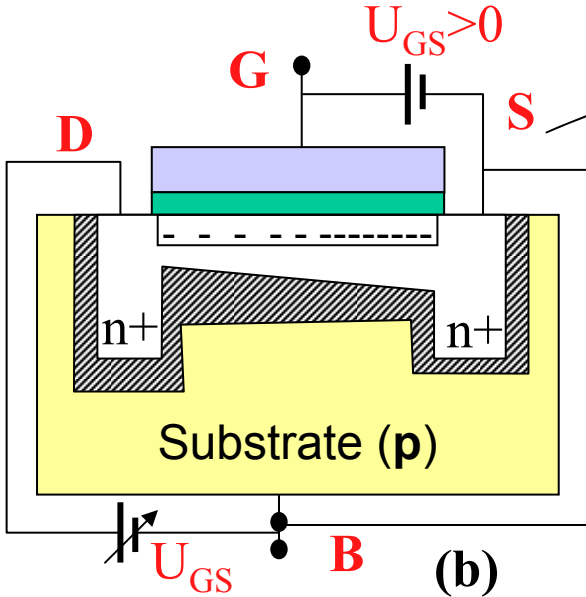
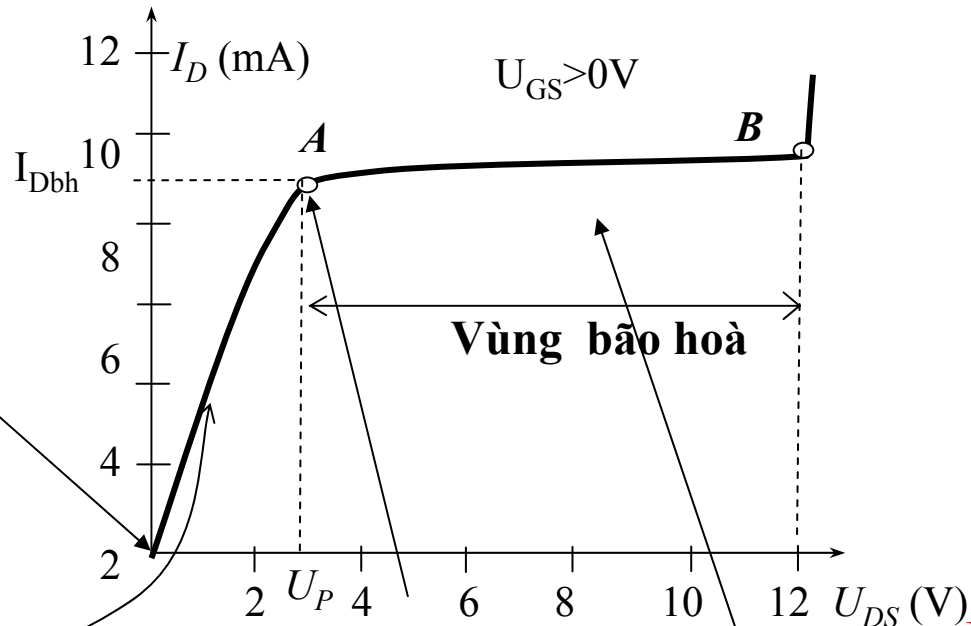
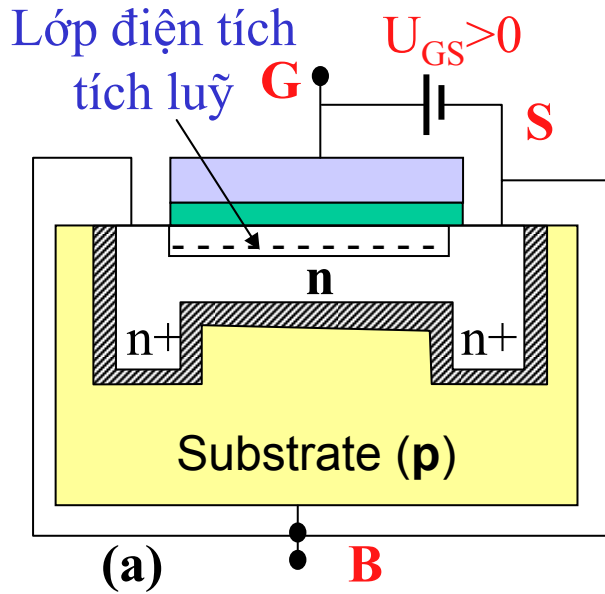
- **Nguyên lý tăng cường:** Khi $U_{GS} > 0$, khi ấy dưới tác dụng của điện trường cực G các điện tử được cảm ứng vào kênh dẫn làm tăng nồng độ của điện tử trong kênh dẫn do đó làm giảm điện trở suất của kênh. Nếu U_{GS} tăng thì I_D cũng sẽ tăng. Cấu trúc MOS giữa G và kênh làm việc ở trạng thái tích lũy.

Với $U_{GS} = \text{const}$, khi U_{DS} tăng dần thì vùng chuyển tiếp PN giữa B và kênh phân cực ngược lan sâu hơn vào kênh, và nồng độ điện tử trong kênh cũng giảm dần về phía cực D, như vậy kênh cũng sẽ bị thắt dần về phía cực D.

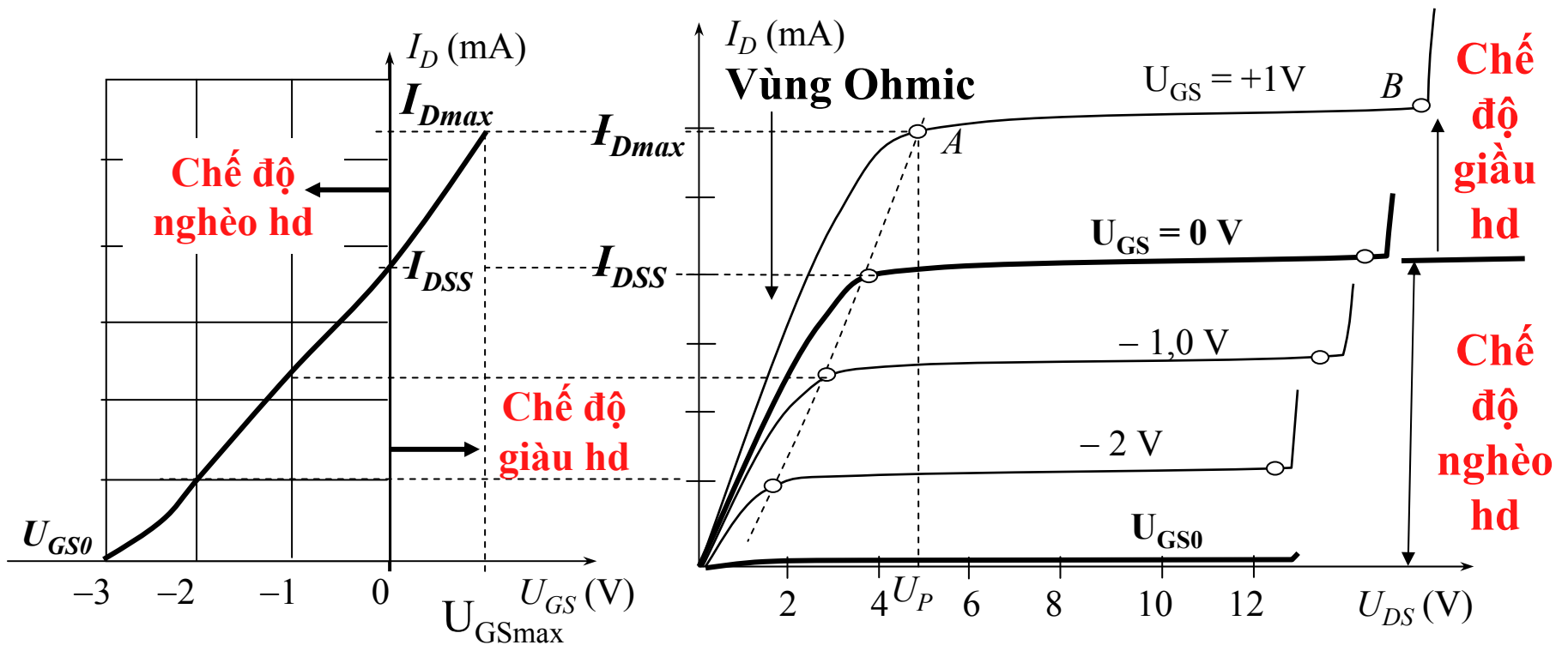
D-MOSFET làm việc theo nguyên lý làm việc tổn hao



D-MOSFET làm việc theo nguyên lý tăng cường

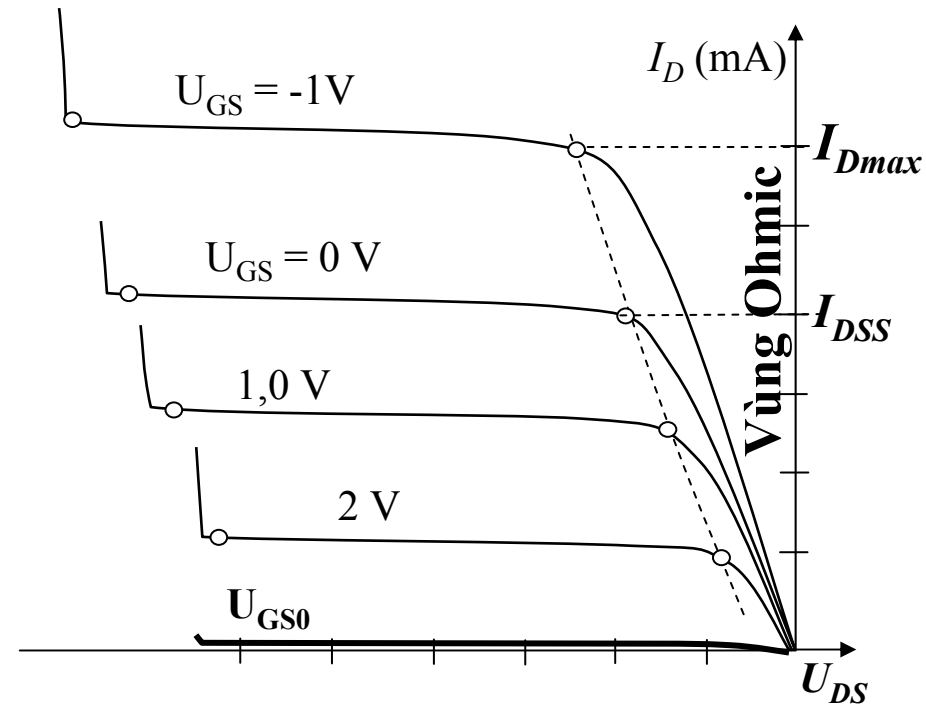
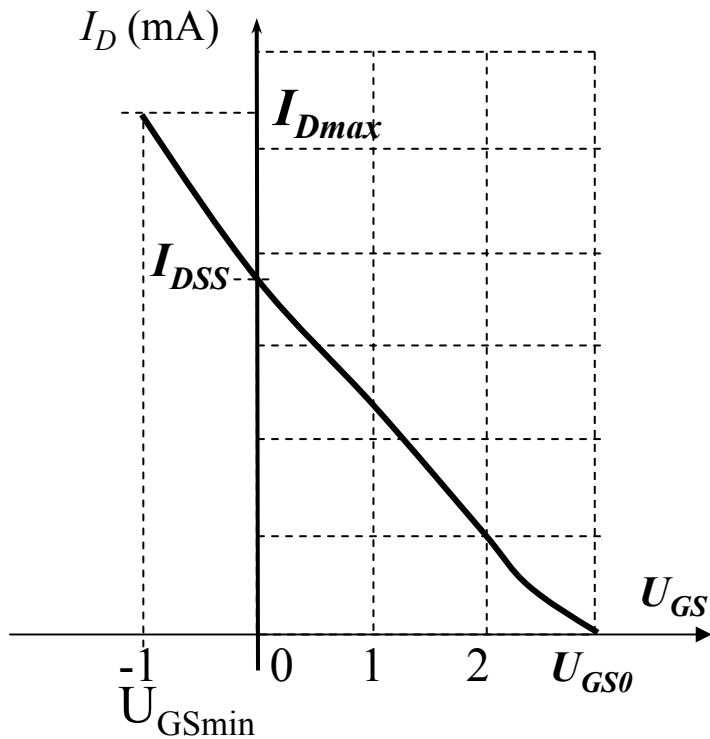


Các họ đặc tuyến của D-MOSFET kênh N



$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 \text{ khi } U_{GS0} \leq U_{GS} \leq U_{GSmax} \rightarrow \text{Vùng bão hòa}$$

Các họ đặc tuyến của D-MOSFET kênh P

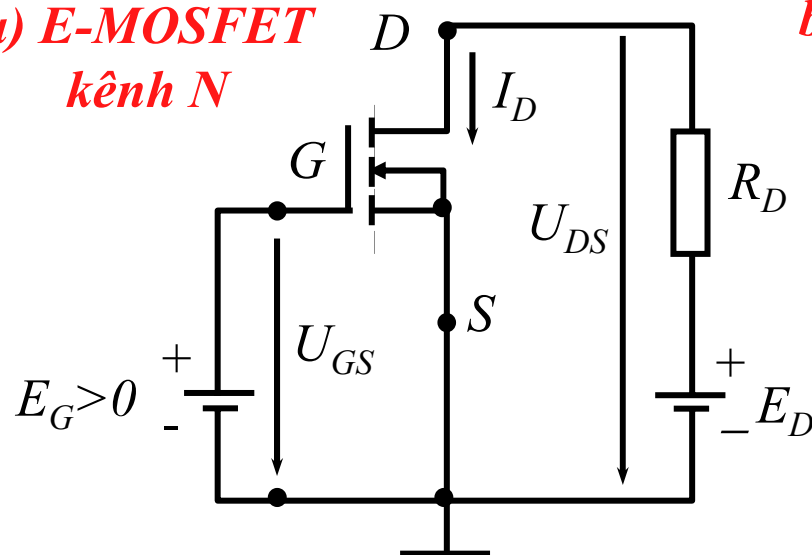


$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 \text{ khi } U_{GSmin} \leq U_{GS} \leq U_{GS0} \rightarrow \text{Vùng bão hòa}$$

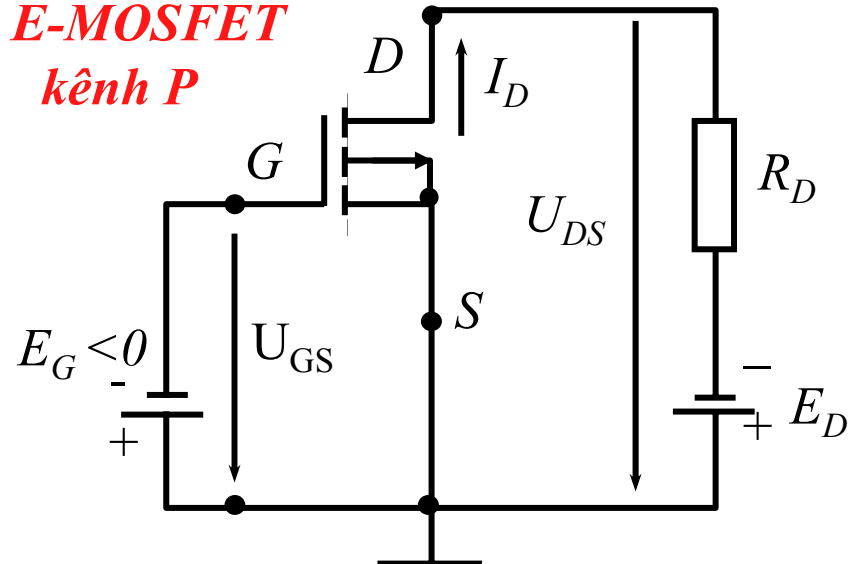
Nguyên lý làm việc của E-MOSFET

- Trong E-MOSFET không có sẵn kênh dẫn giữa S và D mà kênh dẫn này sẽ được tạo ra khi đặt điện áp lên cực cổng thích hợp lớn hơn giá trị điện áp ngưỡng nào đó U_T thì sẽ có sự tạo thành lớp đảo hạt dẫn ngay dưới cực cổng tạo thành kênh dẫn nối giữa S và D (tương tự như cấu trúc MOS trong trạng thái đảo). Vì kênh dẫn chỉ được tạo ra khi có điện áp trên cực G nên loại MOSFET này còn gọi là MOSFET thường đóng.
- Thông thường cực nền B được nối tắt với cực nguồn S. Nguồn phân cực sao cho tạo thành lớp đảo hạt dẫn tại bán dẫn nền, dòng hạt đa số của kênh dẫn đi ra ở cực D.

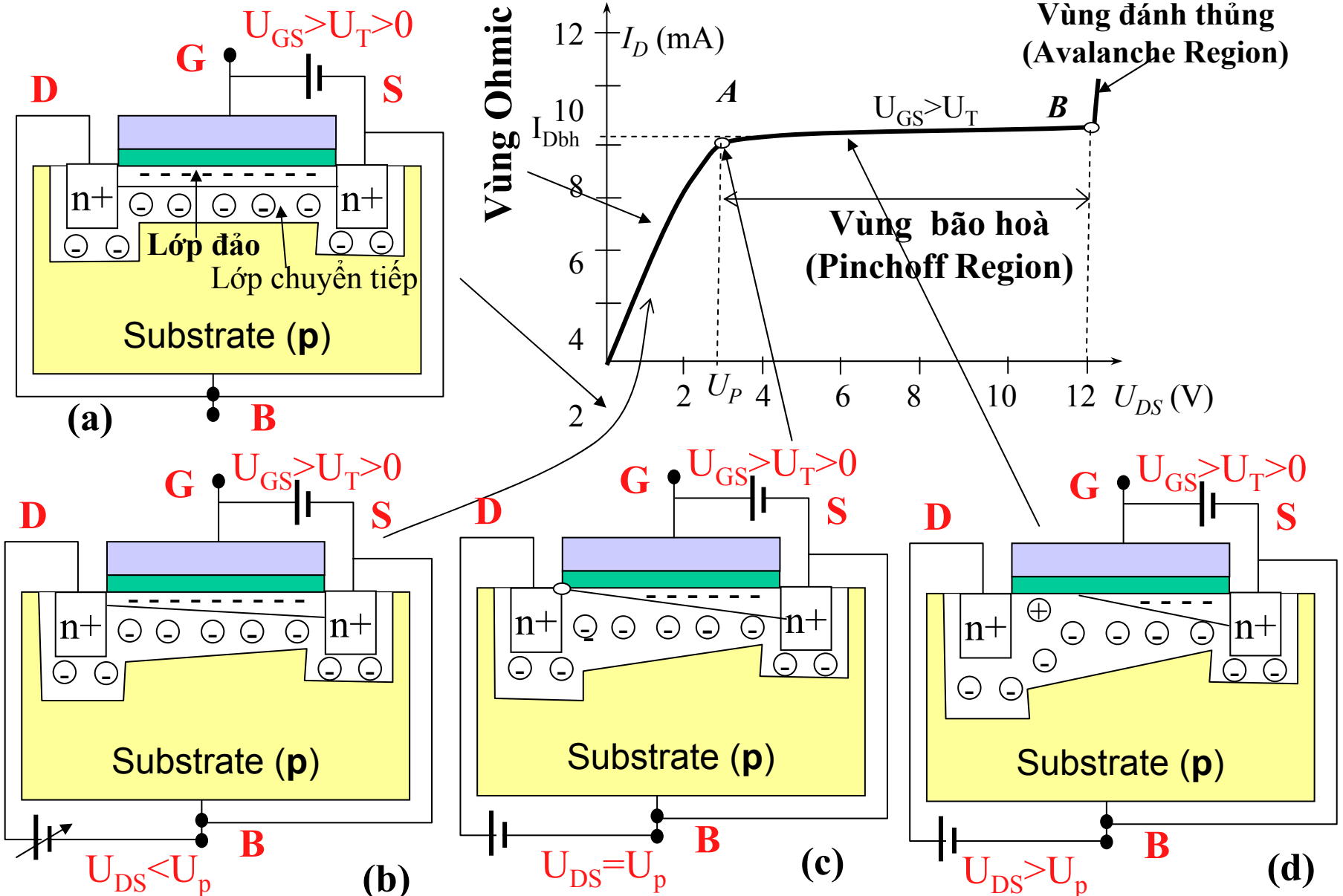
**a) E-MOSFET
kênh N**



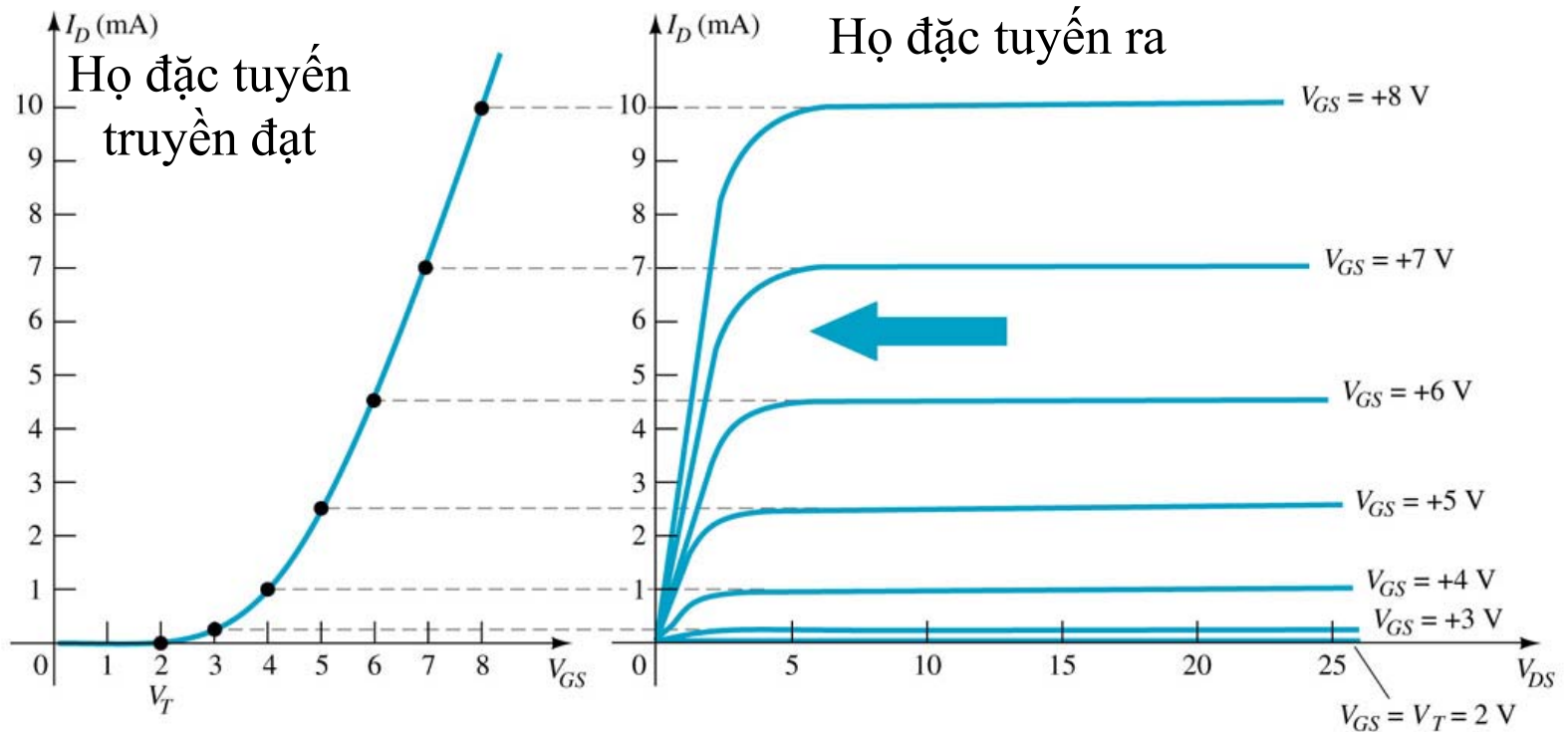
**b) E-MOSFET
kênh P**



Đặc tuyến ra của E-MOSFET kênh N



Các họ đặc tuyến của E-MOSFET kênh N



- Khi $U_{GS} < U_T$ - điện áp ngưỡng, kênh bị khoá hoàn toàn (chưa hình thành kênh cảm ứng): $I_D = I_{D_{bh}} = 0$.
- Khi $U_T < U_{GS} = \text{const}$, nếu $U_{DS} > U_p$ thì $I_D = I_{D_{bh}} = \text{const}$
- Biểu thức tính I_D theo U_{GS} tại vùng bão hoà thường được tính như sau:

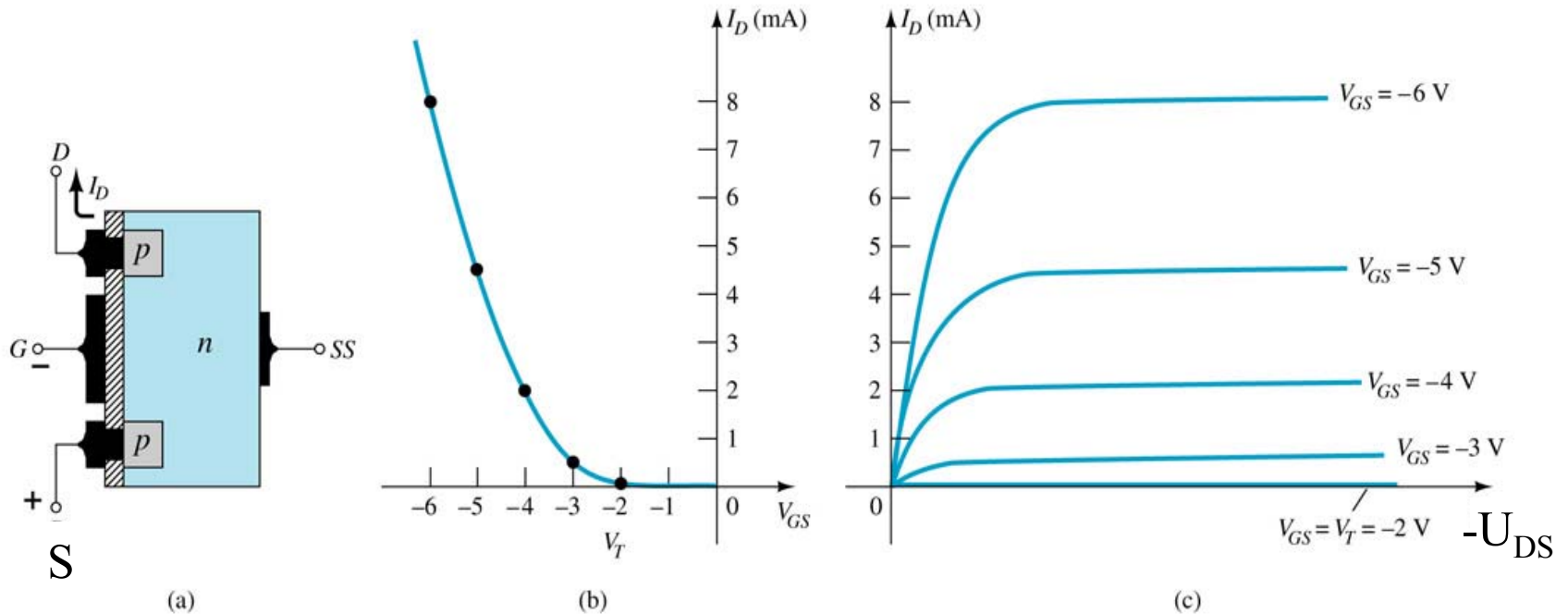
$$I_D = k \cdot (U_{GS} - U_T)^2$$

k: hằng số kênh.

$$k = \frac{W}{2 \cdot L} \mu_n C_{ox}$$

W, L độ rộng và chiều dài của G

Các họ đặc tuyến của E-MOSFET kênh P



- Khi $U_{GS} > U_T$ - điện áp ngưỡng, kênh bị khoá hoàn toàn (chưa hình thành kênh cảm ứng): $I_D = I_{D_{bh}} = 0$.
- Khi $U_{GS} < U_T < 0$, nếu $-U_{DS} > U_p$ thì $I_D = I_{D_{bh}} = \text{const}$
- Biểu thức tính I_D theo U_{GS} tại **vùng bão hoà** thường được tính như sau:

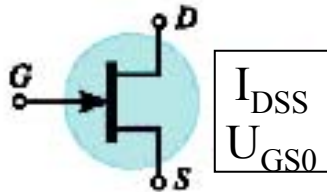
$$I_D = k \cdot (U_{GS} - U_T)^2$$

$$k = \frac{W}{2L} \mu_p C_{ox}$$

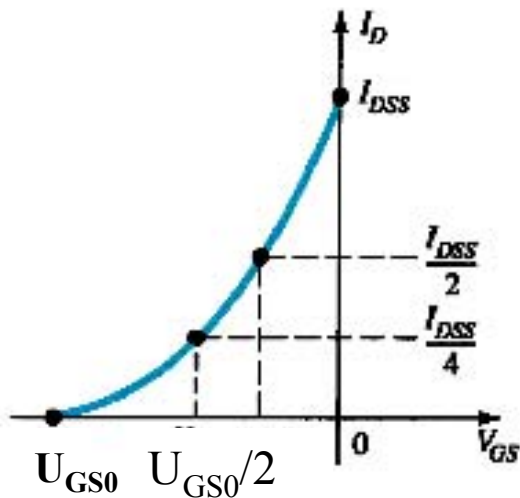
C_{ox} : Điện dung của MOS

Bảng so sánh đặc tuyến truyền đạt của các cấu kiện FET

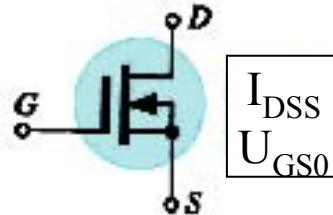
$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$



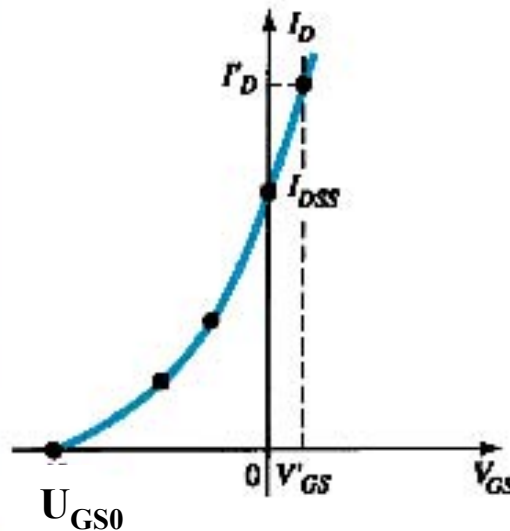
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}}\right)^2$$



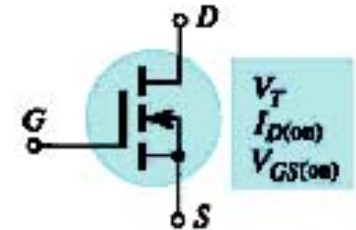
$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$



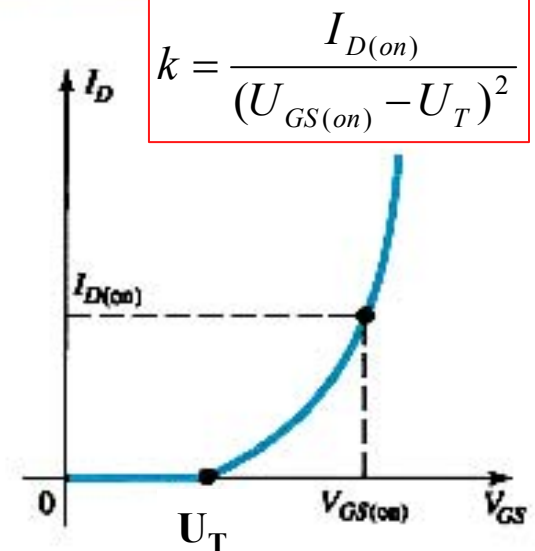
$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}}\right)^2$$



$I_G = 0 \text{ A}, I_D = I_S$



$$I_D = k \cdot (U_{GS} - U_T)^2$$

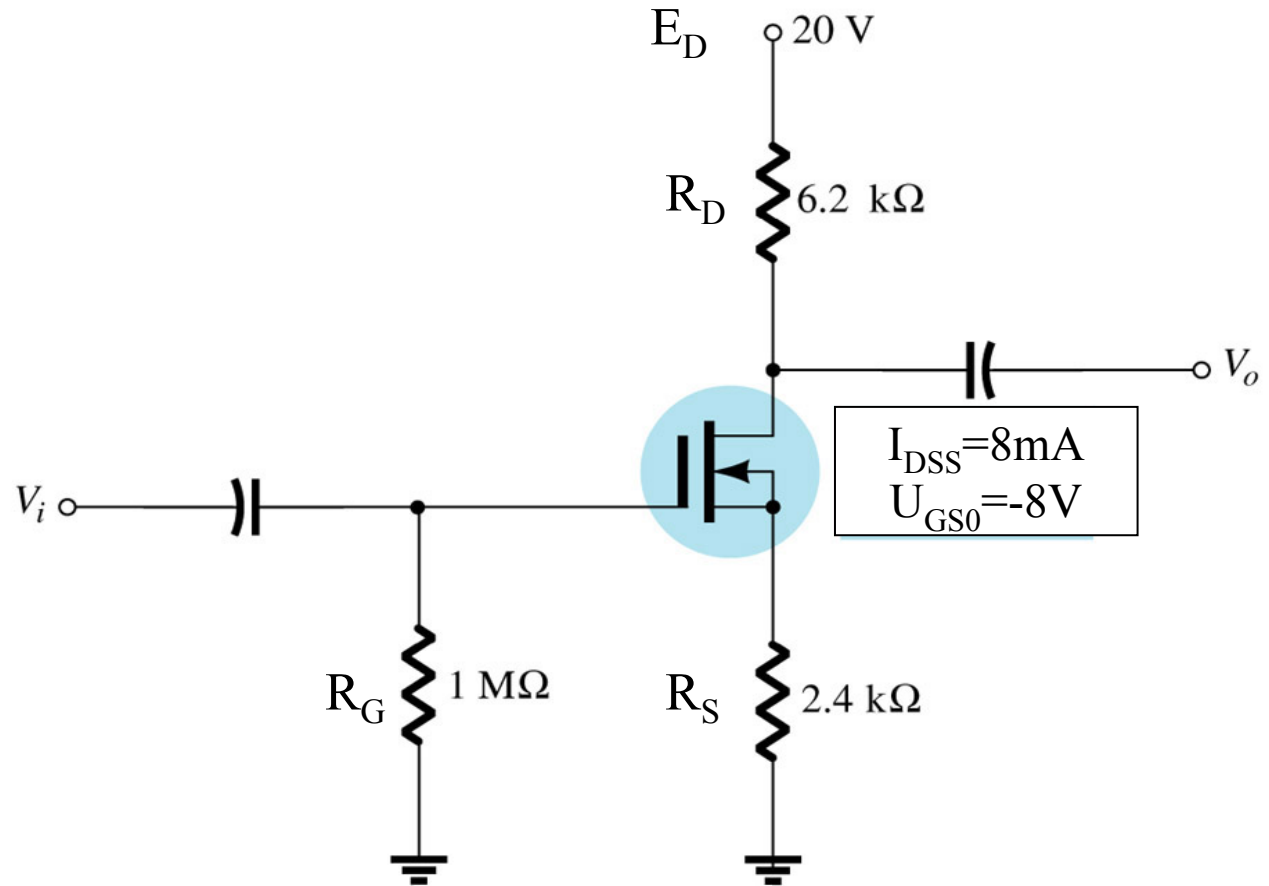


$$k = \frac{I_{D(on)}}{(U_{GS(on)} - U_T)^2}$$

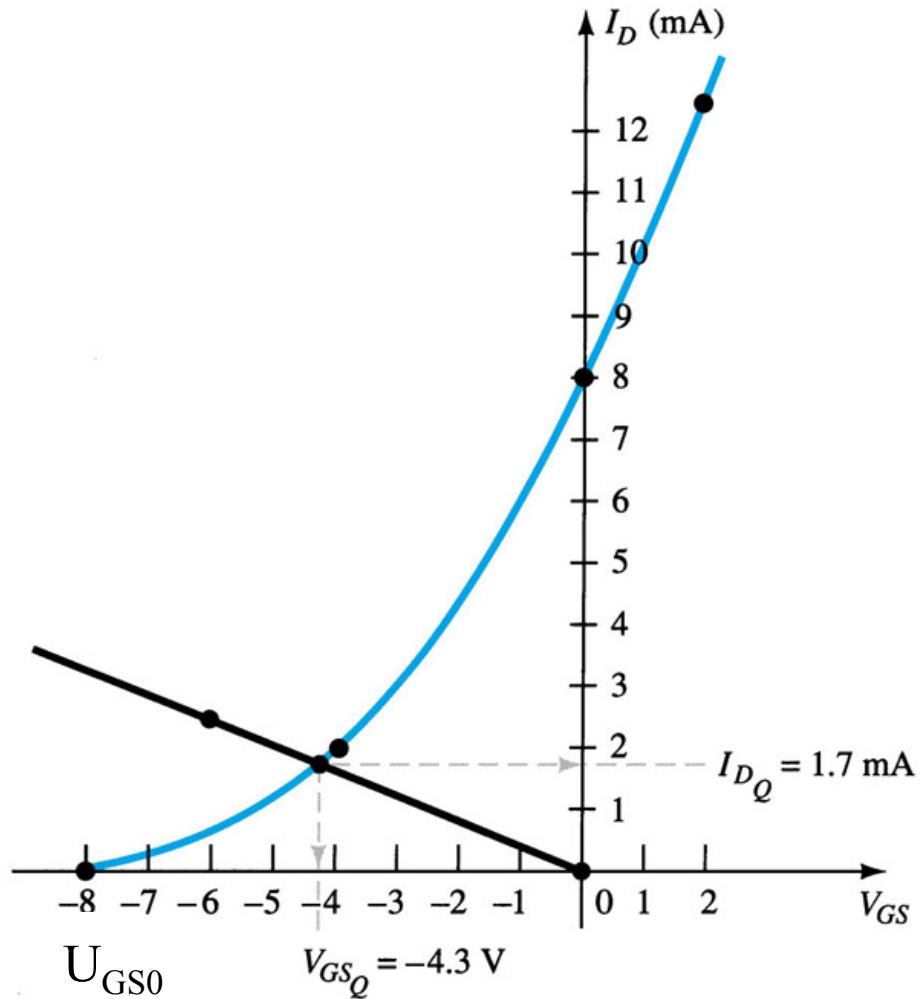
4.4 Định thiên (Phân cực) cho MOSFET

- MOSFET làm việc ở chế độ xung, số thường được phân áp để chúng làm việc ở vùng đặc tuyến khoá hoàn toàn và vùng ohmic hoặc gần bão hoà.
- Khi MOSFET làm việc ở chế độ tích cực (chế độ khuếch đại tín hiệu) thì chúng được định thiên để làm việc ở vùng đặc tuyến bão hoà.
- Trong phần này chủ yếu tính toán mạch định thiên để MOSFET làm việc ở chế độ tích cực.
- Khi tính toán mạch định thiên sử dụng các giả thiết sau: $I_G=0$, Khi $U_{GS}=\text{const}$, dòng $I_D=I_{DSbh}=\text{const}$ mặc dù U_{DS} thay đổi.
- **Các cách định thiên cho D-MOSFET:**
 - + A1/ Tự định thiên
 - + A2/ Định thiên bằng mạch phân áp
 - + A3/ Định thiên cực cổng
- **Các cách định thiên cho E-MOSFET**
 - + B1/ Định thiên bằng mạch hồi tiếp
 - + B2/ Định thiên bằng mạch phân áp

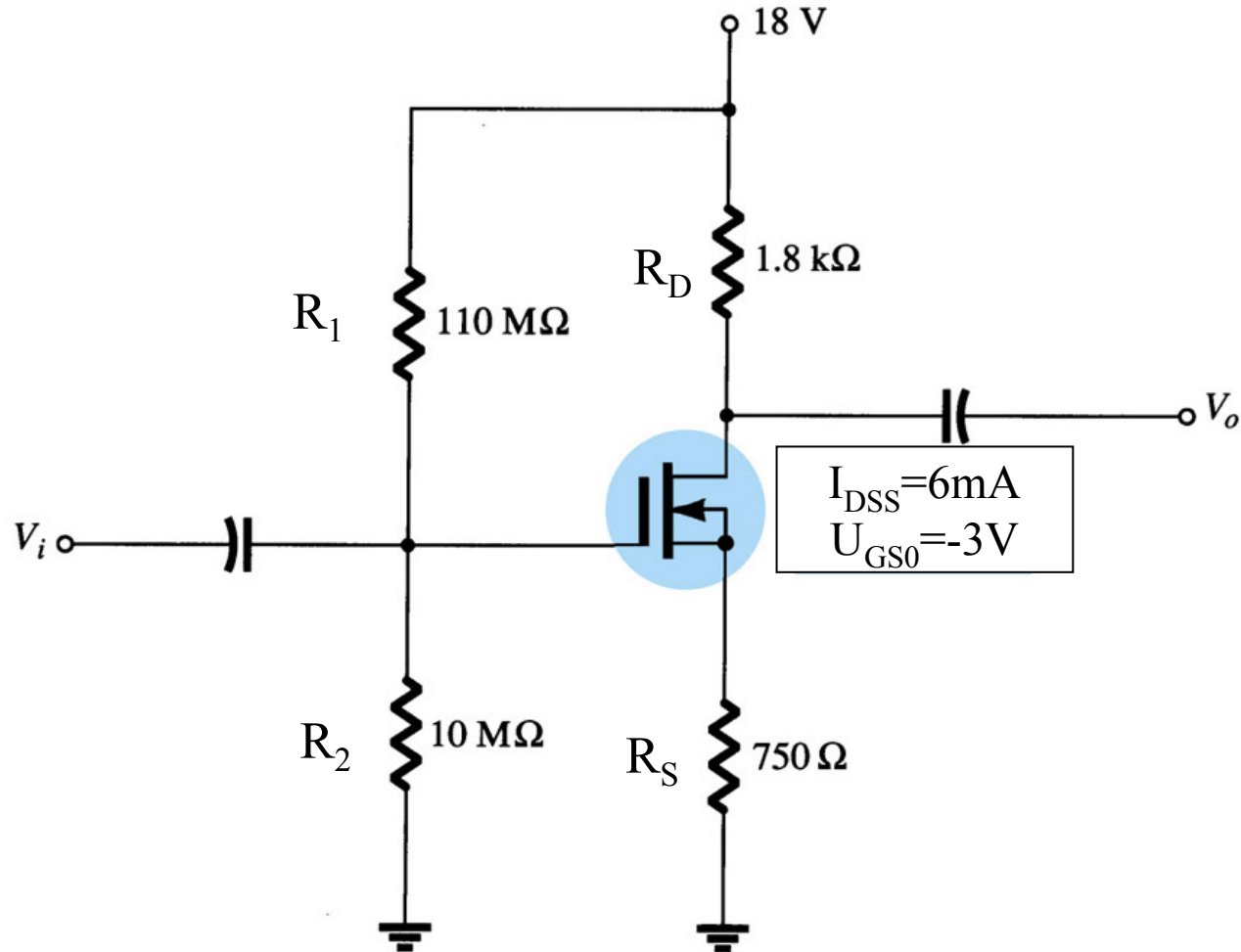
A1. Mạch tự định thiên D-MOSFET



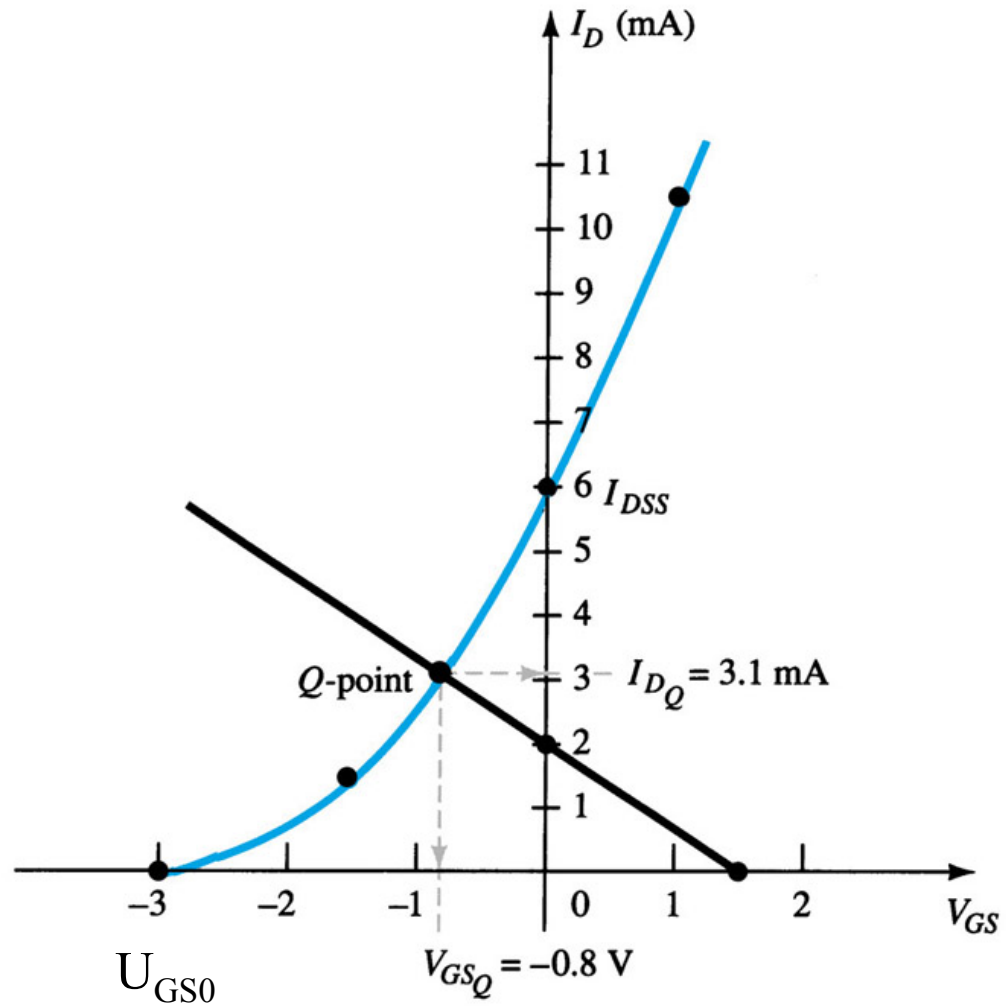
Xác định điểm làm việc Q



A2. Định thiên bằng mạch phân áp cho D-MOSFET

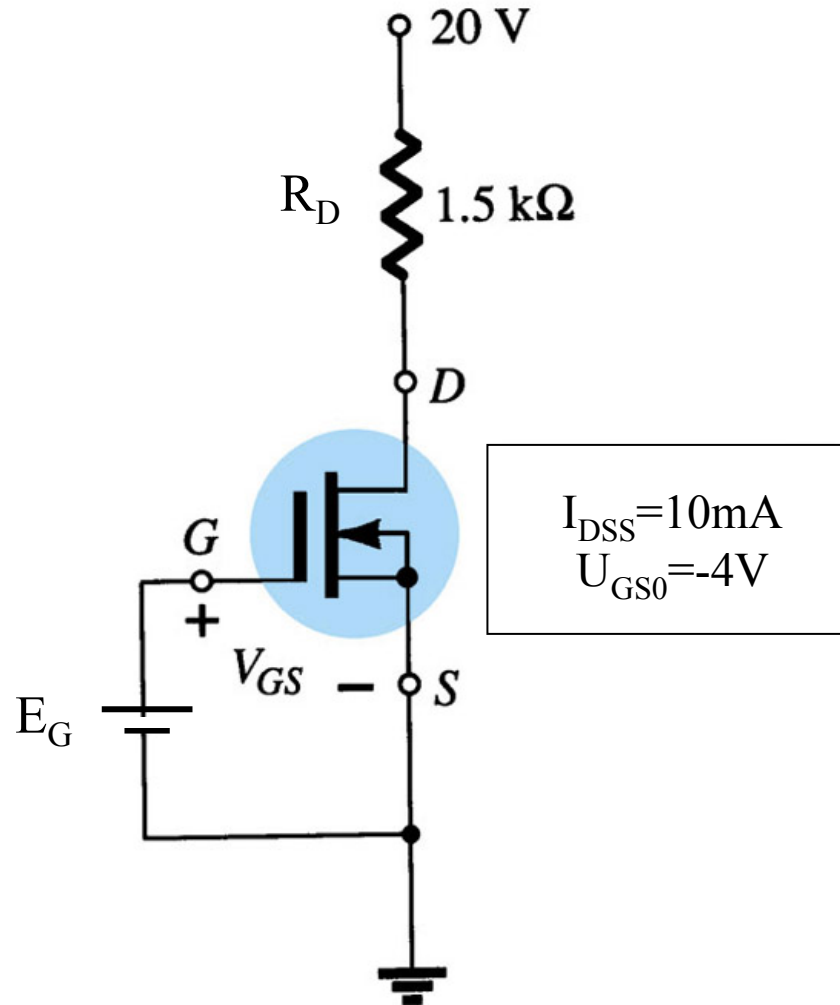


Điểm làm việc Q

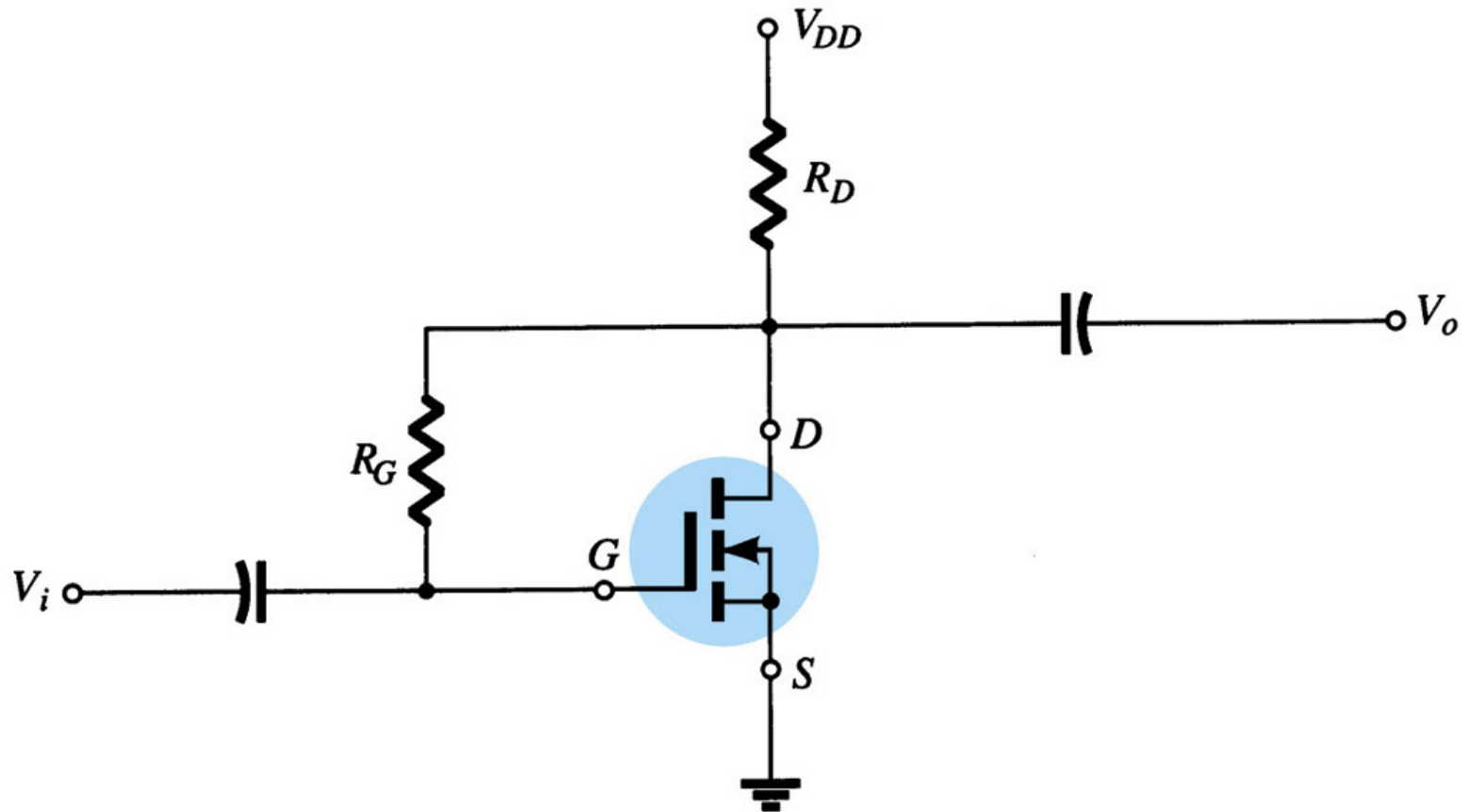


A3. Định thiên cực G cố định

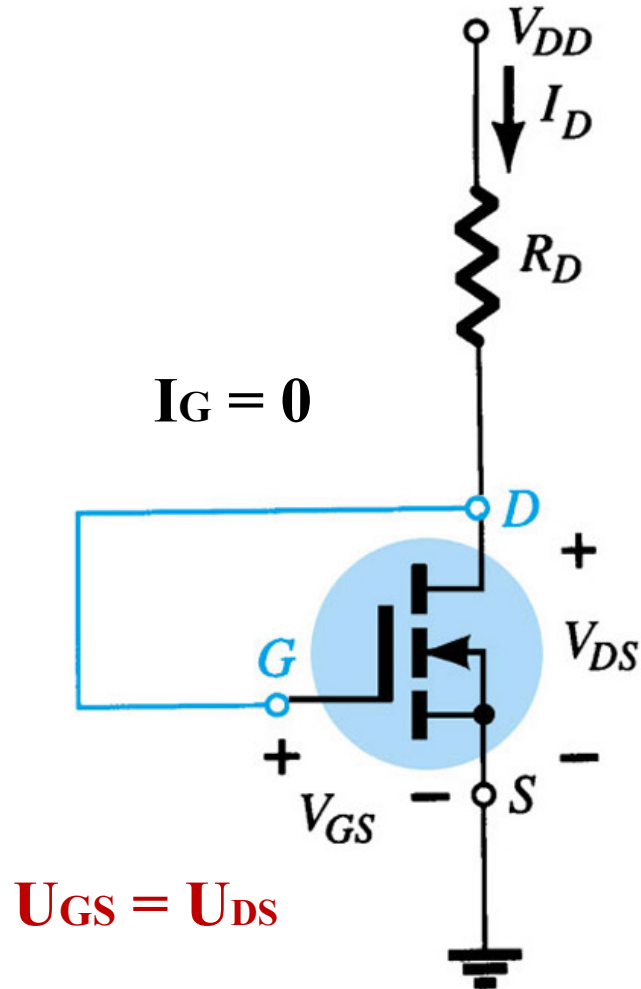
$$E_G = 2V$$



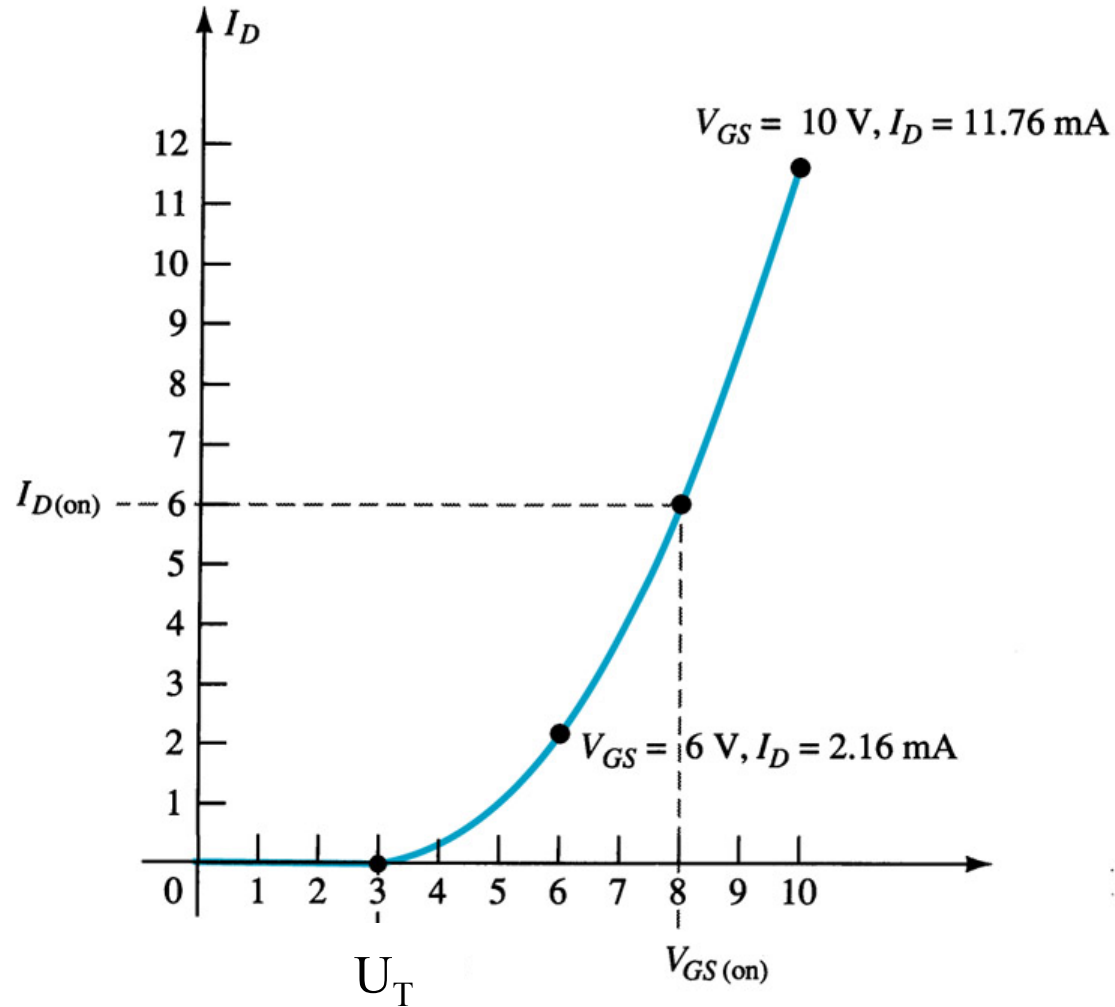
B1. Định thiên cho E-MOSFET bằng mạch hồi tiếp



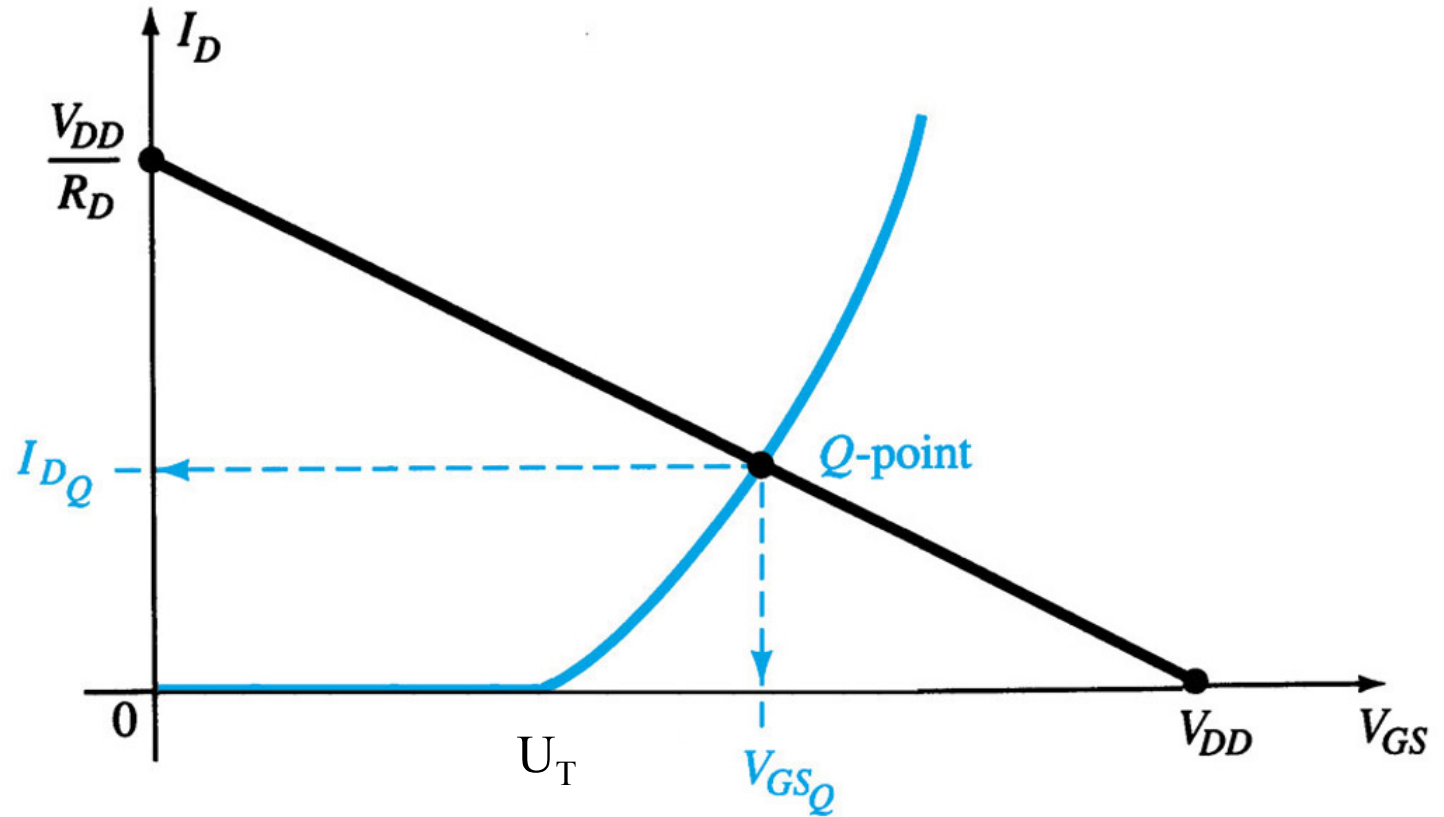
Sơ đồ 1 chiều tương đương



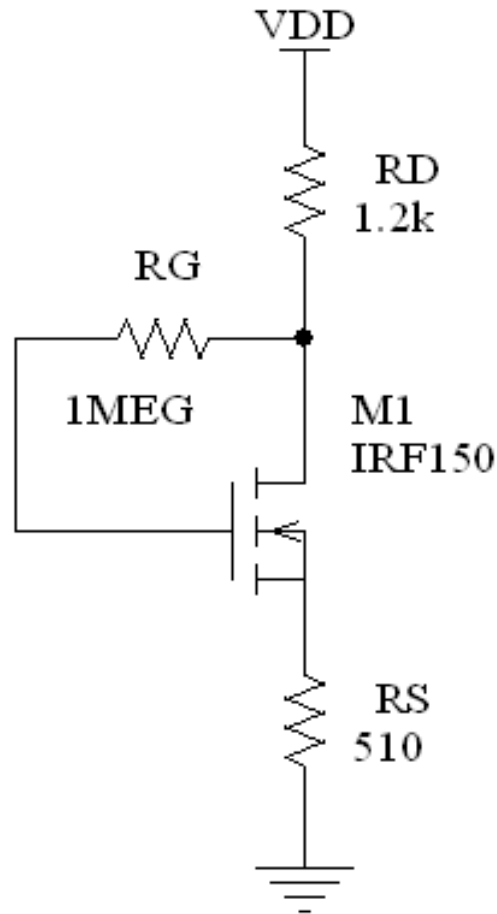
Đặc tuyến truyền đạt



Xác định điểm làm việc Q



Ví dụ



$$U_T = U_{GSTH} = 4V$$

$$U_{GSon} = 7.5V$$

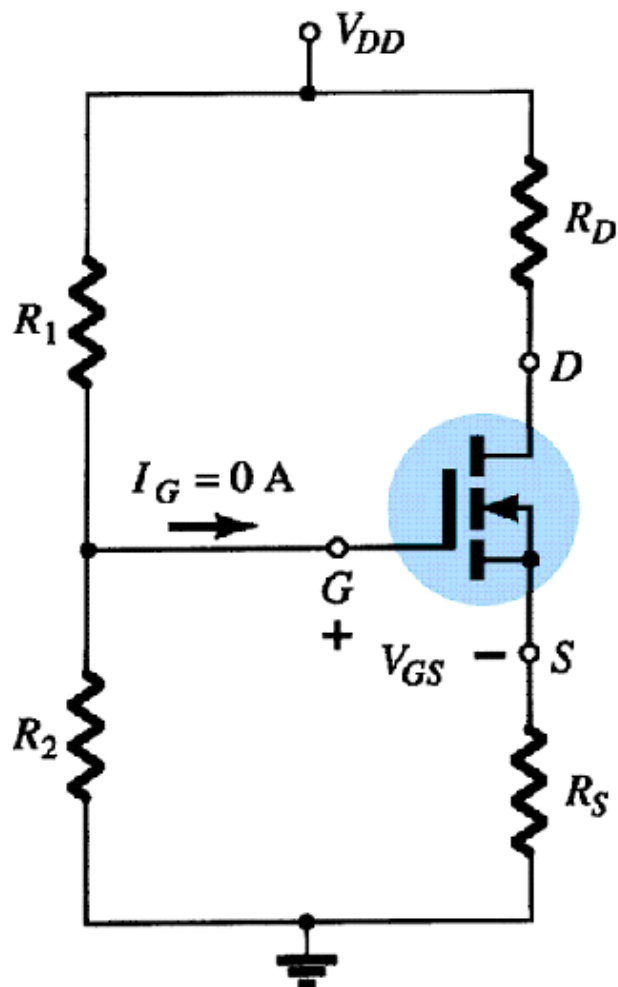
$$I_{Don} = 5mA$$

$$U_{DD} = 22V$$

$$k = \frac{I_{Don}}{(V_{GSon} - V_{GSTH})^2}$$

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GSTH})^2$$

B2. Định thiên cho E-MOSFET kênh N dùng mạch phân áp (1)

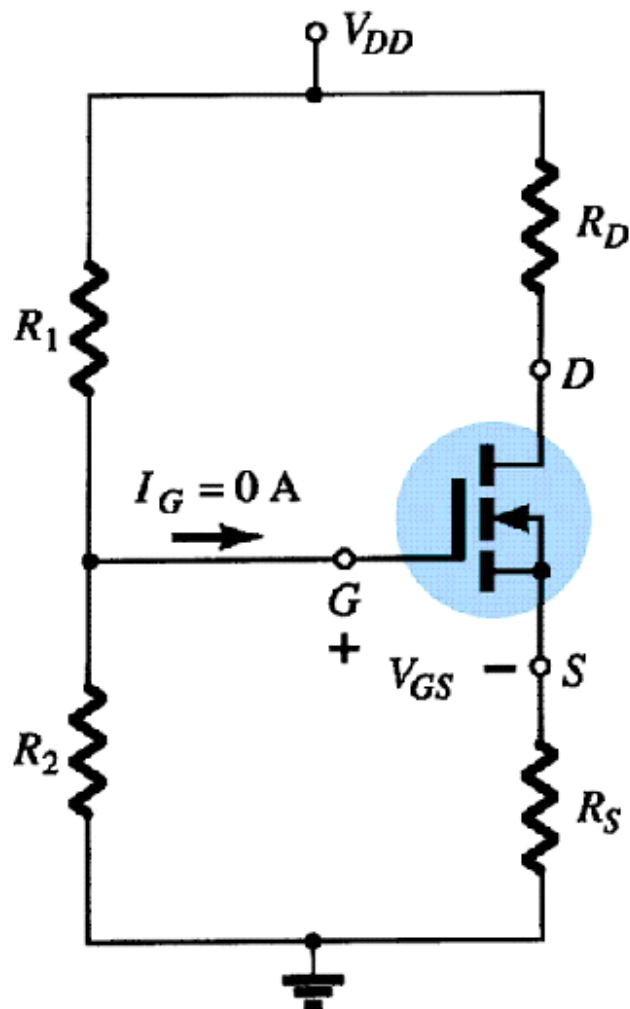


$$V_G = V_{DD} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$k = \frac{I_{D_{on}}}{(V_{GS_{on}} - V_{GS_{TH}})^2}$$

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS_{TH}})^2$$

B2. Định thiên cho E-MOSFET kênh N dùng mạch phân áp (2)



$$V_G = V_{DD} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

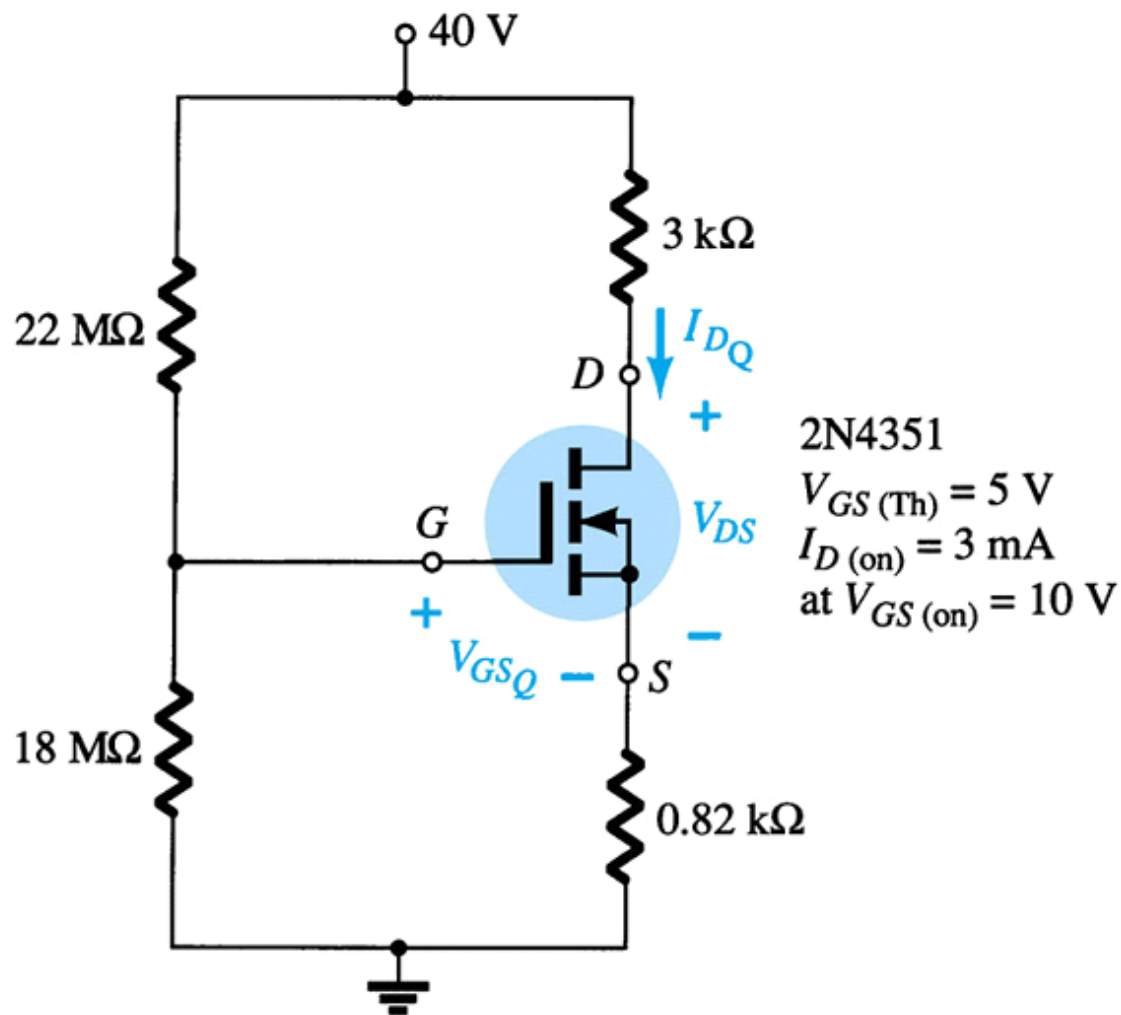
KVL Input

$$-V_G + V_{GS} + I_D R_S = 0$$

$$k = \frac{I_{D_{on}}}{(V_{GS_{on}} - V_{GS_{TH}})^2}$$

$$I_D = k(V_{GS} - V_{GS_{TH}})^2$$

B2. Định thiên cho E-MOSFET kênh N dùng mạch phân áp (3)



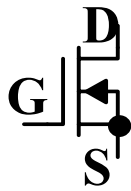
4.5 Mô hình tương đương của MOSFET

a/ Mô hình tương đương một chiều và tín hiệu lớn

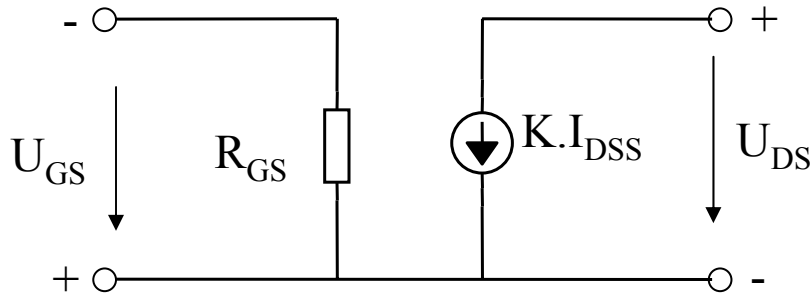
b/ Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ

Xét trường hợp cực S và B nối tắt

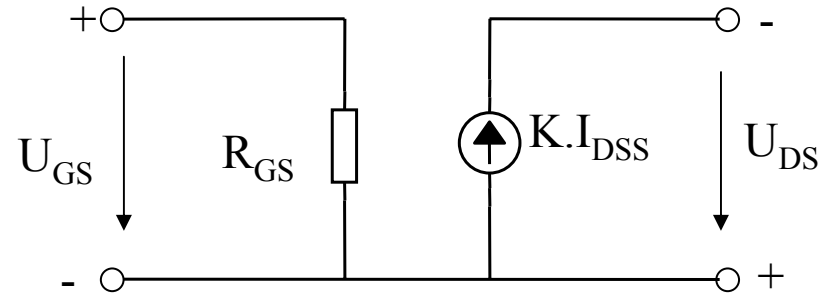
a/ Mô hình tương đương 1 chiều và tín hiệu lớn của D-MOSFET



+ Mô hình tương đương D-MOSFET làm việc ở vùng bão hoà

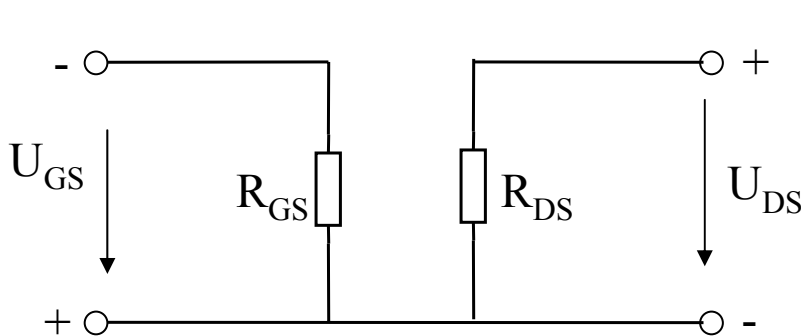


$$K = \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}}\right)^2$$

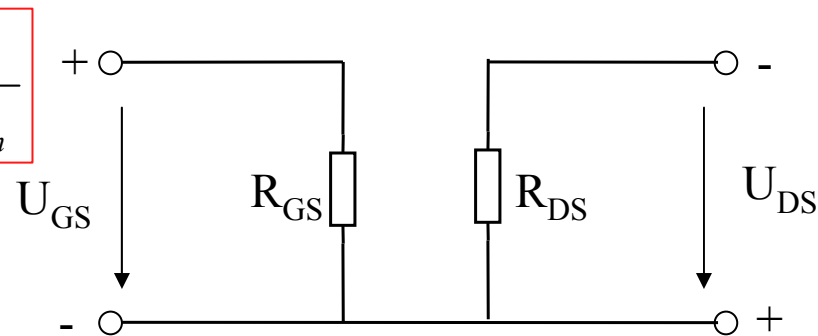


$$K = \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}}\right)^2$$

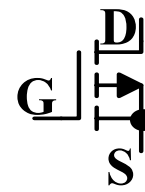
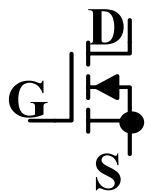
+ Mô hình tương đương D-MOSFET làm việc ở vùng ohmic



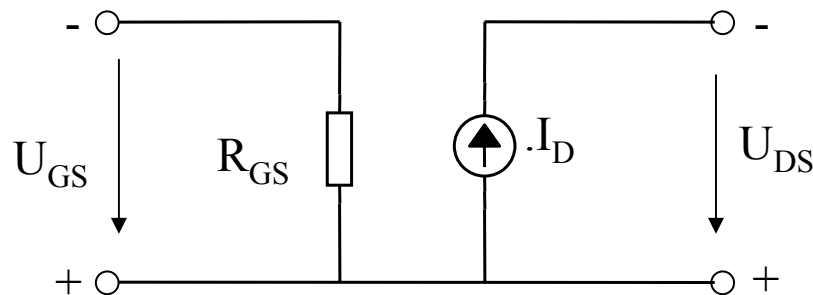
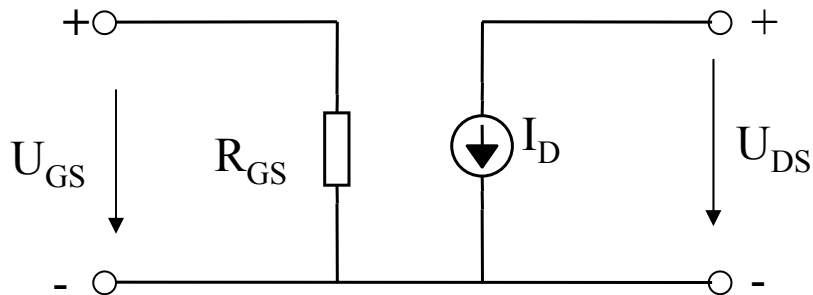
$$R_{DS} = \frac{V_p}{I_{Dbh}}$$



a/ Mô hình tương đương 1 chiều và tín hiệu lớn của E-MOSFET

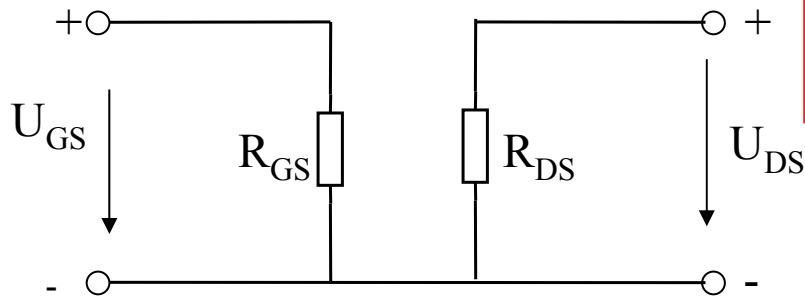


+ Mô hình tương đương E-MOSFET làm việc ở vùng bão hoà

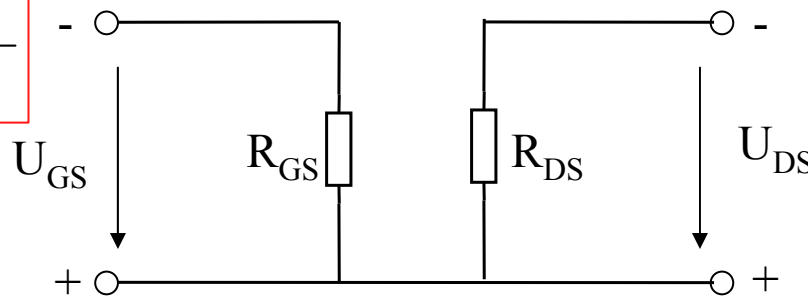


$$I_D = k \cdot (U_{GS} - U_T)^2$$

+ Mô hình tương đương E-MOSFET làm việc ở vùng ohmic



$$R_{DS} = \frac{V_p}{I_{Dbh}}$$



b/ Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ tần thấp

- Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ của MOSFET xác định mối quan hệ giữa tín hiệu xoay chiều biên độ nhỏ trong JFET: i_d , u_{gs} .
- Các phương trình đặc tính tương ứng để xác định các mô hình tương đương của MOSFET:
- Tổng quát :

$$i_D = f(u_{GS}, u_{DS}) = I_D + i_d = f(U_{GS} + u_{gs}, U_{DS} + u_{ds})$$

- Giả sử điểm làm việc $Q(U_{GS}, U_{DS}, I_D)$

$$\Rightarrow i_d = \left. \frac{\partial f}{\partial u_{GS}} \right|_Q u_{gs} + \left. \frac{\partial f}{\partial u_{DS}} \right|_Q u_{ds} = g_m u_{gs} + g_d u_{ds}$$

g_m - Độ hỗ dẫn vào, g_d - Độ hỗ dẫn ra

Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ tần thấp của D-MOSFET (1)

+ Ta có
$$i_D = f(u_{GS}) = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2$$

+ Độ hỗ dẫn vào:

$$g_m = \left. \frac{\partial f}{\partial u_{GS}} \right|_Q = \frac{-2I_{DSS}}{U_{GS0}} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right) = \frac{2\sqrt{I_{DS} \cdot I_{DSS}}}{-U_{GS0}}$$

$$g_{m0} = \frac{-2I_{DSS}}{U_{GS0}} \longrightarrow g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)$$

+ Thực tế thì $I_{D_{bh}}$ cũng sẽ thay đổi theo U_{DS} mặc dù sự thay đổi này là không đáng kể. Phương trình tính dòng I_D được hiệu chỉnh có tính đến ảnh hưởng của điện áp U_{DS} như sau:

$$i_D = f(u_{GS}, u_{DS}) = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 \left(1 + \frac{u_{DS}}{V_{An}} \right) \quad \begin{array}{l} V_{An} - \text{Điện áp Early} \\ (30 \div 300V) \end{array}$$

Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ tần thấp của D-MOSFET (2)

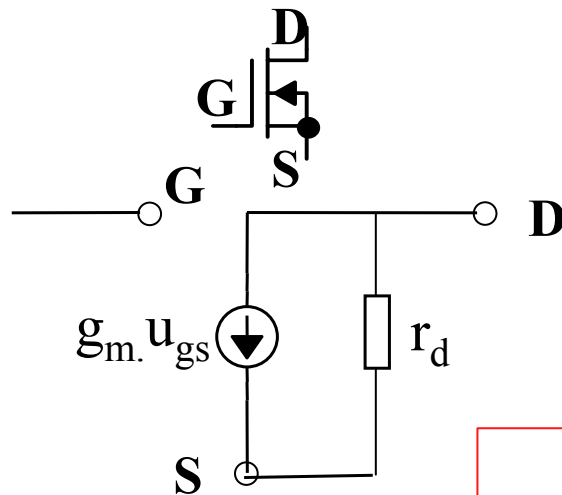
+ Độ dẫn ra :

$$g_d = \left. \frac{\partial i_{DS}}{\partial u_{DS}} \right|_Q = I_{DSS} \left(1 - \frac{u_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 \bigg|_Q \frac{1}{V_{An}} = \frac{I_D}{V_{An}}$$

+ Điện trở vi phân đầu ra:

$$r_i = r_d = \left. \frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D} \right|_Q = \frac{1}{g_d} = \frac{V_{An}}{I_D}$$

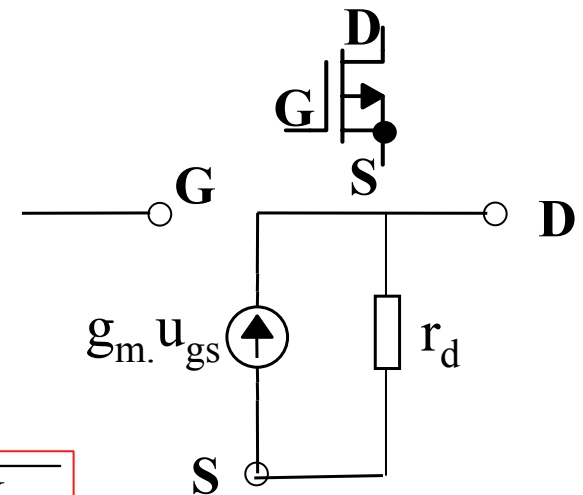
+ Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ tần thấp của D-MOSFET



$$g_{m0} = \frac{-2I_{DSS}}{U_{GS0}}$$

$$g_m = g_{m0} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)$$

$$g_m = \frac{-2I_{DSS}}{U_{GS0}} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right) = \frac{2\sqrt{I_{DS} \cdot I_{DSS}}}{-U_{GS0}}$$



Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ tần thấp của E-MOSFET (1)

+ Mà ta có $i_D = f(u_{GS}) = k(u_{GS} - U_T)^2$

+ Độ hỗ dẫn vào:

$$g_m = \left. \frac{\partial f}{\partial u_{GS}} \right|_Q = 2.k.(U_{GS} - U_T) = \frac{2.I_D}{(U_{GS} - U_T)}$$

+ Thực tế thì $I_{D_{bh}}$ cũng sẽ thay đổi theo U_{DS} mặc dù sự thay đổi này là không đáng kể. Phương trình tính dòng I_D được hiệu chỉnh có tính đến ảnh hưởng của điện áp U_{DS} như sau:

$$i_D = f(u_{GS}) = k(u_{GS} - U_T)^2 (1 + \lambda.u_{DS})$$

+ Độ hỗ dẫn ra :

$$g_d = \left. \frac{\partial i_{DS}}{\partial u_{DS}} \right|_Q = k(U_{GS} - U_T)^2 . \lambda = I_D . \lambda$$

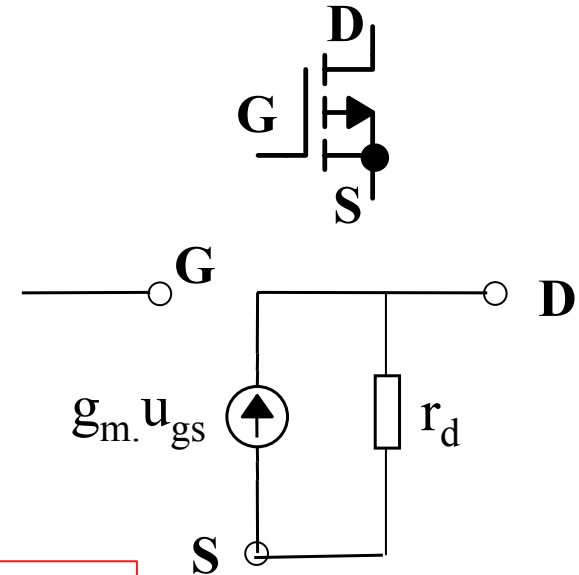
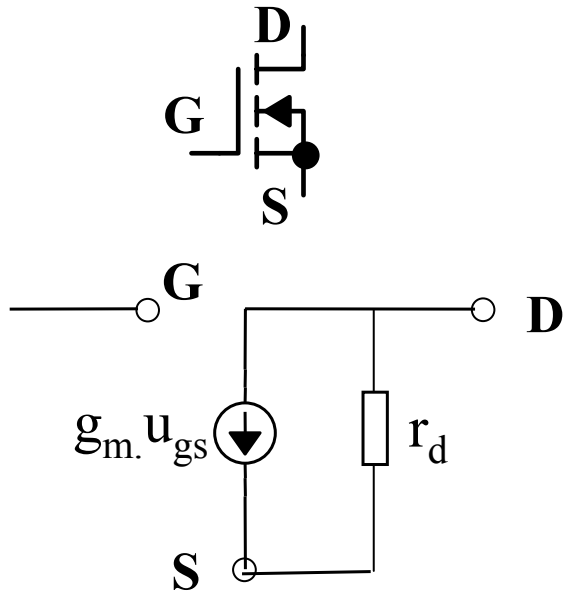
+ Điện trở vi phân đầu ra:

$$r_i = r_d = \left. \frac{\partial u_{DS}}{\partial i_D} \right|_Q = \frac{1}{g_d} = \frac{1}{\lambda.I_D}$$

λ : Hệ số điều chế chiều dài kênh

Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ tần thấp của E-MOSFET (2)

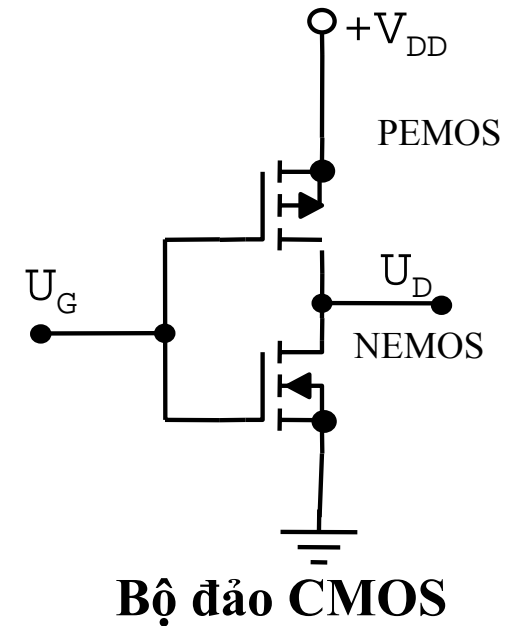
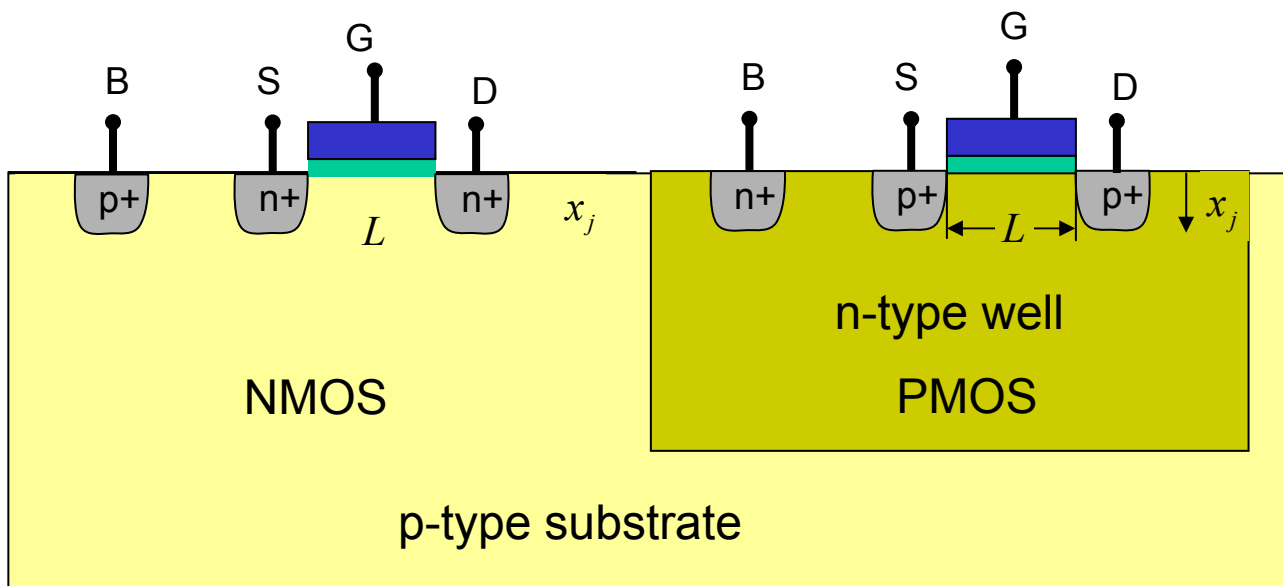
+ Mô hình tương đương tín hiệu nhỏ tần thấp của E-MOSFET



$$g_m = \left. \frac{\partial f}{\partial u_{GS}} \right|_Q = \frac{2 \cdot I_D}{(U_{GS} - U_T)}$$

$$r_d = \frac{1}{g_d} = \frac{1}{\lambda \cdot I_D}$$

4.6 Cấu trúc CMOS



- Công nghệ CMOS- Complementary MOS: Hai MOSFET bù nhau NMOS (MOSFET kênh N) và PMOS (MOSFET kênh P) được chế tạo đồng thời trên một đế bán dẫn duy nhất
- Giữa PMOS và NMOS được cách ly với nhau bởi chuyển tiếp PN phân cực ngược
- Công nghệ CMOS hiện là công nghệ phổ biến trong các vi mạch số

CHƯƠNG 7. Thyristor

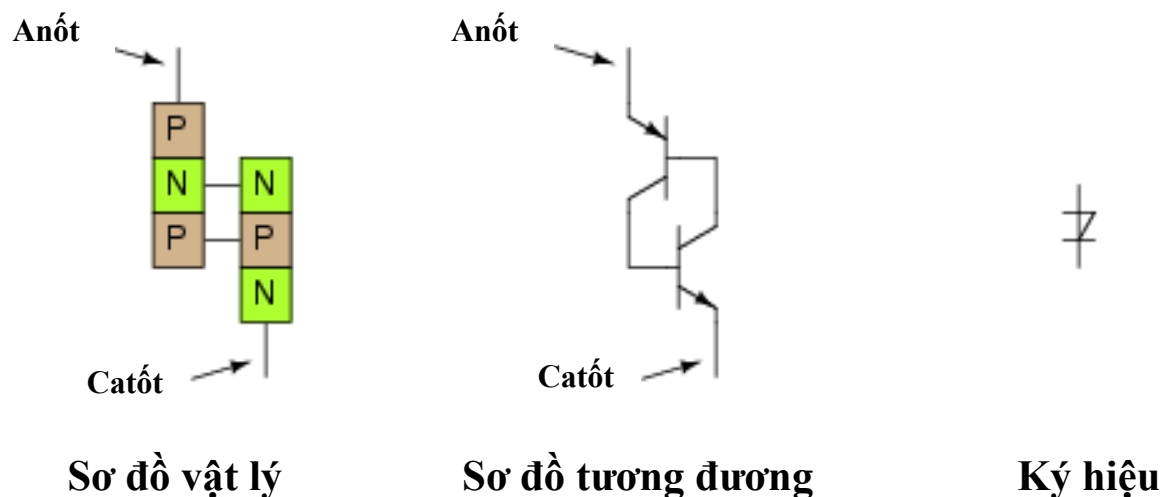
1. Hiện tượng trễ
2. Điốt Shockley
3. DIAC
4. Cấu kiện chỉnh lưu có điều khiển Silic - SCR (Silicon-Controlled Rectifier)
5. TRIAC
6. Transistor đơn nối – UJT (Unijunction Transistor)

Hiện tượng trễ

- Thyristor thuộc lớp cấu kiện bán dẫn có trễ. Do đặc tính trễ mà một hệ thống sẽ không trở về trạng thái ban đầu sau khi nguyên nhân gây ra sự thay đổi trạng thái không còn nữa
- Thyristor là cấu kiện bán dẫn có xu hướng ở trạng thái “mở” mỗi khi được bật, và có xu hướng ở trạng thái “tắt” mỗi khi được tắt. Một sự kiện nhất thời có thể lật thyristor sang trạng thái “mở” hoặc trạng thái “tắt” và nó sẽ tự duy trì ở trạng thái đó thậm chí sau khi nguyên nhân gây ra sự thay đổi trạng thái không còn nữa
- Do đó Thyristor được sử dụng như một cấu kiện chuyển mạch bật/tắt và nó không thể được sử dụng như là một bộ khuếch đại tín hiệu tương tự

Điốt Shockley (1)

- Khởi đầu cho việc chế tạo ra thyristor bắt nguồn từ một cấu kiện có tên là điốt 4 lớp, còn gọi là PNPN điốt, hay điốt Shockley
- Một điốt Shockley bao gồm 2 transistor lưỡng cực, một transistor PNP và một transistor NPN mắc với nhau như hình vẽ 7.1

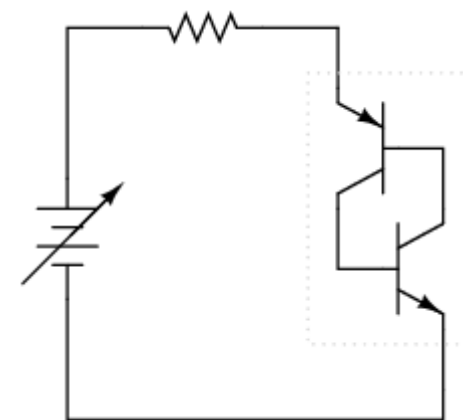


Hình 7.1 - Điốt Shockley: Sơ đồ vật lý, Sơ đồ tương đương, Ký hiệu

Điốt Shockley (2)

Nguyên lý hoạt động:

- Cấp nguồn cho mạch tương đương của điốt Shockley như h/vẽ
- Khi không có điện áp của nguồn cung cấp → không có dòng điện
- Khi U bắt đầu tăng lên thì vẫn sẽ không có dòng điện bởi vì không có transistor nào ở chế độ dẫn (mở): cả hai transistor sẽ đều ở chế độ ngắt
- Dòng cực gốc chảy qua transistor ở phía dưới được điều khiển bởi transistor ở phía trên, và dòng cực gốc chảy qua transistor ở phía trên được điều khiển bởi transistor ở phía dưới. Nói cách khác chẳng transistor nào có thể dẫn điện cho đến khi transistor kia dẫn (hình 7.2)



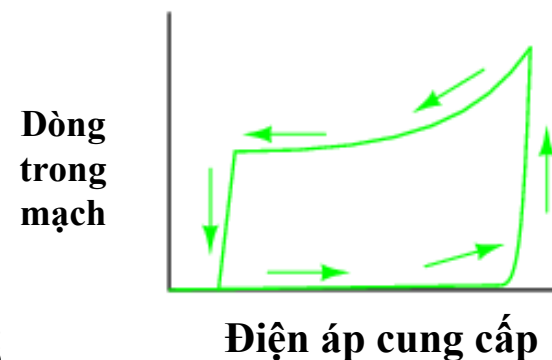
Hình 7.2

Điốt Shockley (3)

- ❖ **Vậy làm thế nào mà một điốt Shockley có thể dẫn điện ?**
 - Nếu hai transistor thật được nối theo kiểu để tạo ra một điốt Shockley thì mỗi transistor sẽ dẫn **khí có một điện áp đủ lớn giữa anốt và catốt** để khiến một trong số chúng thoát ra khỏi trạng thái ngắt
 - Mỗi khi một transistor thoát ra khỏi trạng thái ngắt và bắt đầu dẫn, nó sẽ cho phép dòng cực gốc chảy qua transistor còn lại làm cho transistor này dẫn điện theo cách thông thường, và sau đó cho phép dòng cực gốc chạy qua transistor đầu tiên. Cuối cùng thì cả hai transistor sẽ đều bão hoà và sẽ giữ cho nhau ở trạng thái dẫn (on) thay vì ở trạng thái ngắt (off).
- ❖ **Nhưng làm cách nào để hai transistor lại trở lại trạng thái ngắt?**
 - Giảm U cung cấp tới một giá trị rất nhỏ sao cho chỉ có dòng điện rất nhỏ chảy qua các cực của transistor → một trong hai transistor sẽ ngắt, dẫn đến việc làm ngưng dòng cực gốc chảy qua transistor kia, khiến cho cả hai transistor đều rơi vào trạng thái ngắt

Điốt Shockley (4)

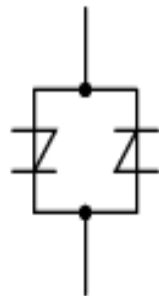
- **Đặc tuyến Vôm/Ampe** là đường trễ kinh điển, khi tín hiệu điện áp đầu vào tăng lên và giảm xuống, dòng điện đầu ra không đi theo cùng một con đường đi xuống giống như khi nó đi lên
- Điốt Shockley có xu hướng duy trì ở trạng thái dẫn (on) một khi nó đã dẫn điện, và ở trạng thái tắt một khi nó đã ngắt điện. Không có chế độ “ở giữa” hay “tích cực” trong hoạt động của nó: nó chỉ thuần túy là cấu kiện bật (on) hoặc tắt (off), giống như tất cả các Thyristor.



Hình 7.3 – Đường cong trễ

DIAC (1)

- **DIAC**: hai điốt Shockley có thể được mắc song song với nhau theo 2 hướng ngược nhau. Diac có thể có hoạt động song hướng (AC)



Mạch tương đương của DIAC



Ký hiệu của DIAC

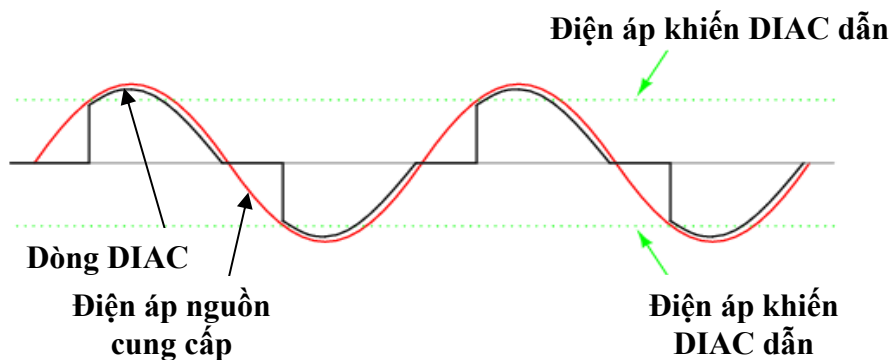
Hình 7.4 – DIAC

DIAC (2)

❖ Nguyên lý hoạt động:

- Khi cấp một điện áp một chiều vào hai đầu của DIAC thì nó hoạt động giống hệt như một điốt Shockley.
- Tuy nhiên, khi cấp một điện áp xoay chiều (AC) vào hai đầu của DIAC thì nó hoạt động hoàn toàn khác. Do dòng điện liên tục đảo chiều, các DIAC sẽ không duy trì ở trạng thái “chốt” lâu hơn một nửa chu kỳ. Nếu một DIAC bắt đầu “chốt”, nó sẽ chỉ tiếp tục dẫn dòng chừng nào điện áp đủ lớn để đưa đủ dòng điện theo hướng đó. Khi điện áp AC đảo chiều, DIAC sẽ ngắt do không đủ dòng điện và nó cần phải có một điện áp đủ lớn (breakover voltage) khác để khiến nó dẫn trở lại. Hình 7.4 mô tả dạng sóng của DIAC

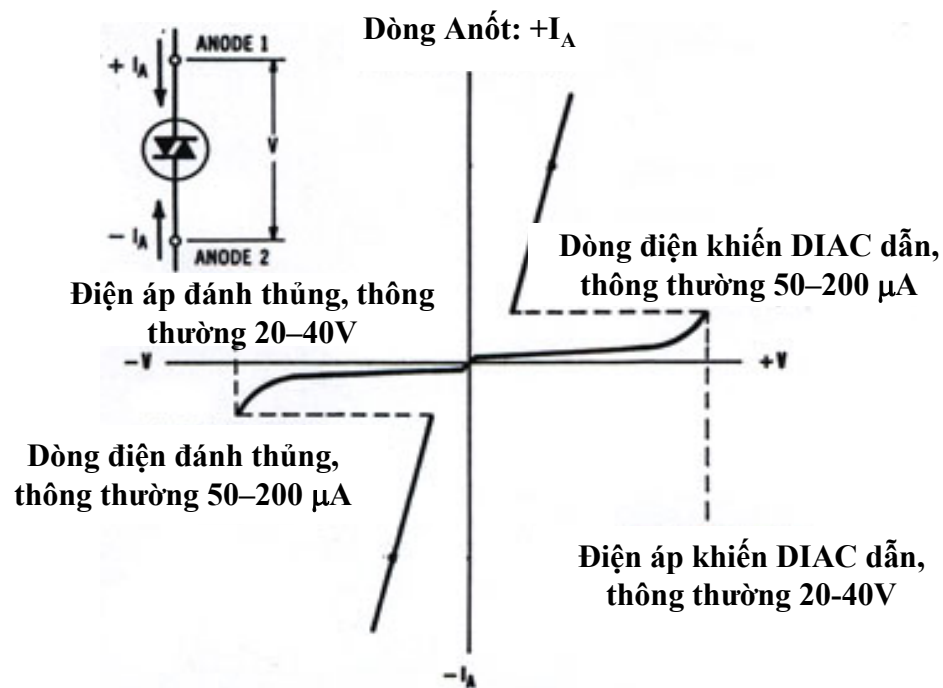
DIAC (2)



Hình 7.5 – Các dạng sóng của DIAC

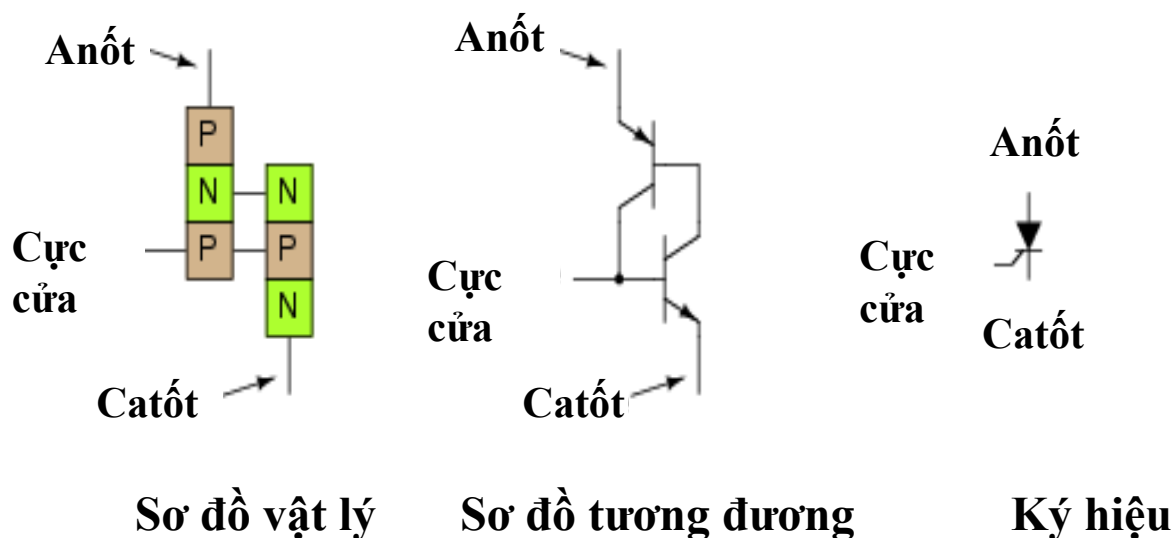
Các DIAC không bao giờ được sử dụng một mình, mà thường được sử dụng kết hợp với các cấu kiện Thyristor khác.

Hình 7.6 Đặc tuyến Vôn Ampe của một DIAC song hướng



SCR: Silicon-Controlled Rectifier (1)

- **Cấu tạo:** quá trình biến điốt Shockley thành SCR chỉ cần thêm một sợi dây thứ 3 nối vào cấu trúc PNPN như mô tả ở hình vẽ 7.7



Hình 7.7 – Cấu kiện chỉnh lưu có điều khiển Silic (SCR)

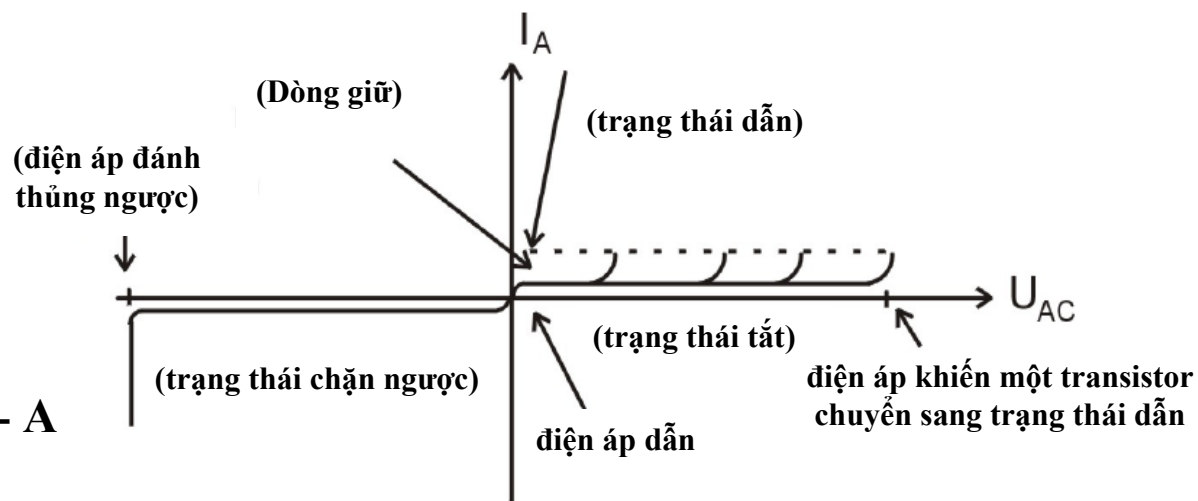
SCR (2)

❖ Nguyên lý hoạt động

- Nếu cực cổng G của một SCR để hở (không nối) thì nó hoạt động giống như một điốt Shockley.
- Do cực cổng G nối trực tiếp với cực gốc của transistor phía dưới, nó có thể được sử dụng như một phương tiện thay thế để “chốt” SCR
- Cung cấp một U nhỏ giữa cực cổng và catốt, transistor phía dưới sẽ buộc phải “dẫn” do có dòng cực gốc đủ lớn, kéo theo transistor phía trên cũng dẫn, và nó lại cung cấp đủ dòng điện cho cực gốc của transistor phía dưới. Kết quả là sau đó SCR không còn cần được kích hoạt bởi một điện áp cổng nữa
- Tất nhiên, dòng cực cổng cần thiết để khởi động việc “chốt” sẽ nhỏ hơn rất nhiều so với dòng điện chảy qua SCR từ catốt đến anốt, do đó SCR sẽ có khả năng khuếch đại

SCR (3)

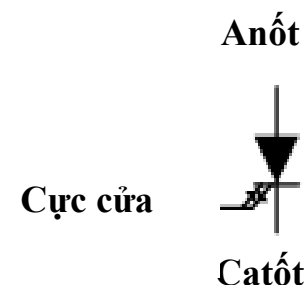
- Phương pháp buộc SCR dẫn điện được gọi là kích hoạt (*triggering*) và trong thực tế nó là cách thông thường nhất để SCR được “chốt”.
- Để tắt một SCR, dòng anốt phải giảm xuống dưới dòng giữ (holding current). Trong các mạch một chiều (DC) một số phụ kiện thêm vào phải được sử dụng để đảm bảo điều này. Trong các mạch xoay chiều (AC) một SCR sẽ tắt khi điện áp cung cấp (điện áp anốt) đi qua điểm 0 hướng tới các giá trị âm.



Hình 7.8 – Đặc tuyến V- A của một SCR

GTO (Gate-Turn-Off Thyristor : Thyristor công tắt)

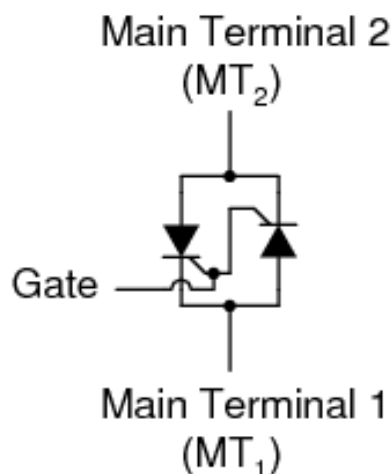
- **Cấu tạo:** Các SCR và GTO có cùng sơ đồ tương đương (gồm hai transistor nối theo kiểu hồi tiếp dương), điều khác biệt duy nhất là cấu trúc được thiết kế để cho phép một transistor NPN có hệ số β lớn hơn hệ số β của transistor PNP. Điều này cho phép một I cực cổng nhỏ hơn (thuận hoặc ngược) để tạo ra một mức độ điều khiển lớn hơn áp dụng cho việc dẫn từ catốt sang anốt, với trạng thái chốt của transistor PNP trở nên phụ thuộc nhiều hơn vào trạng thái chốt của NPN và ngược lại.
- GTO còn được gọi là “chuyển mạch được điều khiển bằng cổng”- *Gate-Controlled Switch (GCS)*



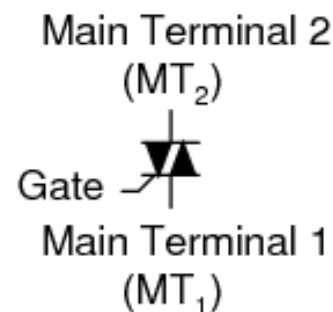
Hình 7.9 – GTO

TRIAC

- SCR là cấu kiện đơn hướng (một chiều), do đó nó chỉ hữu ích cho việc điều khiển một chiều (DC). Nếu hai SCR được nối với nhau theo kiểu song song như hình vẽ 8.34 thì ta có một cấu kiện mới gọi là TRIAC



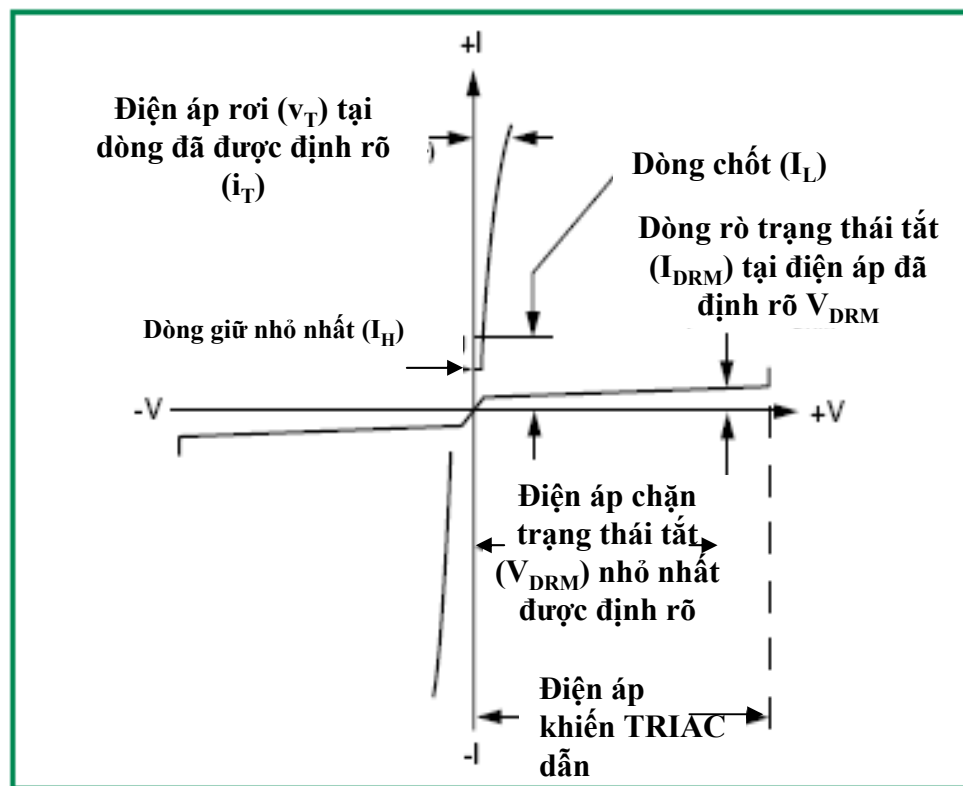
TRIAC equivalent circuit



TRIAC schematic symbol

Hình 7.10 - Mạch tương đương của Triac (a) và ký hiệu của Triac (b)

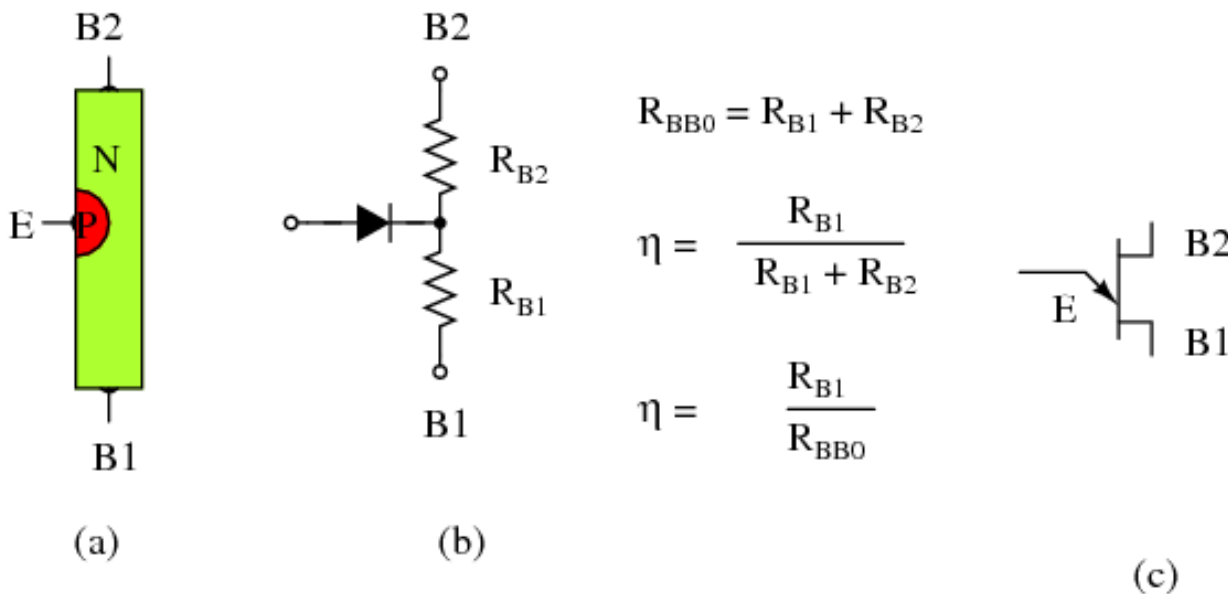
Đặc tuyến Vôn – Ampe của một Triac



Hình 7.11 - Đặc tuyến Vôn – Ampe của một Triac

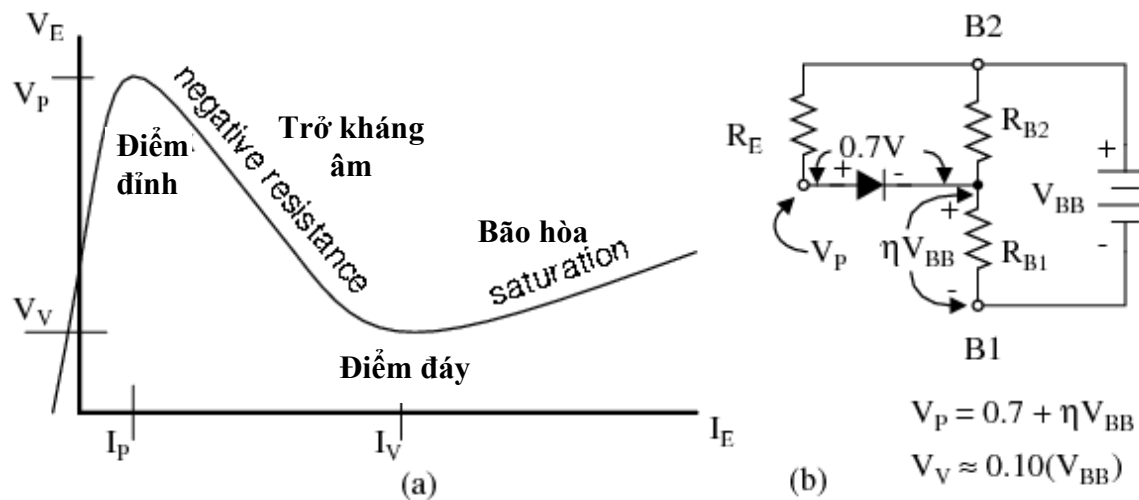
TRANSISTOR ĐƠN NỐI (UJT)

Cấu tạo: gồm một thanh bán dẫn Silic loại N có một đầu nối loại P ở chính giữa. Các đầu nối tại hai đầu cuối của thanh bán dẫn được gọi là các cực cửa B1 và B2; điểm nối ở giữa loại P là cực phát (emitter). Khi cực phát hở, điện trở toàn phần là R_{BB0} (một thông số trong bản thông số (data sheet) của linh kiện) bằng tổng của hai điện trở R_{B1} và R_{B2} .



Hình 7.12 - Transistor đơn nối: (a) Cấu tạo, (b) Mô hình, (c) Ký hiệu

- Đường cong đặc tuyến giữa dòng cực phát đơn nối và điện áp được mô tả như sau: khi V_E tăng, dòng I_E tăng đến I_P (điểm đỉnh – peak point). Sau khi tăng đến điểm đỉnh (I_P), trong vùng điện trở âm (negative resistance region) dòng I_E tăng tiếp mặc dù điện áp giảm. Điện áp đạt giá trị nhỏ nhất tại điểm đáy (valley point). Điện trở của R_{B1} , điện trở bão hoà là nhỏ nhất tại điểm đáy

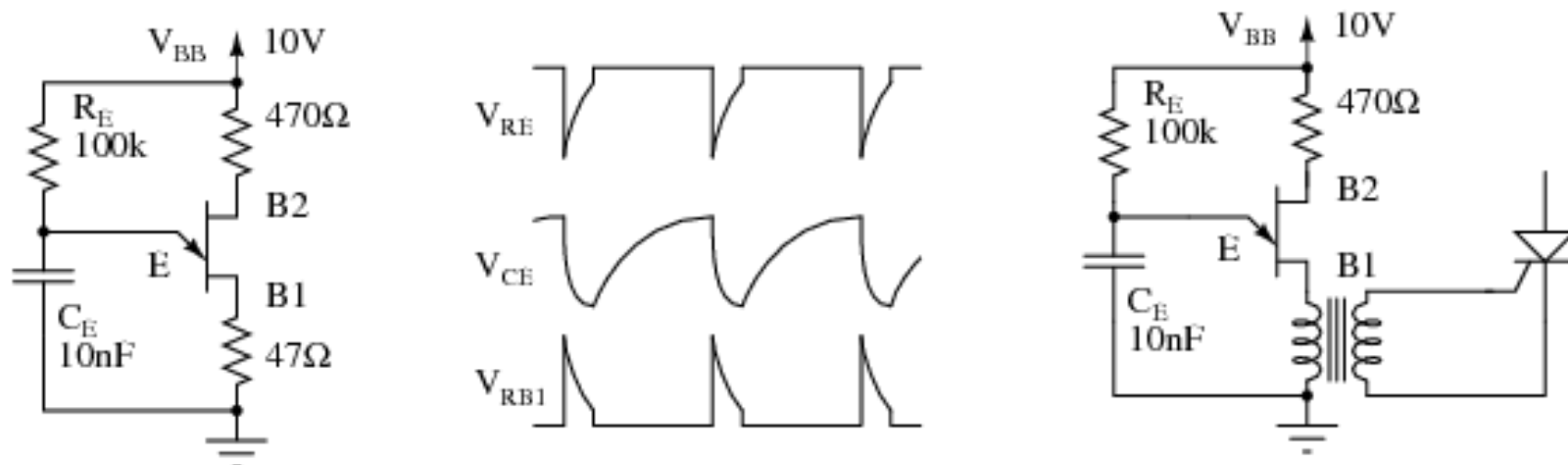


Hình 7.13 - Transistor đơn nối: (a) đường cong đặc tuyến phát, (b) Mô hình cho V_P

Ứng dụng của UJT:

- Dùng để chế tạo bộ tạo dao động hồi phục (relaxation). Điện áp nguồn cung cấp V_{BB} sẽ nạp điện cho C_E qua R_E cho đến điểm đỉnh (peak point). Cực phát đơn nối không có tác động gì đến tụ điện cho đến khi điểm đỉnh được đạt tới.
- Mỗi khi điện áp của tụ (V_E) đạt tới điểm điện áp đỉnh V_P , điện trở cực phát -cực cửa 1 (E-B1) bị nhỏ đi sẽ khiến tụ phóng một cách nhanh chóng. Mỗi khi tụ phóng điện đến dưới điểm đáy V_V , điện trở E-B1 quay trở lại thành điện trở cao, và tụ điện lại được nạp
- Trong khi tụ phóng điện qua điện trở bão hoà E-B1, một xung có thể xuất hiện trên các điện trở tải ngoài B1 và B2 (Hình vẽ 7.14). Điện trở tải tại B1 cần phải nhỏ để không ảnh hưởng đến thời gian phóng điện. Điện trở ngoài tại B2 là tùy chọn. Nó có thể được thay thế bởi một ngắn mạch. Tần số xấp xỉ được cho bởi $1/f = T = RC$

- Điện trở nạp R_E phải giảm đi trong các giới hạn nhất định. Nó buộc phải đủ nhỏ để cho phép dòng I_P chảy dựa trên việc nguồn cung cấp V_{BB} nhỏ hơn V_P . Nó cũng buộc phải đủ lớn để cung cấp dòng I_V dựa trên việc nguồn cung cấp V_{BB} nhỏ hơn V_V .



2n2647 $R_{BBO} = 4.7 - 9.1k$ $\eta = 0.68 - 0.82$ $I_V = 8mA$ $I_P = 2\mu A$

$$f = \frac{1}{RC \ln(1/(1-\eta))} = \frac{1}{(100k)(10nF) \ln(1/(1-0.75))} = 1.39kHz$$

Hình 7.14 - Bộ tạo dao động hồi phục (relaxation oscillator) dùng UJT và các dạng sóng. Bộ tạo dao động điều khiển SCR

CHƯƠNG 8

CẤU KIỆN QUANG ĐIỆN TỬ

1. GIỚI THIỆU
2. CÁC CẤU KIỆN BIẾN ĐỔI ĐIỆN – QUANG
 - 2.1 Điốt phát quang (LED)
 - 2.2 Laser bán dẫn
 - 2.3 Mặt chỉ thị tinh thể lỏng (LCD)
3. CÁC CẤU KIỆN CHUYỂN ĐỔI QUANG – ĐIỆN
 - 3.1 Điện trở quang
 - 3.2 Điốt quang
 - 3.3 Transistor quang lưỡng cực
4. CÁC BỘ GHÉP QUANG (OPTO- COUPLERS)

Giới thiệu chung (1)

1. Khái niệm chung về kỹ thuật quang điện tử

a. Định nghĩa về kỹ thuật quang điện tử:

- Quang điện tử là những hiệu ứng tương hỗ giữa bức xạ ánh sáng và mạch điện tử. Bức xạ ánh sáng là một dạng của bức xạ điện từ có dải tần số dao động rất cao ($\lambda = 50\text{nm} \div 100\mu\text{m}$)
- Các bức xạ quang được chia ra thành ba vùng:
 - Vùng cực tím có $\lambda = 50\text{nm} \div 380\text{nm}$.
 - Vùng ánh sáng nhìn thấy có $\lambda = 380\text{nm} \div 780\text{nm}$.
 - Vùng hồng ngoại có $\lambda = 780\text{nm} \div 100\mu\text{m}$.

Giới thiệu chung (2)

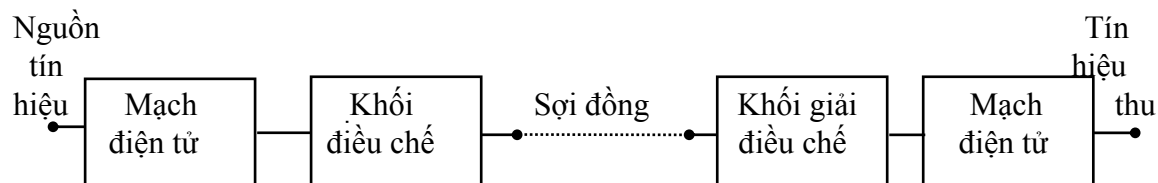
b. Phân loại linh kiện quang điện tử:

- Linh kiện quang điện tử gồm có linh kiện bán dẫn quang điện tử và linh kiện không bán dẫn quang điện tử
- *Linh kiện bán dẫn quang điện tử:* là những linh kiện được chế tạo từ vật liệu bán dẫn như điện trở quang, điôt quang, tranzito quang, LED, LASER bán dẫn, v.v..
- *Linh kiện không phải bán dẫn quang điện tử:* như sợi quang dẫn, mặt chỉ thị tinh thể lỏng LCD, ống nhân quang v.v..

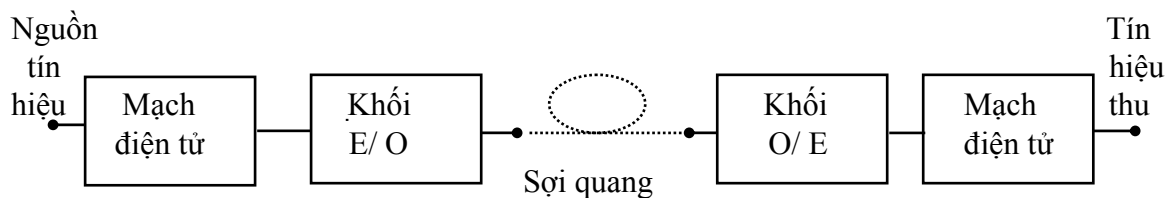
Giới thiệu chung (3)

2. Hệ thống truyền dẫn quang

Sơ đồ khối của các hệ thống thông tin:



a. Hệ thống thông tin điện



b. Hệ thống thông tin quang

Hình 8-1: a. Hệ thống thông tin điện .
b. Hệ thống thông tin quang.

Giới thiệu chung (4)

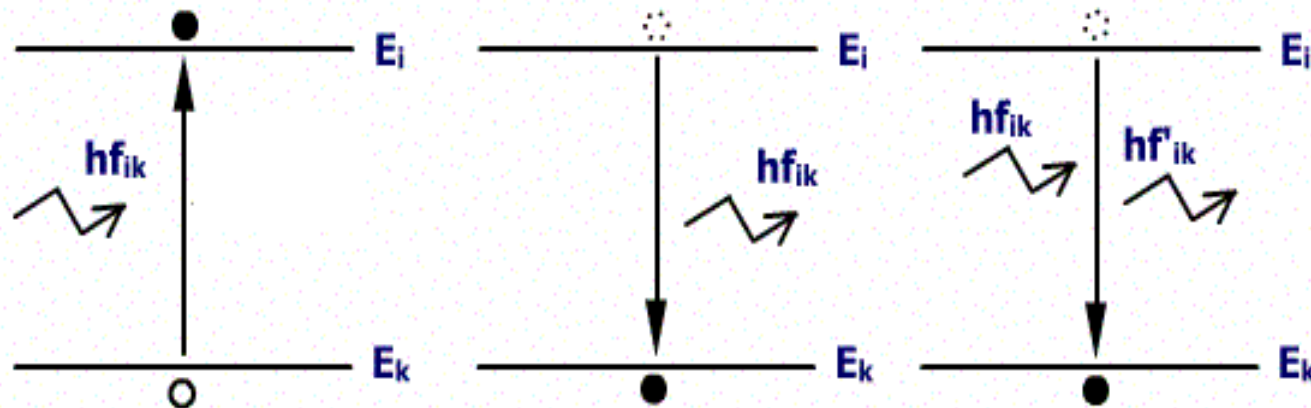
Ưu điểm của hệ thống truyền dẫn quang:

- Sợi quang nhỏ, nhẹ hơn dây kim loại, dễ uốn cong, tốn ít vật liệu
- Sợi quang chế tạo từ thủy tinh thạch anh không bị ảnh hưởng của nước, axit, kiềm nên không bị ăn mòn. Đồng thời, sợi là chất điện môi nên cách điện hoàn toàn, tín hiệu truyền trong sợi quang không bị ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài tới và cũng không gây nhiễu ra môi trường xung quanh
- Đảm bảo bí mật thông tin, không sợ bị nghe trộm
- Khả năng truyền được rất nhiều kênh trong một sợi quang có đường kính rất nhỏ. Tiêu hao nhỏ và không phụ thuộc tần số nên cho phép truyền dẫn băng rộng và tốc độ truyền lớn hơn nhiều so với sợi kim loại
- Giá thành rất rẻ

Các cấu kiện biến đổi Điện – Quang (Cấu kiện phát quang)

➤ Sự tương tác giữa ánh sáng và vật chất

Sự tương tác giữa ánh sáng và vật chất gồm có 3 quá trình: quá trình hấp thụ, quá trình phát xạ tự phát và quá trình phát xạ kích thích



a. Quá trình hấp thụ b. Quá trình phát xạ tự phát c. Quá trình phát xạ kích thích

$$hf = E_i - E_k$$

E_i : Mức năng lượng kích thích

Hình 8- 2: Ba quá trình chủ yếu của sự tương tác giữa ánh sáng và vật chất

Sự tương tác giữa ánh sáng và vật chất

➤ **Quá trình hấp thụ:** quá trình mà tại đó khi có một photon tương tác với vật chất thì một điện tử ở mức năng lượng cơ bản E_k sẽ nhận thêm năng lượng của photon (quang năng) và nhảy lên mức năng lượng kích thích E_i

➤ **Quá trình phát xạ tự phát:** quá trình mà các điện tử nhảy lên mức năng lượng kích thích E_i , nhưng chúng nhanh chóng trở về mức năng lượng cơ bản E_k và phát ra photon có năng lượng $h\nu$. Mỗi một phát xạ tự phát ta thu được một photon. Hiện tượng này xảy ra không có sự kích thích bên ngoài nào → gọi là quá trình phát xạ tự phát. Phát xạ này đẳng hướng và có pha ngẫu nhiên

➤ **Quá trình phát xạ kích thích:**

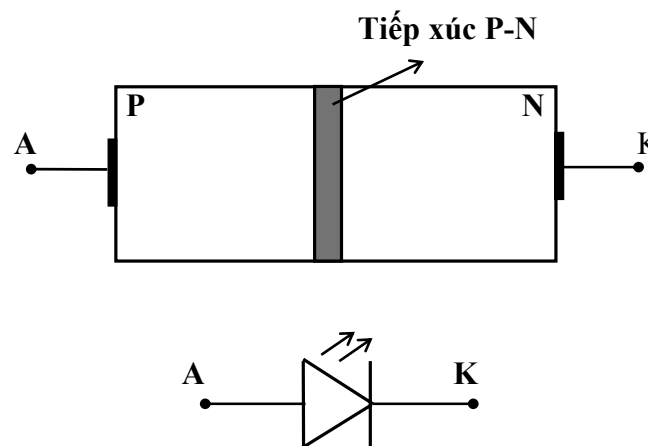
Nếu có một photon có năng lượng $h\nu$ tới tương tác với vật chất mà trong lúc đó có một điện tử đang còn ở trạng thái kích thích E_i , thì điện tử này được kích thích và ngay lập tức nó di chuyển trở về mức năng lượng cơ bản E_k và phát xạ ra một photon khác có năng lượng cũng đúng bằng. Photon mới phát xạ ra này có cùng pha với photon đi đến và được gọi là phát xạ kích thích (hay phát xạ cảm ứng)

Điốt phát quang (LED) chỉ thị (1)

- **Điốt phát quang** là linh kiện bán dẫn quang điện tử. Nó có khả năng phát ra ánh sáng khi có hiện tượng tái hợp xảy ra trong tiếp xúc P-N.
- Tùy theo vật liệu chế tạo mà ta có ánh sáng bức xạ ra ở các vùng bước sóng khác nhau
- Trong mục này ta sẽ trình bày trước hết về LED bức xạ ra ánh sáng nhìn thấy gọi là LED chỉ thị.
- LED chỉ thị có ưu điểm là tần số hoạt động cao, kích thước nhỏ, công suất tiêu hao nhỏ, không sụt áp khi bắt đầu làm việc. LED không cần kính lọc mà vẫn cho ra màu sắc. LED chỉ thị rất rõ khi trời tối. Tuổi thọ của LED khoảng **100 ngàn giờ**

LED chỉ thị (2)

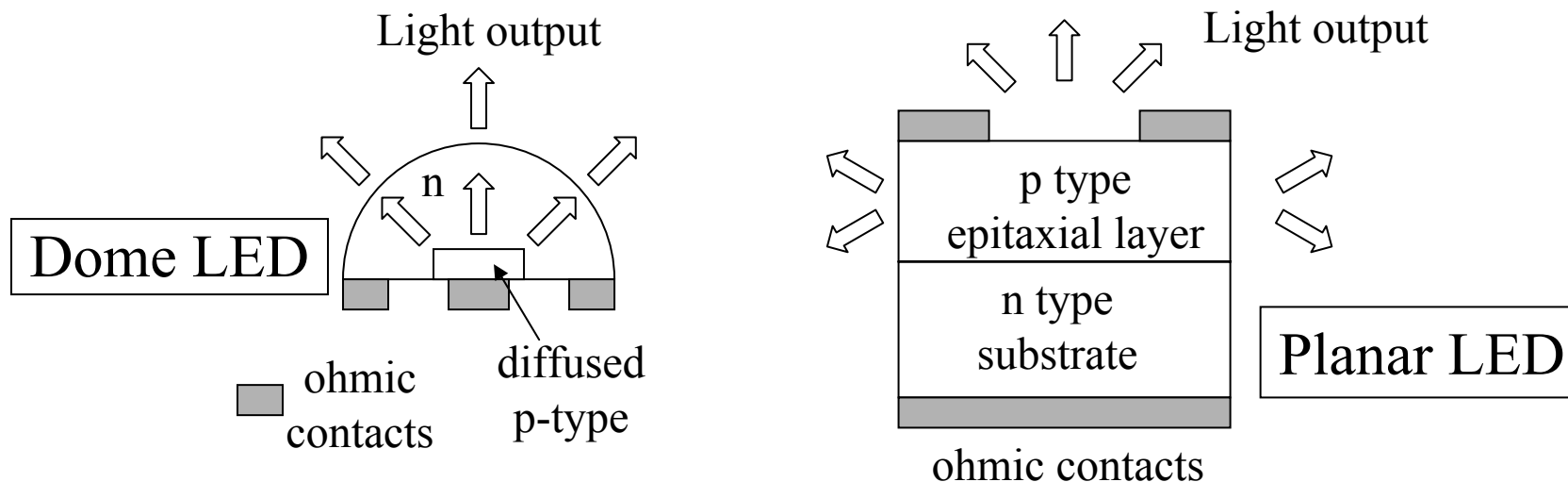
a. Cấu tạo và ký hiệu của LED:



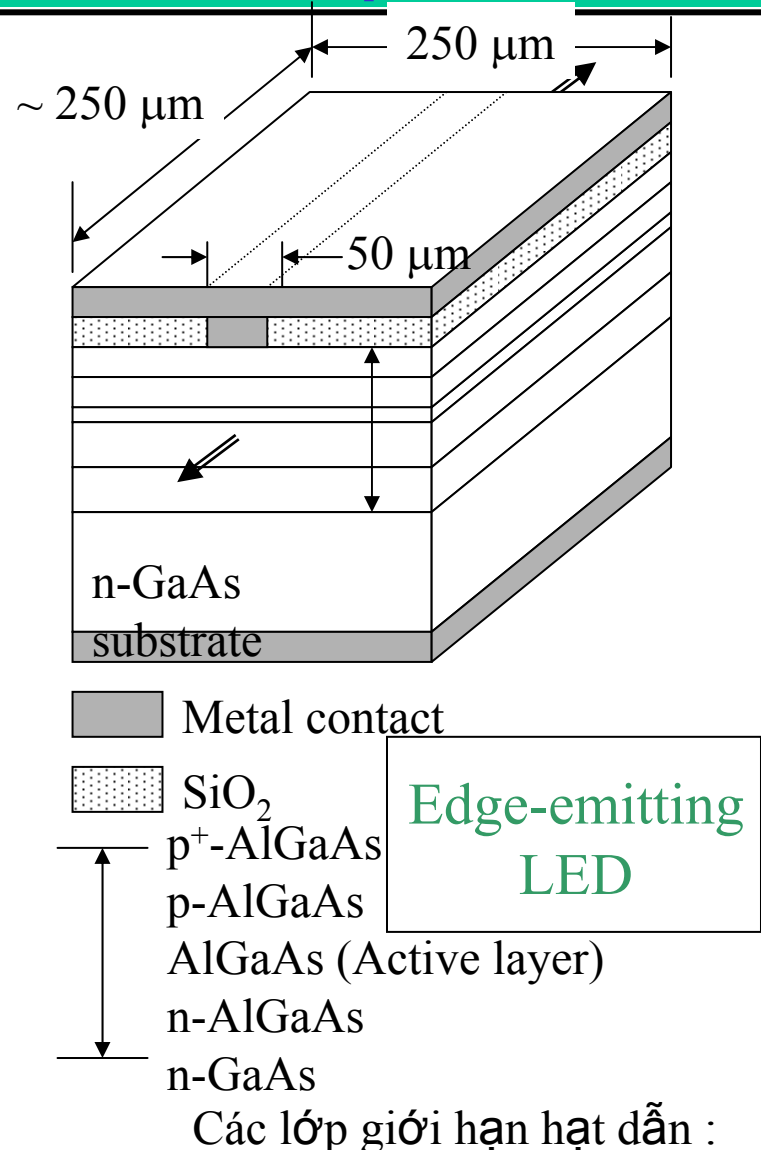
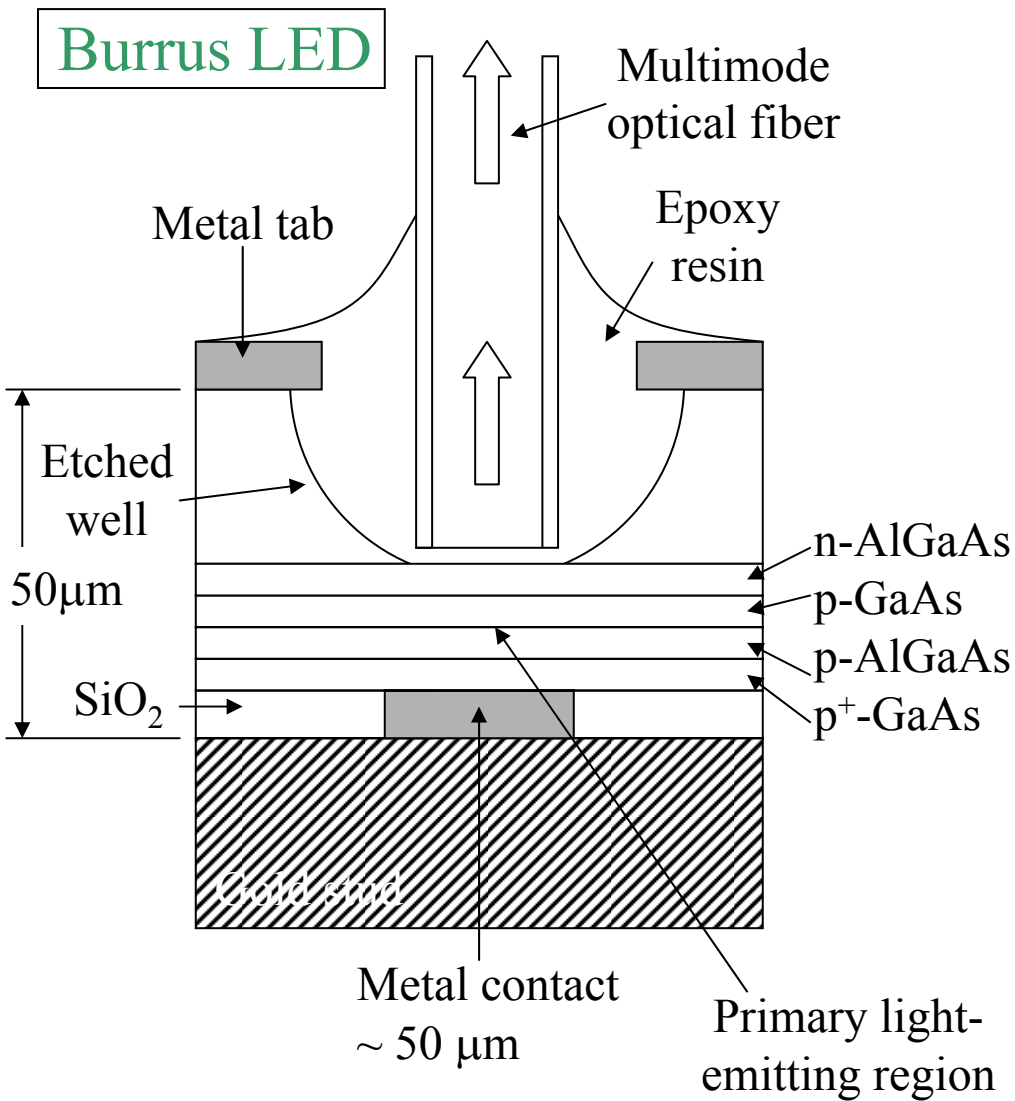
Hình 8- 3 : Mô hình cấu tạo và ký hiệu của LED.

- Vật liệu chế tạo điốt phát quang đều là các liên kết của các nguyên tố thuộc nhóm 3 & nhóm 5 của bảng tuần hoàn Mendêlêep như GaAs, hoặc liên kết 3 nguyên tố như GaAsP v.v.. Đây là các vật liệu tái hợp trực tiếp, có nghĩa là sự tái hợp xảy ra giữa các điện tử ở sát đáy dải dẫn và các lỗ trống ở sát đỉnh dải hóa trị.

Các cấu trúc của LED

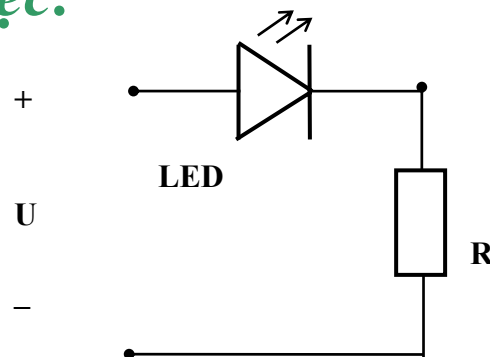


- LED vòm và LED phẳng được sử dụng trong phần lớn các thiết bị hiển thị với lợi ích là rút được lượng ánh sáng cực đại từ thiết bị đó => ánh sáng được phát ra theo tất cả các hướng và sử dụng các ống kính được sắp xếp theo trật tự nhất định để hội tụ ánh sáng.
- Burrus LED và LED phát xạ cạnh chủ yếu được dùng trong các hệ thống thông tin sợi quang



LED chỉ thị (3)

b. Nguyên lý làm việc:



Hình 8- 4 : Sơ đồ nguyên lý của LED

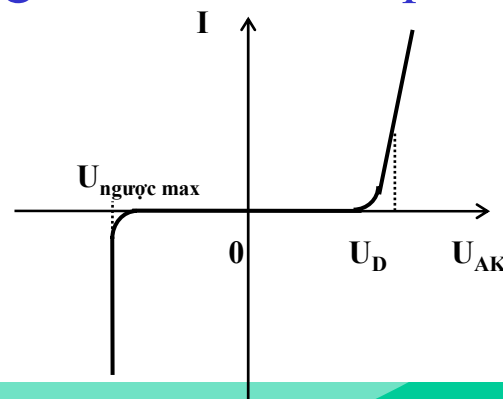
- Khi LED phân cực thuận, các hạt dẫn đa số khuếch tán ồ ạt qua tiếp xúc P-N, chúng gặp nhau sẽ tái hợp và các photon được phát sinh.
- Tốc độ tái hợp trong quá trình bức xạ tự phát này tỉ lệ với nồng độ điện tử trong phần bán dẫn P và nồng độ lỗ trống trong phần bán dẫn N. Đây là các hạt dẫn thiểu số trong chất bán dẫn. Như vậy, để tăng số photon bức xạ ra cần phải gia tăng nồng độ hạt dẫn thiểu số trong các phần bán dẫn.
- Cường độ dòng điện của điốt tỉ lệ với nồng độ hạt dẫn được "chích" vào các phần bán dẫn, do đó cường độ phát quang của LED tỉ lệ với cường độ dòng điện qua điốt

LED chỉ thị (4)

- Điện áp phân cực cho LED gần bằng độ rộng vùng cấm của vật liệu
→ các LED bức xạ ở các bước sóng khác nhau sẽ được chế tạo từ các vật liệu bán dẫn có độ rộng vùng cấm khác nhau và điện áp phân cực cho chúng cũng khác nhau
- Tuy nhiên LED có điện áp phân cực thuận tương đối cao ($1,6V \div 3V$) và có điện áp ngược cho phép tương đối thấp ($3V \div 5V$)

Đặc tuyến Vôn - Ampe của LED:

Đặc tuyến Vôn - Ampe của điốt phát quang biểu diễn mối quan hệ giữa dòng điện quang với điện áp đặt lên LED.

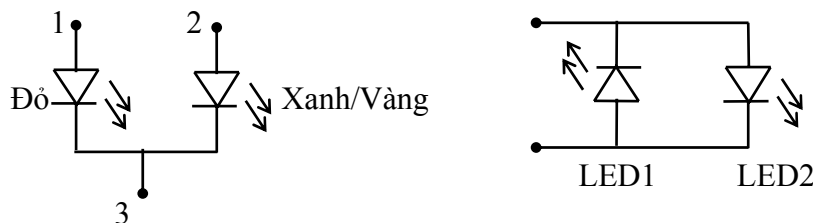


LED chỉ thị (5)

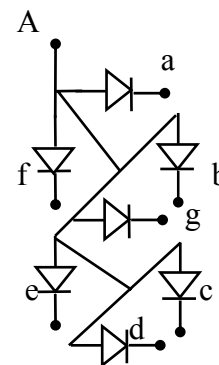
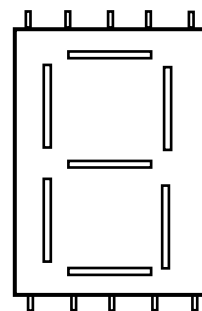
Một số loại LED chỉ thị:

LED đơn: linh kiện một LED

LED đôi: dùng cho những ứng dụng đặc biệt



Hình 8- 6 : LED đôi

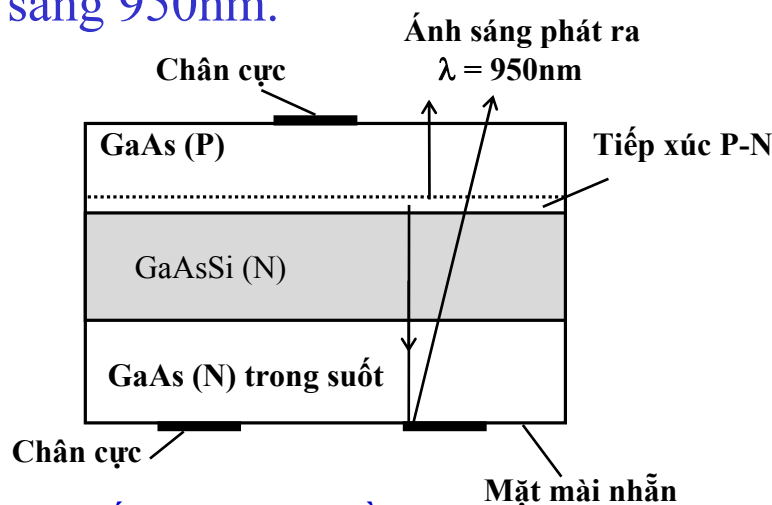


Hình 8- 7: Cấu trúc của một LED 7 đoạn sáng đầu kiểu Anôt chung

LED hồng ngoại (1)

Các hệ thống thông tin quang yêu cầu tốc độ bit xấp xỉ 100 đến 200Mbit/s cùng sợi quang đa mode với công suất quang khoảng vài chục μW thì các điốt phát quang bán dẫn thường là các nguồn sáng tốt nhất

Cấu tạo: Cấu tạo của LED hồng ngoại cơ bản là giống các LED chỉ thị. Để bức xạ ánh sáng hồng ngoại, LED hồng ngoại được chế tạo từ vật liệu Galium Asenit (GaAs) với độ rộng vùng cấm $E_G = 1,43 \text{ eV}$ tương ứng với bức xạ bước sóng khoảng 900nm. Hình 8- 8 mô tả cấu trúc của một LED hồng ngoại bức xạ ánh sáng 950nm.



- Trong phần epitaxy lỏng trong suốt GaAs (N) tạo một lớp tinh thể có tính chất lưỡng tính với tạp chất Silic là GaAsSi (N) và một tiếp xúc P-N được hình thành.

- Với sự pha tạp chất Silic ta có bức xạ với bước sóng 950nm. Mặt dưới của LED được mài nhẵn tạo thành một gương phản chiếu tia hồng ngoại phát ra từ lớp tiếp xúc P-N

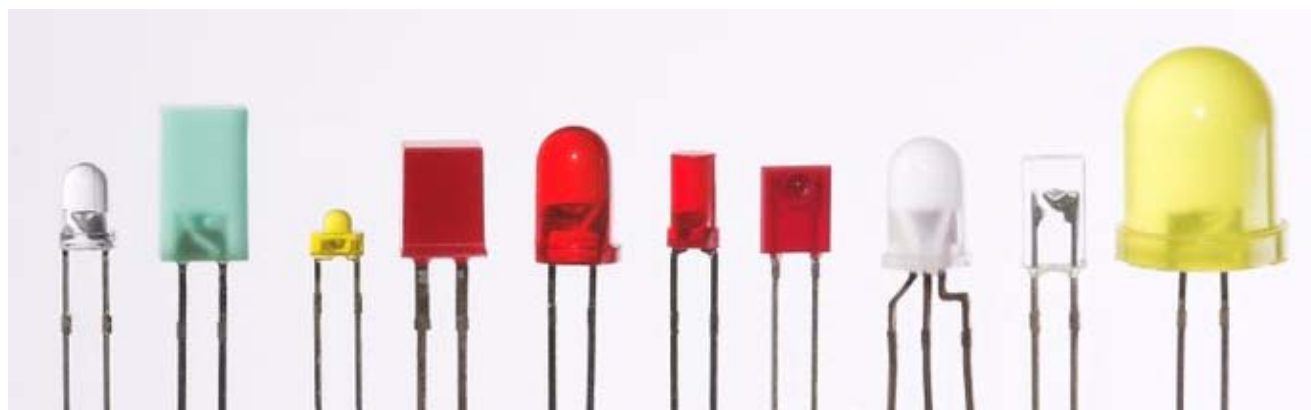
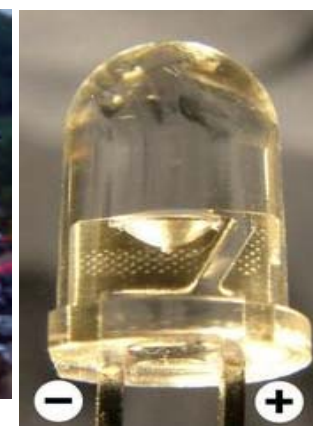
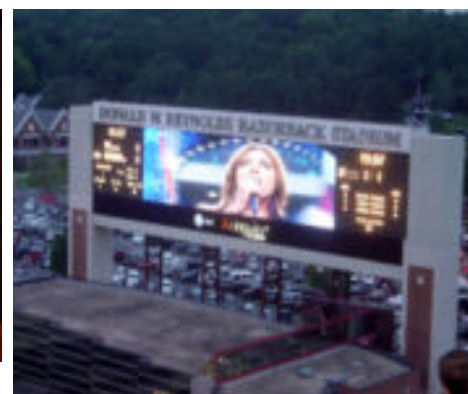
Hình 8- 8 : Cấu trúc của LED hồng ngoại bức xạ $\lambda = 950\text{nm}$

LED hồng ngoại (2)

Nguyên lý làm việc và đặc điểm:

- Khi phân cực thuận cho điôt, các hạt dẫn đa số sẽ khuếch tán qua tiếp xúc P-N, chúng tái hợp với nhau và phát ra bức xạ hồng ngoại. Các tia hồng ngoại bức xạ ra theo nhiều hướng khác nhau. Những tia hồng ngoại có hướng đi vào trong các lớp chất bán dẫn, gặp gương phản chiếu sẽ được phản xạ trở lại để đi ra ngoài theo cùng hướng với các tia khác → tăng hiệu suất của LED
- Ánh sáng hồng ngoại có đặc tính quang học giống như ánh sáng nhìn thấy, nghĩa là nó có khả năng hội tụ, phân kỳ qua thấu kính, có tiêu cự.... Tuy nhiên, ánh sáng hồng ngoại rất khác ánh sáng nhìn thấy ở khả năng xuyên suốt qua vật chất, trong đó có chất bán dẫn. Điều này giải thích tại sao LED hồng ngoại có hiệu suất cao hơn LED chỉ thị vì tia hồng ngoại không bị yếu đi khi vượt qua các lớp bán dẫn để ra ngoài
- Tuổi thọ của LED hồng ngoại dài đến **100.000 giờ**. LED hồng ngoại không phát ra ánh sáng nhìn thấy nên rất có lợi trong các thiết bị kiểm soát vì không gây sự chú ý

Một số hình ảnh của LED



Mặt chỉ thị tinh thể lỏng - LCD (1)

Khái niệm:

- ❖ Tinh thể lỏng sử dụng trong LCD là những hợp chất hữu cơ đặc biệt. Các phân tử của tinh thể lỏng này được phân bố sao cho các trục dọc của chúng nằm song song với nhau.
- ❖ Ở nhiệt độ thấp LCD ở trạng thái rắn, khi t^0 tăng lên đến nhiệt độ nóng chảy thì LCD chuyển sang trạng thái lỏng. Pha trung gian giữa hai trạng thái này là trạng thái tinh thể lỏng
- ❖ LCD **không phải** là linh kiện bán dẫn quang điện tử. LCD được chế tạo dưới dạng thanh và chấm - **ma trận**. LCD là cấu kiện thụ động, nó không phát sáng nên càng dễ đọc nếu xung quanh càng sáng
- ❖ LCD: dùng làm mặt chỉ thị cho đồng hồ, máy tính con, các thiết bị đo số, đồ chơi trẻ em, màn hình ti vi.

LCD (2)

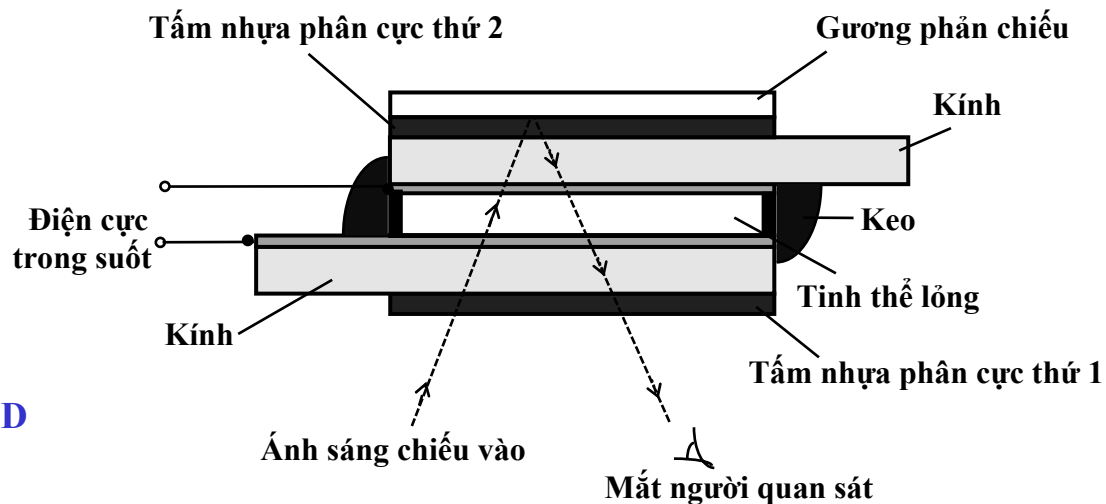
Đặc điểm:

- Khoảng nhiệt độ sử dụng: $(- 10^{\circ}\text{C} \div + 60^{\circ}\text{C})$
- Điện áp: $3\text{V} \div 6\text{V}$ (chuẩn là $4,5\text{V}$)
- Tần số: $30\text{ Hz} \div 200\text{ Hz}$
- Thời gian đóng: 40 ms
- Thời gian ngắt: 80 ms
- Dòng điện tiêu hao khoảng $0,2\ \mu\text{A}$
- LCD có tuổi thọ khá cao từ **10.000 đến 100.000 giờ** và ngày nay nó thay thế dần các mặt chỉ thị loại LED hay huỳnh quang

LCD (3)

Cấu tạo của thanh LCD:

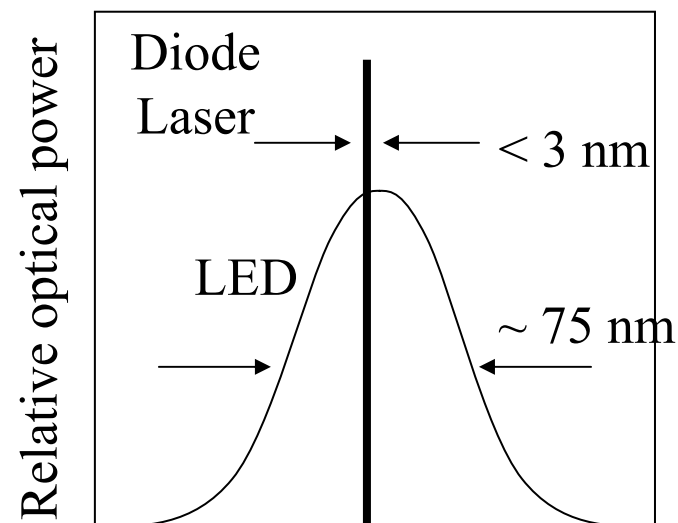
- o Gồm có 2 tấm kính đặt cách nhau khoảng $10\mu\text{m}$. Mặt phía trong của 2 tấm kính tráng một lớp oxit kẽm (ZnO) trong suốt làm hai điện cực.
- o Xung quanh bên cạnh hai tấm kính được hàn kín, sau đó đổ tinh thể lỏng vào khoảng giữa 2 tấm kính và gắn kín lại.
- o Hai tấm nhựa có tính phân cực ánh sáng được dán bên ngoài hai tấm kính sao cho hình ảnh phản chiếu của mặt chỉ thị được nhìn từ một phía nhờ gương phản chiếu.



Hình 8-9 : Cấu tạo của một thanh LCD

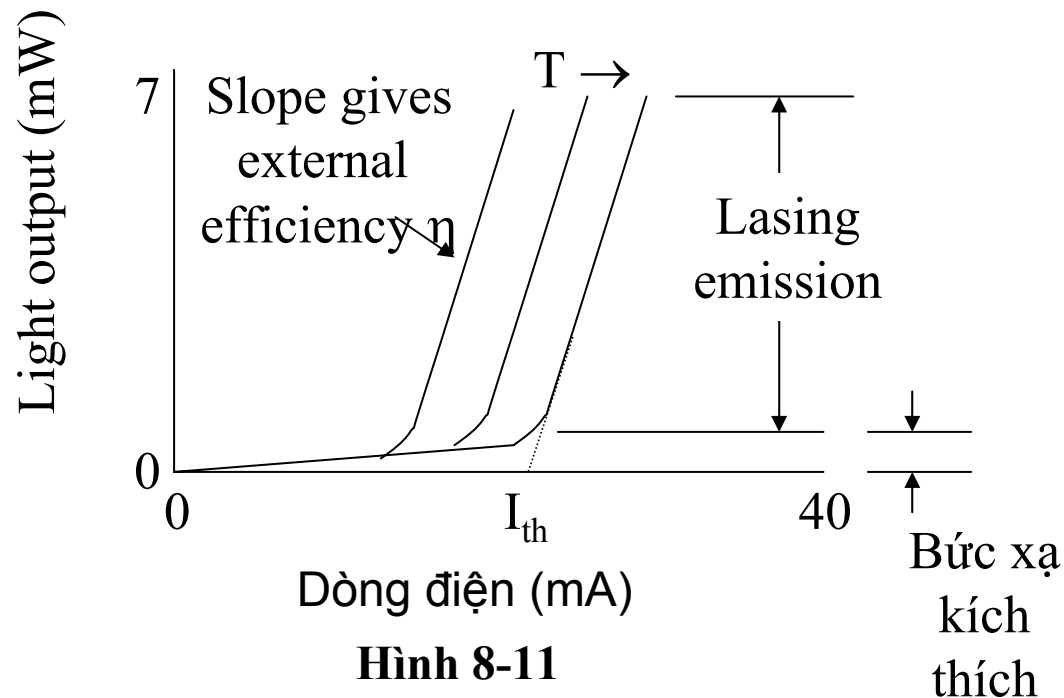
Laser bán dẫn (1)

- Laser = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
- **Đặc điểm:**
 - Phổ phát sáng hẹp
 - Kích thước nhỏ
 - Độ ổn định cao
 - Có bước sóng ánh sáng trong các cửa sổ quang 1, 2, 3
 - Điều chế trực tiếp có thể lên đến vài Gb/s
 - Bán kính bức xạ nhỏ (ghép với sợi quang)



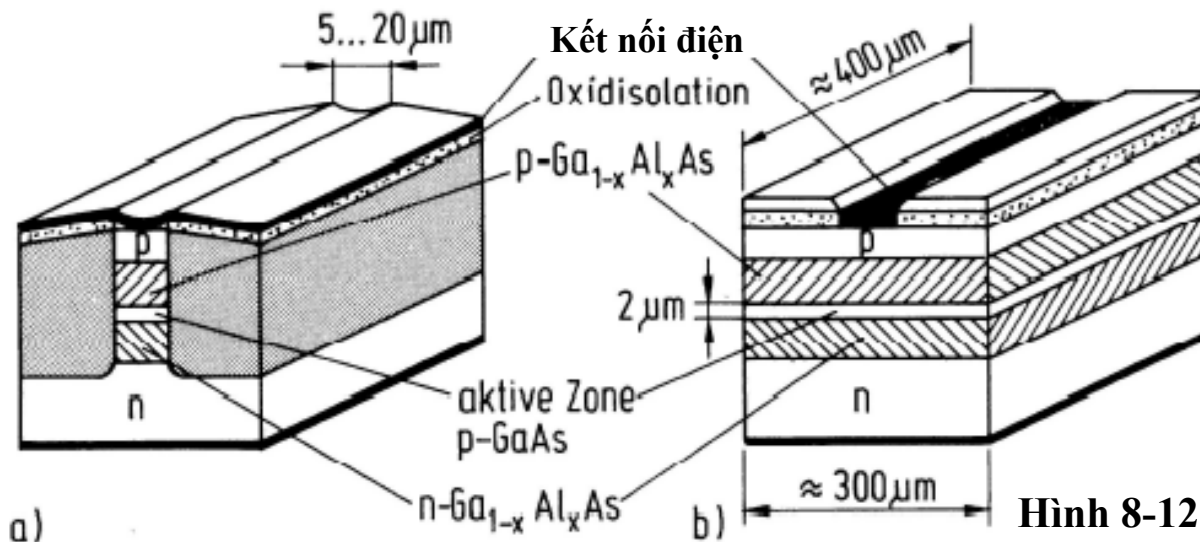
Hình 8-10
Wavelength (nm)

Laser bán dẫn (2)



Hình 8-11

- Giảm dòng điện ngưỡng
 - Tăng công suất tổng của ánh sáng ở đầu ra
 - Tăng hiệu suất quantum mở rộng
- } cải thiện chất lượng của thiết bị laser



Hình 8-12 Laser với cấu trúc dị thể kép

a) Index-Guided

b) Gain-Guided

Các loại laser:

- Laser đa mode: Fabry-Perot Laser
- Laser đơn mode: dùng trong các hệ thống thông tin tiên tiến
 - DFB Laser (Distributed Feedback)
 - DBR Laser (Distributed Bragg Reflector)
 - MQW Laser (Multi Quantum Well)
- Laser có thể điều chỉnh được: điều chỉnh bước sóng phát ra bằng cách (i) thay đổi chiều dài hồ (kéo dẫn cơ học), (ii) thay đổi hệ số khúc xạ (điều khiển nhiệt độ)

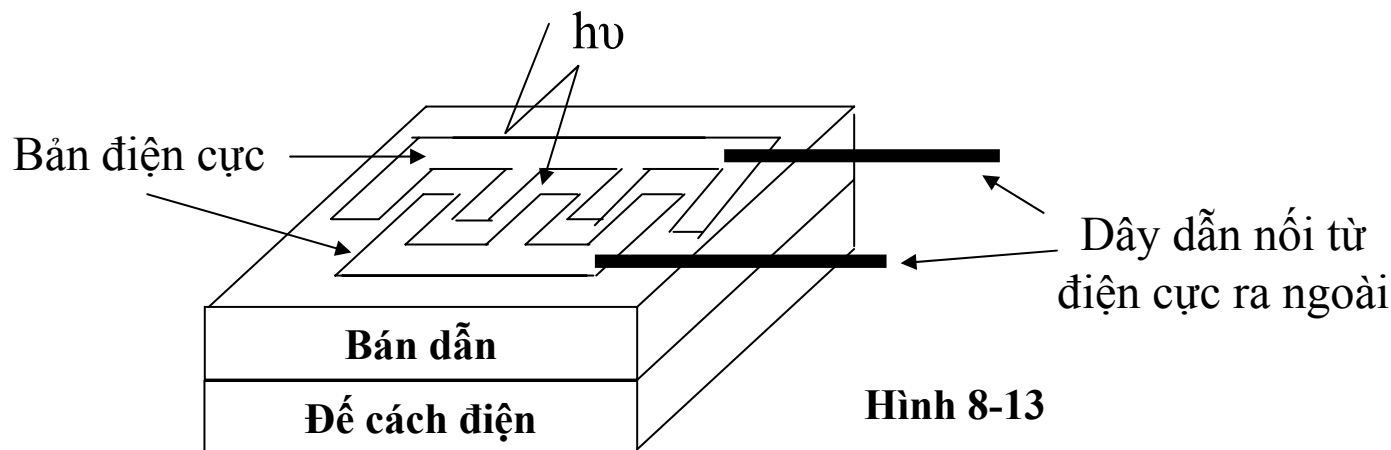
Các cấu kiện chuyển đổi Quang – Điện

- Các bộ thu quang điện hoạt động dựa trên nguyên lý hiệu ứng chuyển đổi quang điện. Ở đó sự hấp thụ photon bởi vật liệu bán dẫn đã tạo ra các cặp điện tử - lỗ trống → tạo ra tín hiệu quang điện dưới dạng dòng điện hay điện thế có thể đo được
- Thiết bị quan trọng nhất là điốt quang bán dẫn (photodiode)
- Yêu cầu:
 - Độ nhạy cao
 - Nhiều trong nhỏ
 - Băng thông rộng

Quang trở (LDR-Light Dependent Resistor) (1)

Cấu tạo & nguyên lý:

- Là bộ thu tín hiệu quang đơn giản nhất. Quang trở thường được làm bằng chất Sunfit Cadimium (CdS), Selenid Cadimium (CdSe), Sunfit chì (PbS)... trong đó loại quang trở CdS có độ nhạy phổ gần với mắt người nên thông dụng nhất
- Quang trở được chế tạo bằng cách tạo một màn bán dẫn trên nền cách điện nối ra 2 đầu kim loại rồi đặt trong một vỏ nhựa, mặt trên có lớp thủy tinh trong suốt để nhận ánh sáng bên ngoài tác động vào

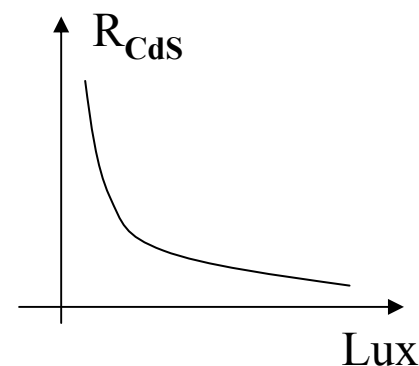


Hình 8-13

Quang trở (2)

- Khi ánh sáng chiếu vào bề mặt quang trở, các cặp e-lỗ trống được sinh ra và được điện trường cuốn ra phía các điện cực. Phụ thuộc vào thông lượng ánh sáng chiếu vào, dòng điện bên ngoài cũng thay đổi theo.
- Trị số điện trở của quang trở thay đổi theo độ sáng chiếu vào nó. Khi bị che tối thì quang trở có trị số điện trở rất lớn (vài $M\Omega$), khi được chiếu sáng thì điện trở giảm nhỏ (vài chục Ω ÷ vài trăm Ω).
- **Ưu điểm** của quang trở: có khuếch đại trong, nghĩa là dòng quang điện thu được có số điện tử (hay lỗ trống) lớn hơn số điện tử (hay lỗ trống) do photon tạo ra

Hình 8.14. Ký hiệu, hình dạng của quang trở

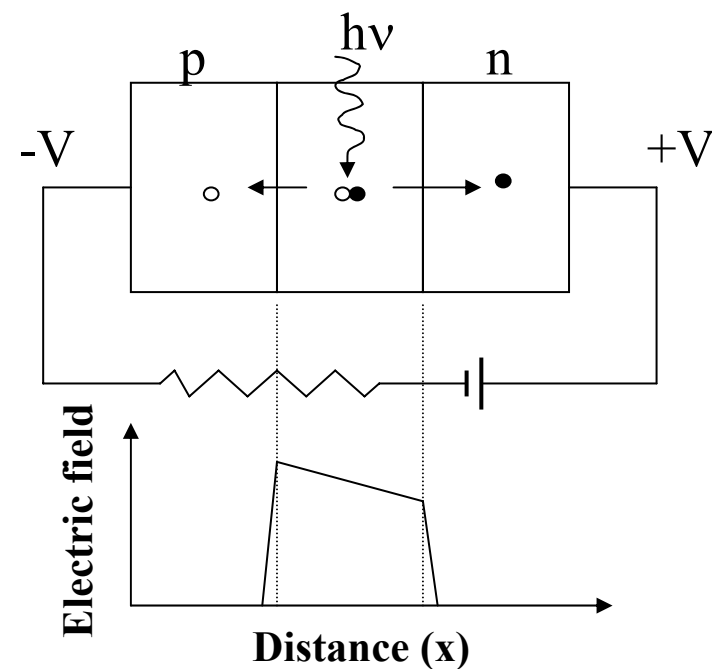


Hình 8.15. Đặc tính của quang trở

- **Ứng dụng:** dùng trong các mạch thu tín hiệu quang, trong báo động, đóng ngắt các mạch điện, trong đo đạc, điều khiển và tự động hoá

Nguyên lý của điốt quang

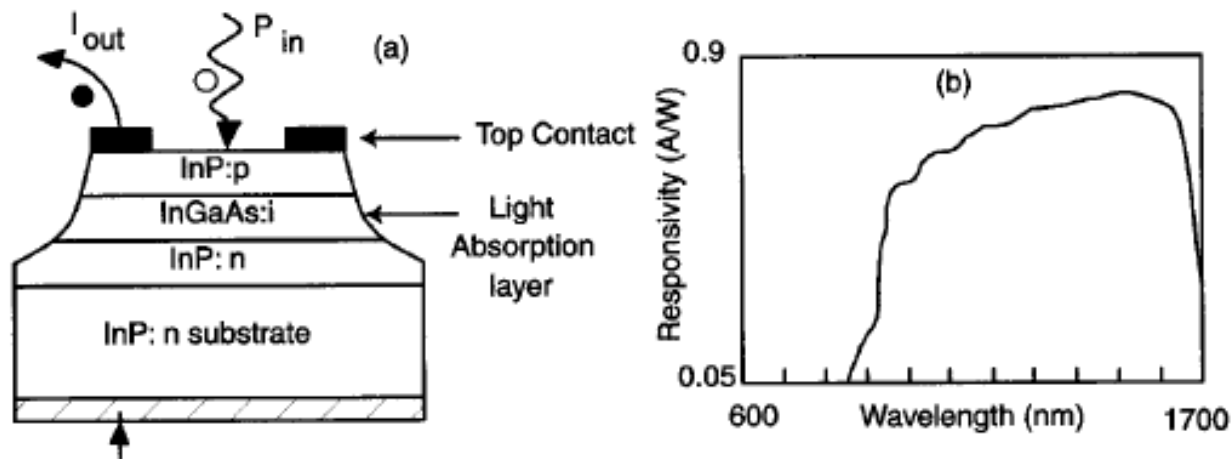
- Cung cấp một điện áp phân cực ngược phù hợp cho một tiếp giáp P-N đơn giản → tạo ra một điện trường → tách các cặp e⁻-lỗ trống do ánh sáng tạo ra (do sự hấp thụ ánh sáng trong chất bán dẫn)
- Tốc độ đáp ứng được xác định bởi điện dung của thiết bị → bị chi phối bởi độ dày của vùng chuyển tiếp → thiết bị diện tích nhỏ và các vùng tích cực có pha tạp thấp sẽ có điện dung nhỏ, nghĩa là tốc độ cao
- Nhiều: nhiều thấp nếu giảm nhỏ dòng điện rò (chủ yếu là dòng rò bề mặt) bằng cách dùng các vật liệu có vùng cấm rộng ở bề mặt



Hình 8-16

PIN Diode (Photodiode có lớp bán dẫn thuần)

Hình 8-17



(a) Mô hình bộ thu quang PIN. (b) Đáp ứng / bước sóng đối với bộ thu quang InGaAs/InP

- Điốt PIN bao gồm lớp P, lớp I và lớp N. Lớp I là lớp bán dẫn thuần có điện trở rất cao để khi Điốt PIN được phân cực ngược, lớp nghèo có thể lan ra rất rộng trong lớp I để hướng phần lớn các photon rơi và hấp thụ trong đó
- Trong lớp I có điện trường cuốn rất cao để cuốn hạt tải nhanh chóng về 2 cực tạo nên dòng quang điện ở mạch ngoài

PIN Diode (2)

- Hấp thụ các photon → cặp e-lỗ trống → dòng điện:

$$i(t) = R.p(t) \approx R|E(t)|^2$$

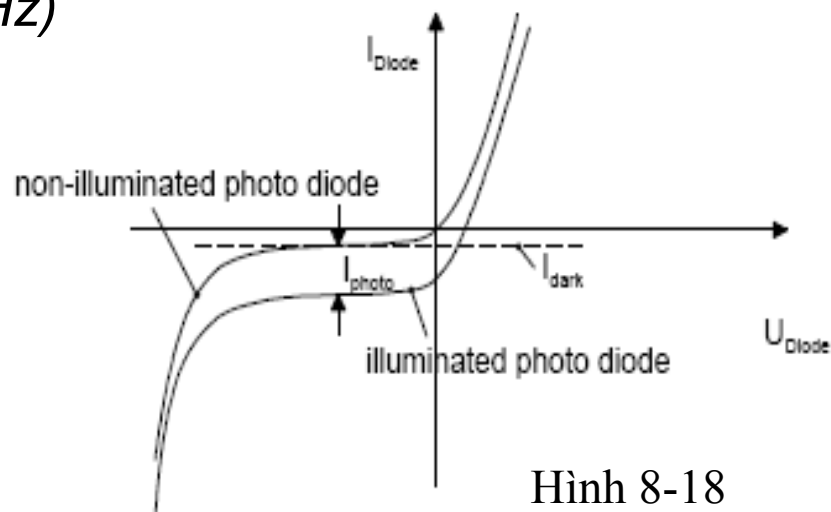
$$R = \eta \frac{q}{hc} \lambda \quad R = \text{Đáp ứng}$$

η = hiệu suất lượng tử < 1 (vd: 0,95%), q = điện tích e⁻; h = hằng số Planck ($6,63 \cdot 10^{-34}$ J/Hz)

Cấu trúc PIN có thời gian đáp ứng rất nhanh và hiệu suất lượng tử cao.

Nhược điểm: dòng tối và nhiễu tương đối lớn, đặc biệt là đối với các bán dẫn có vùng cấm nhỏ như Ge

Đặc tuyến của PIN



Hình 8-18

APD

- Miền tăng tốc (miền hấp thụ ánh sáng) & miền nhân hạt tải là tách biệt nhau
- Khi có ánh sáng chiếu vào, các hạt tải đi qua miền hấp thụ sẽ được tăng tốc, chúng va đập mạnh vào các nguyên tử của bán dẫn gây nên sự ion hoá và tạo ra các cặp e - lỗ trống mới. Quá trình được lặp đi lặp lại nhiều lần → hiệu ứng thác lũ → tăng dòng quang điện bên ngoài, tăng độ khuếch đại (tăng độ nhạy của APD)

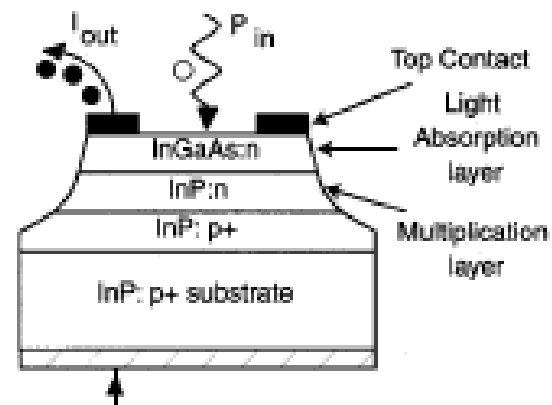
- Điện áp phân cực ngược cao (>100V) → Photon tạo ra các cặp e-lỗ trống → các cặp e/lỗ trống tăng thêm do hiệu ứng thác lũ

M = độ khuếch đại thác lũ (vd: 100)

$$R_{APD} \approx l \frac{q}{hc} \lambda, \quad R_{APD} = M \cdot R,$$

Độ khuếch đại cao, nhưng băng thông thường thấp hơn, nhiều nhiễu hơn so với diốt PIN

APD (Avalanche Photodiode):



Hình 8.19 Mô hình APD với vùng nhân và vùng hấp thụ tách biệt

Các đặc điểm của điốt quang

PARAMETER	Si PIN	Si APD	InGaAs PIN	InGaAs APD	Ge APD
QUANTUM EFFICIENCY	0.8 (>0.9)	0.8 (>0.9)	0.8 (>0.9)	0.8 (>0.9)	0.8 (>0.9)
RISE & FALL TIME (ns)		0.3 (<0.1)	0.1 (<0.2)	0.3 (<0.1)	0.5 (<0.1)
CAPACITANCE (pF)	1	0.5	0.5 (<0.1)	0.5 (<0.1)	0.5 (<0.2)
DARK CURRENT I_{du} (nA)	1 to 10	1 to 10	1 (<0.01)	1 to 10	100 (~50)
DARK CURRENT I_{dm} (nA)		0.001		10 (<1)	100 (5*)
IONIZATION RATIO k		.03(<.015)		0.5 (<0.1)	1 (~0.7)
GAIN-BANDWIDTH PRODUCT (GHz)		>200		80 (>150)	10 (>15)
TYPICAL BIAS VOLTAGE (V)	-15	- 300	- 5	- 60	- 40

TYPICAL (BEST)

 * 30 μm active area

Transistor quang (1)

Cấu tạo và nguyên lý:

- Transistor quang có cấu trúc 3 lớp như BJT thông thường nhưng miền cực gốc để hở, có một diện tích thích hợp để tiếp nhận ánh sáng chiếu vào qua cửa sổ
- Khi Transistor quang ở chế độ hoạt động thì tiếp giáp BC được phân cực ngược còn tiếp giáp BE phân cực thuận
- Khi ánh sáng chiếu vào Transistor quang, các hạt tải được sinh ra và được khuếch tán tới tiếp giáp BC, tiếp giáp này sẽ tách điện tử và lỗ trống để góp phần tạo nên dòng quang điện
- Tiếp giáp BC có vai trò như một điốt quang, các hạt tải từ phía tiếp giáp thuận BE được tiêm thích vào cực gốc B. Dòng quang điện trong miền B (dòng rò I_{CB}) sẽ trở thành dòng I_B và được khuếch đại lên $(\beta+1)$ lần ở collector

Transistor quang (2)

Ký hiệu:



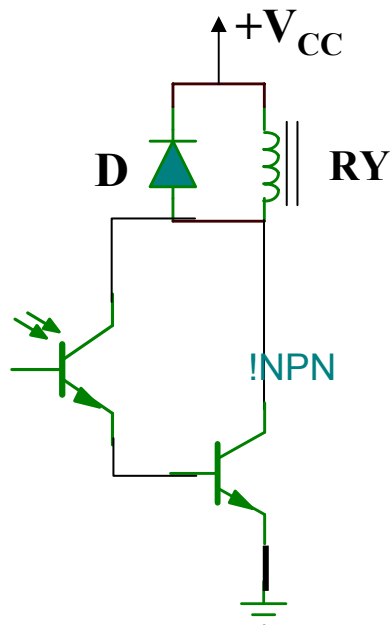
Hình 8.20 Ký hiệu của Transistor quang 2 cực (a) và Transistor quang 3 cực (b)

Đặc điểm:

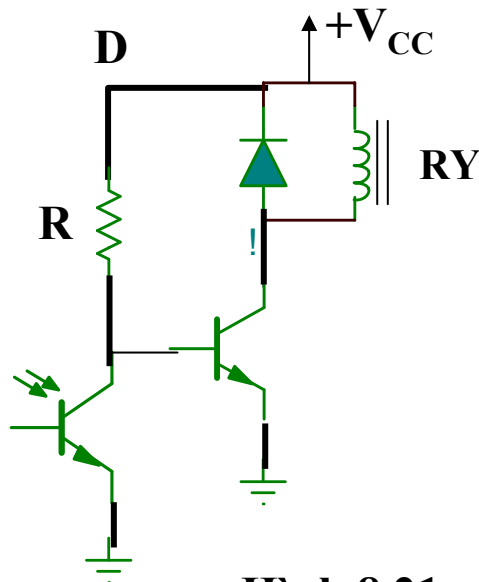
- Độ khuếch đại: $100 \div 1000$ lần và độ khuếch đại là không tuyến tính theo cường độ ánh sáng chiếu vào mối nối giữa cực C và B
- Tốc độ làm việc chậm do tụ điện kí sinh C_{cb} gây hiệu ứng Miller
- Tần số làm việc max ~vài trăm KHz
- Để tăng độ nhạy người ta chế tạo loại Transistor lắp theo kiểu Darlington

Transistor quang (3)

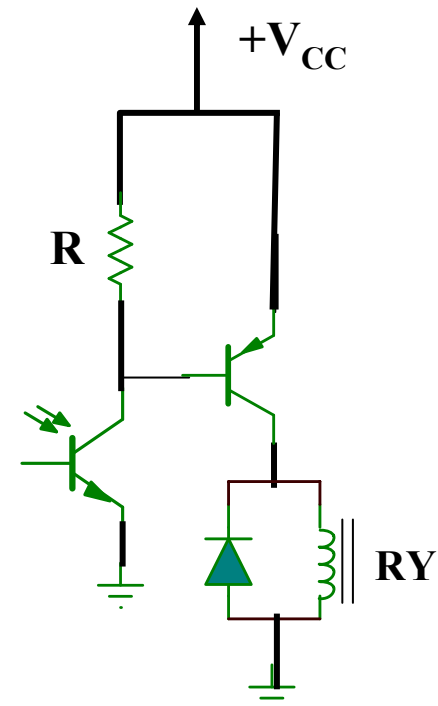
Ứng dụng: (a)



(b)



(c)



Hình 8.21

- Mạch điện a) dùng transistor quang lắp Darlington với transistor công suất để điều khiển rơle RY. Khi được chiếu sáng transistor quang dẫn làm transistor công suất dẫn cấp điện cho rơle

Transistor quang (4)

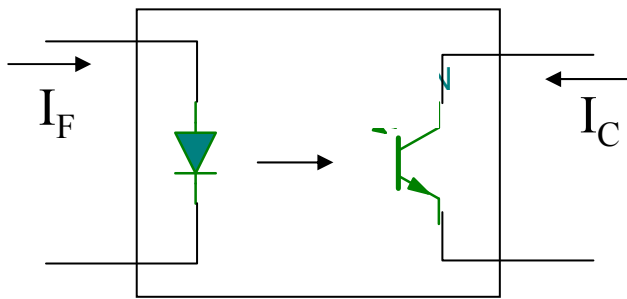
- Mạch điện hình (b) lấy điện áp V_c của transistor quang để phân cực cho cực B của transistor công suất. Khi transistor quang được chiếu sáng sẽ dẫn điện và làm điện áp V_c giảm, cực B transistor công suất không được phân cực nên ngưng dẫn và role không được cấp điện.
- Mạch điện hình (c) dùng transistor loại PNP nên có nguyên lý ngược lại mạch điện hình (b) khi quang transistor được chiếu sáng được dẫn điện tạo sụt áp trên điện trở để phân cực cho cực B của transistor công suất loại PNP làm transistor công suất dẫn, cấp điện cho role.
- Hiện nay người ta còn chế tạo JFET quang và Thyristor quang

Các bộ ghép quang (Opto- Couplers) (1)

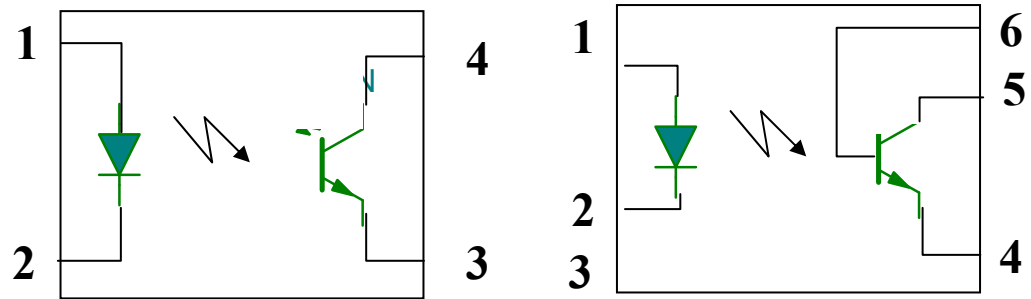
- **Mục đích:** dùng để cách điện giữa các mạch có sự khác biệt lớn về điện áp
- **VD:** mạch tự động điều khiển công suất có điện áp cao ($U = 200V \div 380V, 660V$ hay $1000V$); mạch điều khiển thường có điện áp thấp như các mạch logic, máy tính hay các hệ thống phải tiếp xúc với con người
- **Cấu tạo:**

Bộ ghép quang gồm 2 thành phần gọi là sơ cấp và thứ cấp. Phần sơ cấp là một điốt loại GaAs phát ra tia hồng ngoại, phần thứ cấp là một Transistor quang loại Silic. Khi được phân cực thuận, điốt phát ra bức xạ hồng ngoại chiếu lên trên mạch của Transistor quang.
- **Nguyên lý:** Phần sơ cấp là LED hồng ngoại biến đổi tín hiệu điện thành tín hiệu ánh sáng. Tín hiệu ánh sáng này sẽ được phần thứ cấp (Transistor quang) biến đổi lại thành tín hiệu điện

Các bộ ghép quang (2)



Hình 8.22 Nguyên lý



Hình 8.23. Bộ ghép quang transistor

➤ Đặc điểm:

- Điện áp cách điện giữa sơ cấp và thứ cấp (vài trăm vôn ÷ hàng ngàn vôn)
- Bộ ghép quang có thể làm việc với I_{DC} hoặc I_{AC} có tần số cao
- Điện trở cách điện giữa sơ cấp và thứ cấp có trị số rất lớn (vài chục $M\Omega$ ÷ vài trăm $M\Omega$) đối với I_{DC}
- Hệ số truyền đạt dòng điện (I_C/I_F): vài chục % ÷ vài trăm % tùy loại bộ ghép quang

Các bộ ghép quang (3)

➤ Các loại bộ ghép quang:

a) Bộ ghép quang Transistor:

Phần thứ cấp: Transistor loại Si. Đối với bộ ghép quang transistor có 4 chân thì transistor không có cực B, trường hợp bộ ghép quang transistor có 6 chân thì cực B được nối ra ngoài (hvē). Bộ ghép quang không có cực B có ưu điểm là hệ số truyền đạt lớn, nhưng có nhược điểm là độ ổn định nhiệt kém.

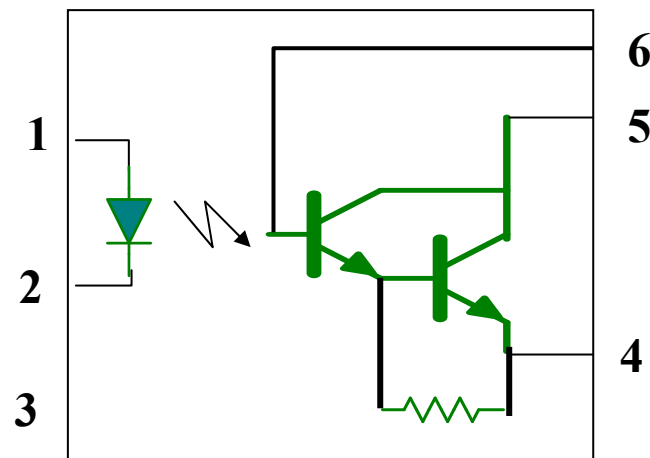
Nếu nối giữa cực B và E một điện trở thì các bộ ghép quang transistor này làm việc khá ổn định với nhiệt độ nhưng hệ số truyền đạt bị giảm đi.

Các bộ ghép quang (4)

b) *Transistor quang Darlington:*

có nguyên lý như bộ ghép quang với transistor quang nhưng với hệ số truyền đạt lớn hơn vài trăm lần nhờ tính chất khuếch đại của mạch Darlington.

Nhược điểm: ảnh hưởng bởi nhiệt độ rất lớn nên giữa chân B và E của transistor sau thường có điện trở để ổn định nhiệt.



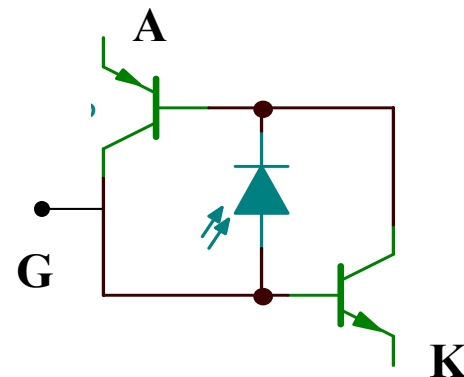
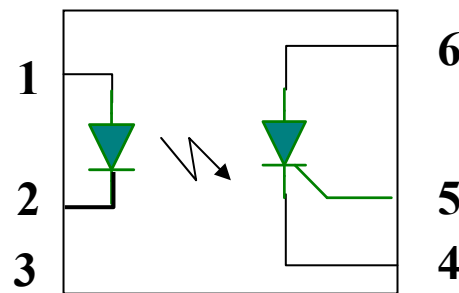
Hình 8.24 Transistor quang Darlington

Các bộ ghép quang (5)

c) Bộ ghép quang với Thyristor quang:

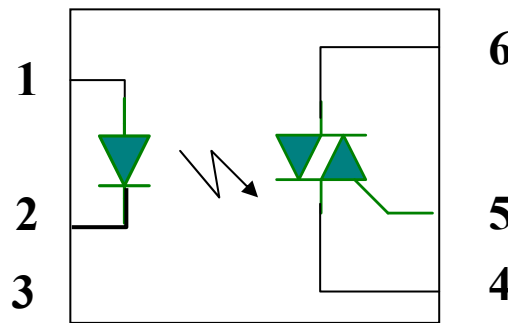
- Gồm một điốt quang và 2 transistor lắp theo nguyên lý của SCR
- Khi có ánh sáng hồng ngoại do LED ở sơ cấp chiếu vào điốt quang thì sẽ có dòng điện I_B cấp cho transistor NPN và khi transistor NPN dẫn thì sẽ điều khiển transistor PNP dẫn điện. Thyristor quang đã được dẫn điện thì sẽ duy trì trạng thái dẫn mà không cần kích liên tục ở sơ cấp
- Để tăng khả năng chống nhiễu người ta nối giữa chân G và K bằng một điện trở từ vài $K\Omega$ ÷ vài chục $K\Omega$

Hình 8.25 Ký hiệu và cấu trúc bán dẫn tương đương của Thyristor quang

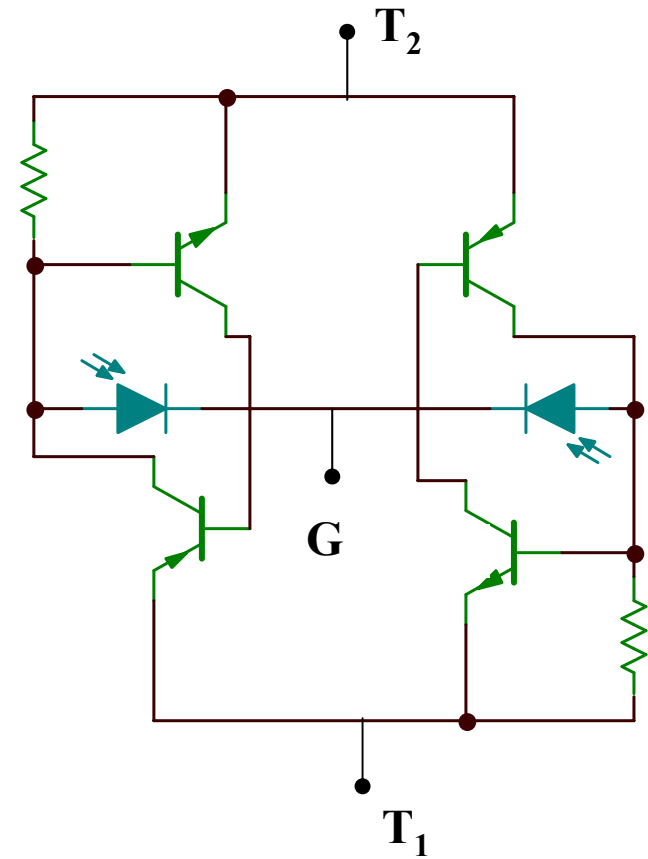


Các bộ ghép quang (6)

d) *OPTO- Triac*: có cấu trúc bán dẫn như hình vẽ



6
5
4



Hình 8.26 Ký hiệu và cấu trúc bán dẫn tương đương của Triac quang

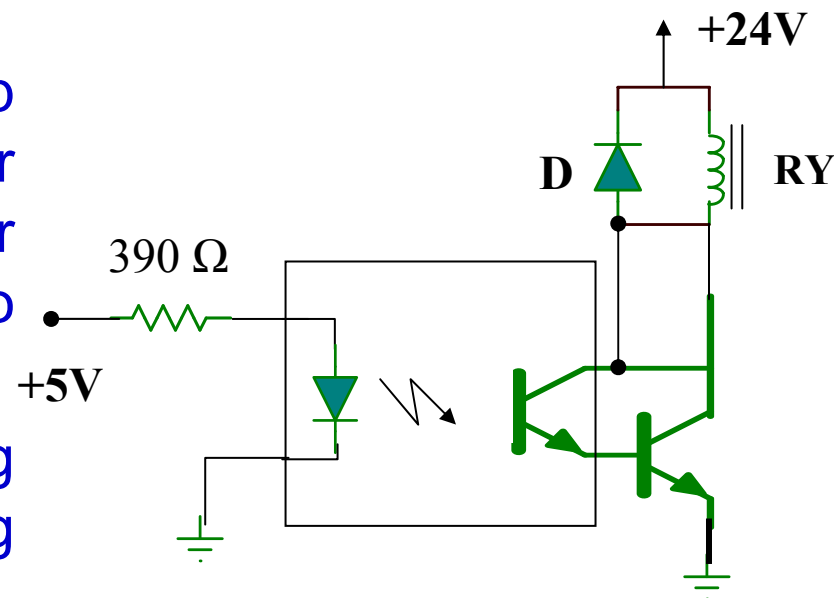
Các bộ ghép quang (7)

➤ Ứng dụng:

- Các loại bộ ghép quang có dòng điện ở sơ cấp cho LED hồng ngoại khoảng 10 mA
- Đối với transistor quang khi thay đổi trị số dòng điện qua LED hồng ngoại ở sơ cấp sẽ làm thay đổi dòng điện ra I_C của transistor quang ở thứ cấp.
- Các bộ ghép quang có thể dùng thay cho rơle hay biến áp xung để giao tiếp với tải thường có điện áp cao và dòng điện lớn.

Các bộ ghép quang (8)

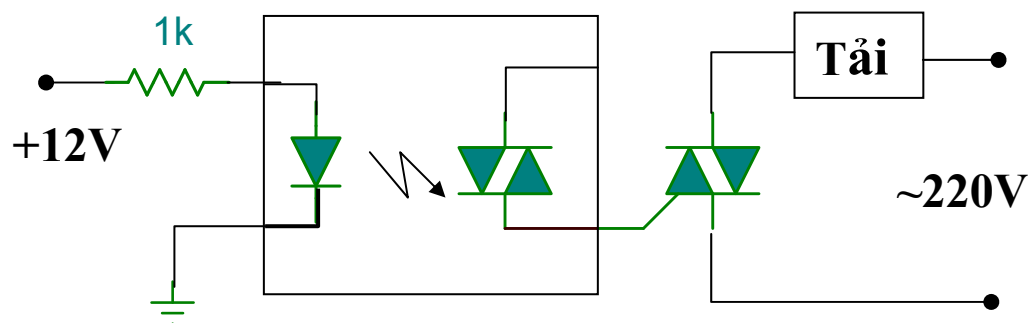
- Mạch điện hình 8.27 là ứng dụng của transistor quang để điều khiển đóng ngắt rơle
- Transistor quang trong bộ ghép quang được ghép Darlington với transistor công suất bên ngoài
- Khi LED hồng ngoại ở sơ cấp được cấp nguồn 5V thì transistor quang dẫn, điều khiển transistor công suất dẫn để cấp điện cho rơle RY
- Điện trở 390Ω để giới hạn dòng qua LED hồng ngoại khoảng 10mA



Hình 8.27

Các bộ ghép quang (9)

- Mạch điện hình 8.28 là ứng dụng của OPTO- Triac để đóng ngắt điện cho tải dùng nguồn xoay chiều 220V
- Điện trở 1kΩ để giới hạn dòng qua LED hồng ngoại khoảng 10mA.
- Khi LED sơ cấp được cấp nguồn 12V thì Triac quang sẽ được kích và dẫn điện tạo dòng kích cho Triac công suất. Khi Triac công suất được kích sẽ dẫn điện như một công tắc để đóng điện cho tải.



Hình 8.28

THUYẾT TRÌNH QUANG ĐIỆN TỬ

KHẢO SÁT

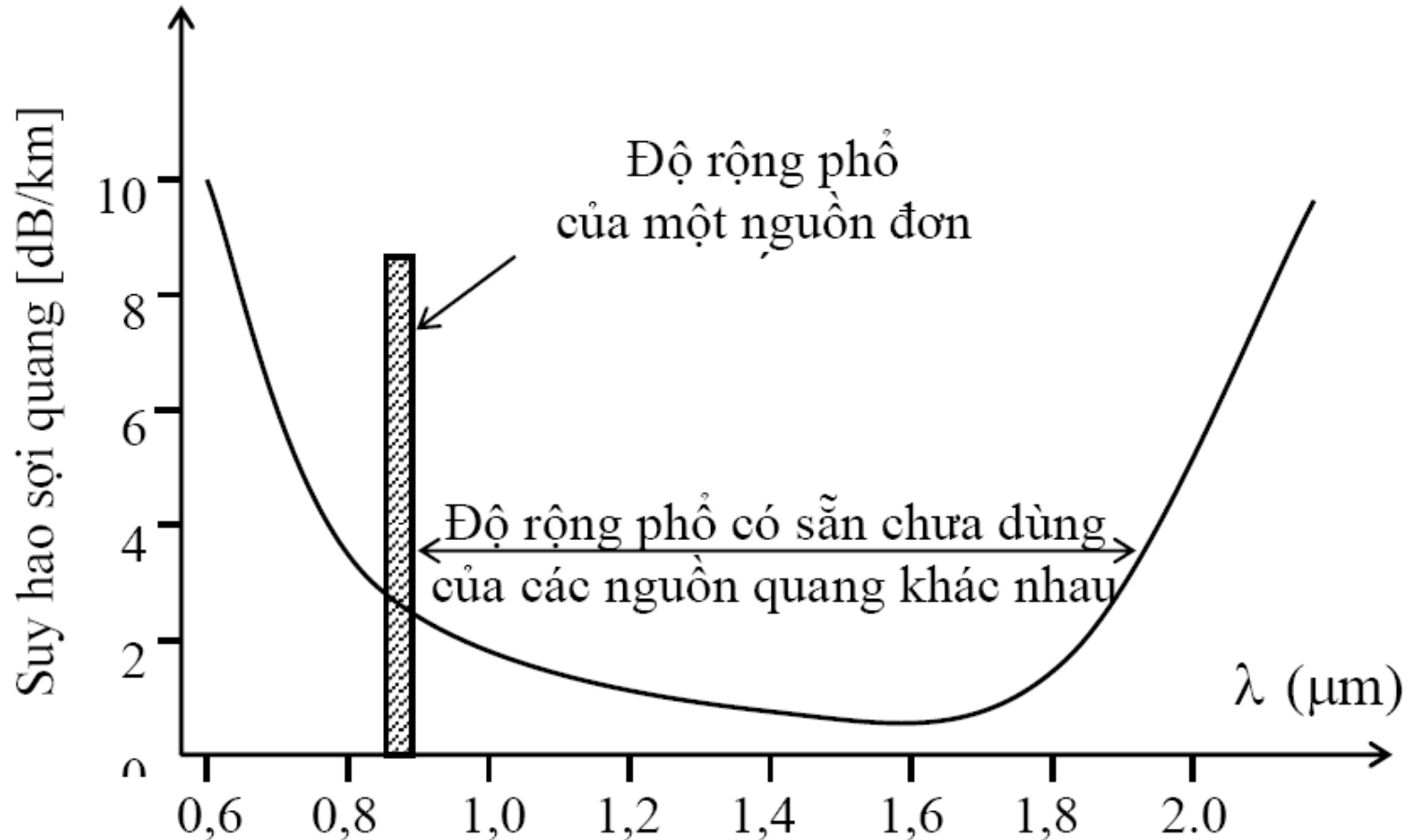
LINH KIỆN CỦA HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG

GVHD: Thầy giáo Hoàng Phú An
Phó trưởng khoa Điện - Điện tử

SVTH:

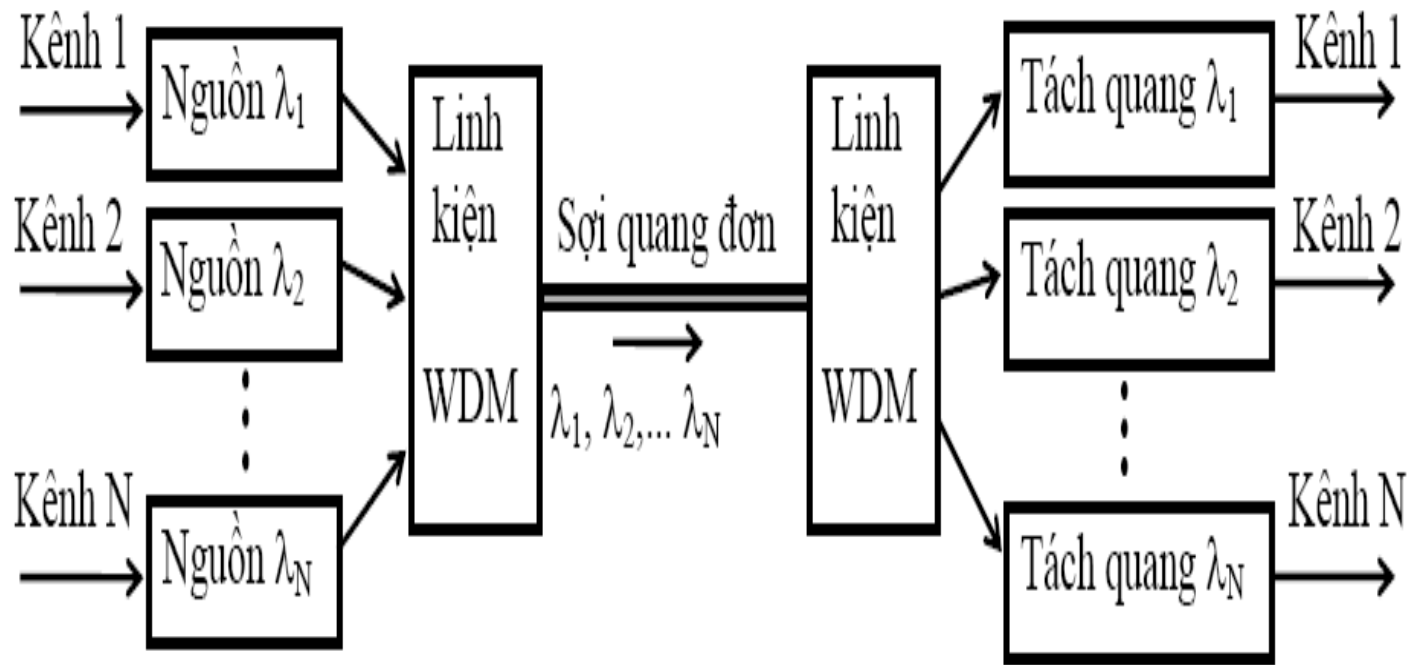
1. Vũ Văn Tài
2. Nguyễn Duy Thìn
3. Nguyễn Văn Trung
4. Nguyễn Thị Kiều
5. Ngô Tiến Huân

Khái niệm về kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng - WDM



Hình 6.3. Một nguồn quang đơn sử dụng một phần rất nhỏ băng truyền dẫn của phổ có sẵn của sợi quang ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM) tạo ra rất nhiều kênh phổ sử dụng đồng thời.

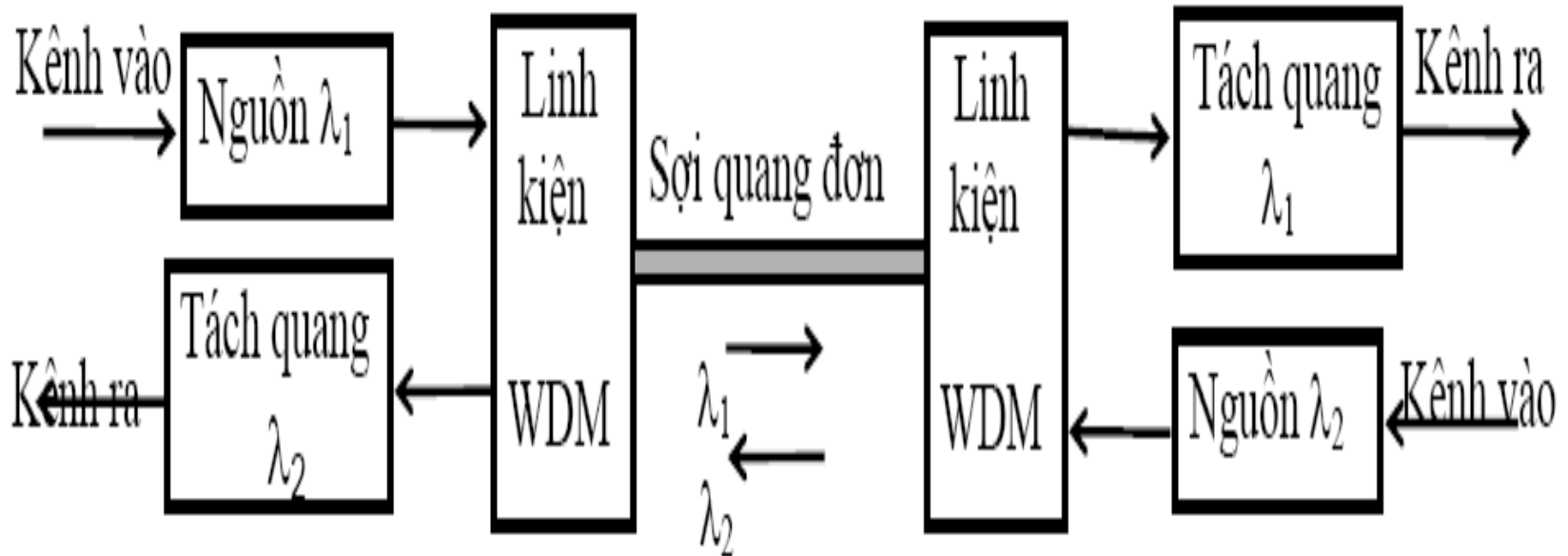
Khái niệm về kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng -WDM



Hình 6.4. Hệ thống WDM đơn hướng kết hợp N tín hiệu độc lập để truyền trên 1 sợi quang đơn.

- Trong hình trên, linh kiện WDM đơn hướng được sử dụng để kết hợp các bước sóng mang tín hiệu khác nhau trên một sợi quang đơn tại một đầu và để tách chúng vào bộ tách quang thích hợp tại đầu kia.

Khái niệm về kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng -WDM

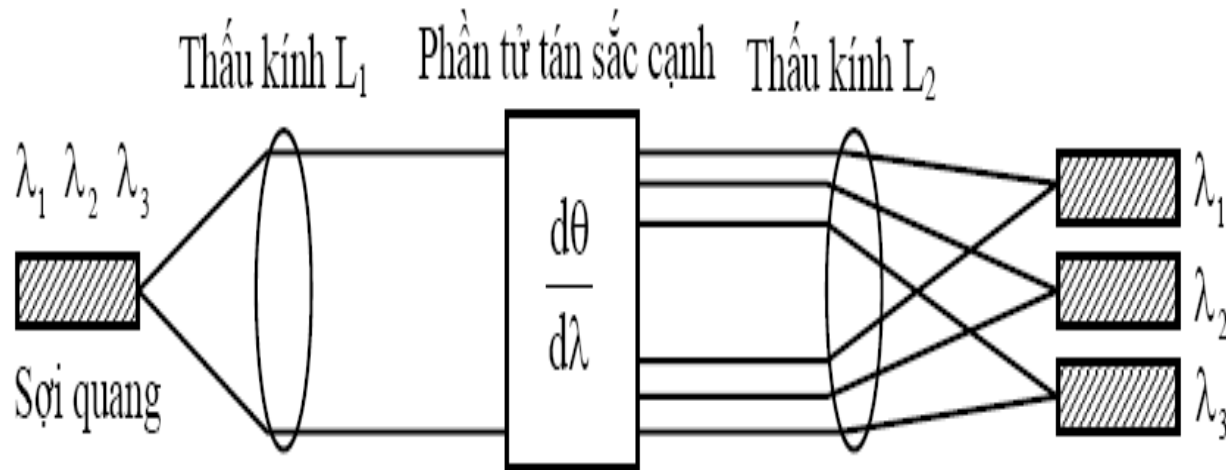


Hình 6.5. Hệ thống WDM hai hướng, trong đó, hai bước sóng hoặc nhiều hơn được truyền đồng thời trong các hướng ngược nhau trên cùng một sợi quang.

- Sơ đồ này gồm việc gửi tin tức trong một hướng tại một bước sóng λ_1 và đồng thời trong hướng ngược lại tại bước sóng λ_2 .

Khái niệm về kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng -WDM

Bộ lọc quang bằng các linh kiện tán sắc (hay bộ ghép kênh tán sắc cạnh)

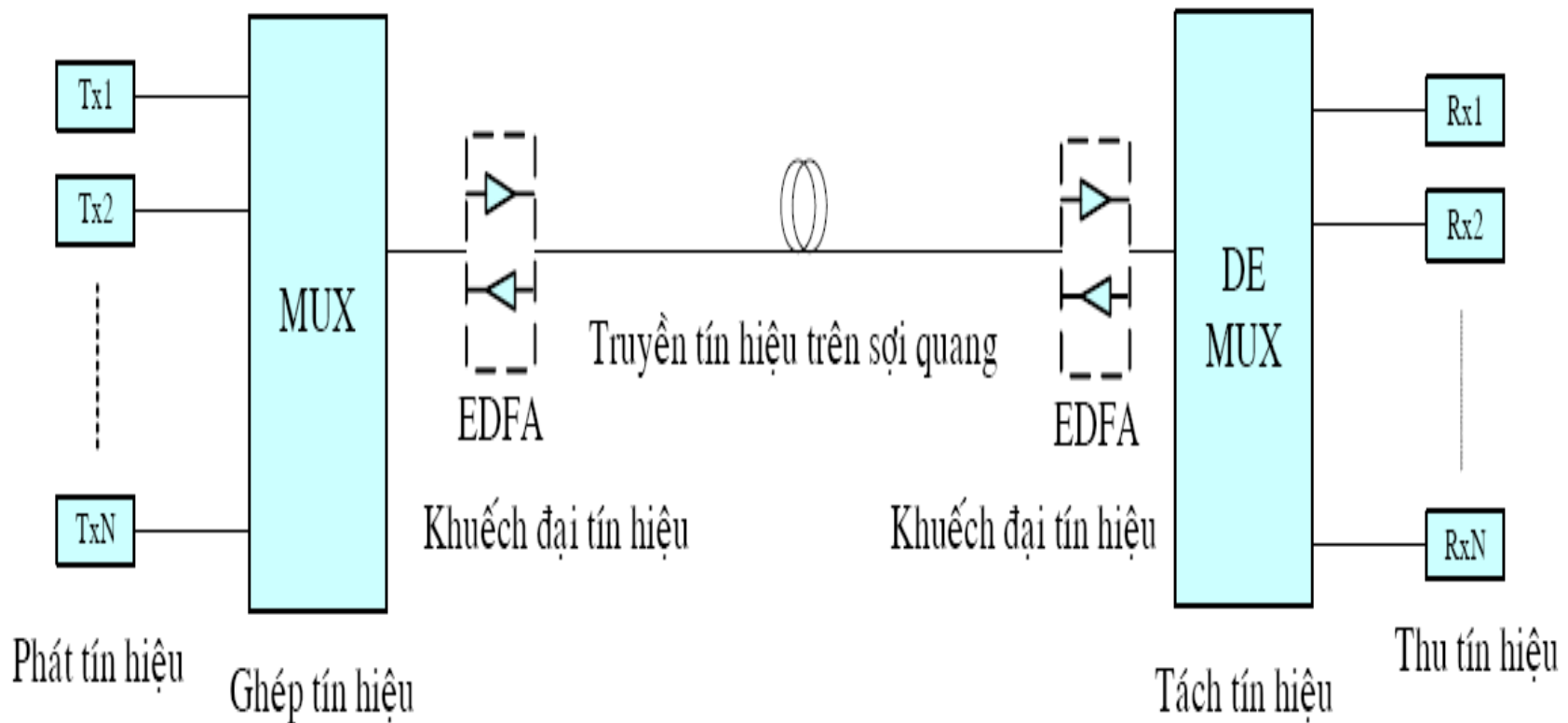


Hình 6.6. Sơ đồ biểu diễn một phần tử WDM tán sắc cạnh cho 3 bước sóng. Nhiều bước sóng có thể kết hợp hoặc phân chia với loại linh kiện này.

- Khi linh kiện sử dụng như một bộ phận kênh, ánh sáng từ sợi quang đi ra được chuẩn trực bằng thấu kính L1 (gọi là thấu kính chuẩn trực) và đi qua phần tử tán sắc cạnh và nó được phân chia thành các kênh có bước sóng đi vào các chùm tia có định hướng không gian khác nhau. Thấu kính L2 (thấu kính hội tụ) sẽ hội tụ các tia đầu ra vào các sợi quang thu thích hợp hoặc các bộ tách quang thích hợp.

Nguyên lý ghép kênh theo bước sóng quang (WDM)

Ghép/tách tín hiệu



Hình 6.10. Sơ đồ chức năng hệ thống WDM

Nguyên lý ghép kênh theo bước sóng quang (WDM)

- **Ghép tín hiệu WDM** là sự kết hợp một số nguồn sáng khác nhau thành một luồng tín hiệu ánh sáng tổng hợp để truyền dẫn qua sợi quang. Tách tín hiệu WDM là sự phân chia luồng ánh sáng tổng hợp đó thành các tín hiệu ánh sáng riêng rẽ tại mỗi cổng đầu ra bộ tách. Hiện tại đã có các bộ tách/ghép tín hiệu WDM như: bộ lọc màng mỏng điện môi, cách tử Bragg sợi, cách tử nhiễu xạ, linh kiện quang tổ hợp AWG, bộ lọc Fabry-Perot...
- Khi dùng bộ tách/ghép WDM, ta phải xét các tham số như: khoảng cách giữa các kênh, độ rộng băng tần của các kênh bước sóng, bước sóng trung tâm của kênh, mức xuyên âm giữa các kênh, tính đồng đều của kênh, suy hao xen, suy hao phản xạ, xuyên âm đầu gần đầu xa...

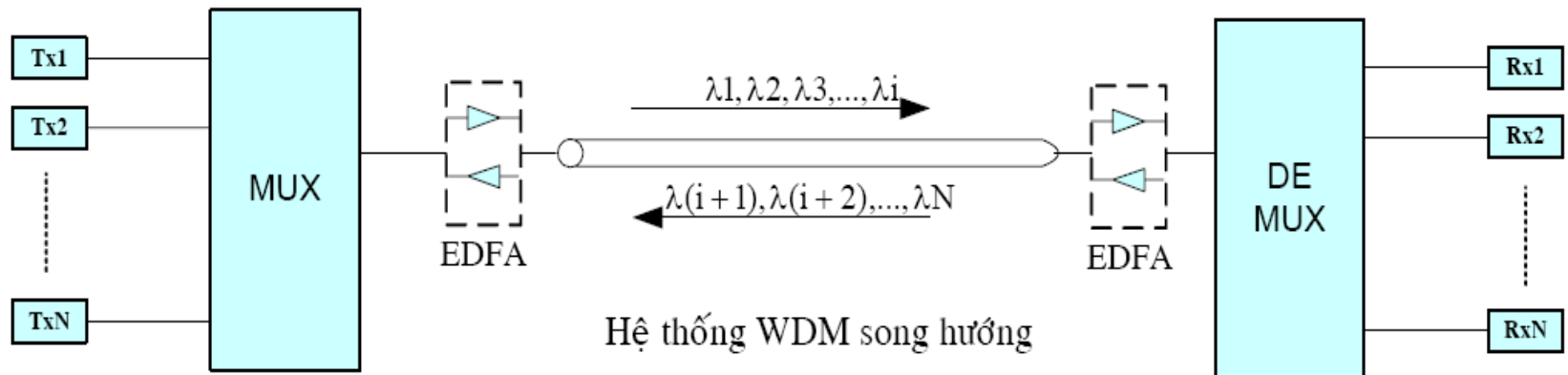
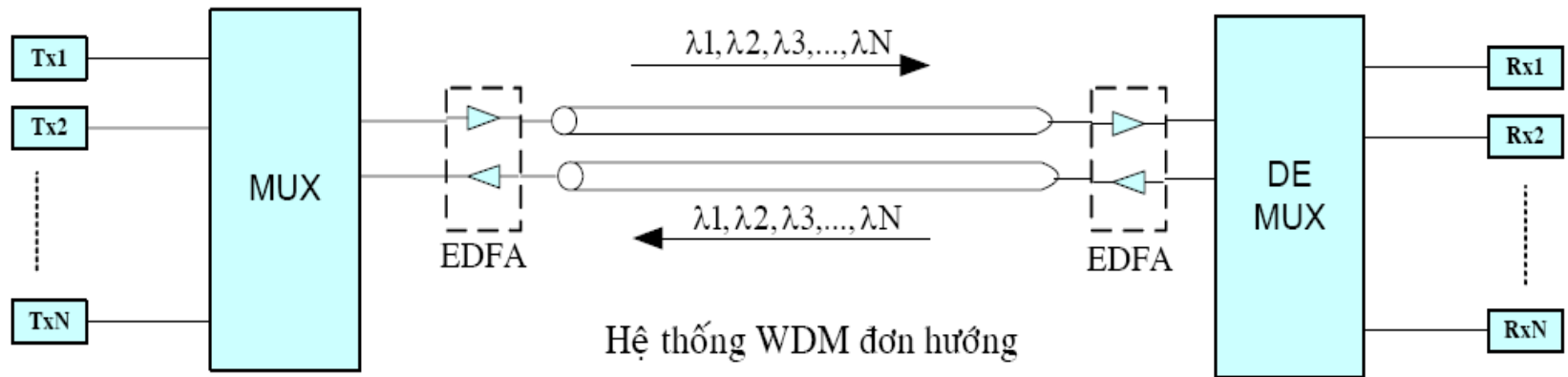
Nguyên lý ghép kênh theo bước sóng quang (WDM)

Truyền dẫn tín hiệu

- Quá trình truyền dẫn tín hiệu trong sợi quang chịu sự ảnh hưởng của nhiều yếu tố: suy hao sợi quang, tán sắc, các hiệu ứng phi tuyến, vấn đề liên quan đến khuếch đại tín hiệu ... Mỗi vấn đề kể trên đều phụ thuộc rất nhiều vào yếu tố sợi quang (loại sợi quang, chất lượng sợi...)
- **Khuếch đại tín hiệu**
- Có ba chế độ khuếch đại: khuếch đại công suất, khuếch đại đường và tiền khuếch đại.
- **Thu tín hiệu**
- Thu tín hiệu trong các hệ thống WDM cũng sử dụng các bộ tách sóng quang như trong hệ thống thông tin quang thông thường: PIN, APD.

Nguyên lý ghép kênh theo bước sóng quang (WDM)

Phân loại hệ thống WDM



Nguyên lý ghép kênh theo bước sóng quang (WDM)

Ưu nhược điểm của 2 hệ thống trên

- Hệ thống WDM về cơ bản chia làm hai loại: hệ thống đơn hướng và song hướng. Hệ thống đơn hướng chỉ truyền theo một chiều trên sợi quang. Do vậy, để truyền thông tin giữa hai điểm cần hai sợi quang. Hệ thống WDM song hướng, ngược lại, truyền hai chiều trên một sợi quang nên chỉ cần 1 sợi quang để có thể trao đổi thông tin giữa 2 điểm.
- Xét về dung lượng, hệ thống đơn hướng có khả năng cung cấp dung lượng cao gấp đôi so với hệ thống song hướng. Ngược lại, số sợi quang cần dùng gấp đôi so với hệ thống song hướng.
- Khi sự cố đứt cáp xảy ra, hệ thống song hướng không cần đến cơ chế chuyển mạch bảo vệ tự động APS (Automatic Protection-Switching) vì cả hai đầu của liên kết đều có khả năng nhận biết sự cố một cách tức thời.

Nguyên lý ghép kênh theo bước sóng quang (WDM)

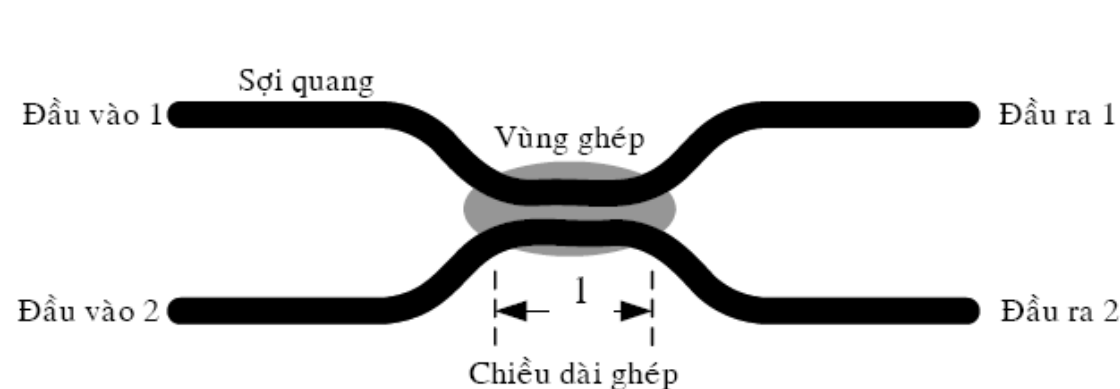
Các linh kiện trong hệ thống WDM

- Các linh kiện được sử dụng trong các mạng quang hiện đại bao gồm
- các bộ ghép/tách (couplers)
- bộ phát laser (lasers)
- bộ tách quang (photodetectors)
- bộ khuếch đại quang (optical amplifiers)
- bộ chuyển mạch quang (optical switches)
- bộ lọc (filters)
- bộ ghép/tách kênh (multiplexers).

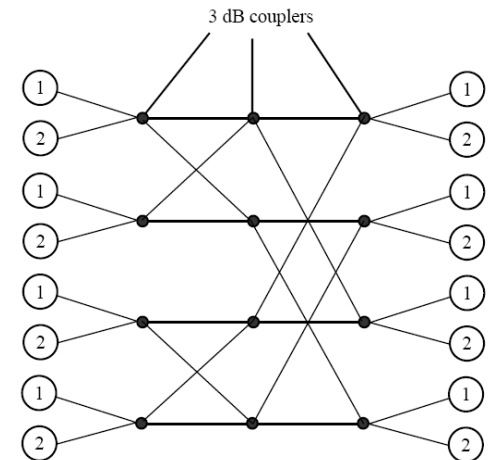
Bộ ghép/tách tín hiệu (Coupler)

Định nghĩa

Bộ ghép/tách tín hiệu (Coupler) là thiết bị quang dùng để kết hợp các tín hiệu truyền đến từ các sợi quang khác nhau. Nếu coupler chỉ cho phép ánh sáng truyền qua nó theo một chiều, ta gọi là coupler có hướng (directional coupler). Nếu nó cho phép ánh sáng đi theo 2 chiều, ta gọi là coupler song hướng (bidirectional coupler).



Hình 6.13. Cấu tạo coupler FBT 2 x 2



Hình 6.14. Coupler hình sao với 8 ngõ vào và 8 ngõ ra

Bộ ghép/tách tín hiệu (Coupler)

- ***Nguyên lý hoạt động***

Khi hai sợi quang được đặt cạnh nhau, ánh sáng sẽ được ghép từ sợi này sang sợi kia và ngược lại. Đó là do quá trình truyền một ánh sáng trên sợi quang qua vùng ghép sẽ khác so với truyền trên sợi quang đơn. Khi đó, toàn bộ ánh sáng thuộc một sợi quang sẽ được ghép hoàn toàn sang sợi quang ghép với nó, phần ánh sáng này lại tiếp tục được ghép ngược trở lại sang sợi quang ban đầu theo một chu kỳ tuần hoàn khép kín. Kết quả ta có cường độ trường điện từ ở đầu ra của bộ ghép

- ***Ứng dụng***

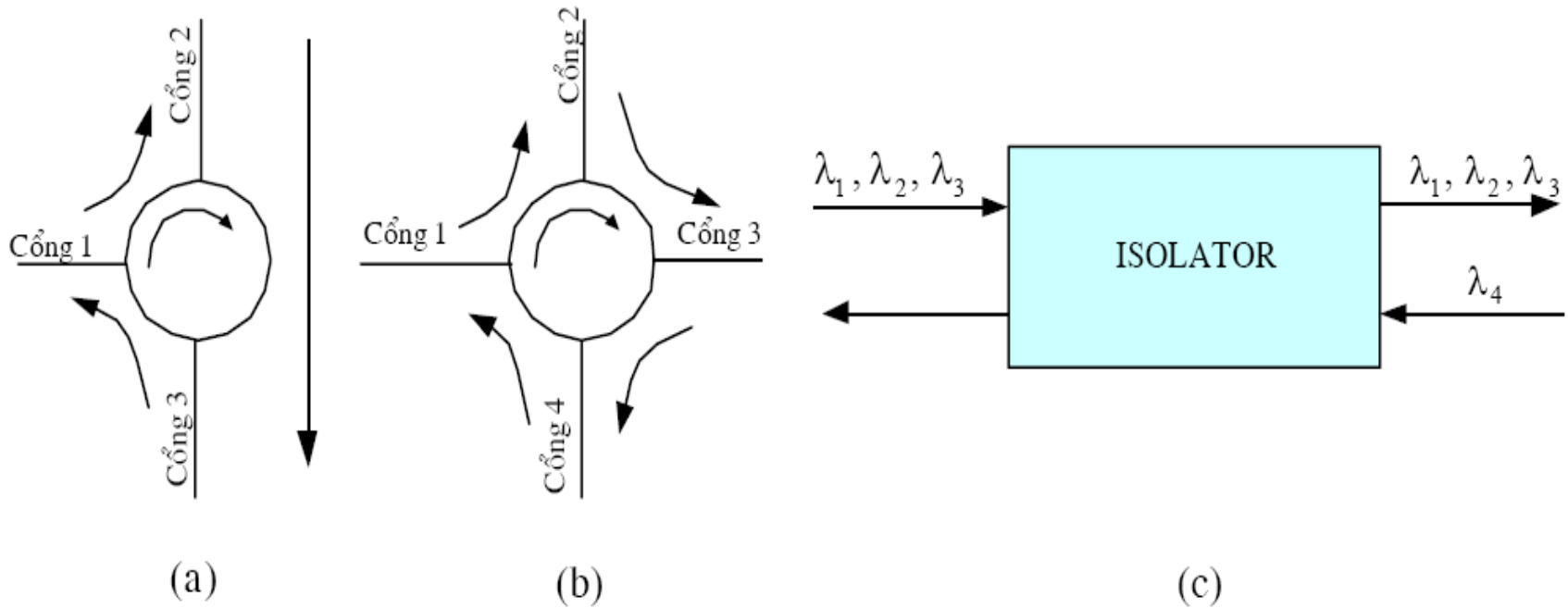
- Bộ coupler với tỉ số ghép $\alpha \approx 1$ được dùng để trích một phần nhỏ tín hiệu quang, phục vụ cho mục đích giám sát.
- Coupler còn là bộ phận cơ bản để tạo nên các thành phần quang khác, chẳng hạn như: các bộ chuyển mạch tĩnh, các bộ điều chế, bộ giao thoa..
- Thực hiện ghép/tách bước sóng trên sợi quang. Coupler 2 x 2 ghép 50:50 phân bố công suất ánh sáng từ một đầu vào ra làm 2 phần bằng nhau ở 2 ngõ ra. Coupler này còn được gọi là coupler 3 dB, ứng dụng phổ biến nhất.

Bộ isolator/circulator

- Isolator là thiết bị không thuận ngược (nonreciprocal). Nó chỉ truyền ánh sáng qua nó theo một chiều và ngăn không cho truyền theo chiều ngược lại. Nó được dùng tại đầu ra của các thiết bị quang (bộ khuếch đại, nguồn phát laser) để ngăn quá trình phản xạ ngược trở lại các thiết bị đó, gây nhiễu và hư hại thiết bị. Hai tham số chính của Isolator là suy hao xen và độ cách ly.
- Circulator cũng thực hiện chức năng tương tự như bộ Isolator nhưng nó thường có nhiều cổng, thường là 3 hoặc 4 cửa. Chính vì sự tương đồng giữa hai loại thiết bị, ta sẽ chỉ trình bày hoạt động của bộ Isolator mà thôi.

Bộ isolator/circulator

Sơ đồ khối của bộ isolator/circulator



Hình 6.15.

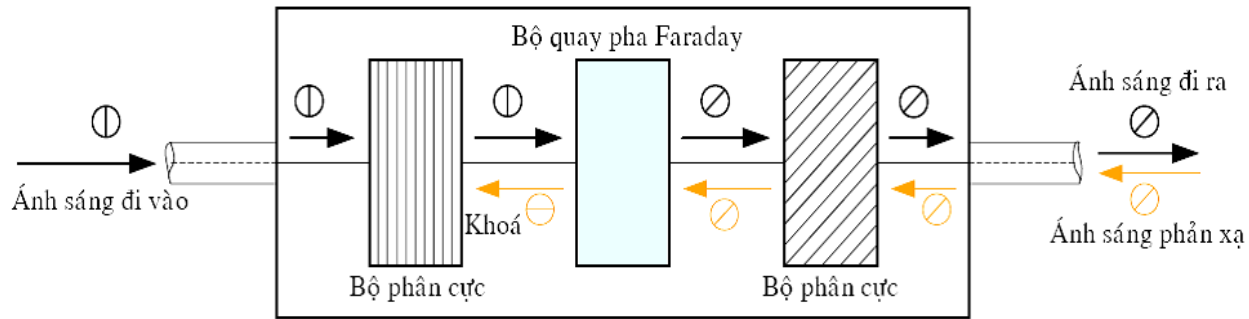
(a) Sơ đồ khối của bộ Circulator 3 cửa.

(b) Sơ đồ khối của bộ Circulator 4 cửa.

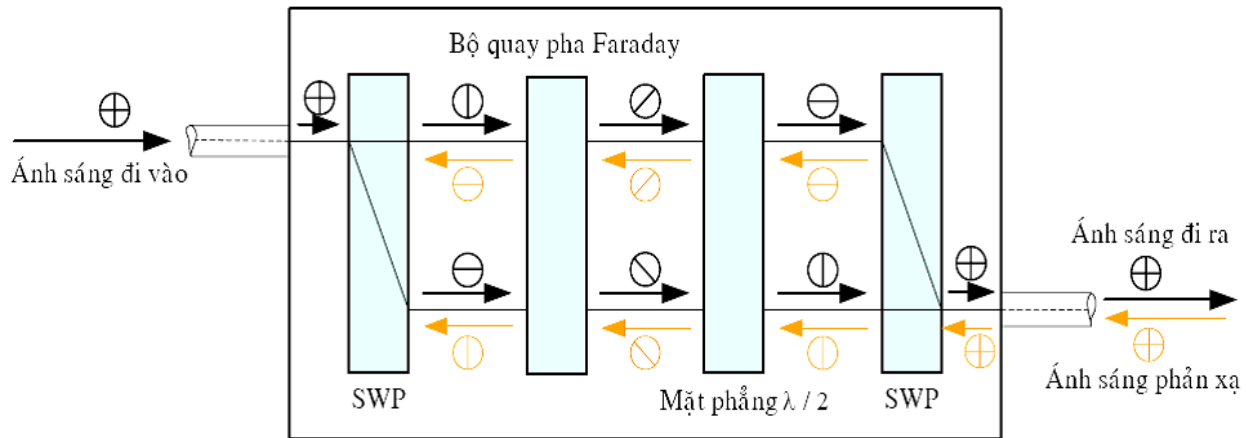
(c) Sơ đồ khối của bộ Isolator.

Bộ isolator/circulator

Nguyên lý hoạt động



(a)



- (a) Cấu tạo bộ Isolator khi ánh sáng vào phân cực dọc.
(b) Cấu tạo bộ Isolator khi ánh sáng vào phân cực bất kỳ.

Bộ isolator/circulator

Nguyên lý hoạt động

Ánh sáng truyền trong sợi quang với trạng thái phân cực bất kì được đưa đến bộ tách/ghép trạng thái phân cực SWP (Spatial Walk-off Polarizer), tách thành hai dòng tín hiệu phân cực dọc và ngang theo hai đường độc lập nhau. Tiếp theo, đến bộ quay pha Faraday, quay pha 45° theo chiều kim đồng hồ. Mặt phẳng $\lambda/2$ (Half-wave plate) thực hiện quay pha 45° theo chiều kim đồng hồ đối với tín hiệu truyền từ trái sang phải, quay pha 45° theo chiều ngược kim đồng hồ theo chiều truyền ngược lại. Cuối cùng, tín hiệu ở hai nhánh được kết hợp lại nhờ bộ SWP thứ hai. Nếu theo chiều ngược lại, hai bộ SWP sẽ khử lẫn nhau. Ánh sáng truyền qua bộ SWP thứ hai, qua bộ quay pha Faraday sẽ không thể kết hợp lại được tại bộ SWP thứ nhất như minh họa trên Hình 6.16.

Bộ isolator/circulator

Ứng dụng

- *Bộ Isolator và Circulator có những ứng dụng sau:*
- *Bộ Isolator thường đứng trước đầu ra bộ khuếch đại quang hoặc nguồn phát laser để ngăn ánh sáng phản xạ ngược trở lại thiết bị gây nhiễu và có thể làm hư thiết bị.*
- *Bộ Circulator được dùng như một bộ phận để chế tạo phần tử xen rớt quang OADM.*

THUYẾT TRÌNH QUANG ĐIỆN TỬ

KHẢO SÁT

GHÉP QUANG VÀ KHUẾCH ĐẠI QUANG

GVHD: Thầy giáo Hoàng Phú An
Phó trưởng khoa Điện - Điện tử

SVTH:

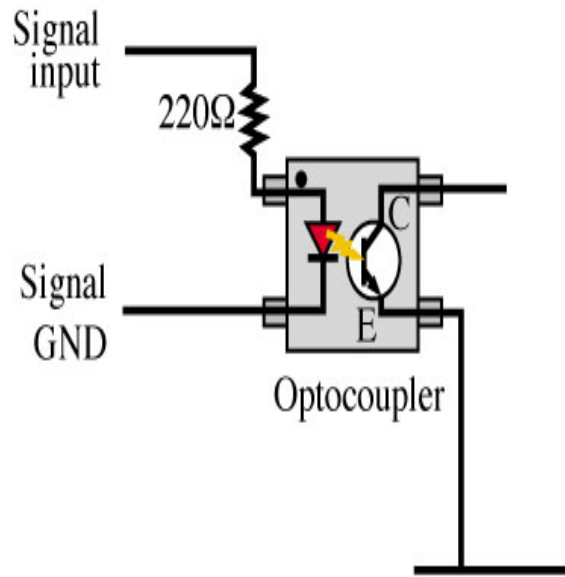
1. Vũ Văn Tài
2. Nguyễn Duy Thìn
3. Nguyễn Văn Trung
4. Nguyễn Thị Kiều
5. Ngô Tiến Huân

Các vấn đề cơ bản

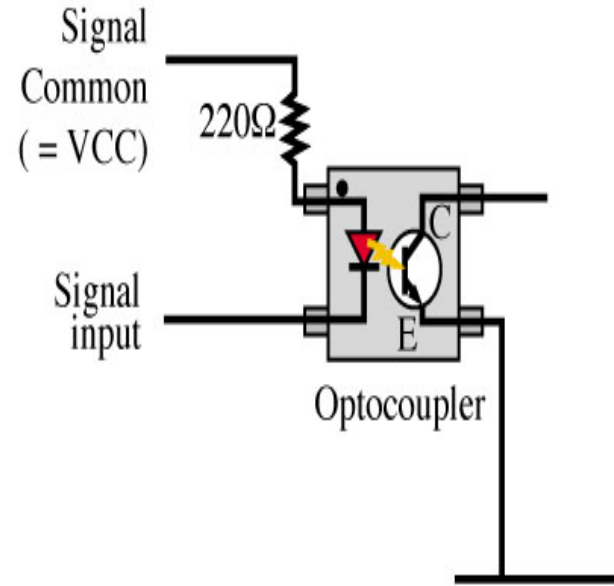
- Ghép quang
- Bộ ghép quang với photothyristor và phototriac,.....
- Khuếch đại quang
- Bộ khuếch đại quang bán dẫn (SOA)
- Bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium (EDFA)
- Bộ khuếch đại quang RAMAN (RA)

Bộ ghép quang

- Cơ chế hoạt động



(a) Optocoupler switches on if Signal input is HIGH



(b) Optocoupler switches on if Signal input is LOW

Hình 7.1. Opto-Couplers

Bộ ghép quang và cơ chế hoạt động

1. Ghép quang

Bộ ghép quang còn gọi là Photo coupled isolator, Photo-couplers, Photo-coupled pairs và Optically Coupled pairs. Từ thông thường nhất cho linh kiện này là Opto-Couplers. Bộ ghép quang dùng để truyền đạt tín hiệu và đồng thời tạo sự cách điện giữa những mạch điện. Ngoài ra nó còn dùng tránh các vòng đất (ground circuit circuit terrestre) gây nhiễu trong mạch điện. Sự truyền đạt tín hiệu được thực hiện qua ánh sáng.

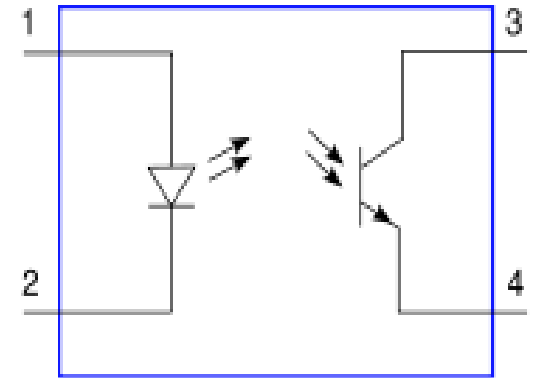
2. Cơ chế hoạt động

Thông thường bộ ghép quang gồm 1 diot với vật liệu bán dẫn loại III/V (v.d.GaAs) phát ra tia hồng ngoại và 1 phototransistor với vật liệu silic. Với dòng điện thuận, diot phát ra bức xạ hồng ngoại với chiều dài sóng khoảng 650-950nm. Dòng điện thuận IF có cường độ khoảng 1-30mA.

Cơ chế hoạt động của bộ ghép quang

Năng lượng bức xạ này được chiếu lên trên bề mặt của phototransistor (face to face) hay chiếu gián tiếp qua một môi trường dẫn quang. Bộ ghép quang face to face thường được dùng nhất.

Đầu tín hiệu được phần phát (LED hồng ngoại) trong bộ ghép quang biến thành tín hiệu ánh sáng. Sau đó tín hiệu ánh sáng được phần nhận (photodiode, phototransistor, IC có tổ hợp diode) biến lại thành tín hiệu điện



Hình 7.2. Nguyên lý làm việc của Opto-Couplers

Các tính chất quan trọng của bộ ghép quang

- **Tính cách điện**

Bộ ghép quang thường được dùng để cách điện giữa 2 mạch điện có điện thế cách biệt khá lớn. Bộ ghép quang có thể làm việc với dòng điện 1 chiều hay tín hiệu điện có tần số khá cao.

- **Điện trở cách điện**

Đó là điện trở với dòng điện 1 chiều giữa ngõ vào và ngõ ra của bộ ghép quang. Nó có trị số bé nhất là $10^{11}\Omega$, như thế đủ đáp ứng yêu cầu thông thường

- **Điện dung ghép nối**

Cấu trúc của bộ ghép quang gồm có phototransistor, LED, phần cơ. Giữa các phần tử này có thể tạo ra 1 điện dung từ 0.3...2pF. Điện dung này được đo khi chân ở ngõ vào cũng như chân ở ngõ ra được nối tắt.

Các tính chất quan trọng của bộ ghép quang

- **Điện thế cách ly**

Điện thế cách ly là điện thế cao nhất giữa ngõ vào và ra mà bộ ghép quang có thể chịu đựng nổi. Điện thế cách ly còn tùy thuộc vào cấu trúc của bộ ghép quang, không khí...

- **Hiệu ứng trường**

Dưới 1 một thế khá cao giữa LED và phototransistor có khoảng cách khá gần, ta có 1 điện trường khá lớn. Nếu bộ ghép quang làm việc với điều kiện như thế liên tục vài ngày, các thông số của bộ ghép quang (đặc biệt là phototransistor) bị thay đổi.

- **Sự lão hoá**

Với thời gian, công suất phát sáng của LED bị giảm đi, do đó ta có hệ số truyền đạt của 1 bộ ghép quang bé đi. Để cho bộ ghép quang làm việc lâu dài không bị lão hoá nhanh, nhiệt độ xung quanh và dòng điện làm việc càng thấp càng tốt.

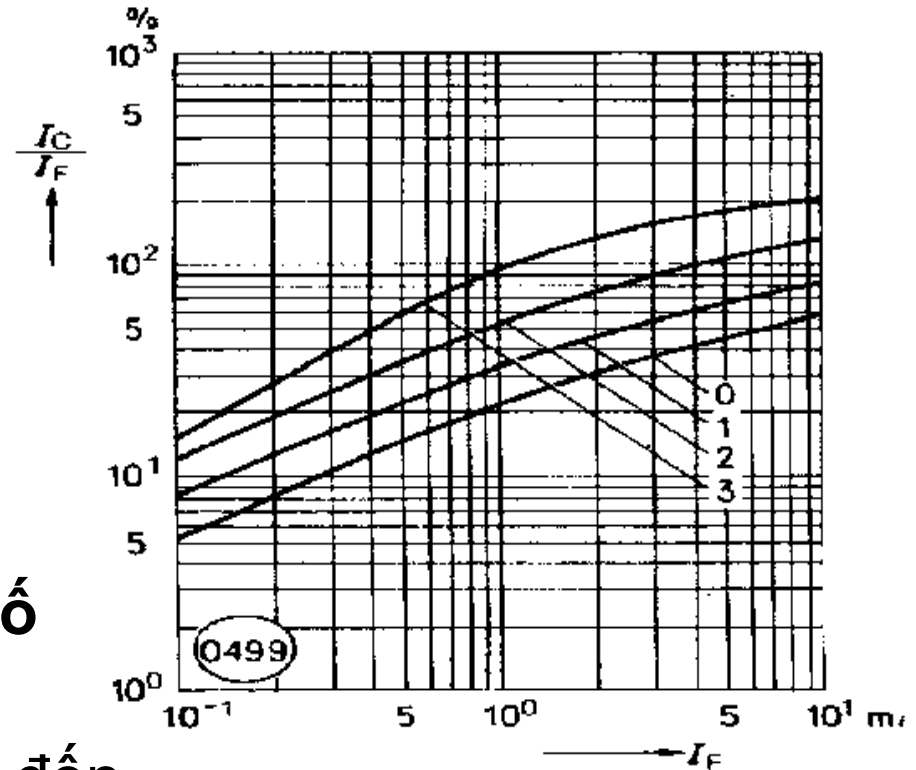
Các tính chất quan trọng của bộ ghép quang

- **Hệ số truyền đạt**

Hệ số truyền đạt (current transfer ratio-CTR) giống như độ khuếch đại dòng điện của 1 transistor. Hệ số truyền đạt là hệ số tính theo phần trăm cho biết dòng điện đi ra

- **Độ rộng dải tần số - Tần số truyền đạt:**

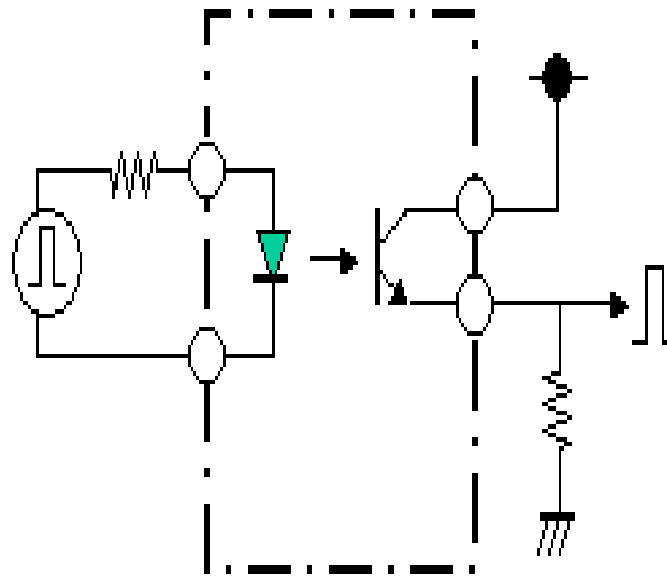
- Bộ ghép quang loại transistor đến 250kHz
- Bộ ghép quang với bộ nhận tổ hợp đơn giản (photodiode, transistor nhanh) đến 2MHz
- Bộ ghép quang với bộ nhận là mạch tổ hợp (IC) đến 20 MHz



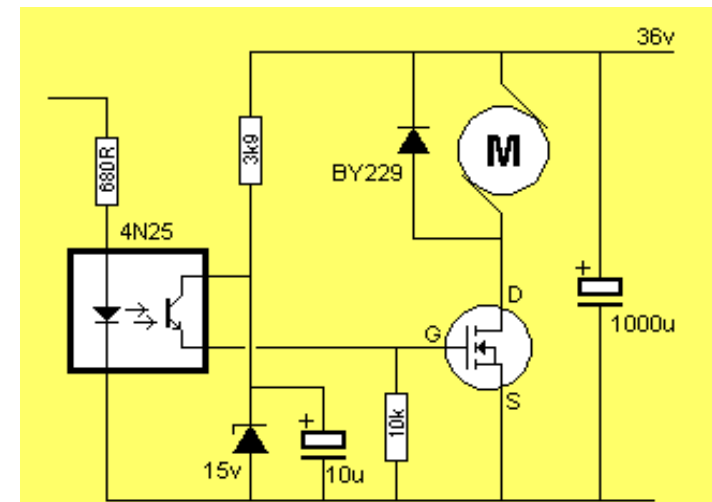
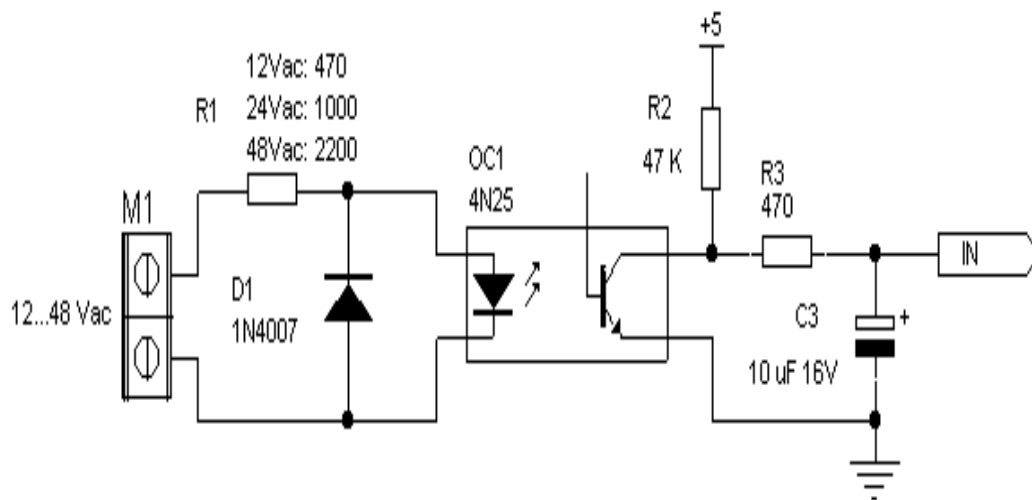
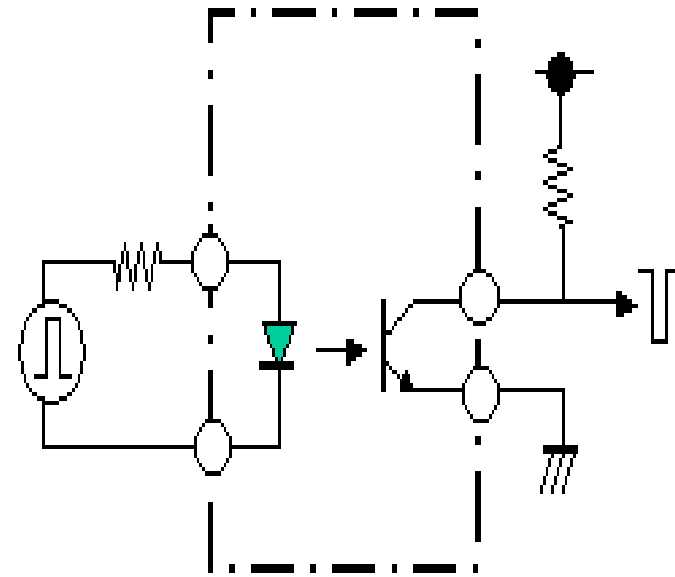
Hình 7.3. Hệ số truyền đạt

Bộ ghép quang với phototransistor

Emitter output



Collector output



Bộ ghép quang với phototransistor

Thông thường cực gốc của phototransistor được nối ra ngoài (ví dụ trong trường hợp với mạch phản hồi). Tuy nhiên bộ ghép quang vẫn làm việc trong trường hợp không có cực gốc, trong trường hợp không có cực gốc, bộ ghép quang có hệ số truyền đạt giữa LED và phototransistor lớn hơn, vì bề mặt cực gốc không bị che lấp 1 phần bởi công tắc của cực gốc. Tuy nhiên không có cực gốc bộ ghép quang vẫn có những bất lợi

Bộ ghép quang làm việc không ổn định với nhiệt độ cao (vì dòng điện ngược tăng cao với nhiệt độ).

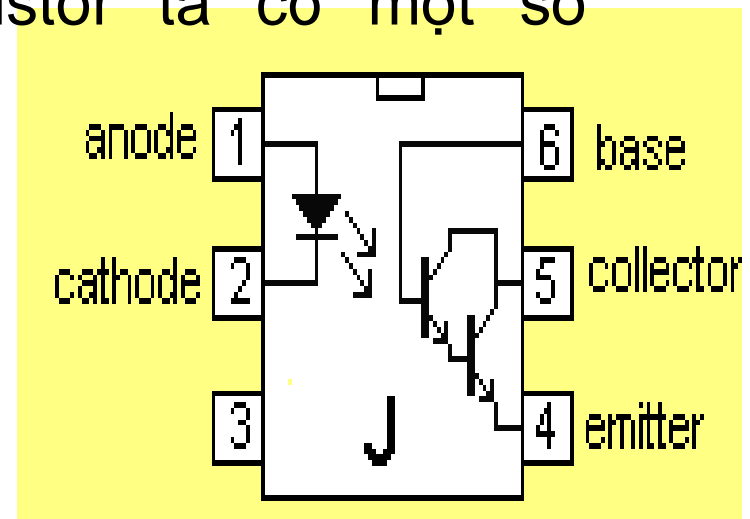
- + Bộ ghép quang làm việc chậm hơn. Nếu ta nối giữa cực gốc và cực phát 1 điện trở bộ ghép quang làm việc nhanh hơn, dòng điện ngược bé hơn. Tuy nhiên hệ số truyền đạt cũng bé đi vì 1 phần dòng điện của cực gốc bị dẫn đi mất.
- + *Cường độ sáng của LED bị giảm đi, nhưng dòng quang điện của phototransistor gia tăng khi nhiệt độ tăng cao. Do đó bộ ghép quang làm việc khá ổn định với nhiệt độ.*

Bộ ghép quang với photo-darlingtontransistor

Hoạt động của một bộ ghép quang với photo-darlingtontransistor giống như với 1 phototransistor, nhưng với hệ số truyền đạt lớn hơn (từ 200...1500) nhờ sự khuếch đại khá lớn của darlington-transistor. Tuy nhiên với photo darlington-transistor ta có một số nhược điểm

- Thời gian đóng mở chậm
- Dòng tối tăng
- Tùy thuộc nhiều vào nhiệt độ.

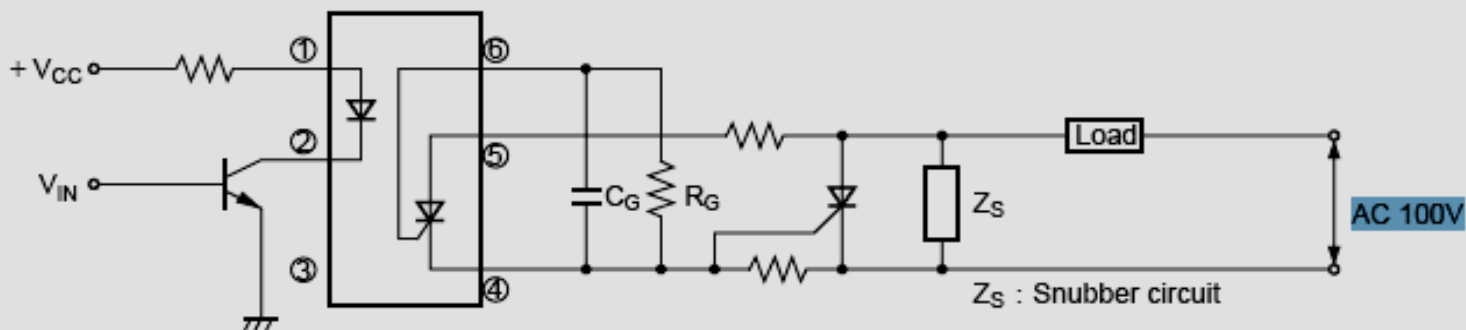
Không có điện trở, bộ ghép quang có hệ số truyền đạt lớn với dòng điện qua diot nhỏ, nhưng bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ rất lớn. Với điện trở (trong khoảng $M\Omega$) bộ ghép quang có hệ số truyền đạt bé hơn nhưng làm việc tốt với nhiệt độ cao.



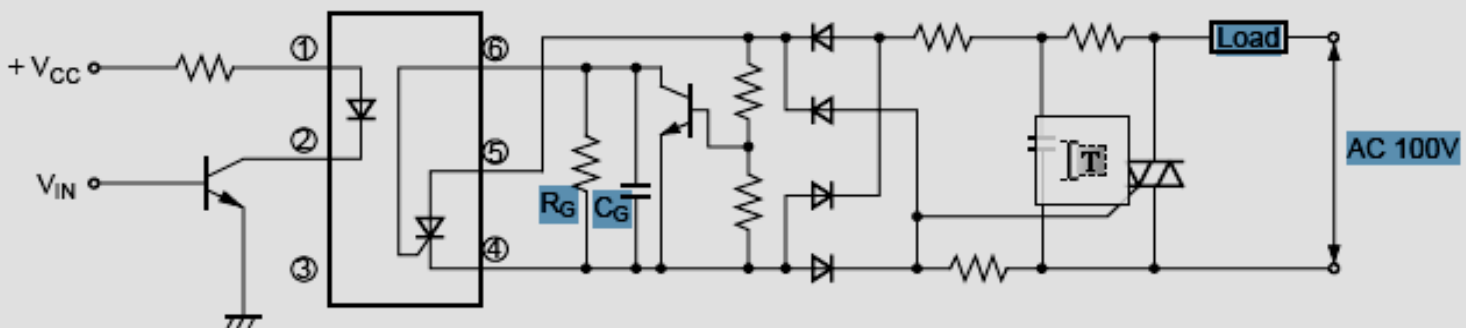
Bộ ghép quang với photothyristor và phototriac

Basic Operation Circuit

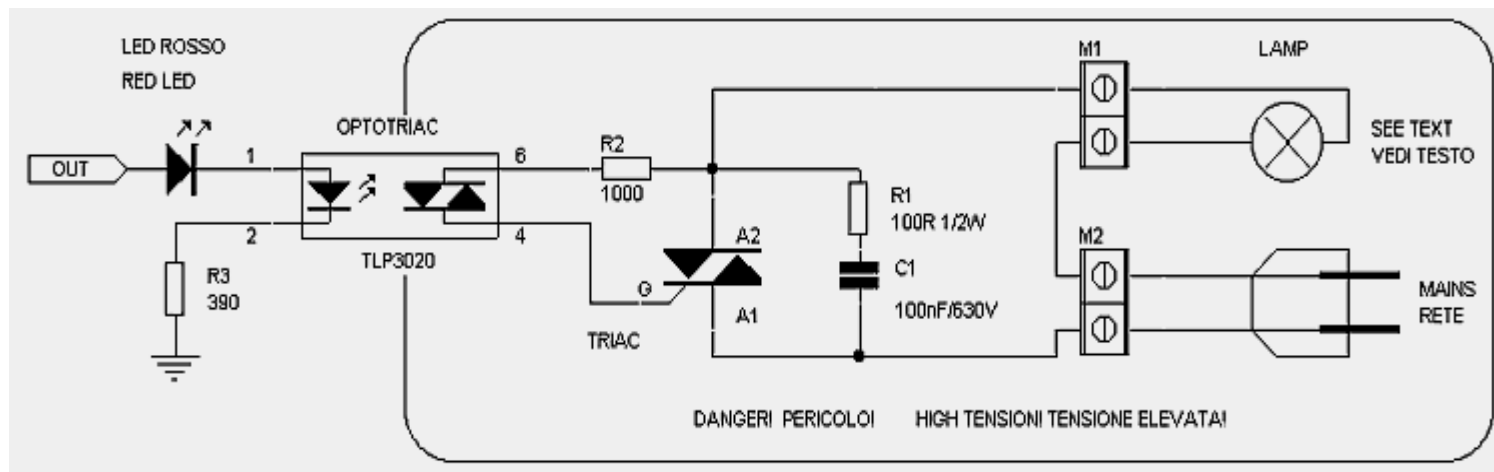
Medium/High Power Thyristor Drive Circuit



Medium/High Power Triac Drive Circuit (Zero-cross Operation)



Bộ ghép quang với photothyristor và phototriac



Với ánh sáng ,ta có dòng điện **IB** làm thông photothyristor dẫn điện .Để cho photoristor nhạy với ánh sáng nó chỉ có thể làm việc với điện áp và dòng điện bé vì cấu trúc của nó bé và mỏng. Khi điện thế và cường độ dòng điện thay đổi nhanh theo thời gian ,trị số dV/dt và di/dt khá lớn ,thyristor có thể tự kích và dẫn điện ngoài ý muốn.Để chống lại hiệu ứng này,ta có thể nối 1 điện trở R_{gk} giữa catôt và Gate.Với trị số R_{gk} bé ,chống nhiễu dV/dt tốt

Đặc tính các linh kiện ghép tín hiệu

Linh kiện	Ưu điểm	Khuyết điểm
Bộ ghép quang	<ul style="list-style-type: none"> - Kinh tế , rẻ tiền - Có thể chế tạo với vật liệu bán dẫn - Làm việc từ tín hiệu 1 chiều đến tín hiệu xoay chiều với tần số cao - cách điện tốt đến vài KV - Tổng trở cách điện cao - Kích thước nhỏ - Không có công tắc nên không bị nảy - Công suất tiêu thụ ít 	<ul style="list-style-type: none"> - Khi ngắt điện hay dẫn điện đều có một điện trở giới hạn (điện trở không thể bằng zero hay vô cực) - Dòng điện khi dẫn điện và điện áp khi ngắt điện đều có trị số giới hạn - Hệ số truyền đạt CTR thấp.
Rơ-le	<ul style="list-style-type: none"> - Làm việc với công suất lớn - Khi dẫn điện có điện trở rất thấp - Có thể truyền tín hiệu 1 chiều - Cách điện tốt 	<ul style="list-style-type: none"> -Đắt tiền vì má rơ-le làm bằng kim loại quý -Công suất tiêu thụ cao -Vận tốc làm việc rất chậm -Kích thước lớn
Biên thể xung	<ul style="list-style-type: none"> -Truyền tín hiệu với vận tốc cao. -Kích thước trung bình -Có hệ số truyền đạt tốt 	<ul style="list-style-type: none"> -Không thể truyền tín hiệu 1 chiều hay xoay chiều có tần số thấp -<u>Đề</u> cách <u>điện</u>(có tổng trở cao hay điện thế cao)rất đắt tiền .
IC phát và nhận tín hiệu đường dài	<ul style="list-style-type: none"> -Có thể chế tạo với vật liệu bán dẫn -Kích thước bé (Dip)/Truyền tin với vận tốc cao -Có thể truyền tín hiệu DC rẻ tiền. 	<ul style="list-style-type: none"> -Tổng trở cách điện bé -Điện thế đánh thủng rất thấp $\leq 30v$.

Khuếch đại quang

Khuếch đại quang

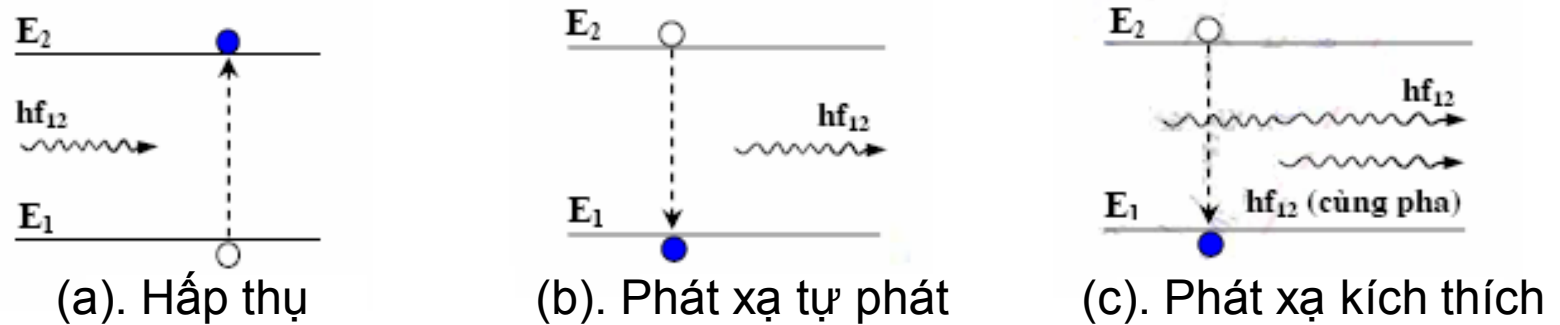
Trong các bộ khuếch đại quang (Optical Amplifier) tín hiệu ánh sáng được khuếch đại trực tiếp trong miền quang mà không thông qua việc biến đổi sang miền điện. Các bộ khuếch đại quang có các ưu điểm sau:

- Không phụ thuộc vào tốc độ bit và phương thức điều chế tín hiệu nên nâng cấp hệ thống
- Khuếch đại nhiều tín hiệu có bước sóng khác nhau cùng truyền trên một sợi quang.

Nguyên lý khuếch đại quang

Nguyên lý khuếch đại quang trong các bộ khuếch đại quang được thực hiện dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích và không có sự cộng hưởng xảy ra trong quá trình khuếch đại.

Các hiện tượng biến đổi quang điện



Hình 7.8. Các hiện tượng biến đổi quang điện

1. Hiện tượng phát xạ kích thích, **hình c**, xảy ra khi một điện tử đang ở trạng thái năng lượng cao E_2 bị kích thích bởi một photon có năng lượng hf_{12} bằng với độ chênh lệch năng lượng giữa trạng thái năng lượng cao và trạng thái năng lượng thấp của điện tử ($E_g = E_2 - E_1$). Khi đó, điện tử sẽ chuyển từ trạng thái năng lượng cao xuống trạng thái năng lượng thấp hơn và tạo ra một photon có năng lượng bằng với năng lượng của photon kích thích ban đầu.

Các hiện tượng biến đổi quang điện

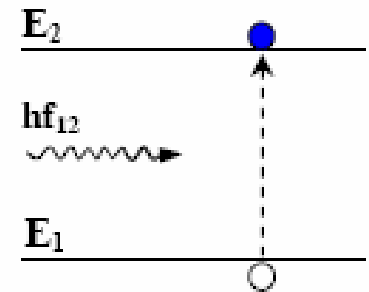
Hiện tượng phát xạ kích thích

- từ một photon ban đầu sau khi xảy ra hiện tượng phát xạ kích thích sẽ tạo ra hai photon (photon ban đầu và photon mới được tạo ra) có cùng phương truyền, cùng phân cực, cùng pha và cùng tần số (tính kết hợp, coherent, của ánh sáng). Hay nói cách khác, quá trình khuếch đại ánh sáng được thực hiện.
- Hiện tượng này được ứng dụng trong các bộ khuếch đại quang bán dẫn (OSA) và khuếch đại quang sợi (OFA). Hiện tượng phát xạ kích thích cũng được ứng dụng trong việc chế tạo laser.

Các hiện tượng biến đổi quang điện

- **Hiện tượng hấp thụ (absorption)**

- Hiện tượng hấp thụ, hình (a), xảy ra khi một photon có năng lượng hf_{12} bị hấp thụ bởi một điện tử ở trạng thái năng lượng thấp. Quá trình này chỉ xảy ra khi năng lượng hf_{12} của photon bằng với độ chênh lệch năng lượng giữa trạng thái năng lượng cao và trạng thái năng lượng thấp của điện tử ($E_g = E_2 - E_1$).



(a)

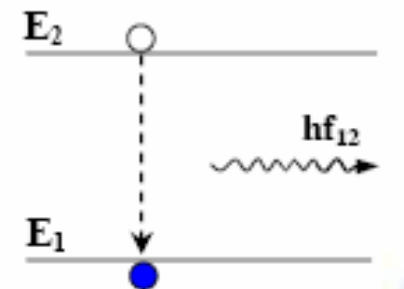
Hiện tượng hấp thụ

- Khi xảy ra hiện tượng hấp thụ, điện tử sẽ nhận năng lượng từ photon và chuyển lên trạng thái năng lượng cao. Hay nói cách khác, hiện tượng hấp thụ là nguyên nhân gây suy hao cho tín hiệu quang khi đi qua bộ khuếch đại quang. Quá trình này xảy ra đồng thời với hai hiện tượng phát xạ tự phát và phát xạ kích thích trong môi trường tích cực (active medium) của bộ khuếch đại.

Các hiện tượng biến đổi quang điện

- **Hiện tượng phát xạ tự phát (spontaneous emission)**

Hiện tượng phát xạ tự phát, hình (b), xảy ra khi một điện tử chuyển trạng thái năng lượng từ mức năng lượng cao E_2 xuống mức năng lượng thấp E_1 và phát ra một năng lượng $E_g = E_2 - E_1$ dưới dạng một photon ánh sáng. Quá trình này xảy ra một cách tự nhiên vì trạng thái năng lượng cao E_2 không phải là trạng thái năng lượng bền vững của điện tử.

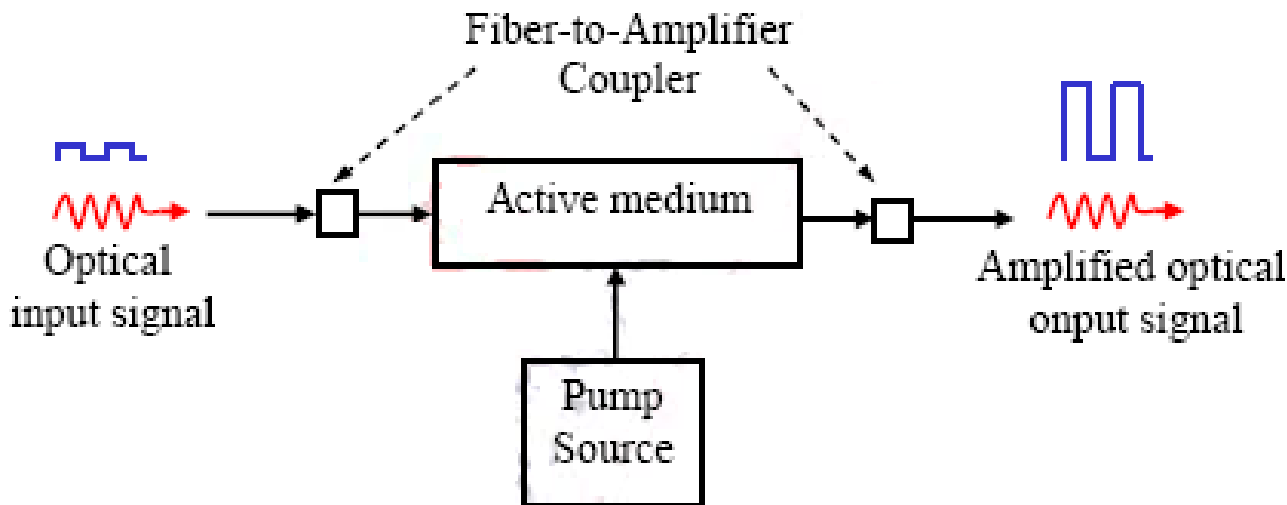


(b). Phát xạ tự phát

Cho dù hiện tượng phát xạ tự phát tạo ra photon ánh sáng, nhưng trong khuếch đại quang, phát xạ tự phát không tạo ra độ lợi khuếch đại.

Phân loại khuếch đại quang

- Cấu tạo của một bộ khuếch đại quang có thể được biểu diễn như hình sau



Hình 7.9. Mô hình tổng quát của một bộ khuếch đại quang

Trong một bộ khuếch đại quang, quá trình khuếch đại ánh sáng được diễn ra trong một môi trường được gọi vùng tích cực (active medium). Các tín hiệu quang được khuếch đại trong vùng tích cực với độ lợi lớn hay nhỏ tùy thuộc vào năng lượng được cung cấp từ một nguồn bên ngoài gọi chung là nguồn bơm (Pump Source)

Phân loại khuếch đại quang

Tùy theo cấu tạo của vùng tích cực, có thể chia khuếch đại quang thành hai loại chính:

- Khuếch đại quang bán dẫn SOA
 - Vùng tích cực được cấu tạo bằng vật liệu bán dẫn.
 - Cấu trúc của vùng tích cực của SOA tương tự như vùng tích cực của laser bán dẫn.
 - Nguồn cung cấp năng lượng để khuếch đại tín hiệu quang là dòng điện
- Khuếch đại quang sợi OFA (Optical Fiber Amplifier)
 - Vùng tích cực là sợi quang được pha đất hiếm. Do đó, OFA còn được gọi là DFA (Doped-Fiber Amplifier)
 - Nguồn bơm là năng lượng ánh sáng được cung cấp bởi các laser có bước sóng phát quang nhỏ hơn bước sóng của tín hiệu cần khuếch đại.

Phân loại khuếch đại quang

- Trong các loại OFA này, EDFA được sử dụng phổ biến hiện nay vì có nhiều ưu điểm về đặc tính kỹ thuật so với SOA và có vùng ánh sáng khuếch đại (1530nm-1565nm) thích hợp với dải tần hoạt động của hệ thống ghép kênh theo bước sóng mật độ cao DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).
- Cả hai loại khuếch đại quang SOA và EDFA đều hoạt động dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích. Ngoài ra, một loại khuếch đại quang khác cũng được sử dụng nhiều trong các hệ thống WDM hiện nay là khuếch đại Raman. Loại khuếch đại này cũng sử dụng sợi quang làm vùng tích cực để khuếch đại ánh sáng. Tuy nhiên, nguyên lý khuếch đại của khuếch đại Raman dựa trên ảnh hưởng phi tuyến của sợi quang (hiện tượng tán xạ Raman được kích thích SRS, Stimulated Raman Scattering) hơn là hiện tượng phát xạ kích thích

Các thông số kỹ thuật của khuếch đại quang

1. Độ lợi (Gain)

Độ lợi của một bộ khuếch đại quang là tỷ số giữa công suất quang ở ngõ ra chia cho công suất quang ở ngõ vào.

Độ lợi là một thông số quan trọng của bộ khuếch đại. Nó đặc trưng cho khả năng khuếch đại công suất ánh sáng của bộ khuếch đại.

2. Băng thông độ lợi (*Gain Bandwidth*)

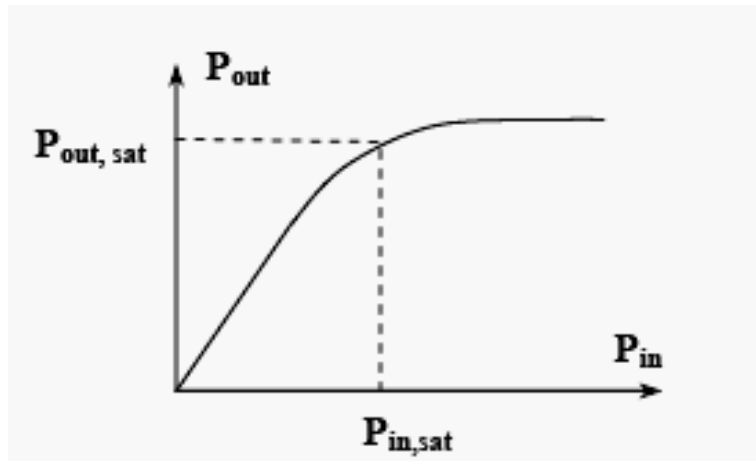
Băng thông độ lợi của bộ khuếch đại quang B-0 được xác định bởi điểm -3dB so với độ lợi đỉnh của bộ khuếch đại. Giá trị B0 xác định băng thông của các tín hiệu có thể được truyền bởi một bộ khuếch đại quang

Các thông số kỹ thuật của khuếch đại quang

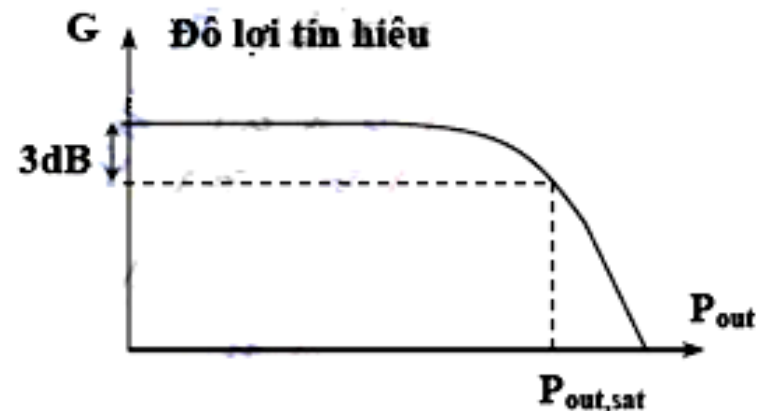
3. Công suất ngõ ra bão hòa - Saturation Output Power

Khi hoạt động ở chế độ tín hiệu nhỏ, công suất quang ở ngõ ra sẽ tăng tuyến tính với công suất quang ở ngõ vào theo hệ số độ lợi

Sự thay đổi của tín hiệu quang ngõ ra so với công suất quang ngõ vào ở được minh họa trong hình sau



Hình 7.10. Công suất ngõ ra theo công suất ngõ vào



Hình 7.11. Độ lợi khuếch đại theo công suất quang ngõ ra

Các thông số kỹ thuật của khuếch đại quang

4. Hệ số nhiễu (Noise Figure)

- Giống như các bộ khuếch đại điện, các bộ khuếch đại quang đều tạo ra nhiễu. Nguồn nhiễu chính trong các bộ khuếch đại quang là do phát xạ tự phát.
- Do đó, tại ngõ ra của bộ khuếch đại công suất quang thu được P_{out} bao gồm cả công suất tín hiệu được khuếch đại và công suất nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại ASE
- Ảnh hưởng của nhiễu đối với bộ khuếch quang được biểu diễn bởi hệ số nhiễu NF (Noise Figure), mô tả sự suy giảm tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR
- Hệ số nhiễu NF của bộ khuếch đại càng nhỏ thì càng tốt. Giá trị nhỏ nhất của NF có thể đạt được là 3dB. Những bộ khuếch đại thỏa mãn hệ số nhiễu tối thiểu này được gọi là đang hoạt động ở giới hạn lượng tử

Ứng dụng của khuếch đại quang

Khuếch đại quang được ứng dụng trong các các hệ thống truyền dẫn quang như các bộ khuếch đại nhằm làm tăng công suất của tín hiệu quang trên đường truyền

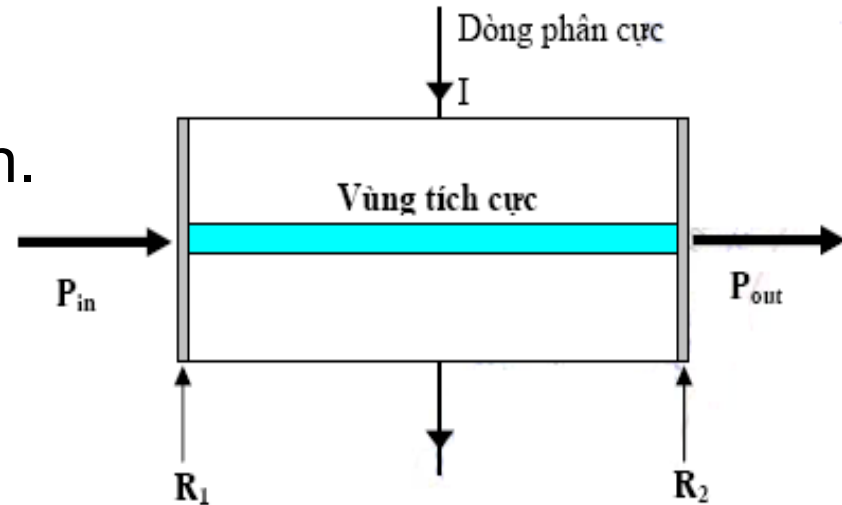
- ***Khuếch đại công suất (Booster Amplifier)***: là bộ khuếch đại quang được đặt ngay sau thiết bị phát nhằm mục đích làm tăng công suất tín hiệu quang đến mức cao nhất để làm cho khoảng cách truyền cực đại.
- ***Khuếch đại đường dây (In-line Amplifier)***: là các bộ khuếch đại quang được đặt trên tuyến quang nhằm mục đích bù mất mát công suất gây ra bởi suy hao sợi, suy hao do kết nối và suy hao do việc phân phối tín hiệu quang trong mạng.
- ***Tiền khuếch đại (Preamplifier)***: là các bộ khuếch đại quang được đặt ngay trước thiết bị thu quang nhằm khuếch đại tín hiệu ngay trước khi tín hiệu được đưa vào thiết bị.

Bộ khuếch đại quang bán dẫn (SOA)

- **Cấu trúc và nguyên lý hoạt động**

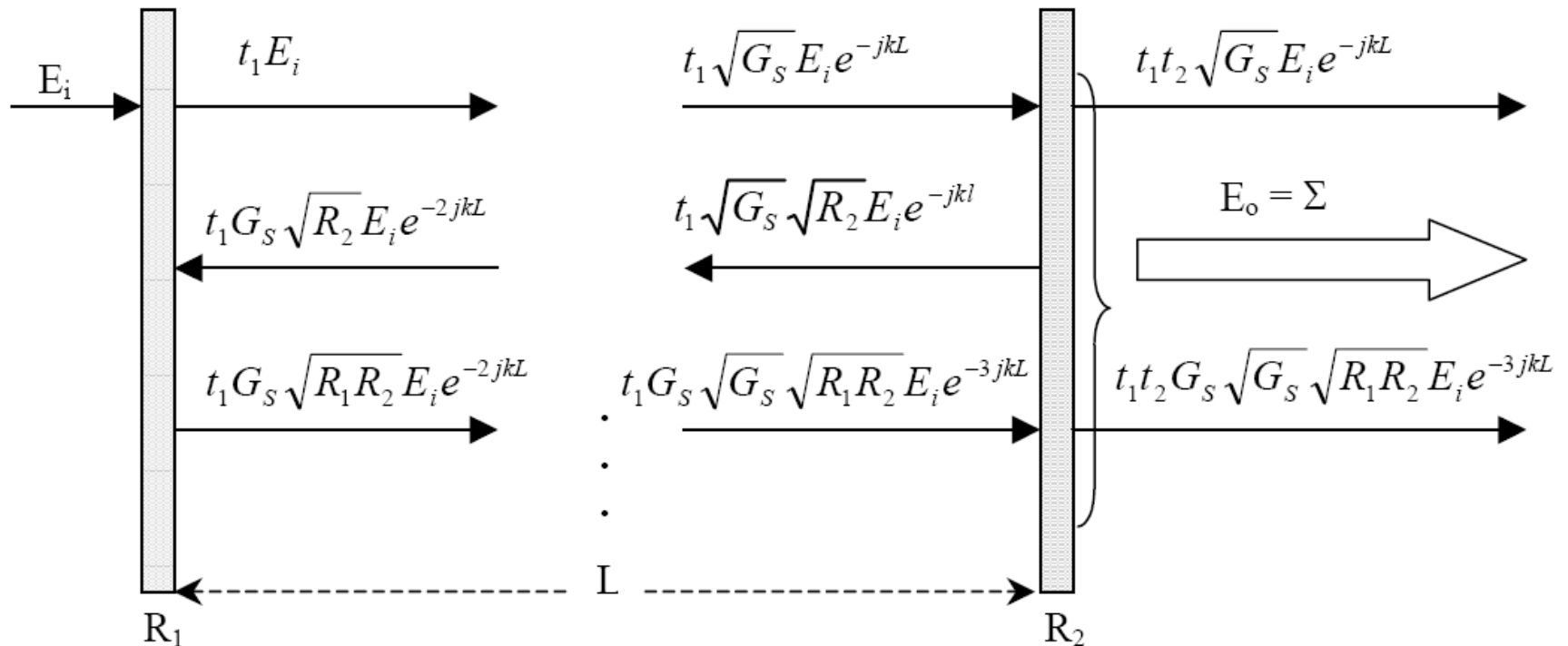
Cấu trúc và nguyên lý hoạt động của khuếch đại quang bán dẫn SOA tương tự như laser bán dẫn. Nghĩa là cũng dựa vào hệ thống hai dải năng lượng của chất bán dẫn và các quá trình biến đổi quang điện: hấp thụ, phát xạ tự phát và phát xạ kích thích

Trong đó, tín hiệu quang được khuếch đại dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích xảy ra trong vùng tích cực của SOA. Vùng tích cực này được đặt giữa hai lớp bán dẫn loại n và p. Nguồn bơm bên ngoài được cung cấp bởi dòng điện phân cực.



Hình 7.12. Cấu trúc của một bộ khuếch đại quang bán dẫn SOA

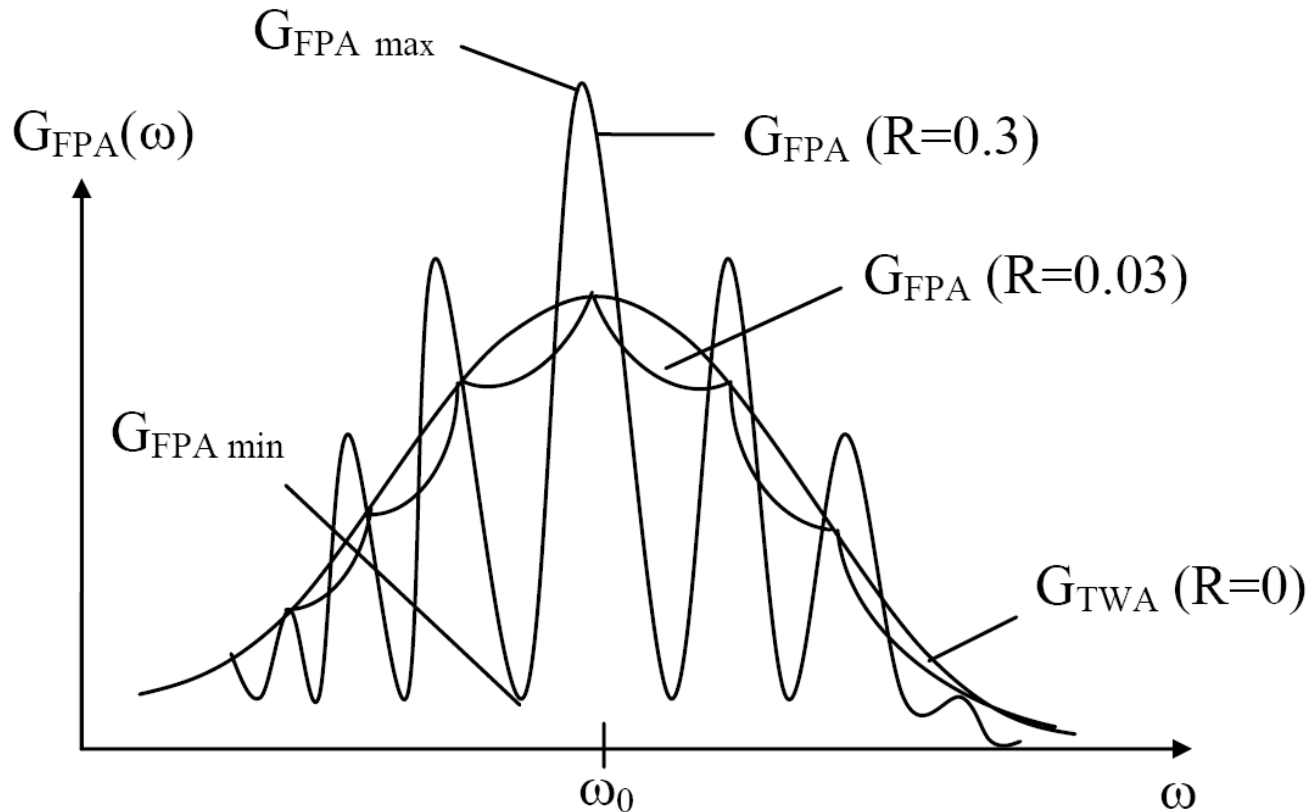
Đặc tính của bộ khuếch đại FPA



7.12. Quá trình khuếch đại tín hiệu xảy ra trong FPA

Quá trình khuếch đại tín hiệu ánh sáng trong FPA có thể được dẫn giải như sau: Điện trường của tín hiệu quang vào E_i được đưa vào hốc cộng hưởng của FPA có chiều dài L tại mặt phản xạ R_1 . Sau khi xuyên qua mặt phản xạ R_1 , tín hiệu ban đầu sẽ được khuếch đại bởi vùng tích cực

Đặc tính của bộ khuếch đại FPA

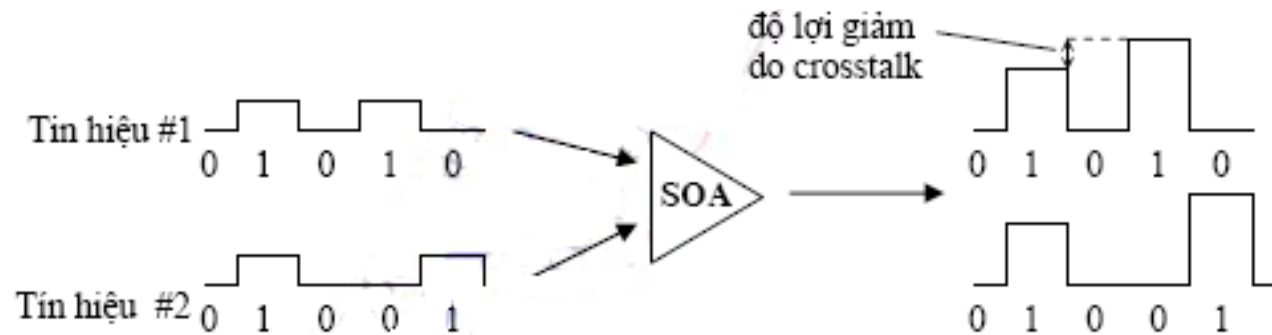


Hình 7.13. Độ lợi $G(f)$ của FPA thay đổi theo tần số với $R = 0.3; R=0.03$ và $R=0$

- Hệ số phản xạ $R=0.03$, $G(\omega)$ tiến gần tới G_s nhưng vẫn còn gợn sóng nhỏ.
- Tại các tần số cộng hưởng $\omega=(2\pi fN)/(2L)$ với N là số nguyên, độ lợi của FPA đạt giá trị cực đại
- Giả sử độ lợi đơn thông G_s , tương ứng với $R=0$ (TWA), có dạng Gauss

Nhiều xuyên âm (Crosstalk) trong SOA

- Nhiều xuyên âm xảy ra khi các tín hiệu quang khác nhau được khuếch đại đồng thời trong cùng một bộ khuếch đại. Có hai loại nhiễu xuyên âm xảy ra trong SOA: nhiễu xuyên kênh (interchannel crosstalk) và bão hòa độ lợi (cross saturation).
- Nhiễu xuyên kênh xảy ra là do hiệu ứng trộn bốn bước sóng FWM (Four Wave Mixing).



Hình 7.14. Ảnh hưởng của nhiễu xuyên kênh trong SOA khi khuếch đại hai tín hiệu

Nhiễu xuyên âm (Crosstalk) trong SOA

- Xem xét đầu vào bộ SOA là tổng của hai tín hiệu quang ở các bước sóng khác nhau. Giả thiết rằng cả 2 bước sóng nằm trong băng thông của SOA. Sự có mặt của tín hiệu thứ hai sẽ làm suy giảm mật độ điện tử ở vùng năng lượng cao do quá trình bức xạ kích thích làm dẫn đến sự nghịch đảo nồng độ được quan sát ở tín hiệu thứ nhất giảm xuống. Do đó, tín hiệu thứ nhất sẽ không được khuếch đại giống như tín hiệu thứ hai, và nếu mật độ điện tử ở vùng năng lượng cao không đủ lớn thì tín hiệu thứ nhất có thể bị hấp thụ
- Hiện tượng xuyên âm phụ thuộc vào thời gian sống của điện tử ở trạng thái năng lượng cao. Nếu thời gian sống đủ lớn so với tốc độ dao động của công suất trong các tín hiệu vào, các điện tử không thể chuyển từ trạng thái năng lượng cao xuống trạng thái năng lượng thấp do sự dao động này. Do đó, không có xuyên âm xảy ra.

Ưu khuyết điểm và ứng dụng của SOA

- **Ưu điểm**

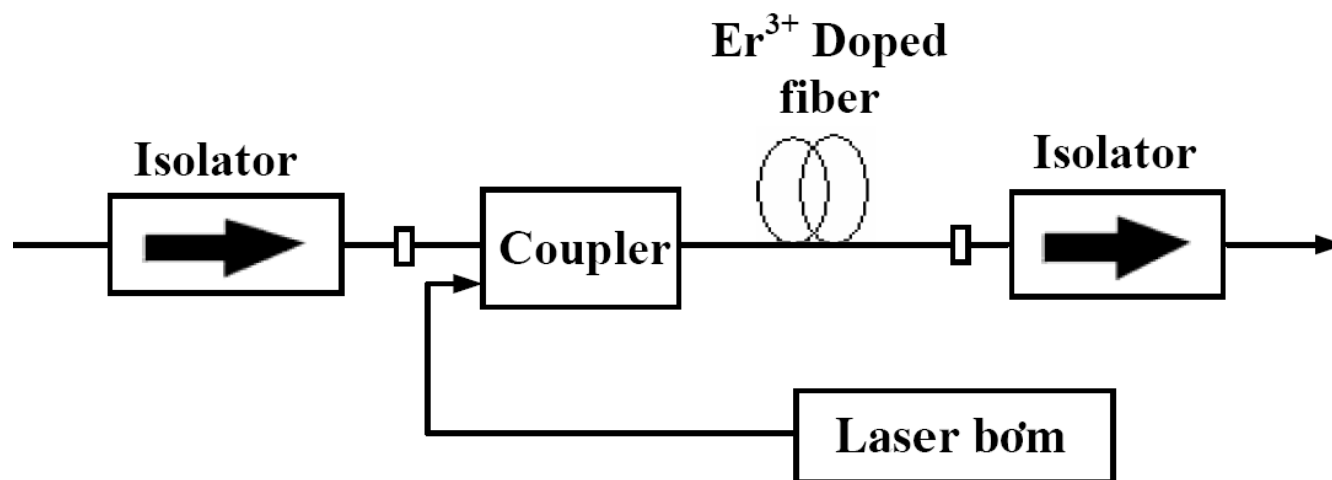
- Đợt lợi cao (25-30dB).
- Kích thước nhỏ, có thể tích hợp với các linh kiện quang bán dẫn khác.
- Dải thông lớn, có thể lên tới 100 nm, rộng hơn so với EDFA.
- Có thể thực hiện khuếch đại tín hiệu ở cả hai cửa sổ ánh sáng 1300nm và 1550nm

- **Khuyết điểm**

- Công suất ra bảo hòa thấp (khoảng 5mW) hạn chế khả năng của SOA khi được sử dụng làm bộ khuếch đại công suất.
- Hệ số nhiễu cao (5-7 dB) ảnh hưởng đến chất lượng của SOA khi được sử dụng làm bộ tiền khuếch đại và khuếch đại đường dây.
- Phụ thuộc vào phân cực của tín hiệu quang tới
- Nhiều xuyên kênh lớn do các hiệu ứng phi tuyến
- Phổ đợt lợi có dạng gợn sóng do sự không hoàn hảo của lớp chống phản xạ tạo
- Kém ổn định do đợt lợi chịu ảnh hưởng của nhiệt độ

Bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium (EDFA)

Các cấu trúc EDFA



Hình 7.15. Cấu trúc tổng quát của một bộ khuếch đại EDFA

Vài nét sơ lược về các bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium và các ứng dụng của nó trong thông tin quang. Sử dụng các bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium (EDFA) để kéo dài cự ly và tăng tốc độ bit truyền dẫn đang được xem như là một trong những giải pháp tốt nhất để xây dựng các hệ thống thông tin quang sợi

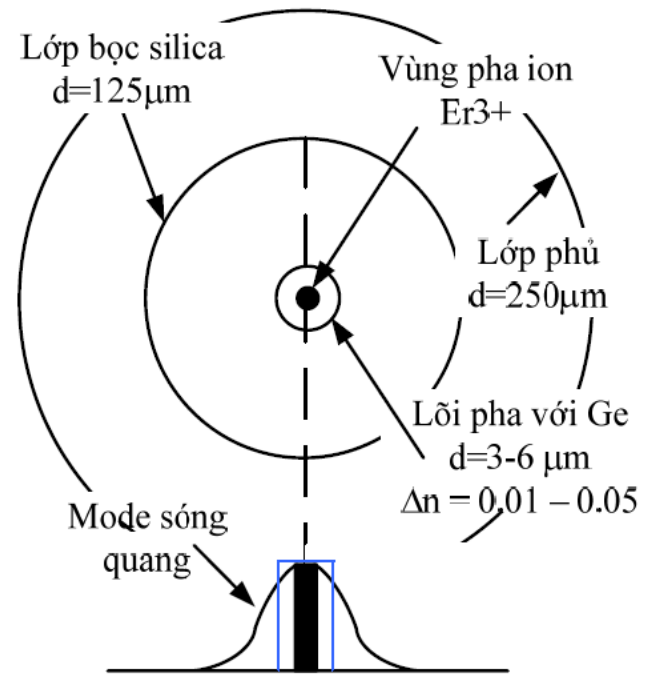
Cấu trúc của một bộ khuếch đại quang sợi pha trộn Erbium EDFA

Cấu trúc của một bộ khuếch đại quang sợi pha trộn Erbium EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) bao gồm Sợi quang pha ion đất hiếm Erbium EDF (Erbium-Doped Fiber): là nơi xảy ra quá trình khuếch đại (vùng tích cực) của EDFA

+) Vùng lõi trung tâm (có đường kính từ 3 -6 μm) của EDF được pha trộn ion là nơi có cường độ sóng bơm và tín hiệu cao nhất

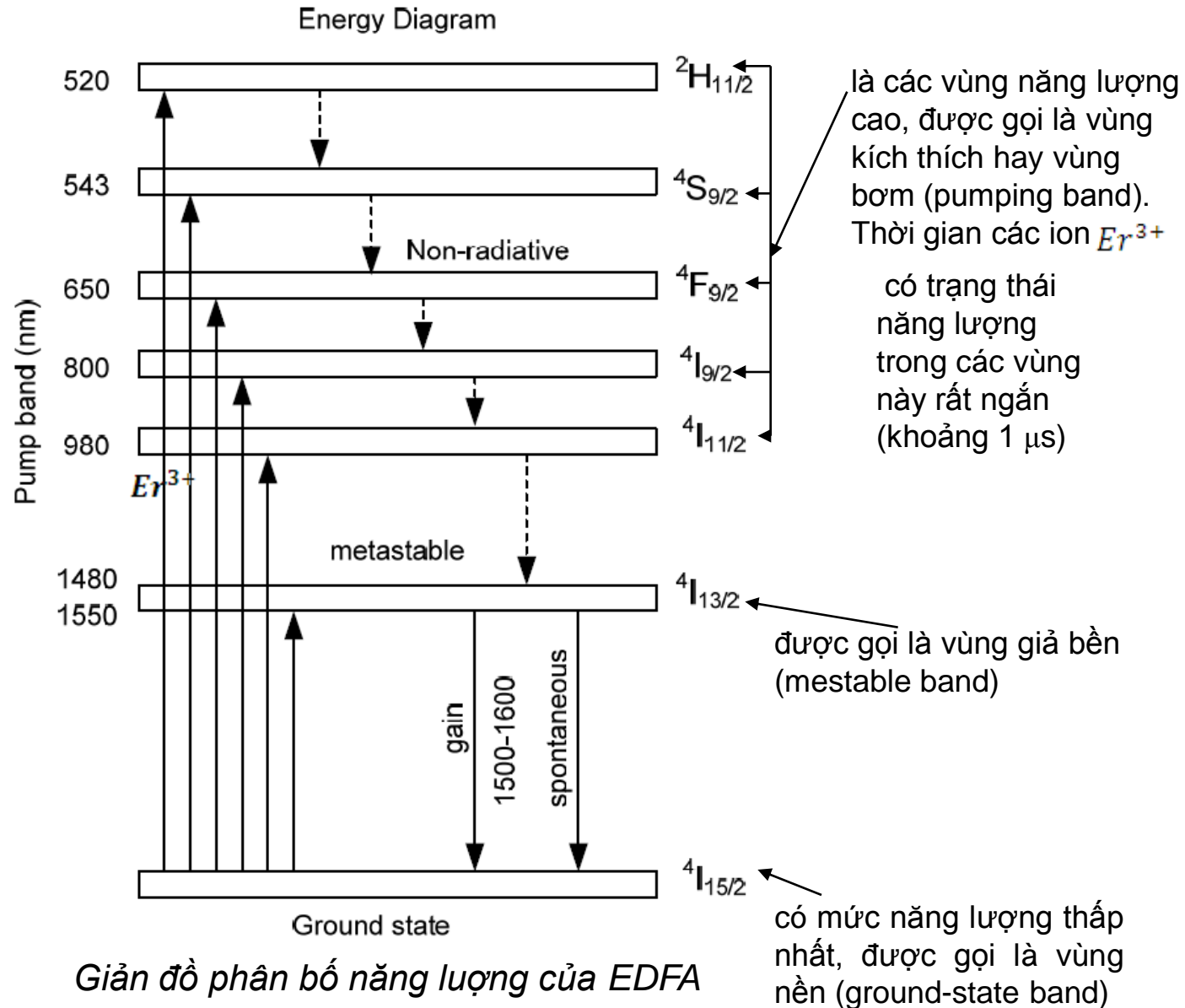
+) Lớp bọc (cladding) có chiết suất thấp hơn bao quanh vùng lõi

+) Lớp phủ (coating) bảo vệ bao quanh sợi quang tạo bán kính sợi quang tổng cộng là 250 μm

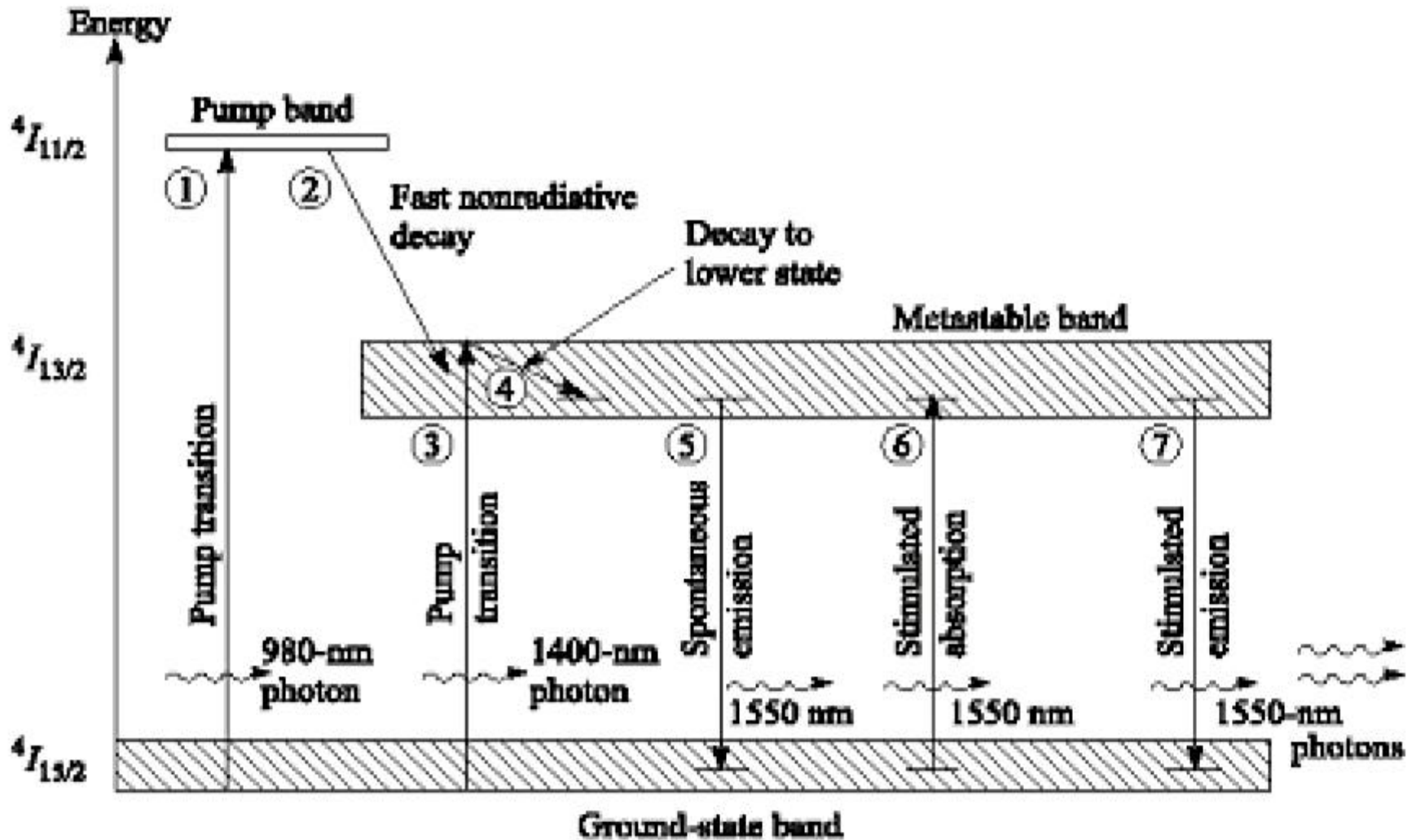


Hình 7.16. Mặt cắt ngang của một loại sợi quang pha ion Erbium

Lý thuyết khuếch đại trong EDFA



Nguyên lý hoạt động của EDFA



Hình 7.19. Quá trình khuếch đại tín hiệu xảy ra EDFA với hai bước sóng bơm 980 nm và 1480nm

Nguyên lý hoạt động của EDFA

- Nguyên lý khuếch đại của EDFA được dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích.
- Quá trình khuếch đại tín hiệu quang trong EDFA có thể được thực hiện theo các bước như sau
- Khi sử dụng nguồn bơm laser 980nm, các ion ở vùng nền sẽ hấp thụ năng lượng từ các photon (có năng lượng $E_{\text{photon}} = 1.27\text{eV}$) và chuyển lên trạng thái năng lượng cao hơn ở vùng bơm (pumping band) (1)
- Tại vùng bơm, các ion phân rã không bức xạ rất nhanh (khoảng $1\mu\text{s}$) và chuyển xuống vùng giả bền (2)
- Khi sử dụng nguồn bơm laser 1480nm, các ion ở vùng nền sẽ hấp thụ năng lượng từ các photon (có năng lượng $E_{\text{photon}} = 0.841\text{eV}$) và chuyển sang trạng thái năng lượng cao hơn ở đỉnh của vùng giả bền (3)
- Các ion trong vùng giả bền luôn có khuynh hướng chuyển xuống vùng năng lượng thấp (vùng có mật độ điện tử cao) (4)
- Sau khoảng thời gian sống (khoảng 10ms), nếu không được kích thích bởi các photon có năng lượng thích hợp (phát xạ kích thích) các ion sẽ chuyển sang trạng thái năng lượng thấp hơn ở vùng nền và phát xạ ra photon (phát xạ tự phát) (5).

Các tính chất của EDFA

- Phụ thuộc vào nồng độ ion Er
- Phụ thuộc vào công suất tín hiệu đến và công suất bơm quang
- Phụ thuộc vào chiều dài sợi: Khi chiều dài sợi ngắn thì tín hiệu không được khuếch đại nhiều do đó độ lợi tín hiệu nhỏ
- Phụ thuộc vào công suất bơm: Công suất bơm càng lớn thì sẽ có nhiều ion erbium bị kích thích để trao đổi năng lượng với tín hiệu cần khuếch đại và sẽ làm cho hệ số khuếch đại tăng lên
- Các yếu tố trên sẽ được hiệu chỉnh sau cho độ lợi của EDFA đạt giá trị yêu cầu với hiệu suất cao nhất. Thông thường, độ lợi của EDFA vào khoảng 20-40 dB tùy theo ứng dụng của EDFA là bộ khuếch đại công suất, khuếch đại đường truyền hay tiền khuếch đại

Ưu khuyết điểm của EDFA

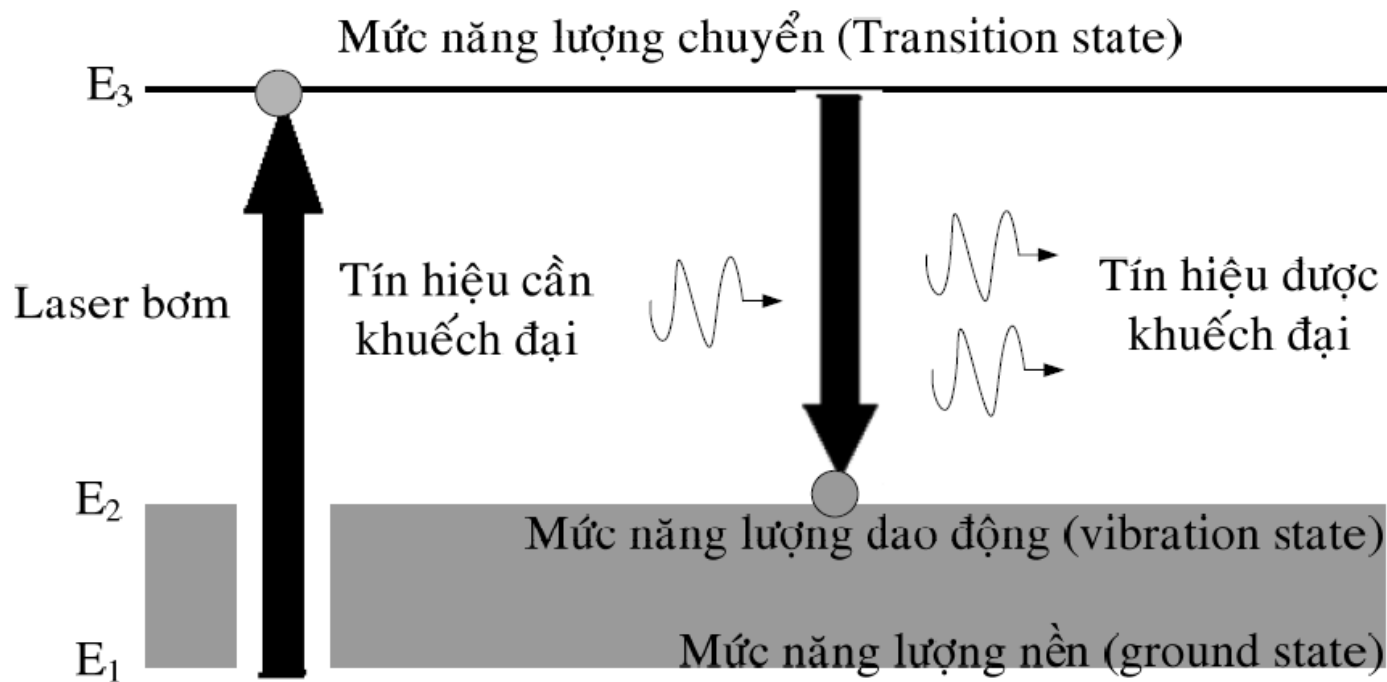
- **Ưu điểm**

- Nguồn laser bơm bán dẫn có độ tin cậy cao, gọn và công suất cao.
- Cấu hình đơn giản: hạ giá thành của hệ thống.
- Cấu trúc nhỏ gọn: có thể lắp đặt nhiều EDFA trong cùng một trạm, dễ vận chuyển và thay thế.
- Công suất nguồn nuôi nhỏ: thuận lợi khi áp dụng cho các tuyến thông tin quang vượt biển.
- Không có nhiễu xuyên kênh khi khuếch đại các tín hiệu WDM như bộ khuếch đại quang bán dẫn.
- Hầu như không phụ thuộc vào phân cực của tín hiệu

- **Khuyết điểm**

- Phổ độ lợi của EDFA không bằng phẳng.
- Băng tần hiện nay bị giới hạn trong băng C và băng L.
- Nhiễu được tích lũy qua nhiều chặng khuếch đại gây hạn chế cự ly truyền dẫn.

Bộ khuếch đại quang RAMAN (RA)

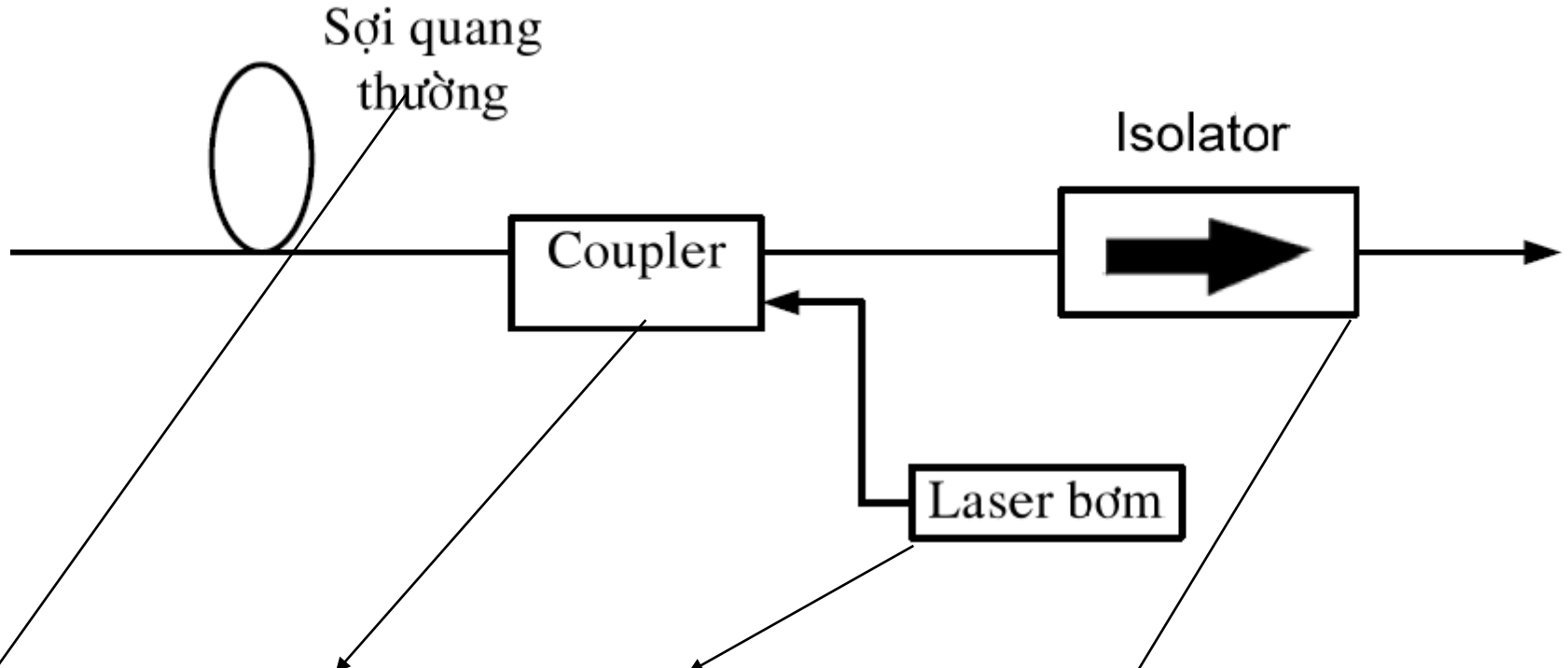


Hình 7.23. Sơ đồ chuyển năng lượng trong khuếch đại Raman

Khuếch đại Raman dựa trên hiện tượng tán xạ Raman kích thích (Stimulated Raman Scattering). Tán xạ Raman kích thích là hiện tượng một nguyên tử hấp thụ năng lượng của một photon, sau đó tạo ra một photon có năng lượng khác. Vì vậy, tán xạ Raman kích thích được định nghĩa là hiện tượng photon thứ cấp được sinh ra do kích thích từ nguồn bên ngoài

Cấu trúc của một bộ khuếch đại Raman

Hình 7.24. Cấu trúc của bộ khuếch đại Raman



Sợi quang là nơi xảy ra quá trình khuếch đại. Sợi quang này cũng là sợi quang truyền tín hiệu như sợi SMF, DSF

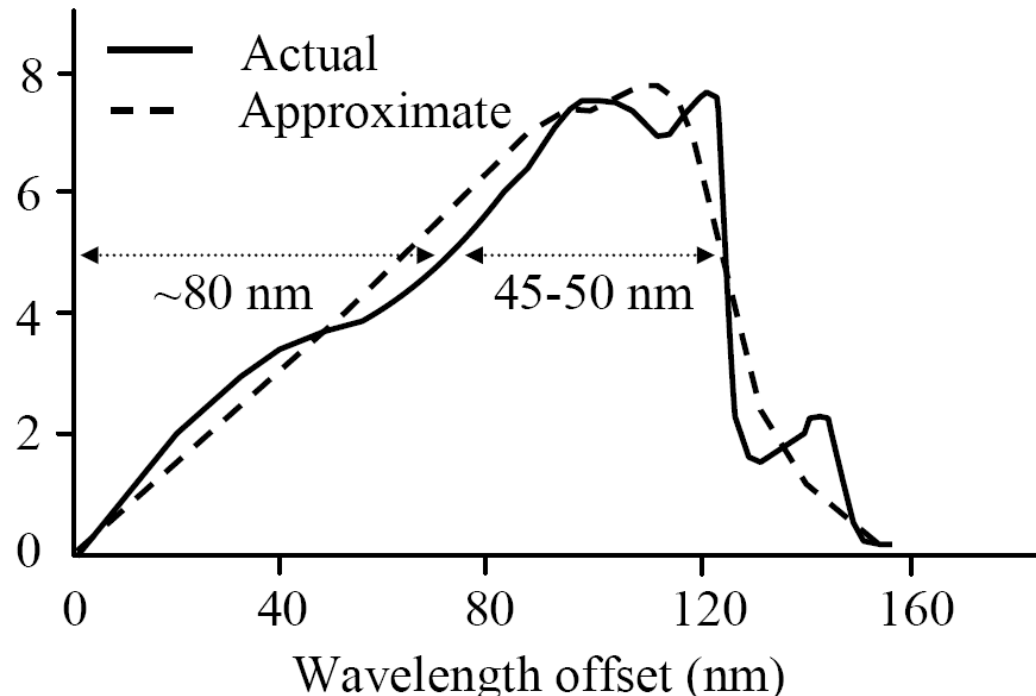
Bộ ghép dùng để ghép bước sóng tín hiệu vào với sóng bơm

Laser bơm dùng để cung cấp năng lượng cho các nguyên tử của sợi quang chuyển lên trạng thái kích thích, giúp tạo ra sự nghịch đảo nồng độ

Bộ cách ly (Isolator): đặt ở hai đầu của bộ khuếch đại quang để ngăn chặn tín hiệu phản xạ ở hai đầu bộ khuếch đại. Đồng thời nó cũng giúp loại trừ nhiễu ASE theo hướng ngược về phía đầu vào có thể gây ảnh hưởng đến tín hiệu đầu vào

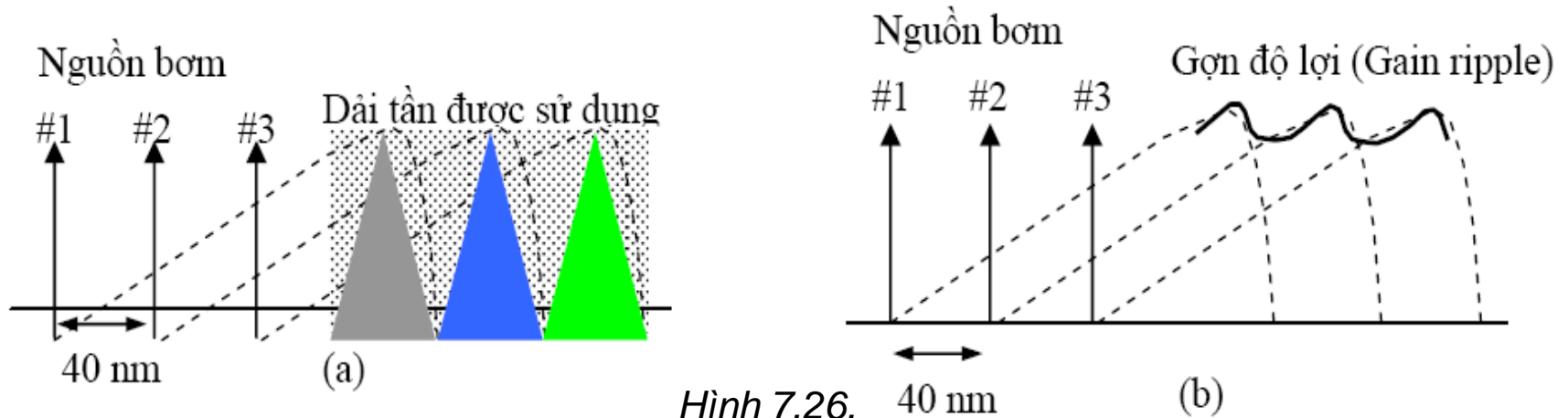
Hệ số khuếch đại Raman

Hệ số khuếch đại Raman tăng hầu như tuyến tính với độ chênh lệch bước sóng giữa tín hiệu và nguồn bơm (wavelength offset), đạt giá trị đỉnh tại 100 nm và giảm nhanh chóng sau đó. Trong hình cũng cho thấy, băng thông độ lợi của khuếch đại Raman có thể đạt được từ 45-50nm



Hình 7.25. Hệ số độ lợi Raman thay đổi theo độ chênh lệch bước sóng của tín hiệu và nguồn bơm (wavelength offset)

Độ rộng băng tần Raman



Hình 7.26. 40 nm (b)

(a) Với khoảng cách các nguồn bơm 40nm, các kênh nằm trong dải tần rộng được khuếch đại

(b) Gợn độ lợi do khuếch đại Raman và do khoảng cách các nguồn bơm

Nếu dải tần của các tín hiệu cần khuếch đại Raman lớn hơn băng thông độ lợi của khuếch đại Raman (giả sử 40nm), cần phải sử dụng nhiều nguồn bơm khác nhau. Mỗi nguồn bơm có bước sóng cách nhau khoảng 40nm (bằng với băng thông độ lợi). Khi đó, dải tần lớn của các tín hiệu có thể được khuếch đại một cách hiệu quả (xem Hình 7.26.-a). Tuy nhiên, do đặc tính khuếch đại của khuếch đại Raman và do khoảng cách của các bước sóng bơm, băng thông độ lợi tổng cộng có dạng gợn sóng như hình Hình 7.26.-b.

Ưu khuyết điểm của khuếch đại Raman

- So với các loại khuếch đại quang khác, khuếch đại Raman có những **ưu điểm** sau:

Tạp âm nhiều thấp

Cấu trúc đơn giản, không cần sợi đặc biệt.

Dễ chọn băng tần.

Có thể đạt được băng thông rộng nhờ kết hợp vài laser bơm.

- Tuy nhiên, bên cạnh những ưu điểm đó bộ khuếch đại Raman cũng có những **nhược điểm** như sau:
 - Xuyên âm giữa các kênh tín hiệu do hiện tượng tán xạ Raman kích thích SRS. Đây là một trong các hiệu ứng phi tuyến của sợi quang có thể gây ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống ghép kênh theo bước sóng WDM.
 - Hệ số khuếch đại thấp.
 - Hiệu suất khuếch đại thấp hơn so với EDFA: khuếch đại Raman cần một công suất bơm lớn hơn để đạt cùng một giá trị độ lợi

LỜI KẾT

Một lần nữa em xin chân thành cảm ơn sự hướng dẫn của thầy giáo **Hoàng Phú An** và sự giúp đỡ của các bạn sinh viên lớp DHDT5LTTB đã giúp nhóm chúng em hoàn thành bài thuyết trình này. Nhóm chúng em rất mong nhận được sự đóng góp phản hồi từ phía thầy và các bạn để bài thuyết trình hoàn thiện hơn.

Chúc thầy giáo dồi dào sức khỏe để tiếp tục nâng đỡ chúng em trên con đường học tập!

Chúc các bạn trong lớp thành công với bài thuyết trình của nhóm mình!

Nhóm chúng em xin chân thành cảm ơn!

Chương 1

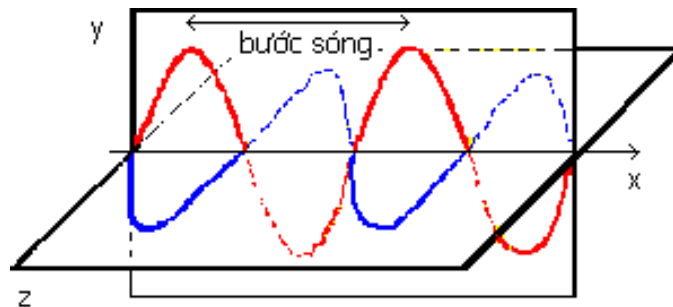
CÁC KIẾN THỨC CƠ BẢN

1.1 Ánh sáng

1.1.1. Tính chất vật lý của ánh sáng

Bằng phương pháp toán học, Macxoen đã chứng minh rằng điện từ trường do một điện tích điểm dao động theo phương thẳng đứng tại một điểm sinh ra sẽ lan truyền trong không gian dưới dạng sóng. Sóng đó được gọi là sóng điện từ.

Người ta nói rằng điện tích dao động đã bức xạ ra sóng điện từ. Nếu xét theo một phương truyền Ox, sóng điện từ là sóng ngang có thành phần điện dao động theo phương thẳng đứng và thành phần từ dao động theo phương nằm ngang.



Hình 1.1. Sóng điện từ lan truyền trong không gian

Tần số sóng điện từ bằng tần số f của điện tích dao động và vận tốc của nó trong chân không bằng vận tốc ánh sáng trong chân không.

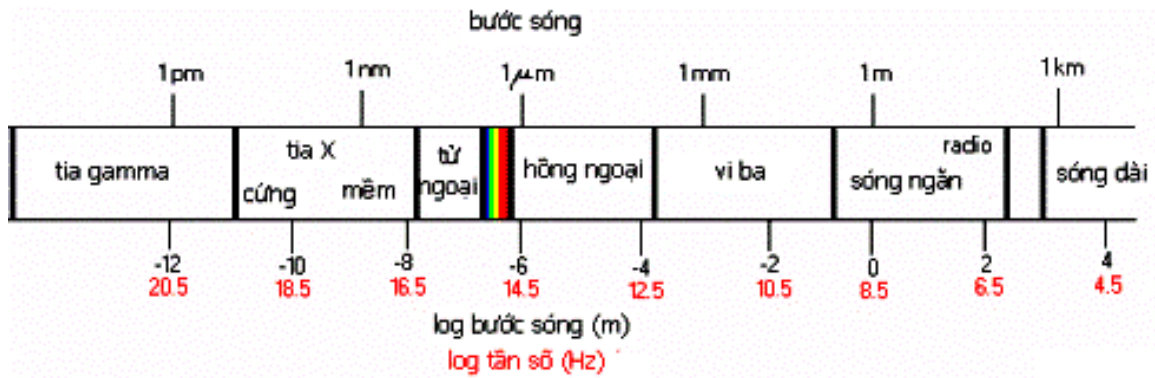
Năng lượng của sóng điện từ tỉ lệ với lũy thừa bậc 4 của tần số.

Ngày nay, người ta đã biết rằng sóng điện từ có đầy đủ các tính chất như sóng cơ học, nhưng sóng cơ học, truyền đi trong những môi trường đàn hồi, còn sóng điện từ thì tự nó truyền đi mà không cần nhờ đến sự biến dạng của một môi trường đàn hồi nào cả, vì vậy nó truyền được cả trong chân không.

Ánh sáng khả kiến dùng để chỉ các bức xạ điện từ có bước sóng nằm trong vùng quang phổ nhìn thấy được bằng mắt thường (tức là từ khoảng 400 nm đến 700 nm).

"Ánh sáng lạnh" là ánh sáng có bước sóng tập trung gần vùng quang phổ tím. "Ánh sáng nóng" là ánh sáng có bước sóng nằm gần vùng đỏ.

Ánh sáng có quang phổ trải đều từ đỏ đến tím là ánh sáng trắng, ánh sáng có bước sóng tập trung tại vùng quang phổ rất hẹp gọi là "ánh sáng đơn sắc".



Hình 1.2. Phân loại Sóng điện từ

Ánh sáng tự nhiên hoặc ánh sáng nhìn thấy được chiếm một phần rất nhỏ trong phổ sóng điện từ.

1.1.2. Bước sóng và màu sắc ánh sáng

Đo bước sóng của những ánh sáng đơn sắc khác nhau bằng phương pháp giao thoa, người ta thấy mỗi ánh sáng đơn sắc có một bước sóng hoàn toàn xác định. Chẳng hạn:

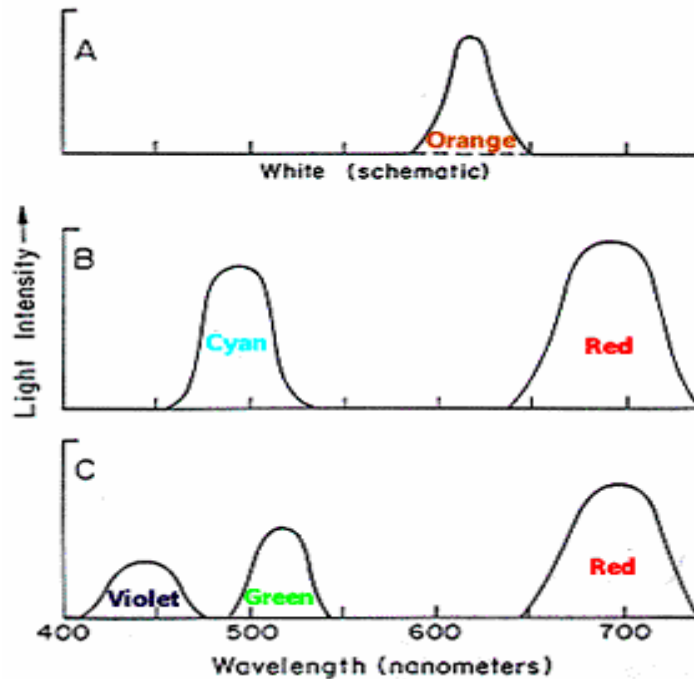
- ánh sáng màu đỏ ở đầu của dải màu liên tục có bước sóng: $0,760\mu\text{m}$.
- ánh sáng màu tím ở cuối của dải màu liên tục có bước sóng: $0,400\mu\text{m}$
- Ánh sáng vàng do đèn hơi natri phát ra có bước sóng: $0,589\mu\text{m}$.

Như vậy, ánh sáng đơn sắc là ánh sáng có một bước sóng xác định. Màu ứng với ánh sáng đó gọi là màu đơn sắc hay màu quang phổ.

Thực ra, những ánh sáng đơn sắc có bước sóng lân cận nhau thì gần như có cùng một màu. Vì vậy, người ta đã phân định ra trong quang phổ liên tục những vùng màu khác nhau:

- Vùng đỏ có bước sóng từ: $0,760\mu\text{m} \rightarrow 0,640\mu\text{m}$
- Vùng da cam và vàng có bước sóng từ: $0,640\mu\text{m} \rightarrow 0,580\mu\text{m}$ (Vùng da cam và Vùng vàng)
- Vùng lục có bước sóng từ: $0,580\mu\text{m} \rightarrow 0,495\mu\text{m}$
- Vùng lam - chàm có bước sóng từ: $0,495\mu\text{m} \rightarrow 0,440\mu\text{m}$ (Vùng lam-chàm)
- Vùng tím có bước sóng từ: $0,440\mu\text{m} \rightarrow 0,400\mu\text{m}$

Ngoài các màu đơn sắc, còn có các màu không đơn sắc, là hỗn hợp của nhiều màu đơn sắc với những tỉ lệ khác nhau.



Hình 1.3. màu sắc và bước sóng của ánh sáng

1. Tia hồng ngoại

Tia hồng ngoại là những bức xạ không nhìn thấy được có bước sóng lớn hơn bước sóng của ánh sáng đỏ ($0,75\mu\text{m}$). Tia hồng ngoại có bản chất là sóng điện từ. Tia hồng ngoại do các vật bị nung nóng phát ra.

Vật có nhiệt độ thấp chỉ phát ra được các tia hồng ngoại. Chẳng hạn như thân thể người ở nhiệt độ 37°C chỉ phát ra các tia hồng ngoại trong đó mạnh nhất là các tia có bước sóng ở vùng $9\mu\text{m}$.

Vật có nhiệt độ 500°C bắt đầu phát ra ánh sáng màu đỏ tối nhưng mạnh nhất vẫn là các tia hồng ngoại ở vùng bước sóng $3,7\mu\text{m}$.

Trong ánh sáng mặt trời, có khoảng 50% năng lượng của chùm sáng là thuộc về các tia hồng ngoại. Nguồn phát tia hồng ngoại thường dùng là các bóng đèn có dây tóc bằng vonfram nóng sáng công suất từ 250W đến 1000W. Nhiệt độ dây tóc bóng đèn đó vào khoảng 2000°C .

Tác dụng nổi bật nhất của tia hồng ngoại là tác dụng nhiệt. Ngoài ra, tia hồng ngoại cũng có tác dụng lên một loại kính ảnh đặc biệt gọi là kính ảnh hồng ngoại. Nếu chụp ảnh các đám mây bằng kính ảnh hồng ngoại thì ảnh các đám mây sẽ nổi lên rất rõ rệt. Đó là các đám mây chứa hơi nước ít hay nhiều sẽ hấp thụ các tia hồng ngoại yếu hay mạnh rất khác nhau.

Ứng dụng quan trọng nhất của các tia hồng ngoại là dùng để sấy hoặc sưởi. Trong công nghiệp, người ta dùng tia hồng ngoại để sấy khô các sản phẩm sơn (như vỏ ô tô, vỏ tủ lạnh v.v...) hoặc các hoa quả như chuối, nho v.v... Trong y học, người ta dùng đèn hồng ngoại để sưởi ấm ngoài da cho máu lưu thông được tốt.

2. Tia tử ngoại

Tia tử ngoại là những bức xạ không nhìn thấy được, có bước sóng ngắn hơn bước sóng của ánh sáng tím ($0,40\mu\text{m}$).

Tia tử ngoại có bản chất là sóng điện từ.

Mặt Trời là một nguồn phát tia tử ngoại rất mạnh. Khoảng 9% công suất của chùm ánh sáng mặt trời là thuộc về các tia tử ngoại. Các hồ quang điện cũng là những nguồn phát tia tử ngoại mạnh. Trong các bệnh viện và phòng thí nghiệm, người ta dùng các đèn thủy ngân làm nguồn phát các tia tử ngoại. Ngoài ra những vật nung nóng trên 3000°C cũng phát ra tia tử ngoại rất mạnh.

Tia tử ngoại bị thủy tinh, nước v.v... hấp thụ rất mạnh. Thạch anh thì gần như trong suốt đối với các tia tử ngoại có bước sóng nằm trong vùng từ $0,18\mu\text{m} \rightarrow 0,4\mu\text{m}$ (gọi là vùng tử ngoại gần).

Tia tử ngoại có tác dụng rất mạnh lên kính ảnh. Nó có thể làm cho một số chất phát quang. Nó có tác dụng iôn hoá không khí. Ngoài ra, nó còn có tác dụng gây ra một số phản ứng quang hoá, phản ứng quang hợp v.v...

Tia tử ngoại có một số tác dụng sinh học.

Trong công nghiệp, người ta sử dụng tia tử ngoại để phát hiện các vết nứt nhỏ, vết xước trên bề mặt các sản phẩm tiện. Muốn vậy, người ta xoa trên bề mặt sản phẩm một lớp bột phát quang rất mịn. Bột sẽ chui vào các khe nứt, vết xước. Khi đưa sản phẩm vào chùm tử ngoại, các vết đó sẽ sáng lên.

Trong y học, người ta dùng tia tử ngoại để chữa bệnh còi xương.

3. Tia X

Năm 1895, nhà bác học Ron-ghen (Roentgen), người Đức, nhận thấy rằng khi cho dòng tia catốt trong ống tia catốt đập vào một miếng kim loại có nguyên tử lượng lớn như bạch kim hoặc vonfram thì từ đó sẽ phát ra một bức xạ không nhìn thấy được. Bức xạ này đi xuyên qua thành thủy tinh ra ngoài và có thể làm phát quang một số chất hoặc làm đen phim ảnh. Người ta gọi bức xạ này là tia X

Khi mới được phát hiện, người ta tưởng lầm tia X là một dòng hạt nào đó. Tuy nhiên, khi cho tia X đi qua điện trường và từ trường mạnh thì nó không bị lệch đường. Như vậy, tia X không mang điện. Tia X là một loại sóng điện từ có bước sóng ngắn hơn bước sóng của tia tử ngoại. Bước sóng của tia X nằm trong khoảng từ $10^{-12} \rightarrow 10^{-8}\text{m}$ (tia X mềm).

Tia X có những tính chất và công dụng sau

Tính chất nổi bật của tia X là khả năng đâm xuyên. Nó truyền qua được những vật chắn sáng thông thường như giấy, bìa, gỗ. Nó đi qua kim loại khó khăn hơn. Kim loại có khối lượng riêng càng lớn thì khả năng cản tia X của

nó càng mạnh. Chẳng hạn, tia X xuyên qua dễ dàng một tấm nhôm dày vài cm, nhưng lại bị lớp chì dày vài mm cản lại. Vì vậy, chì được dùng làm các màn chắn bảo vệ trong kĩ thuật kỹ thuật Ronghen.

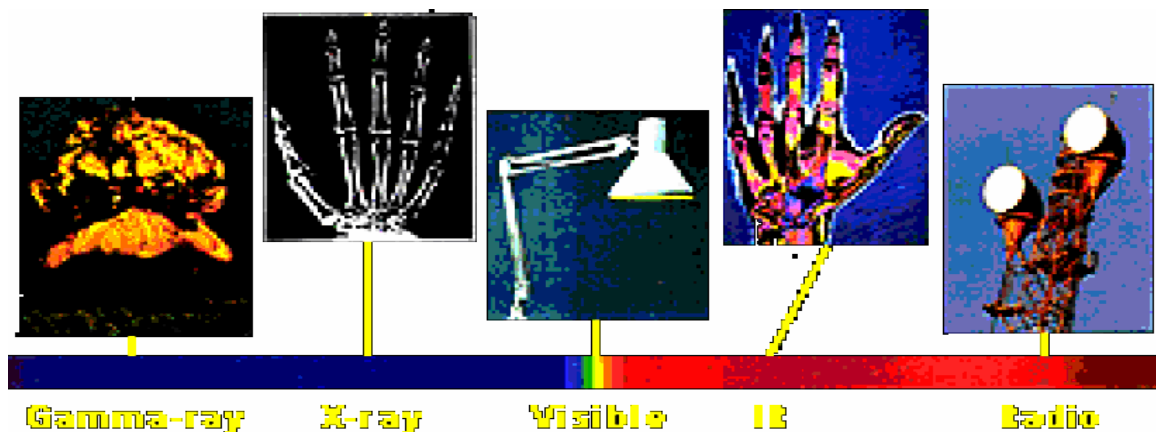
Nhờ khả năng đâm xuyên mạnh mà tia X được dùng trong y học để chiếu điện, chụp điện, trong công nghiệp để dò các lỗ hỏng khuyết tật nằm bên trong các sản phẩm đúc.

Tia X có tác dụng rất mạnh lên kính ảnh, nên nó được dùng để chụp điện.

Tia X có tác dụng làm phát quang một số chất. Màn huỳnh quang dùng trong việc chiếu điện là màn có phủ một lớp platinocyanua bary. Lớp này phát quang màu xanh lục dưới tác dụng của tia X.

Tia X có khả năng ion hoá các chất khí. Người ta lợi dụng đặc điểm này để làm các máy đo liều lượng tia X.

Tia X có tác dụng sinh lý. Nó có thể huỷ hoại tế bào, giết vi khuẩn. Vì thế tia X dùng để chữa những ung thư nông, gần ngoài da.



Hình 1.4. Ứng dụng sóng điện từ.

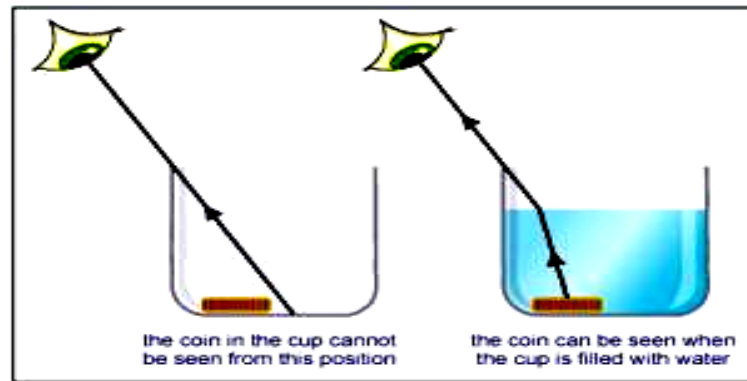
1.1.3. Các hiện tượng quang hình học

Ánh sáng nói riêng, các bức xạ điện từ nói chung dù ở bất kỳ tần số nào đều có tốc độ truyền như nhau trong môi trường chân không: $299\,792,5\text{ km/s} \approx 300\,000\text{ km/s}$

Tuy nhiên, ở trong môi trường khác tốc độ truyền ánh sáng sẽ thay đổi

- Môi trường chân không và không khí : $300\,000\text{ km/s}$
- Môi trường nước : $225\,000\text{ km/s}$
- Thủy tinh : $200\,000\text{ km/s}$

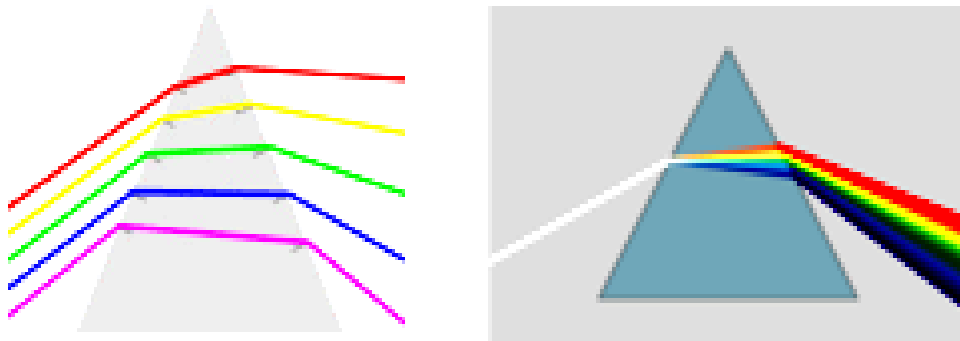
1. Hiện tượng khúc xạ ánh sáng



Hình 1.5. Hiện tượng khúc xạ ánh sáng

Khúc xạ thường dùng để chỉ hiện tượng ánh sáng đổi hướng khi đi qua mặt phân cách giữa hai môi trường có chiết suất khác nhau. Mở rộng ra, đây là hiện tượng đổi hướng đường đi của bức xạ điện từ, khi lan truyền trong môi trường không đồng nhất

2. Hiện tượng tán sắc



Hình 1.6. Hiện tượng tán sắc

Ánh sáng trắng là tổng hợp của rất nhiều tia sáng, mỗi tia sáng tương ứng với các độ dài sóng điện từ khác nhau và có màu sắc khác nhau. Tia sáng có sóng điện từ ngắn càng dễ bị khúc xạ. Như vậy có nghĩa là ánh sáng xanh dễ bị khúc xạ hơn so với ánh sáng đỏ

Lăng kính là một dụng cụ quang học, sử dụng để khúc xạ, phản xạ và tán xạ ánh sáng sang các màu quang phổ (như màu sắc của cầu vồng). Lăng kính thường được làm theo dạng kim tự tháp đứng, có đáy là hình tam giác.

Tia sáng đi từ một môi trường (như môi trường không khí) sang một môi trường khác (như thủy tinh trong lăng kính), nó sẽ bị chậm lại, và giống như kết quả, nó sẽ hoặc bị cong (khúc xạ) hoặc bị phản xạ hoặc đồng thời xảy ra cả hai hiện tượng trên. Góc mà tia sáng hợp với trục thẳng góc tại điểm mà tia sáng đi vào trong lăng kính được gọi là góc tới, và góc tạo ra ở đầu bên

kia, qua quá trình khúc xạ được gọi là góc ló. Tương tự, tia sáng đi vào trong lăng kính được gọi là tia tới và tia sáng đi ra ngoài lăng kính được gọi là tia ló.

Các lăng kính phản xạ được sử dụng để phản xạ ánh sáng, ví dụ như các ống nhòm, vì, nhờ hiện tượng phản xạ toàn phần, chúng dễ dàng được sử dụng hơn là các gương. Các lăng kính tán sắc được sử dụng để chia ánh sáng thành các thành phần quang phổ màu, bởi vì độ khúc xạ của chúng phụ thuộc vào bước sóng của tia sáng (hiện tượng tán sắc); khi một tia sáng trắng đi vào trong lăng kính, nó có một góc tới xác định, trải qua quá trình khúc xạ, và phản xạ bên trong lăng kính, dẫn đến việc tia sáng bị bẻ cong, hay gập khúc, và vì vậy, màu sắc của tia sáng ló sẽ khác nhau. Ánh sáng màu xanh có bước sóng nhỏ hơn ánh sáng màu đỏ và vì vậy nó cong hơn so với ánh sáng màu đỏ. Cũng có loại lăng kính phân cực, nó có thể chia ánh sáng thành các thành phần phân cực khác nhau.

1.1.4. Lượng tính sóng hạt của ánh sáng

Nguyên tử gồm:

Hạt nhân (điện tích +Z) gồm:

- Proton (p), $m_p = 1,672 \cdot 10^{-27}$ kg, tích điện dương + 1,602. 10^{-19} C.
- Neutron(n), $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg, không mang điện .

Hạt nhân của các nguyên tố đều bền (trừ các nguyên tố phóng xạ).

Electron(e) , $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg , tích điện âm - 1,602. 10^{-19} C.

Trong bảng hệ thống tuần hoàn (HTTH), số TT nguyên tố = điện tích hạt nhân = số e.

1. Hiện tượng quang điện

Ánh sáng là một sóng điện từ lan truyền trong chân không với vận tốc $c = 3 \cdot 10^8$ m/s, được đặc trưng bằng bước sóng λ hay tần số dao động $\nu = c/\lambda$

Thuyết sóng của ánh sáng giải thích được những hiện tượng liên quan với sự truyền sóng như giao thoa và nhiễu xạ nhưng không giải thích được những dữ kiện thực nghiệm về sự hấp thụ và sự phát ra ánh sáng khi đi qua môi trường vật chất.

Năm 1900, M.Planck đưa ra giả thuyết: “ Năng lượng của ánh sáng không có tính chất liên tục mà bao gồm từng lượng riêng biệt nhỏ nhất gọi là lượng tử. Một lượng tử của ánh sáng (photon) có năng lượng là $E=h\nu$

Trong đó

- E là năng lượng của photon
- ν : tần số bức xạ
- $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s - hằng số Planck.

Năm 1905, Anhs-tanh đã dựa vào thuyết lượng tử đã giải thích thỏa đáng hiện tượng quang điện. Bản chất của hiện tượng quang điện là các kim loại kiềm trong chân không khi bị, khi bị chiếu sáng sẽ phát ra các electron; năng lượng của các electron đó không phụ thuộc vào cường độ của ánh sáng chiếu vào mà phụ thuộc vào tần số ánh sáng.

Anhs-tanh cho rằng khi được chiếu tới bề mặt kim loại, mỗi photon với năng lượng $h\nu$ sẽ truyền năng lượng cho kim loại. Một phần năng lượng E_0 được dùng để làm bật electron ra khỏi nguyên tử kim loại và phần còn lại sẽ trở thành động năng của electron

$$h\nu = E_0 + \frac{1}{2}mv^2$$

Những bức xạ có tần số bé hơn tần số giới hạn sẽ không gây ra hiện tượng quang điện.

Sử dụng công thức trên ta có thể tính được vận tốc của electron bật ra trong hiện tượng quang điện.

2. Mô hình nguyên tử Bohr

Trong nguyên tử mỗi electron quay xung quanh nhân chỉ theo những quỹ đạo tròn đồng tâm có bán kính xác định.

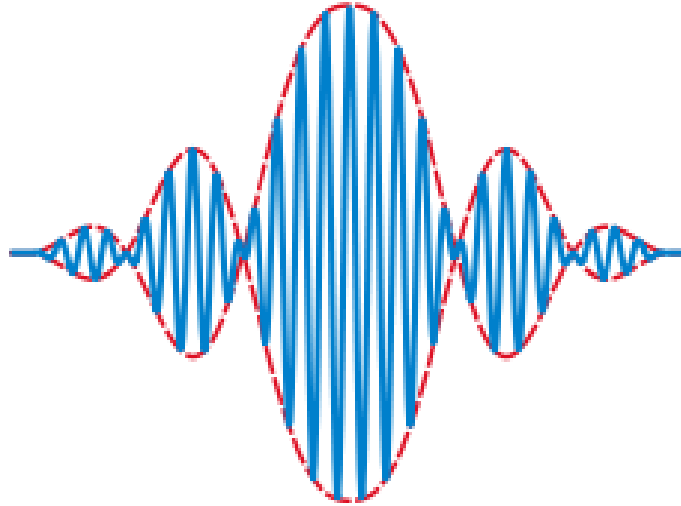
Mỗi quỹ đạo ứng với một mức năng lượng xác định của electron. Quỹ đạo gần nhân nhất ứng với mức năng lượng thấp nhất, quỹ đạo càng xa nhân ứng với mức năng lượng càng cao.

Khi e chuyển từ quỹ đạo này sang quỹ đạo khác thì xảy ra sự hấp thụ hoặc giải phóng năng lượng. Khi e chuyển từ quỹ đạo có mức năng lượng thấp sang mức năng lượng cao hơn thì nó hấp thụ năng lượng. Khi electron chuyển từ một mức năng lượng cao sang mức năng lượng thấp hơn thì xảy ra sự phát xạ năng lượng. Năng lượng của bức xạ hấp thụ hoặc giải phóng là

$$\Delta E = E_n - E_m = h\nu = h \cdot \frac{c}{\lambda}$$

Electron tồn tại ở các mức năng lượng riêng biệt trong một nguyên tử. Các mức năng lượng có thể hiểu là tương ứng với các quỹ đạo riêng biệt của electron xung quanh hạt nhân. Electron ở bên ngoài sẽ có mức năng lượng cao hơn những electron ở phía trong. Khi có sự tác động vật lý hay hóa học từ bên ngoài, các hạt electron này cũng có thể nhảy từ mức năng lượng thấp lên mức

năng lượng cao hay ngược lại. Các quá trình này có thể tạo ra hay hấp thụ các photon. Tập hợp các photon này tạo ra ánh sáng.



1.7. Minh họa tượng trưng 1 photon

Bước sóng (màu sắc) của tia sáng phụ thuộc vào sự chênh lệch năng lượng giữa các mức.

3. Lượng tính sóng hạt của các hạt vi mô

Mô hình trên đều không giải thích được 1 số vấn đề thực nghiệm đặt ra. Nguyên nhân là do:

- Không đề cập đến tính chất sóng của electron
- Do đó coi quỹ đạo chuyển động của electron trong nguyên tử là quỹ đạo tròn có bán kính xác định.

Năm 1924 nhà vật lý học người Pháp Louis De Broglie đã đưa ra giả thuyết: mọi hạt vật chất chuyển động đều có thể coi là quá trình sóng được đặc trưng bằng bước sóng λ và tuân theo hệ thức

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Trong đó

- m - Khối lượng của hạt, kg
- v - Vận tốc chuyển động của hạt , m/s
- h - Hằng số Planck, $h= 6,63.10^{-34}$ J.s

Đối với hạt vĩ mô: m khá lớn ($h = \text{const}$) $\rightarrow \lambda$ khá nhỏ \rightarrow tính chất sóng có thể bỏ qua.

Đối với hạt vi mô : m nhỏ ($h = \text{const}$) $\rightarrow \lambda$ khá khá lớn \rightarrow không thể bỏ qua tính chất sóng.

Ví dụ : Một hạt có khối lượng $m = 0,3 \text{ kg}$, vận tốc chuyển động $V = 30 \text{ m/s}$ thì λ của hạt là?

Giải:

Áp dụng hệ thức Louis De Broglie

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34}}{0,3 \cdot 30} = 0,736 \cdot 10^{-34} \text{ m}$$

λ của hạt vô cùng nhỏ nên bỏ qua tính chất sóng của hạt.

4. Nguyên lý bất định Heisenberg

Không thể xác định đồng thời chính xác cả toạ độ và vận tốc của hạt, do đó không thể vẽ được chính xác quỹ đạo chuyển động của hạt.

$$\Delta x \cdot \Delta v_x \geq \frac{h}{m}$$

Đây là hệ thức bất định Heisenberg

Trong đó

- Δx Độ bất định (sai số) về toạ độ theo phương x
- Δv_x Độ bất định (sai số) về vận tốc theo phương x

Nếu Δx càng nhỏ thì Δv_x càng lớn, nghĩa độ bất định về toạ độ càng nhỏ thì độ bất định về vận tốc càng lớn. Từ đây rút ra một kết luận quan trọng là không thể dùng cơ học cổ điển để mô tả một cách chính xác quỹ đạo chuyển động của hạt vi mô như thuyết của Bohr mà phải sử dụng một môn khoa học mới là cơ học lượng tử.

1.1.5. Ánh sáng laser

Laser là tên viết tắt của cụm từ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation có nghĩa là "khuếch đại ánh sáng bằng phát xạ kích thích" hoặc "khuếch đại ánh sáng bằng bức xạ cưỡng bức".

Tính chất

Trong thực tế, Laser là sự tạo ra một chùm hạt photon được phát xạ thỏa mãn các điều kiện sau đây

- Tất cả các photon phát ra đều có cùng bước sóng giống nhau.(ta gọi đây là sự đơn sắc)
- Tất cả các photon đều có cùng pha dao động. Nói cách khác là các photon phải được tạo ra vào cùng một thời điểm như nhau.
- Tất cả các photon đều cùng phân cực theo một phương .

Sự khác nhau giữa ánh sáng thường và ánh sáng Laser

Ánh sáng laser gồm nhiều photon cùng một tần số, đồng pha và bay gần như song song với nhau, nên có cường độ rất cao và chiều dài đồng pha của chùm sáng lớn. Tia laser thông dụng có thể có chiều dài đồng pha cỡ vài chục cm . Các tính chất này rất quý cho nhiều ứng dụng thực nghiệm.

1.2. Bản chất của sự nhìn thấy

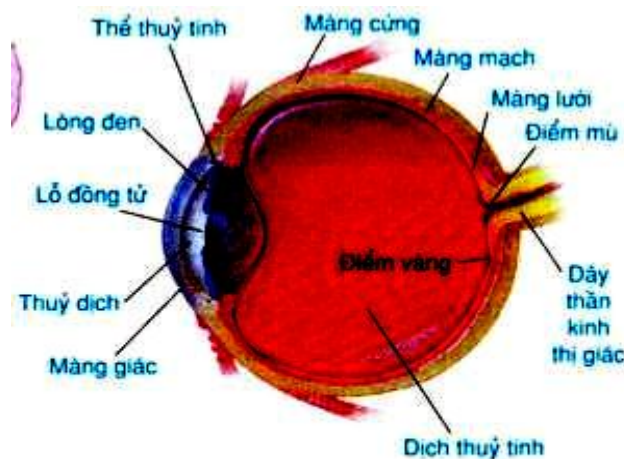
Chúng ta nhìn thấy được mọi vật xung quanh là do nguồn sáng chiếu vào vật đó rồi phản xạ vào mắt ta, nên ta thấy được vật đó.

Các dao động của điện trường trong ánh sáng tác động mạnh đến các tế bào cảm thụ ánh sáng trong mắt người.

1.2.1. Cấu tạo của mắt

Mắt giống như một máy ảnh. Nó có chức năng tạo ra một ảnh thật, nhỏ hơn vật, trên một lớp tế bào nhạy với ánh sáng, để từ đó tạo ra những tín hiệu thần kinh, đưa lên não. Tuy nhiên hệ thống quang học của mắt phức tạp hơn hệ thống quang học của máy ảnh rất nhiều.

Bộ phận chính của mắt là một thấu kính hội tụ, trong suốt, mềm, gọi là thủy tinh thể. Độ cong của hai mặt thủy tinh thể có thể thay đổi được nhờ sự co giãn của cơ đỡ nó.



Hình 49-2. Sơ đồ cấu tạo của mắt (mắt trâu hổ ngàng)

Hình 1.8. Cấu tạo sơ lược mắt

Đằng trước thủy tinh thể là một chất lỏng trong suốt, có chiết suất $n = 1,333$ gọi là thủy dịch.

Đằng sau thủy tinh thể cũng là một chất lỏng trong suốt khác, có chiết suất $n = 1,333$, gọi là dịch thủy tinh.

Mặt ngoài cùng của mắt là một màng mỏng trong suốt, cứng như sừng, gọi là giác mạc.

Thành trong của mắt, phân đôi diện với thủy tinh thể, gọi là võng mạc. Nó đóng vai trò như một màn ảnh, tại đó có các tế bào nhạy sáng, nằm ở đầu các dây thần kinh thị giác.

Trên võng mạc, có một vùng nhỏ màu vàng, rất nhạy với ánh sáng, nằm gần giao điểm V của trục chính của mắt với võng mạc. Vùng này gọi là điểm vàng.

Dưới điểm vàng một chút có điểm mù M là điểm hoàn toàn không nhạy sáng, vì tại đó các dây thần kinh phân nhánh và không có đầu dây thần kinh thị giác.

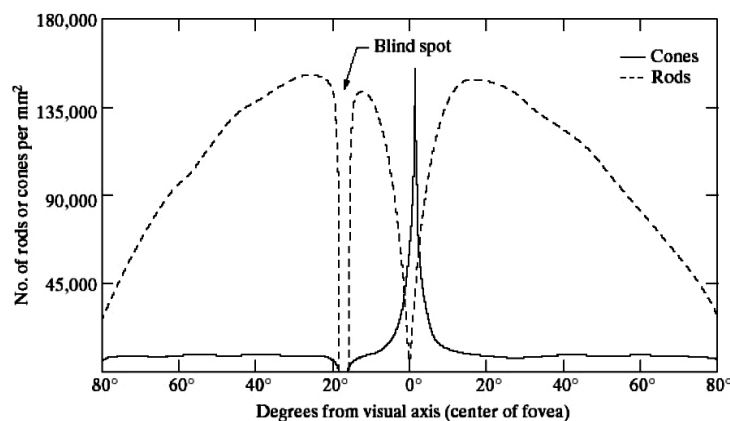
Sát mặt trước của thủy tinh thể có một màng không trong suốt, màu đen (hoặc xanh hay nâu) gọi là màng mỏng mắt (hay lòng đen).

Giữa màng mỏng mắt có một lỗ tròn nhỏ gọi là con ngươi. Tùy theo cường độ của chùm ánh sáng tới mà đường kính của con ngươi sẽ tự động thay đổi, để điều chỉnh chùm sáng chiếu vào võng mạc. ở ngoài nắng, con ngươi thu nhỏ lại; trong phòng tối, nó mở rộng ra.

Một đặc điểm rất quan trọng về mặt cấu tạo của mắt là: độ cong (do đó, tiêu cự) của thủy tinh thể có thể thay đổi được. Trong khi đó, khoảng cách từ quang tâm của thủy tinh thể đến võng mạc ($d' = OV$) lại luôn luôn không đổi ($d' = 2,2\text{cm}$).

Võng mạc người được chia làm 2 lớp (xét về mặt chức năng) gồm lớp tế bào cảm nhận ánh sáng và lớp tế bào dẫn truyền xung thần kinh.

Về tế bào học, võng mạc người chỉ có 2 loại tế bào: Tế bào gậy và tế bào nón.

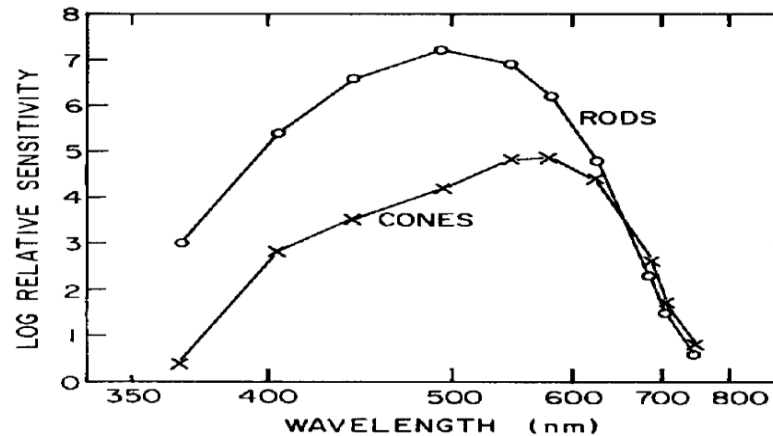


Hình 1.9. Phân bố các tế bào que và tế bào nón trong võng mạc

Tế bào gậy có chức năng xác định về cấu trúc, hình thể vật , những hình ảnh trong tối.

- Có từ 75-150 triệu
- Rất nhạy cảm với ánh sáng
- Cảm nhận trên dải rộng
- Ánh sáng ban ngày và đêm

- Cung cấp khả năng nhìn đêm
- Cảm nhận độ chói (cường độ sáng)
- Độ phân giải cao



Hình 1.10. Độ nhạy sáng của tế bào que và tế bào nón

Tế bào nón có chức năng xác định rõ về màu sắc, độ sắc nét. Trong đó, tế bào nón lại được phân thành 3 loại, nhận cảm màu sắc ánh sáng tương ứng với 3 vùng quang phổ khác nhau

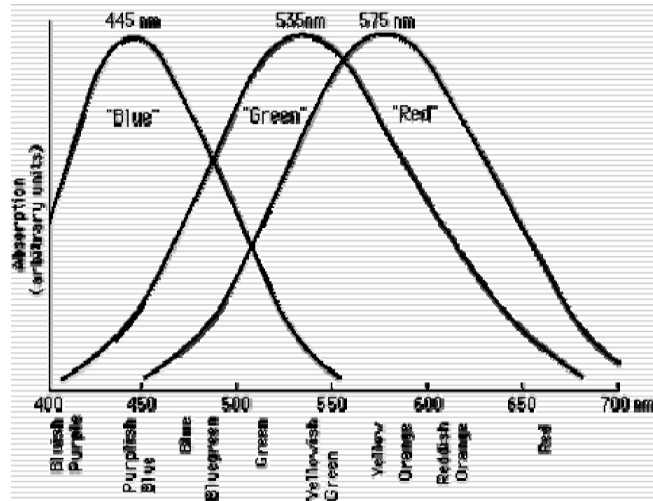
- Có từ 6-7 triệu
- Tập trung chủ yếu tại điểm vàng tại trung tâm võng mạc
- Cảm nhận trên dải hẹp
- Độ phân giải thấp
- Có 3 loại tế bào nón cảm nhận các tần số cảm nhận màu sắc 460 nm (xanh lam), 575 nm (xanh lục), 625 nm (đỏ)
- Chỉ có khả năng nhìn ban ngày

Có 3 loại tế bào nón cảm nhận 3 vùng quang phổ khác nhau (tức ba màu sắc khác nhau). Sự kết hợp cùng lúc 3 tín hiệu từ 3 loại tế bào này tạo nên những cảm giác màu sắc.

Tế bào cảm giác màu đỏ và màu lục có phổ hấp thụ rất gần nhau, do vậy mắt người phân biệt được rất nhiều màu nằm giữa màu đỏ và lục (màu vàng, màu da cam, xanh nõn chuối, ...).

Tế bào cảm giác màu lục và màu lam có phổ hấp thụ nằm xa nhau, nên mắt người phân biệt về các màu xanh không tốt.

Để tạo ra hình ảnh màu trên màn hình, người ta cũng sử dụng 3 loại đèn phát sáng ở 3 vùng quang phổ nhạy cảm của người.

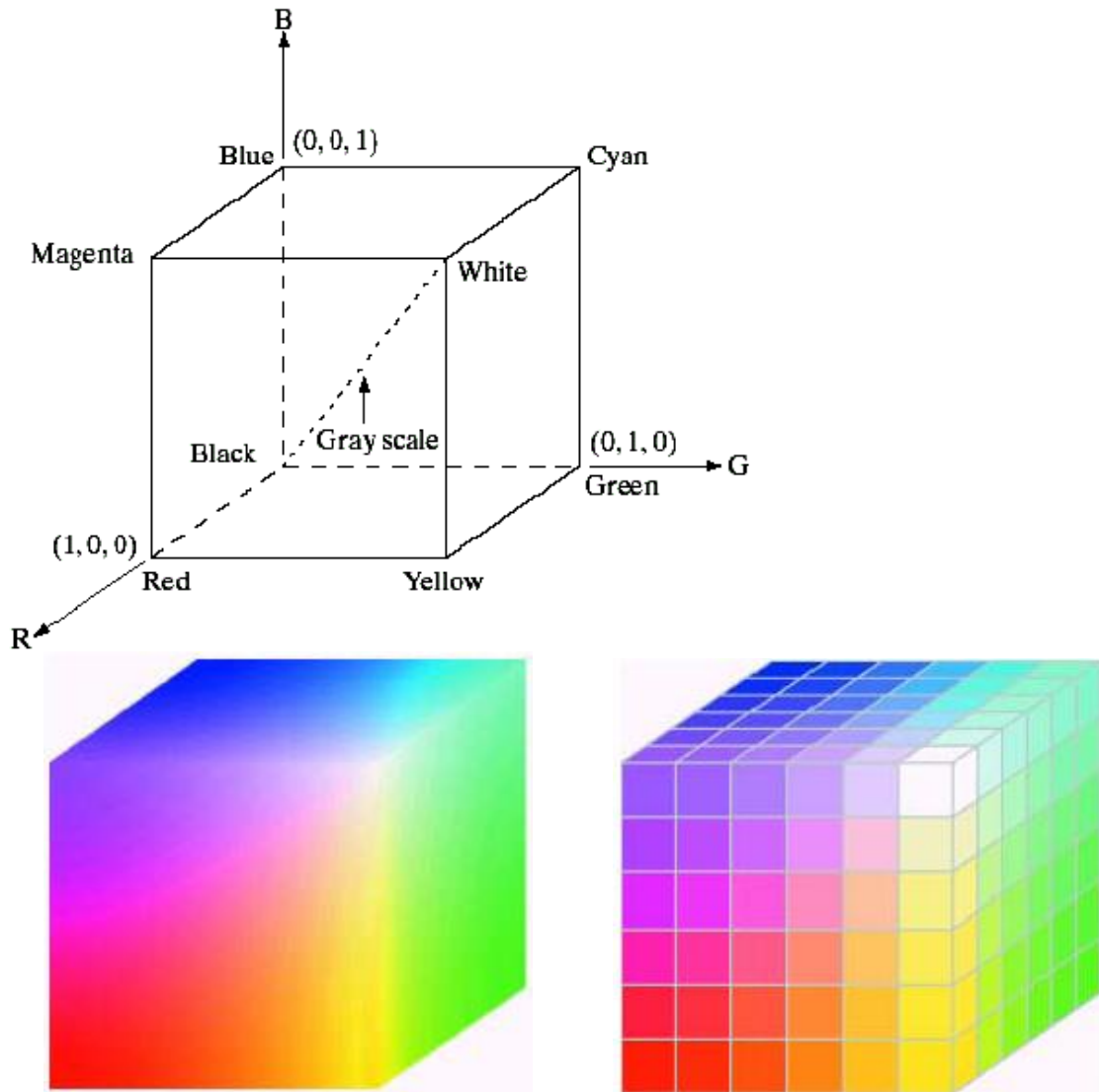


Hình 1.11. Các tế bào nón hấp thụ các phổ $Si(\lambda)$ có đỉnh tại các bước sóng

1.2.2. Các thuộc tính mô tả màu sắc

Các màu được phân biệt dựa theo các thuộc tính: độ sáng, sắc độ, và độ bão hòa màu

- Độ sáng: đặc trưng cho độ rọi cảm nhận
- Đặc trưng màu (Chrominance)
 - Sắc độ(Hue)
 - Là thuộc tính liên quan tới bước sóng chủ yếu trong hỗn hợp các bước sóng ánh sáng.
 - Đặc trưng cho màu sắc chủ đạo được người quan sát cảm nhận
 - Độ bão hòa (Saturation)
 - Đặc trưng cho độ thuần khiết tương đối
 - Phụ thuộc vào độ rộng của phổ ánh sáng
 - Thể hiện lượng màu trắng được trộn với sắc độ
 - Hue và độ bão hòa gọi là đặc trưng màu(chromaticity)



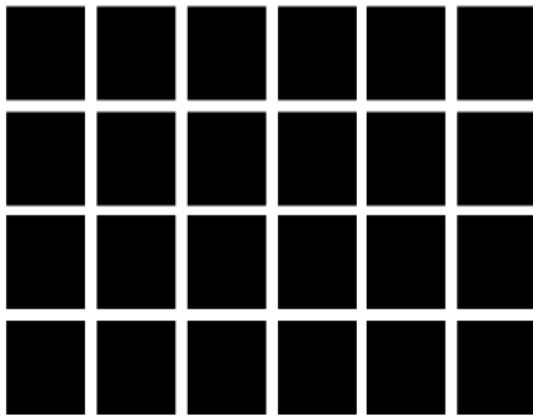
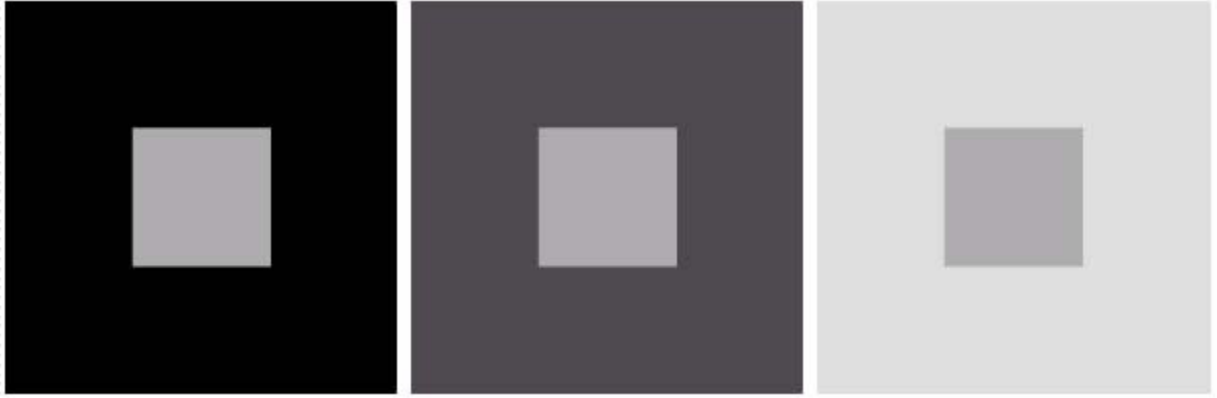
24-bit RGB color cube

RGB safe color cube

Hình 1.12. Sự biểu diễn màu sắc

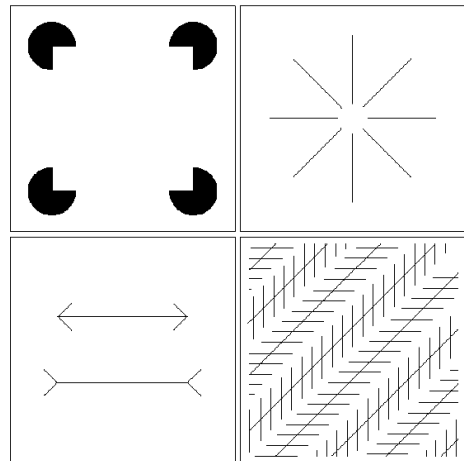
Hầu hết mắt của các sinh vật nhạy cảm với bức xạ điện từ có bước sóng nằm trong khoảng từ 300 nm đến 1200 nm. Khoảng bước sóng này trùng khớp với vùng phát xạ có cường độ mạnh nhất của Mặt Trời.

Các loài vật trên Trái Đất tiến hoá để thu nhận vùng bức xạ tự nhiên mạnh nhất đem lại lợi thế sinh tồn cho chúng.



Do You see the Phantom Spots?

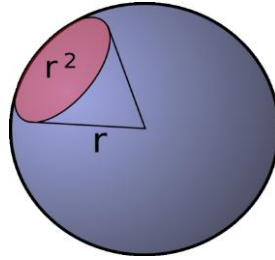
a b
c d
FIGURE 2.9 Some well-known optical illusions.



Hình 1.13. Sự cảm nhận sai độ tương phản và hình dáng kích thước của mắt

1.3. Góc khối

1.3.1. Khái niệm góc khối



Hình 1.14. Góc khối

Đơn vị đo góc khối là góc khối tương tại tâm của một hình cầu có bán kính r theo một phần trên bề mặt của hình cầu có diện tích r^2 . Như vậy ta có 4π Steradian trong hình cầu

1.3.2. Góc trông vật và năng suất phân li của mắt

Góc trông vật AB có dạng một đoạn thẳng đặt vuông góc với trục chính của mắt, là góc tạo bởi hai tia sáng đi từ hai đầu A và B của vật qua quang tâm O của mắt.

Muốn phân biệt được hai điểm A và B thì không những hai điểm đó phải nằm trong giới hạn nhìn rõ của mắt, mà góc trông đoạn AB phải đủ lớn. Thực vậy, khi đoạn AB ngắn lại, góc trông đoạn AB giảm đi, hai ảnh A' và B' của chúng trên võng mạc sẽ tiến lại gần nhau. Khi hai ảnh A', B' nằm trên cùng một đầu tế bào nhạy ánh sáng thì ta không còn phân biệt được hai điểm A và B nữa.

Do đó, người ta gọi năng suất phân li của mắt là góc trông nhỏ nhất α_{\min} giữa hai điểm A và B mà mắt còn có thể phân biệt được hai điểm đó. Lúc đó hai ảnh A' và B' của chúng nằm tại hai tế bào nhạy sáng cạnh nhau trên võng mạc.

Năng suất phân li của mắt phụ thuộc vào từng con mắt. Phép đo đặc thống kê cho ta kết quả

$$\alpha_{\min} \approx 1' \approx \frac{1}{3500} \text{rad}$$

1.3.3. Sự lưu ảnh trên võng mạc

Sau khi tắt ánh sáng kích thích trên võng mạc, phải mất một khoảng thời gian cỡ 0,1s, võng mạc mới hồi phục lại như cũ. Trong khoảng thời gian đó, cảm giác sáng chưa bị mất và người quan sát vẫn còn thấy hình ảnh của vật. Đó là sự lưu ảnh trên võng mạc.

Hiện tượng này được sử dụng trong chiếu bóng, trong vô tuyến truyền hình

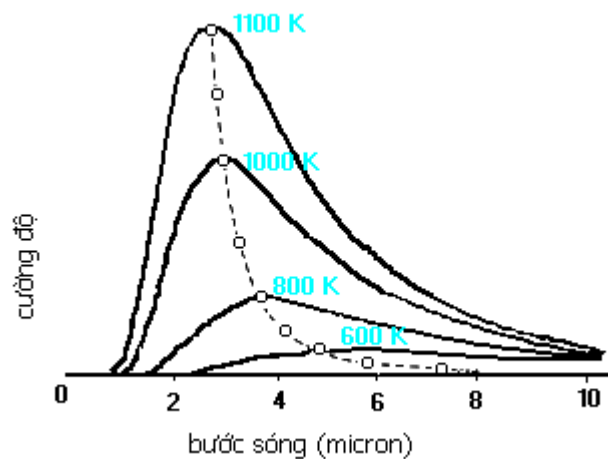
1.4. Trắc quang

1.4.1. Quang phổ

1. Quang phổ liên tục

Nếu nguồn là một bóng đèn có dây tóc nóng sáng thì qua lăng kính ta thấy có một dải sáng có màu biến đổi liên tục từ đỏ đến tím. Đó là quang phổ liên tục của ngọn đèn

Các vật rắn, lỏng hoặc khí có tỉ khối lớn khi bị nung nóng sẽ phát ra quang phổ liên tục. Mặt Trời là một khối khí có tỉ khối lớn phát sáng. Quang phổ của ánh sáng mặt trời là quang phổ liên tục. Trong quang phổ liên tục các vạch màu cạnh nhau nằm sát nhau đến mức chúng nối liền với nhau tạo nên một dải màu liên tục.



Hình 1.15. Bước sóng tia hồng ngoại phát ra giảm khi nhiệt độ các vật bị nung nóng tăng.

Một đặc điểm quan trọng của quang phổ liên tục là nó không phụ thuộc thành phần cấu tạo của nguồn sáng, mà chỉ phụ thuộc vào nhiệt độ của nguồn sáng.

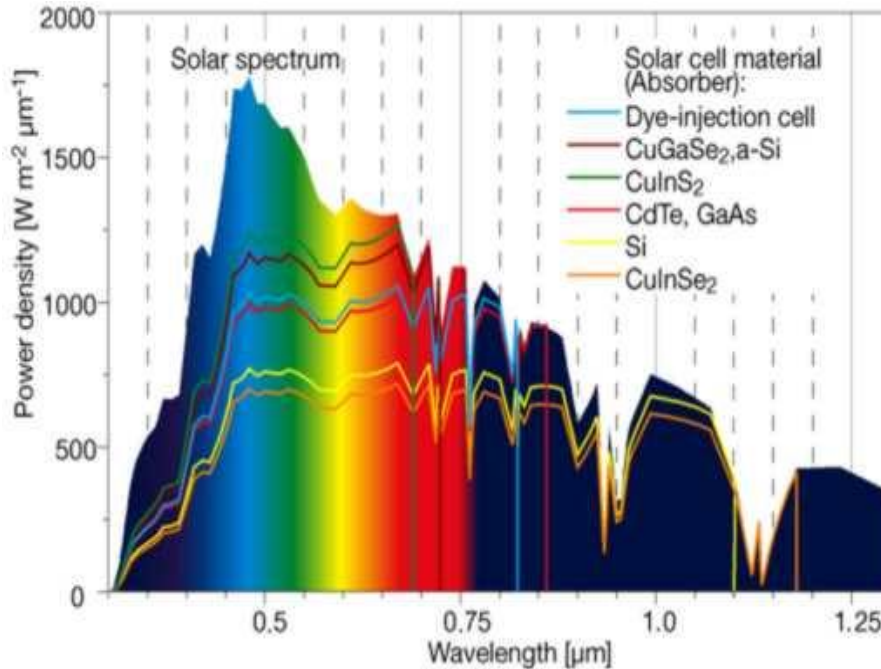
Một miếng sắt và một miếng sứ đặt trong lò, nung đến cùng một nhiệt độ sẽ cho hai quang phổ liên tục rất giống nhau.

Ở nhiệt độ 500°C , vật bắt đầu phát sáng đỏ, nhưng rất yếu, nên mắt chưa cảm nhận được và vật vẫn tối.

Nhiệt độ càng cao, miền phát sáng của vật càng mở rộng về phía ánh sáng có bước sóng ngắn của quang phổ liên tục.

Các dây tóc bóng đèn có nhiệt độ khoảng từ 2500 K đến 3000K phát sáng khá mạnh ở vùng ánh sáng nhìn thấy và cho một quang phổ liên tục có đủ màu sắc từ đỏ đến tím. ánh sáng của các bóng đèn này là ánh sáng trắng.

Nhiệt độ của bề mặt Mặt Trời khoảng 6000K. Vùng sáng mạnh của quang phổ liên tục của Mặt Trời nằm lân cận bước sóng $0,47\mu\text{m}$, ánh sáng mặt trời là ánh sáng trắng.



Hình 1.16. Phổ mặt trời

Trên bầu trời có các ngôi sao màu sáng xanh. Nhiệt độ của các ngôi sao này càng cao hơn nhiệt độ của Mặt Trời rất nhiều.

Người ta lợi dụng đặc điểm trên để xác định nhiệt độ của các vật phát sáng do nung nóng như nhiệt độ của dây tóc bóng đèn, hồ quang, lò cao, Mặt Trời, các sao v.v...

Muốn đo nhiệt độ của một vật bị nung nóng sáng, người ta so sánh độ sáng của vật đó với độ sáng của một dây tóc bóng đèn ở một vùng bước sóng nào đó (thường là đỏ).

Nhiệt độ của dây tóc bóng đèn ứng với những độ sáng khác nhau đã hoàn toàn biết trước.

2. Quang phổ vạch phát xạ.

Chiếu một chùm tia sáng do một đèn phóng điện chứa khí loãng (đèn hơi thủy ngân, đèn hydro, đèn natri v.v...) phát ra vào khe của một máy quang phổ, ta sẽ thu được trên tấm kính của buồng ảnh một quang phổ phát xạ của chất khí hoặc hơi kim loại đó. Quang phổ này bao gồm một hệ thống những vạch màu riêng rẽ nằm trên một nền tối và gọi là quang phổ vạch.

Quang phổ vạch phát xạ do các khí hay hơi ở áp suất thấp bị kích thích phát sáng ra. Có thể kích thích cho một chất khí phát sáng bằng cách đốt nóng hoặc bằng cách phóng một tia lửa điện qua đám khí hay hơi đó v.v...

Thực nghiệm cho thấy quang phổ vạch phát xạ của các nguyên tố khác nhau thì rất khác nhau về số lượng các vạch quang phổ, vị trí các vạch, màu sắc các vạch và độ sáng tỉ đối của các vạch đó.

Như vậy, mỗi nguyên tố hoá học ở trạng thái khí hay hơi nóng sáng dưới áp suất thấp cho một quang phổ vạch riêng, đặc trưng cho nguyên tố đó.

3. Quang phổ vạch hấp thụ

Chiếu một chùm sáng trắng do một đèn có dây tóc nóng sáng phát ra vào khe của một máy quang phổ ta thu được một quang phổ liên tục trên tấm kính của buồng ảnh. Nếu trên đường đi của chùm sáng ta đặt một ngọn đèn có hơi natri nung nóng thì trong quang phổ liên tục nói trên xuất hiện một vạch tối (thực ra là hai vạch tối nằm sát cạnh nhau) ở đúng vị trí của vạch vàng trong quang phổ phát xạ của natri. Đó là quang phổ hấp thụ của natri.

Nếu thay hơi natri bằng hơi kali thì trên quang phổ liên tục xuất hiện những vạch tối ở đúng chỗ những vạch màu của quang phổ phát xạ của kali. Đó là quang phổ hấp thụ của kali.

Quang phổ của Mặt Trời mà ta thu được trên Trái Đất là quang phổ hấp thụ. Bề mặt của Mặt Trời (quang cầu) phát ra một quang phổ liên tục. ánh sáng từ quang cầu đi qua lớp khí quyển của Mặt Trời đến Trái Đất cho ta một quang phổ hấp thụ của khí quyển đó.

Điều kiện để thu được quang phổ hấp thụ là nhiệt độ của đám khí hay hơi hấp thụ phải thấp hơn nhiệt độ của nguồn sáng phát ra quang phổ liên tục.

4. Hiện tượng đảo sắc các vạch quang phổ

Có một hiện tượng đặc biệt liên hệ giữa quang phổ vạch hấp thụ và quang phổ vạch phát xạ của cùng một nguyên tố: hiện tượng đảo sắc. Hiện tượng này xảy ra như sau

Giả sử đám hơi hấp thụ ở trong thí nghiệm trên được nung nóng đến nhiệt độ mà chúng có thể phát sáng, tuy nhiệt độ này vẫn còn thấp hơn nhiệt độ của nguồn sáng trắng. Trên kính ảnh của máy quang phổ, ta thu được quang phổ hấp thụ của đám hơi đó.

Bây giờ ta đột nhiên tắt nguồn sáng trắng đi. Ta sẽ thấy biến mất nền quang phổ liên tục trên kính ảnh, đồng thời những vạch đen của quang phổ hấp thụ trở thành những vạch màu của quang phổ vạch phát xạ của chính nguyên tố đó. Đó là hiện tượng đảo sắc của vạch quang phổ.

Thí dụ: trong quang phổ hấp thụ của hơi natri có một vạch đen kép nằm đúng vị trí của hai vạch vàng ($0,5890\mu\text{m}$, $0,5896\mu\text{m}$) của natri.

Vậy, ở một nhiệt độ nhất định, một đám hơi có khả năng phát ra những ánh sáng đơn sắc nào thì nó cũng có khả năng hấp thụ những ánh sáng đơn sắc đó.

Quang phổ vạch hấp thụ của mỗi nguyên tố cũng có tính chất đặc trưng riêng cho nguyên tố đó. Vì vậy, cũng có thể căn cứ vào quang phổ vạch hấp

thụ để nhận biết sự có mặt của nguyên tố đó trong các hỗn hợp hay hợp chất. Đó là nội dung của phép phân tích quang phổ hấp thụ.

Nhờ có việc phân tích quang phổ hấp thụ của Mặt Trời mà người ta đã phát hiện ra heli ở trên Mặt Trời, trước khi tìm thấy nó ở Trái Đất. Ngoài ra người ta còn thấy có mặt của rất nhiều nguyên tố trong khí quyển Mặt Trời như hiđrô, natri, canxi, sắt v.v...

5. Phép phân tích quang phổ và tiện lợi của phép phân tích quang phổ

Phép phân tích thành phần cấu tạo của các chất dựa vào việc nghiên cứu quang phổ gọi là phép phân tích quang phổ.

Trong phép phân tích quang phổ định tính, người ta chỉ cần biết sự có mặt của các thành phần khác nhau trong mẫu mà người ta cần nghiên cứu. Phép phân tích quang phổ định tính thì đơn giản và cho kết quả nhanh hơn các phép phân tích hoá học.

Trong phép phân tích quang phổ định lượng, người ta cần biết cả nồng độ của các thành phần trong mẫu. Phép phân tích quang phổ hết sức nhạy. Người ta có thể phát hiện được một nồng độ rất nhỏ của chất trong mẫu (thường vào khoảng 0,002%).

Nhờ phép phân tích quang phổ mà người ta đã biết được thành phần cấu tạo và nhiệt độ của các vật ở rất xa như Mặt Trời và các sao.

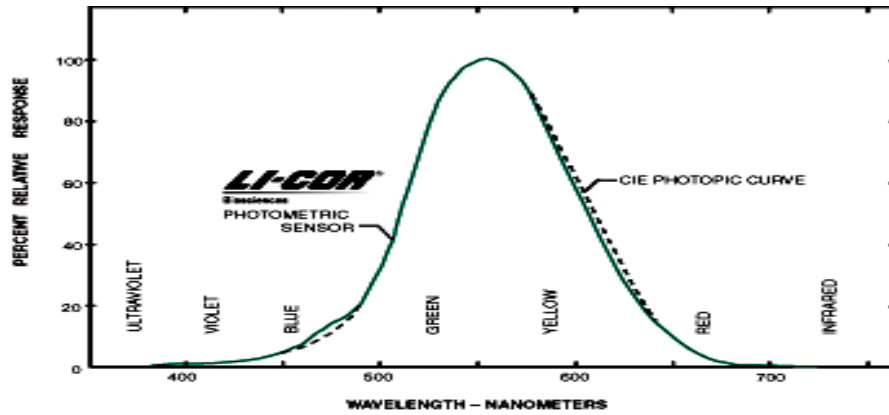
1.4.2. Khái niệm quang trắc

Các hệ đo ánh sáng dựa trên cơ sở mô phỏng đáp ứng của mắt người với ánh sáng.

Trắc quang là phép đo các đại lượng liên quan với ánh sáng trong vùng 400-700 nm.

Phép trắc quang và quang kế sử dụng các đại lượng và đơn vị khác với bức xạ kế. Các hệ trắc quang dựa trên cơ sở các bộ thu có đáp ứng với năng lượng bức xạ theo kiểu như đáp ứng của mắt người.

Người ta dùng một số rất lớn dữ liệu thống kê để tạo ra đường cong chuẩn mô tả đáp ứng phổ của mắt, gọi là đường quan sát chuẩn (hay đường đặc trưng cho quan sát chuẩn) (Standard observer curve hay Luminosity curve for the Standard observer) hay còn gọi là đường cong CIE (“Commision International de l’Eclairage” của Hội đồng “International Commision on Illumination”).



Hình 1.17. đường quan sát chuẩn

Lưu ý trên đồ thị đường cong chuẩn (độ trung tương đối phụ thuộc bước sóng). Bước sóng 555nm là sáng nhất. Một nguồn có thể bức xạ một năng lượng bức xạ như nhau ở 555nm và 610nm, sẽ có độ sáng 0,5 khi hoạt động ở 610nm so với độ sáng 1 khi hoạt động ở 555 nm

BẢNG ĐỘ TRUNG TƯƠNG ĐỐI η ($\eta = 1$ Tại bước sóng 555 nm)

Bước sóng (nm)	Độ trung tương đối	Bước sóng (nm)	Độ trung tương đối
410	0,001	570	0,952
420	0,004	585	0,870
430	0,012	595	0,757
443	0,023	600	0,631
450	0,038	610	0,503
460	0,060	621	0,381
470	0,091	630	0,265
480	0,193	640	0,175
490	0,208	650	0,107
500	0,323	660	0,061
510	0,503	670	0,032
520	0,710	680	0,017
530	0,862	690	0,008
540	0,954	700	0,004
550	0,995	710	0,002
560	0,995	720	0,001

Dòng công suất quang được đo theo Lumen và ký hiệu F_v . Lumen có nghĩa tương tự như đơn vị của công suất Watt nhưng dùng trong vùng bước sóng khả kiến

Quan hệ giữa dòng công suất bức xạ và dòng công suất quang

$$F_v = 683[\text{lm/W}].\Phi_e \eta$$

Với

- F_v : Dòng quang (lumen)
- Φ_e : Dòng bức xạ (Watt)
- 683 lm/W : Hằng số vật lý
- η : Độ trung tương đối ở bước sóng đang xét

Các đặc trưng cơ bản:

- Năng lượng quang trung (Luminous Energy): Q_v lumen.second (lm.s)
- Dòng quang trung: $F_v = dQ_v/dt$ lumen (lm)
- Mật độ dòng quang trung chiếu xạ : $E_v = dF_v/dA$ lm/m^2
- Kích thích quang trung: $M_v = dF_v/dA$ lm/m^2
- Cường độ sáng): $I_v = dF_v/d\omega = E_v .R^2$ lm/sr
- ω góc đặc (góc khối) Sr (Steradian)
- Độ quang trung-Luminance $L_v = dF_v / (d\omega.dA.\cos\theta)$ lm/sr.m^2

Độ quang trung-Luminance L_v của một nguồn có cường độ $I_{(\theta)}$ tại vị trí của đầu thu

$$L_v = I_{(\theta)_t} / a \cos\theta$$

$I_{(\theta)}$: Cường độ bức xạ, là hàm số theo θ (góc giữa tia tới và pháp tuyến của diện tích bị chiếu xạ)

a : Diện tích của nguồn bức xạ.

1.4.3. Các đơn vị đo bức xạ

Các khái niệm cơ bản

Radiant energy (năng lượng bức xạ) (J)	Q_e	Joule
Radiant Flux (dòng bức xạ) (W)	$\Phi_e = (dQ_e/dt) _{\text{qua diện tích } dA}$	Watt
Flux density (mật độ dòng quang tới /đvdt) còn gọi là irradiance (độ rọi năng lượng):	$H_e = d\Phi_e/dA$	(W/m^2)
Radiant Emittance (độ trung năng lượng) là mật độ dòng kích thích trên bề mặt của nguồn được kiểm tra:	$M_e = d\Phi_e/dA$	(W/m^2)
Radiant Intensity (cường độ bức xạ)	$I_e = d\Phi_e/d\omega$	(W/sr)
	với $d\omega = dA/R^2$	Steradian (sr)
Chú ý trường hợp nguồn điểm đẳng hướng	$I_e = \Phi_e/4\pi = H_e R^2$	
Radiance (công suất bức xạ trên đơn vị góc đặc và trên đơn vị diện tích)	$L_\lambda = d\Phi_e/d\omega dA \cos\theta$	$(W/sr.m^2)$
Spectral Radiant Power (công suất bức xạ trên đơn vị bước sóng):	$\Phi_\lambda = dQ_e/d\lambda$	(W/nm)
Spectral Emittance (phổ kích thích, độ rọi phổ)	$W_\lambda = dM_e/d\lambda$	$(W/m^2.nm)$
Spectral Radiant Intensity: (W/sr.nm)	$I_\lambda = dI_e/d\lambda$	
Spectral Radiance	$L_\lambda = dL_e/d\lambda$	$(W/sr.m^2.nm)$

Đơn vị ánh sáng và bức xạ điện từ có liên quan				
1	năng lượng bức xạ	jun	J	$1J = 1N.1m = 1m^2.kg.s^{-2}$

2	công suất bức xạ (thông lượng bức xạ)	oát	W	$1W = 1J/1s = 1m^2.kg.s^{-3}$
3	cường độ bức xạ	oát trên steradian	W/sr	Oát trên steradian là cường độ bức xạ của một nguồn điểm phát đều thông lượng bức xạ 1 oát trong góc khối 1 steradian. $1W/sr = 1m^2.kg.s^{-3}$
4	độ chói năng lượng	oát trên steradian mét vuông	W/(sr.m ²)	Oát trên steradian mét vuông là độ chói năng lượng theo một hướng đã cho tại một điểm trên bề mặt có cường độ bức xạ của phân tử bề mặt ấy là 1 oát trên steradian và diện tích hình chiếu của phân tử lên mặt phẳng vuông góc với hướng trên là 1 mét vuông. $1W/(sr.m^2) = 1kg.s^{-3}$
5	năng suất bức xạ	oát trên mét vuông	W/m ²	Oát trên mét vuông là năng suất bức xạ tại một điểm trên bề mặt có thông lượng bức xạ từ một phân tử diện tích 1 mét vuông của bề mặt này là 1 oát. $1W/m^2 = 1kg.s^{-3}$
6	độ rọi năng lượng	oát trên mét vuông	W/m ²	Oát trên mét vuông là độ rọi năng lượng ở một điểm trên bề mặt có thông lượng bức xạ 1 oát chiếu lên phân tử diện tích 1 mét vuông của bề mặt đó. $1W/m^2 = 1kg.s^{-3}$
7	cường độ sáng	candela	cd	Candela là cường độ sáng theo một phương xác định của một nguồn phát ra bức xạ đơn sắc có tần số 540×10^{12} héc và có cường độ bức xạ theo phương đó là 1/683 oát trên steradian (CGPM lần thứ 16, 1979). Đơn vị cơ bản.

8	độ chói	candela trên mét vuông	cd/m ²	<p>Candela trên mét vuông là độ chói của một nguồn phẳng 1 mét vuông có cường độ sáng 1 candela đo theo phương vuông góc với nguồn.</p> $1\text{cd/m}^2 = 1\text{m}^{-2}.\text{cd}$
9	quang thông	lumen	lm	<p>Lumen là quang thông do một nguồn sáng điểm cường độ 1 candela phát đều trong góc khối 1 steradian.</p> $1\text{lm} = 1\text{cd}.1\text{sr} = 1\text{cd}$
10	lượng sáng	lumen giây	lm.s	<p>Lumen giây là lượng sáng của quang thông 1 lumen tính trong thời gian 1 giây.</p> $1\text{lm.s} = 1\text{cd.s}$
		lumen giờ	lm.h	$1\text{lm.h} = 3\,600\text{lm.s}$
11	năng suất phát sáng (độ trung)	lumen trên mét vuông	lm/m ²	<p>Lumen trên mét vuông là năng suất phát sáng của một nguồn hình cầu có diện tích mặt ngoài 1 mét vuông phát ra một quang thông 1 lumen phân bố đều theo mọi phương.</p> $1\text{lm/m}^2 = 1\text{m}^{-2}.\text{cd}$
12	độ rọi	lux	lx	<p>Lux là độ rọi của một mặt phẳng nhận quang thông 1 lumen phân bố đều trên diện tích 1 mét vuông của mặt đó.</p> $1\text{lx} = 1\text{lm}/1\text{m}^2 = 1\text{m}^{-2}.\text{cd}$
13	lượng rọi	lux giây	lx.s	<p>Lux giây là lượng rọi ứng với độ rọi 1 lux trong thời gian 1 giây.</p> $1\text{lx.s} = 1\text{m}^{-2}.\text{s.cd}$
		lux giờ	lx.h	$1\text{lx.h} = 3\,600\text{lx.s}$
14	độ tụ (quang lực)	một trên mét	m ⁻¹	<p>Một trên mét là độ tụ của một hệ quang có tiêu cự 1 mét trong môi trường chiết suất bằng 1.</p> $1\text{m}^{-1} = 1\text{m}^{-1}$

		điôp	dp	Điôp là tên gọi khác của đơn vị một trên mét. $1dp = 1m^{-1}$
--	--	------	----	--

Chương 2

BÁN DẪN

2.1. Lý thuyết dải năng lượng

2.1.1 Mức năng lượng và dải năng lượng

Ta biết rằng vật chất được cấu tạo từ những nguyên tử (đó là thành phần nhỏ nhất của nguyên tố mà còn giữ nguyên tính chất của nguyên tố đó). Theo mô hình của nhà vật lý Anh Rutherford (1871-1937), nguyên tử gồm có một nhân mang điện tích dương (Proton mang điện tích dương và Neutron trung hoà về điện) và một số điện tử (electron) mang điện tích âm chuyển động chung quanh nhân và chịu tác động bởi lực hút của nhân.

Nguyên tử luôn luôn trung hoà điện tích, số electron quay chung quanh nhân bằng số proton chứa trong nhân - điện tích của một proton bằng điện tích một electron nhưng trái dấu). Điện tích của một electron là $-1,602 \cdot 10^{-19}$ C (Coulomb), điều này có nghĩa là để có được 1 Coulomb điện tích phải có $6,242 \cdot 10^{18}$ electron. điện tích của điện tử có thể đo được trực tiếp nhưng khối lượng của điện tử không thể đo trực tiếp được. Tuy nhiên, người ta có thể đo được tỉ số giữa điện tích và khối lượng (e/m), từ đó suy ra được khối lượng của điện tử là $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ Kg

$$m_e = m_0 / \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Đó là khối lượng của điện tử khi nó chuyển động với vận tốc rất nhỏ so với vận tốc ánh sáng ($c = 3 \cdot 10^8$ m/s). Khi vận tốc điện tử tăng lên, khối lượng của điện tử được tính theo công thức Lorentz-Einstein:

Mỗi điện tử chuyển động trên một đường tròn và chịu một gia tốc xuyên tâm. Theo thuyết điện từ thì khi chuyển động có gia tốc, điện tử phải phát ra năng lượng. Sự mất năng lượng này làm cho quỹ đạo của điện tử nhỏ dần và sau một thời gian ngắn, điện tử sẽ rơi vào nhân. Nhưng trong thực tế, các hệ thống này là một hệ thống bền theo thời gian. Do đó, giả thuyết của Rutherford không đứng vững.

Nhà vật lý học Đan Mạch Niels Bohr (1885- 1962) đã bỏ tước bằng các giả thuyết sau:

- Có những quỹ đạo đặc biệt, trên đó điện tử có thể di chuyển mà không phát ra năng lượng. Tương ứng với mỗi quỹ đạo có một mức năng lượng nhất định. Ta có một quỹ đạo dừng.

- Khi điện tử di chuyển từ một quỹ đạo tương ứng với mức năng lượng w_1 sang quỹ đạo khác tương ứng với mức năng lượng w_2 thì sẽ có hiện tượng bức xạ hay hấp thụ năng lượng. Tần số của bức xạ (hay hấp thụ) này là

$$f = \frac{w_2 - w_1}{h}$$

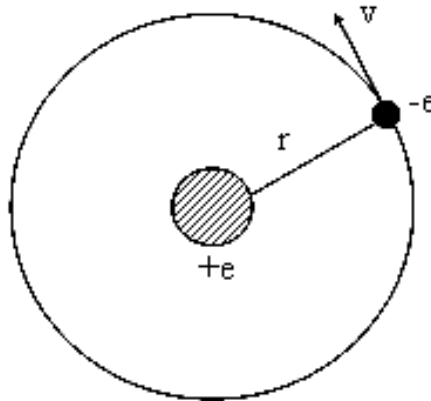
Trong đó, $h=6,62.10^{-34}$ J.s (hằng số Planck).

- Trong mỗi quỹ đạo dừng, moment động lượng của điện tử bằng bội số của

$$\frac{h}{2\pi} = \hbar$$

Moment động lượng:

$$m.v.r = n \cdot \frac{h}{2\pi} = n \cdot \hbar$$



Hình 2.1. Mô hình nguyên tử hydro

Với giả thuyết trên, người ta đã dự đoán được các mức năng lượng của nguyên tử hydro và giải thích được quang phổ vạch của Hydro, nhưng không giải thích được đối với những nguyên tử có nhiều điện tử. Nhận thấy sự đối tính giữa sóng và hạt, Louis de Broglie (Nhà vật lý học Pháp) cho rằng có thể liên kết mỗi hạt điện khối lượng m , chuyển động với vận tốc v một bước sóng

$$\lambda = \frac{h}{mv}$$

Trong khi giải phương trình Schrodinger để tìm năng lượng của những điện tử trong một nguyên tử duy nhất, người ta thấy rằng mỗi trạng thái năng lượng của electron phụ thuộc vào 4 số nguyên gọi là 4 số nguyên lượng

- Số nguyên lượng xuyên tâm (Số nguyên lượng chính). Xác định kích thước của quỹ đạo $n=1,2,3,\dots,7$
- Số nguyên lượng phương vị: (Số nguyên lượng phụ). Xác định hình thể quỹ đạo $l=1,2,3,\dots,n-1$
- Số nguyên lượng từ. Xác định phương hướng của quỹ đạo $m_l=0, \pm 1, \dots, \pm l$
- Số nguyên lượng Spin. Xác định chiều quay của electron

$$m_s = \pm \frac{1}{2}$$

Trong một hệ thống gồm nhiều nguyên tử, các số nguyên lượng tuân theo nguyên lý ngoại trừ Pauli. Nguyên lý này cho rằng: trong một hệ thống không thể có 2 trạng thái nguyên lượng giống nhau, nghĩa là không thể có hai điện tử có 4 số nguyên lượng hoàn toàn giống nhau.

2.1.2 Phân bố điện tử trong nguyên tử theo năng lượng

Tất cả các nguyên tử có cùng số nguyên lượng chính n hợp thành một tầng có tên là K,L,M,N,O,P,Q ứng với $n=1,2,3,4,5,6,7$.

Ở mỗi tầng, các điện tử có cùng số l tạo thành các phụ tầng có tên s, p, d, f tương ứng với $l=0,1,2,3$

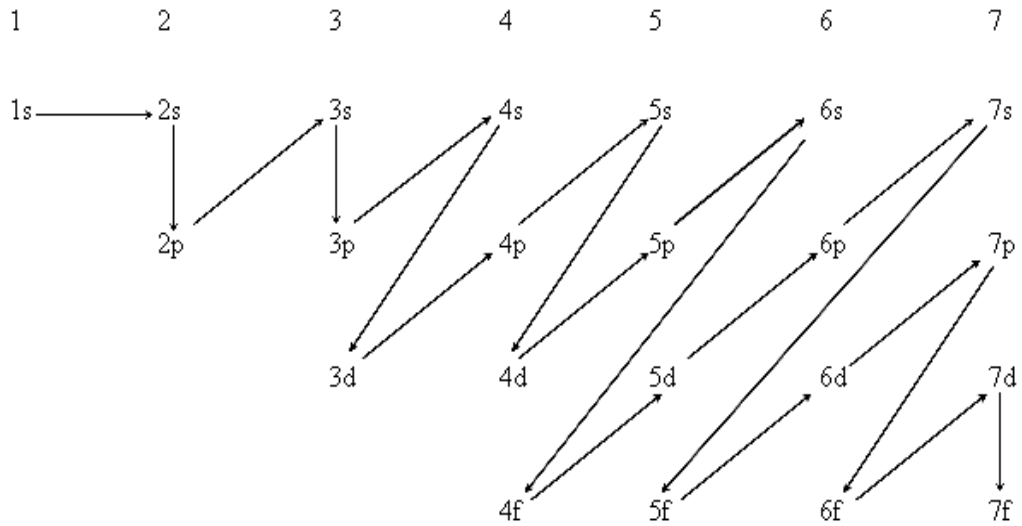
- Tầng K ($n=1$) có một phụ tầng s có tối đa 2 điện tử.
- Tầng L ($n=2$) có một phụ tầng s có tối đa 2 điện tử và một phụ tầng p có tối đa 6 điện tử.
- Tầng M ($n=3$) có một phụ tầng s (tối đa 2 điện tử), một phụ tầng p (tối đa 6 điện tử) và một phụ tầng d (tối đa 10 điện tử).
- Tầng N ($n=4$) có một phụ tầng s (tối đa 2 điện tử), một phụ tầng p (tối đa 6 điện tử), một phụ tầng d (tối đa 10 điện tử) và một phụ tầng f (tối đa 14 điện tử).

Như vậy:

- Tầng K có tối đa 2 điện tử.
- Tầng L có tối đa 8 điện tử.
- Tầng M có tối đa 18 điện tử.

- Tầng N có tối đa 32 điện tử.
- Các tầng O,P,Q cũng có 4 phụ tầng và cũng có tối đa 32 điện tử.

Ứng với mỗi phụ tầng có một mức năng lượng và các mức năng lượng được xếp theo thứ tự như sau:

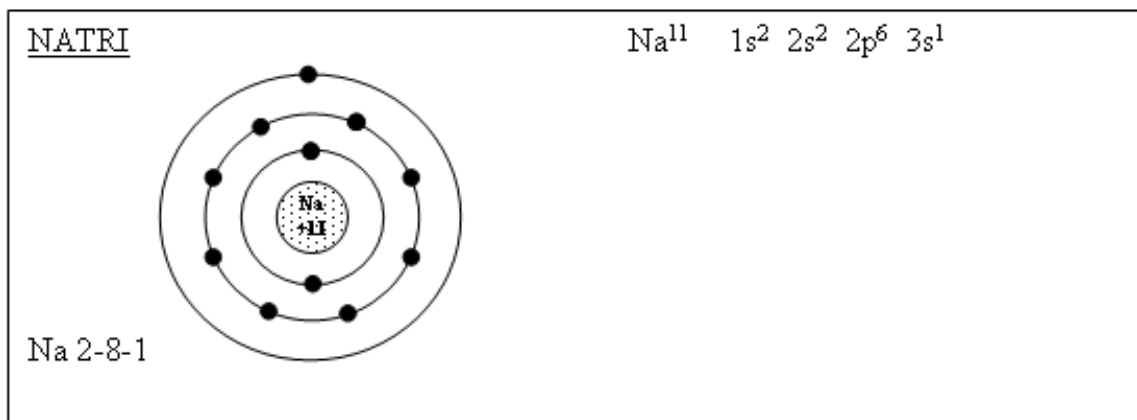


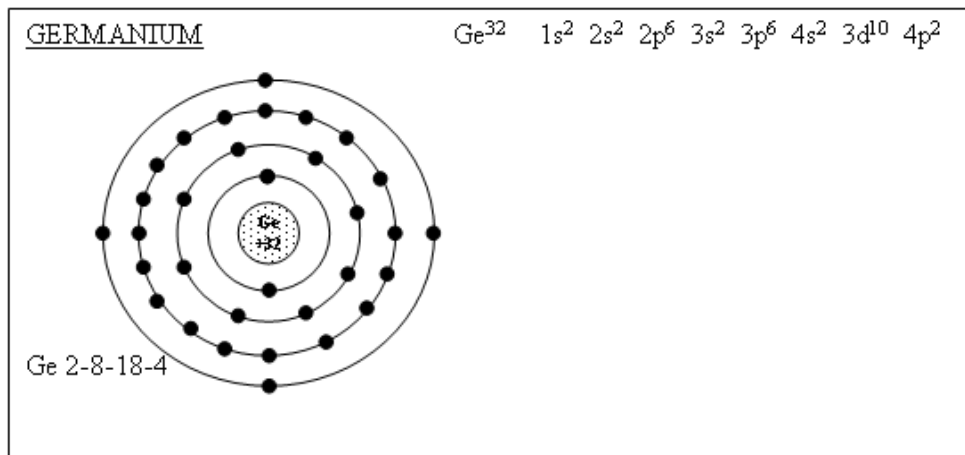
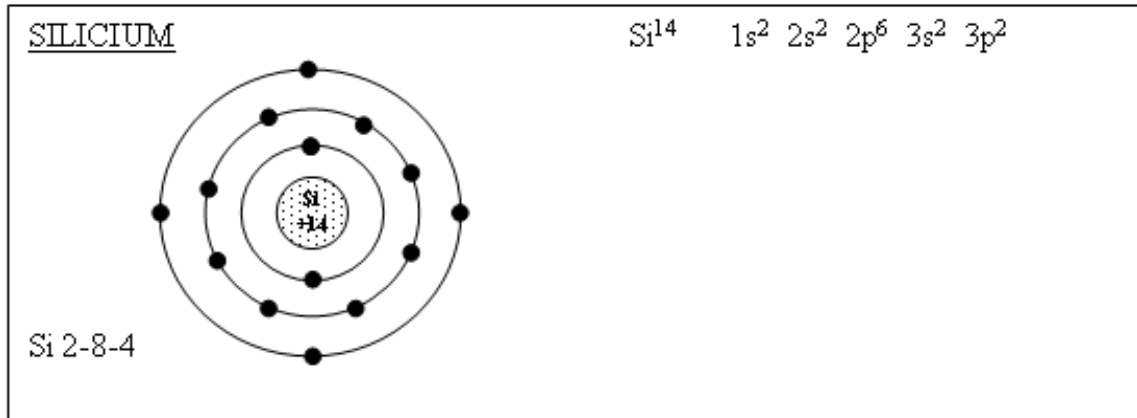
Hình 2.2. Phân bố điện tử trong nguyên tử theo năng lượng

Khi không bị kích thích, các trạng thái năng lượng nhỏ bị điện tử chiếm trước (gần nhân hơn) khi hết chỗ mới sang mức cao hơn (xa nhân hơn).

Thí dụ: nguyên tử Na có số điện tử $z=11$, có các phụ tầng 1s,2s,2p bị các điện tử chiếm hoàn toàn nhưng chỉ có 1 điện tử chiếm phụ tầng 3s.

Cách biểu diễn





Hình 2.3. . Mô hình nguyên tử Na, Si, Ge

Lớp bảo hoà: Một phụ tầng bảo hoà khi có đủ số điện tử tối đa.

Một tầng bảo hoà khi mọi phụ tầng đã bảo hoà. Một tầng bảo hoà rất bền, không nhận thêm và cũng khó mất điện tử.

Tầng ngoài cùng: Trong một nguyên tử, tầng ngoài cùng không bao giờ chứa quá 8 điện tử. Nguyên tử có 8 điện tử ở tầng ngoài cùng đều bền vững (trường hợp các khí trơ).

Các điện tử ở tầng ngoài cùng quyết định hầu hết tính chất hoá học của một nguyên tố.

2.1.3. Dải năng lượng (Energy bands)

Những công trình khảo cứu ở tia X chứng tỏ rằng hầu hết các chất bán dẫn đều ở dạng kết tinh.

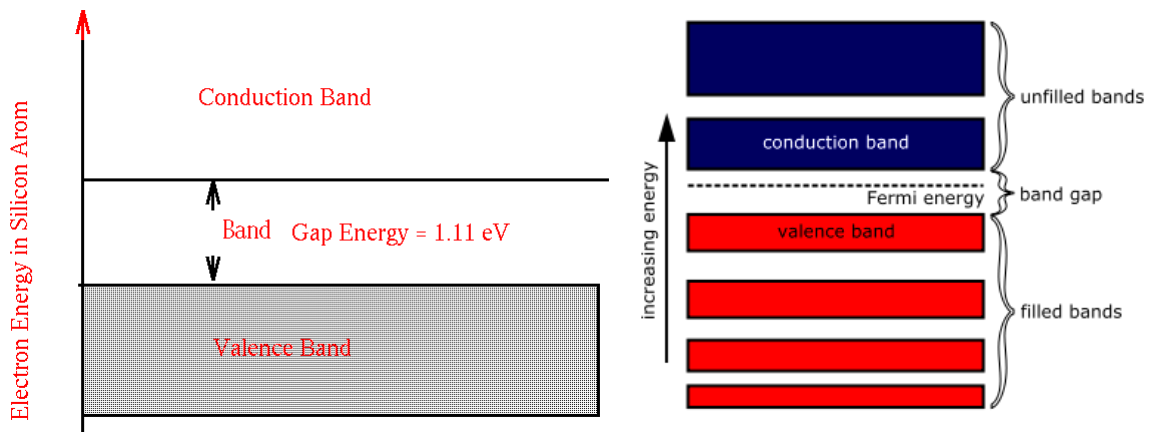
Tính chất dẫn điện của các vật liệu rắn được giải thích nhờ lý thuyết vùng năng lượng. Như ta biết, điện tử tồn tại trong nguyên tử trên những mức năng lượng gián đoạn (các trạng thái dừng). Nhưng trong chất rắn, khi mà các nguyên tử kết hợp lại với nhau thành các khối, thì các mức năng lượng này bị phủ lên nhau, và trở thành các vùng năng lượng và sẽ có ba vùng chính.

Ta khảo sát một tinh thể bất kỳ, năng lượng của điện tử được chia thành từng dải. Dải năng lượng cao nhất bị chiếm gọi là dải hoá trị, dải năng lượng thấp nhất chưa bị chiếm gọi là dải dẫn điện. Khoảng cách hai dải năng lượng này gọi là dải cấm.

Vùng hóa trị (valence band): Là vùng có năng lượng thấp nhất theo thang năng lượng, là vùng mà điện tử bị liên kết mạnh với nguyên tử và không linh động.

Vùng dẫn (Conduction band): Vùng có mức năng lượng cao nhất, là vùng mà điện tử sẽ linh động (như các điện tử tự do) và điện tử ở vùng này sẽ là điện tử dẫn, có nghĩa là chất sẽ có khả năng dẫn điện khi có điện tử tồn tại trên vùng dẫn. Tính dẫn điện tăng khi mật độ điện tử trên vùng dẫn tăng.

Vùng cấm (Forbidden band): Là vùng nằm giữa vùng hóa trị và vùng dẫn, không có mức năng lượng nào do đó điện tử không thể tồn tại trên vùng cấm. Nếu bán dẫn pha tạp, có thể xuất hiện các mức năng lượng trong vùng cấm (mức pha tạp). Khoảng cách giữa đáy vùng dẫn và đỉnh vùng hóa trị gọi là độ rộng vùng cấm, hay năng lượng vùng cấm (Band Gap). Tùy theo độ rộng vùng cấm lớn hay nhỏ mà chất có thể là dẫn điện hoặc không dẫn điện.



Hình 2.4. Dải năng lượng

Như vậy, tính dẫn điện của các chất rắn và tính chất của chất bán dẫn có thể lý giải một cách đơn giản nhờ lý thuyết vùng năng lượng như sau

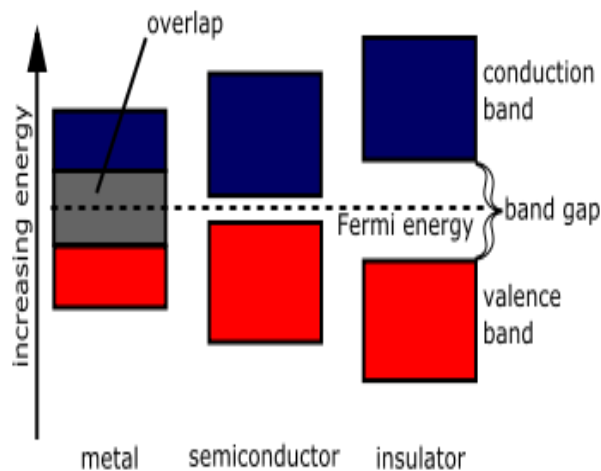
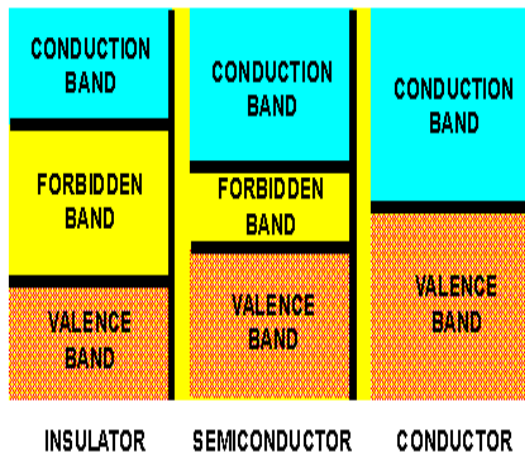
Kim loại có vùng dẫn và vùng hóa trị phủ lên nhau (không có vùng cấm) do đó luôn luôn có điện tử trên vùng dẫn vì thế mà kim loại luôn luôn dẫn điện.

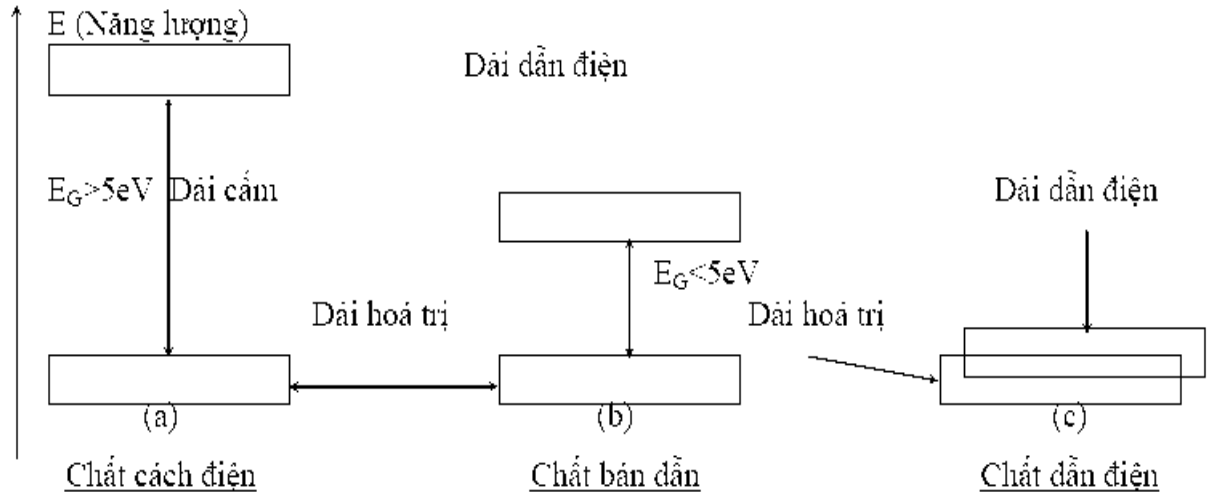
Các chất bán dẫn có vùng cấm có một độ rộng xác định. Ở không độ tuyệt đối (0 K), mức Fermi nằm giữa vùng cấm, có nghĩa là tất cả các điện tử tồn tại ở vùng hóa trị, do đó chất bán dẫn không dẫn điện. Khi tăng dần nhiệt độ, các điện tử sẽ nhận được năng lượng nhiệt ($k_B.T$ với k_B là hằng số Boltzmann) nhưng năng lượng này chưa đủ để điện tử vượt qua vùng cấm nên điện tử vẫn ở vùng hóa trị. Khi tăng nhiệt độ đến mức đủ cao, sẽ có một số

điện tử nhận được năng lượng lớn hơn năng lượng vùng cấm và nó sẽ nhảy lên vùng dẫn và chất rắn trở thành dẫn điện. Khi nhiệt độ càng tăng lên, mật độ điện tử trên vùng dẫn sẽ càng tăng lên, do đó, tính dẫn điện của chất bán dẫn tăng dần theo nhiệt độ (hay điện trở suất giảm dần theo nhiệt độ).

Ta có 3 trường hợp tóm tắt sau

- Dải cấm có độ cao khá lớn ($E_G > 5\text{eV}$) ($1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). Đây là trường hợp của các chất cách điện. Thí dụ như kim cương có $E_G = 7\text{eV}$, SiO_2 $E_G = 9\text{eV}$.
- Dải cấm có độ cao nhỏ ($E_G < 5\text{eV}$). Đây là trường hợp chất bán dẫn điện. Thí dụ: Germanium có $E_G = 0,75\text{eV}$, Silicium có $E_G = 1,12\text{eV}$, Galium Arsenic có $E_G = 1,4\text{eV}$
- Dải hoá trị và dải dẫn điện chồng lên nhau, đây là trường hợp của chất dẫn điện. Thí dụ như đồng, nhôm...





Hình 2.5. Độ dẫn điện phụ thuộc vào dải cấm

Giả sử ta tăng nhiệt độ của tinh thể, nhờ sự cung cấp nhiệt năng, điện tử trong dải hoá trị tăng năng lượng.

Trong trường hợp (a), vì E_G lớn, điện tử không đủ năng lượng vượt dải cấm để vào dải dẫn điện. Nếu ta cho tác dụng một điện trường vào tinh thể, vì tất cả các trạng thái trong dải hoá trị đều bị chiếm nên điện tử chỉ có thể di chuyển bằng cách đổi chỗ cho nhau. Do đó, số điện tử đi, về một chiều bằng với số điện tử đi, về theo chiều ngược lại, dòng điện trung bình triệt tiêu. Ta có chất cách điện.

Trong trường hợp (b), một số điện tử có đủ năng lượng sẽ vượt dải cấm vào dải dẫn điện. Dưới tác dụng của điện trường, các điện tử này có thể thay đổi năng lượng dễ dàng vì trong dải dẫn điện có nhiều mức năng lượng trống để tiếp nhận chúng. Vậy điện tử có năng lượng trong dải dẫn điện có thể di chuyển theo một chiều duy nhất dưới tác dụng của điện trường, ta có chất bán dẫn.

Trong trường hợp (c) cũng giống như trường hợp (b) nhưng số điện tử trong dải dẫn điện nhiều hơn làm cho sự di chuyển mạnh hơn, ta có kim loại hay chất dẫn điện.

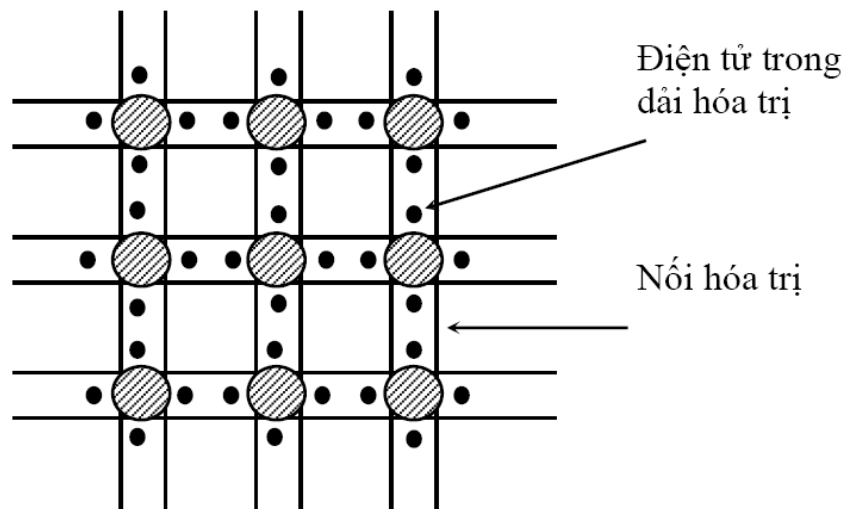
2.2. Sự dẫn điện trong bán dẫn

2.2.1. Chất bán dẫn điện (Semiconductor)

1. chất bán dẫn điện thuần (Pure semiconductor)

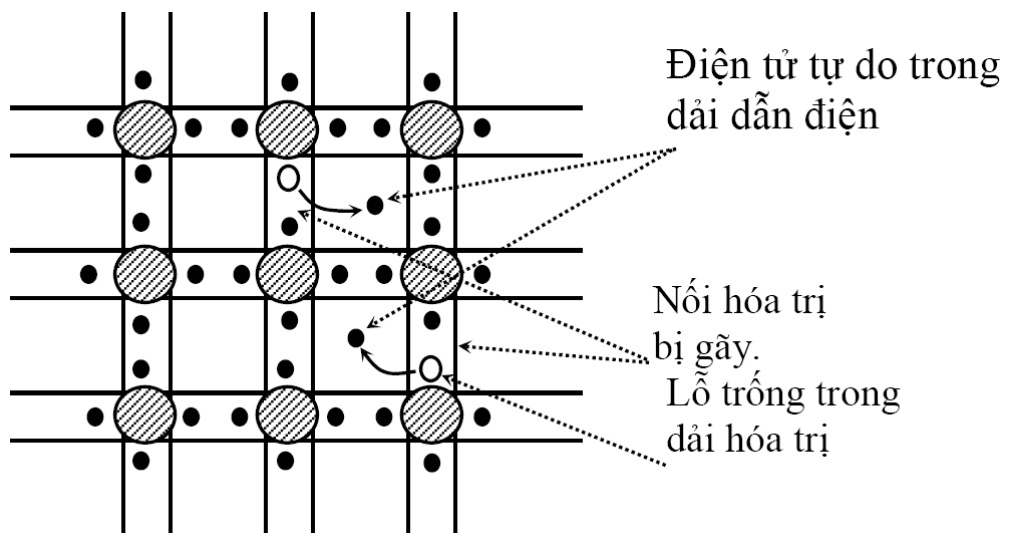
Hầu hết các chất bán dẫn đều có các nguyên tử sắp xếp theo cấu tạo tinh thể. Hai chất bán dẫn được dùng nhiều nhất trong kỹ thuật chế tạo linh kiện điện tử là Silicium và Germanium. Mỗi nguyên tử của hai chất này đều có 4 điện tử ở ngoài cùng kết hợp với 4 điện tử của 4 nguyên tử kế cận tạo

thành 4 liên kết hoá trị. Vì vậy tinh thể Ge và Si ở nhiệt độ thấp là các chất cách điện.



Hình 2.6. Tinh thể chất bán dẫn ở nhiệt độ thấp ($T = 0^0K$)

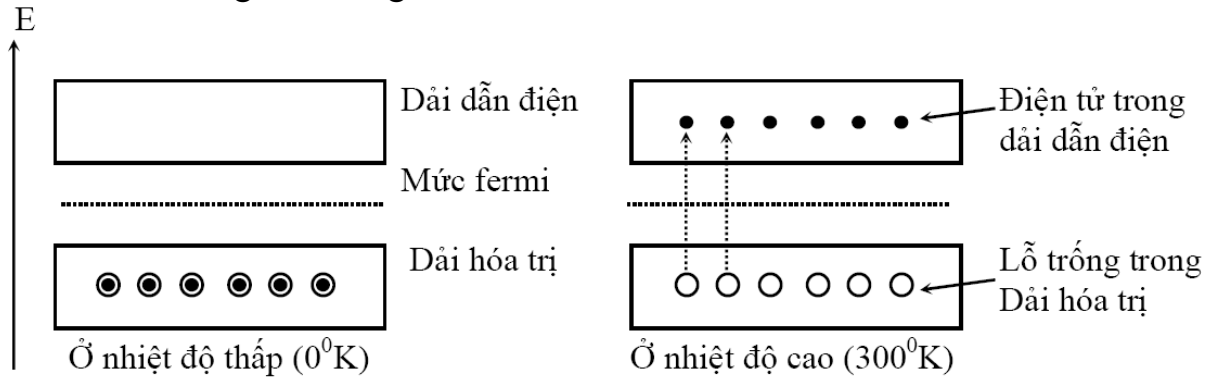
Nếu ta tăng nhiệt độ tinh thể, nhiệt năng sẽ làm tăng năng lượng một số điện tử và làm gãy một số nối hoá trị. Các điện tử ở các nối bị gãy rời xa nhau và có thể di chuyển dễ dàng trong mạng tinh thể dưới tác dụng của điện trường. Tại các nối hoá trị bị gãy ta có các lỗ trống (hole). Về phương diện năng lượng, ta có thể nói rằng nhiệt năng làm tăng năng lượng các điện tử trong dải hoá trị.



Hình 2.7. Tinh thể chất bán dẫn ở nhiệt độ cao ($T = 3000K$)

Khi năng lượng này lớn hơn năng lượng của dải cấm ($0,7eV$ đối với Ge và $1,12eV$ đối với Si), điện tử có thể vượt dải cấm vào dải dẫn điện và chừa lại những lỗ trống (trạng thái năng lượng trống) trong dải hoá trị). Ta nhận thấy số điện tử trong dải dẫn điện bằng số lỗ trống trong dải hoá trị.

Nếu ta gọi n là mật độ điện tử có năng lượng trong dải dẫn điện và p là mật độ lỗ trống có năng lượng trong dải hoá trị. Ta có $n=p=n_i$
 Khi T tăng thì n_i tăng.

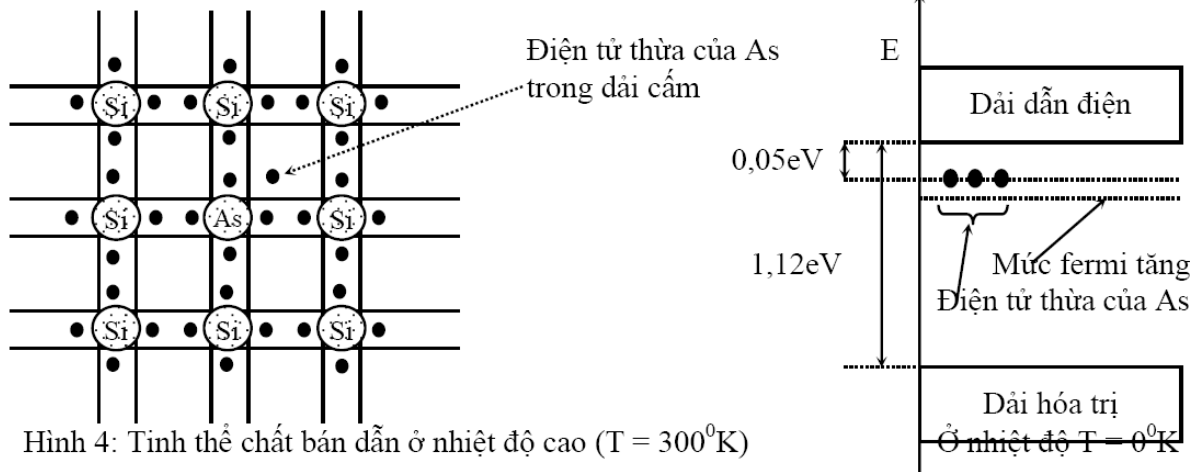


Hình 2.8. Tinh thể chất bán dẫn

Ta gọi chất bán dẫn có tính chất $n = p$ là chất bán dẫn thuần. Thông thường người ta gặp nhiều khó khăn để chế tạo chất bán dẫn loại này.

2. Chất bán dẫn ngoại lai hay có chất pha (Doped/Extrinsic Semiconductor)

Chất bán dẫn loại N: (N - type semiconductor)



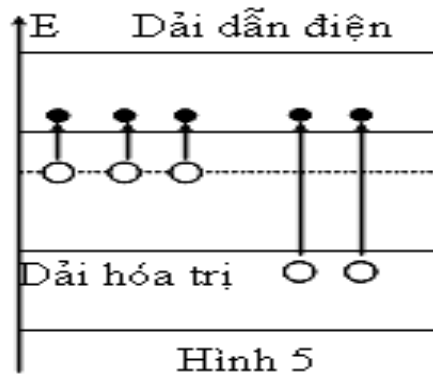
Hình 4: Tinh thể chất bán dẫn ở nhiệt độ cao ($T = 300^0K$)

Hình 2.9. Tinh thể Si

Giả sử ta pha vào Si thuần những nguyên tử thuộc nhóm V của bảng phân loại tuần hoàn như As (Arsenic), Photpho (p), Antimony (Sb). Bán kính nguyên tử của As gần bằng bán kính nguyên tử của Si nên có thể thay thế một nguyên tử Si trong mạng tinh thể. Bốn điện tử của As kết hợp với 4 điện tử của Si lân cận tạo thành 4 nối hoá trị, Còn dư lại một điện tử của As. Ở nhiệt độ thấp, tất cả các điện tử của các nối hoá trị đều có năng lượng trong dải hoá trị, trừ những điện tử thừa của As không tạo nối hoá trị có năng lượng E_D nằm

trong dải cấm và cách đây dẫn điện một khoảng năng lượng nhỏ chừng $0,05\text{eV}$.

Giả sử ta tăng nhiệt độ của tinh thể, một số nối hoá trị bị gãy, ta có những lỗ trống trong dải hoá trị và những điện tử trong dải dẫn điện giống như trong trường hợp của các chất bán dẫn thuần. Ngoài ra, các điện tử của As có năng lượng E_D cũng nhận nhiệt năng để trở thành những điện tử có năng lượng trong dải dẫn điện. Vì thế ta có thể coi như hầu hết các nguyên tử As đều bị Ion hoá (vì khoảng năng lượng giữa E_D và dải dẫn điện rất nhỏ), nghĩa là tất cả các điện tử lúc đầu có năng lượng E_D đều được tăng năng lượng để trở thành điện tử tự do.



Hình 2.10. tăng nhiệt độ

Nếu ta gọi N_D là mật độ những nguyên tử As pha vào (còn gọi là những nguyên tử cho donor atom).

$$\text{Ta có: } n = p + N_D$$

Với

- n mật độ điện tử trong dải dẫn điện.
- p mật độ lỗ trống trong dải hoá trị.

Người ta cũng chứng minh được: $n \cdot p = n_i^2$ ($n < p$)

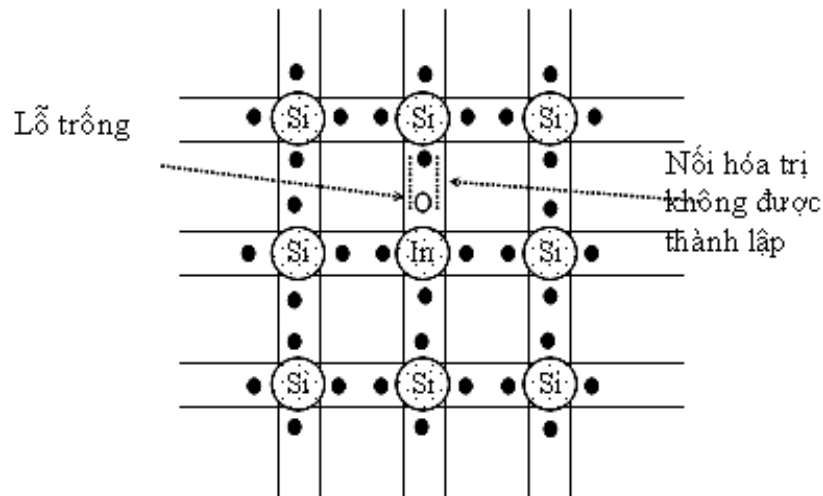
n_i mật độ điện tử hoặc lỗ trống trong chất bán dẫn thuần trước khi pha.

Chất bán dẫn như trên có số điện tử trong dải dẫn điện nhiều hơn số lỗ trống trong dải hoá trị gọi là chất bán dẫn loại N.

Chất bán dẫn loại P

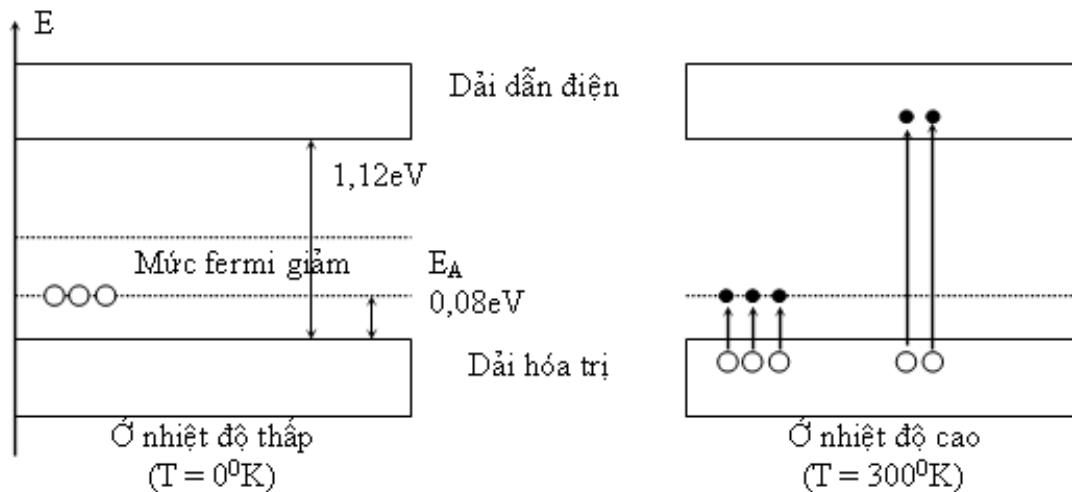
Thay vì pha vào Si thuần một nguyên tố thuộc nhóm V, ta pha vào những nguyên tố thuộc nhóm III như Indium (In), Gallium (Ga), nhôm (Al),... Bán kính nguyên tử In gần bằng bán kính nguyên tử Si nên nó có thể thay thế một nguyên tử Si trong mạng tinh thể. Ba điện tử của nguyên tử In kết hợp với

ba điện tử của ba nguyên tử Si kế cận tạo thành 3 nối hoá trị, còn một điện tử của Si có năng lượng trong dải hoá trị không tạo một nối với Indium. Giữa In và Si này ta có một trạng thái năng lượng trống có năng lượng E_A nằm trong dải cấm và cách dải hoá trị một khoảng năng lượng nhỏ chừng $0,08\text{eV}$.



Hình 2.11. Tinh thể chất bán dẫn loại P

Ở nhiệt độ thấp ($T=0\text{ }^0\text{K}$), tất cả các điện tử đều có năng lượng trong dải hoá trị. Nếu ta tăng nhiệt độ của tinh thể sẽ có một số điện tử trong dải hoá trị nhận năng lượng và vượt dải cấm vào dải dẫn điện, đồng thời cũng có những điện tử vượt dải cấm lên chiếm chỗ những lỗ trống có năng lượng E_A .



Hình 2.12. tăng nhiệt độ chất bán dẫn loại P

Nếu ta gọi N_A là mật độ những nguyên tử Indium pha vào (còn được gọi là nguyên tử nhận), ta cũng có:

$$p = n + N_A$$

- p : mật độ lỗ trống trong dải hoá trị.
- n : mật độ điện tử trong dải dẫn điện.

Người ta cũng chứng minh được:

$$n.p = n_i^2 \quad (p > n)$$

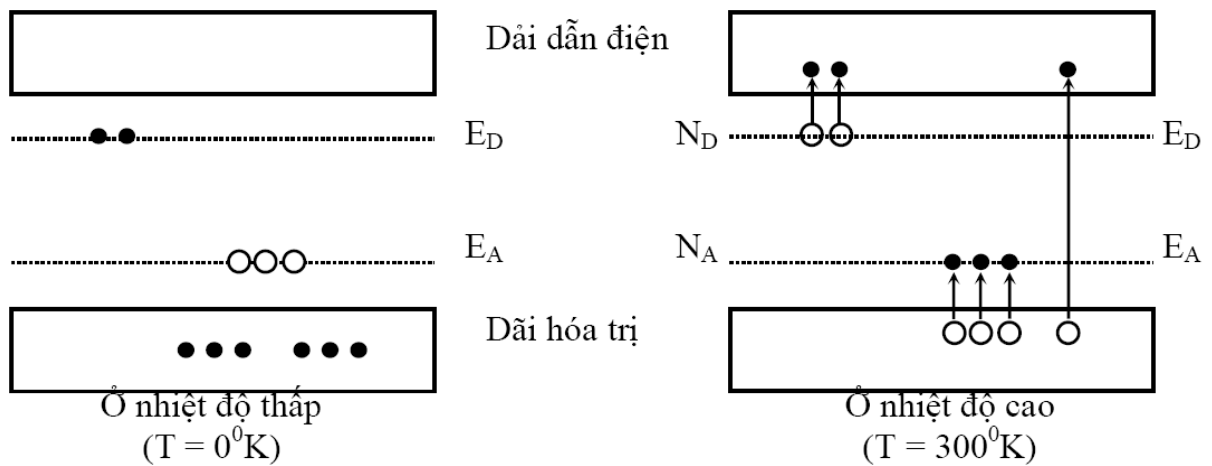
n_i là mật độ điện tử hoặc lỗ trống trong chất bán dẫn thuần trước khi pha.

Chất bán dẫn như trên có số lỗ trống trong dải hoá trị nhiều hơn số điện tử trong dải dẫn điện được gọi là chất bán dẫn loại P.

Như vậy, trong chất bán dẫn loại p, hạt tải điện đa số là lỗ trống và hạt tải điện thiểu số là điện tử.

Chất bán dẫn hỗn hợp

Ta cũng có thể pha vào Si thuần những nguyên tử cho và những nguyên tử nhận để có chất bán dẫn hỗn hợp. Hình sau là sơ đồ năng lượng của chất bán dẫn hỗn hợp.



Hình 2.13. Dải năng lượng Chất bán dẫn hỗn hợp

Trong trường hợp chất bán dẫn hỗn hợp, ta có:

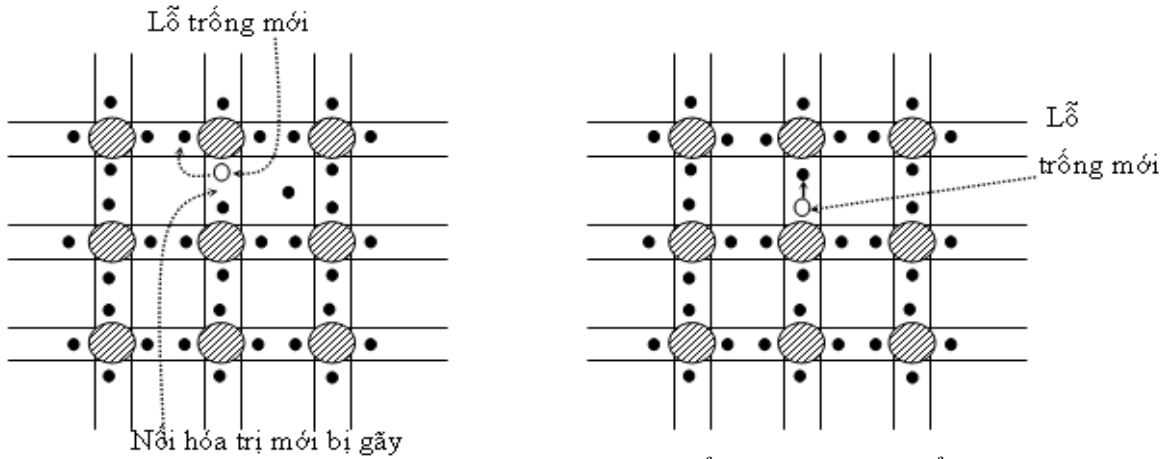
$$n + N_A = p + N_D$$

$$n.p = n_i^2$$

Nếu $N_D > N_A \Rightarrow n > p$, ta có chất bán dẫn hỗn hợp loại N.

Nếu $N_D < N_A \Rightarrow n < p$, ta có chất bán dẫn hỗn hợp loại P.

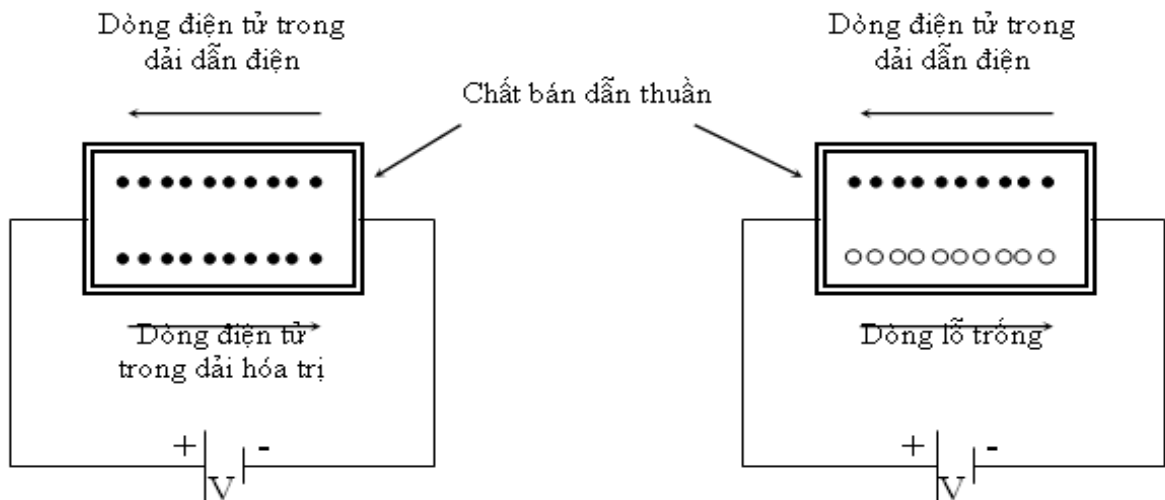
2.2.2 Dẫn suất của chất bán dẫn



Hình 2.15. những điện tử di chuyển trong tinh thể

Dưới tác dụng của điện trường, những điện tử có năng lượng trong dải dẫn điện di chuyển tạo nên dòng điện I_n , nhưng cũng có những điện tử di chuyển từ một nối hoá trị bị gãy đến chiếm chỗ trống của một nối hoá trị đã bị gãy. Những điện tử này cũng tạo ra một dòng điện tương đương với dòng điện do lỗ trống mang điện tích dương di chuyển ngược chiều, ta gọi dòng điện này là I_p . Hình sau đây mô tả sự di chuyển của điện tử (hay lỗ trống) trong dải hoá trị ở nhiệt độ cao.

Vậy ta có thể coi như dòng điện trong chất bán dẫn là sự hợp thành của dòng điện do những điện tử trong dải dẫn điện (đa số đối với chất bán dẫn loại N và thiểu số đối với chất bán dẫn loại P) và những lỗ trống trong dải hoá trị (đa số đối với chất bán dẫn loại P và thiểu số đối với chất bán dẫn loại N).



Hình 2.16. Dòng điện trong chất bán dẫn

Dưới tác dụng của điện trường, các điện tử và lỗ trống di chuyển với vận tốc trung bình $v_n = \mu_n E$ và $v_p = \mu_p E$.

Tương ứng với những dòng điện này, ta có những mật độ dòng điện J , J_n , J_p sao cho: $J = J_n + J_p$

$$J_n = n \cdot e \cdot v_n = n \cdot e \cdot \mu_n \cdot E.$$

- J_n Mật độ dòng điện trôi của điện tử
- μ_n là độ linh động của điện tử
- n là mật độ điện tử trong dải dẫn điện

$$J_p = n.e.v_p = n.e.\mu.p.E.$$

- J_p Mật độ dòng điện trôi của lỗ trống
- μ_p là độ linh động của lỗ trống
- p là mật độ lỗ trống trong dải hoá trị).

Như vậy: $J = e.(n.\mu_n + p.\mu_p).E.$

Theo định luật Ohm, ta có: $J = \sigma.E$

$\Rightarrow \sigma = e.(n.\mu_n + p.\mu_p)$ được gọi là dẫn suất của chất bán dẫn.

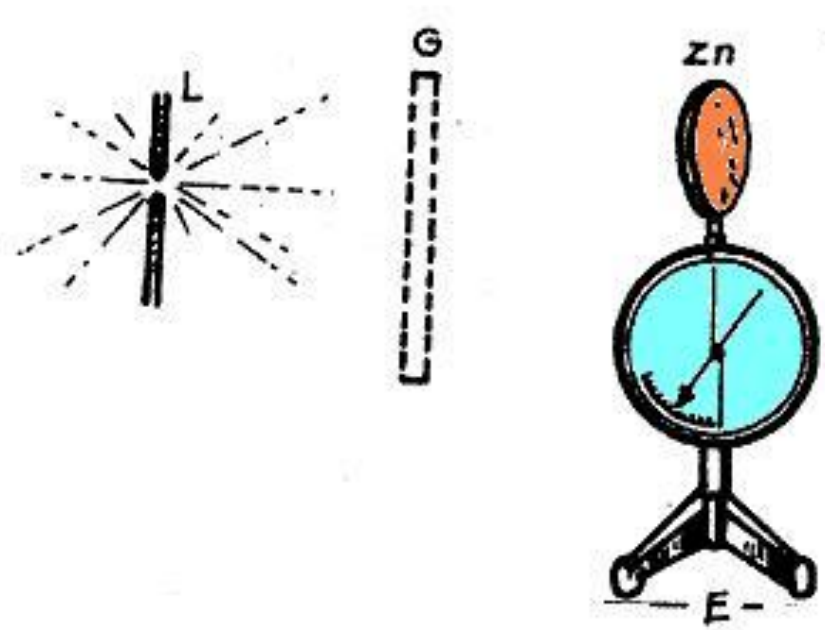
Trong chất bán dẫn loại N, ta có $n \gg p$ nên $\sigma \approx n.\mu_n.e.$

Trong chất bán dẫn loại P, ta có $p \gg n$ nên $\sigma \approx p.\mu_p.e.$

2.3. Hiện tượng quang điện

2.3.1. Thí nghiệm Hecxo

Năm 1887, nhà bác học Hecxo người Đức đã làm thí nghiệm sau: chiếu một chùm ánh sáng do một hồ quang phát ra vào một tấm kẽm tích điện âm, gắn trên một điện nghiệm (có thể thay điện nghiệm bằng tĩnh điện kế). Ông thấy hai lá của điện nghiệm sụp lại. Điều đó chứng tỏ tấm kẽm đã mất điện tích âm.



Hình 2.17. Tĩnh thể

Nếu tấm kẽm tích điện dương thì không có hiện tượng gì xảy ra.

Hiện tượng cũng xảy ra tương tự nếu thay tấm kẽm bằng các tấm đồng, nhôm, bạc, niken v.v...

Nếu dùng một tấm thủy tinh không màu chắn chùm tia hồ quang thì hiện tượng trên không xảy ra. Ta biết rằng thủy tinh hấp thụ mạnh các tia tử ngoại.

Nhiều thí nghiệm tương tự đã đưa ta đến kết luận:

Khi chiếu một chùm sáng thích hợp (có bước sóng ngắn) vào mặt một tấm kim loại thì nó làm cho các electron ở mặt kim loại đó bị bật ra. Đó là hiện tượng quang điện.

Thực ra, khi chiếu ánh sáng tử ngoại vào tấm kẽm tích điện dương thì vẫn có electron bị bật ra. Tuy nhiên, chúng lập tức bị hút trở lại, nên điện tích của tấm kẽm coi như không thay đổi.

2.3.2. Tế bào quang điện

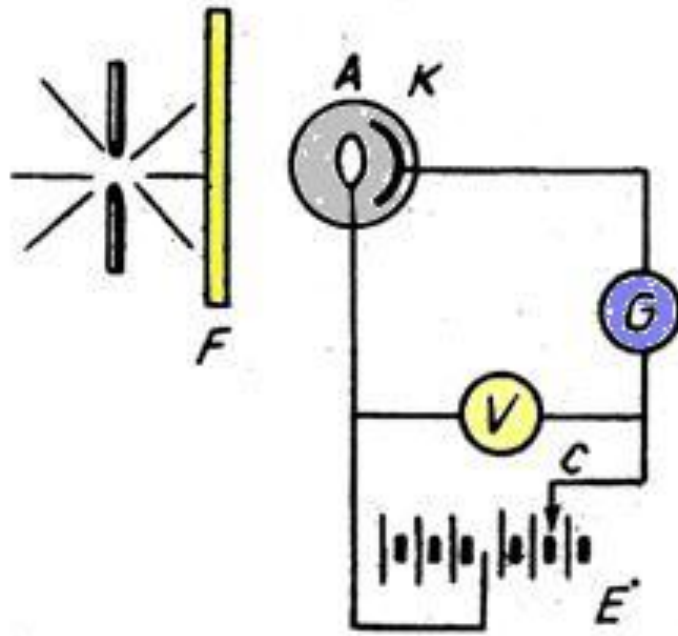
Tế bào quang điện là một bình chân không nhỏ trong đó có hai điện cực: anốt A và catốt K. Anốt (anôt) là một vòng dây kim loại. Catốt (catôt) có dạng một chòm cầu làm bằng kim loại (mà ta cần nghiên cứu) phủ ở thành trong của tế bào.

Ánh sáng do một hồ quang phát ra, được chiếu qua một kính lọc F để lọc lấy một thành phần đơn sắc nhất định, chiếu vào catốt K.

Ta thiết lập giữa anốt và catốt một điện trường nhờ bộ acquy E. Hiệu điện thế U giữa A và K có thể thay đổi (về độ lớn và về dấu) nhờ thay đổi vị trí của chốt cắm C trên bộ nguồn.

Một vôn kế V dùng để đo hiệu điện thế U và một miliampe kế nhạy G để đo cường độ dòng điện chạy qua tế bào quang điện.

Điện trở trong của các acquy rất nhỏ so với điện trở của tế bào quang điện.



Hình 2.18. Tế bào quang điện

Khi chiếu vào catốt ánh sáng có bước sóng ngắn thì trong mạch xuất hiện dòng điện mà ta gọi là dòng quang điện.

Trong tế bào quang điện, dòng quang điện có chiều từ anốt sang catốt. Nó là dòng các êlectron quang điện bay từ catốt sang anốt dưới tác dụng của điện trường giữa anốt và catốt.

Nghiên cứu sự phụ thuộc của hiện tượng quang điện vào bước sóng của ánh sáng kích thích (ánh sáng chiếu vào catốt) người ta thấy: đối với mỗi kim loại dùng làm catốt, ánh sáng kích thích phải có bước sóng nhỏ hơn một giới hạn λ_0 nào đó thì mới gây ra được hiện tượng quang điện. Nếu ánh sáng kích thích có bước sóng lớn hơn thì dù chùm ánh sáng có mạnh cũng không gây ra hiện tượng quang điện.

Sau khi chiếu ánh sáng vào catốt để gây ra hiện tượng quang điện, người ta nghiên cứu sự phụ thuộc của cường độ dòng quang điện I vào hiệu điện thế U_{AK} giữa anốt và catốt. đường cong đồ thị này gọi là đường đặc trưng von-ampere của tế bào quang điện.

Thoạt tiên khi tăng U_{AK} thì dòng quang điện I tăng. Khi U_{AK} đạt đến một giá trị nào đó thì cường độ dòng quang điện đạt đến giá trị bão hoà I_{bh} .

Sau đó giá trị của cường độ dòng quang điện sẽ không đổi dù có tăng U_{AK} .

Nghiên cứu sự phụ thuộc của cường độ dòng quang điện bão hoà I_{bh} vào cường độ của chùm ánh sáng kích thích, ta thấy I_{bh} tỉ lệ thuận với cường độ sáng kích thích

Muốn cho dòng quang điện triệt tiêu hoàn toàn thì phải đặt giữa anốt và catốt một hiệu điện thế âm U_h nào đó ($U_h = U_{AK} < 0$). U_h được gọi là hiệu điện thế hãm. Giá trị của U_h ứng với giao điểm của đường đặc trưng von-ampe của tế bào quang điện với trục hoành.

Thí nghiệm cho thấy giá trị của hiệu điện thế hãm U_h ứng với mỗi kim loại dùng làm catốt hoàn toàn không phụ thuộc vào cường độ của chùm sáng kích thích mà chỉ phụ thuộc vào bước sóng của chùm sáng kích thích đó. Nếu hai chùm sáng kích thích 1 và 2, đơn sắc, có cùng bước sóng, thì các đường đặc trưng von-ampe 1 và 2 sẽ cắt trục U tại cùng một điểm U_h .

2.3.3 Các định luật quang điện

a) Định luật quang điện thứ nhất

Đối với mỗi kim loại dùng làm catốt có một bước sóng giới hạn λ_0 nhất định gọi là giới hạn quang điện. Hiện tượng quang điện chỉ xảy ra khi bước sóng λ của ánh sáng kích thích nhỏ hơn giới hạn quang điện ($\lambda \leq \lambda_0$).

Giá trị giới hạn quang điện λ_0 của một số kim loại (tính ra μm) được cho

Bạc 0,26, Canxi 0,45, Đồng 0,30, Natri 0,50, Kẽm 0,35,
Kali 0,55, Nhôm 0,36, Xedi 0,66.

Ta thấy ánh sáng nhìn thấy được chỉ có khả năng gây ra được hiện tượng quang điện ở canxi và các kim loại kiềm.

b) Định luật quang điện thứ hai

Với ánh sáng kích thích có bước sóng thoả mãn định luật quang điện thứ nhất thì cường độ dòng quang điện bão hòa tỉ lệ thuận với cường độ của chùm sáng kích thích.

c) Định luật quang điện thứ ba

Sự tồn tại của hiệu điện thế hãm U_h chứng tỏ rằng khi bật ra khỏi mặt kim loại, các electron quang điện có một vận tốc ban đầu v_0 . Điện trường cản mạnh đến mức độ nào đó thì ngay cả những electron có vận tốc ban đầu lớn nhất $v_{0\text{max}}$ cũng không bay đến được anốt. Lúc đó dòng quang điện triệt tiêu hoàn toàn và công của điện trường cản có giá trị đúng bằng động năng ban đầu cực đại của electron quang điện.

$$eU_h = \frac{mv_{0\text{max}}^2}{2}$$

Từ sự nghiên cứu thực nghiệm giá trị của U_h mà ta đã trình bày ở bài trước, ta rút ra định luật sau

Động năng ban đầu cực đại của các electron quang điện không phụ thuộc vào cường độ của chùm sáng kích thích, mà chỉ phụ thuộc vào bước sóng của ánh sáng kích thích và bản chất kim loại dùng làm catốt.

2.3.4 Thuyết lượng tử

a) Các định luật quang điện hoàn toàn mâu thuẫn với tính chất sóng của ánh sáng. Thực vậy, theo thuyết sóng, khi ánh sáng chiếu vào mặt catốt, điện trường biến thiên trong sóng ánh sáng sẽ làm cho các electron trong kim loại dao động. Cường độ của chùm sáng kích thích càng lớn, thì điện trường đó càng mạnh và nó làm cho electron dao động càng mạnh. Đến mức độ nào đó thì electron sẽ bị bật ra, tạo thành dòng quang điện. Do đó, bất kì chùm sáng nào cũng có thể gây ra hiện tượng quang điện, miễn là nó có cường độ đủ lớn và động năng ban đầu cực đại của electron quang điện phải phụ thuộc vào cường độ của chùm sáng kích thích.

b) Ta chỉ có thể giải thích được các định luật quang điện, nếu thừa nhận một thuyết mới gọi là thuyết lượng tử do nhà bác học Plăng (Planck) người Đức, đề xướng vào năm 1900.

Theo thuyết lượng tử: *Những nguyên tử hay phân tử vật chất không hấp thụ hay bức xạ ánh sáng một cách liên tục, mà thành từng phần riêng biệt, . Mỗi phần có mang một năng lượng hoàn toàn xác định được gọi là lượng tử ánh sáng, có độ lớn là $\epsilon = hf$, trong đó, f là tần số của ánh sáng mà nó phát ra, còn h là một hằng số gọi là hằng số Plăng.*

$$h = 6,625.10^{-34} \text{J.s}$$

Mỗi phần đó gọi là một lượng tử năng lượng

Ta thấy mỗi lượng tử ánh sáng rất nhỏ, mỗi chùm sáng dù yếu cũng chứa một số rất lớn lượng tử ánh sáng. Do đó, ta có cảm giác chùm sáng là liên tục.

Khi ánh sáng truyền đi, các lượng tử ánh sáng không bị thay đổi, không phụ thuộc khoảng cách tới nguồn sáng, dù nguồn đó là một ngôi sao nằm cách xa ta hàng triệu năm ánh sáng.

2.3.5 Giải thích các định luật quang điện bằng thuyết lượng tử

Nhà bác học Anhxtanh (Einstein), người Đức, là người đầu tiên vận dụng thuyết lượng tử để giải thích các định luật quang điện. Ông coi chùm sáng như một chùm hạt và gọi mỗi hạt là một photon. Mỗi photon ứng với một lượng tử ánh sáng.

Theo Anhxtanh, trong hiện tượng quang điện có sự hấp thụ hoàn toàn photon chiếu tới. Mỗi photon bị hấp thụ sẽ truyền toàn bộ năng lượng của nó

cho một electron. Đối với các electron nằm ngay trên bề mặt kim loại thì phần năng lượng này sẽ được dùng vào hai việc

Cung cấp cho electron đó một công A để nó thắng được các lực liên kết trong tinh thể và thoát ra ngoài. Công này gọi là công thoát.

Cung cấp cho electron đó một động năng ban đầu. So với động năng ban đầu mà các electron nằm ở các lớp sâu thu được khi bị bứt ra thì động năng ban đầu này là cực đại

$$hf = A + \frac{mv_{0\max}^2}{2} \quad (8-1)$$

Đây là công thức Anhtan về hiện tượng quang điện.

Đối với các electron nằm ở các lớp sâu bên trong mặt kim loại thì trước khi đến bề mặt kim loại, chúng đã chạm với các ion của kim loại và mất một phần năng lượng. Do đó động năng ban đầu của chúng nhỏ hơn động năng ban đầu cực đại nói ở trên.

Công thức (8-1) cho thấy động năng ban đầu cực đại của các electron quang điện chỉ phụ thuộc tần số f (hay bước sóng λ) của ánh sáng kích thích và bản chất của kim loại dùng làm catốt (K) mà không phụ thuộc vào cường độ của chùm sáng kích thích. Đó chính là nội dung của định luật quang điện thứ ba.

Công thức (8-1) còn cho thấy: nếu năng lượng của photon nhỏ hơn công thoát A thì nó không thể làm cho electron bật ra khỏi catốt và hiện tượng quang điện sẽ không xảy ra.

Ta có

$$hf \geq A \Rightarrow h \cdot \frac{c}{\lambda} \geq A \Rightarrow \lambda \leq \frac{hc}{A}$$

Đặt
$$\frac{hc}{A} = \lambda_0 \Rightarrow \lambda \leq \lambda_0 \quad (8-2)$$

λ_0 chính là giới hạn quang điện của kim loại. Bất đẳng thức (8-2) biểu thị định luật quang điện thứ nhất.

Cuối cùng, ta giải thích định luật quang điện thứ hai như sau

Với chùm sáng có khả năng gây ra hiện tượng quang điện thì số electron quang điện bị bật ra khỏi catốt trong đơn vị thời gian tỉ lệ thuận với số photon đến đập vào mặt catốt trong thời gian đó. Mặt khác, số photon này lại tỉ lệ thuận với cường độ của chùm sáng; còn cường độ dòng quang điện bão hoà lại tỉ lệ thuận với số electron quang điện bị bật ra khỏi catốt trong đơn vị thời gian. Vì vậy, cường độ của dòng quang điện bão hoà sẽ tỉ lệ thuận với cường độ của chùm sáng kích thích.

2.3.6 Lượng tính sóng - hạt của ánh sáng

Ánh sáng nhìn thấy cũng như các tia hồng ngoại, tia tử ngoại, tia Ronghen, đều là các sóng điện từ có bước sóng khác nhau. Người ta nói chúng có cùng bản chất điện từ

Ta lại thấy ánh sáng có tính chất hạt (tính chất lượng tử). Vậy, ánh sáng vừa có tính chất sóng, vừa có tính chất hạt. Người ta nói: ánh sáng có lưỡng tính sóng - hạt.

Những sóng điện từ có bước sóng càng ngắn thì photon ứng với chúng có năng lượng càng lớn. Thực nghiệm cho thấy tính chất hạt của chúng thể hiện càng đậm nét, tính chất sóng càng ít thể hiện.

Ta có thể coi những tác dụng sau đây là những biểu hiện của tính chất hạt: khả năng đâm xuyên, tác dụng quang điện, tác dụng ion hoá, tác dụng phát quang.

Ngược lại, những sóng điện từ có bước sóng càng dài thì photon ứng với chúng có năng lượng càng nhỏ. Thực nghiệm cho thấy: tính chất hạt của chúng càng khó thể hiện, tính chất sóng của chúng càng dễ bộc lộ. Ta dễ dàng quan sát thấy hiện tượng giao thoa, hiện tượng tán sắc của các sóng đó.

2.3.7 Hiện tượng quang dẫn

Một số chất bán dẫn là chất cách điện khi không bị chiếu sáng và trở thành chất dẫn điện khi bị chiếu sáng. Hiện tượng giảm mạnh điện trở của chất bán dẫn khi bị chiếu sáng gọi là hiện tượng quang dẫn.

Trong hiện tượng quang điện, khi có ánh sáng thích hợp chiếu vào catốt của tế bào quang điện thì electron sẽ bị bật ra khỏi catốt. Vì vậy, hiện tượng này còn gọi là hiện tượng quang điện ngoài. (hay hiện tượng quang điện bên ngoài)

Trong hiện tượng quang dẫn, mỗi photon của ánh sáng kích thích khi bị hấp thụ sẽ giải phóng một electron liên kết để nó trở thành một electron tự do chuyển động trong khối chất bán dẫn đó. Các electron liên kết khi được giải phóng, sẽ để lại một "lỗ trống" mang điện dương. Những lỗ trống này cũng có thể chuyển động tự do từ nút mạng này sang nút mạng khác và cũng tham gia vào quá trình dẫn điện.

Hiện tượng giải phóng electron liên kết để cho chúng trở thành các electron dẫn gọi là hiện tượng quang điện bên trong.

Vì năng lượng cần thiết để giải phóng một electron liên kết chuyển nó thành electron dẫn không lớn lắm, nên để gây ra hiện tượng quang dẫn, không đòi hỏi photon phải có năng lượng lớn. Rất nhiều chất quang dẫn hoạt động được với ánh sáng hồng ngoại. Thí dụ: CdS có giới hạn quang dẫn là $0,9\mu\text{m}$. Ta hiểu giới hạn quang dẫn của một chất là bước sóng dài nhất của ánh sáng

có khả năng gây ra hiện tượng quang dẫn ở chất đó. Đây là một lợi thế của hiện tượng quang dẫn so với hiện tượng quang điện.

2.3.8 Quang trở (LDR)

Cấu tạo Quang trở gồm một lớp chất bán dẫn (cadimi sunfua CdS chẳng hạn) (1) phủ trên một tấm nhựa cách điện (2). Có hai điện cực (3) và (4) gắn vào lớp chất bán dẫn đó

Nối một nguồn khoảng vài vôn với quang trở thông qua một miliampe kế. Ta thấy khi quang trở được đặt trong tối thì trong mạch không có dòng điện. Khi chiếu quang trở bằng ánh sáng có bước sóng ngắn hơn giới hạn quang dẫn của quang trở thì sẽ xuất hiện dòng điện trong mạch.

Điện trở của quang trở giảm đi rất mạnh khi bị chiếu sáng bởi ánh sáng nói trên. Đo điện trở của quang trở CdS, người ta thấy: khi không bị chiếu sáng, điện trở của nó vào khoảng $3.10^6 \Omega$; khi bị chiếu sáng, điện trở của nó chỉ còn khoảng 20Ω .

Ngày nay, quang trở được dùng thay cho các tế bào quang điện trong hầu hết các mạch điều khiển tự động.

2.3.9 Pin quang điện:

Pin quang điện là một nguồn điện trong đó quang năng được biến đổi trực tiếp thành điện năng. Pin hoạt động dựa vào hiện tượng quang điện bên trong xảy ra trong một chất bán dẫn.

Ta hãy xét một pin quang điện đơn giản. Pin đồng oxit (h.8.6)

Pin có một điện cực bằng đồng. Trên bản đồng này có phủ một lớp đồng oxit Cu_2O . Người ta phun một lớp vàng rất mỏng trên mặt lớp Cu_2O để làm điện cực thứ hai. Lớp vàng này mỏng đến mức cho ánh sáng truyền qua được. ở chỗ tiếp xúc giữa Cu_2O và Cu hình thành một lớp có tác dụng đặc biệt: nó chỉ cho phép electron chạy qua nó theo chiều từ Cu_2O sang Cu.

Khi chiếu một chùm sáng có bước sóng thích hợp vào mặt lớp Cu_2O thì ánh sáng sẽ giải phóng các electron liên kết trong Cu_2O thành electron dẫn. Một phần các electron này khuếch tán sang cực Cu. Cực Cu thừa electron nên nhiễm điện âm. Cu_2O nhiễm điện dương. Giữa hai điện cực của pin hình thành một suất điện động.

Nếu nối hai điện cực với nhau bằng một dây dẫn thông qua một điện kế, ta sẽ thấy có một dòng điện chạy trong mạch theo chiều từ Cu_2O sang Cu.

Ngoài pin quang điện đồng oxit, còn có rất nhiều loại pin quang điện khác, phổ biến nhất là pin selen.

Ngày nay, các pin quang điện có rất nhiều ứng dụng. Các pin mặt trời ở các máy tính bỏ túi, trên các vệ tinh nhân tạo v.v... đều là pin quang điện.

TÀI LIỆU THAM KHẢO

1. SÁCH LINH KIỆN QUANG ĐIỆN TỬ (THẦY DƯƠNG MINH TRÍ).
2. TÀI LIỆU CẤU KIỆN ĐIỆN TỬ (THS. TRẦN THỊ CẨM).
3. <http://www.vocw.edu.vn/content/m10422/latest/>.
4. http://www.onthi.com/?a=OT&ot=LT&hdn_lt_id=572
5. http://www.onthi.com/ly-thuyet/thuyet-luong-tu-va-cac-dinh-luat-quang-dien_573.html.
6. http://www.onthi.com/ly-thuyet/quang-tro-va-pin-quang-dien_574.html.
7. www.wikipedia.org.

Và một số tài liệu tham khảo khác.

Chương 4

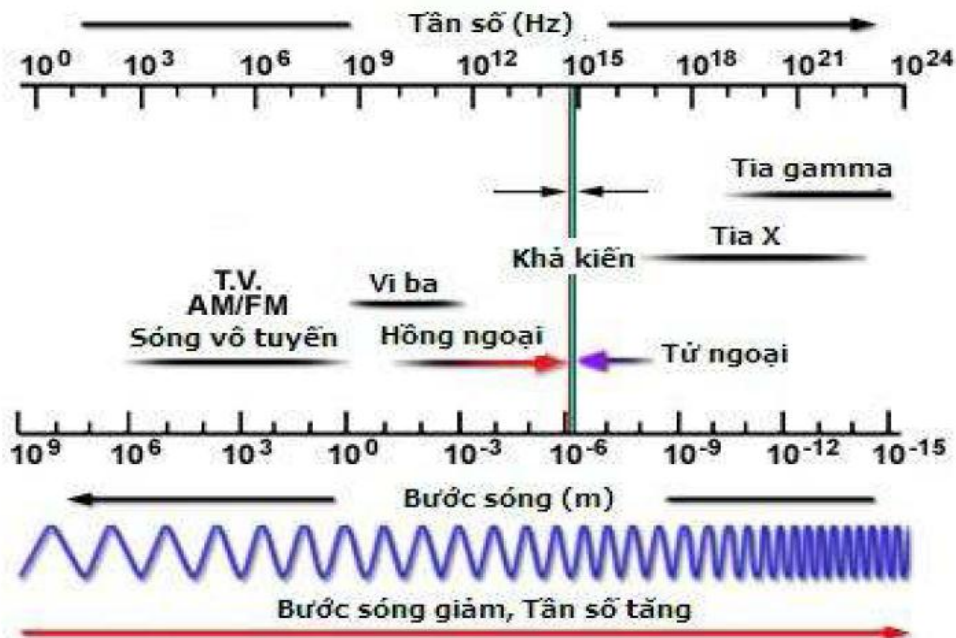
CÁC DỤNG CỤ PHÁT HIỆN BỨC XẠ

4.1. Đặc tính chung

Ánh sáng là 1 dạng của bức xạ điện từ có dải bước sóng từ 0,001 nm đến 1cm hoặc dải tần số rất cao, $10^{14} \rightarrow 10^{15}$ Hz. Sự thay đổi trạng thái năng lượng trong nguyên tử và phân tử là nguồn gốc của các bức xạ ánh sáng đó.

Các ánh sáng được chia thành 3 vùng là

Vùng cực tím	Độ dài bước sóng từ 100 nm - 380 nm
Vùng ánh sáng nhìn thấy	Độ dài bước sóng từ 380 đến 780 nm
Vùng hồng ngoại	Độ dài bước sóng từ 780 nm đến 1 mm



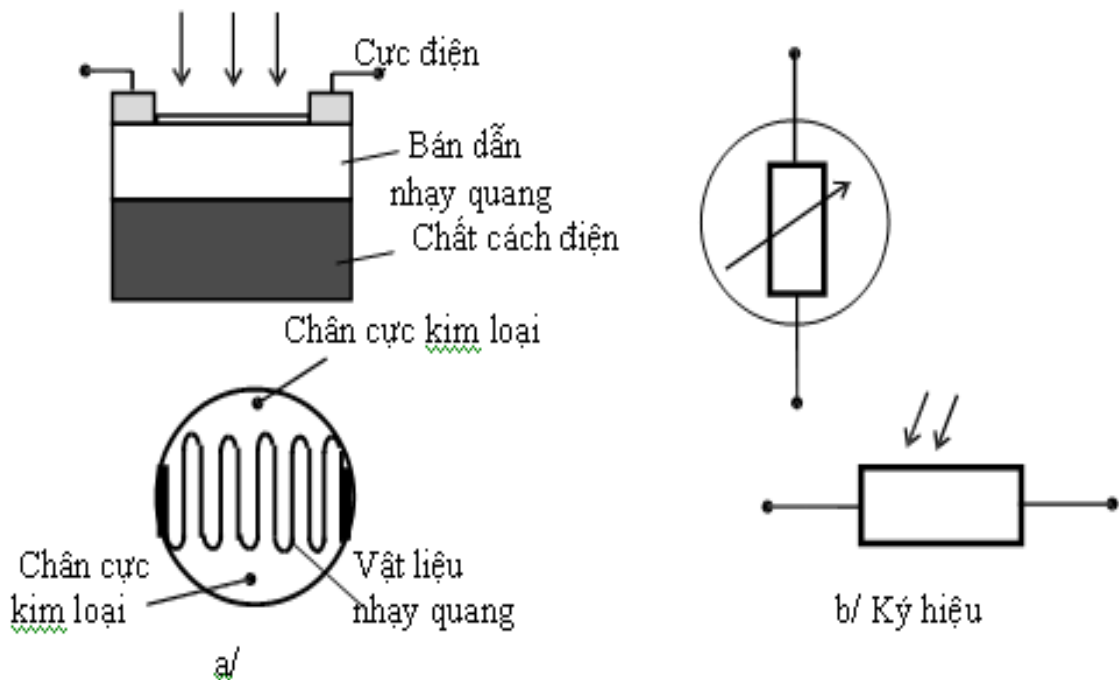
Hình 4.1. Phổ của bức xạ điện từ

Đặc điểm của mắt người là nhìn thấy các sóng điện từ thuộc vùng ánh sáng nhìn thấy. Mắt người không chỉ phân biệt được độ sáng yếu hay mạnh, mà còn phân biệt được từng bước sóng riêng biệt gọi là độ cảm màu của mắt. Nhưng trong kỹ thuật chỉ dùng khái niệm bước sóng chứ không dùng khái niệm màu sắc, và ngay cả tần số cũng ít dùng. Các bước sóng trong thông tin quang hiện nay nằm ở vùng hồng ngoại nên khái niệm màu sắc càng không có ý nghĩa.

4.2. Các linh kiện thu quang (hiệu ứng quang điện bên trong)

Bộ thu quang là phần tử có nhiệm vụ biến đổi tín hiệu quang thành tín hiệu điện dựa trên nguyên lý biến đổi quang → điện. Nghĩa là, biến đổi năng lượng quang thành năng lượng điện. Khi các nguyên tử được cung cấp năng lượng dưới dạng năng lượng quang thích hợp, các điện tử ở lớp ngoài cùng của chúng có thể bật ra thành điện tử tự do. Bằng cách dùng điện trường ngoài để thu nhận các điện tử này ta sẽ có dòng điện ở mạch ngoài gọi là dòng quang điện có độ lớn phụ thuộc vào cường độ ánh sáng chiếu vào. Tùy theo mục đích sử dụng và cấu trúc mà có nhiều loại bộ thu quang khác nhau, vì thế đặc tính của chúng cũng khác nhau.

4.2.1. Điện trở quang



Hình 4.2. Điện trở quang

Điện trở quang là một linh kiện bán dẫn thụ động, không có lớp tiếp xúc P-N.

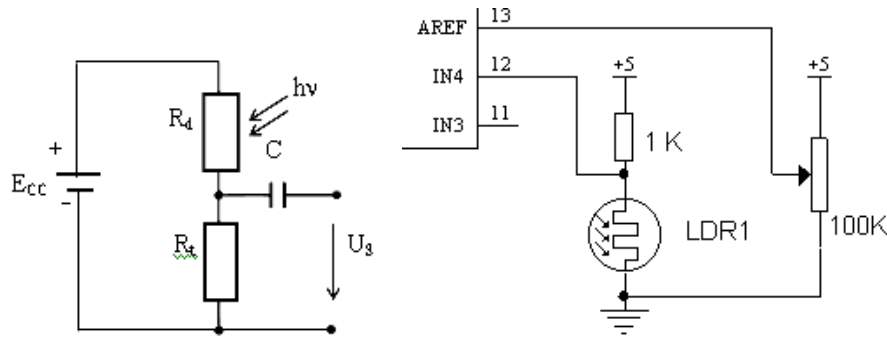
Vật liệu dùng để chế tạo điện trở quang thường là Cadmium Sulfid (CdS), Cadmium Selenid (CdSe), Sulfid kẽm (ZnS) hoặc các tinh thể hỗn hợp khác. Tất cả các vật liệu này được gọi là vật liệu bán dẫn nhạy quang.

1. Cấu tạo

Điện trở quang gồm một lớp vật liệu bán dẫn nhạy quang rải lên một tấm vật liệu cách điện và 2 chân dẫn điện. Để chống ẩm người ta bọc bên ngoài quang trở một lớp sơn chống ẩm trong suốt với vùng ánh sáng hoạt động của nó. Tất cả được bọc trong một vỏ bằng chất dẻo có cửa sổ cho ánh

sáng đi qua.

2. Nguyên lý làm việc



Hình 4.3. Nguyên lý làm việc

Khi chiếu ánh sáng vào vật liệu bán dẫn nhạy quang với năng lượng photon lớn hơn hoặc bằng độ rộng vùng cấm của vật liệu, do quá trình hấp thụ quang năng, từng cặp điện tử- lỗ trống mới xuất hiện. Do vậy, nồng độ hạt dẫn trong chất bán dẫn tăng lên, làm độ dẫn điện của nó tăng, hay nói cách khác là điện trở của chất bán dẫn giảm xuống.

Độ dẫn điện được tạo ra khi được chiếu ánh sáng là

$$\sigma = \sigma_0 + \sigma_F$$

trong đó

- σ_0 - là độ dẫn điện khi chưa chiếu sáng.
- σ_F - độ dẫn điện được tạo ra do ánh sáng

$$\sigma_F = q(\mu_n + \mu_p)\Delta p$$

ở đây $\Delta n = \Delta p$ - nồng độ điện tử bằng nồng độ lỗ trống mới sinh ra.

Dòng điện quang được tính theo công thức:

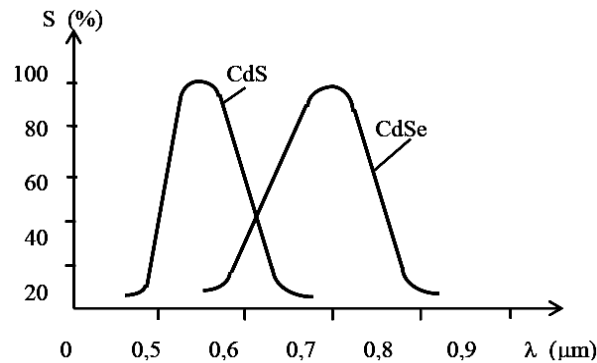
$$I_{ph} = q\Delta p(\mu_n + \mu_p)Ewd$$

w.d là tiết diện của lớp bán dẫn nhạy quang, E là cường độ điện trường.

Qua công thức trên ta thấy độ dẫn điện của vật liệu bán dẫn có thể thay đổi được khi ta thay đổi nồng độ hạt dẫn và độ linh động hiệu dụng của điện tử và lỗ trống. Như vậy, khi ta thay đổi cường độ chiếu sáng lên điện trở quang thì cường độ dòng điện trong mạch cũng thay đổi theo.

Các điện trở quang có khả năng khuếch đại dòng điện lên đến 10^5 lần hoặc hơn nữa. Tuy nhiên, các giá trị này chỉ phù hợp khi cường độ ánh sáng không thay đổi theo thời gian hoặc thay đổi chậm. Khi tần số biến điệu, cường độ ánh sáng tăng thì hệ số khuếch đại của điện trở quang giảm. Khả

năng đáp ứng tần số của điện trở quang thấp, thường đạt từ vài chục Hz đến vài KHz.



Hình 4.4. Độ nhạy quang

3. Các tham số chính của điện trở quang

Điện dẫn suất σ_p là hàm số của mật độ năng lượng quang ρ_λ khi độ dài bước sóng không đổi

$$\sigma_p = \sigma_p(\rho_\lambda) \text{ khi } \lambda = \text{const}$$

Độ nhạy tương đối của điện trở quang $S(\lambda)$ là tỉ số giữa điện dẫn suất thay đổi theo bước sóng $\sigma_p(\lambda)$ và điện dẫn suất cực đại $\sigma_{p,\text{max}}$ khi mật độ năng lượng quang ρ_λ không đổi

$$S(\lambda) = \frac{\sigma_p(\lambda)}{\sigma_{p,\text{max}}} \Big|_{\rho_\lambda}$$

Vận tốc làm việc là thời gian hồi đáp của một điện trở quang khi có sự thay đổi từ sáng sang tối hay từ tối sang sáng. Với cường độ ánh sáng mạnh, điện trở quang làm việc nhanh hơn. Điện trở quang làm việc chậm hơn khi trời lạnh và cất giữ trong bóng tối.

Hệ số nhiệt của điện trở quang: Hệ số nhiệt của điện trở quang tỉ lệ nghịch với cường độ chiếu sáng. Do đó, để giảm bớt sự thay đổi trị số của điện trở quang theo nhiệt độ, điện trở quang cần được cho hoạt động ở mức chiếu sáng tối đa.

Điện trở tối R_d : Điện trở tối là điện trở trong bóng tối của điện trở quang. Điện trở tối là tham số quan trọng, nó cho ta biết "dòng điện rò" lớn nhất đối với một điện thế trên điện trở quang.

Điện thế hoạt động: Tùy theo cấu trúc mặt nạ của điện trở quang mà có các điện thế làm việc khác nhau. Điện thế này có thể lên tới 0,5 Kv/mm. Điện thế hoạt động cao nhất đo được khi điện trở quang hoạt động trong bóng tối. Khi sử dụng điện trở quang cần chọn giá trị điện áp cung cấp sao cho tối ưu đối với mạch điện mà không làm hỏng điện trở quang.

Công suất tiêu tán cao nhất: Khi điện trở quang hoạt động cần phải giữ

cho nhiệt độ của nó thấp hơn một nhiệt độ cho phép. Nhiệt độ cho phép của điện trở quang thường giới hạn từ -40°C đến $+75^{\circ}\text{C}$.

4.2.2. Photodiode – Diode quang

1. Khái niệm chung

Khi chiếu sáng một tiếp xúc P-N thì trên nó sẽ xuất hiện một điện áp. Tùy theo chức năng và cấu trúc có thể chia điốt quang thành nhiều loại như sau

- Điốt quang loại tiếp xúc P-N.
- Điốt quang loại PIN.
- Điốt quang thác (APD).

Một số đặc điểm của điốt quang là rất tuyến tính, ít nhiễu, dải tần số làm việc rộng, nhẹ, có độ bền cơ học cao và tuổi thọ cao.

Điốt quang không nhạy bằng điện trở quang loại CdS nhưng nó làm việc nhanh gấp nhiều lần.



Hình 4.5. Diode quang

2. Vật liệu cơ bản

Hiện nay, để truyền dẫn tín hiệu quang theo 3 cửa sổ suy hao nhỏ nhất của sợi quang, người ta chú ý đến các điốt quang làm việc ở hai vùng bước sóng:

Vùng bước sóng từ 0,85 đến 0,9 μm .

Vùng bước sóng từ 1,3 đến 1,6 μm .

Trong vùng bước sóng thứ nhất từ 0,85 đến 0,9 μm , thì vật liệu chế tạo điốt quang được chọn là Silic vì Silic có độ nhạy cao với bước sóng quanh 0,85 μm . Độ rộng vùng cấm của silic là $E_G = 1,1\text{eV}$ và bằng năng lượng quang cần hấp thụ, ta có

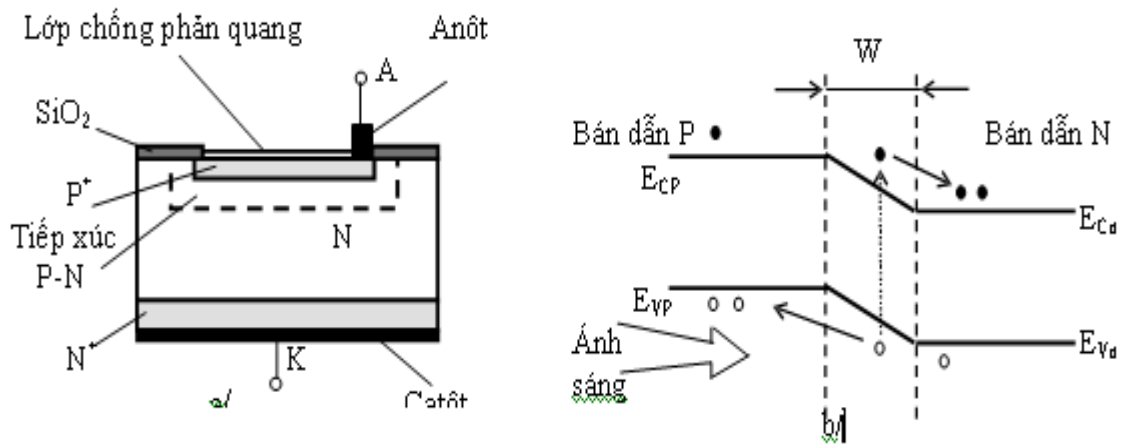
$$E_G = h\nu = h \frac{C}{\lambda}$$

và sẽ có bước sóng cắt là: $\lambda_P = 1,1\mu\text{m}$.

Trong vùng bước sóng thứ hai từ 1,3 đến 1,6 μm cần sử dụng chất bán dẫn có độ rộng vùng cấm hẹp hơn với $E_G < 0,95\text{ eV}$ người ta thường chọn

vật liệu bán dẫn được chế tạo từ các liên kết III-V như GaAs, InP, InAs và GaSb... Ngoài ra, người ta cũng chú ý đến liên kết II-VI như PbSnSe và CdHgTe. Nhờ thay đổi hàm lượng phù hợp trong cấu trúc $Hg_xCd_{1-x}Te$ có thể chế tạo được các điốt quang làm việc ở bước sóng 1,3 μm đến 1,55 μm . Thực tế đã có loại điốt quang thác APD thử nghiệm chế tạo từ vật liệu $Hg_{0,4}Cd_{0,6}Te$.

2. Điốt quang loại tiếp xúc P-N

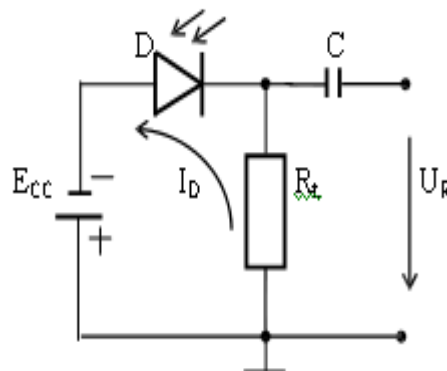


Hình 4.6. Cấu tạo của điốt quang loại tiếp xúc P-N (a) và phân bố dải năng lượng của tiếp xúc P-N (b).

Cấu tạo

Điốt quang gồm có một tiếp xúc P-N. Bề dày của lớp tiếp xúc là w . Hai phần bán dẫn P⁺ và N⁺ có nồng độ tạp chất cao. Điốt có một cửa sổ để chiếu ánh sáng vào. Hai chân anốt A và catốt K là kim loại được nối tới các phần bán dẫn.

Nguyên lý làm việc



Hình 4.7. Sơ đồ nguyên lý đấu nối điốt quang

Điốt quang được cấp nguồn ECC sao cho tiếp xúc P-N *phân cực ngược* để tạo ra một điện trường dịch chuyển các hạt dẫn thiểu số sẽ được sinh ra dưới tác dụng của ánh sáng. Do đó, khi chưa có tác dụng ánh sáng thì trong điốt thu quang chỉ có dòng điện ngược (dòng điện tối hay dòng rò) rất nhỏ.

Khi cho ánh sáng chiếu vào, do quá trình hấp thụ, trong bán dẫn xuất hiện từng cặp điện tử - lỗ trống. Các điện tử và lỗ trống này dưới tác động của điện trường ở tiếp xúc P-N phân cực ngược sẽ chuyển động trôi qua tiếp xúc P-N và tạo nên dòng điện gọi là dòng quang điện.

Linh kiện cần có độ nhạy cao vì nó sẽ cho dòng điện quang cao hơn đối với cùng công suất quang chiếu vào.

Tần số và cường độ của dòng quang điện hoàn toàn do tần số và cường độ của ánh sáng kích thích quyết định.

Điốt quang loại tiếp xúc P-N có vùng điện tích không gian hẹp, ánh sáng được hấp thụ phần lớn ở trong vùng bán dẫn loại P và N. Như vậy hiệu suất lượng tử thấp và tốc độ đáp ứng thấp. Để tăng hiệu suất lượng tử hóa và độ nhạy người ta chế tạo điốt quang có vùng điện tích không gian rộng hơn. Đó là điốt quang loại PIN và điốt quang thác APD.

3. Điốt quang loại PIN:

Cấu tạo

Điốt quang loại PIN gồm một lớp bán dẫn N^+ có nồng độ tạp chất cao làm nền, trên đó phủ một lớp bán dẫn nguyên tính I (Intrinsic), rồi đến lớp bán dẫn loại P^+ có nồng độ tạp chất cao. Do đó điốt có tên gọi là điốt P-I-N. Bên trên bề mặt của lớp bán dẫn P^+ là điện cực vòng Anốt để ánh sáng có thể thâm nhập vào miền bán dẫn I. Trên lớp bán dẫn P có phủ một lớp mỏng chống phản xạ quang để tránh tổn thất ánh sáng chiếu vào.

Nguyên lý hoạt động

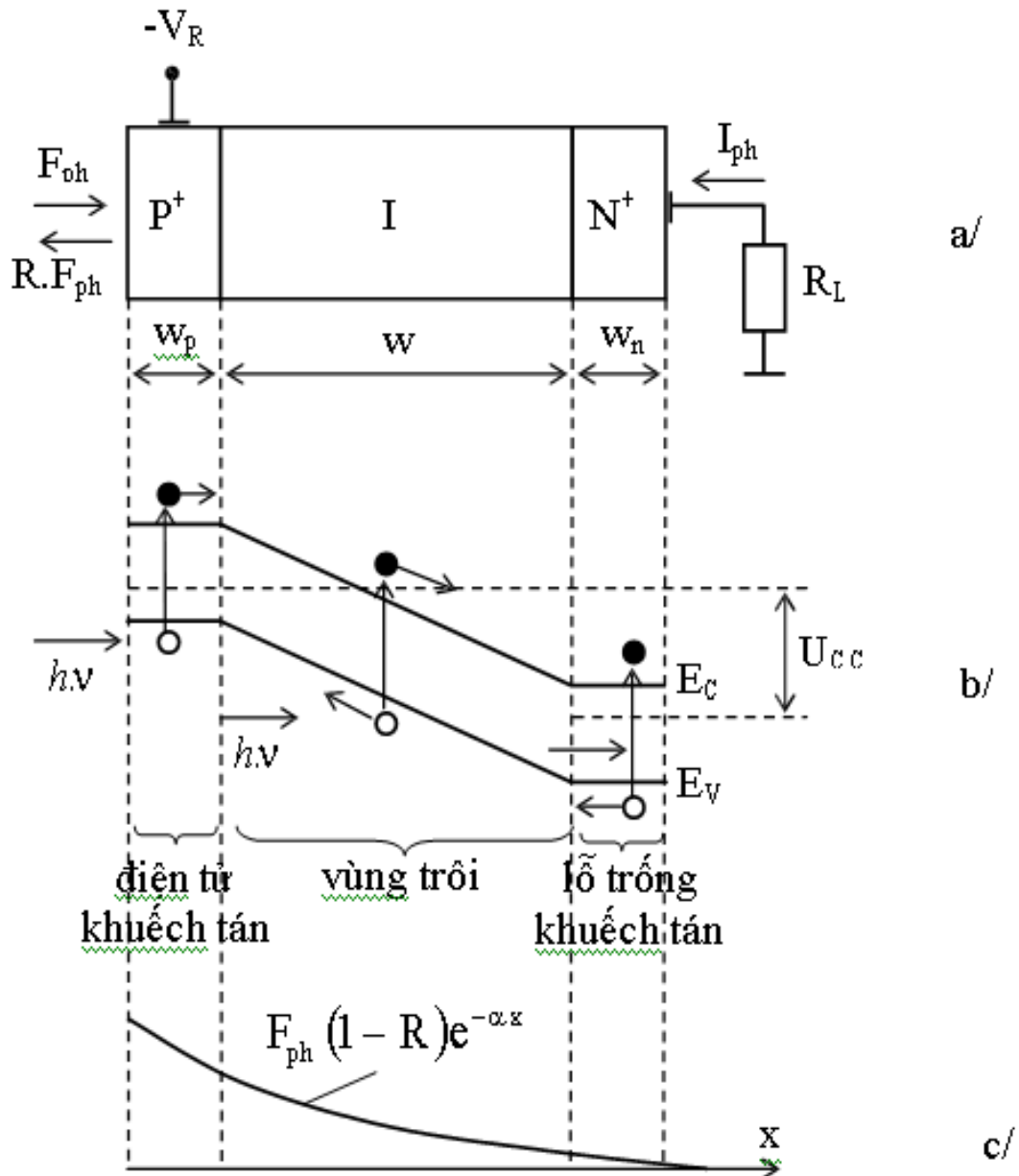
Điện áp cung cấp cho điốt phân cực ngược dọc theo linh kiện, vì vậy lớp I bị nghèo hoàn toàn trong suốt thời gian hoạt động của nó.

Khi ánh sáng đi vào lớp bán dẫn P^+ , trường hợp lý tưởng mỗi photon sẽ sinh ra trong miền P^+ , I hoặc N^+ một cặp điện tử- lỗ trống. Các điện tử và lỗ trống vừa sinh ra sẽ được điện trường mạnh hút về hai phía điện cực, tạo ra một dòng điện ở mạch ngoài và trên tải R_t thu được một điện áp U_{Ra} .

Trên thực tế, một phần ánh sáng vào bị tổn thất do phản xạ. Lớp chống phản xạ tạo cho linh kiện có thể đạt hiệu suất tới 80%.

Đối với silic, hệ số phản xạ ánh sáng R_f hầu như là 30%.

Khả năng thâm nhập ánh sáng vào các lớp bán dẫn thay đổi theo bước sóng. Vì thế lớp bán dẫn P⁺ không được quá dày. Xác suất tạo ra các cặp điện tử - lỗ trống trong miền I tăng lên theo độ dày của miền này, do đó miền I càng dày càng đạt hiệu suất lượng tử hóa cao. Nhưng nếu độ rộng của lớp I tăng lên thì thời gian trôi qua nó chậm hơn và làm chậm tốc độ chuyển mạch.



Hình 4.8. Hoạt động của điốt quang PIN
 a/ Mô hình cấu tạo của điốt PIN
 b/ Giản đồ năng lượng khi phân cực ngược
 c/ Đặc tính phát sinh hạt dẫn

Trong điốt PIN không có khuếch đại và hiệu suất cực đại là đơn vị,

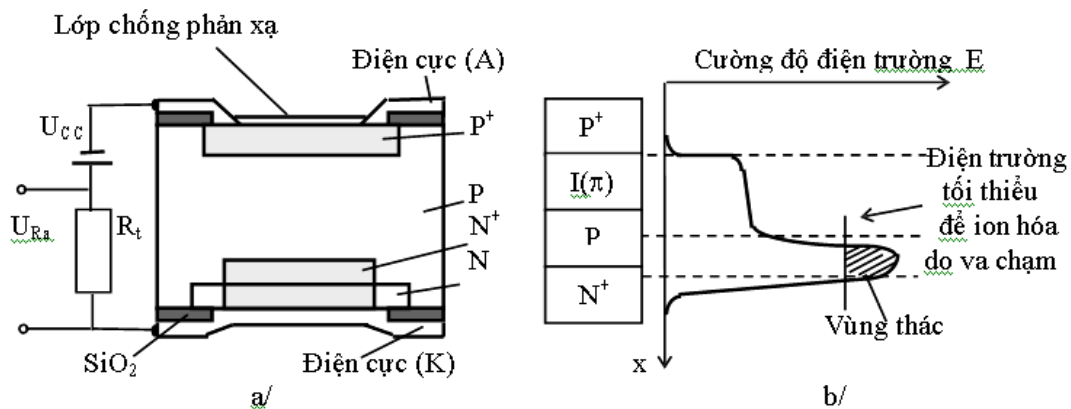
độ rộng băng tần có thể giới hạn bởi hằng số thời gian điện dung - điện trở ngoài. Trên thực tế, độ rộng băng có thể đạt 10 GHz. Điốt quang loại PIN có dòng điện tối rất nhỏ nên tiếng ồn thấp hơn so với điện trở quang. Vì nguyên nhân này, điốt PIN là bộ tách quang thông dụng trong các hệ thống thông tin quang.

4. Điốt quang thác (APD)

Để tăng độ nhạy của điốt quang, người ta có thể sử dụng hiệu ứng giống như hiệu ứng nhân điện tử trong các bộ nhân quang điện. Cấu tạo của điốt quang sẽ có dạng đặc biệt đó là điốt quang với hiệu ứng quang thác APD - Avalanche Photodiodes.

Điốt quang thác giống như điốt PIN trừ điện áp phân cực lớn hơn nhiều để tạo ra sự nhân thác lũ về hạt dẫn và như vậy APD có khuếch đại dòng điện bởi sự ion hoá do va chạm và nhân hạt dẫn.

Cấu tạo



Hình 4.9. Cấu tạo và sự phân bố điện trường trong điốt quang thác APD.

Như hình vẽ, lớp bán dẫn nguyên tính I trong điốt P-I-N được thay bằng một lớp bán dẫn P có nồng độ tạp chất thấp. Như vậy, miền bán dẫn P tạo thành miền trôi và là nơi sinh ra các cặp điện tử- lỗ trống.

Điện trường do điện áp phân cực ngược bên ngoài đặt vào thay đổi theo các lớp bán dẫn dọc theo điốt. Trong vùng trôi điện trường tăng chậm, nhưng trong vùng tiếp xúc P-N⁺ thì tăng nhanh và tạo ra miền thác tại vùng này.

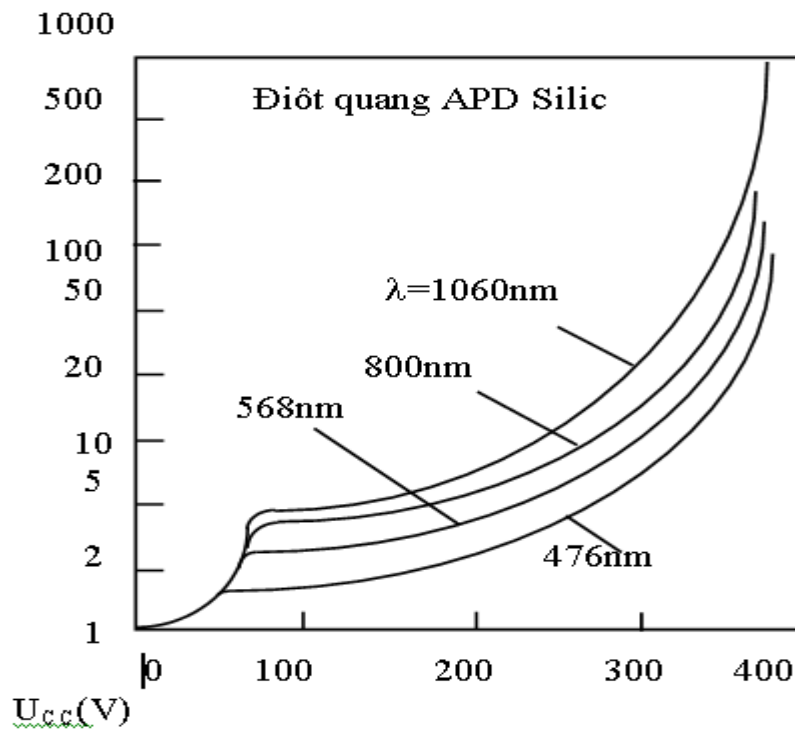
Nguyên lý hoạt động

Nguyên lý hoạt động của APD cơ bản giống như điốt P-I-N.

Sơ đồ nguyên lý được mô tả trong hình trên. Theo sơ đồ này, điốt quang thác được phân cực ngược nhờ nguồn U_{cc}, và tín hiệu điện được lấy ra trên tải R_t.

Khi chiếu ánh sáng vào, sẽ xuất hiện thêm các cặp điện- lỗ trống mới

trong miền trôi (bán dẫn P). Dưới tác động của điện trường, các điện tử trong miền P sẽ dịch chuyển đến vùng thác của tiếp xúc P-N⁺ và rơi vào vùng có điện trường mạnh nên được tăng tốc. Các điện tử có tốc độ lớn này sẽ va chạm vào các nguyên tử khác để tạo ra các cặp điện tử- lỗ trống mới. Hiện tượng này được gọi là hiện tượng ion hóa do va chạm. Do đó, dòng điện qua điốt APD tăng nhanh như được khuếch đại lên với hệ số khuếch đại M. Hệ số khuếch đại (hay còn gọi là hệ số nhân) phụ thuộc vào điện áp phân cực cho điốt và nó có thể đạt tới 200 lần. Xem hình dưới.



Hình 4.10. Sự phụ thuộc của hệ số khuếch đại dòng điện M của điốt quang APD silic vào điện áp phân cực U_{cc} ở các bước sóng khác nhau tại nhiệt độ trong phòng.

Hệ số nhân M cũng có thể tính theo công thức

$$M_{ph} = \frac{I_M}{I_{ph}} = \frac{1}{1 - (V/V_{dt})^n}$$

Trong đó:

- I_M - là giá trị trung bình của dòng điện nhân tổng tại đầu ra.
- I_{ph} - là dòng quang điện sơ cấp chưa được nhân, xác định theo công thức trên.
- V_{dt} - điện áp đánh thủng tại giá trị M xác định.
- n - lũy thừa, là hằng số vật liệu có giá trị từ 2,5 đến 7.
- $V = V_0 - IMRM$

- V_0 là điện áp phân cực ngược cho điốt;
- R_M là điện trở nối tiếp của điốt quang và điện trở tải của mạch tách quang
- I_M là dòng điện nhân ở đầu ra của APD.

Ta thấy điốt APD cần có điện áp phân cực lớn hơn nhiều so với điốt loại P-I-N. Nếu thời gian cho quá trình ion hóa trong miền thác càng dài thì hệ số khuếch đại M càng lớn, song tốc độ trôi qua miền thác sẽ chậm đi. Các xung cũng sẽ bị giãn rộng ra và hạn chế độ rộng băng tần B . Để đánh giá khả năng làm việc của APD, người ta định nghĩa tích số độ khuếch đại và độ rộng băng do quá trình thác là

$$M_{ph} B = \frac{1}{2\pi\tau} \quad (27)$$

Trong đó: τ là thời gian giữa 2 quá trình va chạm của điện tử với các nguyên tử.

Sự tăng hệ số khuếch đại có thể đạt được khi tích hệ số khuếch đại - độ rộng băng tần đạt 100 GHz hoặc hơn. Thông thường, các APD cho phép đạt độ rộng băng trên 1GHz với giá trị M_{ph} lớn. Để ổn định giá trị M_{ph} , ta cần cấp một điện áp nguồn lớn và ổn định về nhiệt do đó chi phí để đảm bảo chế độ làm việc cho APD lớn hơn nhiều so với điốt loại P-I-N.

Trong điốt APD silic, ion hoá do va chạm bởi điện tử khoảng 50 lần lớn hơn lỗ trống và do đó nó cho tỉ lệ tín hiệu / tiếng ồn tốt nhất.

5. Các đặc tính và tham số của điốt quang

Hiệu suất lượng tử hóa η là tỉ số giữa số lượng các đôi điện tử- lỗ trống sinh ra trên số photon có năng lượng $h\nu$ đi đến và nó được tính theo công thức sau

$$\eta = \frac{I_{ph}/q}{P_0/h\nu}$$

Trong đó

I_{ph} là dòng quang điện trung bình sinh ra do công suất quang trung bình P_0 đi tới điốt quang.

Trên điốt thực tế hiệu suất lượng tử hóa $\eta = (30 - 95)\%$.

Độ nhạy của điốt quang S : (hay hệ số chuyển đổi)

Độ nhạy chỉ rõ giá trị dòng quang điện sinh ra trên đơn vị công suất ánh sáng đi đến điốt. Nó liên hệ với hiệu suất lượng tử hóa theo công thức:

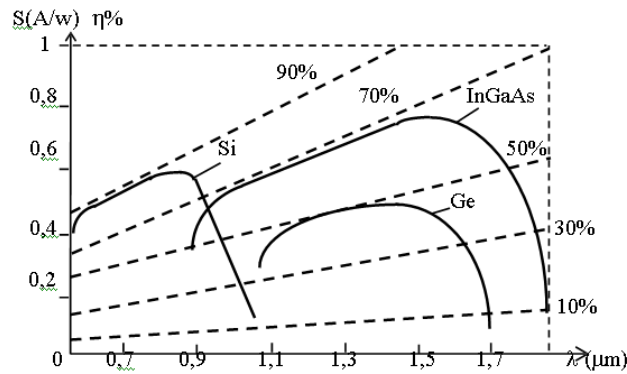
$$S = \frac{I_{ph}}{P_0} = \frac{\eta q}{h\nu}$$

Trong các điốt quang loại P-I-N, độ nhạy là hàm của bước sóng được mô

tả ở hình dưới

Trong hầu hết các photodiốt, độ nhạy là một hàm tuyến tính với công suất quang. Có nghĩa là, dòng quang điện I_{Ph} tỉ lệ thuận trực tiếp với công suất quang P_0 chiếu vào cấu kiện tách quang, cũng như vậy, độ nhạy S là hằng số tại một bước sóng đã cho.

Tuy nhiên, hiệu suất lượng tử hóa không phải là hằng số tại tất cả các bước sóng vì nó thay đổi theo năng lượng photon. Dẫn đến độ nhạy là hàm của bước sóng và vật liệu bán dẫn.



Hình 4.11. So sánh giữa hiệu suất lượng tử và độ nhạy như một hàm của bước sóng cho điốt quang loại P-I-N đối với các vật liệu khác nhau.

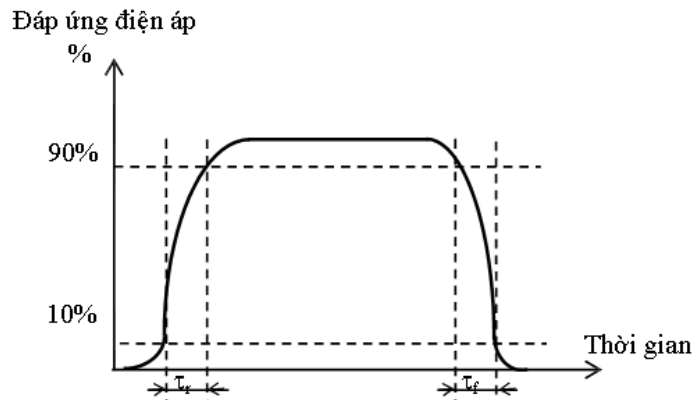
Tạp âm của bộ tách quang

Trong các hệ thống thông tin sợi quang, nhìn chung photodiốt được yêu cầu để tách các tín hiệu quang rất yếu. Việc tách các tín hiệu quang yếu nhất có thể yêu cầu bộ tách quang và mạch khuếch đại tiếp theo của nó phải tối ưu sao cho tỉ số tín hiệu trên tạp âm (S/N) được duy trì. Tỉ số tín hiệu trên tạp âm (S/N) tại đầu ra của một bộ thu quang được xác định như sau

$$S = \frac{\text{Công suất tín hiệu dòng quang điện}}{\text{Công suất tạp âm Diode quang} + \text{Công suất tạp âm mạch khuếch đại}}$$

Thời gian hồi đáp

Thời gian hồi đáp của điốt quang được biểu thị bằng thời gian lên và thời gian xuống của tín hiệu tách quang trên lối ra khi điốt quang được chiếu sáng bằng bức xạ quang đầu vào. Thời gian lên được đo từ 10% đến 90% sườn lên của xung ra và thời gian xuống cũng được đo như vậy.

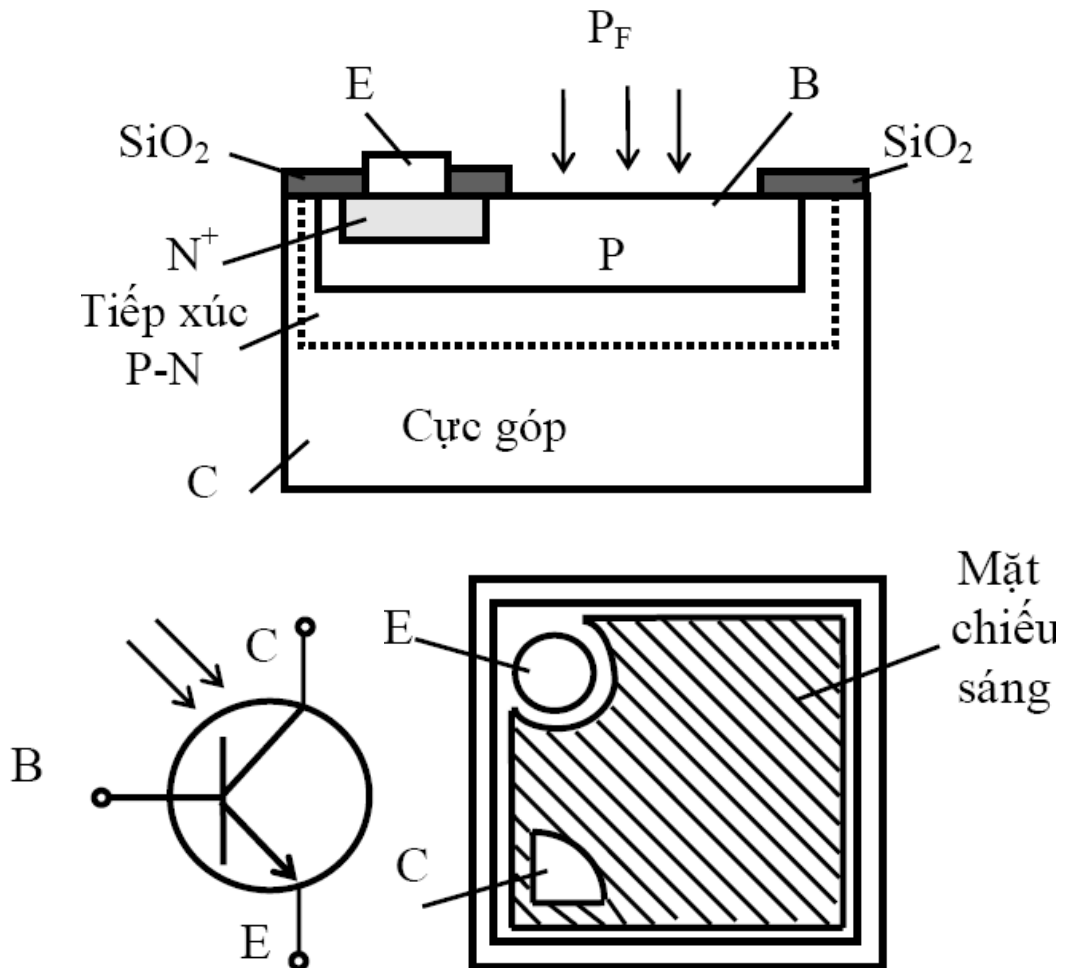


Hình 4.12. Thời gian lên τ_r và thời gian xuống τ_f của đáp ứng điện áp lối ra của điốt quang.

4.2.3. Tranzito quang – Phototransistor

1. Cấu tạo

Tranzito quang có 2 loại PNP và NPN. Ba chân cực: cực phát E, cực gốc B, và cực góp C. Cực gốc là bề mặt được ánh sáng chiếu vào, nó được chế tạo rất mỏng để có điện trở nhỏ.



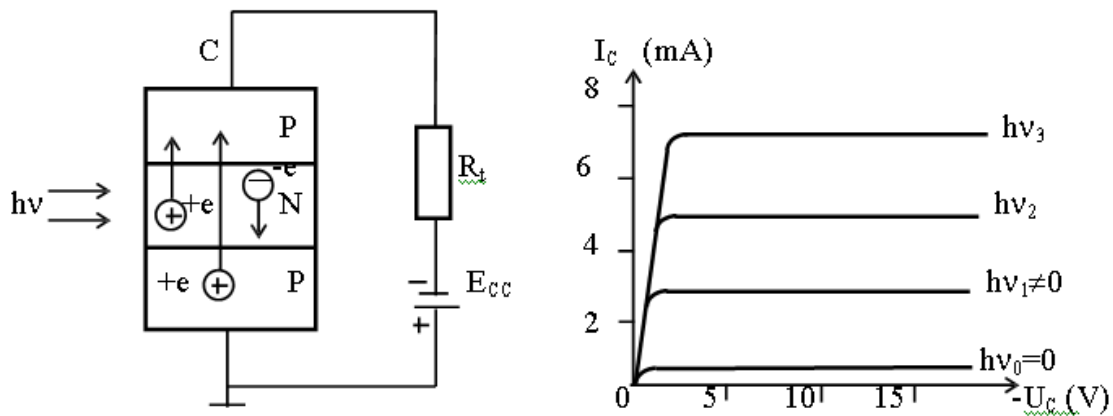
Hình 4.13. Cấu tạo và ký hiệu của tranzito quang

2. Nguyên lý hoạt động

Trong hình, nguồn cung cấp ECC tạo cho tiếp xúc phát phân cực thuận và tiếp xúc góp phân cực ngược. Tải R_t để sụt bớt một phần điện áp phân cực cho tranzito, và lấy tín hiệu điện ra.

- Khi không có tín hiệu quang ($h\nu = 0$ hay $I_B = I_{\text{Phot.}} = 0$) trong mạch chỉ có dòng điện tối I_C tối. Đây là dòng điện do các lỗ trống khuếch tán từ phân phát sang tới cực góp và nó có trị số nhỏ.

- Khi có tín hiệu quang đến ($h\nu \neq 0$ hay $I_B = I_{\text{Phot.}} \neq 0$), ở phần gốc sẽ xuất hiện các cặp điện tử- lỗ trống. Các lỗ trống sẽ di chuyển về cực góp tạo nên thành phần dòng quang điện $I_{\text{Phot.}}$, còn các điện tử chuyển động về phía tiếp xúc phát, kích thích cho sự khuếch tán của các hạt dẫn tại đây dễ dàng hơn..



Hình 4.14. Sơ đồ nguyên lý đầu nối tranzito quang và đặc tuyến Vôn-Ampe của nó

Với sơ đồ mắc cực phát chung như hình vẽ, ta có thể tính gần đúng dòng điện cực góp khi tranzito quang được chiếu sáng I_C s:

- Do cực gốc để hở và có ánh sáng chiếu đến nên dòng điện cực gốc chính là dòng tín hiệu quang $I_{\text{Phot.}}$.
- Hệ số khuếch đại dòng quang chính bằng hệ số khuếch đại của tranzito trong sơ đồ mắc cực phát chung ($M = \beta$).

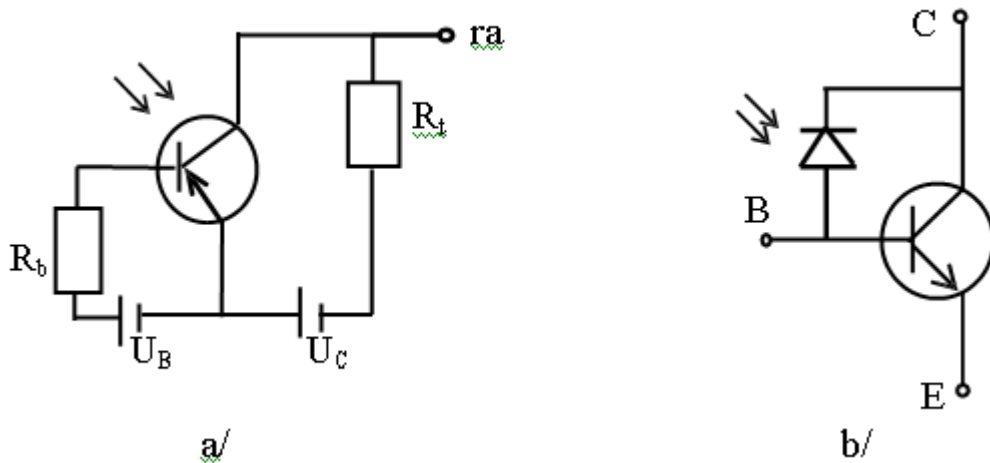
Vậy, tổng dòng điện trong tranzito quang khi được chiếu sáng

$$I_Cs = \beta I_{\text{Phot.}} + I_{\text{Phot.}} + I_C \text{ tối}$$

Thành phần dòng điện tối I_C tối sẽ hạn chế khả năng khuếch đại tín hiệu quang của tranzito. Để khắc phục hạn chế này người ta dùng tranzito quang 3 chân cực để giảm dòng điện tối và tăng trở kháng ra của mạch. Sơ đồ đầu tranzito 3 chân cực như trong hình 28. Với cách mắc này các tham số của mạch phụ thuộc vào dòng điện cực gốc rõ rệt. Tại giá trị dòng cực gốc tối ưu nào đó sẽ cho các thông số tối ưu: dòng điện tối có thể

giảm xuống 10 lần, trở kháng ra tăng lên khoảng 10 lần, và các hệ số khuếch đại dòng điện và điện áp tăng lên đáng kể so với mạch để hở cực gốc. Trong các mạch, tranzito quang cũng có thể mắc theo 3 cách mắc.

Đó là các sơ đồ: cực gốc chung, cực phát chung và cực góp chung như tranzito thường chỉ có khác tín hiệu điều khiển là tín hiệu quang.



Hình 4.15.

- a- Sơ đồ mắc tranzito quang 3 chân cực để tối ưu các thông số
- b- Sơ đồ tương đương của tranzito quang: điôt quang là tiếp xúc gốc- góp.

Về mặt cấu trúc có thể coi tranzito quang như một mạch tích hợp đơn giản gồm một điôt quang làm nhiệm vụ biến đổi tín hiệu quang sang tín hiệu điện và một tranzito có nhiệm vụ khuếch đại

Để có hệ số khuếch đại dòng quang lớn, người ta dùng sơ đồ Dacling- ton đối với các tranzito quang, xem hình 29. Tranzito quang Dacling-ton được chế tạo như chỉ ra trong hình.



- a/ Sơ đồ tranzito quang Dacling ton
- b/ Sơ đồ tương đương

Hình 4.16. Sơ đồ tranzito quang Darlington

Từ sơ đồ tương đương ta thấy độ nhạy phổ của tranzito quang cũng giống như đối với các điôt quang tương ứng, tuy nhiên vì tranzito quang có khả năng khuếch đại nên độ nhạy của nó cao hơn điôt quang khoảng vài trăm lần. Tần số làm việc của tranzito quang thấp hơn điôt quang. Tranzito quang làm việc với tần số đến vài trăm KHz (khoảng 300KHz, còn sơ đồ Darling- ton chỉ khoảng 30KHz) trong khi điôt quang làm việc đến vài chục MHz.

BPW 21

Features

- *Especially suitable for applications from 350nm to 820nm*
- *Adapted to human eye sensitivity ($V\lambda$)*
- *Hermetically sealed metal package (similar to TO-5)*

Application

- *Exposure meter for daylight*
- *For artificial light of high color temperature in photographic fields and color analysis*



Characteristics ($T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$, standard light A, $T = 2856\text{ K}$) (cont'd)

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Kurzschlußstrom, $E_v = 1000\text{ lx}$ Short-circuit current	I_{SC}	10	μA
Anstiegs- und Abfallzeit des Fotostromes Rise and fall time of the photocurrent $R_L = 1\text{ k}\Omega$; $V_R = 5\text{ V}$; $\lambda = 550\text{ nm}$; $I_p = 10\text{ }\mu\text{A}$	t_r, t_f	1.5	ns
Durchlaßspannung, $I_F = 100\text{ mA}$, $E = 0$ Forward voltage	V_F	1.2	V
Kapazität, $V_R = 0\text{ V}$, $f = 1\text{ MHz}$, $E = 0$ Capacitance	C_0	580	pF
Temperaturkoeffizient von V_O Temperature coefficient of V_O	TC_V	- 2.6	mV/K
Temperaturkoeffizient von I_{SC} Temperature coefficient of I_{SC}	TC_I	- 0.05	%/K
Rauschäquivalente Strahlungsleistung Noise equivalent power $V_R = 5\text{ V}$, $\lambda = 550\text{ nm}$	NEP	7.2×10^{-14}	$\frac{\text{W}}{\sqrt{\text{Hz}}}$
Nachweisgrenze, $V_R = 5\text{ V}$, $\lambda = 550\text{ nm}$ Detection limit	D^*	1×10^{12}	$\frac{\text{cm} \times \sqrt{\text{Hz}}}{\text{W}}$

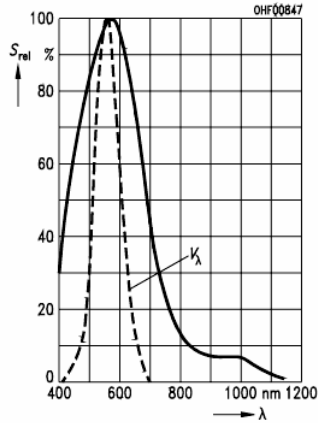
Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Betriebs- und Lagertemperatur Operating and storage temperature range	$T_{op}; T_{stg}$	- 40 ... + 80	°C
Sperrspannung Reverse voltage	V_R	10	V
Verlustleistung, $T_A = 25$ °C Total power dissipation	P_{tot}	250	mW

Kennwerte ($T_A = 25$ °C, Normlicht A, $T = 2856$ K)

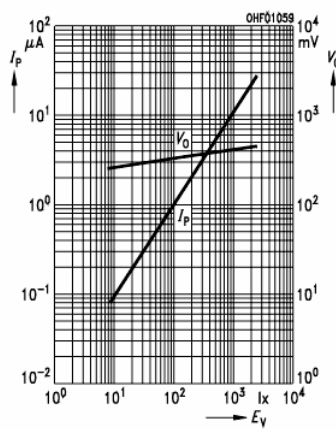
Characteristics ($T_A = 25$ °C, standard light A, $T = 2856$ K)

Bezeichnung Parameter	Symbol Symbol	Wert Value	Einheit Unit
Fotoempfindlichkeit, $V_R = 5$ V Spectral sensitivity	S	10 (≥ 5.5)	nA/lx
Wellenlänge der max. Fotoempfindlichkeit Wavelength of max. sensitivity	$\lambda_{S\ max}$	550	nm
Spektraler Bereich der Fotoempfindlichkeit $S = 10\%$ von S_{max} Spectral range of sensitivity $S = 10\%$ of S_{max}	λ	350 ... 820	nm
Bestrahlungsempfindliche Fläche Radiant sensitive area	A	7.34	mm ²
Abmessung der bestrahlungsempfindlichen Fläche Dimensions of radiant sensitive area	$L \times B$ $L \times W$	2.73×2.73	mm \times mm
Halbwinkel Half angle	φ	± 55	Grad deg.
Dunkelstrom $V_R = 10$ V Dark current $V_R = 5$ V $V_R = 10$ mV	I_R I_R	2 (≤ 30) 8 (≤ 200)	nA pA
Spektrale Fotoempfindlichkeit, $\lambda = 550$ nm Spectral sensitivity	S_λ	0.34	A/W
Quantenausbeute, $\lambda = 550$ nm Quantum yield	η	0.80	<u>Electrons</u> Photon
Leerlaufspannung, $E_v = 1000$ lx Open-circuit voltage	V_O	400 (≥ 320)	mV

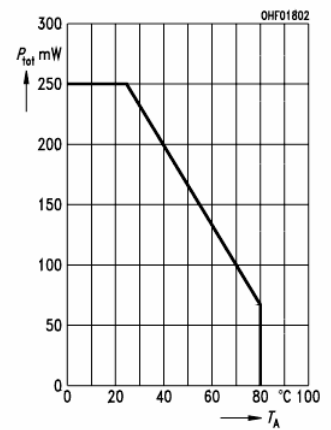
Relative Spectral Sensitivity
 $S_{rel} = f(\lambda)$



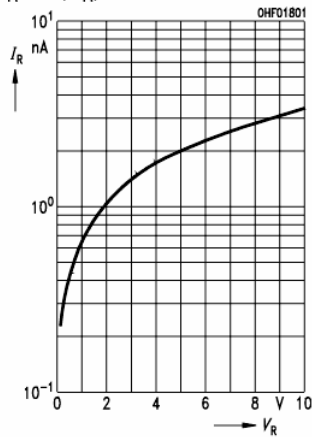
Photocurrent $I_p = f(E_v)$, $V_R = 5\text{ V}$
Open-Circuit Voltage $V_o = f(E_v)$



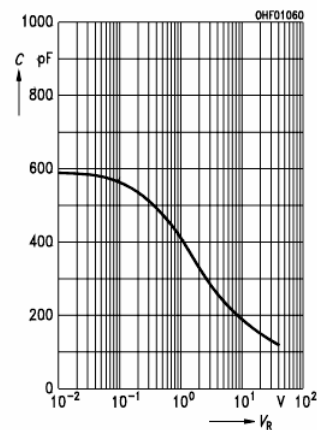
Total Power Dissipation
 $P_{tot} = f(T_A)$



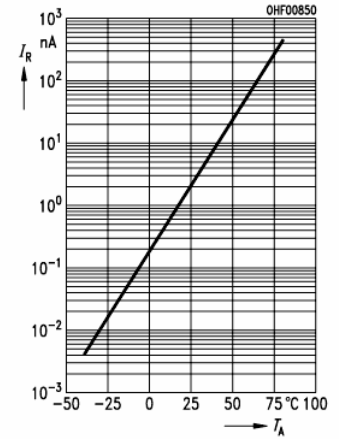
Dark Current
 $I_R = f(V_R)$



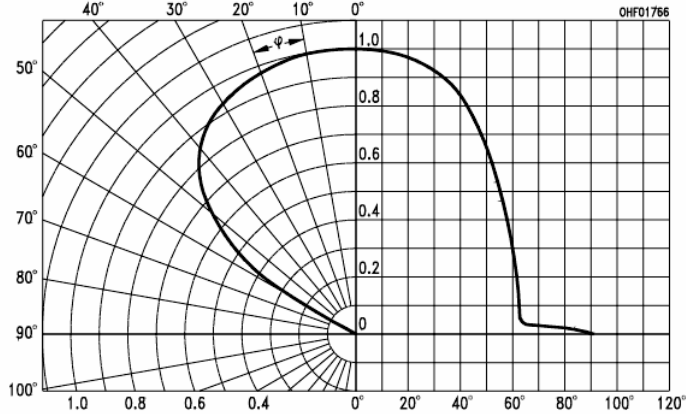
Capacitance
 $C = f(V_R)$, $f = 1\text{ MHz}$, $E = 0$



Dark Current
 $I_R = f(T_A)$, $V_R = 5\text{ V}$



Directional Characteristics
 $S_{rel} = f(\varphi)$



4.3. Các linh kiện thu quang (hiệu ứng quang điện bên ngoài)

4.3.1. vacuum photodetectors

Dùng hiệu ứng quang điện tạo ra dòng và áp tỷ lệ với mật độ dòng công suất sóng tới.

Độ nhạy cao, đáp ứng nhanh .

Chủ yếu dùng trong phòng thí nghiệm.

1. Nguyên lý

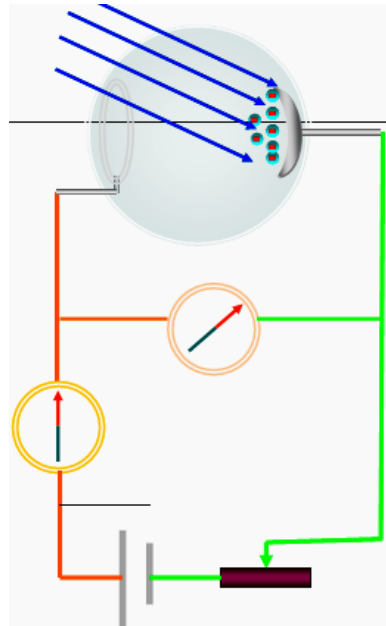
Cathode cấu tạo từ bề mặt kim loại cong có phủ lớp oxide.

Anode: ống mỏng đặt tại tiêu điểm của cathode.

Phát xạ điện tử từ bề mặt cathode đòi hỏi năng lượng photon đến phải đủ để kéo điện tử ra khỏi các lực liên kết của e- với nguyên tử và với bề mặt cathode (do các điện tích dương tạo ra bởi các điện tử rời khỏi bề mặt).

$$E_{kmax} = hf - W$$

- W: công thoát điện tử
- h: hằng số planck
- f: tần số photon



Hình 4.17. vacuum photodetectors

2. Các đặc trưng cơ bản

Stopping voltage thế áp đặt để làm triệt tiêu $E_{k \max}$ độ dẫn = 0

Tần số ngưỡng khi sóng đến có tần số nhỏ hơn tần số ngưỡng sẽ không phát xạ điện tử từ cathode, là tần số ứng với $E_k = 0$.

Đặc trưng thuận

- Tồn tại điện áp “knee voltage” mà trên đó dòng sẽ bão hoà, photodiode hoạt động trong miền này.

- Dòng bão hoà tỷ lệ thuận với mật độ dòng quang tới H.

- Thế stop giống nhau với các mật độ dòng quang tới khác nhau (chỉ là hàm của tần số photon)

Đặc tuyến ra có tải dùng để tính gần đúng dòng qua ống I_T , thế rơi trên ống V_T khi biết tải R và mật độ dòng quang (lm)

Các tính chất cơ bản của vacuum photodetector

1/ Dòng photodiode tăng tuyến tính theo mật độ dòng quang nếu trở tải nhỏ.

2/ Trường hợp lý tưởng, độ nhạy dòng $S_I = \frac{\Delta I}{\Delta F_v} = \text{const.}$ và không phụ thuộc tải

3/ Các mạch thực tế lệch khỏi lý tưởng khi dòng lớn và bé .

4/ Thế anode giảm khi mật độ dòng quang tăng.

5/ Độ nhạy điện áp $S_v = \frac{\Delta V}{\Delta F_v}$ tỷ lệ với trở tải .

6/ Với trở tải R_L nhỏ, độ nhạy điện áp gần không đổi và dòng, thế thay đổi gần tuyến tính theo mật độ dòng quang.

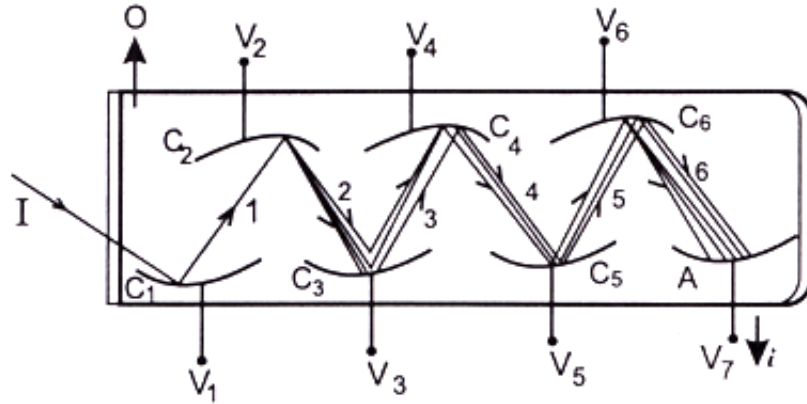
4.3.2. Photomultiplier - Ống nhân quang

Loại đèn điện tử dùng để khuếch đại dòng photon yếu.

Cấu trúc gồm bóng chân không, photocatôt C_1 , các cực trung gian $C_2, C_3...$ (còn gọi là các đinôt) và anôt A.

Dòng photon yếu đập vào photocatôt làm phát xạ dòng electron, giữa các đôi điện cực $C_1C_2, C_2C_3...$ có đặt hiệu thế gia tốc tăng dần, dựa vào hiệu ứng phát xạ thứ cấp của các đinôt, dòng điện tử đến anôt có thể tăng lên $10^5, 10^9$ lần.

Hiện nay có nhiều loại Ống nhân quang khác nhau về cấu tạo catôt quang, phương pháp chiếu sáng, hệ thống các cực phát xạ thứ cấp, hệ thống hội tụ điện tử thứ cấp. Ống nhân quang dùng để khuếch đại những tia sáng yếu, biến thiên nhanh. Được sử dụng trong các hệ truyền hình, truyền ảnh và các ống đếm nhấp nháy



Hình 4.18. Ống nhân quang điện

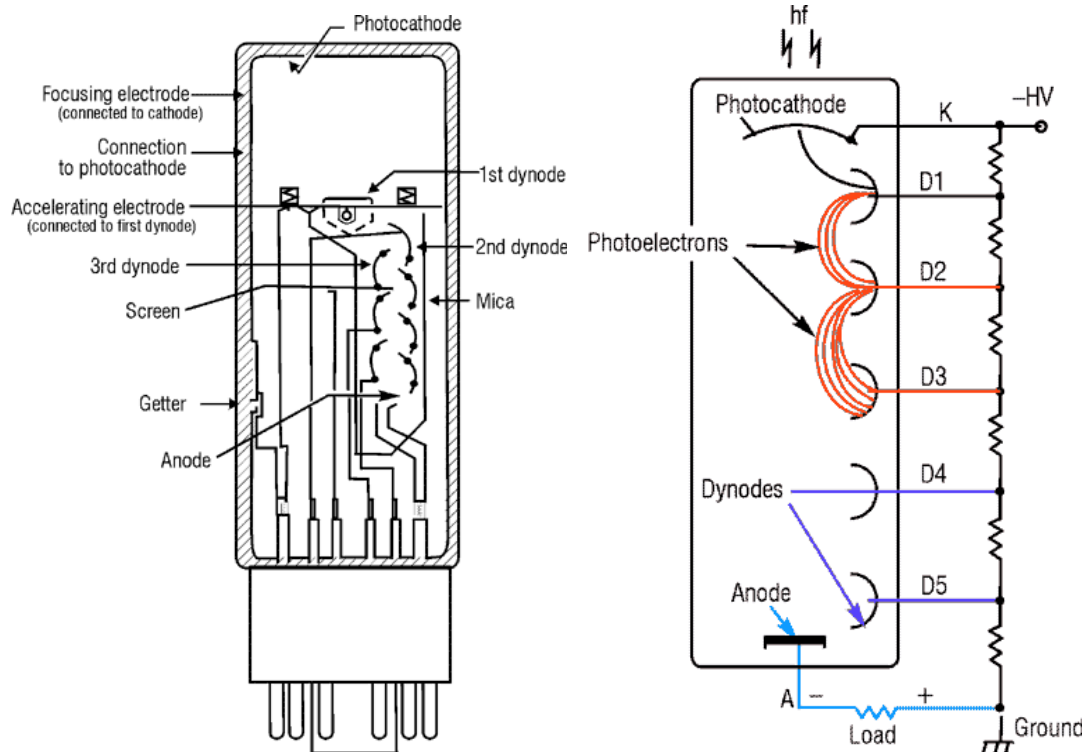
O - Ống chân không;

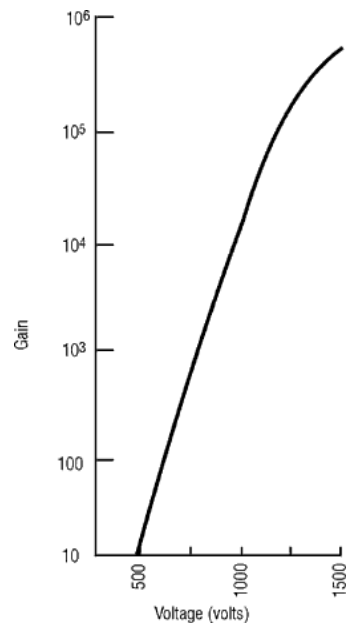
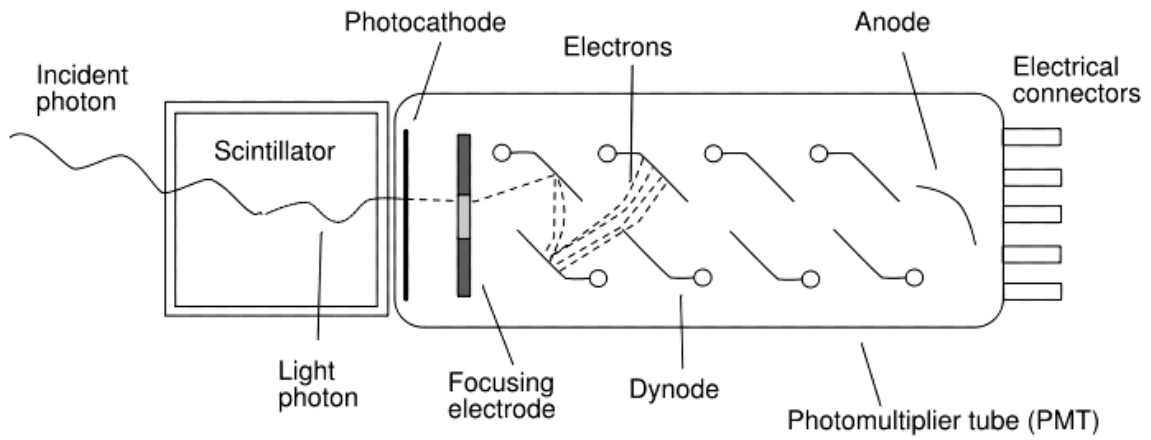
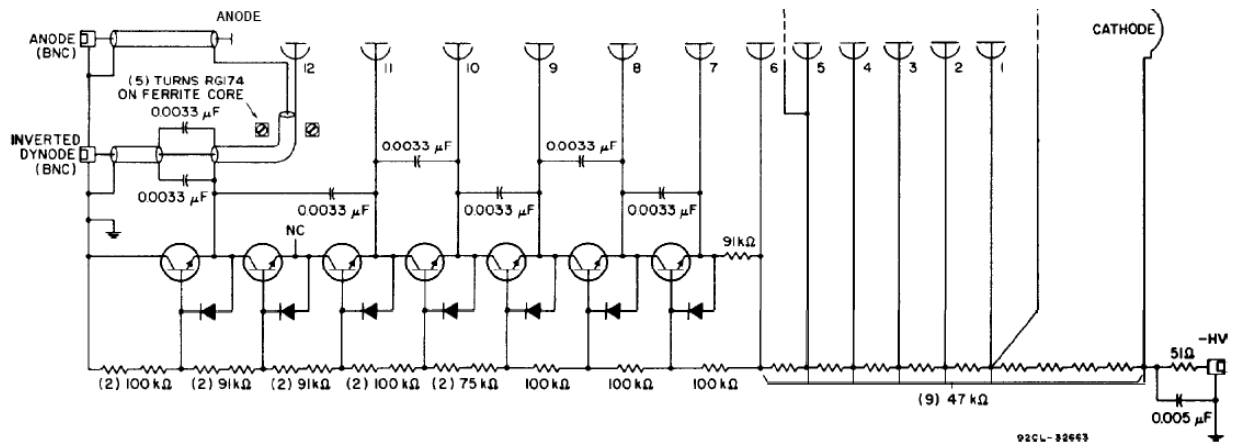
$V_1 < V_2 \dots < V_7$; 1,2,3,4,5,6 – Chùm điện tử;

I - Bức xạ, tia phóng xạ;

$C_1 \dots C_6$ – Catôt. A – Anôt. i – Dòng anôt;

Cặp (C_1, C_2) gọi là đinôt, tương tự như vậy là (C_2, C_3), (C_3, C_4)...





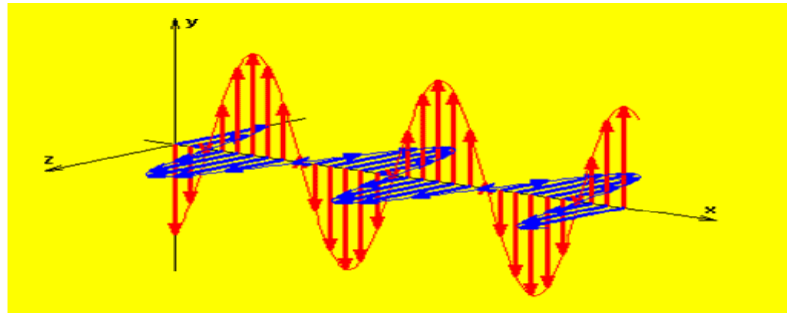
Chương 5

LED-LIGHT EMITTING DIODE

5.1. Nguyên tắc hoạt động và cấu tạo

5.1.1. Hiện tượng phân cực ánh sáng.

Ánh sáng là sóng điện từ có độ dài từ $0.4 \mu\text{m}$ đến $0.75 \mu\text{m}$. Một nguồn sáng như một ngọn đèn, một ngọn lửa gồm vô số các hạt phát ra ánh sáng. Các hạt này là các phân tử, nguyên tử hay ion.



Hình 5.1. Lan truyền sóng điện từ

Các sóng điện từ phát ra bởi các hạt đó có vectơ cường độ điện trường E hướng theo tất cả mọi phương thẳng góc với phương truyền tia sáng. Ánh sáng như vậy được gọi là *ánh sáng tự nhiên*. Vậy ánh sáng tự nhiên được coi là gồm vô số các dao động thẳng, phân bố đều nhau theo tất cả mọi phương thẳng góc với phương truyền của tia sáng. Không có một phương nào được ưu đãi.

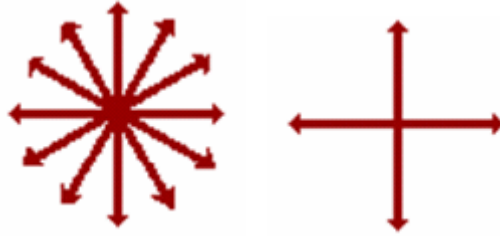
Nếu bằng cách nào đó ta làm mất sự đối xứng này của các phương dao động sáng thì ánh sáng đó được gọi là *ánh sáng phân cực*.

Có thể có ánh sáng phân cực một phần hay ánh sáng phân cực hoàn toàn.

Sự phân cực (Polarization): hiện tượng vector dao động bị giới hạn phương dao động.

Ánh sáng tự nhiên: Vector E dao động theo mọi phương

Ánh sáng phân cực: Phương dao động của vector E không còn tính đối xứng xung quanh phương truyền nữa.



Hình 5.2. Ánh sáng không phân cực hay phân cực một phần

Hiện tượng phân cực do phản xạ

Ánh sáng tự nhiên bị phản xạ qua một bề mặt với một góc thích hợp sẽ bị phân cực.

Định luật Brewster

Để có ánh sáng phân cực hoàn toàn do sự phản xạ trên một bề mặt của một môi trường trong suốt, góc tới i phải có một trị số xác định tùy thuộc vào bản chất của môi trường và được tính bởi công thức

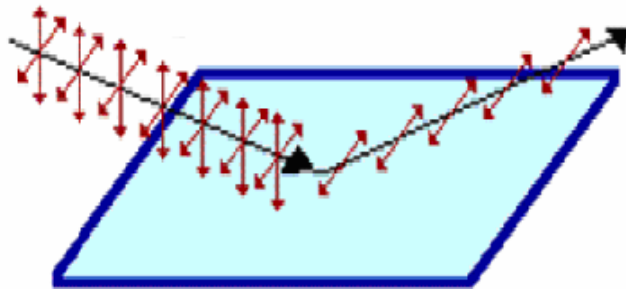
$$\operatorname{tg} i = n$$

n là chiết suất của môi trường

Góc i được gọi là góc Brewster (i_B)

Nếu môi trường tới là thủy tinh có $n = 1,5$

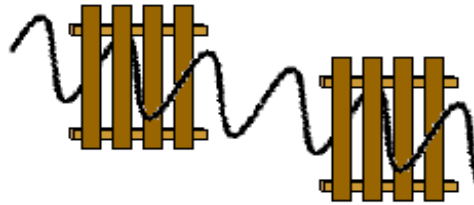
$$\operatorname{tg} i_B = 1,5. \text{ Suy ra } i_B = 57^\circ.$$



Hình 5.3. Ánh sáng phân cực Brewster

Hiện tượng phân cực do truyền qua môi trường dị hướng

The Picket Fence Analogy



When the pickets of both fences are aligned in the vertical direction, a vertical vibration can make it through both fences.



When the pickets of the second fence are horizontal, vertical vibrations which make it through the first fence will be blocked.

Hình 5.4. *...vòng dị hướng*

(ảnh minh họa)

5.1.2. Mặt chỉ thị tinh thể lỏng (LCD - Liquid Crystal Display)

LCD có những lợi điểm sau

- rất ít tốn điện, khoảng 10Uw
- chữ số hiện rõ ràng dễ đọc ở nơi có nhiều ánh sáng
- cấu trúc phẳng, đẹp, có độ bền cơ học cao
- có thể được điều khiển trực tiếp bằng các linh kiện TTL, hay CMOS
- có thể chỉ thị những dấu hiệu phức tạp

Tuy nhiên, LCD cũng có những bất lợi sau:

- đời sống tương đối ngắn so với LED
- khi trời tối chỉ có thể đọc được với ánh đèn từ bên ngoài hay chiếu từ phía sau
- thời gian tắt và mở tương đối chậm

Với những tính chất như trên, LCD được dùng làm mặt chỉ thị cho đồng hồ, máy tính, máy đo digital, các đồng hồ trong xe hơi, trò chơi trẻ em.... LCD là linh kiện thụ động, nó không phát sáng, càng dễ đọc hơn khi chung quanh càng sáng.

Ngày nay đã có LCD màu. Thời gian tắt mở của LCD loại mới cũng cải tiến nhanh hơn để dùng làm mặt màn hình Tivi, máy tính cá nhân....

Khái niệm

Mặt hiển thị tinh thể lỏng LCD (Liquid Crystal Display) là linh kiện tạo ra ảnh khả kiến nhờ điều khiển sự truyền sáng qua một quá trình phân cực. Các đèn điện phát quang thường được dùng như các nguồn ánh sáng đen cho ứng dụng hiển thị tinh thể lỏng.

Mặt chỉ thị tinh thể lỏng – LCD – không phải là linh kiện bán dẫn quang điện tử. LCD được chế tạo dưới dạng thanh và chấm – ma trận. LCD có tuổi thọ khá cao từ 10000 giờ đến 100 000 giờ và ngày nay nó thay thế dần các mặt chỉ thị loại LED, Plasma hay huỳnh quang.

Vật liệu

Tinh thể lỏng sử dụng trong LCD là những hợp chất hữu cơ. Các phân tử của tinh thể lỏng này được phân bố sao cho các trục dọc của chúng nằm song song với nhau.

Hiệu ứng quang học dùng cho LCD chỉ hạn chế trong khoảng "không đẳng hướng", do vậy dải nhiệt độ làm việc của LCD bị hạn chế và xác định bởi hai điểm nhiệt độ nóng chảy và nhiệt độ trong suốt.

Hiện nay, có nhiều hãng điện tử chế tạo các loại LCD như Hitachi, Sharp, Seiko, Samsung, Hantronic, Optex, Phillip, Powertip,... Thông dụng nhất là LCD của hãng Hitachi

Các LCD trên có khác nhau về

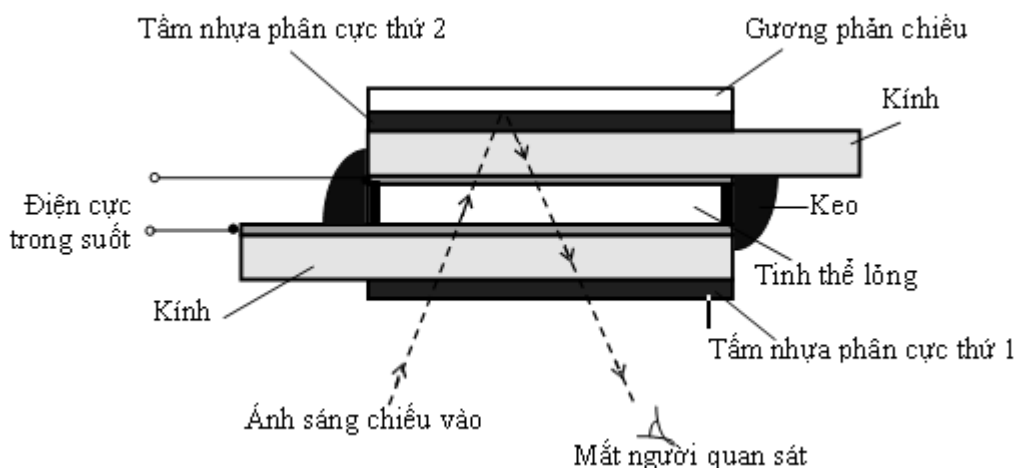
- Kích thước: có loại kích thước nhỏ, trung bình và lớn. Loại kích thước nhỏ cho các thiết bị điện tử số dùng trong gia đình. Loại kích thước trung bình cho các thiết bị điện tử số dùng trong công nghiệp và ti vi. Loại kích thước lớn dành cho màn hình đồ họa và các biển quảng cáo.
- Cách trao đổi tin: song song (cho các thiết bị ở gần) và nối tiếp (cho các thiết bị ở xa)..
- Hiển thị: Chữ/ số hay hình ảnh (đồ họa).

Hãng	Ký hiệu	Ma trận	Công dụng	Loại
Optex	DMC	5x7, 1 hay 2 dòng	Cho thiết bị số	Chữ/số, song song
Sharp	LM	5x7, 1 hay 2 dòng	Cho thiết bị số	Chữ/số, song song
Hitachi	HD 44780	5x7, 1 hay 2 dòng	Cho thiết bị số	Chữ/số, song song
Seiko	KS0066	5x7, 1 hay 2 dòng	Cho thiết bị số	Chữ/số, song song
Hanntronic	LCM1	5x7, 1 hay 2 dòng	Cho thiết bị số	Chữ/số, song song
Matrix Orbital	LCD4021	124x64	Cho quảng cáo	Chữ/số, nối tiếp
Matrix Orbital	LCD4021	240x64	Cho quảng cáo	Chữ/số, nối tiếp
Hanntronic		128x240	Cho quảng cáo	Đồ họa
Hanntronic		240x64	Cho quảng cáo	Đồ họa
Hanntronic		320x240	Cho quảng cáo	Đồ họa
Powertip	NCL	128x64	Cho quảng cáo	Đồ họa
Powertip	NCL	240x128	Cho quảng cáo	Đồ họa

Hình 5.5. Các loại màn hình tinh thể lỏng (LCD)

Cấu tạo của thanh LCD:

Cấu tạo của LCD gồm có 2 tấm kính đặt cách nhau khoảng $10\mu\text{m}$. Mặt phía trong của 2 tấm kính tráng một lớp oxit kẽm (ZnO) trong suốt làm hai điện cực. Xung quanh bên cạnh hai tấm kính được hàn kín, sau đó đổ tinh thể lỏng vào khoảng giữa 2 tấm kính và gắn kín lại. Hai tấm nhựa có tính phân cực ánh sáng được dán bên ngoài hai tấm kính sao cho hình ảnh phản chiếu của mặt chỉ thị được nhìn từ một phía nhờ gương phản chiếu.



Hình 5.6. Cấu tạo của một thanh LCD

Nguyên lý làm việc

Chế độ phản chiếu:

- Khi chưa có điện áp đặt vào, các thanh LCD không làm việc thì ánh sáng sẽ đi qua tấm nhựa phân cực thứ nhất, qua chất tinh thể lỏng, qua tấm nhựa phân cực thứ 2 đến gương phản chiếu và phản chiếu trở về phía người quan sát và thanh LCD không nhìn thấy - Mặt chỉ thị trong suốt.
- Khi có điện áp cung cấp cho thanh LCD, trục dài của các phân tử chất tinh thể lỏng được định hướng theo hướng của điện trường. Như vậy, ánh sáng đi qua tấm nhựa phân cực thứ nhất sẽ bị thay đổi do chất tinh thể đã hoạt hóa, do đó, ánh sáng không thể đi qua tấm phân cực thứ 2 để phản chiếu lại bằng gương phản chiếu. Như thế thanh tinh thể lỏng chịu tác động của điện trường sẽ bị tối đi.

Với 2 màng lọc phân cực 90^0 ta có nền của mặt chỉ thị trong suốt và những chữ, số, dấu hiệu tối đen. Đây là mặt chỉ thị hoạt động ở chế độ phản chiếu.

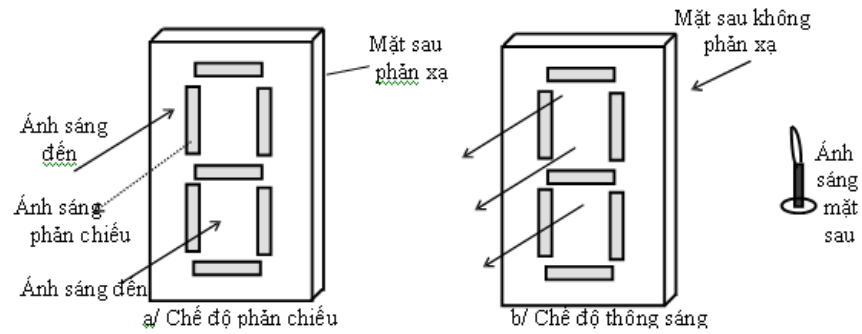
Nhược điểm của chế độ phản chiếu là mặt chỉ thị phải dựa vào một nguồn sáng từ bên ngoài. Nếu không có ánh sáng ngoài hay trong một phòng tối thì mặt chỉ thị sẽ không nhìn thấy.

Chế độ thông sáng:

- Nếu 2 màng lọc phân cực song song thì ta có mặt chỉ thị có nền tối và các chữ, số và dấu hiệu sẽ trong suốt. Loại này thích hợp với việc chiếu sáng từ phía sau mặt chỉ thị và ta gọi là chế độ thông sáng.

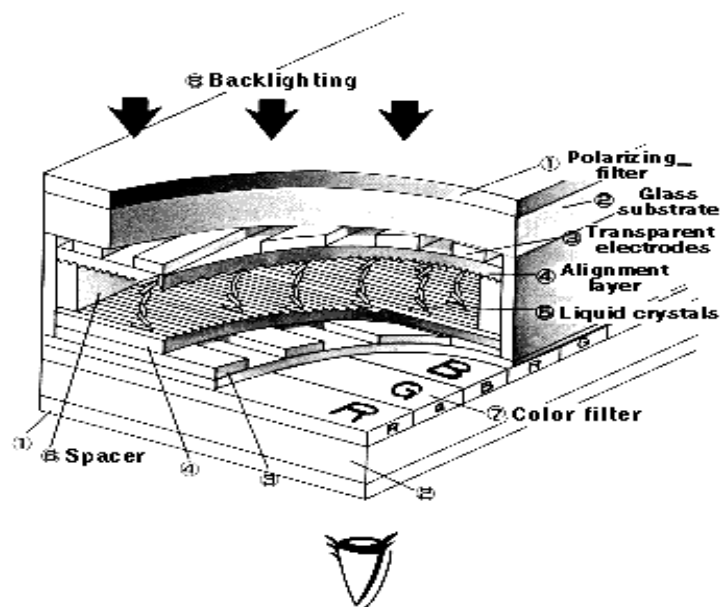
Ở chế độ này, ánh sáng đi qua các phân tử không hoạt hóa nhưng được đưa vào khuôn bằng các thanh hoạt hóa. Vì vậy chữ số đã chọn sẽ nhìn thấy. Để ánh sáng chiếu đều, cần có một tấm kính tán xạ đặt giữa LCD và nguồn sáng.

LCD này dùng điện áp xoay chiều từ 3V đến 8V, thời gian hiện số là 100 msec và thời gian tắt từ 200 msec đến 300 msec.



Hình 5.7. Chế độ làm việc của LCD

Cấu tạo LCD màu



Hình 5.8. Cấu tạo LCD màu

1. **Polarizing filter (Bộ lọc phân cực)** Điều khiển ánh sáng đi vào và thoát ra.
2. **Glass substrate (Hợp chất thủy tinh đặc biệt)** Lọc chặn điện từ các điện cực
3. **Transparent electrodes (Điện cực trong suốt)** Là các thanh dẫn điện trong suốt cho phép ánh sáng xuyên qua.
4. **Alignment layer (Sắp xếp lớp)** Là hai bề mặt có rãnh, ở giữa là các phân tử tinh thể lỏng, Các phân tử được sắp xếp theo hình xoắn ốc 90° .
5. **Liquid crystals (Các tinh thể lỏng).**
6. **Spacer (Khoảng trống)** Duy trì khoảng cách đều giữa các tấm kính.

7. **Color filter (Bộ lọc màu)** Màu được lọc và thể hiện khi dùng các bộ lọc R, G và B.
8. **Backlighting (Ánh sáng phía sau)** Ánh sáng được chiếu từ phía sau màn hình xuyên qua các lớp trên, ở màn hình điện thoại, người ta sử dụng ánh sáng chiếu từ xung quanh sau đó dùng lớp phản xạ để hướng ánh sáng chiếu thẳng góc với màn hình từ sau về phía trước.

Màu được hiển thị nhờ các bộ lọc màu dành cho mỗi thành phần hiển thị, trong hệ thống ma trận điểm, các điểm màu đỏ (R), xanh lá (G), xanh dương (B) nhận được do sử dụng các bộ lọc màu, ba màu cơ bản trên kết hợp lại cho ta một điểm ảnh, mỗi điểm màu sẽ cho một màu có cường độ sáng khác nhau, một điểm ảnh có thể cho vô số màu và là màu tổng hợp được từ ba màu cơ bản trên.

LCD với hiệu ứng trường

Màn ảnh LCD dùng cho máy tính và tivi được chế tạo với kỹ thuật màng mỏng transistor TFT – (thin film transistor) hay kỹ thuật cấu trúc hình sợi chỉ xoắn STN (super twisted nematic)

Với kỹ thuật STN, giữa hai tấm kính là một lớp mỏng chất lỏng hữu cơ đặc biệt có phân tử với kích thước khá dài. Chất lỏng này là tinh thể lỏng dùng để ngắt mở ánh sáng. Với lớp phủ trên hai tấm kính, người ta tạo những khe cực bé với kỹ thuật mài đặc biệt.

Các khe này chạy dọc theo cùng một hướng và được dùng để định hướng các phân tử tinh thể lỏng theo cách cơ học. Các phân tử tinh thể lỏng sắp xếp theo hướng các khe này. Vì những lực giữa các phân tử tác dụng lẫn nhau, các phân tử luôn định hướng theo phân tử kế bên. Sự định hướng này được bắt đầu và tiếp diễn từ các khe cực nhỏ trên tấm kính. Vì hướng của các khe tấm kính trên thẳng góc với hướng các khe của tấm kính dưới, do đó các phân tử bị cũng bức theo hai hướng này. Hướng của trục các phân tử theo từng lớp bị làm lệch tuần tự từ tấm kính này sang tấm kính kia. Bên ngoài hai tấm kính được phủ hai màng lọc phân cực chỉ cho ánh sáng xuyên qua theo một mặt phẳng định hướng. Vì định hướng của kính lọc phân cực trùng với hướng của các khe cho mỗi tấm kính, cho nên hai hướng của kính lọc phân cực xoay nhau một góc 90° . Vì rằng mặt phẳng của ánh sáng xuyên qua một kính lọc phân cực sẽ xoay theo hướng của các trục của các phân tử tinh thể lỏng, cho nên mặt phẳng dao động của ánh sáng cũng được xoay đi một góc 90° và như thế ánh sáng có thể xuyên qua kính lọc phân cực thứ hai. Ở trạng thái không có điện áp màn ảnh sẽ trong suốt và cho ánh sáng đi qua.

Dưới tác dụng của điện trường các phân tử tinh thể lỏng định hướng theo chiều điện trường – một đường thẳng. Khi mặt kính được phủ một lớp dẫn điện và được dùng như điện cực, khi có điện áp, các phân tử xoay đi và nằm theo trục thẳng góc với hai tấm kính.

Như thế mặt phẳng ánh sáng không bị xoay, hai kính lọc có chiều phân cực thẳng góc nhau sẽ không cho ánh sáng xuyên qua. Ở điểm nào trên hai tấm kính có sự chồng lấp hai điện cực, ở đây cho ta một điểm tối theo hình thù và độ lớn của sự chồng lấp của hai điện cực. Trong những màn ảnh LCD, điện cực là các phân đoạn hay những điểm của một ma trận. Cho màn ảnh LCD màu, trước mỗi điểm ảnh là một kính lọc màu. Ba điểm màu đỏ, xanh lá cây, xanh da trời tạo nên một điểm ảnh màu.

Như thế một màn ảnh LCD màu với cùng độ phân giải như màn ảnh một màu có số điểm Pixel nhiều gấp 3 lần.

Các màn ảnh LCD hiện nay đều cần được chiếu sáng từ phía sau bởi các đèn huỳnh quang, tấm dẫn quang, sợi dẫn quang bằng chất dẻo hay màng nhựa điện phát quang.

Để cho ánh sáng chiếu đều, cần có 1 tấm kính tán xạ đặt giữa LCD và nguồn sáng. Chỉ có khoảng 3% đến 5% ánh sáng đến mắt người xem. 50% ánh sáng bị hấp thụ bởi kính lọc phân cực và 30% bởi kính lọc màu. Hãng 3M đã chế tạo một màng nhựa. trên đây có hàng triệu lăng kính cực nhỏ đưa ánh sáng từ nguồn sáng chiếu thẳng góc với màn ảnh. Điều này rất quan trọng cho các thiết bị cầm tay cần tiết kiệm điện. Màn ảnh LCD nêu trên là loại thụ động STN. Nó được điều khiển bởi một ma trận hai chiều gồm các đường dẫn điện trong suốt. Ở các vị trí cắt nhau của các đường dẫn điện trên hai tấm kính cho ta một điểm ảnh. Ma trận được vận động theo phương pháp quét cho nên vận tốc chậm. Nếu hình ảnh thay đổi nhanh, những bóng hình ảnh sẽ được tạo ra. Để tránh những nhược điểm này, loại màn ảnh LCD tích cực TFT được phát triển. Mỗi điểm ảnh là một transistor riêng biệt trên một trong hai tấm kính được tạo nên với kỹ thuật màng mỏng. Với kỹ thuật này người ta đạt độ phân giải cao, hình ảnh có thể thay đổi nhanh hơn và với điện trường cao hơn cho ta hình ảnh có độ tương phản rõ nét hơn.

Với kỹ thuật TFT có hàng triệu transistor được hình thành trên tấm kính.

Một trong những nhược điểm của màn ảnh LCD là góc nhìn khá bé (15 đến 40 grad, vòng tròn = 400 grad = 360⁰). Với kỹ thuật IPS (in – Plane Switching – Mode) hay Super – TFT ta đạt góc nhìn đến 140 grad. Với kỹ thuật này 2 điện cực và transistor cho một điểm ảnh được chế tạo trên cùng một tấm kính. Điện trường được hình thành không ở giữa hai tấm kính mà giữa hai điện cực trên cùng một tấm kính. Nếu không có điện cực các phân tử nằm song song với các khe cực nhỏ trên mặt tấm kính. Sự xoay theo hình xoắn ốc của các phân tử trong tinh thể lỏng không được tạo ra theo phương pháp mới này. Vì màng lọc phân cực có định hướng 90⁰ cho nên khi không có điện áp điểm ảnh tối đi.

Khi có điện áp, các phân tử tinh thể lỏng vẫn nằm song song với mặt kính nhưng xoay đi một góc 90⁰ trong mặt phẳng nằm ngang vì điện trường

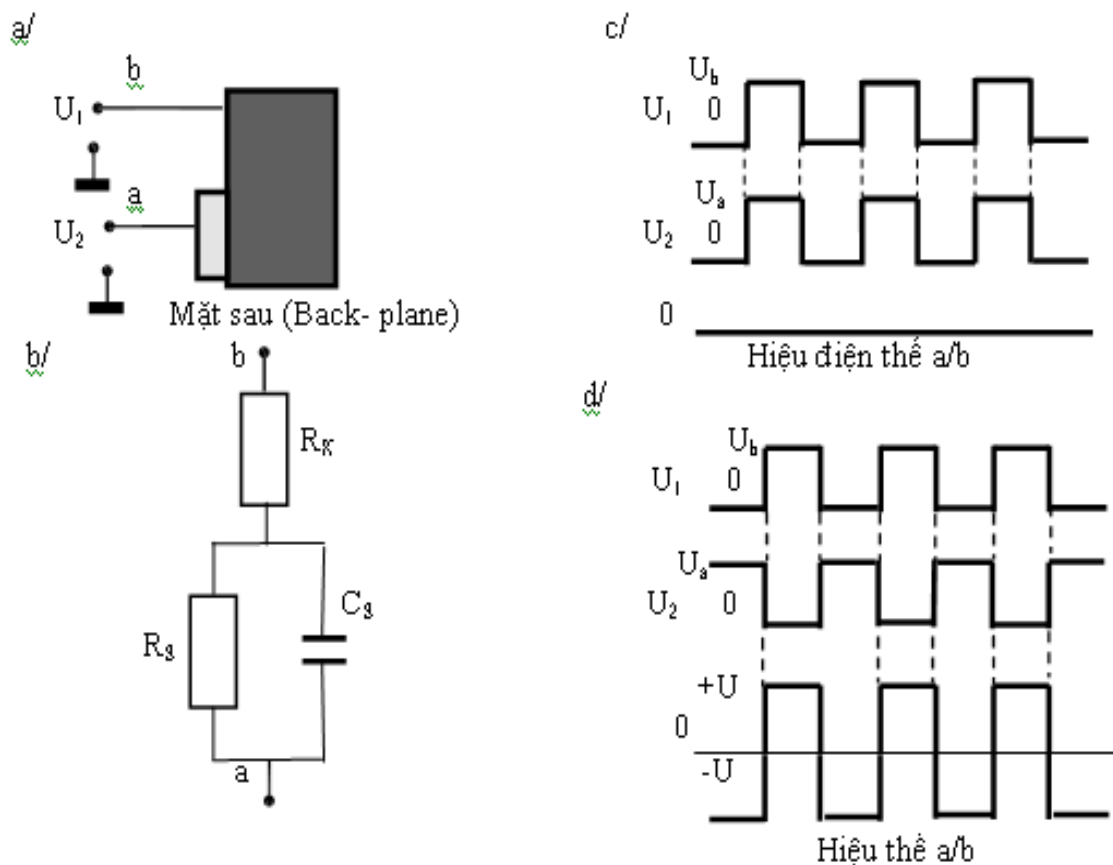
giữa hai điện cực nằm thẳng góc với các khe trên tấm kính. Điện trường càng lớn, sự xoay các phân tử càng mạnh và ánh sáng lọt qua càng nhiều.

5.2. Mạch điện điều khiển LCD

Phân đoạn tinh thể lỏng và mạch điện tương đương của nó được mô tả trong hình 8- 21a,b. Trong hình vẽ có

- a: là điện cực của một phân đoạn
- b: là điện cực chung.
- R_K : là điện trở của các vật liệu giữa nguồn điện và phân đoạn tinh thể lỏng (khoảng vài $K\Omega$).
- R_S : là điện trở của tinh thể lỏng (khoảng vài $M\Omega$)
- C_S : là điện dung giữa hai cực điện của một phân đoạn tinh thể lỏng. (khoảng từ $100pF \rightarrow 200pF$, $300pF$ cho LCD loại lớn).

Điện dung C_S không gây ảnh hưởng ở tần số làm việc từ 30 Hz đến 150 Hz, hoặc 200 Hz.



Hình 5.9. Mạch điện điều khiển LCD

a- Phân đoạn LCD với các chân điện cực.

b- Mạch điện tương đương của một phân đoạn LCD.

c- Hai điện cực a và b có điện áp cùng pha.

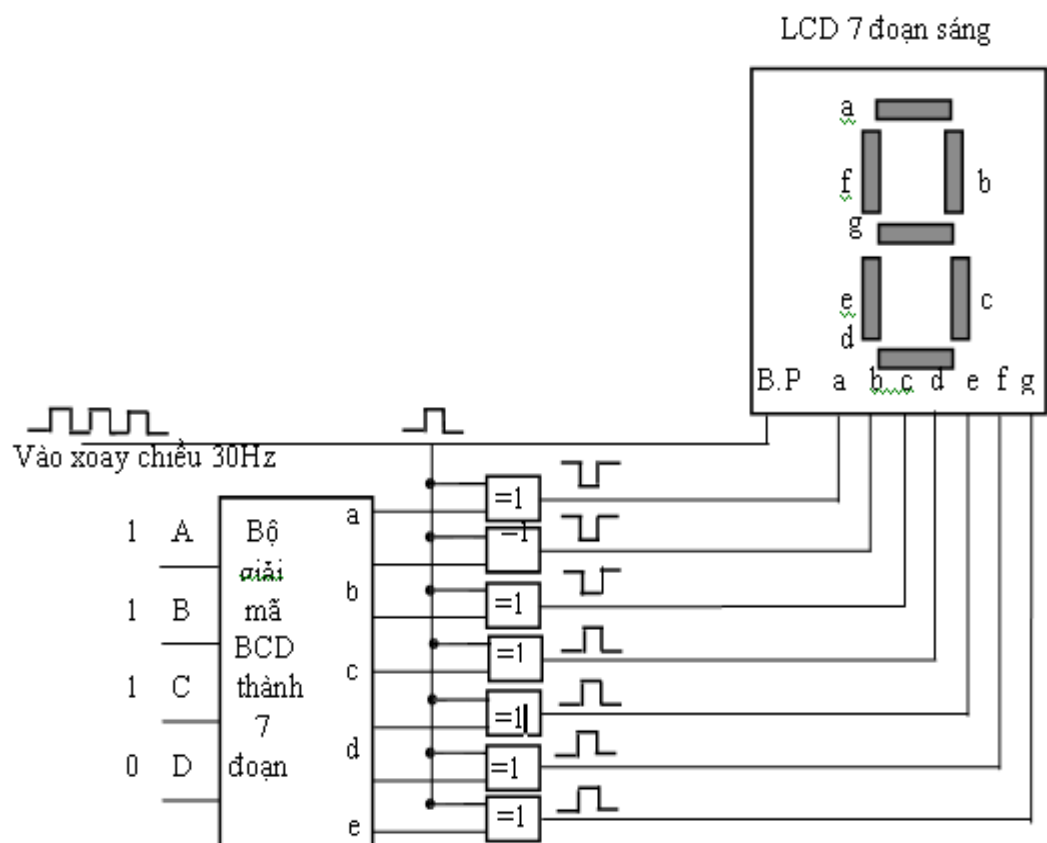
d- Hai điện cực a và b có điện áp ngược nhau.

Với các tần số < 30 Hz các chữ số bị chậm chạp; và với tần số > 100 Hz và với điện áp khá cao các phân đoạn không có điện áp cũng bị chậm chạp. Để hạn chế hiện tượng này, các phân đoạn không sử dụng phải nối với điện cực mặt sau (Back -plane).

Trong hình (c) cho ta thấy, khi điện áp trên hai điện cực a và b của phân đoạn LCD cùng pha thì hiệu thế của phân đoạn là 0V nên nó không có kích hoạt.

Trong hình (d) Khi hai điện cực a và b có điện áp ngược nhau thì hiệu thế giữa điện cực a và điện cực b là một điện áp xoay chiều với biên độ bằng $2U_b$ và phân đoạn LCD được kích thích hoạt động.

Như đã biết, để LCD làm việc ta cần một điện áp xoay chiều không có lần điện áp một chiều. Với điện áp một chiều lớn, màng điện cực trong suốt từ chất Indium/ oxit kẽm bị khử thành Indium/kẽm. Màng điện cực sẽ tối đi và LCD bị mù.



Hình 5.10. Hoạt động của LCD với bộ giải mã 7 đoạn sáng và cổng X-OR (CMOS).

LCD thông thường, yêu cầu điện áp một chiều lần vào phải < 100 mV; còn LCD màu yêu cầu điện áp một chiều lần vào phải < 50 mV. Do vậy, ta

nên dùng mạch điều khiển với IC họ CMOS sẽ cho ta một điện áp ít méo nhất. Vì LCD có công suất thấp nên dùng các cổng CMOS điều khiển là tốt nhất. Hình trên mô tả hoạt động của mặt chỉ thị LCD 7 đoạn với bộ giải mã BCD thành 7 đoạn.

Theo như hình trên, một phân đoạn trên mặt chỉ thị LCD sẽ trở nên đen nếu nó ngược pha với B.P.(điện cực Back plane); nó sẽ trở nên trong suốt nếu điện áp trên nó cùng pha với điện áp trên B.P.

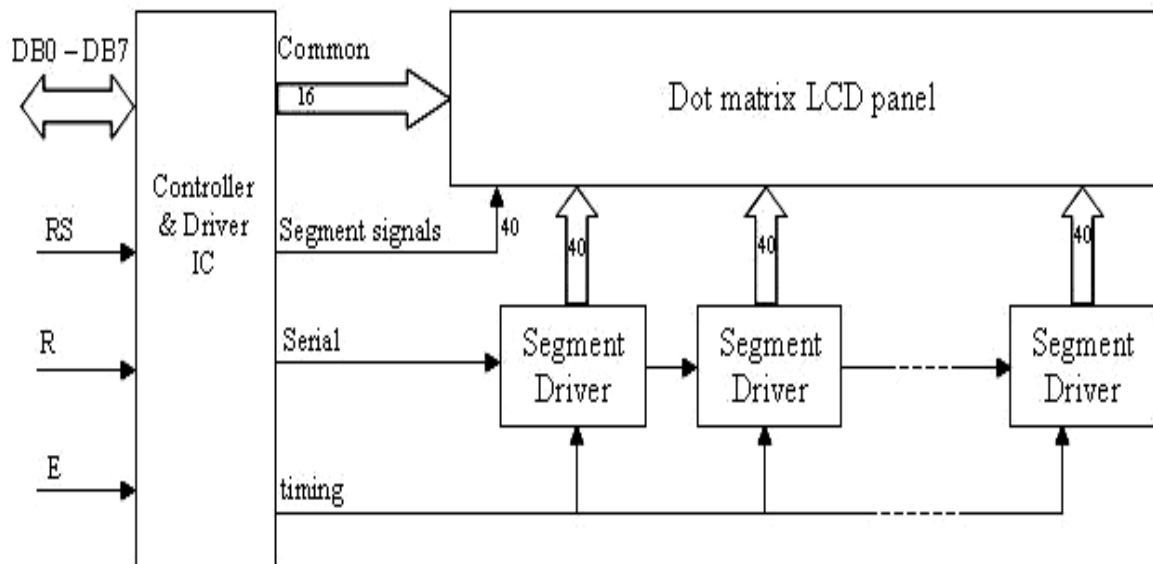
e. Các tham số chính của LCD:

Tham số	Đơn vị	min	Loại tiêu chuẩn	max
Khoảng nhiệt độ làm việc	°C	- 10		+60
Khoảng nhiệt độ dự trữ	°C	- 25		+70
Điện áp làm việc	V_{T8}	3	4,5	6
Thành phần dc	mV			100
Tần số điều khiển	Hz	30		200
Dòng tiêu thụ năng lượng	nA/mm^2		15	30
Thời gian lên	ms		40	
Thời gian tắt	ms		80	
Thời gian lên + thời gian tắt	ms			250

Hình 5.11. Bảng tham số của LCD.

- Thời gian lên: Thời gian lúc có tín hiệu đến khi LCD hiển thị
- Thời gian xuống: Thời gian từ lúc không còn tín hiệu đến khi LCD không còn hiển thị

Nguyên tắc điều khiển hiển thị LCD



Hình 5.12. Sơ đồ khối nguyên tắc điều khiển hiển thị LCD

Các LCD của các hãng khác nhau nhưng đều có một cấu trúc và tính năng thống nhất về hệ lệnh và cách lập trình

Sơ đồ khối

Trên hình ta thấy LCD có sơ đồ khối gồm

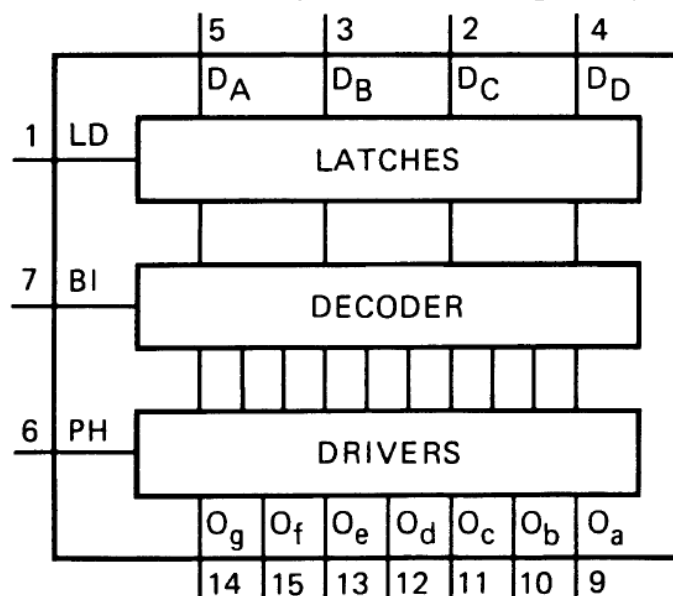
- Màn hình tinh thể lỏng ma trận điểm (dot matrix LCD panel).
- Vi mạch điều khiển (controller & driver IC).
- Các bộ điều khiển các đoạn (segment driver).

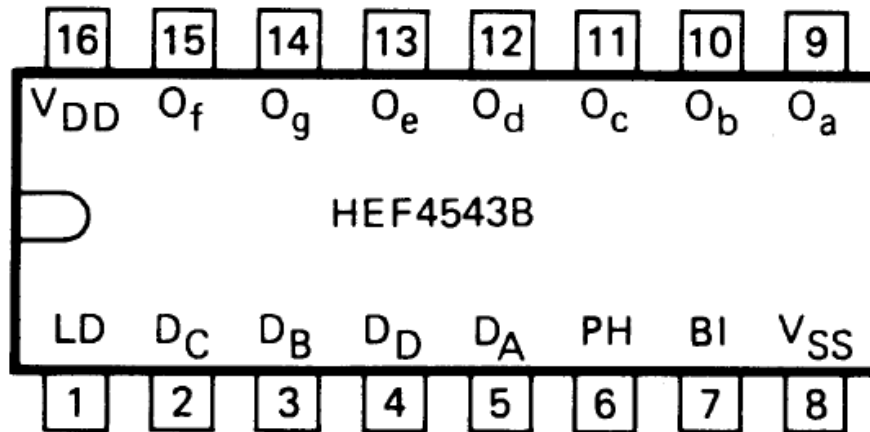
Segment driver dùng IC 4543

BCD to 7-segment latch/decoder/driver HEF4543B

DESCRIPTION

The HEF4543B is a BCD to 7-segment latch/decoder/driver for liquid crystal and LED displays. It has four address inputs (DA to DD), an active HIGH latch disable input (LD), an active HIGH blanking input (BI), an active HIGH phase input (PH) and seven buffered segment outputs (Oa to Og). The circuit provides the function of a 4-bit storage latch and an 8-4-2-1 BCD to 7-segment decoder/driver. It can invert the logic levels of the output combination. The phase (PH), blanking (BI) and latch disable (LD) inputs are used to reverse the function table phase, blank the display and store a BCD code, respectively. For liquid crystal displays a square-wave is applied to PH and the electrical common back-plane of the display. The outputs of the device are directly connected to the segments of the liquid crystal.





FUNCTION TABLE

Notes

1. H = HIGH state (the more positive voltage)
2. L = LOW state (the less positive voltage)
3. X = state is immaterial
4. For liquid crystal displays, apply a square-wave to PH.
For common cathode LED displays, select PH = LOW.
For common anode LED displays, select PH = HIGH.
5. Depends upon the BCD-code previously applied when LD = HIGH.

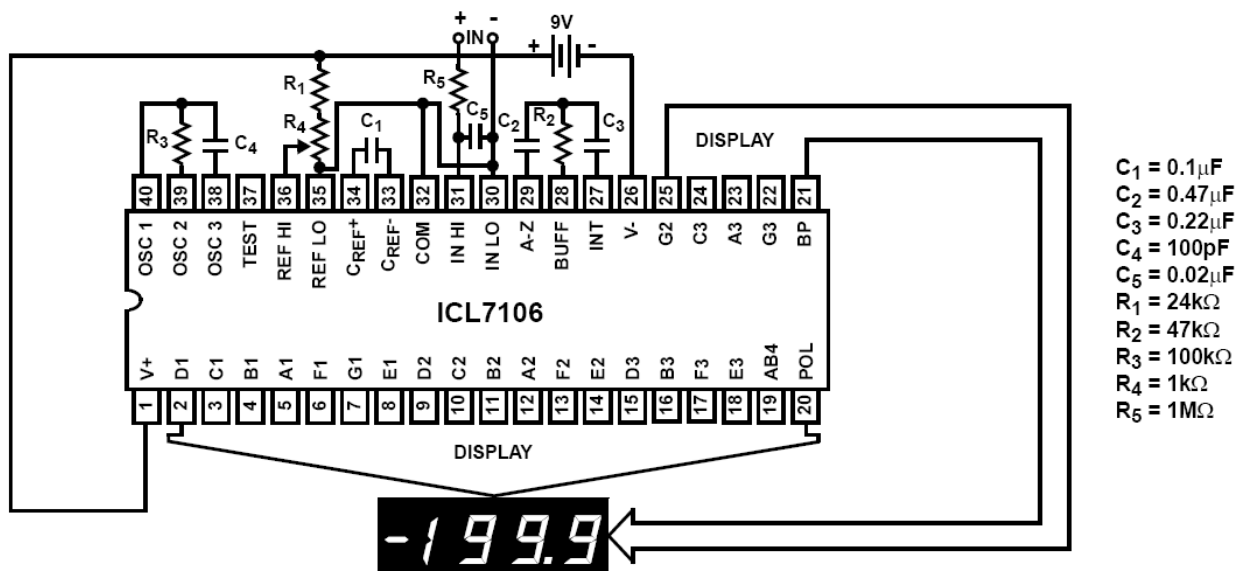
FUNCTION TABLE

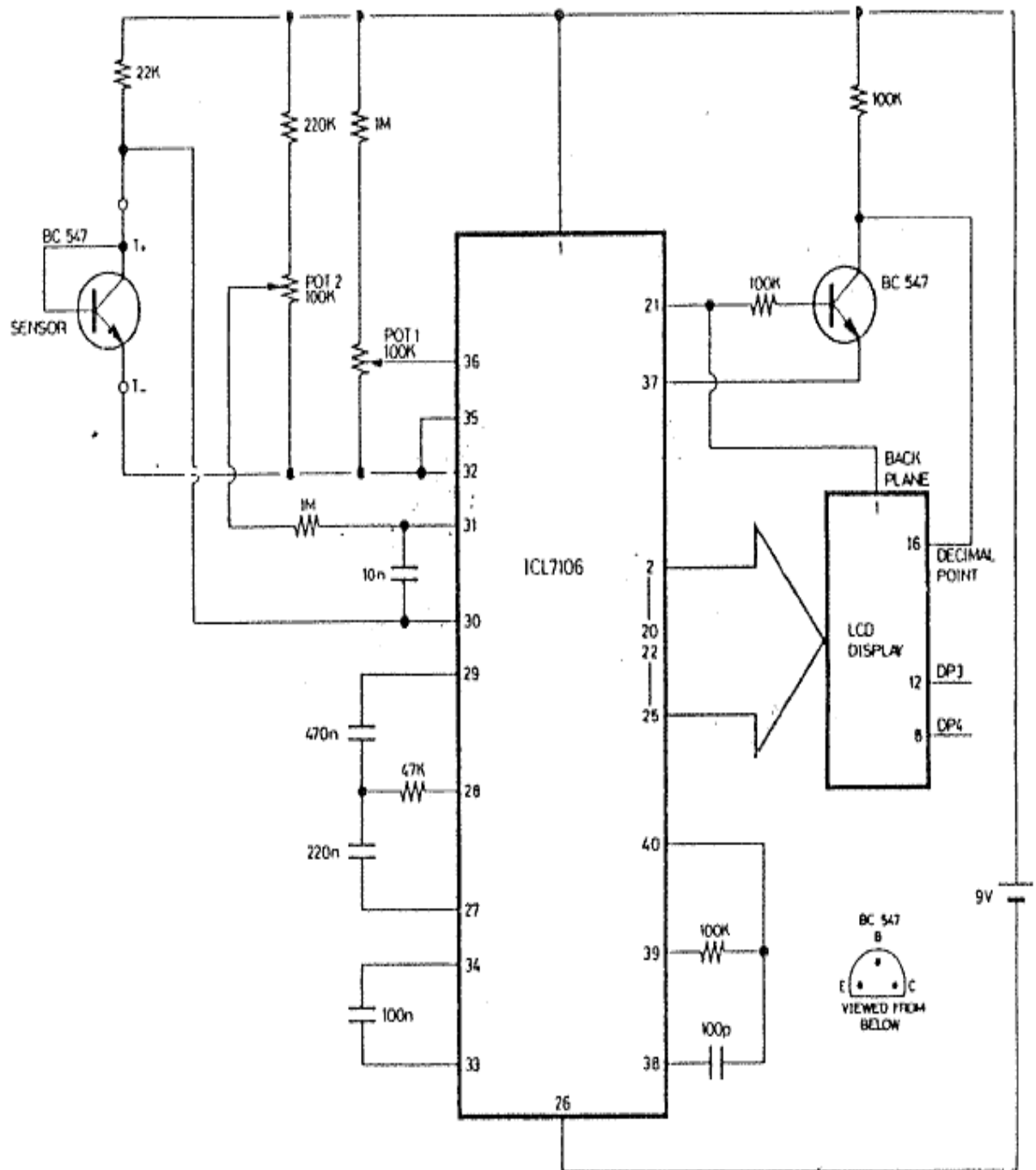
INPUTS							OUTPUTS							
LD	BI	PH ⁽⁴⁾	D _D	D _C	D _B	D _A	O _a	O _b	O _c	O _d	O _e	O _f	O _g	DISPLAY
X	H	L	X	X	X	X	L	L	L	L	L	L	L	blank
H	L	L	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	L	0
H	L	L	L	L	L	H	L	H	H	L	L	L	L	1
H	L	L	L	L	H	L	H	H	L	H	H	L	H	2
H	L	L	L	L	H	H	H	H	H	H	L	L	H	3
H	L	L	L	H	L	L	L	H	H	L	L	H	H	4
H	L	L	L	H	L	H	H	L	H	H	L	H	H	5
H	L	L	L	H	H	L	H	L	H	H	H	H	H	6
H	L	L	L	H	H	H	H	H	H	L	L	L	L	7
H	L	L	H	L	L	L	H	H	H	H	H	H	H	8
H	L	L	H	L	L	H	H	H	H	H	L	H	H	9
H	L	L	H	L	H	L	L	L	L	L	L	L	L	blank
H	L	L	H	L	H	H	L	L	L	L	L	L	L	blank
H	L	L	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	L	blank
H	L	L	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	L	blank
H	L	L	H	H	H	H	L	L	L	L	L	L	L	blank
L	L	L	X	X	X	X	(5)							(5)
as above		H	as above				inverse of above							as above

5.3. *Hiển thị số đo số liệu dạng tương tự dùng IC 7106*

ICL7106, ICL7107, ICL7107S
3 1/2 Digit, LCD/LED Display, A/D
Converters

The Intersil ICL7106 and ICL7107 are high performance, low power, 3 1/2 digit A/D converters. Included are seven segment decoders, display drivers, a reference, and a clock. The ICL7106 is designed to interface with a liquid crystal display (LCD) and includes a multiplexed backplane drive; the ICL7107 will directly drive an instrument size light emitting diode (LED) display. The ICL7106 and ICL7107 bring together a combination of high accuracy, versatility, and true economy. It features autozero to less than 10 μ V, zero drift of less than 1 μ V/oC, input bias current of 10pA (Max), and rollover error of less than one count. True differential inputs and reference are useful in all systems, but give the designer an uncommon advantage when measuring load cells, strain gauges and other bridge type transducers. Finally, the true economy of single power supply operation (ICL7106), enables a high performance panel meter to be built with the addition of only 10 passive components and a display.





Chương 6

LINH KIỆN CỦA HỆ THỐNG THÔNG TIN QUANG

6.1. Hệ thống truyền dẫn quang.

Sơ đồ khối của các hệ thống thông tin

Sơ đồ khối cơ bản nhất của hệ thống thông tin điện và quang được mô tả trên hình 8-1a,b. Trong hình :

Nguồn tín hiệu: là các dạng thông tin thông thường như tiếng nói, hình ảnh, số liệu, văn bản...

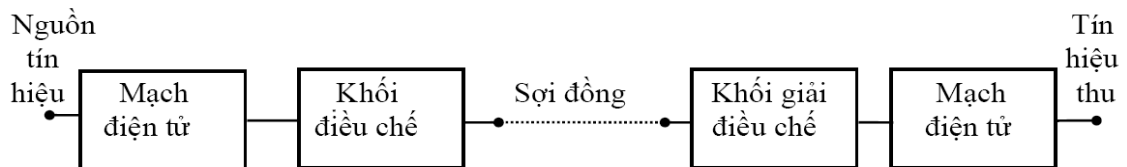
Mạch điện tử : có nhiệm vụ xử lý nguồn thông tin để tạo ra các tín hiệu điện dưới dạng analog hoặc digital.

Khối E/O: là mạch biến đổi điện - quang có nhiệm vụ điều biến tín hiệu điện thành cường độ bức xạ ánh sáng để phát đi (biến đổi tín hiệu điện thành tín hiệu quang).

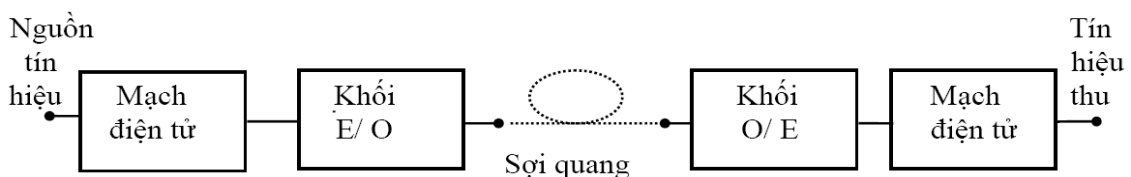
Sợi quang có nhiệm vụ truyền dẫn tín hiệu quang từ nơi phát đến nơi thu.

Khối O/E : mạch biến đổi quang - điện còn gọi là bộ thu quang có nhiệm vụ tiếp nhận ánh sáng từ sợi quang đưa đến và biến đổi trở lại thành tín hiệu điện như tín hiệu điện đã phát đi.

Tải tin : Trong hệ thống điện thì tải tin là các sóng điện từ cao tần, trong hệ thống quang tải tin là ánh sáng và cũng là sóng điện từ song có tần số rất cao ($10^{14} \div 10^{15}$ Hz) do vậy tải tin quang rất thuận lợi cho tải các tín hiệu băng rộng.



a. Hệ thống thông tin điện



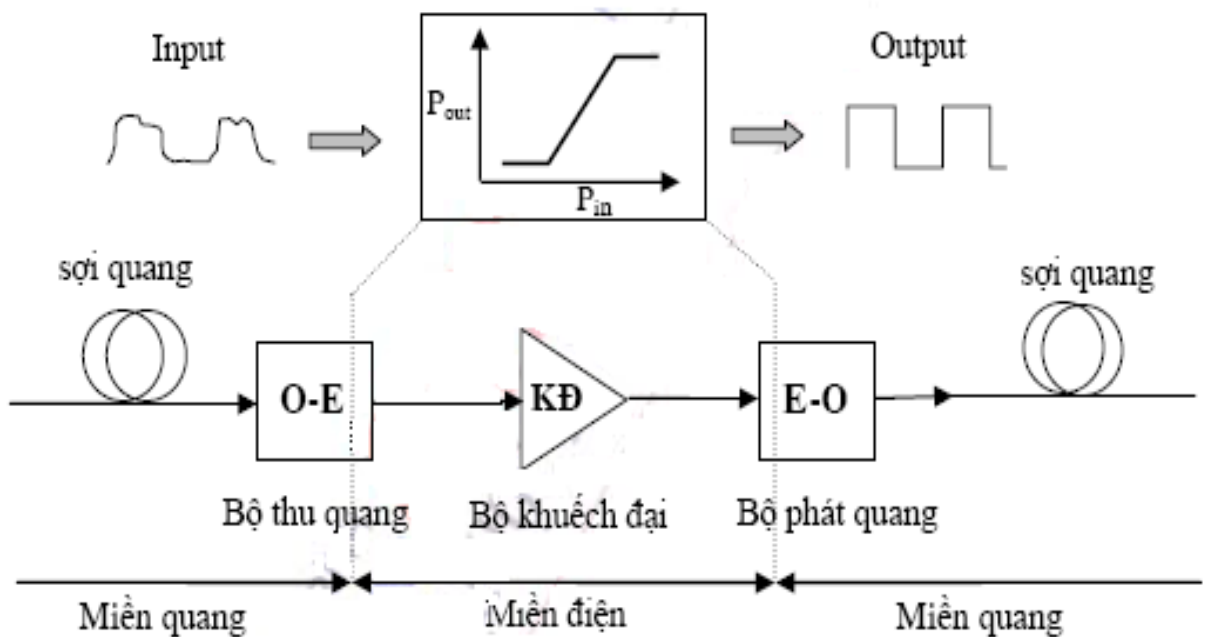
b. Hệ thống thông tin quang

Hình 6.1. Hệ thống truyền dẫn quang.

Trạm lặp quang điện (optoelectronic repeater)

Suy hao của sợi quang là nguyên nhân giới hạn cự ly truyền của các hệ thống thông tin quang. Đối với các hệ thống truyền dẫn quang cự ly dài, giới hạn về suy hao được khắc phục bằng cách sử dụng các trạm lặp quang điện (optoelectronic repeater). Trong các trạm lặp quang điện này (xem hình 1.1), quá trình khuếch đại tín hiệu quang được thực hiện qua nhiều bước. Đầu tiên, tín hiệu quang sẽ được biến đổi thành dòng điện bởi các bộ thu quang (optical receiver) sử dụng linh kiện tách sóng quang như PIN hay APD. Dòng quang điện thu được sẽ được tái tạo lại dạng xung, định thời và khuếch đại bởi các mạch phục hồi tín hiệu và mạch khuếch đại. Sau đó, tín hiệu điện sẽ được biến đổi thành tín hiệu quang thông qua các nguồn quang trong bộ phát quang (optical transmitter) và được truyền đi trong sợi quang.

Như vậy, quá trình khuếch đại tín hiệu được thực hiện trên miền điện.



Hình 6.2. Cấu trúc của một trạm lặp quang điện (optoelectronic repeater)

Các trạm lặp quang điện đã được sử dụng phổ biến trong các hệ thống truyền dẫn quang một bước sóng như hệ thống truyền dẫn quang SDH. Tuy nhiên, khi sử dụng cho các hệ thống truyền dẫn quang đa bước sóng như hệ thống WDM, rất nhiều trạm lặp quang điện cần được sử dụng để khuếch đại và tái tạo các kênh quang có bước sóng khác nhau. Điều này làm tăng độ phức tạp cũng như tăng giá thành của hệ thống truyền dẫn quang WDM.

Ưu điểm của hệ thống truyền dẫn quang

So với hệ thống thông tin điện, hệ thống thông tin quang có một số ưu điểm sau:

- + Sợi quang nhỏ, nhẹ hơn dây kim loại, dễ uốn cong, tốn ít vật liệu.
- + Sợi quang chế tạo từ thủy tinh thạch anh không bị ảnh hưởng của nước, axit, kiềm nên không bị ăn mòn. Đồng thời, sợi là chất điện môi nên cách điện hoàn toàn, tín hiệu truyền trong sợi quang không bị ảnh hưởng của nhiễu bên ngoài tới và cũng không gây nhiễu ra môi trường xung quanh.
- + Đảm bảo bí mật thông tin, không sợ bị nghe trộm.
- + Khả năng truyền được rất nhiều kênh trong một sợi quang có đường kính rất nhỏ. Tiêu hao nhỏ và không phụ thuộc tần số nên cho phép truyền dẫn băng rộng và tốc độ truyền lớn hơn nhiều so với sợi kim loại.
- + Giá thành rất rẻ.

8.2. Khái niệm về kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng -WDM.

Sự tương tác giữa ánh sáng và vật chất.

Như đã biết, theo lý thuyết dải năng lượng của vật chất, thì thông thường các hạt đều tồn tại ở mức cơ bản (E_k) vì mức này có năng lượng thấp nhất nên cũng bền vững nhất. Chỉ cần kích thích một năng lượng nào đó, ví dụ như quang năng, điện năng, nhiệt năng... thì các hạt ở mức cơ bản sẽ di chuyển lên mức năng lượng cao hơn, gọi là các mức kích thích (E_i). Các hạt chỉ tồn tại ở các mức kích thích một thời gian rất ngắn khoảng 10^{-8} giây rồi nó lại dịch chuyển về các mức năng lượng thấp hơn và phát ra ánh sáng, hay còn gọi là các photon. Photon phát ra theo định luật bảo toàn năng lượng:

$$h\nu = E_i - E_k$$

và ta có tần số bức xạ của ánh sáng tính theo công thức

$$\nu = \frac{E_i - E_k}{h}$$

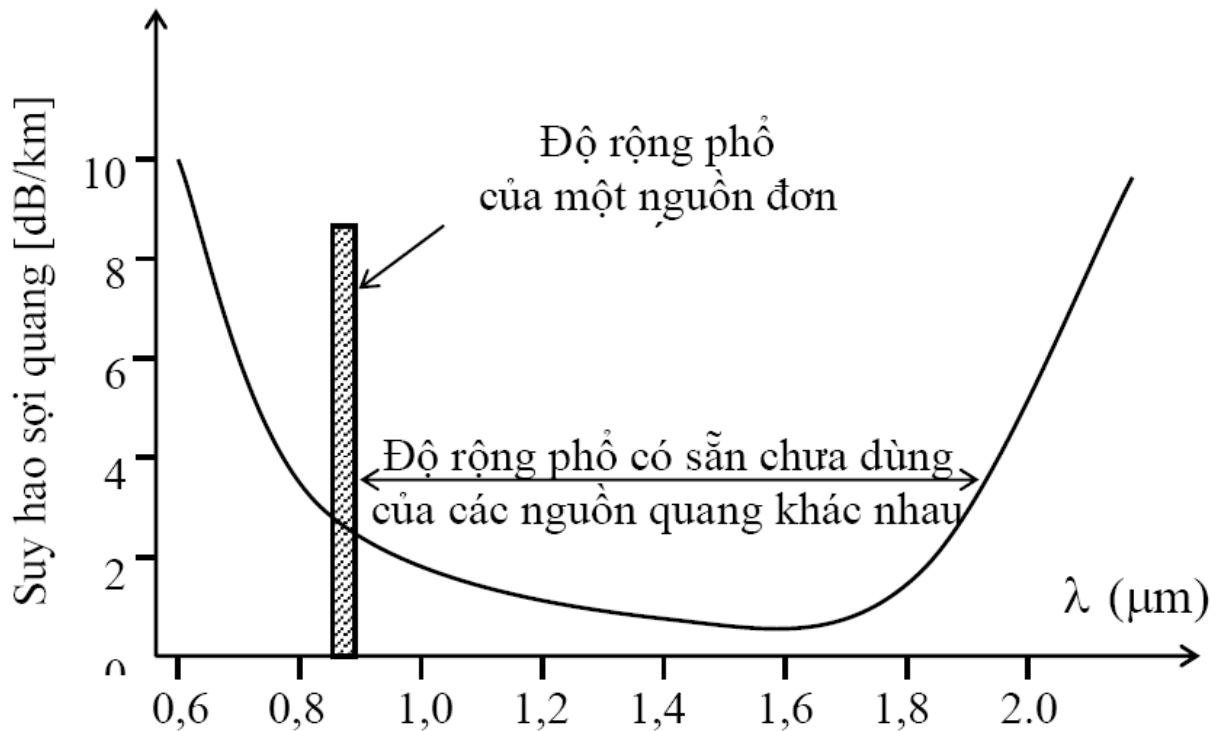
trong đó

- ν - tần số bức xạ của ánh sáng ($\nu = c/\lambda$).
- h - hằng số Plank ($h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{ J.s} = 4,16 \cdot 10^{-15} \text{ eV.s}$).
- c - vận tốc của ánh sáng ($c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$).
- λ - độ dài bước sóng của bức xạ ánh sáng phát ra.

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{c}{\frac{E_i - E_k}{h}} = \frac{1240}{(E_i - E_k)} \left[\frac{\text{eV.nm}}{\text{eV}} \right] = \frac{1240}{E_G} \left[\frac{\text{eV.nm}}{\text{eV}} \right]$$

Khái niệm về kỹ thuật thông tin quang WDM.

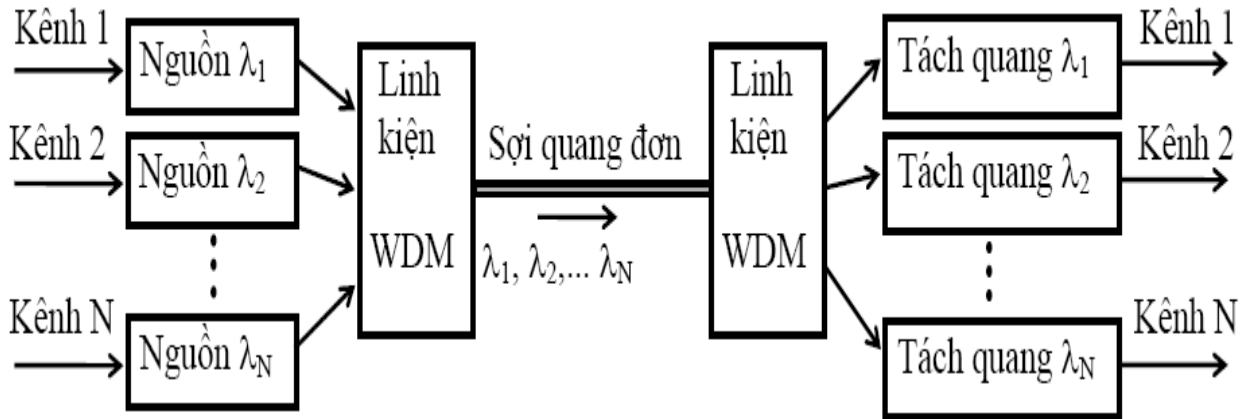
Bộ lọc quang liên quan đến kỹ thuật ghép kênh phân chia theo bước sóng -WDM. Vì mỗi một nguồn sáng đơn sắc có độ rộng phổ hẹp, nên trong truyền dẫn nó chỉ sử dụng một phần rất nhỏ băng truyền dẫn của một sợi quang. Ghép kênh phân chia theo bước sóng sẽ tạo ra rất nhiều kênh phổ sử dụng đồng thời.



Hình 6.3. Một nguồn quang đơn sử dụng một phần rất nhỏ băng truyền dẫn của phổ có sẵn của sợi quang ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM) tạo ra rất nhiều kênh phổ sử dụng đồng thời.

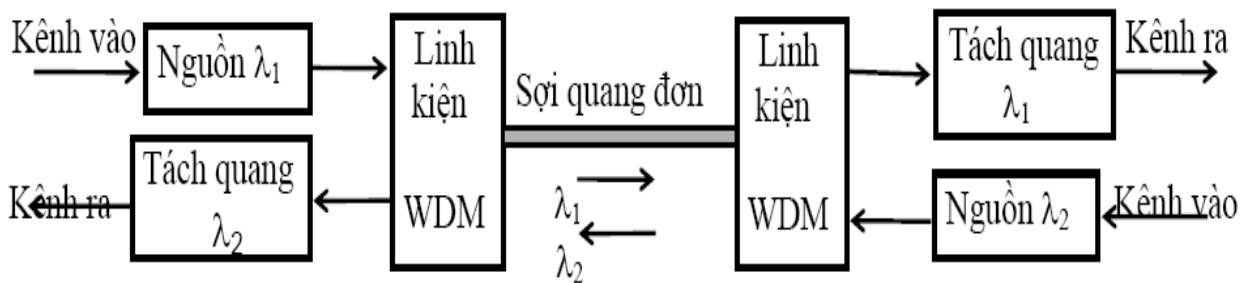
Ta thấy có rất nhiều vùng hoạt động phổ có thể thêm vào. Một cách lý tưởng, sự tăng đột biến dung lượng thông tin của một sợi quang có thể đạt được bằng việc truyền dẫn đồng thời các tín hiệu quang trên cùng một sợi quang từ nhiều nguồn ánh sáng khác nhau có các bước sóng đỉnh bức xạ đặt cách nhau một cách chính xác. Bởi mỗi nguồn sáng hoạt động tại một bước sóng đỉnh khác nhau, tính toàn vẹn của các tín tức độc lập từ mỗi nguồn được duy trì để việc chuyển đổi tuần tự sang tín hiệu điện ở đầu thu. Đây là cơ sở của ghép kênh phân chia theo bước sóng (WDM).

Hai cơ cấu WDM khác nhau mô tả trong hình sau.



Hình 6.4. Hệ thống WDM đơn hướng kết hợp N tín hiệu độc lập để truyền trên 1 sợi quang đơn.

Trong hình trên, linh kiện WDM đơn hướng được sử dụng để kết hợp các bước sóng mang tín hiệu khác nhau trên một sợi quang đơn tại một đầu và để tách chúng vào bộ tách quang thích hợp tại đầu kia.



Hình 6.5. Hệ thống WDM hai hướng, trong đó, hai bước sóng hoặc nhiều hơn được truyền đồng thời trong các hướng ngược nhau trên cùng một sợi quang.

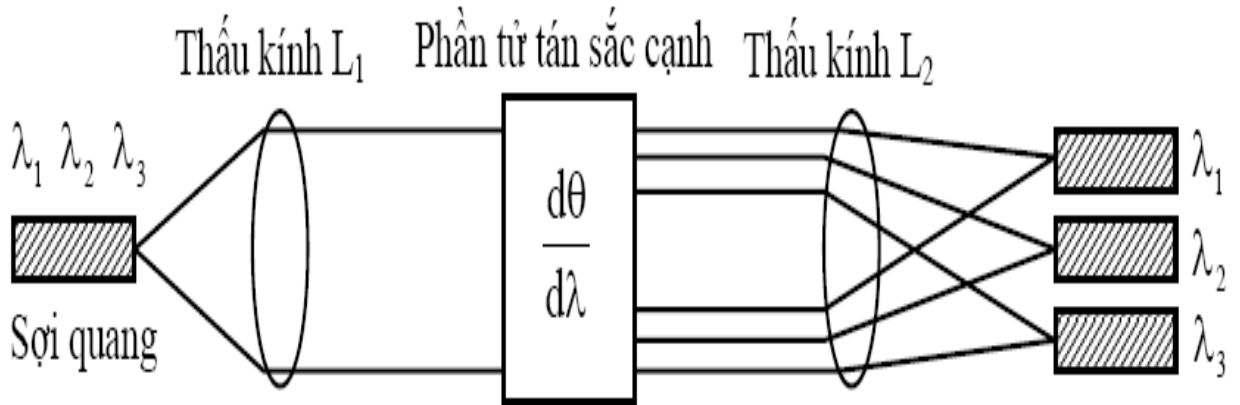
Sơ đồ hệ thống WDM hai hướng được mô tả trong hình trên.

Sơ đồ này gồm việc gửi tin tức trong một hướng tại một bước sóng λ_1 và đồng thời trong hướng ngược lại tại bước sóng λ_2 .

Trong các hệ thống thông tin quang trong hai hình trên, các bộ ghép kênh phân chia theo bước sóng có hai loại được sử dụng rộng rãi nhất là các linh kiện tán sắc cạnh như các lăng kính hoặc các cách tử, và các bộ lọc màng mỏng hoặc các linh kiện tích hợp quang đơn một.

Bộ lọc quang bằng các linh kiện tán sắc (hay bộ ghép kênh tán sắc cạnh).

Sơ đồ của một bộ ghép kênh tán sắc cạnh được mô tả trong hình 8- 51 đối với hệ thống 3 bước sóng sử dụng, ở đó $d\theta / d\lambda$ là độ tán sắc cạnh của linh kiện.



Hình 6.6. Sơ đồ biểu diễn một phần tử WDM tán sắc cạnh cho 3 bước sóng. Nhiều bước sóng có thể kết hợp hoặc phân chia với loại linh kiện này.

Khi linh kiện sử dụng như một bộ phận kênh, ánh sáng từ sợi quang đi ra được chuẩn trực bằng thấu kính L1 (gọi là thấu kính chuẩn trực) và đi qua phần tử tán sắc cạnh và nó được phân chia thành các kênh có bước sóng đi vào các chùm tia có định hướng không gian khác nhau. Thấu kính L2 (thấu kính hội tụ) sẽ hội tụ các tia đầu ra vào các sợi quang thu thích hợp hoặc các bộ tách quang thích hợp.

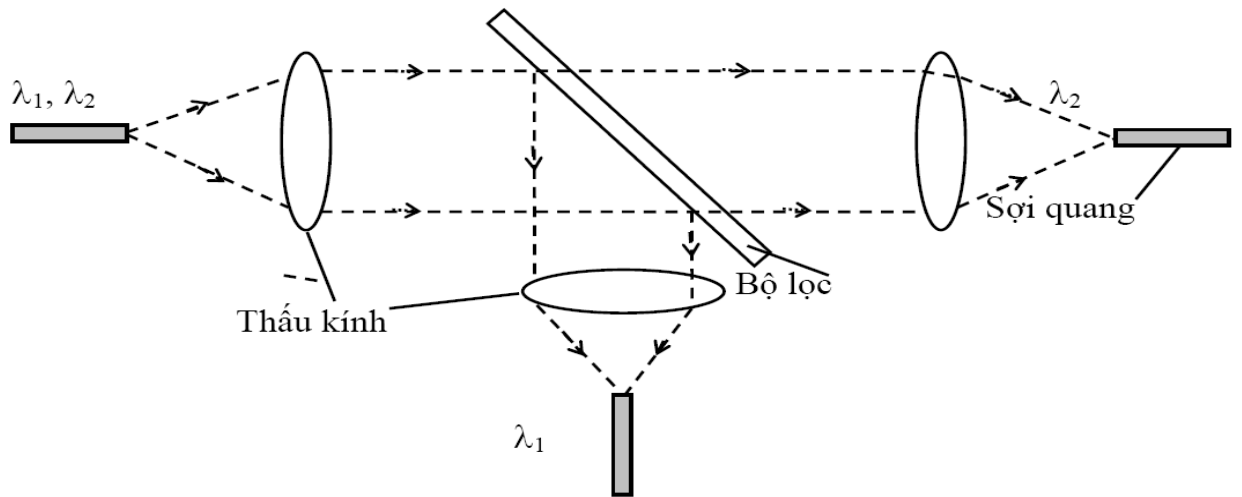
8.5.3. Bộ lọc quang màng mỏng .

Trong phần này chúng ta sẽ nghiên cứu về bộ lọc quang màng mỏng. Hoạt động của một phần tử ghép kênh loại bộ lọc được mô tả trong hình 8- 52 cho hoạt động của hai bước sóng.

Các bộ lọc được thiết kế để truyền ánh sáng cho một bước sóng cụ thể và để hoặc hấp thụ, hoặc phản xạ tất cả các bước sóng khác.

Các bộ lọc loại phản xạ thường được sử dụng vì tổn hao của các bộ lọc loại hấp thụ có xu hướng tăng cao hơn (cao hơn 1dB).

Bộ lọc phản xạ gồm một tấm kính phẳng, bên trên nó nhiều lớp màng mỏng chất cách điện khác nhau được lắng đọng tùy theo tính chọn lọc của bước sóng. Các bộ lọc này có thể sử dụng nối tiếp thành chuỗi để phân chia thêm các kênh bước sóng. Sự phức tạp cũng tăng theo số lượng các bộ lọc nối tiếp và sự tăng tổn hao tín hiệu cũng xảy ra với việc tăng thêm các bộ ghép kênh nối tiếp. Nhìn chung chỉ nên hạn chế hoạt động đến 2 hoặc 3 bộ lọc (có nghĩa là hoạt động 3 hoặc 4 kênh).

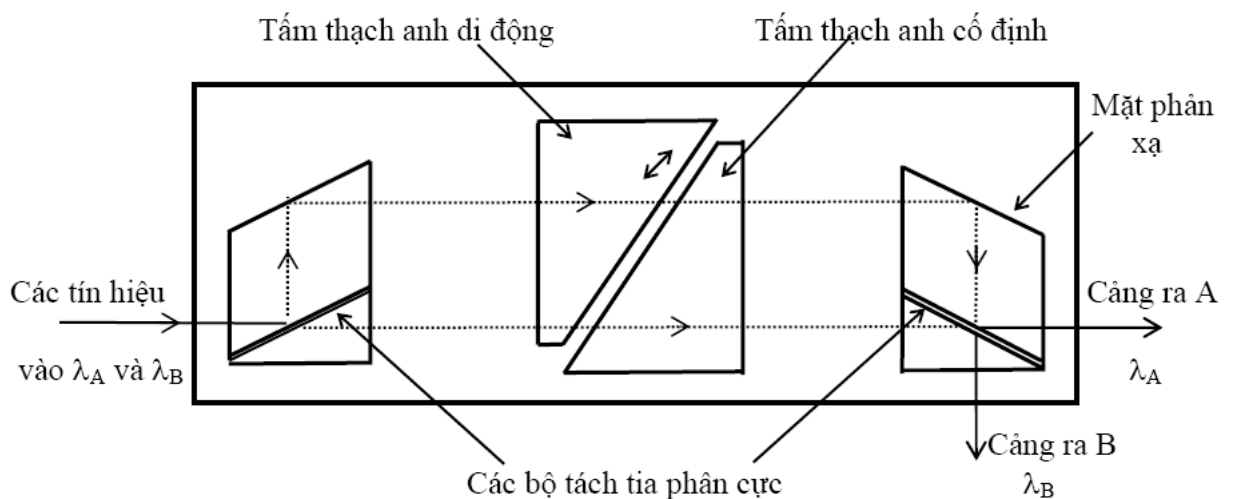


Hình 6.7. Bộ lọc màng mỏng nhiều lớp phản xạ sử dụng cho WDM.

Linh kiện này trong suốt tại bước sóng λ_2 và phản xạ tại bước sóng λ_1 .

Trong thiết kế các hệ thống WDM, cần phải chú ý làm giảm đến mức thấp nhất các yếu tố gây ra sự giảm sút phẩm chất ngoài biên của đường truyền. Trên đây là các linh kiện WDM thụ động, độ chọn lọc bước sóng của chúng được cố định. Người ta cũng phát minh ra các phần tử WDM tích cực, các phần tử này được chuyển một cách tích cực hoặc được điều chỉnh theo bước sóng. Giữa các phần tử WDM tích cực là nguồn đa bước sóng và các tổ hợp tách quang, các laser có khả năng điều chỉnh bước sóng, và các bộ lọc có thể điều chỉnh bước sóng.

Bộ lọc có thể điều chỉnh bước sóng (a wavelength-tunable-filter).



Hình 6.8. Ví dụ về bộ lọc điều chỉnh bước sóng. Một tấm thạch anh di động thay đổi độ dài tuyến đường đi qua tinh thể để thay đổi phổ ra hình sin.

Trong phương pháp này, các tín hiệu tin tức khác nhau được gửi vào các kênh tần số riêng của độ rộng băng B. Bằng việc sử dụng một bộ lọc với

dải thông có độ rộng B mà nó có thể điều chỉnh trên khoảng tần số của các kênh này, người ta có thể chọn được kênh theo yêu cầu.

Ở đây, một phần tử đa cấp lưỡng chiết suất cấu tạo từ hai ống dẫn sóng bằng thạch anh (a birefringent multiple - order element) được đặt giữa hai bộ tách tia phân cực (polarizing beam splitters).

Công suất ra P của ánh sáng tại các cổng ra A và B liên hệ với công suất vào P₀ bằng công thức

$$P = \frac{P_0}{2} \left(1 \pm \cos \frac{2\pi\Delta n L}{\lambda} \right)$$

Trong đó:

- Δn : độ chênh lệch giữa chiết suất thông thường và chiết suất khác thường của vật liệu lưỡng chiết.

- λ : độ dài bước sóng.

- dấu \pm liên quan đến các cổng A (dấu +) và cổng B (dấu -).

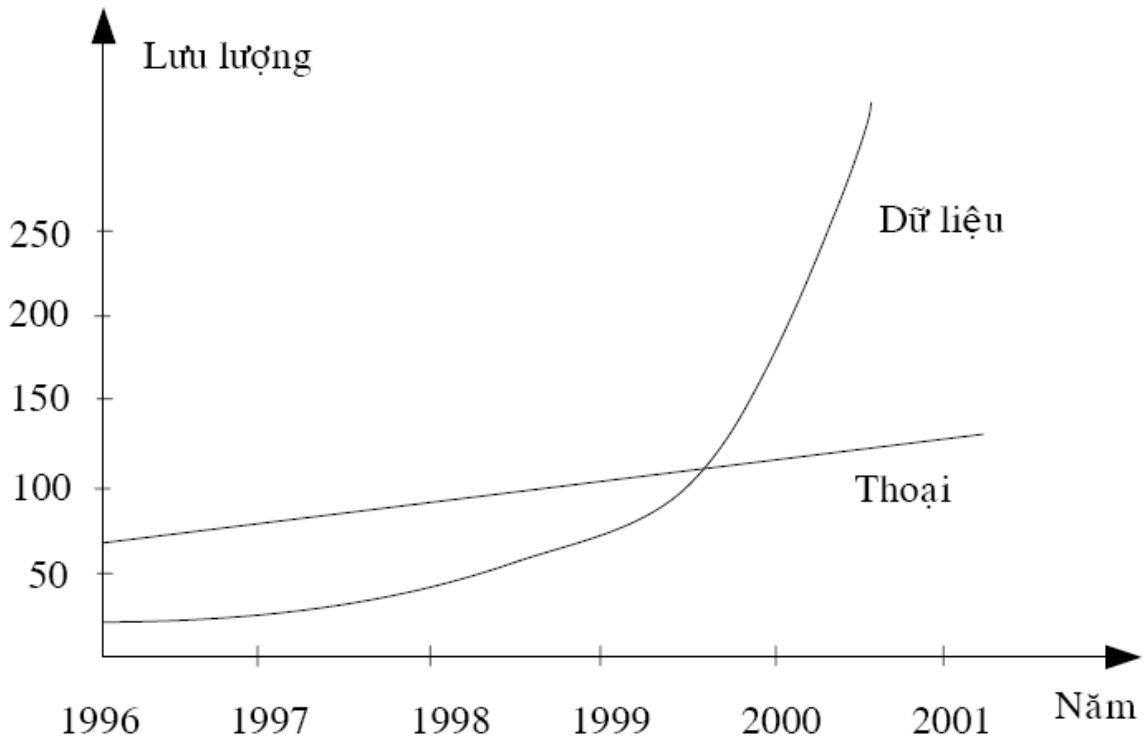
Sự biến đổi hình sin của phổ ra có thể được thay đổi bằng cách thay đổi độ dài đường truyền L đi qua tinh thể. Điều này đạt được bằng cách di chuyển một trong các tấm thạch anh lên trên hoặc xuống dưới. Sự thay đổi chiều dài theo cấp bậc chu kỳ quay phân cực sẽ xác định vị trí của kênh.

Vì tuyến quang là thuận nghịch, linh kiện này có thể được sử dụng như là bộ ghép kênh và hoặc như là bộ phân kênh đều được.

6.3. Nguyên lý ghép kênh theo bước sóng quang (WDM)

6.3.1. Giới thiệu chung

Sự phát triển nhanh chóng của các mô hình truyền số liệu, đặc biệt là Internet đã làm bùng nổ nhu cầu tăng băng thông. Trong bối cảnh IP (Internet Protocol) đang nổi lên như là nền tảng chung của mọi loại hình dịch vụ trong tương lai, các nhà cung cấp dịch vụ truyền dẫn bắt buộc phải xem xét lại phương thức truyền dẫn TDM truyền thống, vốn tối ưu cho truyền thoại nhưng lại kém hiệu quả trong việc tận dụng băng thông.



Hình 6.9. Tương quan giữa nhu cầu truyền thoại và truyền số liệu

Tóm lại, ta phải giải quyết bài toán tăng băng thông cho viễn thông tương lai. Các nhà cung cấp dịch vụ truyền dẫn bắt đầu xét đến ba phương thức truyền dẫn sau:

1. Truyền dẫn ghép phân không gian SDM (Space Division Multiplexing): đơn giản và không cần sự phát triển công nghệ, chỉ đơn thuần là tăng số lượng sợi quang, tốc độ truyền dẫn vẫn giữ nguyên. Ta có thể chọn SDM nếu trên tuyến truyền dẫn cần tăng băng thông đã có sẵn số lượng sợi quang chưa dùng và khoảng cách tuyến truyền dẫn là đủ ngắn để không cần dùng các bộ lặp, bộ khuếch đại. Nếu khoảng cách là xa, khi đó chi phí sẽ vụt tăng do mỗi hệ thống lắp thêm đều cần một số lượng bộ lặp, bộ khuếch đại... như hệ thống cũ.

2. Truyền dẫn ghép phân theo thời gian TDM (Time Division Multiplexing):

Tăng tốc độ truyền dẫn lên trên sợi quang. Khi tiếp tục dùng phương thức truyền thống này, ta phải xem xét đến hai vấn đề:

Trước và khi truyền trên sợi quang. Trước khi chuyển thành tín hiệu quang để truyền đi, các linh kiện điện tử có khả năng xử lý với tốc độ bit tối đa là bao nhiêu?

Thực tế hiện nay cho thấy, ở đa số các mạng truyền dẫn, linh kiện điện tử có khả năng đáp ứng tốt đối với các dòng tín hiệu ở tốc độ 2.5 Gbps hoặc 10 Gbps. Như vậy thì chưa giải quyết trọn vẹn bài toán tăng băng thông.

Trong phòng thí nghiệm đã cho các linh kiện hoạt động ở tốc độ 40 Gbps hoặc 80 Gbps. Để TDM có thể đạt được những tốc độ cao hơn, các phương pháp thực hiện tách/ghép kênh trong miền quang, được gọi là phân kênh thời gian trong miền quang (Optical time Division Multiplexing - OTDM) đang được tích cực triển khai.

Các kết quả nghiên cứu trong phòng thí nghiệm cho thấy OTDM có thể ghép được các luồng 10Gbit/s thành luồng 250Gbit/s. Nhưng khi đó, truyền trên sợi quang sẽ vấp phải các vấn đề nghiêm trọng ảnh hưởng đến chất lượng truyền dẫn: tán sắc sắc thể, tán sắc phân cực, phi tuyến tính.

3. Ghép phân theo bước sóng WDM (Wavelength Division Multiplexing)

Ghép thêm nhiều bước sóng để có thể truyền trên một sợi quang, không cần tăng tốc độ truyền dẫn trên một bước sóng. Công nghệ WDM có thể mang đến giải pháp hoàn thiện nhất trong điều kiện công nghệ hiện tại.

Thứ nhất nó vẫn giữ tốc độ xử lý của các linh kiện điện tử ở mức 10 Gbps, bảo đảm thích hợp với sợi quang hiện tại. Thay vào đó, công nghệ WDM tăng băng thông bằng cách tận dụng cửa sổ làm việc của sợi quang trong khoảng bước sóng 1260 nm đến 1675 nm. Khoảng bước sóng này được chia làm nhiều băng sóng hoạt động như minh họa trên bảng 1.1.

Thoạt tiên, hệ thống WDM hoạt động ở băng C (do EDFA hoạt động trong khoảng băng sóng này). Về sau, EDFA có khả năng hoạt động ở cả băng C và băng L nên hệ thống WDM hiện tại dùng EDFA có thể hoạt động ở cả băng C và băng L.

Nếu theo chuẩn ITU-T, xét khoảng cách giữa các kênh bước sóng là 100 Ghz (đảm bảo khả năng chống xuyên nhiễu kênh trong điều kiện công nghệ hiện tại), sẽ có 32 kênh bước sóng hoạt động trên mỗi băng. Như vậy, nếu vẫn giữ nguyên tốc độ bit trên mỗi kênh truyền, dùng công nghệ WDM cũng đủ làm tăng băng thông truyền trên một sợi quang lên 64 lần

Bảng 1.1 Sự phân chia các băng sóng

Băng sóng	Mô tả	Phạm vi bước sóng (nm)
Băng O	Original	1260 đến 1360
Băng E	Extended	1360 đến 1460
Băng S	Short	1460 đến 1530
Băng C	Conventional	1530 đến 1565
Băng L	Long	1565 đến 1625
Băng U	Ultra-long	1625 đến 1675

6.3.2. Sơ đồ khối tổng quát

a) Định nghĩa

Ghép kênh theo bước sóng WDM (Wavelength Division Multiplexing) là công nghệ “trong một sợi quang đồng thời truyền dẫn nhiều bước sóng tín hiệu quang”. Ở đầu phát, nhiều tín hiệu quang có bước sóng khác nhau được tổ hợp lại (ghép kênh) để truyền đi trên một sợi quang. Ở đầu thu, tín hiệu tổ hợp đó được phân giải ra (tách kênh), khôi phục lại tín hiệu gốc rồi đưa vào các đầu cuối khác nhau.

b) Sơ đồ chức năng

Để đảm bảo việc truyền nhận nhiều bước sóng trên một sợi quang, hệ thống WDM phải thực hiện các chức năng sau:

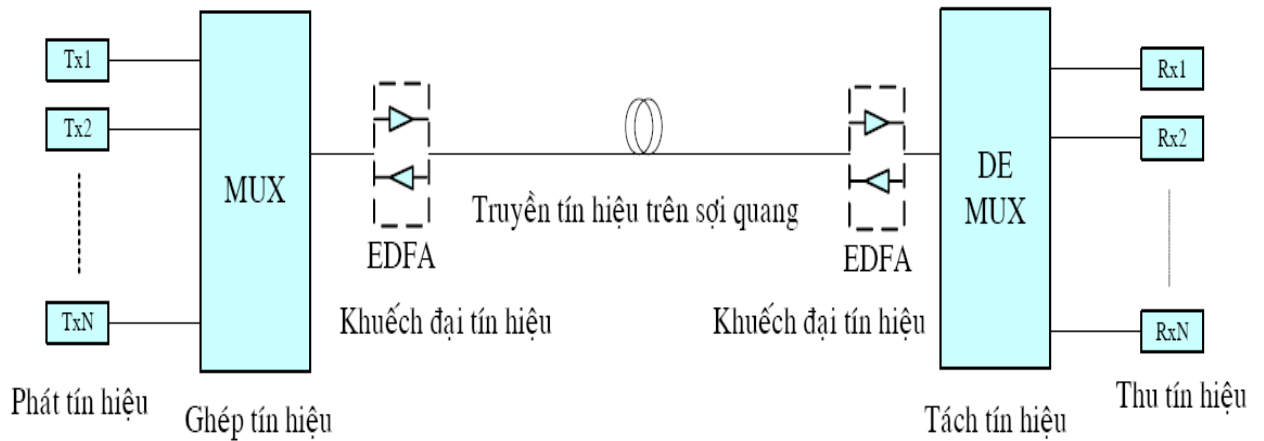
Phát tín hiệu

Trong hệ thống WDM, nguồn phát quang được dùng là laser. Hiện tại đã có một số loại nguồn phát như: Laser điều chỉnh được bước sóng (Tunable Laser), Laser đa bước sóng (Multiwavelength Laser)... Yêu cầu đối với nguồn phát laser là phải có độ rộng phổ hẹp, bước sóng phát ra ổn định, mức công suất phát đỉnh, bước sóng trung tâm, độ rộng phổ.

Ghép/tách tín hiệu

Ghép tín hiệu WDM là sự kết hợp một số nguồn sáng khác nhau thành một luồng tín hiệu ánh sáng tổng hợp để truyền dẫn qua sợi quang. Tách tín hiệu WDM là sự phân chia luồng ánh sáng tổng hợp đó thành các tín hiệu ánh sáng riêng rẽ tại mỗi cổng đầu ra bộ tách. Hiện tại đã có các bộ tách/ghép tín hiệu WDM như: bộ lọc màng mỏng điện môi, cách tử Bragg sợi, cách tử nhiễu xạ, linh kiện quang tổ hợp AWG, bộ lọc Fabry-Perot...

Khi xét đến các bộ tách/ghép WDM, ta phải xét các tham số như: khoảng cách giữa các kênh, độ rộng băng tần của các kênh bước sóng, bước sóng trung tâm của kênh, mức xuyên âm giữa các kênh, tính đồng đều của kênh, suy hao xen, suy hao phản xạ Bragg, xuyên âm đầu gần đầu xa...



Hình 6.10. Sơ đồ chức năng hệ thống WDM

Truyền dẫn tín hiệu

Quá trình truyền dẫn tín hiệu trong sợi quang chịu sự ảnh hưởng của nhiều yếu tố: suy hao sợi quang, tán sắc, các hiệu ứng phi tuyến, vấn đề liên quan đến khuếch đại tín hiệu ... Mỗi vấn đề kể trên đều phụ thuộc rất nhiều vào yếu tố sợi quang (loại sợi quang, chất lượng sợi...)

Khuếch đại tín hiệu

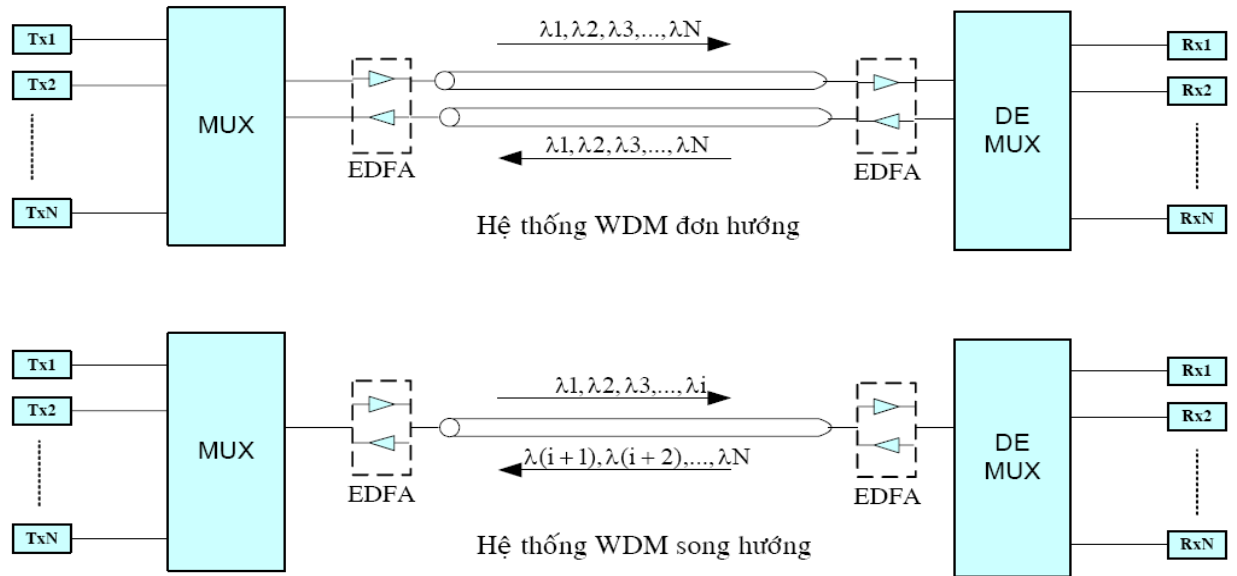
Hệ thống WDM hiện tại chủ yếu sử dụng bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium (EDFA). Tuy nhiên bộ khuếch đại Raman hiện nay cũng đã được sử dụng trên thực tế. Có ba chế độ khuếch đại: khuếch đại công suất, khuếch đại đường và tiền khuếch đại. Khi dùng bộ khuếch đại EDFA cho hệ thống WDM phải đảm bảo các yêu cầu sau:

- Độ lợi khuếch đại đồng đều đối với tất cả các kênh bước sóng (mức chênh lệch không quá 1 dB).
- Sự thay đổi số lượng kênh bước sóng làm việc không được gây ảnh hưởng đến mức công suất đầu ra của các kênh.
- Có khả năng phát hiện sự chênh lệch mức công suất đầu vào để điều chỉnh lại các hệ số khuếch đại nhằm đảm bảo đặc tuyến khuếch đại là bằng phẳng đối với tất cả các kênh.

Thu tín hiệu

Thu tín hiệu trong các hệ thống WDM cũng sử dụng các bộ tách sóng quang như trong hệ thống thông tin quang thông thường: PIN, APD.

c) Phân loại hệ thống WDM



Hình 6.11. Hệ thống ghép bước sóng đơn hướng và song hướng

Hệ thống WDM về cơ bản chia làm hai loại: hệ thống đơn hướng và song hướng như minh họa trên hình trên. Hệ thống đơn hướng chỉ truyền theo một chiều trên sợi quang. Do vậy, để truyền thông tin giữa hai điểm cần hai sợi quang. Hệ thống WDM song hướng, ngược lại, truyền hai chiều trên một sợi quang nên chỉ cần 1 sợi quang để có thể trao đổi thông tin giữa 2 điểm.

Cả hai hệ thống đều có những ưu nhược điểm riêng. Giả sử rằng công nghệ hiện tại chỉ cho phép truyền N bước sóng trên một sợi quang, so sánh hai hệ thống ta thấy:

Xét về dung lượng, hệ thống đơn hướng có khả năng cung cấp dung lượng cao gấp đôi so với hệ thống song hướng. Ngược lại, số sợi quang cần dùng gấp đôi so với hệ thống song hướng.

Khi sự cố đứt cáp xảy ra, hệ thống song hướng không cần đến cơ chế chuyển mạch bảo vệ tự động APS (Automatic Protection-Switching) vì cả hai đầu của liên kết đều có khả năng nhận biết sự cố một cách tức thời.

Đứng về khía cạnh thiết kế mạng, hệ thống song hướng khó thiết kế hơn vì còn phải xét thêm các yếu tố như: vấn đề xuyên nhiễu do có nhiều bước sóng hơn trên một sợi quang, đảm bảo định tuyến và phân bố bước sóng sao cho hai chiều trên sợi quang không dùng chung một bước sóng.

Các bộ khuếch đại trong hệ thống song hướng thường có cấu trúc phức tạp hơn trong hệ thống đơn hướng. Tuy nhiên, do số bước sóng khuếch đại trong hệ thống song hướng giảm $\frac{1}{2}$ theo mỗi chiều nên ở hệ thống song hướng, các bộ khuếch đại sẽ cho công suất quang ngõ ra lớn hơn so với ở hệ thống đơn hướng.

6.3.3. Đặc điểm của hệ thống WDM

Thực tế nghiên cứu và triển khai WDM đã rút ra được những ưu nhược điểm của công nghệ WDM như sau:

Ưu điểm của công nghệ WDM

- Tăng băng thông truyền trên sợi quang số lần tương ứng số bước sóng được ghép vào để truyền trên một sợi quang.
- Tính trong suốt: Do công nghệ WDM thuộc kiến trúc lớp mạng vật lý nên nó có thể hỗ trợ các định dạng số liệu và thoại như: ATM, Gigabit Ethernet, ESCON, chuyển mạch kênh, IP ...
- Khả năng mở rộng: Những tiến bộ trong công nghệ WDM hứa hẹn tăng băng thông truyền trên sợi quang lên đến hàng Tbps, đáp ứng nhu cầu mở rộng mạng ở nhiều cấp độ khác nhau.
- Hiện tại, chỉ có duy nhất công nghệ WDM là cho phép xây dựng mô hình mạng truyền tải quang OTN (Optical Transport Network) giúp truyền tải trong suốt nhiều loại hình dịch vụ, quản lý mạng hiệu quả, định tuyến linh động ...

Nhược điểm của công nghệ WDM

- Vẫn chưa khai thác hết băng tần hoạt động có thể của sợi quang (chỉ mới tận dụng được băng C và băng L).
- Quá trình khai thác, bảo dưỡng phức tạp hơn gấp nhiều lần.
- Nếu hệ thống sợi quang đang sử dụng là sợi DSF theo chuẩn G.653 thì rất khó triển khai WDM vì xuất hiện hiện tượng trộn bốn bước sóng khá gay gắt.

6.3.4. Lưới ITU

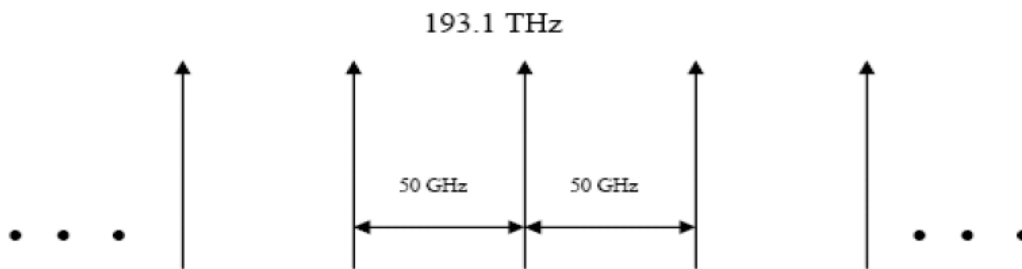
Việc chuẩn hoá các bộ bước sóng dùng cho các mạng WDM là hết sức cần thiết vì nó bảo đảm cho các thiết bị của các nhà cung cấp khác nhau đều được sản xuất theo cùng một tiêu chuẩn, và đều làm việc tương thích với nhau.

Khi chuẩn hoá bước sóng, vấn đề cần phải xem xét đầu tiên là là khoảng cách giữa các kênh phải dựa theo tần số hay bước sóng. Khoảng cách tần số bằng nhau sẽ làm cho khoảng cách bước sóng hơi khác nhau. Không có một tiêu chuẩn kỹ thuật nào được ưu tiên để lựa chọn trong trường hợp này. Trong khuyến cáo ITU-G.692 các kênh cách nhau một khoảng 50 GHz (tương đương với khoảng cách bước sóng là 0.4nm) với tần số trung tâm danh định là 193.1THz (1552.52 nm). Tần số này ở giữa dải thông của sợi quang 1.55 μ m và bộ khuếch đại quang sợi EDFA (xem hình 1.4). Khoảng cách này phù hợp với khả năng phân giải của các bộ MUX/DEMUX hiện nay, độ ổn định tần số

của các bộ laser, MUX/DEMUX,... Khi công nghệ hoàn thiện hơn khoảng cách này sẽ phải giảm đi.

Một vấn đề khác, khó khăn hơn là chọn lựa một bộ bước sóng tiêu chuẩn bảo đảm cho các hệ thống cho 4, 8, 16, và 32 bước sóng hoạt động tương thích với nhau bởi vì các nhà sản xuất đều có các cấu hình kênh tối ưu riêng và các kế hoạch nâng cấp hệ thống từ ít kênh lên nhiều kênh khác nhau. ITU đã chuẩn hoá (ITU G.959) bộ 16 bước sóng bắt đầu từ tần số 192.1 THz, rộng 200GHz mỗi bên cho giao diện đa kênh giữa các thiết bị WDM.

Cuối cùng là phải lưu ý không chỉ bảo đảm các tần số trung tâm mà còn phải bảo đảm độ lệch tần số tối đa cho phép. Đối với $\Delta f \geq 200$ GHz, ITU quy định độ lệch tần số là không vượt quá $\pm \Delta f / 5$ GHz. Với $\Delta f = 50$ GHz và $\Delta f = 100$ GHz thì đến thời điểm này ITU vẫn chưa chuẩn hoá.



Hình 6.12. Lưới bước sóng theo ITU

6.3.5. Các yếu tố ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống WDM

Có 3 yếu tố cơ bản của sợi quang ảnh hưởng đến khả năng của các hệ thống thông tin quang, bao gồm:

- Suy hao
- Tán sắc
- Hiện tượng phi tuyến xảy ra trong sợi quang.

Tuy nhiên, đối với các hệ thống khác nhau thì mức độ ảnh hưởng của các yếu tố này cũng khác nhau.

Đối với các hệ thống cự ly ngắn, dung lượng thấp thì yếu tố chủ yếu cần quan tâm là suy hao.

Đối với các hệ thống tốc độ cao, cự ly tương đối lớn thì yếu tố chủ yếu cần quan tâm là suy hao và tán sắc.

Đối với các hệ thống cự ly dài và dung lượng rất lớn thì ngoài 2 yếu tố trên cần phải xem xét đến cả các hiệu ứng phi tuyến.

6.4. Các linh kiện trong hệ thống WDM

Các linh kiện được sử dụng trong các mạng quang hiện đại bao gồm

- các bộ ghép/tách (couplers)
- bộ phát laser (lasers)
- bộ tách quang (photodetectors)

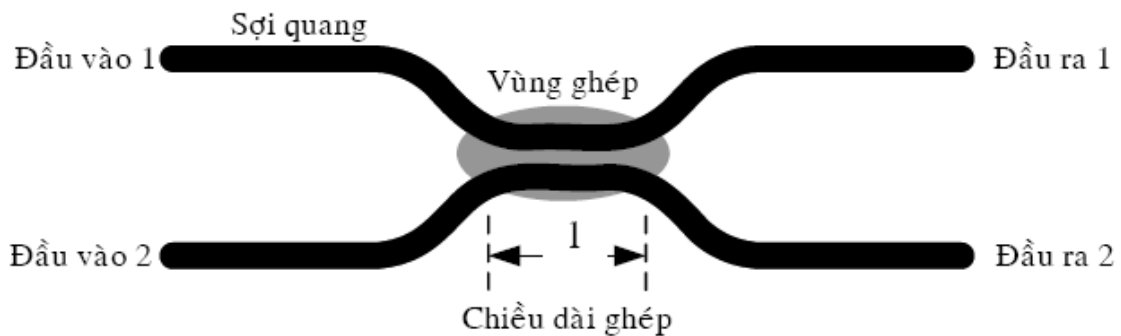
- bộ khuếch đại quang (optical amplifiers)
- bộ chuyển mạch quang (optical switches)
- bộ lọc (filters)
- bộ ghép/tách kênh (multiplexers).

6.4.1. Bộ ghép/tách tín hiệu (Coupler)

a) Định nghĩa

Bộ ghép/tách tín hiệu (Coupler) là thiết bị quang dùng để kết hợp các tín hiệu truyền đến từ các sợi quang khác nhau. Nếu coupler chỉ cho phép ánh sáng truyền qua nó theo một chiều, ta gọi là coupler có hướng (directional coupler). Nếu nó cho phép ánh sáng đi theo 2 chiều, ta gọi là coupler song hướng (bidirectional coupler).

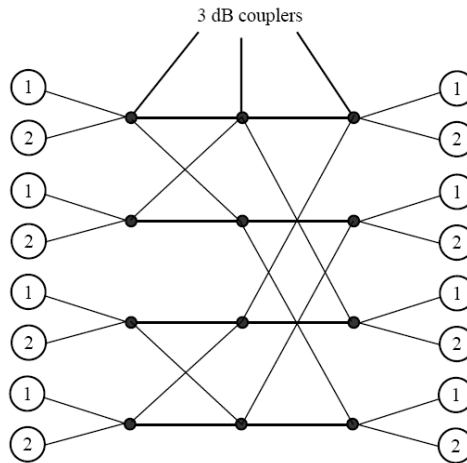
Coupler thông dụng nhất là coupler FBT (Fused Biconical Taper). Coupler này được chế tạo bằng cách đặt 2 sợi quang cạnh nhau, sau đó vừa nung chảy để chúng kết hợp với nhau vừa kéo giãn ra để tạo thành một vùng ghép (coupling region). Một coupler 2 x 2 đặc trưng bởi tỉ số ghép α ($0 < \alpha < 1$). α là tỉ lệ công suất ánh sáng ngõ vào 1 đến ngõ ra 1 so với tổng công suất ánh sáng vào ngõ vào 1. Phần tỉ lệ $1 - \alpha$ công suất ánh sáng còn lại của ngõ vào 1 sẽ được truyền đến ngõ ra 2. Hình 1.9 là một coupler FBT 2 x 2 có hướng.



Hình 6.13. Cấu tạo coupler FBT 2 x 2

Coupler có thể là chọn lựa bước sóng (wavelength selective) hay không phụ thuộc vào bước sóng, tương ứng với α phụ thuộc hay không phụ thuộc vào bước sóng.

Trường hợp $\alpha = 1/2$, coupler được dùng để chia công suất tín hiệu ngõ vào thành hai phần bằng nhau ở hai ngõ ra. Coupler trong trường hợp này được gọi là coupler 3 dB. Coupler hình sao nxn có thể được tạo bằng cách kết nối các coupler 3dB như trên hình sau.



Hình 6.14. Coupler hình sao với 8 ngõ vào và 8 ngõ ra được hình thành từ các

coupler 3dB. Công suất từ một ngõ vào được chia đều cho các ngõ ra

b) Nguyên lý hoạt động

Khi hai sợi quang được đặt cạnh nhau, ánh sáng sẽ được ghép từ sợi này sang sợi kia và ngược lại. Đó là do quá trình truyền một ánh sáng trên sợi quang qua vùng ghép sẽ khác so với truyền trên sợi quang đơn. Khi đó, toàn bộ ánh sáng thuộc một sợi quang sẽ được ghép hoàn toàn sang sợi quang ghép với nó, phần ánh sáng này lại tiếp tục được ghép ngược trở lại sang sợi quang ban đầu theo một chu kỳ tuần hoàn khép kín. Kết quả ta có cường độ trường điện từ ở đầu ra của bộ ghép E_{o1} , E_{o2} được tính theo cường độ trường điện từ đầu vào E_{i1} , E_{i2} theo công thức

$$\begin{pmatrix} E_{o1}(f) \\ E_{o2}(f) \end{pmatrix} = e^{-i\beta l} \begin{pmatrix} \cos(\kappa l) & i \sin(\kappa l) \\ i \sin(\kappa l) & \cos(\kappa l) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_{i1}(f) \\ E_{i2}(f) \end{pmatrix}$$

Trong đó:

- β là hệ số pha của sự truyền ánh sáng trong sợi quang.
- κ là Hệ số ghép. κ phụ thuộc vào chiều rộng của sợi quang, chiết suất của lõi sợi và đến khoảng cách gần nhau của hai sợi quang khi thực hiện nung chảy.

Nếu chỉ cho ánh sáng vào ngõ 1 (cho $E_{i2}=0$), khi đó công thức (1.32) được viết lại là:

$$E_{01}(f) = e^{-i\beta l} \cos(\kappa l) E_{i1}(f)$$

$$E_{02}(f) = e^{-i\beta l} e^{i(\pi/2)} \sin(\kappa l) E_{i1}(f)$$

Ta nhận xét rằng ở 2 đầu ngõ ra có sự lệch pha $\pi/2$.

d) Ứng dụng

Coupler là linh kiện quang linh hoạt và có thể cho nhiều ứng dụng khác nhau. Bộ coupler với tỉ số ghép $\alpha \approx 1$ được dùng để trích một phần nhỏ tín hiệu quang, phục vụ cho mục đích giám sát.

Coupler còn là bộ phận cơ bản để tạo nên các thành phần quang khác, chẳng hạn như: các bộ chuyển mạch tĩnh, các bộ điều chế, bộ giao thoa Mach-Zehnder MZI... MZI có thể được chế tạo hoạt động như bộ lọc, MUX/DEMUX, chuyển mạch và bộ chuyển đổi bước sóng.

Thực hiện ghép/tách bước sóng trên sợi quang. Nhờ điều chỉnh chiều dài ghép thích hợp khi chế tạo, coupler 2 x 2 ghép 50:50 phân bố công suất ánh sáng từ một đầu vào ra làm 2 phần bằng nhau ở 2 ngõ ra. Coupler này còn được gọi là coupler 3 dB, ứng dụng phổ biến nhất. Từ coupler 3 dB, có thể tạo nên bộ coupler n x n ghép n tín hiệu khác nhau vào một sợi quang.

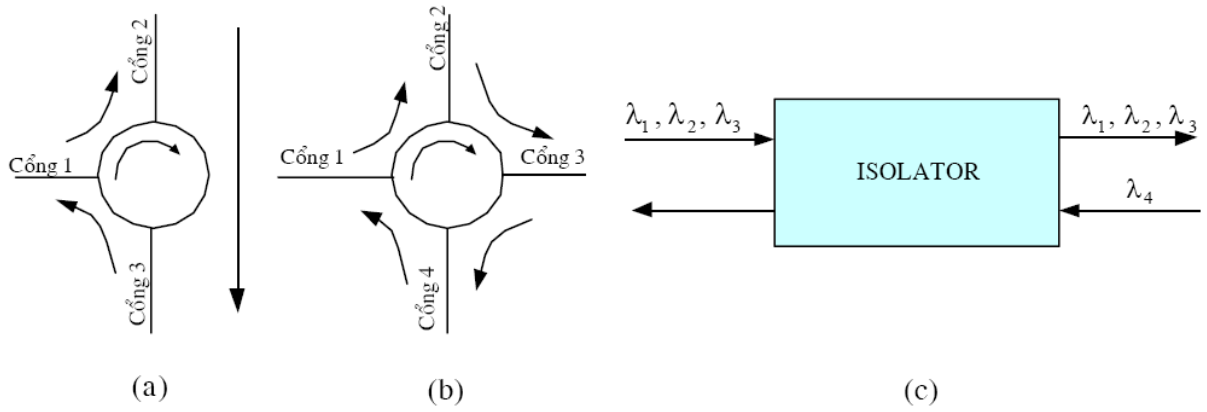
6.4.2. Bộ isolator/circulator

a) Định nghĩa

Coupler và phần lớn các linh kiện quang thụ động khác là các thiết bị thuận ngược (reciprocal) theo nghĩa thiết bị sẽ hoạt động cùng một kiểu nếu đảo ngõ vào và ngõ ra với nhau.

Isolator là thiết bị không thuận ngược (nonreciprocal). Nó chỉ truyền ánh sáng qua nó theo một chiều và ngăn không cho truyền theo chiều ngược lại. Nó được dùng tại đầu ra của các thiết bị quang (bộ khuếch đại, nguồn phát laser) để ngăn quá trình phản xạ ngược trở lại các thiết bị đó, gây nhiễu và hư hại thiết bị. Hai tham số chính của Isolator là suy hao xen và độ cách ly.

Circulator cũng thực hiện chức năng tương tự như bộ Isolator nhưng nó thường có nhiều cổng, thường là 3 hoặc 4 cửa. Chính vì sự tương đồng giữa hai loại thiết bị, ta sẽ chỉ trình bày hoạt động của bộ Isolator mà thôi.



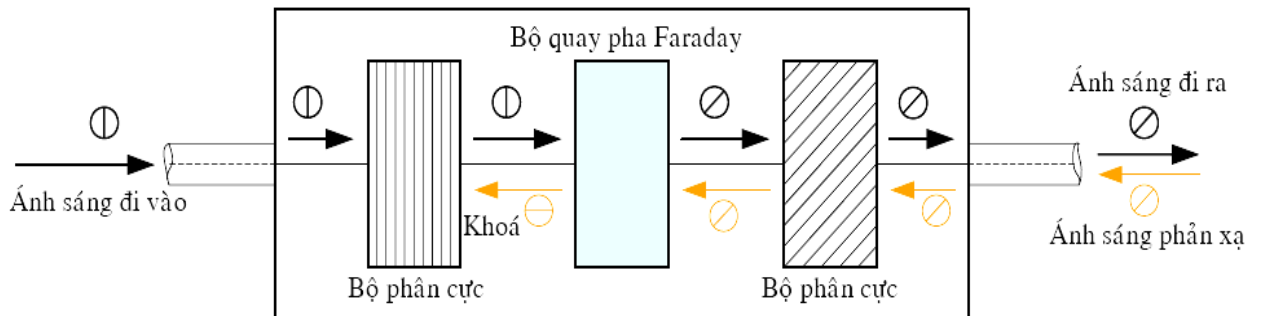
Hình 6.15.

(a) Sơ đồ khối của bộ Circulator 3 cửa.

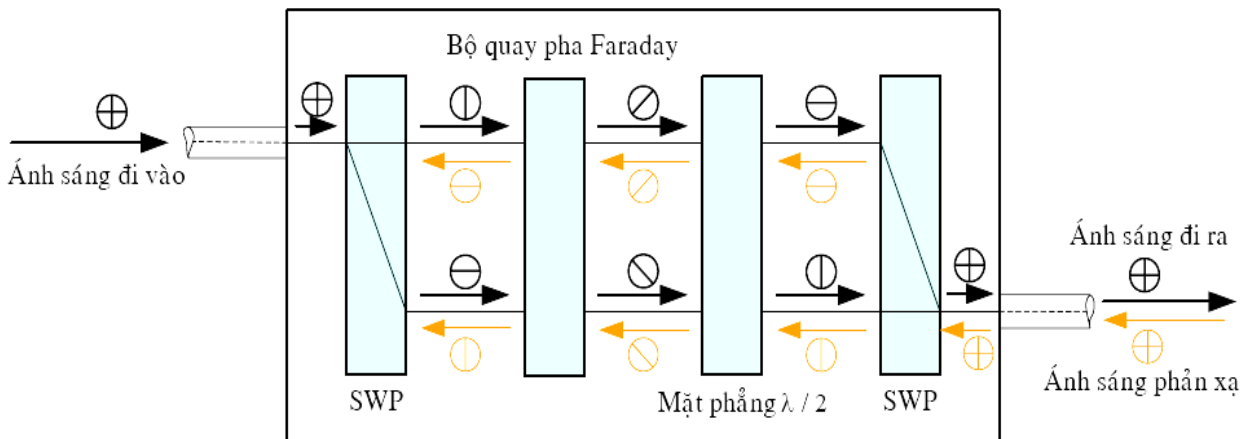
(b) Sơ đồ khối của bộ Circulator 4 cửa.

(c) Sơ đồ khối của bộ Isolator.

b) Nguyên lý hoạt động



(a)



Hình 6.16.

(a) Cấu tạo bộ Isolator khi ánh sáng vào phân cực dọc.

(b) Cấu tạo bộ Isolator khi ánh sáng vào phân cực bất kỳ.

Trạng thái phân cực của ánh sáng truyền trong sợi quang được định nghĩa là chiều phân cực của vector cường độ trường E nằm trên mặt phẳng

vuông góc với phương truyền ánh sáng trong sợi. Ta gọi là phân cực ngang và phân cực dọc. Quá trình truyền ánh sáng trong sợi quang là sự kết hợp tuyến tính truyền các sóng phân cực ngang và phân cực dọc.

Mô hình đơn giản của bộ Isolator được minh họa như trong Hình 6.16. (a). Giả sử ánh sáng truyền là phân cực dọc, truyền đến bộ phân cực (Polarizer), bộ này thực hiện chức năng chỉ cho sóng phân cực dọc đi qua, không cho sóng phân cực ngang đi qua. Sau bộ phân cực là bộ quay pha Faraday, thực hiện quay pha 45° theo chiều kim đồng hồ không phân biệt chiều ánh sáng đến.

Tiếp theo là bộ phân cực, bộ này thực hiện chức năng chỉ cho sóng phân cực 45° đi qua. Như vậy, bộ Isolator ta xét chỉ cho phép sóng phân cực dọc đi qua theo chiều từ trái sang phải. Trong trường hợp sóng phản xạ theo chiều ngược lại, nếu sóng qua được bộ phân cực thứ hai, qua tiếp theo bộ quay pha Faraday, thì cũng không thể qua được bộ phân cực thứ nhất (do lúc này sóng phân cực ngang).

Trên thực tế thì sóng truyền trong sợi quang luôn là sự kết hợp tuyến tính của các trạng thái phân cực ngang và dọc nên thiết kế bộ Isolator phức tạp hơn. Mô hình thu nhỏ được trình bày trong Hình 6.16. (b).

Ánh sáng truyền trong sợi quang với trạng thái phân cực bất kì được đưa đến bộ tách/ghép trạng thái phân cực SWP (Spatial Walk-off Polarizer), tách thành hai dòng tín hiệu phân cực dọc và ngang theo hai đường độc lập nhau. Tiếp theo, đến bộ quay pha Faraday, quay pha 45° theo chiều kim đồng hồ. Mặt phẳng $\lambda/2$ (Half-wave plate) thực hiện quay pha 45° theo chiều kim đồng hồ đối với tín hiệu truyền từ trái sang phải, quay pha 45° theo chiều ngược kim đồng hồ theo chiều truyền ngược lại. Cuối cùng, tín hiệu ở hai nhánh được kết hợp lại nhờ bộ SWP thứ hai. Nếu theo chiều ngược lại, hai bộ SWP sẽ khử lẫn nhau. Ánh sáng truyền qua bộ SWP thứ hai, qua bộ quay pha Faraday sẽ không thể kết hợp lại được tại bộ SWP thứ nhất như minh họa trên Hình 6.16. .

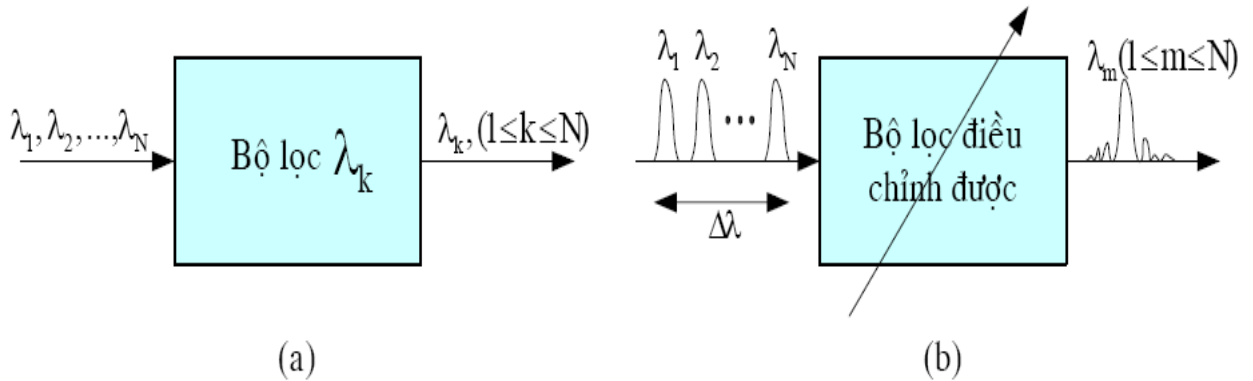
c) Ứng dụng

Bộ Isolator và Circulator có những ứng dụng sau:

- Bộ Isolator thường đứng trước đầu ra bộ khuếch đại quang hoặc nguồn phát laser để ngăn ánh sáng phản xạ ngược trở lại thiết bị gây nhiễu và có thể làm hư thiết bị.
- Bộ Circulator được dùng như một bộ phận để chế tạo phần tử xen rút quang OADM.

6.4.3. Bộ lọc quang

a) Tổng quan



Hình 6.17. Sơ đồ khối của bộ lọc.

(a) Bộ lọc cố định bước sóng λ_k .

(b) Bộ lọc có thể điều chỉnh bước sóng được trong khoảng $\Delta\lambda$.

Định nghĩa

Bộ lọc là thiết bị chỉ cho phép một kênh bước sóng đi qua, khoá đối với tất cả các kênh bước sóng khác. Nguyên lý cơ bản nhất của bộ lọc là sự giao thoa giữa các tín hiệu, bước sóng hoạt động của bộ lọc sẽ được cộng pha nhiều lần khi đi qua nó, các kênh bước sóng khác, ngược lại, sẽ bị triệt tiêu về pha.

Tùy thuộc vào khả năng điều chỉnh kênh bước sóng hoạt động, người ta chia bộ lọc làm hai loại: bộ lọc cố định (fixed filter) và bộ lọc điều chỉnh được (tunable filter).

Yêu cầu đối với bộ lọc

Hiện nay, có rất nhiều công nghệ chế tạo bộ lọc. Tuy nhiên, yêu cầu chung đối với tất cả các công nghệ là:

- Bộ lọc tốt phải có giá trị suy hao xen IL thấp.
- Bộ lọc phải không phụ thuộc nhiều vào trạng thái phân cực của tín hiệu đưa vào.
- Dải thông hoạt động của bộ lọc phải không nhạy cảm với sự thay đổi nhiệt độ của môi trường.
- Bộ lọc phải đảm bảo trong khoảng nhiệt độ hoạt động (thường là khoảng 100°C), độ dịch dải thông hoạt động phải không vượt quá khoảng cách giữa hai kênh bước sóng hoạt động gần nhất.
- Khi ứng dụng ghép nối tiếp nhiều bộ lọc trong hệ thống WDM, băng thông hoạt động sẽ bị thu hẹp lại. Để hạn chế tối đa điều này, các bộ lọc phải có hàm truyền đạt trong khoảng bước sóng hoạt động là bằng phẳng.

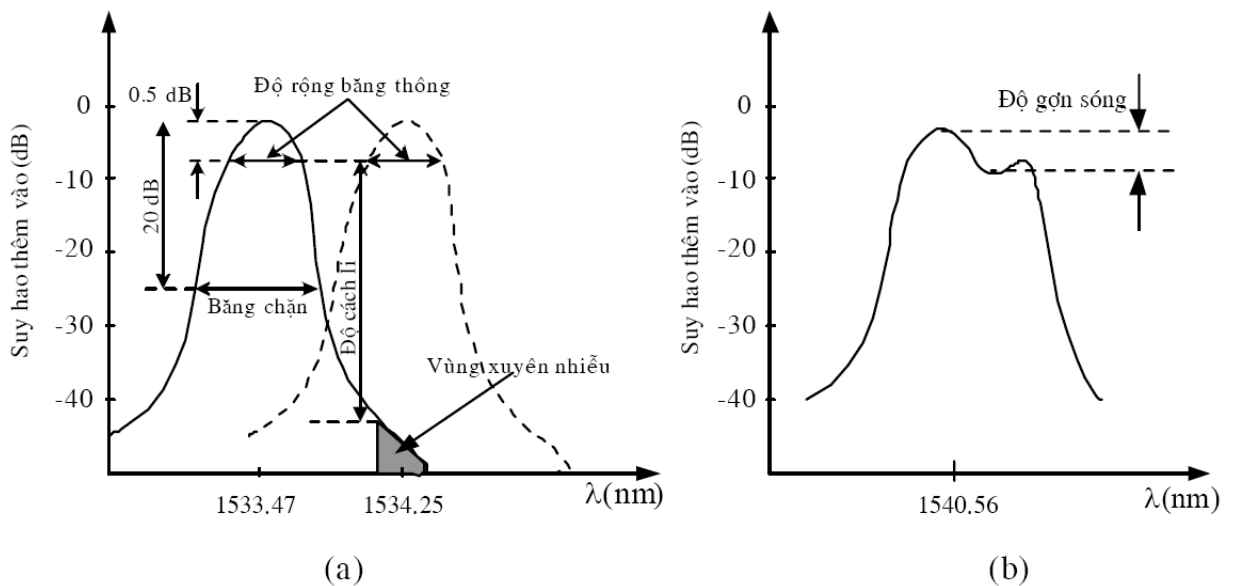
- Hàm truyền đạt của bộ lọc phải có độ dốc lớn để tránh giao nhau ở phần vạt của hai bước sóng lân cận, gây xuyên nhiễu giữa các kênh.
- Giảm chi phí sản xuất.

Vấn đề này lại phụ thuộc vào công nghệ chế tạo. Tuy nhiên, khi vấn đề này đặt lên hàng đầu thì ta sẽ có hai lựa chọn.

Thứ nhất là dùng công nghệ ống dẫn sóng, cho phép sản xuất trên những vi mạch tích hợp quang (bù lại hoạt động phụ thuộc vào trạng thái phân cực của sóng quang).

Thứ hai là dùng công nghệ sản xuất các thiết bị thuần quang, tuy khó khăn trong tích hợp mạch nhưng có nhiều ưu điểm là: không phụ thuộc vào trạng thái phân cực của sóng quang, ghép sóng từ sợi quang vào thiết bị dễ dàng.

b) Thông số cơ bản



Hình 6.18. (a) Các thông số đặc trưng của bộ lọc. (b) Độ gọn sóng của bộ lọc.

Hình trên minh họa các đặc tính đặc trưng cho một bộ lọc, các đặc tính đó được định nghĩa như sau:

- Bước sóng trung tâm: phải là bước sóng tuân theo tiêu chuẩn ITU-T
- Độ rộng băng thông (Pass Bandwidth): là độ rộng của hàm truyền đạt tại mức suy hao xen cách đỉnh 0.5 dB. Trong một số trường hợp, người ta còn có thể xét băng thông đi qua 1 dB, 3 dB. Đặc tính này rất quan trọng vì laser trong trường hợp không lý tưởng chỉ phát tín hiệu có bước sóng dao động nhất định so với bước sóng trung tâm được qui định theo chuẩn ITU-T.

- Độ rộng băng chặn (Stop Bandwidth): là độ rộng của hàm truyền đạt tại mức suy hao xen cách đỉnh 20 dB. Dải chặn của bộ lọc phải càng nhỏ càng tốt để tránh hiện tượng xuyên nhiễu giữa các kênh.
- Độ cách ly (Isolation): để chỉ công suất của một kênh bước sóng xuyên nhiễu sang các kênh bước sóng lân cận.
- Độ gợn sóng (Ripple): là độ chênh lệch đỉnh-đỉnh trong phạm vi một kênh bước sóng.
- Hệ số sử dụng băng thông BUF (Bandwidth-utilization Factor): là tỉ số của độ rộng kênh truyền LW (Linewidth) của ánh sáng được truyền đi so với ánh sáng phản xạ tại một mức suy hao xác định. Bộ lọc lý tưởng phải có BUF = 1. Trên thực tế, khi IL = -25 dB thì BUF \approx 0.4.

Nếu bộ lọc thuộc loại có thể điều chỉnh bước sóng được, nó còn có thêm các đặc tính nữa như là:

- Khoảng điều chỉnh bước sóng động: là khoảng bước sóng mà trong phạm vi hoạt động của bộ lọc.
- Số kênh bước sóng có thể xử lý: là tỉ lệ khoảng điều chỉnh bước sóng động trên khoảng cách giữa các kênh bước sóng.
- Thời gian điều chỉnh: Thời gian điều chỉnh giữa các kênh bước sóng hoạt động khác nhau.
- Tỉ lệ nén biên SSR (Sidelobe Suppression Ratio): là khoảng cách giữa giá trị công suất đỉnh so với giá trị công suất lớn nhất ở biên.
- Độ phân giải: là độ dịch bước sóng nhỏ nhất bộ lọc có thể nhận biết được.

c) Cách tử

Cách tử dùng để mô tả các thiết bị mà hoạt động của nó dựa trên hiện tượng giao thoa giữa các tín hiệu quang xuất phát từ cùng một nguồn quang nhưng có độ lệch pha tương đối với nhau.

Phân biệt với cách tử là vật chuẩn (etalon) là thiết bị ở đó nhiều tín hiệu quang được tạo ra nhờ một hốc cộng hưởng (single cavity) lặp lại các tia đi ngang qua nó.

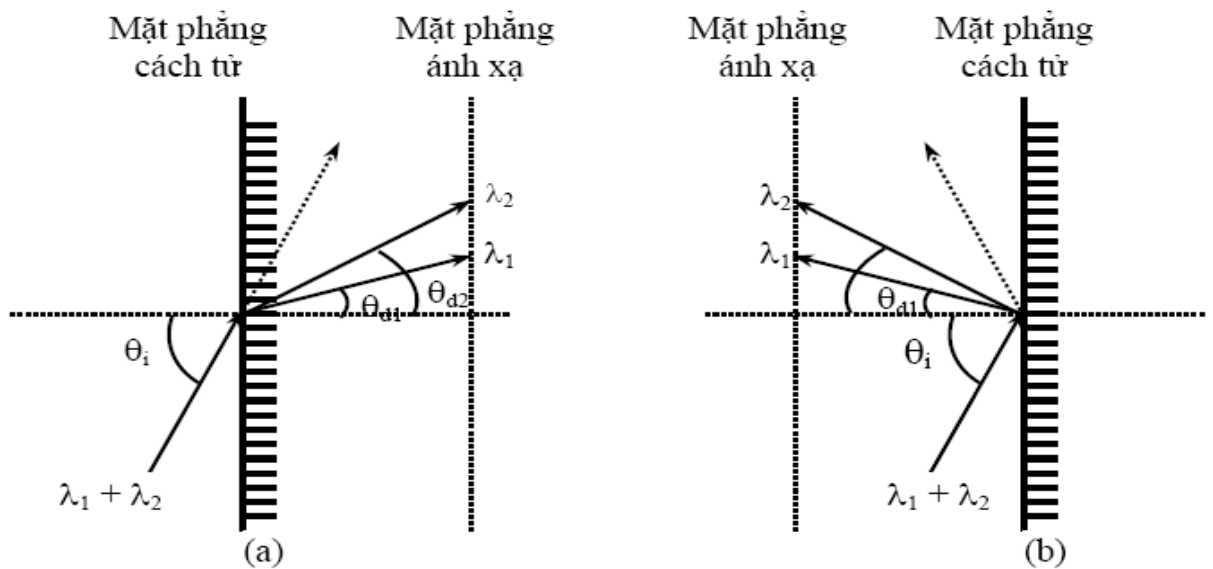
Sóng ánh sáng có lan truyền theo hướng z với tần số góc là ω và hằng số pha là β sẽ có độ dịch pha là $(\omega t - \beta z)$. Do đó độ dịch pha tương đối giữa hai sóng phát sinh từ một nguồn có thể được tạo ra bằng cách cho chúng truyền qua hai đường khác nhau.

Trong WDM cách tử được dùng như là một bộ tách kênh để tách các bước sóng hoặc như là một bộ ghép kênh để kết hợp các bước sóng.

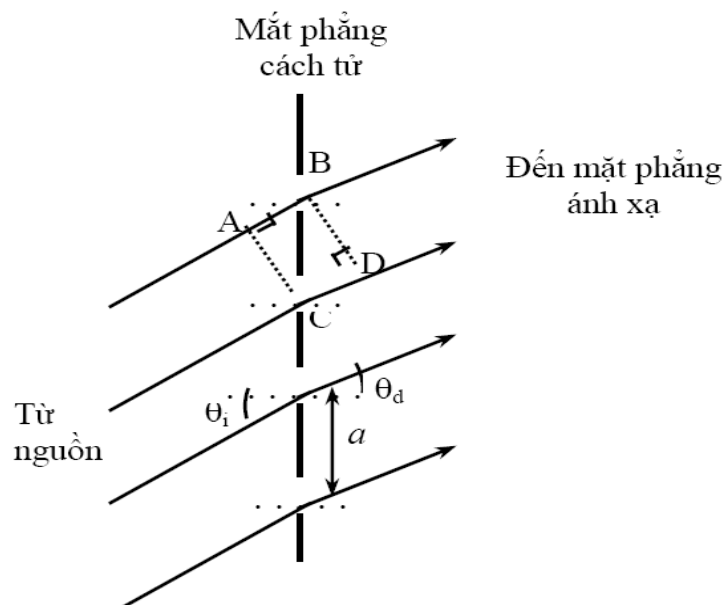
Hình 6.18. là hai ví dụ về cách tử: trên mặt phẳng cách tử (grating plane), các khe (slit) được cách đều nhau. Khoảng cách giữa hai khe kế cận gọi là pitch. Do các khe nhỏ nên theo hiện tượng nhiễu xạ (diffraction) ánh sáng truyền qua các khe này sẽ lan toả ra mọi hướng. Trên mặt phẳng ánh xạ (imaging plane) sẽ quan sát được hiện tượng giao thoa cộng hưởng (constructive interference) và triệt tiêu các bước sóng tại các điểm khác nhau, cách tử này được gọi là cách tử nhiễu xạ (diffraction grating).

Hình 6.18. (a) là cách tử truyền dẫn (transmission gratings),

Hình 6.18. (b) là cách tử phản xạ (reflection gratings).



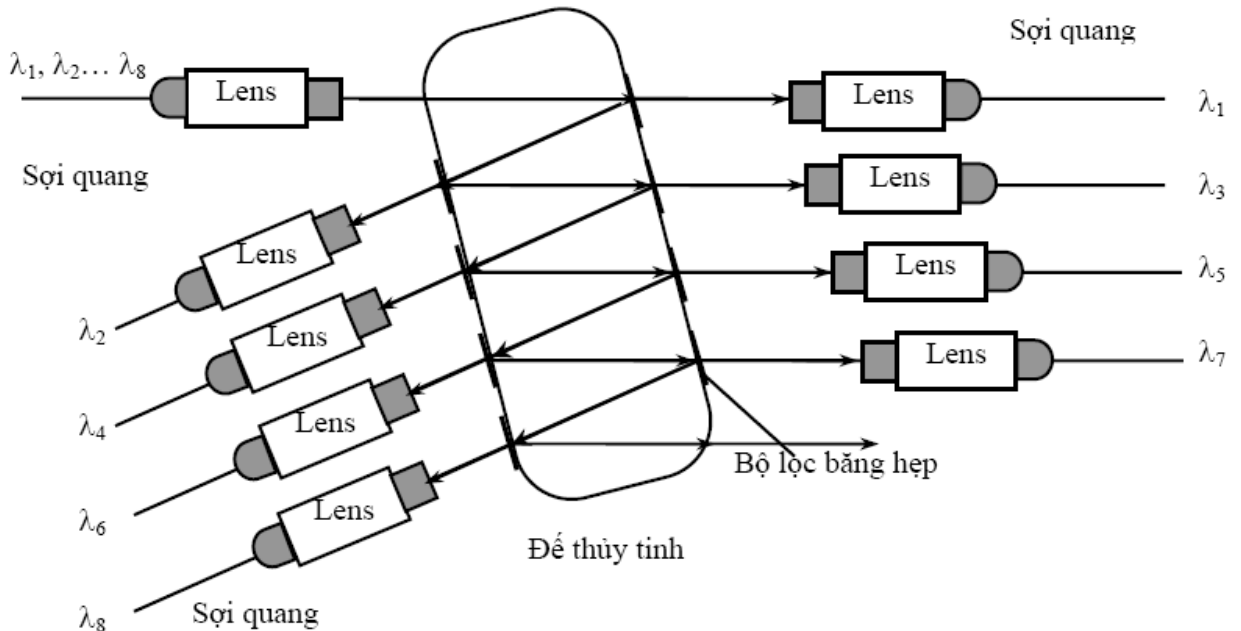
Hình 6.18. (a) Cách tử truyền dẫn và (b) Cách tử phản xạ



Hình 6.19. Nguyên tắc hoạt động của cách tử truyền dẫn.
Cách tử phản xạ hoạt động tương tự



Hình 6.20. Cách tử blazing với góc blaze α .



Hình 6.21. Bộ lọc ghép/tách kênh được tạo từ các bộ lọc màng mỏng điện môi

6.4.4. Bộ ghép/tách kênh bước sóng

Bộ ghép/tách kênh bước sóng, cùng với bộ kết nối chéo quang, là thiết bị quan trọng nhất cấu thành nên hệ thống WDM.

Khi dùng kết hợp với bộ kết nối chéo quang OXC (Optical Crossconnect) sẽ hình thành nên mạng truyền tải quang, có khả năng truyền tải đồng thời và trong suốt mọi loại hình dịch vụ, mà công nghệ hiện nay đang hướng tới.

Tuy nhiên, trong khi thiết bị và công nghệ chuyển mạch quang, nhìn chung vẫn còn đang ở mức nghiên cứu tại các phòng thí nghiệm thì các thiết bị ghép/tách kênh bước sóng đã được thương mại hoá rộng rãi.

Về công nghệ chế tạo, công nghệ chế tạo bộ lọc (mà đã được trình bày chi tiết ở phần 6.4.3.) và công nghệ chế tạo bộ tách/ghép kênh hoàn toàn giống nhau. Chỉ khác là bộ lọc thường chỉ có một bước sóng hoạt động, còn bộ tách/ghép kênh hoạt động trên nhiều kênh bước sóng liên tục. Bộ lọc chính là phần tử cơ bản cấu tạo nên bộ ghép/tách kênh

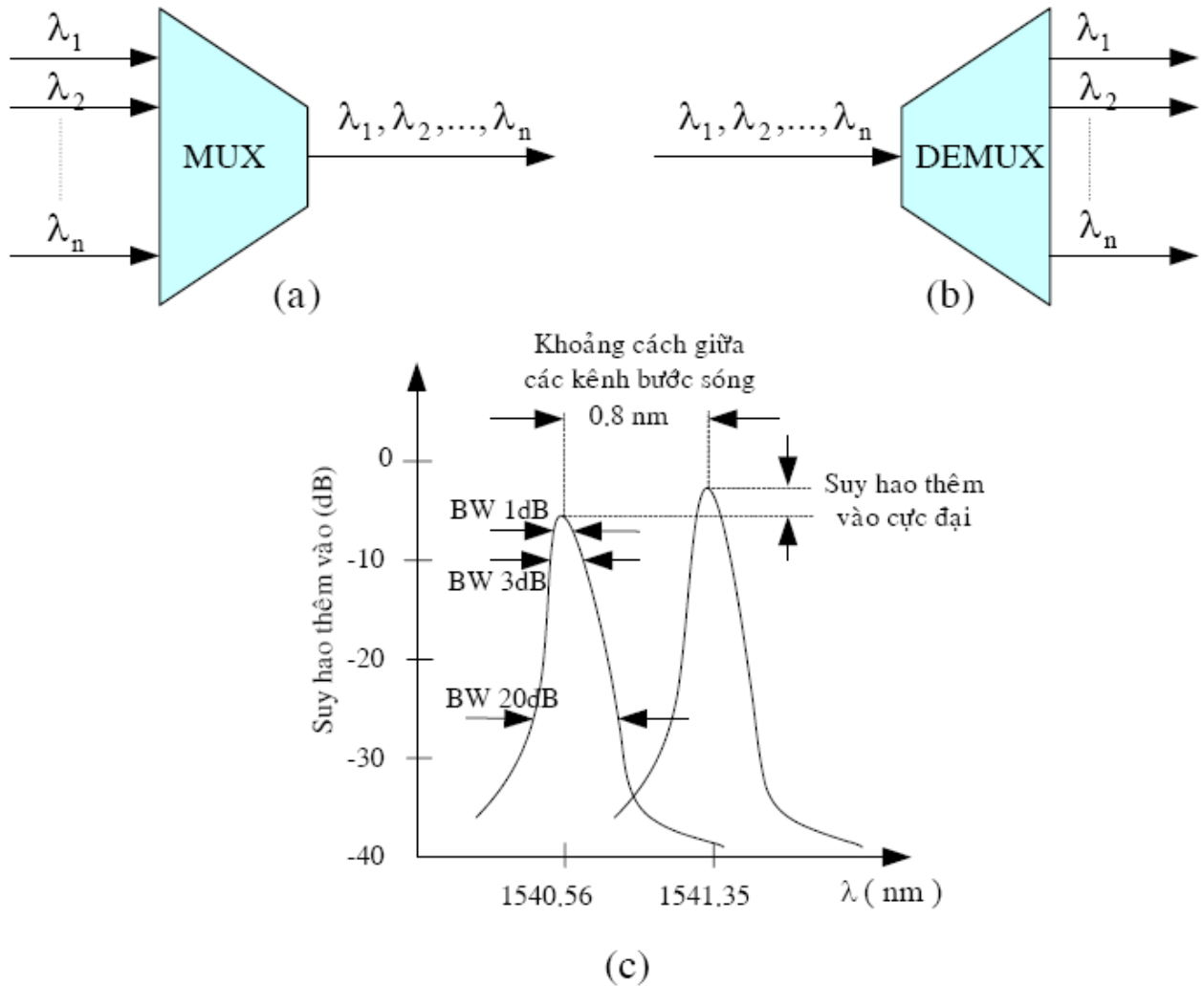
a) Định nghĩa

Nguyên lý hoạt động của bộ MUX/DEMUX cũng tương tự như bộ Coupler. Tuy nhiên, bộ Coupler/Splitter thực hiện ghép tách tín hiệu có cùng bước sóng, còn bộ MUX/DEMUX thực hiện ghép tách tín hiệu ở các bước sóng khác nhau. Sơ đồ khối bộ MUX/DEMUX cho trong hình 6.22. (a) và (b).

b) Đặc tính

Bộ MUX/DEMUX thường được mô tả theo những thông số sau:

- Suy hao xen (Insertion Loss): đã mô tả ở phần coupler.
- Số lượng kênh xử lý: là số lượng kênh bước sóng ở đầu vào và đầu ra của bộ ghép/tách kênh. Thông số này đặc trưng cho dung lượng của thiết bị.
- Bước sóng trung tâm: Các bước sóng trung tâm phải tuân theo chuẩn của ITU-T để đảm bảo vấn đề tương thích.
- Băng thông: là độ rộng phổ (linewidth) của kênh bước sóng trên thực tế. Băng thông thường được tính là độ rộng của hàm truyền đạt công suất ở các mức cách đỉnh 1dB, 3dB, 20dB.
- Giá trị lớn nhất suy hao xen: được tính là khoảng cách nhỏ nhất giữa đỉnh của hàm truyền đạt công suất của một kênh bước sóng nào đó so với mức $IL=0$ (dB) (minh hoạ trên 6.22. (c)).
- Độ chênh lệch suy hao xen vào giữa các kênh: được tính là hiệu của giá trị lớn nhất và nhỏ nhất suy hao xen vào giữa các kênh bước sóng.



Hình 6.22. Bộ tách/ghép kênh bước sóng quang.

(a) Sơ đồ khối bộ ghép kênh bước sóng (MUX).

(b) Sơ đồ khối bộ tách kênh bước sóng (DEMUX).

(c) Các thông số đặc trưng của bộ MUX/DEMUX.

c) Ghép tầng để tạo bộ ghép kênh dung lượng cao

Nhu cầu về dung lượng ngày càng cao trong khi công nghệ chế tạo sợi quang vẫn còn những giới hạn nhất định, làm hạn chế tốc độ truyền dẫn một kênh bước sóng. Điều đó đòi hỏi phải tăng số lượng kênh bước sóng truyền trên một sợi quang, có nghĩa là số lượng kênh mà bộ MUX/DEMUX xử lý phải tăng lên.

Trong khi công nghệ chế tạo phần tử cơ bản vẫn còn giới hạn ở một khoảng số lượng kênh bước sóng có thể xử lý nhất định thì giải pháp ghép tầng được xem là giải pháp hợp lý nhất.

Ghép tầng nối tiếp đơn kênh (Serial)

Trong phương pháp này thực hiện ghép n tầng, mỗi tầng chỉ thực hiện ghép/tách một kênh bước sóng. Một ví dụ tiêu biểu là bộ DEMUX 8 kênh bước sóng, chế tạo từ các phần tử cơ bản là bộ lọc TFMF như đã trình bày trong hình (1.25).

Ưu điểm lớn nhất của phương pháp ghép tầng nối tiếp là số bước sóng xử lý có thể thay đổi linh động bằng cách thêm/bớt số bộ lọc ghép vào (“pay as you grow”).

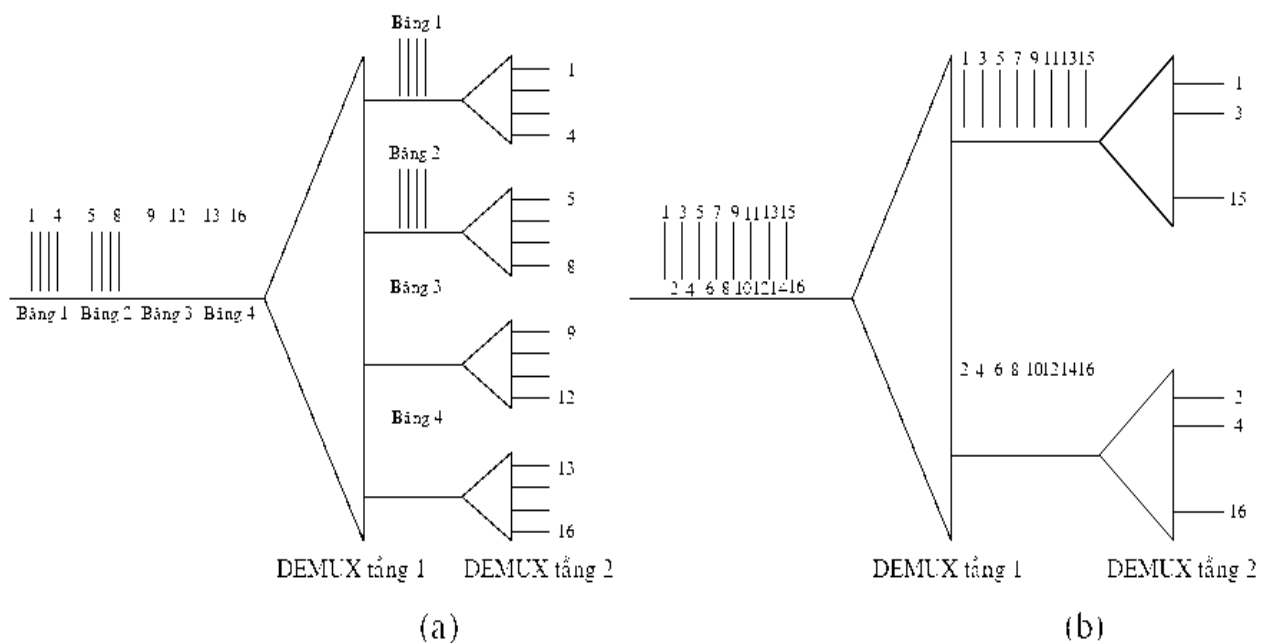
Nhược điểm chính là chỉ có thể tăng lên đến một số lượng bước sóng nào đó mà thôi, do suy hao xen sẽ tăng gần như tuyến tính với số lượng bộ lọc thêm vào.

Ghép một tầng (Single-Stage)

Tất cả các bước sóng đều được tách đồng thời trong một tầng duy nhất. Ví dụ cho cấu trúc này là bộ lọc AWG

Ưu điểm của phương pháp này suy hao xen nhỏ, tính đồng nhất của suy hao tốt hơn.

Nhược điểm là số kênh được tách bị hạn chế do công nghệ sản xuất AWG.



Hình 6.23. Ghép tầng để tăng dung lượng ghép/tách các kênh bước sóng.

(a) Ghép tầng theo từng băng sóng.

(b) Ghép tầng đan xen chẵn lẻ.

Ghép tầng theo từng băng sóng (Multistage Banding)

Phương pháp này thực hiện với n/m tầng, mỗi tầng thực hiện ghép/tách m kênh bước sóng thuộc cùng một băng sóng (thông thường $m=4$ hoặc $m=8$, số lượng kênh bước sóng trong một băng sóng là do nhà sản xuất thiết bị qui định) xem hình (6.23. a). Như vậy, đòi hỏi bộ MUX/DEMUX ở tầng đầu phải có dải bước sóng hoạt động rất rộng.

Ưu điểm: hạn chế được suy hao thêm vào m lần so với phương pháp ghép tầng nối tiếp. Cấu trúc này có thể mở rộng thêm nhiều tầng. Cấu trúc có dạng mô đun nên ở tầng cuối cùng có thể chỉ dùng một băng

Nhược điểm: phí phạm tài nguyên “bước sóng” do phải chừa khoảng cách rộng giữa các băng sóng.

Ghép tầng đan xen chẵn lẻ

Có thể áp dụng với hai tầng hoặc nhiều hơn. Tầng đầu làm nhiệm vụ ghép/tách các kênh bước sóng chẵn, lẻ ra làm thành hai băng, đưa đến tầng hai. Tiếp theo, tầng hai có thể thực hiện chức năng tương tự như tầng một hoặc thực hiện ghép/tách riêng ra thành các kênh riêng lẻ (xem hình 6.23. b).

Ưu điểm của phương pháp này là càng về tầng cuối, không cần phải dùng các bộ lọc có độ chính xác cao do khoảng cách giữa các kênh bước sóng cần xử lý ở tầng sau sẽ càng rộng ra.

6.4.5. Bộ chuyển mạch quang

a) Các bộ chuyển mạch đơn (Single Switch)

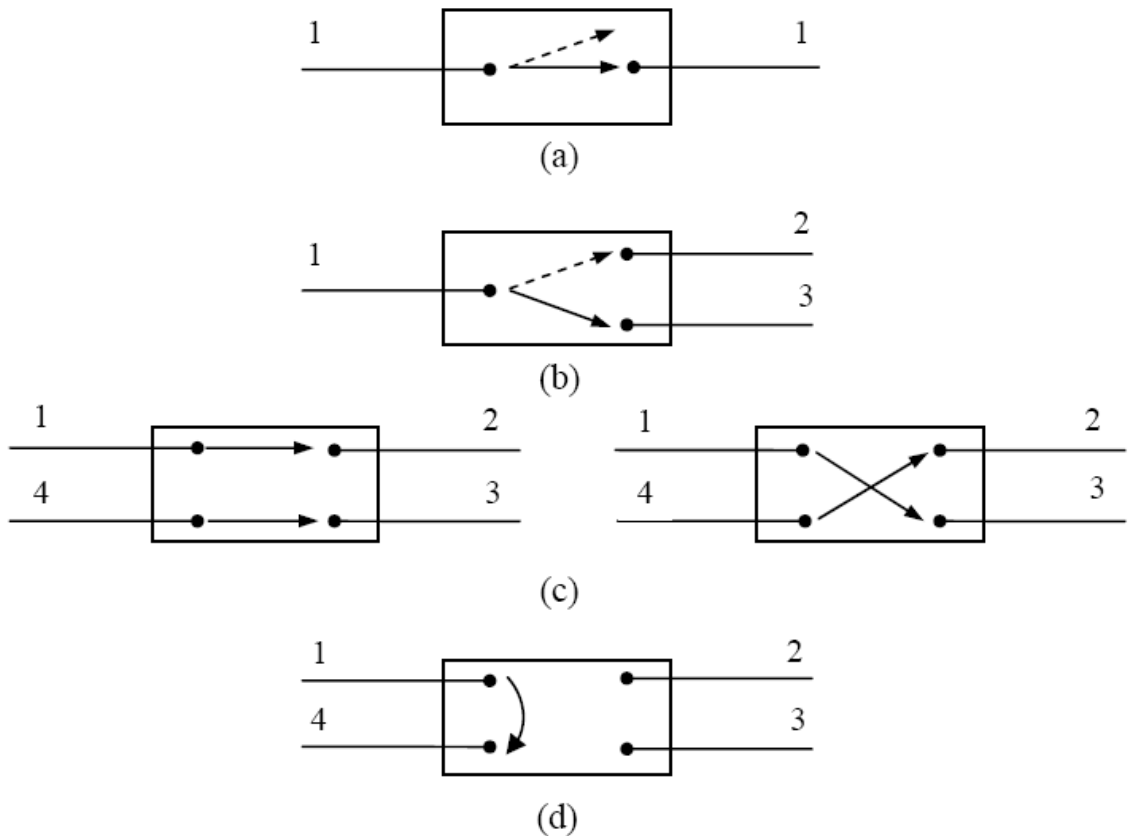
Theo chức năng, các bộ chuyển mạch đơn thường được chia làm hai loại: on/off và chuyển tiếp (passing).

Bộ chuyển mạch on/off (1x1) sẽ cho phép/hoặc không cho phép tín hiệu ánh sáng đi qua (hình 6.24. (a)).

Chuyển mạch chuyển tiếp 1x2 hướng tín hiệu ánh sáng từ sợi quang thứ nhất sang sợi quang thứ hai hoặc sang sợi quang thứ ba (hình 6.24. (b)). Cấu hình chuyển mạch 1x2 trong hình hình 6.24. (b) là cấu hình chuyển mạch đơn giản nhất. Các bộ chuyển mạch chuyển tiếp 1xN đơn mang tính thương mại cao.

Bộ chuyển mạch chuyển tiếp 2x2 có thể kết nối hai sợi quang này với hai sợi quang khác. Bộ chuyển mạch chuyển tiếp 2x2 có thể có hai trạng thái: trạng thái kết nối thẳng (bypass/bar) và trạng thái kết nối chéo (cross/inserted) (hình 6.24. (c)). Thuật ngữ không nghẽn dùng để chỉ một bộ chuyển mạch có thể kết nối bất kỳ ngõ vào đến bất kỳ ngõ ra.

Hình 6.24. (d) trình bày bộ chuyển mạch 2x2 có nghẽn vì bộ chuyển mạch này chỉ có thể kết nối từ sợi quang 1 đến sợi quang 4.



Hình 6.24. Các loại cấu hình chuyển mạch quang:
 (a) chuyển mạch On/Off (1x1);
 (b) chuyển mạch chuyển tiếp (1x2) (không nghẽn);
 (d) chuyển mạch 2x2 có nghẽn.

Nhiều ví dụ đơn giản về các ứng dụng của bộ chuyển mạch khẳng định tầm quan trọng của các bộ chuyển mạch trong hệ thống thông tin sợi quang như sau:

- Các chuyển mạch on/off được dùng làm các đầu phát và đầu thu cách ly trong thiết bị đo thử. Bộ chuyển mạch 1x2 cho phép lựa chọn kênh và được dùng cho chuyển mạch bảo vệ (để định hướng lại lưu lượng khi sợi quang bị đứt).
- Các chuyển mạch 1xN được dùng để kiểm tra và đo các linh kiện quang, kiểm tra từ xa các hệ thống thông tin sợi quang.
- Các chuyển mạch 2x2 được dùng để kết nối thẳng nút trong các mạng quang. Chuyển mạch 2x2 thường được ứng dụng trong các mạng FDDI. Khi một trạm nào đó bị hư hỏng hoặc bị mất nguồn, bộ chuyển mạch sẽ tự động thay đổi sang trạng thái nghẽn, do đó đảm bảo luồng lưu lượng không bị ảnh hưởng khi nút bị hư hỏng.

Các chuyển mạch đơn được chế tạo theo các kiểu khoá (latching) hoặc không khoá (nonlatching). Loại khoá sẽ giữ nguyên trạng thái (vị trí) của chuyển mạch nếu nguồn bị mất.

Nguyên lý hoạt động của các chuyển mạch đơn

Nguyên lý hoạt động của các chuyển mạch đơn điển hình thường dựa trên: điện-quang, quang cơ học, nhiệt quang. Hình 6.25 trình bày một số nguyên lý hoạt động của bộ chuyển mạch.

Nếu chuyển mạch thiên áp của một bộ khuếch đại quang bán dẫn (SOA- Semiconductor Optical Amplifier) sang hai trạng thái on/off thì tạo ra được một chuyển mạch điện-quang (hình 6.25. (a)) vì một SOA chỉ khuếch đại ánh sáng khi nó được phân cực và hấp thụ ánh sáng khi nó không được phân cực.

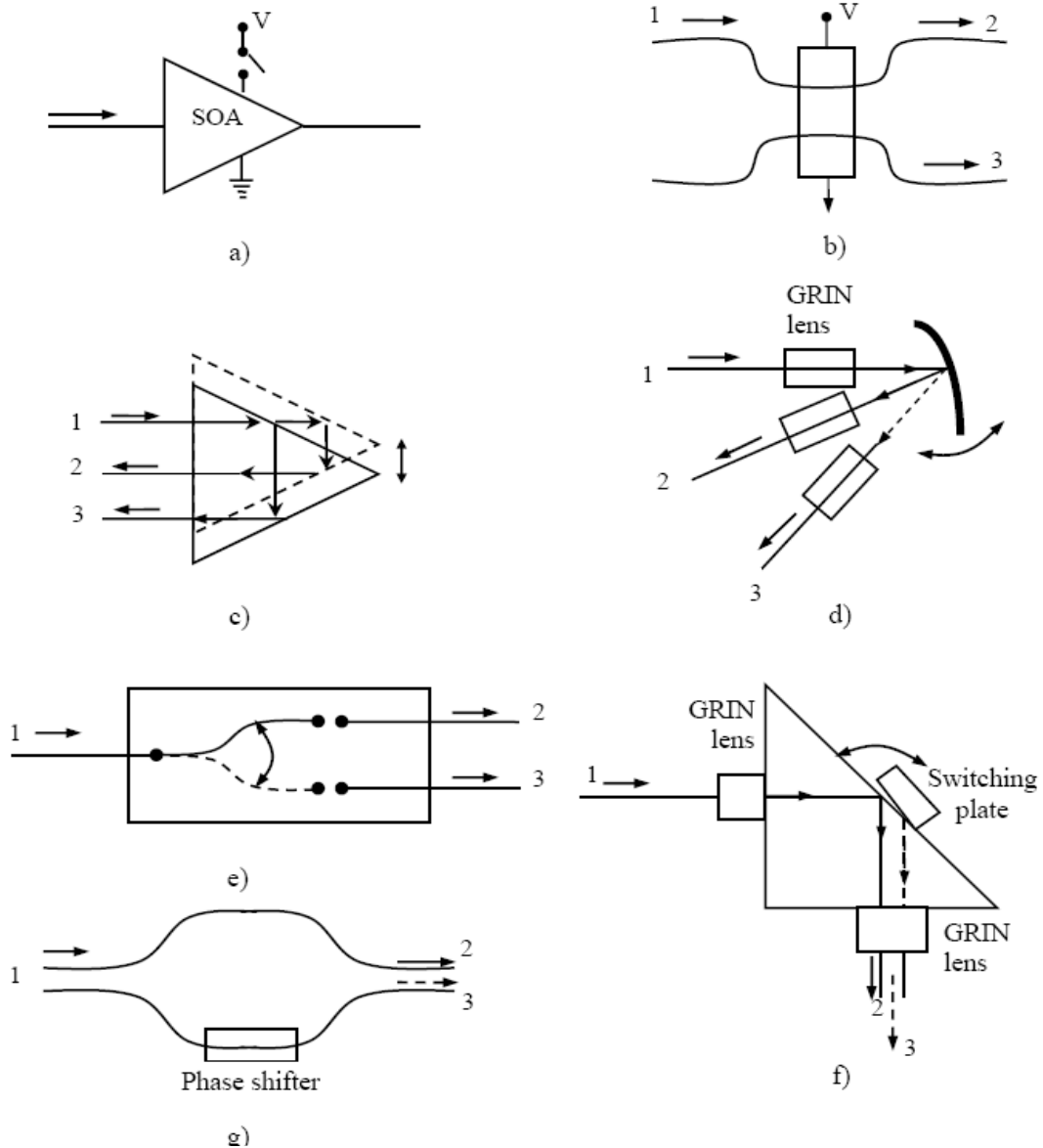
Hình 6.25(b) trình bày một ví dụ khác của chuyển mạch EO, trong đó tỉ số ghép của bộ ghép ống dẫn sóng phụ thuộc vào điện áp áp vào. Thay đổi tỉ số ghép bằng cách dùng LiNbO_3 để chế tạo lớp trên cùng của bộ ghép vì LiNbO_3 là loại nhiên liệu có chỉ số khúc xạ thay đổi theo giá trị của điện áp áp vào.

Chuyển mạch quang cơ học hoạt động dựa trên chuyển động cơ học của các linh kiện quang. Ví dụ, di chuyển lăng kính trong hình 6.25(c) theo chiều dọc sẽ cho phép chuyển mạch một tín hiệu quang từ sợi 2 sang sợi 3.

Ta cũng có thể đạt được kết quả tương tự khi đặt nhẹ lên trụ một gương hình cầu (hình 6.25(d)). Các thấu kính GRIN (graded-index) sẽ làm cho việc chuyển tiếp ánh sáng ghép từ/vào sợi quang được dễ dàng hơn.

Hình 6.25(e) trình bày ví dụ về chuyển mạch quang. Một cặp sợi quang ở ngõ vào chuyển từ vị trí này sang vị trí khác để thực hiện việc chuyển mạch tín hiệu quang.

Nguyên lý của việc làm mất tác dụng của toàn bộ ánh sáng phản xạ bên trong (FTIR Frustration of Total Internal Reflection) được ứng dụng để chế tạo bộ chuyển mạch được trình bày trong hình 6.25(f). Nhắc lại là một phần ánh sáng sẽ truyền qua môi trường khúc xạ khác ngay cả khi không có ánh sáng phản xạ bên trong. Ta gọi ánh sáng được truyền qua này là sóng suy biến (evanescent wave). Nhờ hiệu ứng này, khi lá chuyển mạch được gắn với lăng kính thì sẽ tạo ra ánh sáng phản xạ bên trong. Khi lá chuyển mạch (switching plate) tiến tới gần lăng kính, thì toàn bộ ánh sáng phản xạ bên trong bị mất tác dụng, kết quả là chùm ánh sáng phản xạ sẽ di chuyển dần dần sang hướng khác.



Hình 6.25. Nguyên lý hoạt động của các bộ chuyển mạch quang:

- (a) chuyển mạch on/off dùng SOA;
- (b) bộ ghép ống dẫn sóng chế tạo từ LiNbO₃;
- (c) chuyển mạch dùng lăng kính chuyển động;
- (d) chuyển mạch dùng gương hình cầu;
- (e) chuyển mạch bằng cách di chuyển sợi quang;
- (f) chuyển mạch ứng dụng hiệu ứng FTIR;
- (g) chuyển mạch quang-nhiệt sử dụng bộ giao thoa Mach-Zehnder.

Do đó, bằng cách di chuyển lá chuyển mạch hướng tới lăng kính, ta có thể định hướng tín hiệu ánh sáng sang sợi 3. Khi lá chuyển mạch không tiếp xúc với lăng kính, sẽ xảy ra hiện tượng phản xạ ánh sáng bên trong và tín hiệu

quang đi vào sợi 2. Chú ý là quá trình chuyển động cơ học của các linh kiện quang xảy ra rất nhanh, rất ít và chắc chắn. Nên hiện nay, các bộ chuyển mạch quang cơ học đang được sử dụng phổ biến nhất.

Hình 6.25(g) trình bày ví dụ về chuyển mạch quang nhiệt. Một bộ giao thoa Mach-Zehnder kết hợp với một bộ dịch pha gắn trong mỗi nhánh giao thoa. Bằng hơi nóng, ta có thể điều khiển số lượng bộ dịch pha, nghĩa là có thể định hướng tín hiệu quang sang sợi 2 hoặc sợi 3.

Các chuyển mạch quang nhiệt có tốc độ chuyển mạch nhanh hơn so với các bộ chuyển mạch quang cơ học, và quan trọng nhất là, chúng có thể được thực hiện theo công nghệ trạng thái rắn planar (planar solid-state) như các ma trận chuyển mạch lớn.

Một số tham số chính quy định đặc tính của các bộ chuyển mạch:

- Tỉ số tắt mở (extinction ratio): thể hiện đặc tính của bộ chuyển mạch on/off. Đây là tỉ số giữa năng lượng ánh sáng khi chuyển mạch ở trạng thái on và năng lượng ánh sáng khi chuyển mạch ở trạng thái off. Giá trị này càng cao càng tốt, thường nằm trong khoảng từ 45 đến 50 dB.
- Suy hao xen (insertion loss): là đơn vị đo công suất suy hao do bộ chuyển mạch gây ra thường có giá trị khoảng 0.5 dB.
- Nhiễu xuyên âm (crosstalk): tỉ số giữa công suất ngõ ra được tạo ra bởi ngõ vào mong muốn và công suất ngõ ra được tạo ra bởi ngõ vào không mong muốn. Giá trị này càng cao càng tốt, thường khoảng 80 dB.
- Thời gian chuyển mạch (switching time): là tham số rất quan trọng. Khi sử dụng các bộ lọc hiệu chỉnh được, thời gian chuyển mạch yêu cầu phụ thuộc vào các ứng dụng của chuyển mạch. Đối với các mạng chuyển mạch kênh ngày nay, thời gian chuyển mạch khoảng cỡ μ s, thậm chí cỡ ms, nhưng đối với các mạng quang chuyển mạch gói, thời gian chuyển mạch chỉ khoảng vài ns, thậm chí khoảng ps. Các bộ chuyển mạch đơn quang-cơ học và quang-nhiệt có thời gian chuyển mạch nằm trong khoảng từ 2 đến 20 ms, trong khi các bộ chuyển mạch đơn quang-điện có thời gian chuyển mạch cỡ ns.

Ngoài những tham số kể ra trên đây, trong tài liệu tham khảo đặc tính của phần tử chuyển mạch còn có một số tham số như dải bước sóng hoạt động, PDL, và nhiệt độ phòng.

b) Các khối chuyển mạch quang lớn (multistage/large optical switch)

Các khối chuyển mạch quang với số lượng cổng từ vài trăm đến vài ngàn đang được nghiên cứu cho hệ thống mạng quang thế hệ tiếp theo. Khi thiết kế các khối chuyển mạch quang lớn, cần quan tâm đến các vấn đề sau:

- *Số lượng của các phần tử chuyển mạch cần thiết: các bộ chuyển mạch lớn được tạo thành từ các phần tử chuyển mạch theo nhiều cách khác nhau, như sẽ trình bày bên dưới. Chi phí và độ phức tạp của khối chuyển mạch phụ thuộc vào số phần tử chuyển mạch được yêu cầu, cách đóng gói, ghép nối, phương pháp chế tạo và điều khiển.*
- *Tính đồng nhất của suy hao: các bộ chuyển mạch có thể tạo ra suy hao khác nhau cho từng kết nối khác nhau của ngõ vào và ngõ ra. Khối chuyển mạch càng lớn thì sự khác nhau về suy hao càng nhiều. Đánh giá tính đồng nhất của suy hao bằng cách xem xét số phần tử chuyển mạch tối thiểu và tối đa trên đường dẫn quang đối với từng kết nối ngõ vào/ra khác nhau.*
- *Số điểm nối chéo trong khối chuyển mạch: thông số này đặc biệt quan trọng trong việc chế tạo các khối chuyển mạch quang. Một số khối chuyển mạch quang được tích hợp từ nhiều bộ chuyển mạch trên một mạch duy nhất. Không giống như trong các mạch điện tích hợp (IC), ở đó, các kết nối giữa nhiều linh kiện khác nhau có thể nằm trên nhiều lớp, trong các mạch quang tích hợp, tất cả các kết nối đều được tạo ra trên một lớp duy nhất bằng các ống dẫn sóng. Nếu các đường dẫn của hai ống dẫn sóng cắt nhau (tạo ra điểm nối chéo) thì sẽ xảy ra các hiệu ứng không mong muốn như suy hao công suất và hiện tượng nhiễu xuyên âm. Để hiện tượng suy hao công suất và nhiễu xuyên âm không gây ảnh hưởng đến khối chuyển mạch thì phải tối thiểu hoá hoặc hạn chế hoàn toàn các điểm cắt nhau này.*
- *Các đặc tính nghẽn: về chức năng, có thể chia khối chuyển mạch thành hai loại: nghẽn và không nghẽn. Khối chuyển mạch gọi là không nghẽn khi một cổng ngõ vào nào đó đang rỗi có thể kết nối với bất kỳ ngõ ra nào cũng đang rỗi. Ví dụ, một khối chuyển mạch không nghẽn có khả năng thực hiện mọi kết nối từ ngõ vào đến ngõ ra. Nếu trong khối chuyển mạch có một số kết nối không thể thực hiện được, thì khối chuyển mạch này được gọi xem là có nghẽn. Phần lớn các ứng dụng đều yêu cầu chuyển mạch không nghẽn. Với chuyển mạch không nghẽn có thể phân thành hai loại là: chuyển mạch không nghẽn theo nghĩa rộng (wide-sense nonblocking), và chuyển mạch không nghẽn theo nghĩa hẹp (strict-sense non-blocking). Theo nghĩa rộng, bất kỳ ngõ vào nào chưa được sử dụng cũng có thể kết nối với bất kỳ ngõ ra nào cũng chưa được sử dụng mà không cần phải định tuyến lại các kết nối đang tồn tại; khối chuyển mạch dạng này sử dụng các thuật toán định tuyến đặc trưng để định tuyến cho các kết nối hiện có sao cho đảm bảo không xảy ra nghẽn cho các kết nối tiếp sau đó. Theo nghĩa hẹp, bất kỳ ngõ vào nào chưa được sử dụng cũng được kết nối với bất kỳ ngõ ra nào*

cũng chưa được sử dụng mà không cần quan tâm đến trạng thái của các kết nối trước đó trong khối chuyển mạch.

Một khối chuyển mạch không nghẽn yêu cầu việc định tuyến lại cho các kết nối để đảm bảo thuộc tính không nghẽn được gọi là khối chuyển mạch không nghẽn sắp xếp lại (rearrangeably non-blocking switch). Việc định tuyến lại các kết nối có thể hoặc không thể được chấp nhận còn tùy thuộc vào ứng dụng vì chắc chắn các kết nối sẽ bị ngắt trong một khoảng thời gian nào đó khi chúng được chuyển mạch sang đường dẫn khác. So với các cấu trúc chuyển mạch không nghẽn theo nghĩa rộng, ưu điểm của các cấu trúc chuyển mạch không nghẽn sắp xếp lại là sử dụng càng ít các bộ chuyển mạch nhỏ thì kích thước của khối chuyển mạch càng lớn. Tuy nhiên, khi các cấu trúc không nghẽn sắp xếp lại sử dụng càng ít bộ chuyển mạch nhỏ thì thuật toán điều khiển để thiết lập kết nối của chúng càng phức tạp, nhưng nói chung với công nghệ vi xử lý áp dụng trong khối chuyển mạch ngày nay, thì đây là vấn đề nhỏ, không quan trọng. Nhược điểm lớn nhất của các khối chuyển mạch không nghẽn sắp xếp lại là không thể phục vụ cho các ứng dụng không cho phép ngắt các kết nối đang tồn tại, thậm chí trong khoảng thời gian cực ngắn khi cần thiết lập một kết nối mới.

Rõ ràng, tùy thuộc vào ứng dụng của khối chuyển mạch trên thực tế một thông số có thể được ưu tiên hơn các thông số khác.

Bảng sau đây trình bày sự so sánh giữa các cấu trúc chuyển mạch khác nhau, trong đó cấu trúc Spanke dùng các bộ chuyển mạch $1 \times n$, các cấu trúc còn lại đều hình thành từ bộ chuyển mạch 2×2 .

Bảng 1.2 So sánh giữa các cấu trúc chuyển mạch khác nhau.

	Loại không nghẽn	Số bộ chuyển mạch	Suy hao lớn nhất	Suy hao nhỏ nhất
Crossbar	Wide-sense	n^2	$2n-1$	1
Clos	Strict-sense	$4\sqrt{2}n^{1.5}$	$5\sqrt{2n} - 5$	3
Spanke	Strict-sense	$2n$	2	2
Benes	Rearrangeable	$\frac{n}{2}(2\log_2 n - 1)$	$2\log_2 n - 1$	$2\log_2 n - 1$
Spanke-Benes	Rearrangeable	$\frac{n}{2}(n - 1)$	n	$\frac{n}{2}$

6.4.6. Bộ chuyển đổi bước sóng

Bộ chuyển đổi bước sóng là thiết bị chuyển đổi tín hiệu có bước sóng này ở đầu vào ra thành tín hiệu có bước sóng khác ở đầu ra. Đối với hệ thống WDM, bộ chuyển đổi bước sóng cho nhiều ứng dụng hữu ích khác nhau:

- Tín hiệu có thể đi vào mạng với bước sóng không thích hợp khi truyền trong mạng WDM. Chẳng hạn như hiện nay các thiết bị WDM trên thế giới đa số đều chỉ có khả năng hoạt động trên các bước sóng thuộc băng C và băng L, nhưng tín hiệu SDH hoạt động với bước sóng 1310 nm có thể truyền trên hệ thống WDM nhờ các bộ chuyển đổi bước sóng đặt ở biên giới giữa mạng WDM và mạng SDH, chuyển đổi tín hiệu từ bước sóng 1310 nm sang tín hiệu tương thích với bước sóng theo qui định ITU-T hoạt động ở vùng 1550 nm.
- Bộ chuyển đổi khi được trang bị trong các cấu hình nút mạng WDM giúp sử dụng tài nguyên bước sóng hiệu quả hơn, linh động hơn.

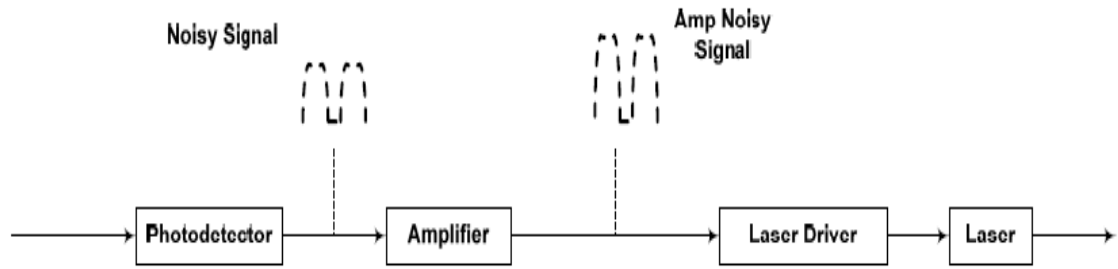
Có bốn phương pháp chế tạo bộ chuyển đổi bước sóng: phương pháp quang-điện, phương pháp cửa quang, phương pháp giao thoa và phương pháp trộn bước sóng. Phương pháp trộn bước sóng là phương pháp toàn quang, hoạt động hoàn toàn không dựa vào tín hiệu điện, tuy nhiên hiện tại công nghệ chế tạo theo phương pháp này vẫn chưa đủ hoàn thiện để có thể thương mại hoá.

a) Tạo bằng phương pháp quang-điện

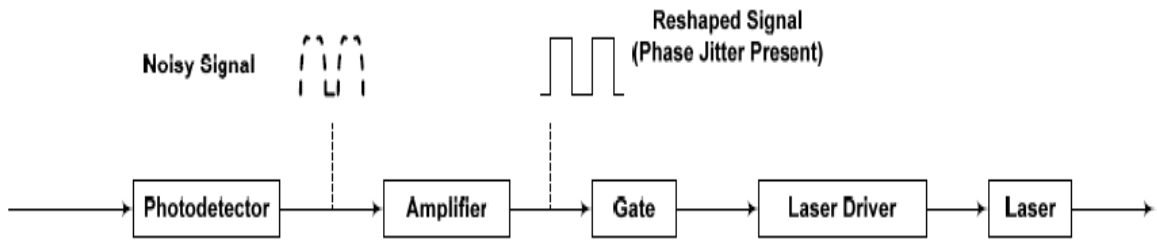
Đây là phương pháp chế tạo bộ chuyển đổi bước sóng đơn giản và phổ biến nhất hiện nay.

Tín hiệu đầu vào trước hết được chuyển sang dạng tín hiệu điện, tái tạo lại và sau đó được một bộ phát laser phát bước sóng khác. Thường các bộ chuyển đổi bước sóng đầu vào biến đổi-đầu ra cố định dùng phương pháp chế tạo này. Tính trong suốt của thiết bị loại này phụ thuộc vào kiểu tái tạo (regeneration) của thiết bị đối với tín hiệu:

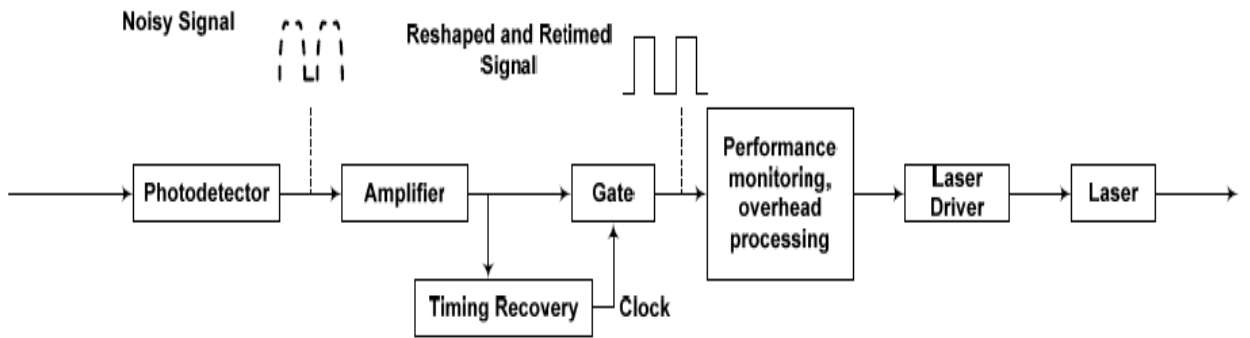
- Tái tạo 1R: đầu thu đơn giản chỉ chuyển đổi tín hiệu đầu vào từ dạng năng lượng các hạt photon ánh sáng sang các hạt điện tử, sau đó các hạt điện tử được khuếch đại bởi một bộ khuếch đại tương tự RF (Radio Frequency) và phát ra tia laser với bước sóng thích hợp.
- Tái tạo 2R: phương pháp tái tạo này chỉ áp dụng được khi tín hiệu đầu vào là tín hiệu số. Tín hiệu được sửa lại dáng xung (reshaped) nhờ cho đi qua cổng logic, không thực hiện đồng bộ lại tín hiệu (retimed) nên phương pháp chế tạo này dễ làm nảy sinh hiện tượng Jitter.
- Tái tạo 3R: thực hiện đồng thời việc sửa dáng xung và đồng bộ lại cho tín hiệu. Phương pháp này giúp xoá bỏ những ảnh hưởng đến dạng của tín hiệu do các yếu tố như: phi tuyến tính, tán sắc trong sợi quang, nhiễu của bộ khuếch đại... Tuy nhiên, để đồng bộ lại tín hiệu mỗi bộ chuyển đổi bước sóng chỉ hoạt động tương ứng với một luồng tín hiệu số có tốc độ bit nhất định, giảm tính trong suốt của thiết bị.



(a)



(b)



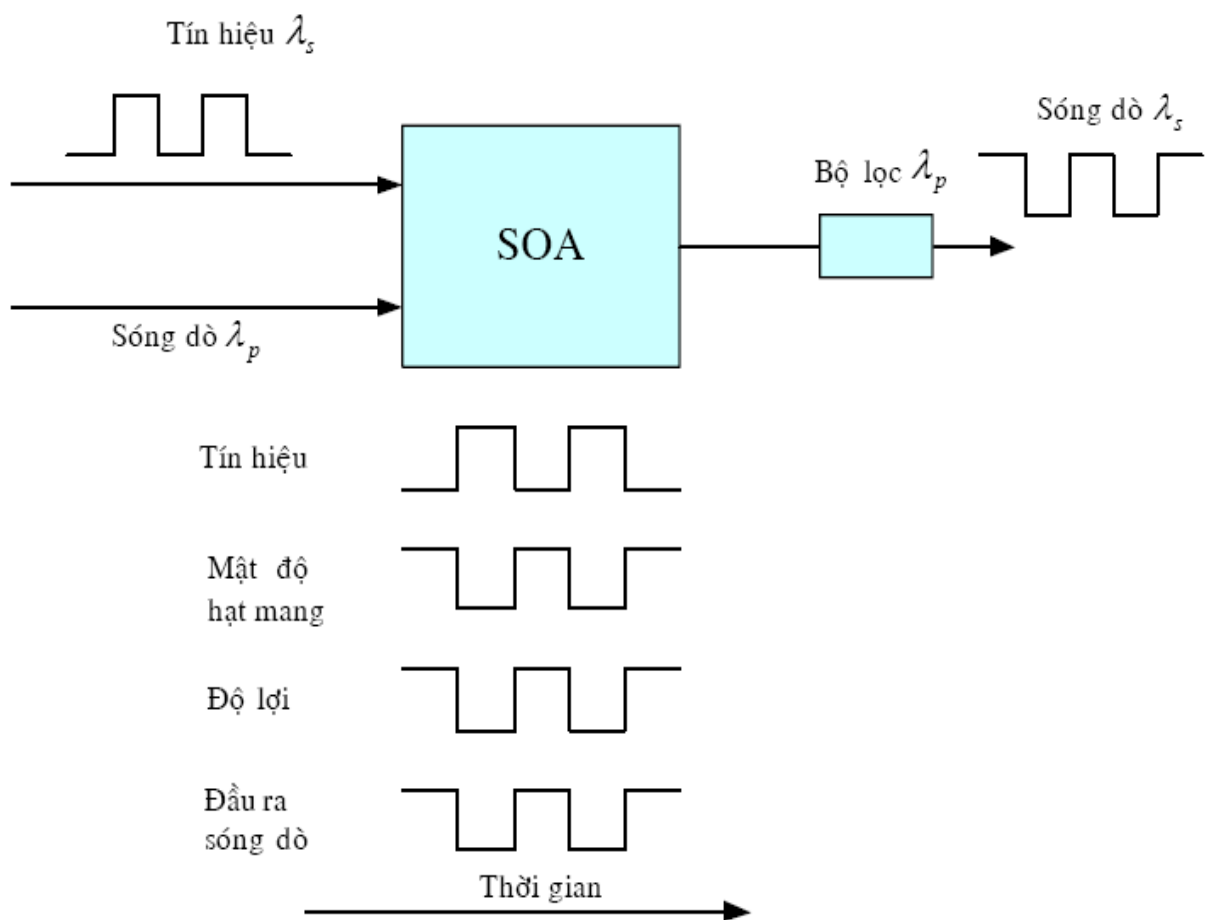
(c)

Hình 6.26. Các loại chuyển đổi bước sóng quang điện: (a) 1R; (b) 2R; (c) 3R

b) Chế tạo bằng phương pháp cửa quang

Phương pháp chế tạo các bộ chuyển đổi bước sóng dùng phương pháp cửa quang tận dụng tính chất của một số thiết bị quang có đặc tính đầu ra thay đổi theo cường độ tín hiệu. Sự thay đổi này được chuyển đến tín hiệu chưa được điều chế, gọi là tín hiệu dò (probe signal) cấu hình cho đi xuyên qua thiết bị. Tại đầu ra, tín hiệu dò mang thông tin chứa trong tín hiệu đầu vào. Các thiết bị chế tạo theo phương pháp này thường thuộc dạng đầu vào thay đổi-đầu ra cố định, hoặc đầu vào thay đổi-đầu ra thay đổi tùy theo tín hiệu dò là cố định hoặc có thể điều chỉnh bước sóng không.

Kỹ thuật chính của phương pháp này là điều chế chéo độ lợi CGM (Cross-Gain Modulation), tận dụng hiệu ứng phi tuyến trong một bộ khuếch đại quang bán dẫn SOA, tận dụng tính chất của SOA là có độ lợi thay đổi theo cường độ tín hiệu đi vào. Nguyên lý hoạt động của một thiết bị SOA được cấu hình làm bộ chuyển đổi bước sóng được minh họa như trên hình sau.



Hình 6.27. Bộ chuyển đổi bước sóng chế tạo theo phương pháp cửa quang.

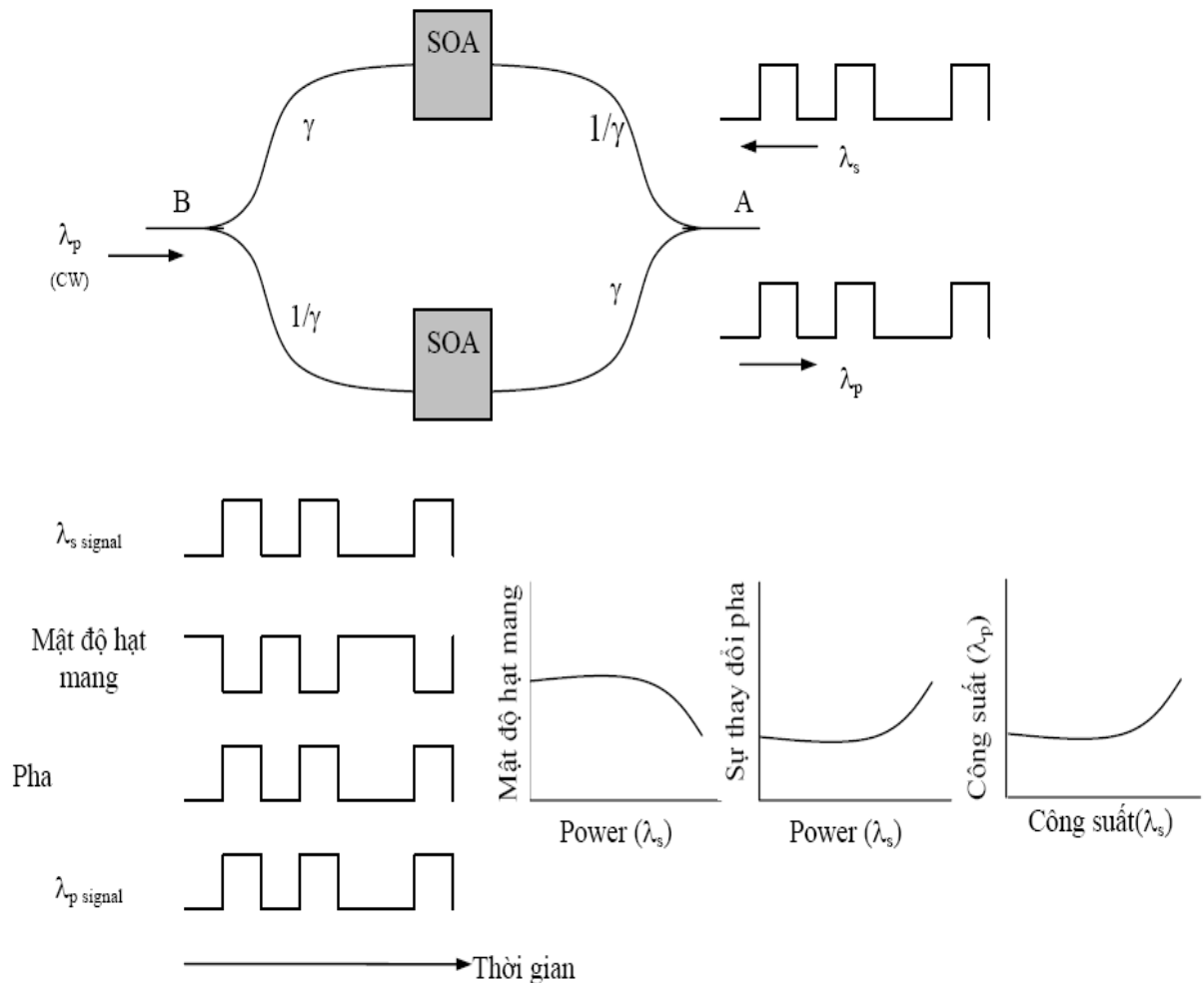
c) Chế tạo bằng phương pháp giao thoa

Kỹ thuật chính của phương pháp này chính là điều chế chéo pha. Khi cường độ sóng mang trong bộ khuếch đại thay đổi cùng với tín hiệu đầu vào,

nó làm thay đổi chiết suất của môi trường độ lợi, dẫn đến thay đổi pha của tín hiệu dò.

Hiện tượng điều chế pha kiểu này có thể chuyển sang điều chế biên độ bằng cách dùng bộ lọc Mach-Zehnder. Trong đó, cả hai nhánh của bộ lọc Mach-Zehnder đều có cùng chiều dài, mỗi nhánh dùng kết hợp thêm với một bộ khuếch đại SOA

Tại đầu vào của bộ lọc Mach-Zehnder dùng bộ Coupler tách tín hiệu đi theo hai nhánh của bộ lọc theo tỉ lệ không đều nhau. Do cường độ tín hiệu đi trên mỗi nhánh không đều nhau nên khi đi qua các bộ SOA sẽ bị dịch pha các lượng không giống nhau. Theo nguyên lý hoạt động của MZI, sự lệch pha giữa hai tín hiệu này được chuyển đến một tín hiệu điều chế biên độ ở đầu ra truyền với bước sóng khác.



Hình 6.28. Biến đổi bước sóng bằng điều chế xuyên pha

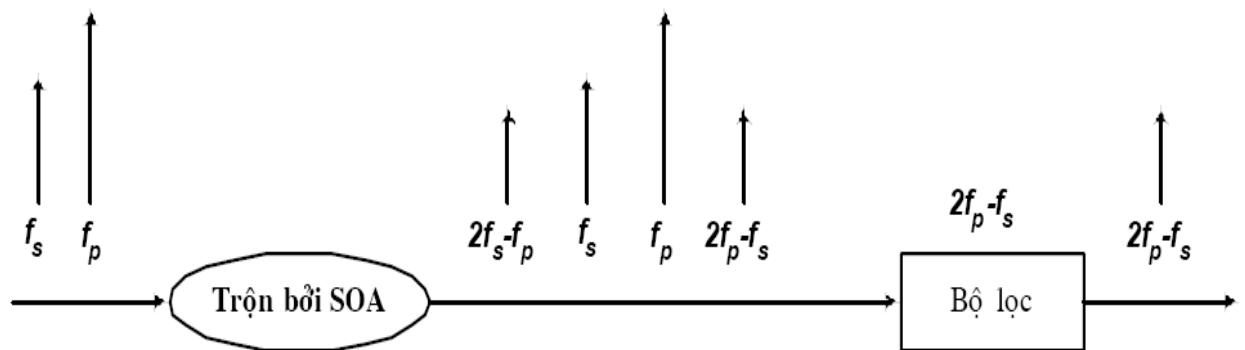
sử dụng bộ khuếch đại quang bán dẫn có gắn bộ lọc Mach-Zehnder bên trong

d) Chế tạo bằng phương pháp trộn bước sóng

Phương pháp chế tạo này dựa trên hiện tượng trộn bốn bước sóng, trong đó nếu có ba bước sóng f_1, f_2, f_3 cùng truyền trong sợi quang thì theo hiện

tương phi tuyến tính sẽ xuất hiện sóng ảnh hưởng do hiệu ứng phi tuyến tính được tính là: $f_1+f_2-f_3$. Ứng dụng cho bộ chuyển đổi bước sóng khi $f_1 = f_2$ và sau đó cho qua bộ khuếch đại SOA. Giả sử sóng vào kí hiệu là f_s và sóng dò là f_p , bộ khuếch đại SOA được cấu hình sao cho một trong hai bước sóng sinh do hiện tượng FWM $2f_p-f_s$ và $2f_s-f_p$ nằm trong băng thông hoạt động của tín hiệu, khi đó ta đã thực hiện được chức năng chuyển đổi bước sóng.

Ưu điểm của phương pháp chế tạo này là tính trong suốt đối với các định dạng tín hiệu, nghĩa là có thể hoạt động với nhiều tốc độ bit khác nhau. Tuy nhiên, nhược điểm là khi khoảng cách giữa bước sóng tín hiệu f_s và bước sóng dò f_p tăng thì hiệu quả chuyển đổi bước sóng sẽ giảm.



Hình 6.29. Chuyển đổi bước sóng bằng cách trộn bốn bước sóng trong bộ khuếch đại quang

Chương 7

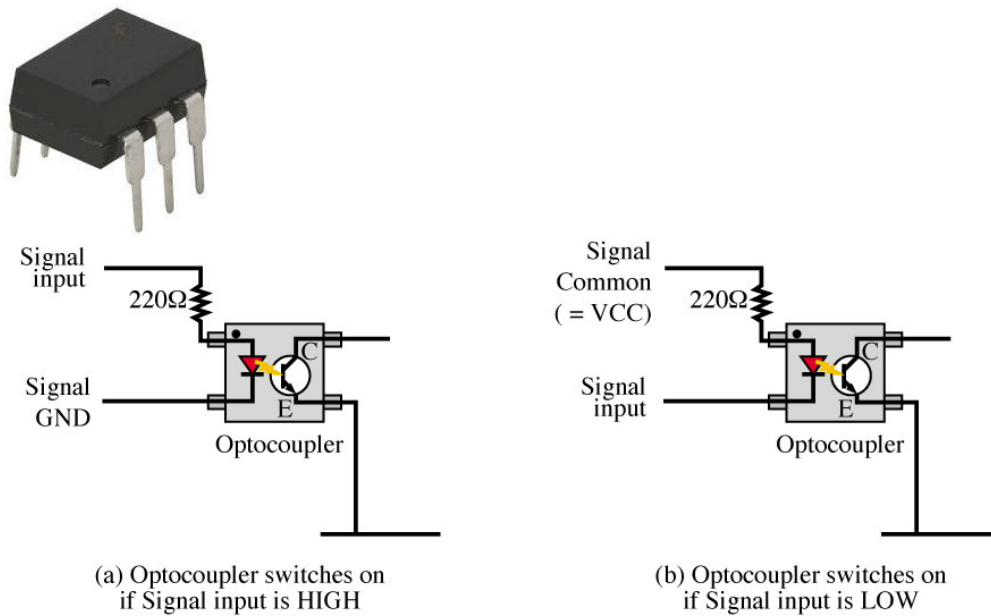
GHÉP QUANG VÀ KHUẾCH ĐẠI QUANG

7.1. Ghép quang

Bộ ghép quang còn gọi là Photo coupled isolator, Photo-couplers, Photo-coupled pairs và Optically Coupled pairs. Từ thông thường nhất cho linh kiện này là Opto-Couplers. Bộ ghép quang dùng để truyền đạt tín hiệu và đồng thời tạo sự cách điện giữa những mạch điện. Ngoài ra nó còn dùng tránh các vòng đất (ground circuit circuit terrestre) gây nhiễu trong mạch điện. Sự truyền đạt tín hiệu được thực hiện qua ánh sáng.

7.1.1. Cơ chế hoạt động

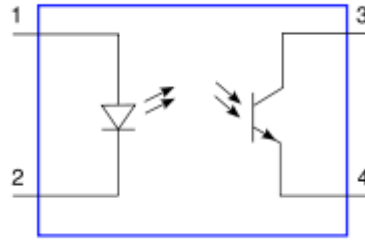
Thông thường bộ ghép quang gồm 1 diot với vật liệu bán dẫn loại III/V (v.d.GaAs) phát ra tia hồng ngoại và 1 phototransistor với vật liệu silic. Với dòng điện thuận, diot phát ra bức xạ hồng ngoại với chiều dài sóng khoảng 650-950nm. Dòng điện thuận I_F có cường độ khoảng 1-30mA.



Hình 7.1. Opto-Couplers

Năng lượng bức xạ này được chiếu lên trên bề mặt của phototransistor (face to face) hay chiếu gián tiếp qua một môi trường dẫn quang. Bộ ghép quang face to face thường được dùng nhất.

Đầu tín hiệu được phân phát (LED hồng ngoại) trong bộ ghép quang biến thành tín hiệu ánh sáng. Sau đó tín hiệu ánh sáng được phân nhận (photodiode, phototransistor, IC có tổ hợp diode) biến lại thành tín hiệu điện



Hình 7.2. Nguyên lý làm việc của Opto-Couplers

Tùy theo loại bộ ghép quang tần số truyền đạt tín hiệu có thể từ DC đến 20MHz. Bộ ghép quang được 1 vỏ nhựa loại DIP (Dual-In-Line-Plastic) bảo vệ. Vỏ nhựa này chắn sáng và cách điện. Phân phát và phân thu được ghép bằng 1 loại nhựa trong suốt và cách điện.

7.1.2. Các tính chất quan trọng

1. Tính cách điện

Như đã nói bộ ghép quang thường được dùng để cách điện giữa 2 mạch điện có điện thế cách biệt khá lớn. Bộ ghép quang có thể làm việc với dòng điện 1 chiều hay tín hiệu điện có tần số khá cao. Đặc biệt với thể tích nhỏ bé, bộ ghép quang tỏ ra ưu việt hơn so với biến thế.

2. Điện trở cách điện

Đó là điện trở với dòng điện 1 chiều giữa ngõ vào và ngõ ra của bộ ghép quang. Nó có trị số bé nhất là $10^{11}\Omega$, như thế đủ đáp ứng yêu cầu thông thường. Như thế chúng ta cần chú ý, với dòng điện rò trong khoảng nA có thể ảnh hưởng đến hoạt động của mạch điện, ví dụ khi dòng điện rò chạy vào cực gốc của phototransistor còn để trống. Gặp trường hợp này ta có thể tạo những khe trống trên mạch in hay 1 đường mạch in nối với điện thế đất giữa ngõ ra và ngõ vào. Với bộ ghép quang ta cần có mạch in loại tốt.

3. Điện dung ghép nối

Sự miễn nhiễm tín hiệu đồng hành (common mode transient immunity)

Cấu trúc của bộ ghép quang gồm có phototransistor, LED, phần cơ. Giữa các phần tử này có thể tạo ra 1 điện dung từ 0.3...2pF. Điện dung này được đo khi chân ở ngõ vào cũng như chân ở ngõ ra được nối tắt. Với sự thay đổi cao áp khá nhanh ($500V/\mu s$ – ví dụ do những xung điện nhiễu trong lưới điện) giữa ngõ ra và ngõ vào, điện dung ký sinh có thể truyền đi sự thay đổi này và xung điện ở ngõ ra có những gai nhọn. Trong trường hợp này, nên sử dụng bộ

ghép quang không có chân nối với cực gốc, và giữa cực thu và cực phát nên nối 1 tụ điện để làm giảm gai nhiễu xung ra. Để không tạo thêm điện dung ký sinh, với bộ ghép quang ta không nên dùng chân để cắm IC. Với trị số điện dung ghép nối càng bé ta có sự miễn nhiễu đồng hành càng tốt.

4. Điện thế cách ly:

Điện thế cách ly là điện thế cao nhất giữa ngõ vào và ra mà bộ ghép quang có thể chịu đựng nổi. Điện thế cách ly còn tùy thuộc vào cấu trúc của bộ ghép quang, không khí...

5. Hiệu ứng trường

Dưới 1 một thế khá cao giữa LED và phototransistor có khoảng cách khá gần, ta có 1 điện trường khá lớn. Nếu bộ ghép quang làm việc với điều kiện như thế liên tục vài ngày, các thông số của bộ ghép quang (đặc biệt là phototransistor) bị thay đổi.

Hiệu ứng trường càng rõ ràng hơn với nhiệt độ cao (100°) và 1 điện thế 1 chiều khá cao (1kV). Các thông số như độ khuếch đại, điện áp và dòng điện ngược có thể bị thay đổi, với 1 điện trường khá lớn

So với transistor, các thông số của LED rất ổn định dưới tác dụng của điện trường. Người ta có thể bảo vệ lớp chuyển tiếp pn của transistor silic bằng 1 màng ion trong suốt để chống lại ảnh hưởng của điện trường (Transparent Ion Shield – Trios)

6. Sự lão hoá

Với thời gian, công suất phát sáng của LED bị giảm đi, do đó ta có hệ số truyền đạt của 1 bộ ghép quang bé đi. Người ta tránh sự lão hoá của 1 bộ ghép quang bằng phương pháp “Burn in”. Sau khi sản xuất, các bộ ghép quang được cho làm việc với dòng điện và với nhiệt độ xung quanh khá lớn trong 1 thời gian (ví dụ 24 giờ). Do đó bộ ghép quang bị lão hoá trước và nó không bị lão hoá nhanh như các bộ ghép quang chưa qua “Burn in”. Để cho bộ ghép quang làm việc lâu dài không bị lão hoá nhanh, nhiệt độ xung quanh và dòng điện làm việc càng thấp càng tốt.

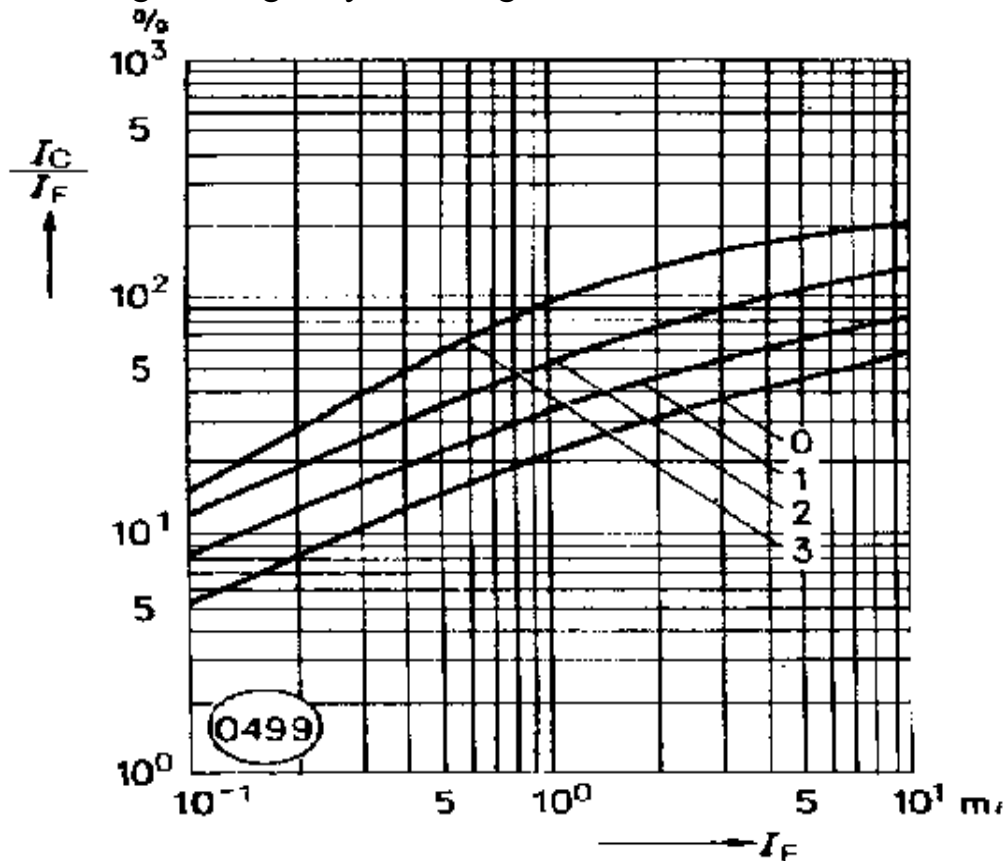
7. Hệ số truyền đạt

Hệ số truyền đạt (current transfer ratio-CTR) giống như độ khuếch đại dòng điện của 1 transistor. Hệ số truyền đạt là hệ số tính theo phần trăm cho biết dòng điện đi ra (ví dụ của 1 phototransistor) lớn hơn so với dòng điện vào của LED hồng ngoại trong 1 bộ ghép quang ($CTR = (I_C/I_F) \times 100\%$)

Theo sơ đồ mạch dưới, ta có thể đo được hệ số truyền đạt. Nguồn dòng I_F có thể tạo bằng 1 điện áp ổn định nối tiếp với 1 điện trở. Trong đặc trưng kỹ thuật của 4 loại bộ ghép quang CNY17...ta có sự liên hệ giữa dòng điện I_F qua LED và hệ số truyền đạt. Sự liên hệ này không tuyến tính. Cả cường độ chiếu sáng của LED hồng ngoại và độ khuếch đại của phototransistor cũng đều

gia tăng nhanh khi I_F tăng. Với dòng I_F khá lớn, đặt tuyến không còn dốc nhiều nữa. Cường độ chiếu sáng của LED không còn tăng theo I_F và phototransistor cũng bão hòa. Như thế bộ ghép quang chỉ hoạt động với tín hiệu tương đối bé.

Trong bộ ghép quang digital phần nhận là 1 mạch tổ hợp, trị số CTR không còn ý nghĩa. Ở đây người ta chỉ cần biết với cường độ dòng điện ở ngõ vào để có trạng thái High hay Low ở ngõ ra.



Hình 7.3. Hệ số truyền đạt

8. Độ rộng dải tần số - Tần số truyền đạt:

Các bộ ghép quang hiện nay có thể đạt đến tần số

- Bộ ghép quang loại transistor đến 250kHz.
- Bộ ghép quang với bộ nhận tổ hợp đơn giản (photodiode, transistor nhanh) đến 2MHz.
- Bộ ghép quang với bộ nhận là mạch tổ hợp (IC) đến 20 MHz.

7.1.3. Các sự lựa chọn khi dùng bộ ghép quang

Để đáp ứng các đòi hỏi cho từng ứng dụng các bộ ghép quang được chọn và thử nghiệm đặc biệt.

1/ Đảm bảo sự cách điện:

Với điện thế $V_{IO} = 500V$ và ở nhiệt độ $175^{\circ}C$ điện trở cách nhiệt phải $\geq 10^9 \Omega$. để đảm bảo sự cách điện này bộ ghép quang phải làm việc với các thông số giới hạn bằng những mạch điện bảo vệ.

2/Bộ ghép quang được thử nghiệm 100% để đảm bảo thời gian chuyển tiếp ngắn.

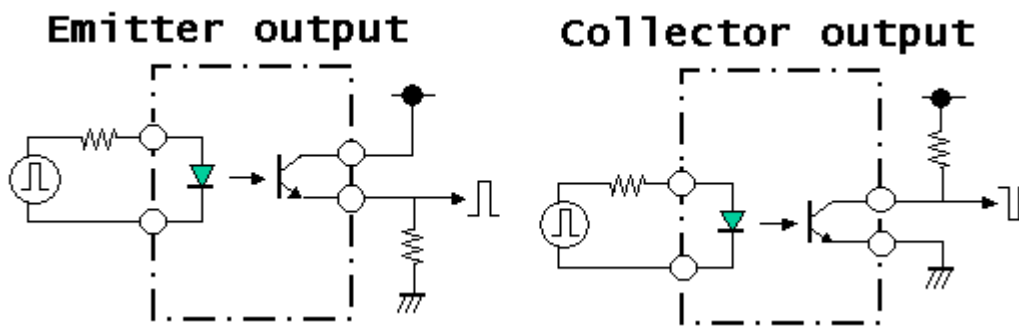
$$t_{on} \leq 4,5 \mu s \quad (I_F = 10mA)$$

$$t_{off} \leq 4,5 \mu s \quad (I_F = 10mA)$$

3/ Có độ ổn định cao hơn với ảnh hưởng môi trường:

Vì lý do kinh tế vỏ bọc bộ ghép quang không được làm bằng kim loại hay gốm mà làm bằng plastic dù phẩm chất tồi hơn. Trong những điều kiện nóng ($25-55^{\circ}C$) và ẩm (trên 90% độ ẩm tương đối, hàm ẩm trong không khí có thể thấm vào bên trong linh kiện và làm đặc cách điện giảm đi. Người ta có thể dùng silicon bọc bên ngoài.

7.1.4. Bộ ghép quang với phototransistor

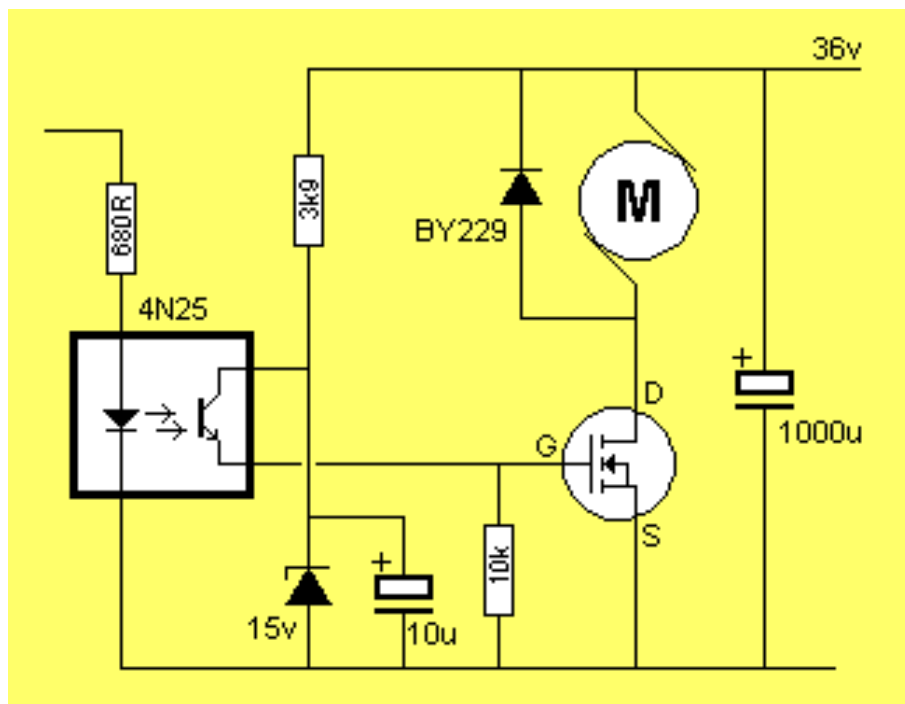
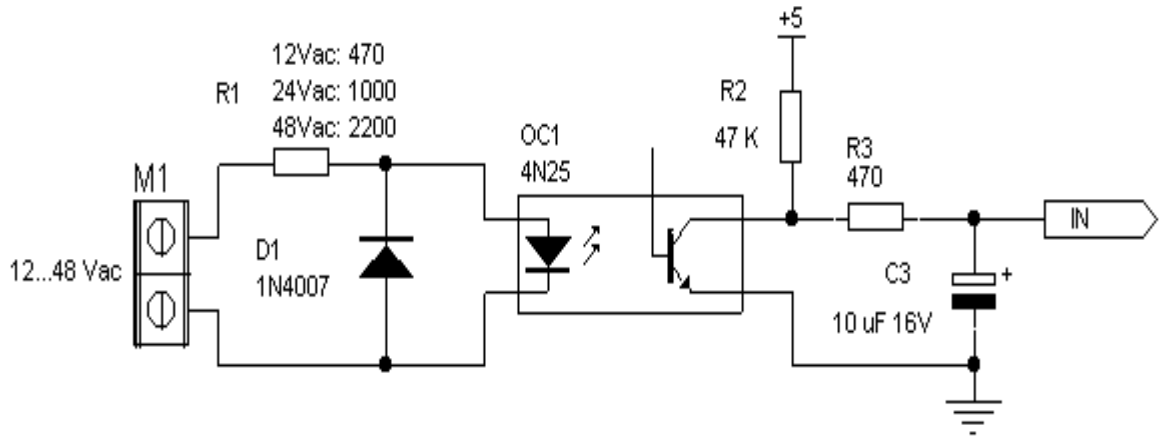


Hình 7.4.

Thông thường cực gốc của phototransistor được nối ra ngoài (ví dụ trong trường hợp với mạch phản hồi). Tuy nhiên bộ ghép quang vẫn làm việc trong trường hợp không có cực gốc. trong trường hợp không có cực gốc, bộ ghép quang có hệ số truyền đạt giữa LED và phototransistor lớn hơn, vì bề mặt cực gốc không bị che lấp 1 phần bởi công tắc của cực gốc. Tuy nhiên không có cực gốc bộ ghép quang vẫn có những bất lợi

- Bộ ghép quang làm việc không ổn định với nhiệt độ cao (vì dòng điện ngược tăng cao với nhiệt độ).
- Bộ ghép quang làm việc chậm hơn. Nếu ta nối giữa cực gốc và cực phát 1 điện trở bộ ghép quang làm việc nhanh hơn, dòng điện ngược bé hơn. Tuy nhiên hệ số truyền đạt cũng bé đi vì 1 phần dòng điện của cực gốc bị dẫn đi mất.

- Cường độ sáng của LED bị giảm đi, nhưng dòng quang điện của phototransistor gia tăng khi nhiệt độ tăng cao. Do đó bộ ghép quang làm việc khá ổn định với nhiệt độ.



Hình 7.5.

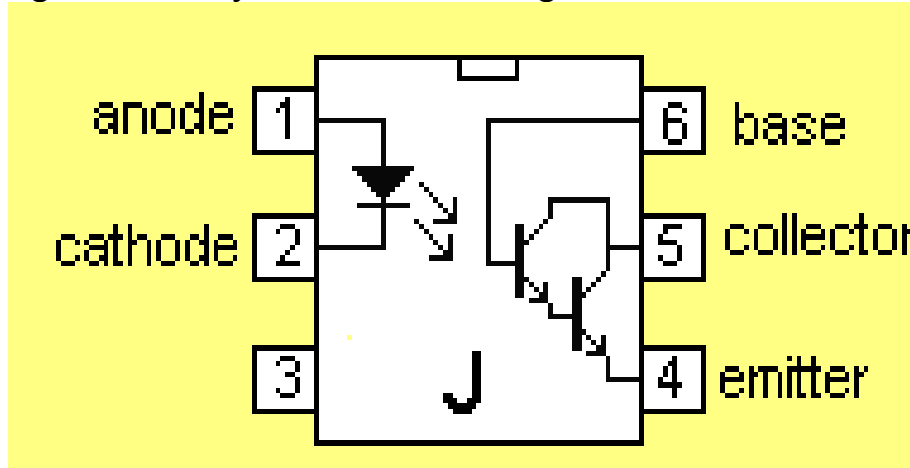
7.1.5. Bộ ghép quang với photo-darlingtontransistor

Hoạt động của một bộ ghép quang với photo-darlingtontransistor giống như với 1 phototransistor, nhưng với hệ số truyền đạt lớn hơn (từ 200...1500) nhờ sự khuếch đại khá lớn của darlington-transistor. Tuy nhiên với photo darlington-transistor ta có một số nhược điểm

- Thời gian đóng mở chậm
- Dòng tối tăng.

- Tùy thuộc nhiều vào nhiệt độ.

Với mạch điện không có điện trở ở giữa cực phát và cực gốc. Không có điện trở, bộ ghép quang có hệ số truyền đạt lớn với dòng điện qua diot nhỏ, nhưng bị ảnh hưởng bởi nhiệt độ rất lớn. Với điện trở (trong khoảng $M\Omega$) bộ ghép quang có hệ số truyền đạt bé hơn nhưng làm việc tốt với nhiệt độ cao.

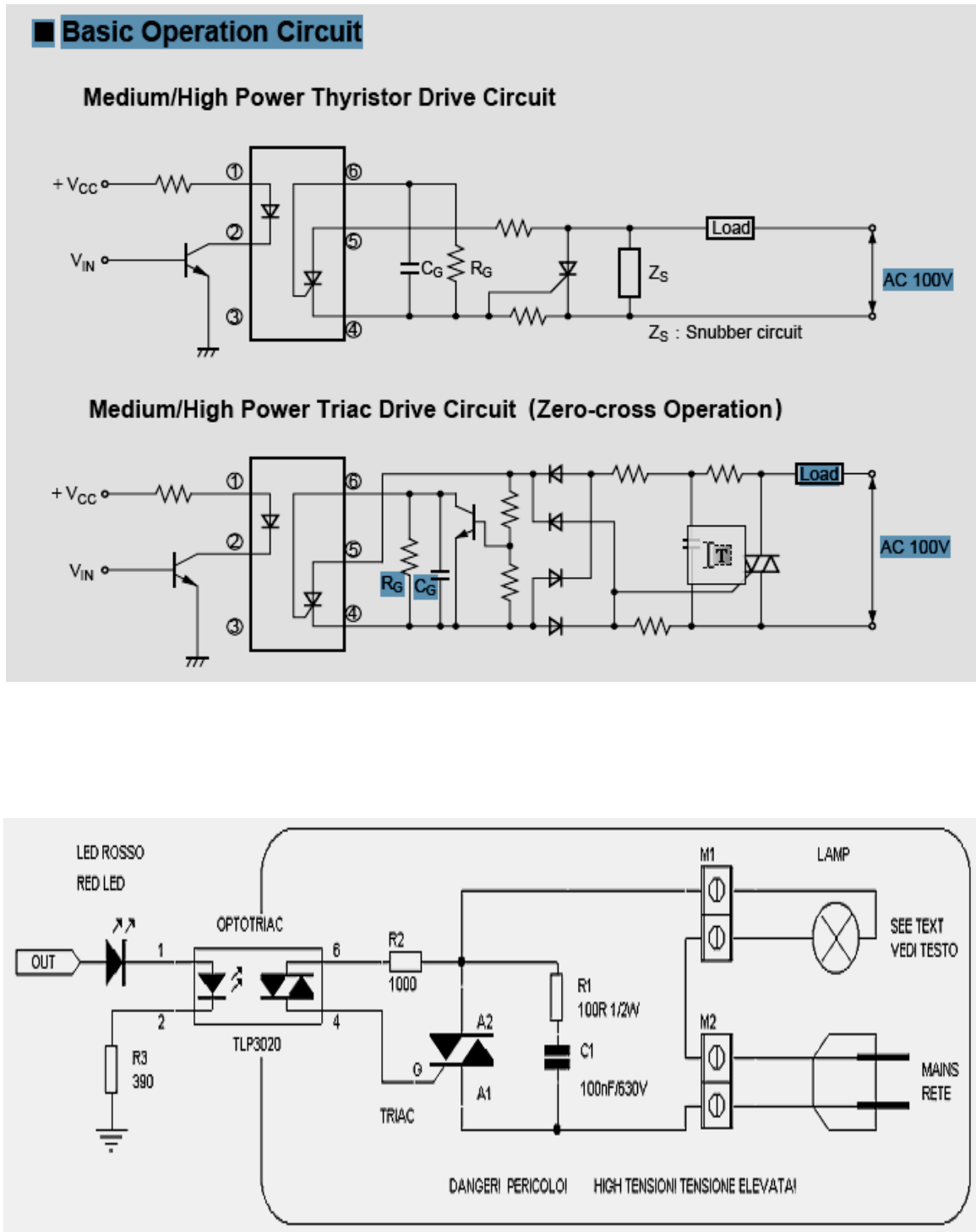


Hình 7.6.

7.1.6. Bộ ghép quang với photothyristor và phototriac

Với ánh sáng, ta có dòng điện I_B làm thông photothyristor dẫn điện. Để cho photoristor nhạy với ánh sáng nó chỉ có thể làm việc với điện áp và dòng điện bé vì cấu trúc của nó bé và mỏng.

Khi điện thế và cường độ dòng điện thay đổi nhanh theo thời gian, trị số dV/dt và di/dt khá lớn, thyristor có thể tự kích và dẫn điện ngoài ý muốn. Để chống lại hiệu ứng này, ta có thể nối 1 điện trở R_{gk} giữa catôt và Gate. Với trị số R_{gk} bé, chống nhiễu dV/dt tốt, nhưng cần dòng điện I_f qua LED lớn, ngược lại với trị số R_{gk} lớn (từ 10k đến 100k), dòng I_f bé nhưng chống nhiễu dV/dt tồi.



Hình 7.7.

7.1.7. Một số lưu ý cơ bản với bộ ghép quang
Với mạch điều khiển

- Để điều khiển các bộ ghép quang ,ta cần dòng vào cho LED hồng ngoại là 10mA và dòng ra cho phototransistor khoảng 2mA là bé nhất .Để giảm thời gian lên (rise time) và thời gian trễ (propagation delay),dòng diốt hồng ngoại có thể giảm còn 1mA nhưng chống nhiễu tồi.
- Với các mạch điện trên ,bộ ghép quang có thể thay thế các rơ-le.Bộ ghép quang làm việc nhanh hơn,không có hiện tượng nảy (contact bounce), an toàn hơn và cách điện tốt hơn.Tuy nhiên rơ-le làm việc với dòng điện lớn hơn ,điện thế ở ngõ ra lớn hơn,điện trở khi rơ-le nối điện nhỏ hơn và điện trở ngắt điện cao hơn.
- Bộ ghép quang có thể thay thế các biến thể xung.Nó có thể truyền các tín hiệu 1 chiều hay tín hiệu có tần số thấp.Trong khi đó biến thể xung chỉ có thể làm việc tốt với tần số cao và một bộ đệm (latch) để lưu giữ tín hiệu 1 chiều. Biến thể xung có thời gian lên nhanh hơn bộ ghép quang với phototransistor.
- Các IC tải và nhận tín hiệu được dùng trong việc truyền các tín hiệu digital qua các đường truyền dữ liệu rất dài trong sự hiện diện các tín hiệu nhiễu.Biên độ tín hiệu nhiễu cao nhất cho phép là không 30V.Trong nhiều trường hợp thực tế ,tín hiệu nhiễu có thể lên đến vài trăm Volt trên các đường truyền.Bộ ghép quang với độ cách điện hàng nghìn Volt tỏ ra rất hữu dụng trong trường hợp này.

Với mạch tuyến tính

Dòng điện thuận của diốt hồng ngoại phải có cường độ khoảng từ 5mA đến 20mA.Tín hiệu biến điệu (modulating signal) được ghép vào nền của điện thế 1 chiều này.

Với tần số cao phototransistor phải làm việc với 1 khuếch đại có tổng trở vào thấp,thường là khuếch đại có cực gốc nối đất

Tóm tắt đặc tính các linh kiện ghép tín hiệu

Linh kiện	Ưu điểm	Khuyết điểm
Bộ ghép quang	- Kinh tế , rẻ tiền - Có thể chế tạo với vật liệu bán dẫn	- Khi ngắt điện hay dẫn điện đều có một điện trở giới hạn (điện trở không thể bằng

	<ul style="list-style-type: none"> - Làm việc từ tín hiệu 1 chiều đến tín hiệu xoay chiều với tần số cao - Cách điện tốt đến vài KV - Tổng trở cách điện cao - Kích thước nhỏ - Không có công tắc nên không bị nảy - Công suất tiêu thụ ít 	<ul style="list-style-type: none"> zero hay vô cực) - Dòng điện khi dẫn điện và điện áp khi ngắt điện đều có trị số giới hạn - Hệ số truyền đạt CTR thấp.
Rơ-le	<ul style="list-style-type: none"> - Làm việc với công suất lớn - Khi dẫn điện có điện trở rất thấp - Có thể truyền tín hiệu 1 chiều - Cách điện tốt 	<ul style="list-style-type: none"> -Đắt tiền vì má rơ-le làm bằng kim loại quý -Công suất tiêu thụ cao -Vận tốc làm việc rất chậm -Kích thước lớn
Biến thế xung	<ul style="list-style-type: none"> -Truyền tín hiệu với vận tốc cao. -Kích thước trung bình -Có hệ số truyền đạt tốt 	<ul style="list-style-type: none"> -Không thể truyền tín hiệu 1 chiều hay xoay chiều có tần số thấp -Để cách điện(có tổng trở cao hay điện thế cao)rất đắt tiền .
IC phát và nhận tín hiệu đường dài	<ul style="list-style-type: none"> -Có thể chế tạo với vật liệu bán dẫn -Kích thước bé (Dip)/Truyền tin với vận tốc cao -Có thể truyền tín hiệu DC rẻ tiền. 	<ul style="list-style-type: none"> -Tổng trở cách điện bé -Điện thế đánh thủng rất thấp $\leq 30v$.

7.2. Khuếch đại quang

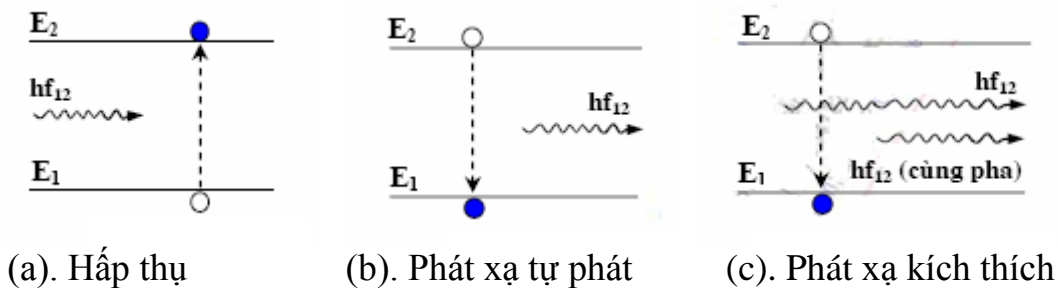
Trong các bộ khuếch đại quang (Optical Amplifier) tín hiệu ánh sáng được khuếch đại trực tiếp trong miền quang mà không thông qua việc biến đổi sang miền điện. Các bộ khuếch đại quang có các ưu điểm sau:

- Không phụ thuộc vào tốc độ bit và phương thức điều chế tín hiệu nên nâng cấp hệ thống
- Khuếch đại nhiều tín hiệu có bước sóng khác nhau cùng truyền trên một sợi quang.

7.2.1. Nguyên lý khuếch đại quang

Nguyên lý khuếch đại quang trong các bộ khuếch đại quang được thực hiện dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích và không có sự cộng hưởng xảy ra trong quá trình khuếch đại.

a. **Hiện tượng phát xạ kích thích (stimulated emission)** là một trong ba hiện tượng biến đổi quang điện được ứng dụng trong thông tin quang. Các hiện tượng này được minh họa trên hình sau



Hình 7.8. Các hiện tượng biến đổi quang điện

➤ Hiện tượng phát xạ kích thích, **hình c**, xảy ra khi một điện tử đang ở trạng thái năng lượng cao E_2 bị kích thích bởi một photon có năng lượng $h\nu_{12}$ bằng với độ chênh lệch năng lượng giữa trạng thái năng lượng cao và trạng thái năng lượng thấp của điện tử ($E_g = E_2 - E_1$). Khi đó, điện tử sẽ chuyển từ trạng thái năng lượng cao xuống trạng thái năng lượng thấp hơn và tạo ra một photon có năng lượng bằng với năng lượng của photon kích thích ban đầu.

➤ Như vậy, từ một photon ban đầu sau khi xảy ra hiện tượng phát xạ kích thích sẽ tạo ra hai photon (photon ban đầu và photon mới được tạo ra) có cùng phương truyền, cùng phân cực, cùng pha và cùng tần số (tính kết hợp, coherent, của ánh sáng). Hay nói cách khác, quá trình khuếch đại ánh sáng được thực hiện.

➤ Hiện tượng này được ứng dụng trong các bộ khuếch đại quang bán dẫn (OSA) và khuếch đại quang sợi (OFA). Hiện tượng phát xạ kích thích cũng được ứng dụng trong việc chế tạo laser.

➤ Tuy nhiên, điểm khác biệt chính giữa laser và các bộ khuếch đại quang là trong các bộ khuếch đại quang không xảy hiện tượng hồi tiếp và cộng hưởng. Vì nếu xảy ra quá trình hồi tiếp và cộng hưởng như trong laser, bộ khuếch đại quang sẽ tạo ra các ánh sáng kết hợp của riêng nó cho dù không có tín hiệu quang ở ngõ vào. Nguồn ánh sáng này được xem là nhiễu xảy ra trong bộ khuếch đại. Do vậy, khuếch đại quang có thể làm tăng công suất tín hiệu ánh sáng được đưa vào ngõ vào bộ khuếch đại nhưng không tạo ra tín hiệu quang kết hợp của riêng nó ở ngõ ra.

b. Hiện tượng hấp thụ (*absorption*)

▪ Hiện tượng hấp thụ, **hình (a)**, xảy ra khi một photon có năng lượng hf_{12} bị hấp thụ bởi một điện tử ở trạng thái năng lượng thấp. Quá trình này chỉ xảy ra khi năng lượng hf_{12} của photon bằng với độ chênh lệch năng lượng giữa trạng thái năng lượng cao và trạng thái năng lượng thấp của điện tử ($E_g = E_2 - E_1$). Khi xảy ra hiện tượng hấp thụ, điện tử sẽ nhận năng lượng từ photon và chuyển lên trạng thái năng lượng cao. Hay nói cách khác, hiện tượng hấp thụ là nguyên nhân gây suy hao cho tín hiệu quang khi đi qua bộ khuếch đại quang. Quá trình này xảy ra đồng thời với hai hiện tượng phát xạ tự phát và phát xạ kích thích trong môi trường tích cực (active medium) của bộ khuếch đại.

c. Hiện tượng phát xạ tự phát (*spontaneous emission*)

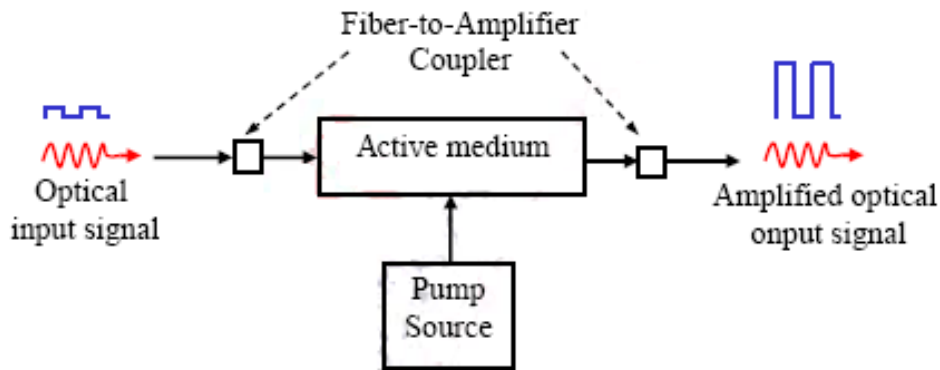
▪ Hiện tượng phát xạ tự phát, **hình (b)**, xảy ra khi một điện tử chuyển trạng thái năng lượng từ mức năng lượng cao E_2 xuống mức năng lượng thấp E_1 và phát ra một năng lượng $E_g = E_2 - E_1$ dưới dạng một photon ánh sáng. Quá trình này xảy ra một cách tự nhiên vì trạng thái năng lượng cao E_2 không phải là trạng thái năng lượng bền vững của điện tử. Sau một khoảng thời gian được gọi là thời gian sống (life time) của điện tử ở mức năng lượng cao, các điện tử sẽ tự động chuyển về trạng thái năng lượng thấp hơn (trạng thái năng lượng bền vững). Tùy theo loại vật liệu khác nhau, thời gian sống của điện tử sẽ khác nhau.

▪ Cho dù hiện tượng phát xạ tự phát tạo ra photon ánh sáng, nhưng trong khuếch đại quang, phát xạ tự phát không tạo ra độ lợi khuếch đại. Nguyên nhân là do hiện tượng này xảy ra một cách tự phát không phụ thuộc vào tín hiệu ánh sáng đưa vào bộ khuếch đại. Nếu không có ánh sáng tín hiệu đưa vào, vẫn có năng lượng ánh sáng được tạo ra ở ngõ ra của bộ khuếch đại. Ngoài ra, ánh sáng do phát xạ tự phát tạo ra không có tính kết hợp như hiện tượng phát xạ kích thích.

- Do vậy, phát xạ tự phát được xem là nguyên nhân chính gây nhiễu trong các bộ khuếch đại quang. Loại nhiễu này được gọi là nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại ASE (Amplified Spontaneous Emission noise).

7.2.2. Phân loại khuếch đại quang

Tổng quát, cấu tạo của một bộ khuếch đại quang có thể được biểu diễn như hình sau



Hình 7.9. Mô hình tổng quát của một bộ khuếch đại quang

- Trong một bộ khuếch đại quang, quá trình khuếch đại ánh sáng được diễn ra trong một môi trường được gọi vùng tích cực (active medium). Các tín hiệu quang được khuếch đại trong vùng tích cực với độ lợi lớn hay nhỏ tùy thuộc vào năng lượng được cung cấp từ một nguồn bên ngoài gọi chung là nguồn bơm (Pump Source). Các nguồn bơm này có tính chất như thế nào tùy thuộc vào loại khuếch đại quang hay nói cách khác phụ thuộc vào cấu tạo của vùng tích cực.
- Tùy theo cấu tạo của vùng tích cực, có thể chia khuếch đại quang thành hai loại chính:
 - ✓ Khuếch đại quang bán dẫn SOA (Semiconductor Optical Amplifier)
 - Vùng tích cực được cấu tạo bằng vật liệu bán dẫn.
 - Cấu trúc của vùng tích cực của SOA tương tự như vùng tích cực của laser bán dẫn. Điểm khác biệt chính giữa SOA và laser là SOA hoạt động ở trạng thái dưới mức ngưỡng phát xạ.
 - Nguồn cung cấp năng lượng để khuếch đại tín hiệu quang là dòng điện
 - ✓ Khuếch đại quang sợi OFA (Optical Fiber Amplifier)
 - Vùng tích cực là sợi quang được pha đất hiếm. Do đó, OFA còn được gọi là DFA (Doped-Fiber Amplifier)

- Nguồn bơm là năng lượng ánh sáng được cung cấp bởi các laser có bước sóng phát quang nhỏ hơn bước sóng của tín hiệu cần khuếch đại.

- Tùy theo loại đất hiếm được pha trong lõi của sợi quang, bước sóng bơm của nguồn bơm và vùng ánh sáng được khuếch đại của OFA sẽ thay đổi. Một số loại OFA tiêu biểu:

+ EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier): 1530nm – 1565nm

+ PDFA (Praseodymium-Doped Fiber Amplifier): 1280nm – 1340nm

+ TDFA (Thulium-Doped Fiber Amplifier): 1440nm -1520nm

+ NDFA (Neodymium-Doped Fiber Amplifier): 900nm, 1065nm hoặc 1400nm

⊕ Trong các loại OFA này, EDFA được sử dụng phổ biến hiện nay vì có nhiều ưu điểm về đặc tính kỹ thuật so với SOA và có vùng ánh sáng khuếch đại (1530nm-1565nm) thích hợp với dải tần hoạt động của hệ thống ghép kênh theo bước sóng mật độ cao DWDM (Dense Wavelength Division Multiplexing).

⊕ Cả hai loại khuếch đại quang SOA và EDFA đều hoạt động dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích. Ngoài ra, một loại khuếch đại quang khác cũng được sử dụng nhiều trong các hệ thống WDM hiện nay là khuếch đại Raman. Loại khuếch đại này cũng sử dụng sợi quang làm vùng tích cực để khuếch đại ánh sáng. Tuy nhiên, nguyên lý khuếch đại của khuếch đại Raman dựa trên ảnh hưởng phi tuyến của sợi quang (hiện tượng tán xạ Raman được kích thích SRS, Stimulated Raman Scattering) hơn là hiện tượng phát xạ kích thích.

7.2.3. Các thông số kỹ thuật của khuếch đại quang:

a) Độ lợi (Gain)

- Độ lợi của một bộ khuếch đại quang là tỷ số giữa công suất quang ở ngõ ra chia cho công suất quang ở ngõ vào.

$$G = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (1.1)$$

$$G(\text{dB}) = 10 \cdot \log\left[\frac{P_{out}}{P_{in}}\right] \quad (1.2)$$

- G: Độ lợi tín hiệu của bộ khuếch đại quang
- P_{in} , P_{out} công suất tín hiệu ánh sáng ở ngõ vào và ngõ ra của bộ khuếch đại quang (mW).
- Độ lợi là một thông số quan trọng của bộ khuếch đại. Nó đặc trưng cho khả năng khuếch đại công suất ánh sáng của bộ khuếch đại. Tuy vậy, độ lợi của

một bộ khuếch đại bị giới hạn bởi các cơ chế bão hòa độ lợi. Điều này làm giới hạn công suất quang ra cực đại của bộ khuếch đại.

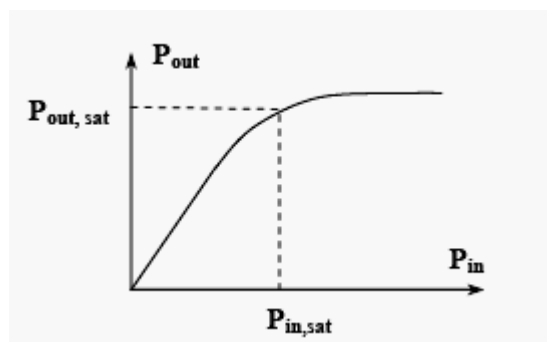
b) Băng thông độ lợi (Gain Bandwidth)

- Độ lợi của bộ khuếch đại quang không bằng nhau cho tất cả các tần số của tín hiệu quang vào. Nếu đo độ lợi G của các tín hiệu quang với các tần số khác nhau, một đáp ứng tần số quang của bộ khuếch đại $G(f)$ sẽ đạt được. Đây chính là phổ độ lợi của bộ khuếch đại quang.

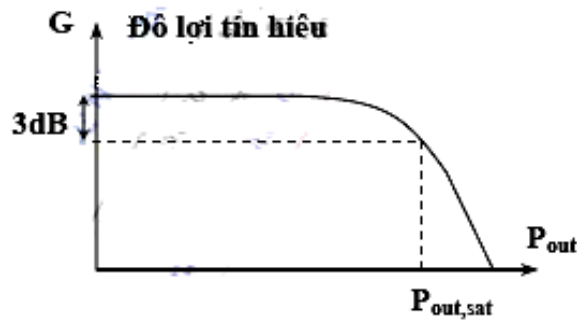
- Băng thông độ lợi của bộ khuếch đại quang B_0 được xác định bởi điểm -3dB so với độ lợi đỉnh của bộ khuếch đại. Giá trị B_0 xác định băng thông của các tín hiệu có thể được truyền bởi một bộ khuếch đại quang. Do đó, ảnh hưởng đến hoạt động của các hệ thống thông tin quang khi sử dụng chúng như các bộ lặp hay bộ tiền khuếch đại.

c) Công suất ngõ ra bão hòa (Saturation Output Power)

- Khi hoạt động ở chế độ tín hiệu nhỏ, công suất quang ở ngõ ra sẽ tăng tuyến tính với công suất quang ở ngõ vào theo hệ số độ lợi G : $P_{out} = G.P_{in}$. Tuy nhiên, công suất ngõ ra không thể tăng mãi được. Bằng thực nghiệm, người ta thấy rằng trong tất cả các bộ khuếch đại quang, khi công suất ngõ vào P_{in} tăng đến một mức nào đó, độ lợi G bắt đầu giảm. Kết quả là công suất ở ngõ ra không còn tăng tuyến tính với tín hiệu ngõ ra nữa mà đạt trạng thái bão hòa. Sự thay đổi của tín hiệu quang ngõ ra so với công suất quang ngõ vào ở được minh họa trong hình sau



Hình 7.10. Công suất ngõ ra theo công suất ngõ vào



Hình 7.11. Độ lợi khuếch đại theo công suất quang ngõ ra

Hình trên biểu diễn sự biến đổi của độ lợi tín hiệu G theo công suất quang ngõ ra P_{out} . Công suất ở ngõ ra tại điểm độ lợi giảm đi 3 dB được gọi là công suất ra bão hòa $P_{sat, out}$.

- Công suất ra bão hòa $P_{sat, out}$ của một bộ khuếch đại quang cho biết công suất ngõ ra lớn nhất mà bộ khuếch đại quang đó có thể hoạt động được. Thông thường, một bộ khuếch đại quang có độ lợi cao sẽ có công suất ra bão hòa cao bởi vì sự nghịch đảo nồng độ cao có thể được duy trì trong một dải công suất vào và ra rộng.

d) Hệ số nhiễu (Noise Figure)

- Giống như các bộ khuếch đại điện, các bộ khuếch đại quang đều tạo ra nhiễu. Nguồn nhiễu chính trong các bộ khuếch đại quang là do phát xạ tự phát. Vì sự phát xạ tự phát là các sự kiện ngẫu nhiên, pha của các photon phát xạ tự phát cũng ngẫu nhiên. Nếu photon phát xạ tự phát có hướng gần với hướng truyền của các photon tín hiệu, chúng sẽ tương tác với các photon tín hiệu gây nên sự dao động về pha và biên độ. Bên cạnh đó, năng lượng do phát xạ tự phát tạo ra cũng sẽ được khuếch đại khi chúng truyền qua bộ khuếch đại về phía ngõ ra. Do đó, tại ngõ ra của bộ khuếch đại công suất quang thu được P_{out} bao gồm cả công suất tín hiệu được khuếch đại và công suất nhiễu phát xạ tự phát được khuếch đại ASE (Amplified Spontaneous Emission).

$$P_{out} = G.P_{in} + P_{ASE} \quad (1.3)$$

- Ảnh hưởng của nhiễu đối với bộ khuếch đại quang được biểu diễn bởi hệ số nhiễu NF (Noise Figure), mô tả sự suy giảm tỷ số tín hiệu trên nhiễu SNR (Signal to Noise Ratio) do nhiễu của bộ khuếch đại thêm vào. Hệ số NF được cho bởi công thức sau

$$NF = \frac{SNR_{in}}{SNR_{out}} \quad (1.4)$$

SNR_{in} , SNR_{out} là tỷ số tín hiệu trên nhiễu tại ngõ vào và ngõ ra của bộ khuếch đại

Hệ số nhiễu NF của bộ khuếch đại càng nhỏ thì càng tốt. Giá trị nhỏ nhất của NF có thể đạt được là 3dB. Những bộ khuếch đại thỏa mãn hệ số nhiễu tối thiểu này được gọi là đang hoạt động ở giới hạn lượng tử.

Ngoài bốn thông số kỹ thuật chính được nêu ở trên, các bộ khuếch đại quang còn được đánh giá dựa trên các thông số sau

- Độ nhạy phân cực (Polarization sensitivity) là sự phụ thuộc của độ lợi của bộ khuếch đại vào phân cực của tín hiệu
- Ảnh hưởng của nhiệt độ đối với độ lợi và băng thông độ lợi,
- Xuyên nhiễu (crosstalk)

7.2.4. Ứng dụng của khuếch đại quang

Khuếch đại quang được ứng dụng trong các các hệ thống truyền dẫn quang như các bộ khuếch đại nhằm làm tăng công suất của tín hiệu quang trên đường truyền, khắc phục suy hao do sợi quang và các mối hàn, nối xảy ra trên đường truyền. Tùy theo vị trí lắp đặt, các bộ khuếch đại trên tuyến truyền dẫn quang được chia làm ba loại

a. **Khuếch đại công suất (Booster Amplifier):** là bộ khuếch đại quang được đặt ngay sau thiết bị phát nhằm mục đích làm tăng công suất tín hiệu quang đến mức cao nhất để làm cho khoảng cách truyền cực đại. Yêu cầu của các bộ khuếch đại công suất là tạo ra công suất đầu ra cực đại chứ không phải độ lợi cực đại vì công suất tín hiệu ngõ vào lớn.

b. **Khuếch đại đường dây (In-line Amplifier):** là các bộ khuếch đại quang được đặt trên tuyến quang nhằm mục đích bù mất mát công suất gây ra bởi suy hao sợi, suy hao do kết nối và suy hao do việc phân phối tín hiệu quang trong mạng. Các bộ khuếch đại đường dây có thể được lắp đặt nối tiếp nhau trên đường truyền để gia tăng khoảng cách lắp đặt. Tuy nhiên, việc lắp đặt nối tiếp các bộ khuếch đại quang sẽ làm giảm hệ số SNR ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống truyền dẫn quang. Yêu cầu của bộ khuếch đại đường dây là độ ổn định trên toàn bộ dải thông của hệ thống WDM, giữ nhiễu ở mức cực tiểu và thực hiện việc trao đổi tốt tín hiệu quang với sợi quang truyền dẫn.

c. **Tiền khuếch đại (Preamplifier):** là các bộ khuếch đại quang được đặt ngay trước thiết bị thu quang nhằm khuếch đại tín hiệu ngay trước khi tín hiệu được đưa vào thiết bị. Điều này làm giảm yêu cầu nghiêm ngặt của độ nhạy thiết bị thu và cho phép hệ thống truyền dẫn quang hoạt động với tốc độ bit cao hơn. Do vị trí lắp đặt, các bộ tiền khuếch đại hoạt động với công suất tín

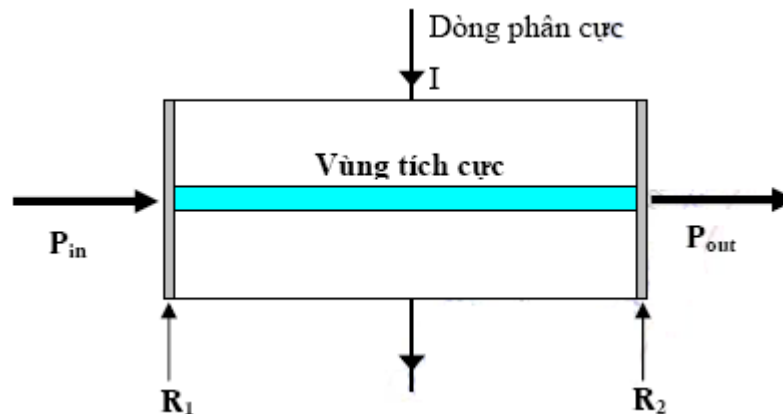
hiệu vào yếu và mức nhiễu ở đầu thu cao. Do vậy, yêu cầu của một bộ tiền khuếch đại là độ nhạy lớn, độ lợi lớn và nhiễu thấp.

✓ Ngoài các ứng dụng chính làm các bộ khuếch đại trên đường truyền quang, các bộ khuếch đại quang SOA và OFA còn được sử dụng trong các bộ chuyển đổi bước sóng. Việc chuyển đổi bước sóng được thực hiện dựa trên hiện tượng bảo hòa độ lợi và hiện tượng trộn bốn bước sóng FWM (Four-Wave Mixing) xảy ra trong các bộ khuếch đại quang.

7.3. Bộ khuếch đại quang bán dẫn (SOA)

7.3.1. Cấu trúc và nguyên lý hoạt động

Cấu trúc và nguyên lý hoạt động của khuếch đại quang bán dẫn SOA (Semiconductor Optical Amplifier) tương tự như laser bán dẫn. Nghĩa là cũng dựa vào hệ thống hai dải năng lượng của chất bán dẫn và các quá trình biến đổi quang điện: hấp thụ (absorption), phát xạ tự phát (spontaneous emission) và phát xạ kích thích (stimulated emission). Trong đó, tín hiệu quang được khuếch đại dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích xảy ra trong vùng tích cực của SOA. Vùng tích cực này được đặt giữa hai lớp bán dẫn loại n và p. Nguồn bơm bên ngoài được cung cấp bởi dòng điện phân cực.



Hình 7.12. Cấu trúc của một bộ khuếch đại quang bán dẫn SOA

Do có cấu trúc và nguyên lý hoạt động tương tự với laser bán dẫn nên SOA còn được gọi là khuếch đại laser bán dẫn SLA (Semiconductor Laser Amplifier).

Sự khác nhau chính giữa SOA và laser bán dẫn là SOA hoạt động dưới mức ngưỡng dao động. Điều kiện này xảy ra khi dòng điện phân cực $I_{bias} < I_{th}$ của laser và hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ của vùng tích cực nhỏ. Khi đó, quá trình phản xạ, cộng hưởng và tự phát xạ ánh sáng sẽ không xảy ra.

SOA có thể được phân thành hai loại chính dựa vào hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ của lớp tích cực.

Loại thứ nhất, khuếch đại Fabry-Perot **FPA (Fabry-Perot Amplifier)** có hệ số phản xạ cao (có thể lên tới 32%). Cấu trúc của FPA cũng tương tự như laser Fabry-Perot nhưng hoạt động với dòng phân cực $I_{bias} < I_{th}$. Với cấu trúc hốc cộng hưởng có hệ số phản xạ cao, quá trình hồi tiếp, chọn lọc tần số xảy ra. Kết quả là, FPA có độ lợi cao nhưng phổ độ lợi khuếch đại nhấp nhô, không đều. Điều này làm giảm băng thông khuếch đại của FPA.

Để khắc phục hạn chế trên của FPA, hai lớp chống phản xạ AR (anti-reflection) có hệ số phản xạ $R = 0$, được đặt tại hai đầu của vùng tích cực để không cho quá trình phản xạ xảy ra bên trong bộ khuếch đại. Khi đó, tín hiệu vào SOA sẽ được khuếch đại khi chỉ đi qua một lần (được gọi là single pass) xuyên qua vùng tích cực của bộ khuếch đại mà không có hồi tiếp về. Đây là cấu trúc của loại SOA thứ hai: khuếch đại sóng chạy **TWA (Traveling Wave Amplifier)**. Trên thực tế, hệ số phản xạ ở hai đầu của vùng tích cực của TWA không hoàn toàn bằng 0 mà có giá trị rất nhỏ từ 0.1% đến 0.01%.

7.3.2. Đặc tính của bộ khuếch đại FPA và TWA

- ⊕ Xét một bộ khuếch đại FPA có hệ số phản xạ công suất ở hai mặt phản xạ của lớp tích cực là R_1 và R_2 như hình 7.12. Bộ khuếch đại này cũng có thể TWA nếu cho $R_1 = R_2 = 0$. Do đó, quá trình phân tích sau, đều có thể áp dụng cho FPA và TWA.
- ⊕ Bỏ qua suy hao khi ánh sáng truyền qua mỗi mặt phản xạ, ta có hệ số xuyên qua của công suất ánh sáng đi qua mỗi mặt phản xạ tương ứng là $(1-R_1)$ và $(1-R_2)$.
- ⊕ Tương ứng, ta có hệ phản xạ và hệ số xuyên qua của cường độ điện trường tại hai mặt phản xạ là:

$$\sqrt{R_1}, \sqrt{R_2} \text{ và } t_1 = \sqrt{1-R_1}, t_2 = \sqrt{1-R_2}$$

- ⊕ Gọi G_s là rằng độ lợi đơn thông (single-pass gain) của SOA khi tín hiệu quang đi qua vùng tích cực mà không có sự hồi tiếp (hệ số phản xạ $R=0$).

Ta có

$$G_s = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \exp[(\Gamma g - \alpha)L] \quad (1.5)$$

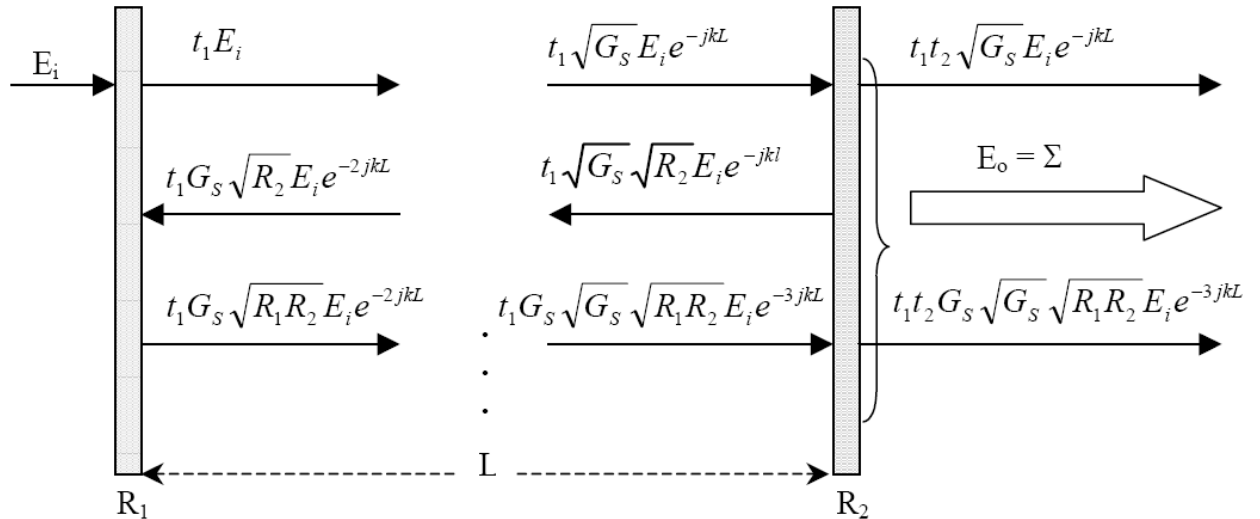
- Trong đó

- g : độ lợi trên một đơn vị chiều dài của vùng tích cực
- α : suy hao trên một đơn vị chiều dài của vùng tích cực

- Γ : hệ số tập trung (confinement factor) biểu diễn mức độ tập trung của luồng ánh sáng bên trong vùng tích cực

- L : chiều dài của vùng tích cực

- P_{in} , P_{out} : công suất tín hiệu ở ngõ vào và ngõ ra của bộ khuếch đại



Hình 7.12. Quá trình khuếch đại tín hiệu xảy ra trong FPA

Quá trình khuếch đại tín hiệu ánh sáng trong FPA (xem Hình 7.12.) có thể được dẫn giải như sau:

Điện trường của tín hiệu quang vào E_i được đưa vào hốc cộng hưởng của FPA có chiều dài L tại mặt phản xạ R_1 . Sau khi xuyên qua mặt phản xạ R_1 , tín hiệu ban đầu sẽ được khuếch đại bởi vùng tích cực và đạt cường độ $t_1\sqrt{G_S}E_i e^{-jkl}$ tại mặt phản xạ R_2 (k là hệ số truyền dẫn của môi trường khuếch đại).

Tại đây, một phần năng lượng ánh sáng sẽ truyền ra ngoài với cường độ $t_1 t_2 \sqrt{G_S} E_i e^{-jkl}$. Phần còn lại sẽ phản xạ ngược trở lại về phía R_1 với cường độ $t_1 \sqrt{G_S} \sqrt{R_2} E_i e^{-jkl}$.

✓ Tại R_1 , điện trường thu được là $t_1 G_S \sqrt{R_2} E_i e^{-2jkl}$. Tương tự như tại R_2 , một phần điện trường $t_1 G_S \sqrt{R_1 R_2} E_i e^{-2jkl}$ sẽ phản xạ ngược về phía R_2 , phần còn lại sẽ đi ra ngoài hốc cộng hưởng.

✓ Sau khi đi qua khoảng cách L của vùng tích cực, tín hiệu thu được tại R_1 đạt giá trị $t_1 G_S \sqrt{G_S} \sqrt{R_1 R_2} E_i e^{-3jkl}$. Quá trình phản xạ và truyền xuyên qua mặt phản xạ R_2 tiếp tục diễn ra. Phần tín hiệu xuyên qua có điện trường $t_1 t_2 G_S \sqrt{G_S} \sqrt{R_1 R_2} E_i e^{-3jkl}$. Phần còn lại sẽ phản xạ ngược về phía R_1 . Cứ như vậy quá trình phản xạ trong vùng tích cực tiếp tục tiếp diễn.

✓ Điện trường tổng cộng thu được tại ngõ ra của bộ khuếch đại sẽ bằng tổng của các thành phần điện trường đi xuyên qua R2. Nếu giả sử rằng thời gian truyền trong hốc cộng hưởng nhỏ hơn chu kỳ của điện trường tới E_i , ta có điện trường thu được tại ngõ ra

$$E_o = E_i e^{-j\omega t} t_1 t_2 \sum_{m=0}^{\infty} (\sqrt{R_1 R_2} G_s)^m e^{-2m\pi kL}$$

Với $|\sqrt{R_1 R_2} G_s| < 1$, biểu thức (2.6) có thể biến đổi thành

$$E_o = E_i \frac{\sqrt{G_s} t_1 t_2 e^{-j\omega t}}{1 - \sqrt{R_1 R_2} G_s e^{-2j\omega t}}$$

Hàm truyền công suất của bộ khuếch đại FPA

$$G_{FPA}(\omega) = \left| \frac{E_o}{E_i} \right|^2 = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2) G_s(\omega)}{(1 - G_s \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4 G_s \sqrt{R_1 R_2} \sin^2 kL}$$

Do

$$\sin^2(kL) = \sin^2\left(\frac{\omega}{v} L\right) = \sin^2\left(\frac{(\omega - \omega_0)}{v} L\right)$$

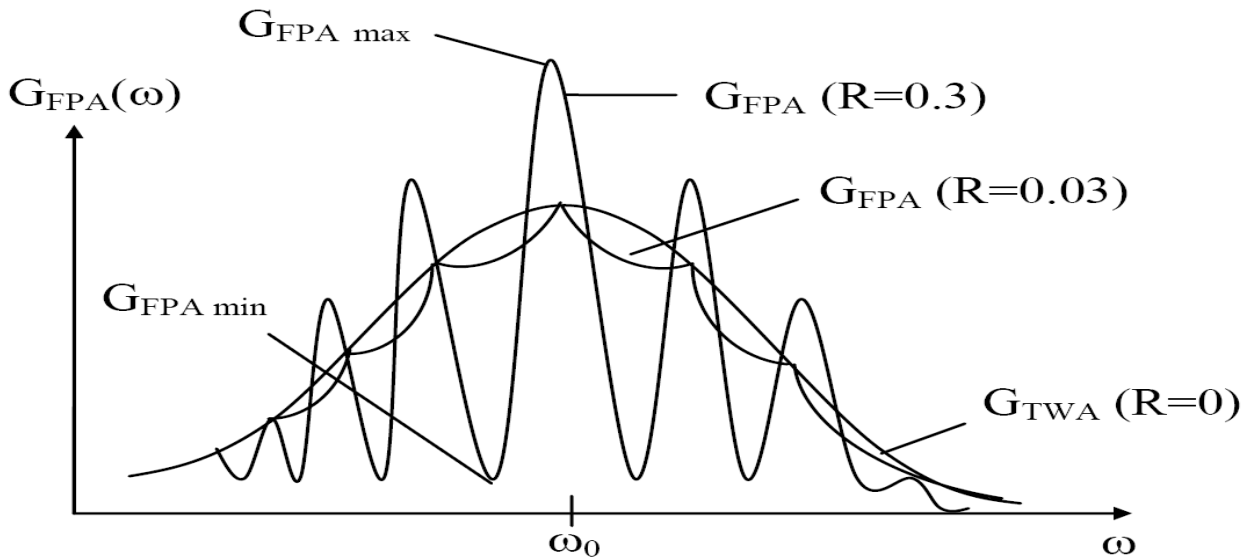
với v là vận tốc ánh sáng truyền trong môi trường khuếch đại, ω là tần số góc đang xét, ω_0 là tần số góc cộng hưởng mà tại đó độ lợi đạt giá trị lớn nhất. Biểu thức trên được viết lại như sau

$$G_{FPA}(\omega) = \left| \frac{E_o}{E_i} \right|^2 = \frac{(1 - R_1)(1 - R_2) G_s(\omega)}{(1 - G_s \sqrt{R_1 R_2})^2 + 4 G_s \sqrt{R_1 R_2} \sin^2[(\omega - \omega_0)L/v]}$$

Nếu hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ của FPA bằng nhau $R_1 = R_2 = R$

$$G_{FPA}(\omega) = \left| \frac{E_o}{E_i} \right|^2 = \frac{(1 - R)^2 G_s(\omega)}{(1 - G_s R)^2 + 4 G_s R \sin^2[(\omega - \omega_0)L/v]}$$

- v là vận tốc ánh sáng truyền trong môi trường khuếch đại
- ω là tần số góc đang xét
- ω_0 là tần số góc cộng hưởng mà tại đó độ lợi đạt giá trị lớn nhất
- L chiều dài FPA
- R hệ số phản xạ của hai mặt phản xạ
- G_s là rằng độ lợi đơn thông (single-pass gain) của SOA



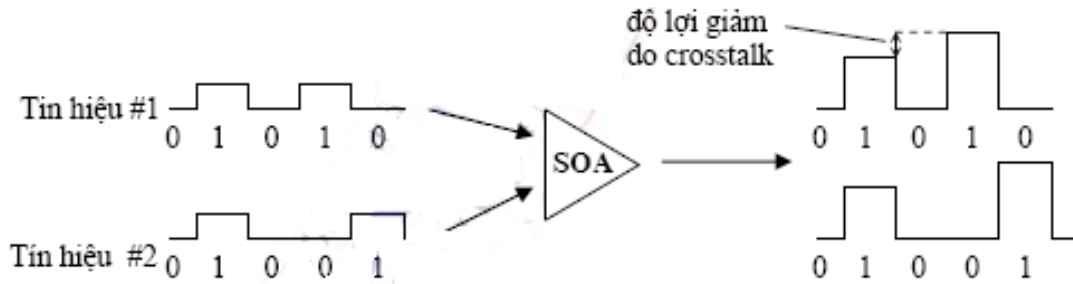
Hình 7.13. Độ lợi $G(f)$ của FPA thay đổi theo tần số với $R = 0.3; R=0.03$ và $R=0$

- ✓ Giả sử độ lợi đơn thông G_s , tương ứng với $R=0$ (TWA), có dạng Gauss. Khi hệ số phản xạ của hai lớp phản xạ của vùng tích cực lớn $R=0.3$, độ lợi $G(\omega)$ không bằng phẳng theo tần số mà có dạng gợn sóng lớn do chức năng lọc tần số của hốc cộng hưởng.
- ✓ Tại các tần số cộng hưởng $\omega=(2\pi fN)/(2L)$ với N là số nguyên, độ lợi của FPA đạt giá trị cực đại. Giữa các tần số cộng hưởng, độ lợi của FPA giảm nhanh chóng. Do đó, băng thông độ lợi (được xác định tại vị trí -3dB so với độ lợi đỉnh) của FPA nhỏ so với băng thông độ lợi của TWA.
- ✓ Vì vậy, FPA không thích hợp với các ứng dụng khuếch đại trong hệ thống thông tin quang.
- ✓ Khi hệ số phản xạ $R=0.03$, $G(\omega)$ tiến gần tới G_s nhưng vẫn còn gợn sóng nhỏ. Độ gợn sóng này có thể được loại bỏ bằng cách giảm hệ số phản xạ hơn nữa để bộ khuếch đại trở thành TWA.

7.3.3. Nhiễu xuyên âm (Crosstalk) trong SOA:

Nhiễu xuyên âm xảy ra khi các tín hiệu quang khác nhau được khuếch đại đồng thời trong cùng một bộ khuếch đại. Có hai loại nhiễu xuyên âm xảy ra trong SOA: nhiễu xuyên kênh (interchannel crosstalk) và bão hòa độ lợi (cross saturation).

Nhiễu xuyên kênh xảy ra là do hiệu ứng trộn bốn bước sóng FWM (Four Wave Mixing). Bản chất và ảnh hưởng của hiệu ứng phi tuyến này đối hệ thống thông tin quang WDM không được trình bày trong chương này.



Hình 7.14. Ảnh hưởng của nhiễu xuyên kênh trong SOA khi khuếch đại hai tín hiệu

Nhiều xuyên kênh gây nên do hiện tượng bảo hòa độ lợi xảy ra trong SOA được minh họa trên. Xem xét đầu vào bộ SOA là tổng của hai tín hiệu quang ở các bước sóng khác nhau. Giả thiết rằng cả 2 bước sóng nằm trong băng thông của SOA. Sự có mặt của tín hiệu thứ hai sẽ làm suy giảm mật độ điện tử ở vùng năng lượng cao do quá trình bức xạ kích thích làm dẫn đến sự nghịch đảo nồng độ được quan sát ở tín hiệu thứ nhất giảm xuống. Do đó, tín hiệu thứ nhất sẽ không được khuếch đại giống như tín hiệu thứ hai, và nếu mật độ điện tử ở vùng năng lượng cao không đủ lớn thì tín hiệu thứ nhất có thể bị hấp thụ. Quá trình này xảy ra đồng thời đối với cả hai tín hiệu. Do đó, trên hình 2.8 ta thấy, khi mức 1 của hai tín hiệu 1 và 2 xảy ra đồng thời, độ lợi của mỗi tín hiệu sẽ nhỏ hơn so với bình thường.

Hiện tượng xuyên âm phụ thuộc vào thời gian sống của điện tử ở trạng thái năng lượng cao. Nếu thời gian sống đủ lớn so với tốc độ dao động của công suất trong các tín hiệu vào, các điện tử không thể chuyển từ trạng thái năng lượng cao xuống trạng thái năng lượng thấp do sự dao động này. Do đó, không có xuyên âm xảy ra.

Đối với các SOA, thời gian sống này ở mức ns. Do đó, các điện tử dễ dàng phản ứng lại sự dao động trong công suất của các tín hiệu được điều chế ở tốc độ Gb/s, dẫn đến một sự suy yếu hệ thống chính do xuyên âm. Ngược lại, thời gian sống phát xạ tự phát trong EDFA là khoảng 10ms. Do đó, xuyên âm chỉ có mặt nếu tốc độ điều chế của các tín hiệu vào ít hơn vài kiloHertz, điều này thường ít gặp trong thực tế. Do đó, EDFA phù hợp hơn khi được sử dụng trong các hệ thống WDM hơn SOA.

7.3.4. Ưu khuyết điểm và ứng dụng của SOA:

➤ *Ưu điểm:*

- Độ lợi cao (25-30dB).
- Kích thước nhỏ, có thể tích hợp với các linh kiện quang bán dẫn khác.
- Dải thông lớn, có thể lên tới 100 nm, rộng hơn so với EDFA.

- Có thể thực hiện khuếch đại tín hiệu ở cả hai cửa sổ ánh sáng 1300nm và 1550nm.

➤ *Khuyết điểm:*

- Công suất ra bảo hòa thấp (khoảng 5mW) hạn chế khả năng của SOA khi được sử dụng làm bộ khuếch đại công suất.

- Hệ số nhiễu cao (5-7 dB) ảnh hưởng đến chất lượng của SOA khi được sử dụng làm bộ tiền khuếch đại và khuếch đại đường dây.

- Phụ thuộc vào phân cực của tín hiệu quang tới

- Nhiễu xuyên kênh lớn do các hiệu ứng phi tuyến: hiệu ứng trộn 4 bước sóng FWM (four wave mixing) và hiệu ứng bảo hòa độ lợi chéo (cross-gain saturation)

- Phổ độ lợi có dạng gọn sóng do sự không hoàn hảo của lớp chống phản xạ tạo

- Kém ổn định do độ lợi chịu ảnh hưởng của nhiệt độ

➤ *Ứng dụng:*

Với các đặc tính kỹ thuật trên, SOA có nhiều khuyết điểm so với EDFA khi được dùng làm khuếch đại quang. Do đó, cho dù SOA được nghiên cứu và chế tạo từ trước EDFA, nhưng SOA không được sử dụng làm bộ khuếch đại quang trong hệ thống WDM cũng như các hệ thống truyền dẫn quang khác hiện nay. Thay vào đó, dựa trên các hiệu ứng phi tuyến đáp ứng nhanh của SOA, SOA được dùng trong các ứng dụng khác của hệ thống thông tin quang như: bộ biến đổi bước sóng (wavelength convertor), phục hồi xung clock (clock recovery) và các ứng dụng xử lý tín hiệu quang (optical signal processing applications).

7.4. Bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium (EDFA)

Thông tin quang sợi đã phát triển mạnh trong các hệ thống viễn thông trên thế giới cũng như tại Việt Nam. Việc tăng khả năng truyền dẫn và mở rộng khoảng cách truyền dẫn chỉ có thể giải quyết hiệu quả bằng các hệ thống truyền dẫn mới sử dụng các công nghệ như SDH hoặc ATM kết hợp với các linh kiện truyền thu kiểu mới như các bộ khuếch đại quang học. Khuếch đại tín hiệu quang bằng cách sử dụng các sợi quang pha đất hiếm đã mở ra những khả năng giảm giá thành tuyến truyền dẫn trong các mạng vùng hoặc các mạng đường trục bằng việc tăng khoảng cách các trạm lặp hoặc đa kênh truyền trên các mạng địa phương có sẵn. Các bộ khuếch đại quang sợi bằng sợi dẫn quang pha tạp erbium (EDFA) ở bước sóng 1550nm đã được sử dụng

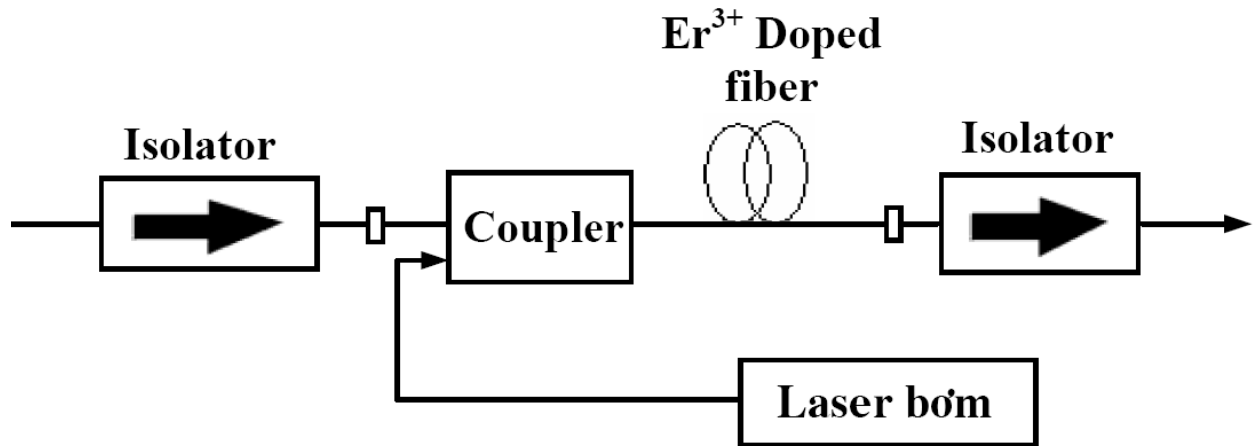
rộng rãi trong các tuyến thông tin cáp quang đường dài hoặc các mạng vòng lớn.

Nguyên tắc hoạt động của các khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium là phát xạ cưỡng bức. Các ion Er^{3+} hấp thụ các photon từ chùm sáng bơm với bước sóng nhỏ hơn 1,5 μm , rồi lại tái phát xạ một phần năng lượng dưới dạng các photon với bước sóng của signal. Các ion Er^{3+} đã được chọn bởi vì nó phát xạ huỳnh quang tại bước sóng $\sim 1.5 \mu m$, bước sóng này sinh ra bởi dịch chuyển phát xạ giữa trạng thái điện tử bị kích thích và mức cơ bản $4I_{15/2}$. Các công trình nghiên cứu về laser và các khuếch đại quang pha tạp với các ion đất hiếm và với Erbium, khi so sánh với các phương pháp chế tạo khác, cho thấy rằng bằng phương pháp sol-gel, đã chế tạo các khuếch đại quang, trên đế thủy tinh, với nồng độ erbi 0.25 at.% và với chiều dài khuếch đại là 5,7 cm, thời gian sống là 6 ms với Gain (dB/mW) cỡ 2,7 tại bước sóng bơm 980 nm.

Trong công nghệ viễn thông quang học toàn bộ (all-optical telecommunications) thì các laser pha tạp đất hiếm và khuếch đại quang là một vài trong số các linh kiện cơ bản, và bởi sự cần giảm giá thành và kích thước linh kiện nên nó cần phải được tích hợp lại. Sự nhỏ gọn và công suất của laser và khuếch đại quang chủ yếu liên quan tới mức độ ion đất hiếm pha tạp càng nhiều càng tốt và phải giảm thấp nhất mất mát trong quá trình truyền sóng.

Trong bài này sẽ trình bày vài nét sơ lược về các bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium và các ứng dụng của nó trong thông tin quang. Sử dụng các bộ khuếch đại quang sợi pha tạp Erbium (EDFA) để kéo dài cự ly và tăng tốc độ bit truyền dẫn đang được xem như là một trong những giải pháp tốt nhất để xây dựng các hệ thống thông tin quang sợi. Trong những ứng dụng đó, EDFA được dùng làm tiền khuếch đại quang để cải thiện độ nhạy thu có sức hấp dẫn đặc biệt. Sự có mặt của bộ khuếch đại quang trong hệ thống thông tin quang nói chung và trong bộ thu khuếch đại quang (OAR) nói riêng đã làm tăng công suất tín hiệu quang là do EDFA đã khuếch đại tín hiệu trước khi tiến hành tách sóng tại bộ thu quang.

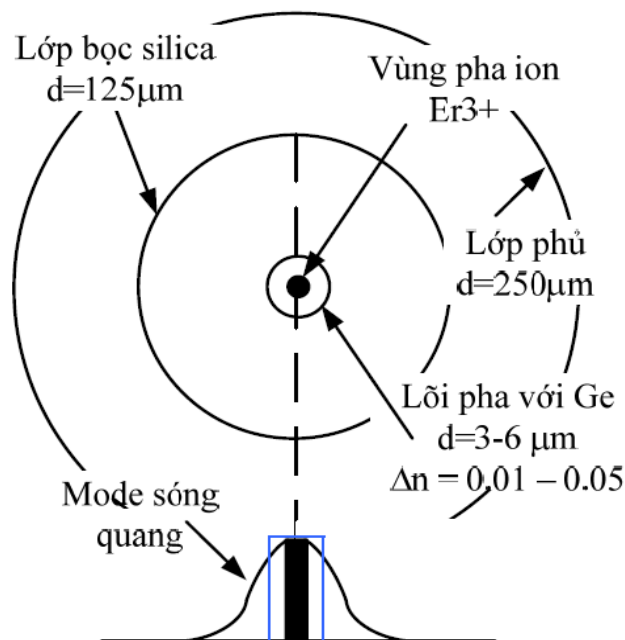
7.4.1. Các cấu trúc EDFA



Hình 7.15. Cấu trúc tổng quát của một bộ khuếch đại EDFA

Cấu trúc của một bộ khuếch đại quang sợi pha trộn Erbium EDFA (Erbium-Doped Fiber Amplifier) bao gồm

Sợi quang pha ion đất hiếm Erbium EDF (Erbium-Doped Fiber): là nơi xảy ra quá trình khuếch đại (vùng tích cực) của EDFA. Cấu tạo của sợi quang pha ion Er^{3+} được minh họa như sau.



Hình 7.16. Mặt cắt ngang của một loại sợi quang pha ion Erbium

Trong đó:

+ Vùng lõi trung tâm (có đường kính từ 3 -6 μm) của EDF được pha trộn ion Er^{3+} là nơi có cường độ sóng bơm và tín hiệu cao nhất. Việc pha

các ion Er^{3+} trong vùng này cung cấp sự chông lấp của năng lượng bơm và tín hiệu với các ion erbium lớn nhất dẫn đến sự khuếch đại tốt hơn.

- + Lớp bọc (cladding) có chiết suất thấp hơn bao quanh vùng lõi.
- + Lớp phủ (coating) bảo vệ bao quanh sợi quang tạo bán kính sợi quang tổng cộng là 250 μm . Lớp phủ này có chiết suất lớn hơn so với lớp bọc dung để loại bỏ bất kỳ ánh sáng không mong muốn nào lan truyền trong sợi quang.

Nếu không kể đến chất pha erbium, cấu trúc EDF giống như sợi đơn mode chuẩn trong viễn thông. Ngoài ra, EDF còn được chế tạo bằng các loại vật liệu khác như sợi thủy tinh flouride (flouride-based glass fiber) hoặc sợi quang thủy tinh đa vật liệu (multicomponent glass fiber).

- Laser bơm (pumping laser): Cung cấp năng lượng ánh sáng để tạo ra trạng thái nghịch đảo nồng độ trong vùng tích cực. Laser bơm phát ra ánh sáng có bước sóng 980nm hoặc 1480nm.

- WDM Coupler: Ghép tín hiệu quang cần khuếch đại và ánh sáng từ laser bơm vào trong sợi quang. Loại coupler được sử dụng là WDM coupler cho phép ghép các tín hiệu có bước sóng 980/1550nm hoặc 1480/1550nm.

- Bộ cách ly quang (Optical isolator): Ngăn không cho tín hiệu quang được khuếch đại phản xạ ngược về phía đầu phát hoặc các tín hiệu quang trên đường truyền phản xạ ngược về EDFA.

7.4.2. Lý thuyết khuếch đại trong EDFA

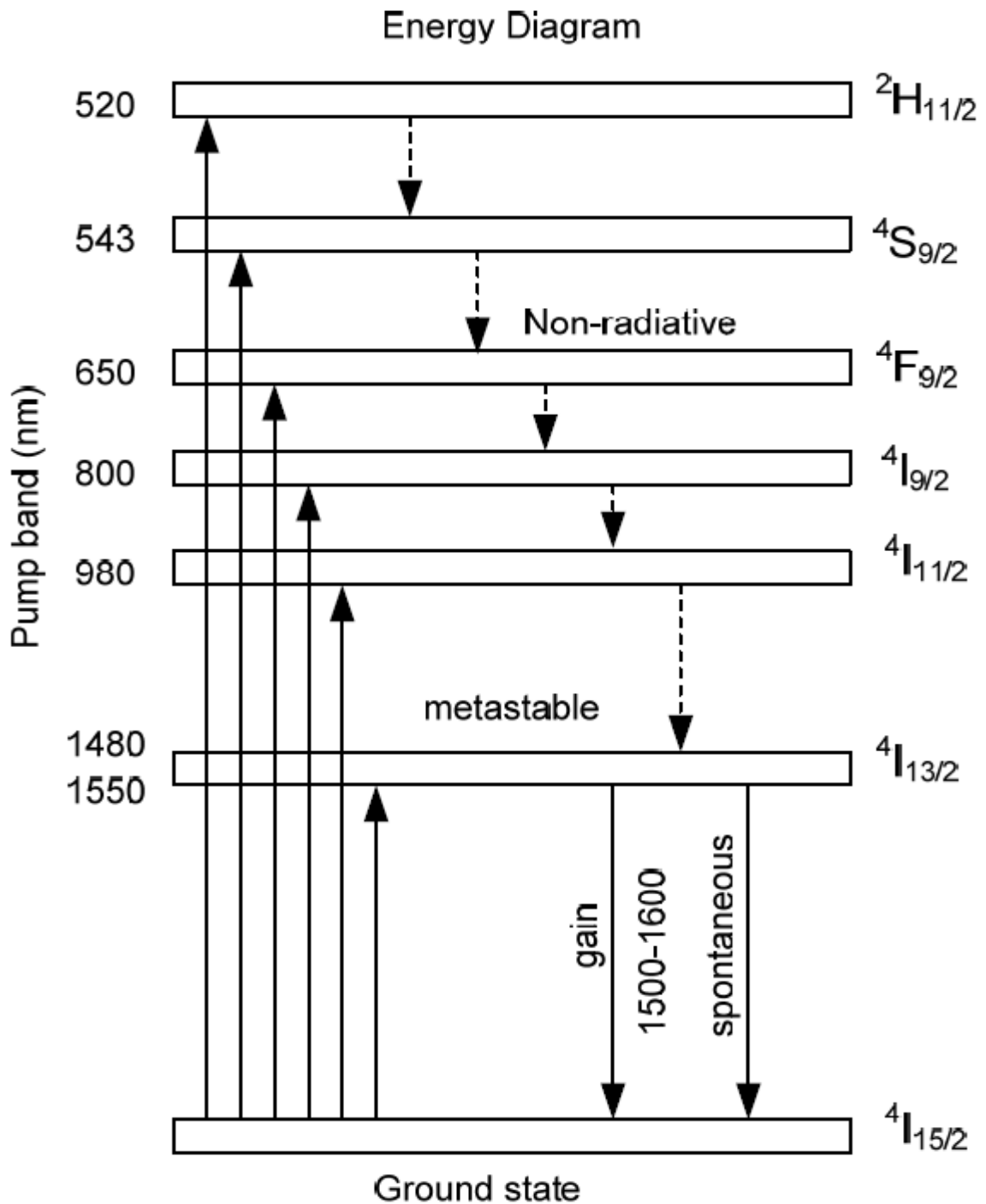
a) Giảm độ phân bố năng lượng của Er^{3+}

Giảm độ phân bố năng lượng của Er^{3+} trong sợi silica được minh họa trong hình vẽ. Theo đó, các ion Er^{3+} có thể tồn tại ở nhiều vùng năng lượng khác nhau được ký hiệu: $^4I_{15/2}$, $^4I_{13/2}$, $^4I_{11/2}$, $^4I_{9/2}$, $^4F_{9/2}$, $^4S_{9/2}$, $^2H_{11/2}$. Trong đó

- Vùng $^4I_{15/2}$ có mức năng lượng thấp nhất, được gọi là vùng nền (ground-state band)

- Vùng $^4I_{13/2}$ được gọi là vùng giả bền (metastable band) vì các ion Er^{3+} có thời gian sống (lifetime) tại vùng này lâu (khoảng 10ms) trước khi chuyển xuống vùng nền. Thời gian sống này thay đổi tùy theo loại tạp chất được pha trong lõi của EDF.

- Vùng $^4I_{11/2}$, $^4I_{9/2}$, $^4F_{9/2}$, $^4S_{9/2}$, $^2H_{11/2}$ là các vùng năng lượng cao, được gọi là vùng kích thích hay vùng bơm (pumping band). Thời gian các ion Er^{3+} có trạng thái năng lượng trong các vùng này rất ngắn (khoảng 1 μs)



Hình 7.17. Biểu đồ phân bố năng lượng của ion Er^{3+} trong sợi silica.

Sự chuyển đổi năng lượng của các ion Er^{3+} có thể xảy ra trong các trường hợp sau:

- Khi các ion Er^{3+} ở vùng nền nhận một mức năng lượng bằng độ chênh lệch năng lượng giữa vùng nền và vùng năng lượng cao hơn, chúng sẽ chuyển lên vùng có mức năng lượng cao hơn (sự hấp thụ năng lượng)

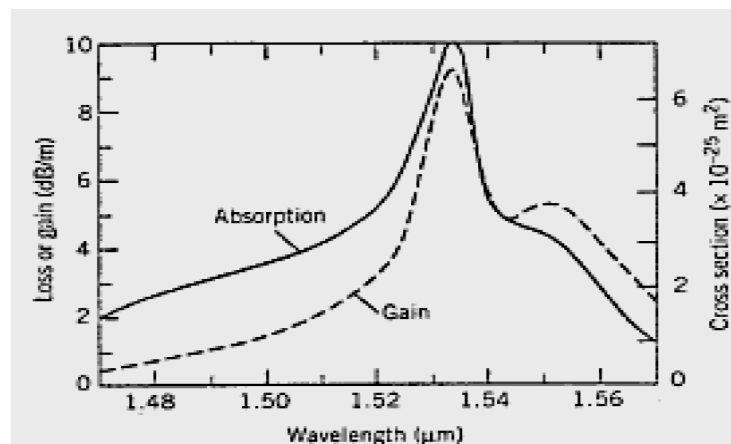
- Khi các ion Er^{3+} chuyển từ các vùng năng lượng cao xuống vùng năng lượng thấp hơn sẽ xảy ra hai trường hợp sau:

- Phân rã không bức xạ (nonradiative decay): năng lượng được giải phóng dưới dạng photon tạo ra sự dao động phân tử trong sợi quang
- Phát xạ ánh sáng (radiation): năng lượng được giải phóng dưới dạng photon

Độ chênh lệch năng lượng giữa vùng giả bền (${}^4I_{13/2}$) và vùng nền (${}^4I_{15/2}$)

- 0.775eV (tương ứng với năng lượng của photon có bước sóng 1600nm) tính từ đáy vùng giả bền đến đỉnh của vùng nền
- 0.814eV (1527 nm) tính từ đáy vùng giả bền đến đáy của vùng nền
- 0.841 eV (1477nm) tính từ đỉnh vùng giả bền đến đáy của vùng nền

Mật độ phân bố năng lượng của các ion Er^{3+} trong vùng giả bền không đều nhau: các ion Er^{3+} có khuynh hướng tập trung nhiều ở các mức năng lượng thấp. Điều này dẫn đến khả năng hấp thụ và phát xạ photon của ion Erbium thay đổi theo bước sóng. Phổ hấp thụ (absorption spectrum) và phổ độ lợi (gain spectrum) của EDFA có lõi pha Ge được biểu diễn trên hình dưới



Hình 7.18. Phổ hấp thụ (absorption spectrum) và phổ độ lợi (gain spectrum) của EDFA có lõi pha Ge

b) Nguyên lý hoạt động của EDFA

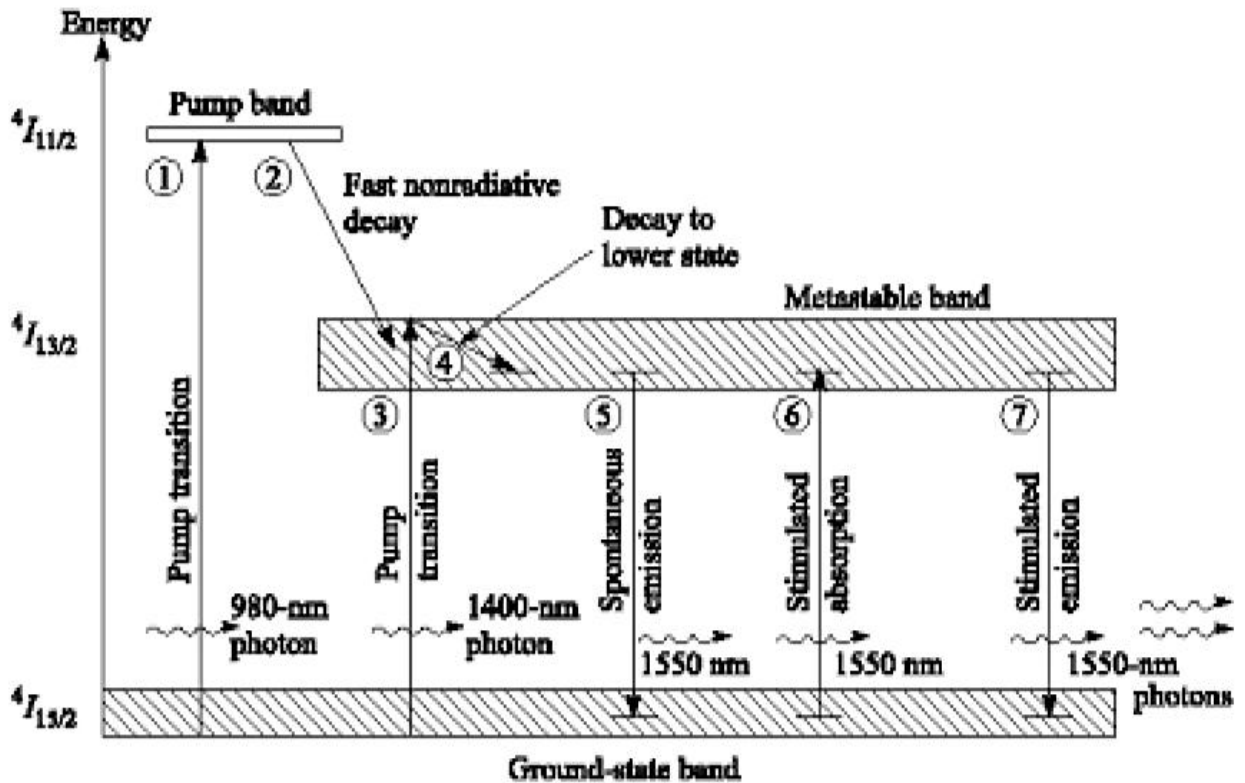
Nguyên lý khuếch đại của EDFA được dựa trên hiện tượng phát xạ kích thích.

Quá trình khuếch đại tín hiệu quang trong EDFA có thể được thực hiện theo các bước như sau

Khi sử dụng nguồn bơm laser 980nm, các ion Er^{3+} ở vùng nền sẽ hấp thụ năng lượng từ các photon (có năng lượng $E_{\text{photon}} = 1.27\text{eV}$) và chuyển lên trạng thái năng lượng cao hơn ở vùng bơm (pumping band) (1)

Tại vùng bơm, các ion Er^{3+} phân rã không bức xạ rất nhanh (khoảng $1\mu\text{s}$) và chuyển xuống vùng giả bền (2)

Khi sử dụng nguồn bơm laser 1480nm, các ion Er^{3+} ở vùng nền sẽ hấp thụ năng lượng từ các photon (có năng lượng $E_{\text{photon}} = 0.841\text{eV}$) và chuyển sang trạng thái năng lượng cao hơn ở đỉnh của vùng giả bền (3)



Hình 7.19. Quá trình khuếch đại tín hiệu xảy ra EDFA với hai bước sóng bơm 980 nm và 1480nm

Các ion Er^{3+} trong vùng giả bền luôn có khuynh hướng chuyển xuống vùng năng lượng thấp (vùng có mật độ điện tử cao) (4)

Sau khoảng thời gian sống (khoảng 10ms), nếu không được kích thích bởi các photon có năng lượng thích hợp (phát xạ kích thích) các ion Er^{3+} sẽ chuyển sang trạng thái năng lượng thấp hơn ở vùng nền và phát xạ ra photon (phát xạ tự phát) (5).

Khi cho tín hiệu ánh sáng đi vào EDFA, sẽ xảy ra đồng thời hai hiện tượng sau:

- Các photon tín hiệu bị hấp thụ bởi các ion Er^{3+} ở vùng nền (6). Tín hiệu ánh sáng bị suy hao

- Các photon tín hiệu kích thích các ion Er^{3+} ở vùng giả bền (7). Hiện tượng phát xạ kích thích xảy ra. Khi đó, các ion Er^{3+} bị kích thích sẽ chuyển trạng thái năng lượng từ mức năng lượng cao ở vùng giả bền xuống mức năng lượng thấp ở vùng nền và phát xạ ra photon mới có cùng hướng truyền, cùng phân cực, cùng pha và cùng bước sóng. Tín hiệu ánh sáng được khuếch đại.

Độ rộng giữa vùng giả bền và vùng nền cho phép sự phát xạ kích thích (khuếch đại) xảy ra trong khoảng bước sóng 1530 nm – 1565nm. Đây cũng là vùng bước sóng hoạt động của EDFA. Độ lợi khuếch đại giảm nhanh chóng tại các bước sóng lớn hơn 1565 nm và bằng 0 dB tại bước sóng 1616nm.

7.4.3. Yêu cầu đối với nguồn bơm

a) Bước sóng bơm

Với các vùng năng lượng được nêu trong phần trên, ánh sáng bơm có thể được sử dụng tại các bước sóng khác nhau 650 nm (${}^4F_{9/2}$), 800 nm (${}^4I_{9/2}$), 980 nm (${}^4I_{11/2}$), 1480 nm (${}^4I_{13/2}$). Tuy nhiên, khi bước sóng bơm càng ngắn thì các ion Er^{3+} phải trải qua nhiều giai đoạn chuyển đổi năng lượng trước khi trở về vùng nền và phát xạ ra photon ánh sáng. Do đó, hiệu suất bơm không cao, năng lượng bơm sẽ bị hao phí qua việc tạo ra các phonon thay vì photon. Vì vậy, trên thực tế, ánh sáng bơm sử dụng cho EDFA chỉ được sử dụng tại hai bước sóng 980nm và 1480nm.

Trong EDFA, điều kiện để có khuếch đại tín hiệu là đạt được sự nghịch đảo nồng độ bằng cách sử dụng nguồn bơm để bơm các ion erbium lên trạng thái kích thích. Có hai cách thực hiện quá trình này: bơm trực tiếp tại bước sóng 1480 nm hoặc bơm gián tiếp ở bước sóng 980 nm.

- Phương pháp bơm gián tiếp (bơm ở 980 nm): Trong trường hợp này, ion erbium liên tục được chuyển tiếp từ vùng năng lượng ${}^4I_{15/2}$ thấp lên vùng năng lượng cao ${}^4I_{11/2}$, sau đó các ion sẽ phân rã xuống vùng ${}^4I_{13/2}$ nhưng không phát xạ. Từ vùng này, khi có ánh sáng kích thích thì các ion sẽ phát xạ bước sóng mong muốn (từ 1550 đến 1600 nm) khi chuyển từ vùng năng lượng ${}^4I_{13/2}$ xuống vùng ${}^4I_{15/2}$. Đây chính là hệ thống ba mức. Thời gian sống của ion erbium ở mức ${}^4I_{11/2}$ khoảng 1 μ s trong khi ở ${}^4I_{13/2}$ thì tới 10ms. Với thời gian sống dài, vùng ${}^4I_{15/2}$ được gọi là vùng ổn định. Vì vậy, các ion được bơm lên mức cao, sau đó nhanh chóng rơi xuống vùng ${}^4I_{13/2}$ và tồn tại ở đó trong một khoảng thời gian tương đối dài tạo nên sự nghịch đảo về nồng độ.

- Với phương pháp bơm trực tiếp (1480 nm): các ion erbium chỉ hoạt động trong hai vùng năng lượng và ${}^4I_{15/2}$. Đây là hệ thống 2 mức. Các ion erbium

liên tục được chuyển từ vùng năng lượng nền ${}^4I_{15/2}$ lên vùng năng lượng kích thích ${}^4I_{13/2}$ nhờ năng lượng bơm. Vì thời gian tồn tại ở mức này dài nên chúng tích lũy tại đây tạo ra sự nghịch đảo nồng độ.

Nguồn bơm có hiệu quả cao ở cả hai bước sóng 980 và 1480 nm. Để có hệ số khuếch đại hơn 20 dB thì chỉ cần tạo ra nguồn bơm có công suất nhỏ hơn 5 mW, nhưng vẫn cần phải có nguồn bơm từ 10 đến 100 mW để đảm bảo cho công suất ra đủ lớn.

Chỉ số nhiễu lượng tử giới hạn là 3 dB đạt được ở bước sóng 980 nm. Đối với bước sóng 1480 nm thì chỉ số nhiễu là vào khoảng 4 dB vì tiết diện ngang phát xạ tại 1480 nm cao hơn tại 980 nm và sự bức xạ kích thích do nguồn bơm đã giới hạn sự nghịch đảo tích lũy tại 1480nm. Do đó, bước sóng bơm 980 nm được ứng dụng cho các bộ khuếch đại tạp âm thấp. Hệ số độ lợi tại bước sóng bơm 980 nm cao hơn tại 1480 nm tại cùng công suất bơm. Do đó, để đạt được cùng một hệ số độ lợi thì công suất bơm tại 1480 nm phải cao hơn tại 980 nm. Vì công suất bơm ở 1480 nm lớn hơn nên công suất ngõ ra lớn hơn, do đó bơm ở bước sóng 1480nm được ứng dụng cho các bộ khuếch đại công suất. Ngoài ra, bước sóng bơm 1480 nm được truyền trong sợi quang với suy hao thấp. Do đó, nguồn bơm laser có thể đặt xa bộ khuếch đại.

Hiện nay, bơm bước sóng 1480 nm được sử dụng rộng rãi hơn vì chúng sẵn có hơn và độ tin cậy cao hơn. Độ tin cậy là đặc điểm quan trọng đối với laser bơm vì nó dùng để bơm cho khoảng cách dài và để tránh làm nhiễu tín hiệu. Các thiết bị khuếch đại công suất đòi hỏi công suất bơm cao nhất và độ ổn định của chúng là mấu chốt trong quá trình nghiên cứu phát triển chúng. Nếu tăng được độ ổn định của laser có bước sóng 980 nm thì có thể chúng sẽ được chọn làm nguồn bơm. Một số EDFA được bơm tại cả hai bước sóng để tận dụng ưu điểm của cả hai bước sóng.

Bảng 1 So sánh hai bước sóng bơm 980nm và 1480nm

Bước sóng bơm	980 nm	1480 nm
Tính chất:		
Độ lợi	Cao hơn	Thấp hơn
Độ lợi công suất bơm	Thấp hơn	Cao hơn
Suy hao công suất bơm	Cao hơn	Thấp hơn
Hệ số nhiễu	Thấp hơn	Cao hơn
Ứng dụng	Tiền khuếch đại	Khuếch đại công suất

b) Công suất bơm

Công suất bơm càng lớn thì sẽ có nhiều ion erbium bị kích thích để trao đổi năng lượng với tín hiệu cần khuếch đại và sẽ làm cho hệ số khuếch đại tăng lên. Tuy nhiên, hệ số khuếch đại không thể tăng mãi theo công suất bơm

vì số lượng các ion erbium được cấy vào sợi là có giới hạn. Ngoài ra, khi công suất bơm tăng lên thì hệ số nhiễu sẽ giảm. Điều này sẽ được trình bày trong phần tính hệ số nhiễu của EDFA.

c) Hướng bơm

Bộ khuếch đại EDFA có thể được bơm theo ba cách:

Bơm thuận (codirectional pumping): nguồn bơm được bơm cùng chiều với hướng truyền tín hiệu.

Bơm ngược (counterdirectional pumping): nguồn bơm được bơm ngược chiều với hướng truyền tín hiệu.

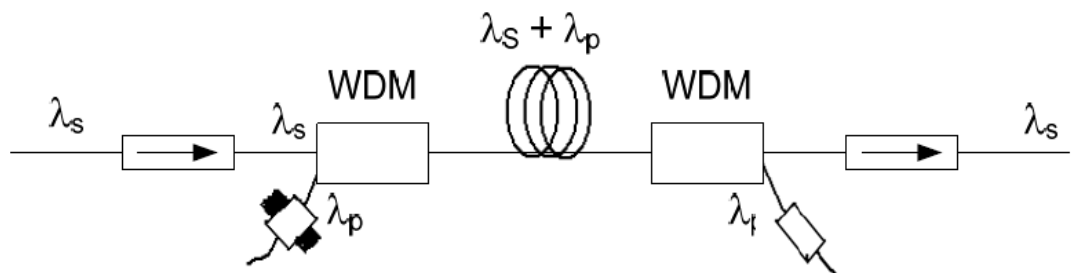
Bơm hai chiều (dual pumping): sử dụng hai nguồn bơm và được theo hai chiều ngược nhau.

Hướng bơm thuận có ưu điểm nhiễu thấp vì nhiễu khá nhạy cảm với độ lợi mà độ lợi tín hiệu cao nhất khi công suất tín hiệu vào thấp nhất. Trong khi đó, hướng bơm ngược cung cấp công suất ra bão hoà cao nhưng có hệ số nhiễu cao hơn bơm thuận.

Do vậy, người ta đề nghị sử dụng cả hai laser bơm có bước sóng bơm khác nhau. Việc bơm tại bước sóng 1480 nm thường được sử dụng theo chiều ngược với hướng truyền tín hiệu và bơm tại 980 nm theo hướng thuận để sử dụng tốt nhất ưu điểm của mỗi loại bơm. Bơm tại 1480 nm có hiệu suất lượng tử cao hơn nhưng có hệ số nhiễu cao hơn, trong khi bơm tại bước sóng 980 nm có thể cung cấp một hệ số nhiễu gần mức giới hạn lượng tử. Hệ số nhiễu thấp phù hợp cho các ứng dụng tiền khuếch đại.

Một EDFA được bơm bằng một nguồn bơm có thể cung cấp công suất đầu ra cực đại khoảng +16 dBm trong vùng bão hoà hoặc hệ số nhiễu từ 5-6 dB trong vùng tín hiệu nhỏ. Cả hai bước sóng bơm được sử dụng đồng thời có thể cung cấp công suất đầu ra cao hơn; một EDFA được bơm kép có thể cung cấp công suất ra tới +26 dBm trong vùng công suất bơm cao nhất có thể đạt được. Hình 6 thể hiện một EDFA được bơm kép.

Giá trị các đặc tính của bộ khuếch đại EDFA được trình bày trong bảng 2.



Hình 7.20. Cấu hình bộ khuếch đại EDFA được bơm kép.

7.4.4. Phổ khuếch đại

Phổ độ lợi của EDFA được trình bày trong hình *Hình 7.18*. là tính chất quan trọng nhất của EDFA khi xác định các kênh tín hiệu được khuếch đại trong hệ thống WDM. Hình dạng của phổ khuếch đại phụ thuộc vào bản chất của sợi quang, loại tạp chất (Ge, Al) và nồng độ tạp chất được pha trong lõi của sợi quang.

Hình *Hình 7.18*. cho thấy phổ độ lợi của EDFA có lõi pha Ge khá rộng. Tuy nhiên, phổ độ lợi này không bằng phẳng. Điều này sẽ dẫn đến việc hệ số khuếch đại khác nhau đối với các bước sóng khác nhau. Nếu độ lợi của các kênh tín hiệu không đồng nhất, nhất là sau khi qua nhiều tầng EDFA, sai số độ lợi này sẽ tích lũy tuyến tính đến mức khi tới đầu thu kênh bước sóng có độ lợi cao làm cho đầu vào máy thu quá tải. Ngược lại, kênh tín hiệu có độ lợi nhỏ thì tỉ số SNR không đạt yêu cầu. Sự làm phẳng độ lợi là cần thiết để loại bỏ sự khuếch đại méo các tín hiệu qua các EDFA đường truyền ghép tầng.

Một số biện pháp được sử dụng để khắc phục sự không bằng phẳng của phổ độ lợi:

- Chọn lựa các bước sóng có độ lợi gần bằng nhau. WDM làm việc ở dải sóng băng C (1530 – 1565 nm). Trong dải bước sóng này chọn 40 bước sóng làm bước sóng công tác của WDM. Các bước sóng này có độ lợi gần bằng nhau.
- Công nghệ cân bằng độ lợi: dùng bộ cân bằng (equalizer) hấp thụ bớt công suất ở bước sóng có độ lợi lớn và bộ khuếch đại để tăng công suất của bước sóng có độ lợi nhỏ.
- Thay đổi thành phần trộn trong sợi quang: dùng sợi quang trộn thêm nhôm, photpho nhôm hay flo cùng với erbium sẽ tạo nên bộ khuếch đại có băng tần được mở rộng và phổ khuếch đại bằng phẳng hơn.

Ngoài ra, phổ độ lợi của EDFA còn phụ thuộc vào chiều dài của sợi EDF. Lý do là vì trạng thái nghịch đảo nồng độ thay đổi dọc theo chiều dài của sợi quang khi công suất bơm thay đổi.

Bộ khuếch đại EDFA hoạt động ở **băng C (1530-1565 nm)**. Tuy nhiên, độ lợi của sợi pha tạp có đuôi trải rộng đến khoảng 1605 nm. Điều này kích thích sự phát triển của các hệ thống hoạt động ở **băng L từ 1565 đến 1625 nm**. Nguyên lý hoạt động của EDFA băng L giống như EDFA băng C. Tuy nhiên, có sự khác nhau trong việc thiết kế EDFA cho băng C và băng L. Các phần tử bên trong bộ khuếch đại quang như bộ cách ly (isolator) và bộ ghép (coupler) phụ thuộc vào bước sóng nên chúng sẽ khác nhau trong băng C và

băng L. Sự so sánh các tính chất của EDFA trong băng C và băng L được thể hiện trong bảng 2.

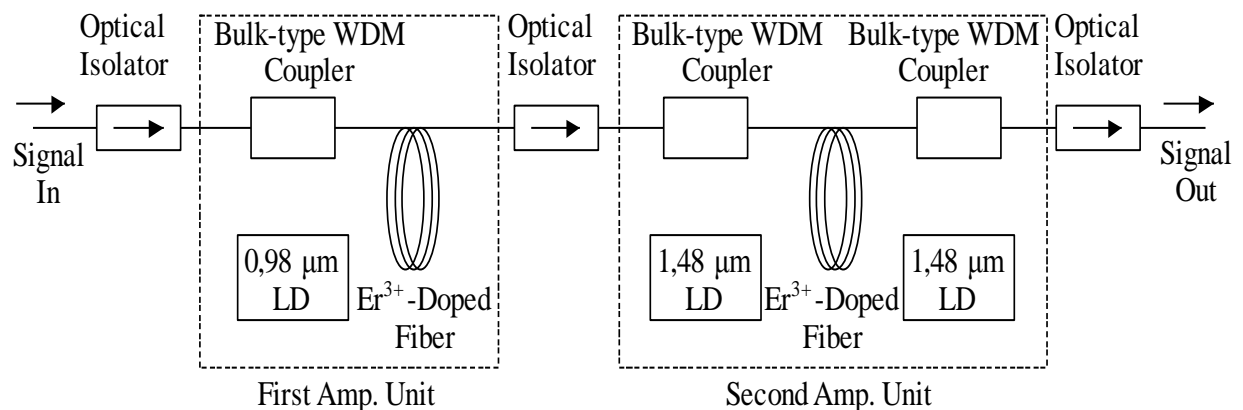
Bảng 2 Bảng so sánh EDFA hoạt động trong băng C và băng L

Tính chất	Băng C	Băng L
Độ lợi	Cao hơn	Nhỏ hơn khoảng 3 lần
Phổ độ lợi	Ít bằng phẳng hơn	Bằng phẳng hơn
Nhiều ASE	Thấp hơn	Cao hơn

Hình dưới trình bày cấu trúc của một bộ khuếch đại băng L làm bằng phẳng độ lợi trong khoảng bước sóng 1570nm – 1610nm với thiết kế hai tầng

Tầng đầu tiên được bơm ở bước sóng 980nm và hoạt động như một bộ EDFA truyền thống (sợi quang dài 20-30nm) có khả năng cung cấp độ lợi trong khoảng bước sóng 1530-1570 nm.

Ngược lại, tầng thứ hai có sợi quang dài 200m và được bơm hai chiều sử dụng laser 1480nm. Một bộ isolator được đặt giữa hai tầng này cho phép nhiễu ASE truyền từ tầng thứ 1 sang tầng thứ 2 nhưng ngăn ASE truyền ngược về tầng thứ nhất. Với cấu trúc nối tiếp như vậy, khuếch đại hai tầng có thể cung cấp độ lợi phẳng trên một vùng băng thông rộng trong khi vẫn duy trì mức nhiễu thấp.



Hình 7.21. Cấu hình của một bộ khuếch đại băng L làm bằng phẳng độ lợi trong khoảng bước sóng 1570nm – 1610nm với thiết kế hai tầng

7.4.5. Các tính chất của EDFA

a) Độ lợi (Gain)

Độ lợi của một bộ EDFA có thể được tính theo phương trình sau:

$$G = \exp\left[\int_0^L (N_2(z)\sigma_s^{(e)} - N_1(z)\sigma_s^{(a)})\Gamma_s dz\right] \quad (2.11)$$

Trong đó:

- $N_2(z)$, $N_1(z)$: mật độ ion erbium ở trạng thái kích thích và ở trạng thái nền tại vị trí z trong đoạn sợi quang pha erbium
- L : chiều dài sợi pha erbium.
- $\sigma_s^{(e)}$, $\sigma_s^{(a)}$: tiết diện ngang hấp thụ và phát xạ của ion erbium tại bước sóng tín hiệu.
- Phương trình (2.11) cho thấy độ lợi liên quan đến sự nghịch đảo nồng độ trung bình. Gọi $\overline{N_1}$, $\overline{N_2}$ lần lượt là nồng độ ion Erbium ở mức năng lượng nền và mức năng lượng kích thích trung bình. Khi đó $\overline{N_1}$, $\overline{N_2}$ sẽ được tính theo công thức sau:

$$\overline{N_1} = \frac{1}{L} \int_0^L N_1(z) ds \quad (2.12)$$

$$\overline{N_2} = \frac{1}{L} \int_0^L N_2(z) ds \quad (2.13)$$

Phương trình (2.11) có thể được viết lại một cách đơn giản hơn như sau:

$$G = \exp[\overline{N_2}\sigma_s^{(e)} - \overline{N_1}\sigma_s^{(a)}]\Gamma_s L \quad (2.14)$$

Từ phương trình trên ta thấy độ lợi tín hiệu sau khi đi qua sợi quang chỉ phụ thuộc vào sự nghịch đảo nồng độ các ion erbium trung bình trong sợi quang mà không phụ thuộc vào chi tiết về dạng nghịch đảo như một hàm đối với vị trí dọc theo chiều dài sợi quang. Trong phương trình (2.12), (2.13) có hai tham số $N_1(z)$ và $N_2(z)$ là hàm theo vị trí z dọc theo sợi quang được cho bởi

$$N_2(z) = \frac{\frac{\tau\sigma_s^{(a)}\Gamma_s}{hf_s A} P_s(z) + \frac{\tau\sigma_p^{(a)}\Gamma_p}{hf_s A} P_p(z)}{\frac{\tau(\sigma_s^{(a)} + \sigma_s^{(e)})\Gamma_s}{hf_s A} P_s(z) + \frac{\tau(\sigma_p^{(a)} + \sigma_p^{(e)})\Gamma_p}{hf_s A} P_p(z)} N \quad (2.15)$$

$$N_1(z) = N - N_2(z) \quad (2.16)$$

Trong đó:

- τ : thời gian sống của ion erbium ở trạng thái kích thích ${}^4I_{13/2}$.
- $P_s(z)$: công suất của tín hiệu tại vị trí z trong sợi quang.
- $P_p(z)$: công suất bơm tại vị trí z trong sợi quang.
- Γ_s : hệ số chồng lấp tại bước sóng tín hiệu.
- Γ_p : hệ số chồng lấp tại bước sóng bơm.
- f_p : tần số tín hiệu.
- f_p : tần số bơm.
- N : mật độ ion erbium tổng cộng.
- $\sigma_s^{(a)}, \sigma_s^{(e)}$: là tiết diện ngang hấp thụ và phát xạ tại bước sóng tín hiệu.
- $\sigma_p^{(a)}, \sigma_p^{(e)}$: là tiết diện ngang hấp thụ và phát xạ tại bước sóng bơm.
- h : hằng số Planck; $h = 6,625 \cdot 10^{-34} \text{J.s}$.

Từ công thức (2.15) ta thấy hệ số khuếch đại của EDFA phụ thuộc vào các yếu tố sau:

- Phụ thuộc vào nồng độ ion Er^{+3} : Khi nồng độ Er^{+3} trong sợi quang của bộ EDFA tăng thì khả năng chúng được chuyển lên mức năng lượng cao hơn càng nhiều, do đó hệ số khuếch đại tăng. Nhưng nếu nồng độ Er^{+3} tăng quá cao sẽ gây tích tụ dẫn đến hiện tượng tiêu hao quang làm cho hệ số khuếch đại giảm.
- Phụ thuộc vào công suất tín hiệu đến và công suất bơm quang: Khi công suất vào tăng, bức xạ bị kích tăng nhanh, nghĩa là ion Er^{+3} ở mức năng lượng cao trở về mức năng lượng cơ bản càng nhiều làm giảm nồng độ số ion Er^{+3} ở mức năng lượng cao, làm yếu đi khả năng bức xạ của ion Er^{+3} khi tín hiệu quang được đưa tới, do đó hệ số khuếch đại giảm. Sẽ có một mức giới hạn mà công suất tín hiệu vào tăng nhưng công suất ra không tăng nữa gọi là công suất bão hoà.
- Phụ thuộc vào chiều dài sợi: Khi chiều dài sợi ngắn thì tín hiệu không được khuếch đại nhiều do đó độ lợi tín hiệu nhỏ. Ngược lại, khi chiều dài tăng lên thì tín hiệu được khuếch đại nhiều hơn, do đó độ lợi lớn hơn. Tuy nhiên, khi chiều dài quá dài so với công suất bơm thì độ lợi tín hiệu sẽ bị giảm do chiều dài quá lớn mà công suất bơm lại không

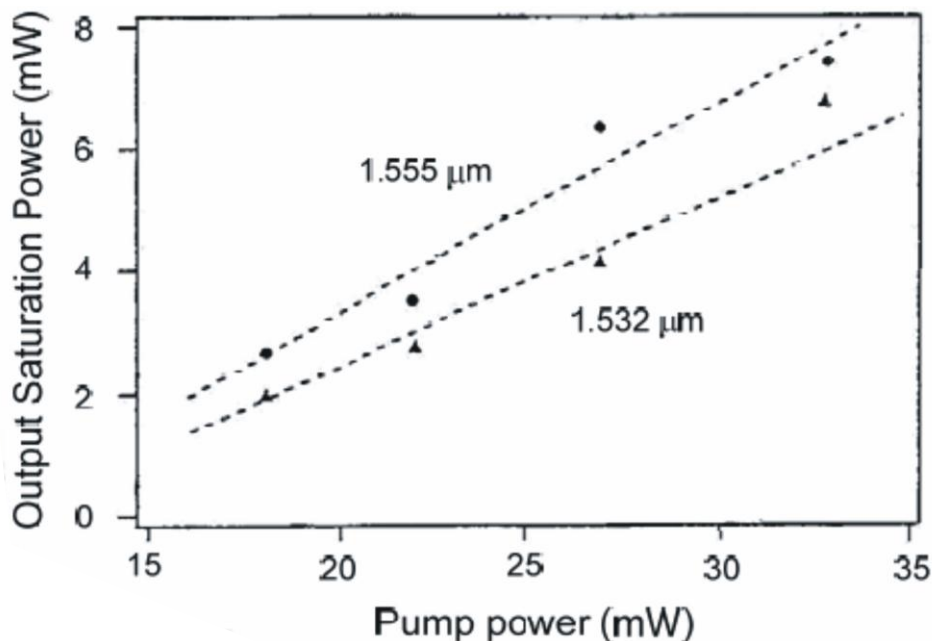
đáp ứng hết chiều dài sợi thì tín hiệu sẽ bị suy hao dần và do đó làm giảm độ lợi.

- Phụ thuộc vào công suất bơm: Công suất bơm càng lớn thì sẽ có nhiều ion erbium bị kích thích để trao đổi năng lượng với tín hiệu cần khuếch đại và sẽ làm cho hệ số khuếch đại tăng lên. Tuy nhiên, hệ số khuếch đại không thể tăng mãi theo công suất bơm vì số lượng các ion erbium được cấy vào sợi là có giới hạn.

Do vậy, tùy theo ứng dụng của EDFA, các yếu tố trên sẽ được hiệu chỉnh sau cho độ lợi của EDFA đạt giá trị yêu cầu với hiệu suất cao nhất. Thông thường, độ lợi của EDFA vào khoảng 20-40 dB tùy theo ứng dụng của EDFA là bộ khuếch đại công suất, khuếch đại đường truyền hay tiền khuếch đại.

b) Công suất ra bão hoà (Output saturation power)

Sự bão hoà xảy ra khi công suất tín hiệu vào EDFA lớn gây ra sự giảm hệ số khuếch đại. Vì vậy, nó giới hạn công suất ra của bộ khuếch đại. Sự bão hoà hệ số khuếch đại này xuất hiện khi công suất tín hiệu tăng cao và gây ra sự phát xạ kích thích ở một tỷ lệ cao và do đó làm giảm sự nghịch đảo nồng độ. Điều đó có nghĩa là số các ion erbium ở trạng thái kích thích giảm một cách đáng kể. Hệ quả là, công suất tín hiệu ở ngõ ra bị hạn chế bởi sự bão hoà công suất. Công suất ra bão hoà $P_{out,sat}$ được định nghĩa là tín hiệu ra mà ở đó hệ số khuếch đại bị giảm đi 3 dB so với khi khuếch đại tín hiệu nhỏ.



Hình 7.22. Công suất ra bão hoà tăng tuyến tính theo công suất bơm vào tại bước sóng bơm 975 nm đối với bước sóng tín hiệu là 1555 nm và 1532 nm.

Công suất ra bão hoà không phải là một hằng số mà tăng lên tuyến tính với công suất bơm (xem hình 8). Công suất bão hoà có thể được xác định bằng công suất tín hiệu ngõ ra mà tại đó độ lợi bằng độ lợi tín hiệu nhỏ trừ 3 dB. Như vậy bằng cách xác định độ lợi tín hiệu nhỏ ta có thể suy ra điểm bão hoà và từ đó xác định công suất bão hoà.

Công suất ra bão hoà cũng thay đổi tùy theo bước sóng của tín hiệu vì mật độ các ion Er^{3+} phân bố tại vùng năng lượng giả bên không bằng nhau. Hình 2.16 cho thấy công suất ra bão hoà tại 1.55 μm cao hơn tại 1.53 μm với cùng công suất bơm.

7.4.6. Ưu khuyết điểm của EDFA

a) Ưu điểm:

- Nguồn laser bơm bán dẫn có độ tin cậy cao, gọn và công suất cao.
- Cấu hình đơn giản: hạ giá thành của hệ thống.
- Cấu trúc nhỏ gọn: có thể lắp đặt nhiều EDFA trong cùng một trạm, dễ vận chuyển và thay thế.
- Công suất nguồn nuôi nhỏ: thuận lợi khi áp dụng cho các tuyến thông tin quang vượt biển.
- Không có nhiễu xuyên kênh khi khuếch đại các tín hiệu WDM như bộ khuếch đại quang bán dẫn.
- Hầu như không phụ thuộc vào phân cực của tín hiệu.

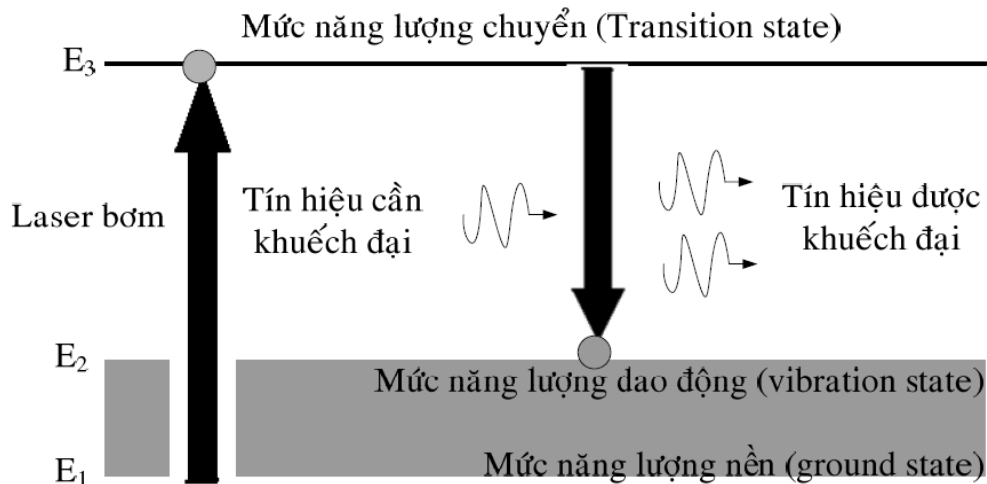
b) Khuyết điểm:

- Phổ độ lợi của EDFA không bằng phẳng.
- Băng tần hiện nay bị giới hạn trong băng C và băng L.
- Nhiễu được tích lũy qua nhiều chặng khuếch đại gây hạn chế cự ly truyền dẫn.

2.4 Bộ khuếch đại quang RAMAN (RA)

2.4.1 Nguyên lý hoạt động

Khuếch đại Raman dựa trên hiện tượng tán xạ Raman kích thích (Stimulated Raman Scattering). Tán xạ Raman kích thích là hiện tượng một nguyên tử hấp thụ năng lượng của một photon, sau đó tạo ra một photon có năng lượng khác. Vì vậy, tán xạ Raman kích thích được định nghĩa là hiện tượng photon thứ cấp được sinh ra do kích thích từ nguồn bên ngoài.



Hình 7.23. Sơ đồ chuyển năng lượng trong khuếch đại Raman

Để có khuếch đại Raman thì phải tạo ra sự nghịch đảo nồng độ. Điều này đạt được bằng cách cung cấp năng lượng cho các nguyên tử của sợi quang từ một laser bơm có bước sóng thấp hơn bước sóng của tín hiệu. Khi đó, các nguyên tử của sợi quang sẽ hấp thụ năng lượng bơm có năng lượng cao (bước sóng ngắn) và chuyển lên mức năng lượng cao hơn. Khi có tín hiệu đến, nó sẽ kích thích các nguyên tử đang ở mức năng lượng cao chuyển sang trạng thái năng lượng thấp hơn và giải phóng ra một năng lượng dưới dạng photon ánh sáng có cùng bước sóng (dài hơn

bước sóng bơm) và cùng pha với tín hiệu đến. Do đó, tín hiệu đã được khuếch đại

Dựa trên giản đồ năng lượng trên, tần số ánh sáng bơm $f_{\text{bơm}}$ và tần số ánh sáng được khuếch đại $f_{\text{khuếch đại}}$ được xác định như sau

$$f_{\text{bơm}} = (E_3 - E_1)/h$$

$$f_{\text{khuếch đại}} = (E_2 - E_1)/h$$

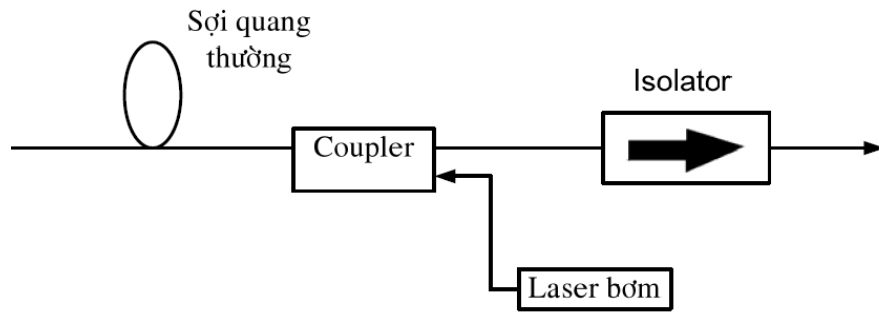
Trong đó

- h là hằng số Plank;
- E_1, E_2, E_3 là năng lượng của các trạng thái năng lượng cao (transition state), trạng thái năng lượng trung gian (vibration state) và trạng thái năng lượng thấp (ground state) của các nguyên tử trong sợi quang.

Không giống như nguyên lý khuếch đại của EDFA, khuếch đại Raman không cần một sợi quang riêng và đặc biệt (pha trộn ion Er^{3+}).

Trong khuếch đại Raman, tín hiệu quang được khuếch đại dọc theo toàn bộ chiều dài của sợi quang silic bình thường.

Cấu trúc của một bộ khuếch đại Raman được minh họa trong hình 2.19.



Hình 7.24. Cấu trúc của bộ khuếch đại Raman

Sợi quang: là nơi xảy ra quá trình khuếch đại. Sợi quang này cũng là sợi quang truyền tín hiệu như sợi SMF, DSF, ...

Trong khuếch đại quang không cần sử dụng sợi quang đặc biệt (pha ion Erbium) như bộ khuếch đại EFDA.

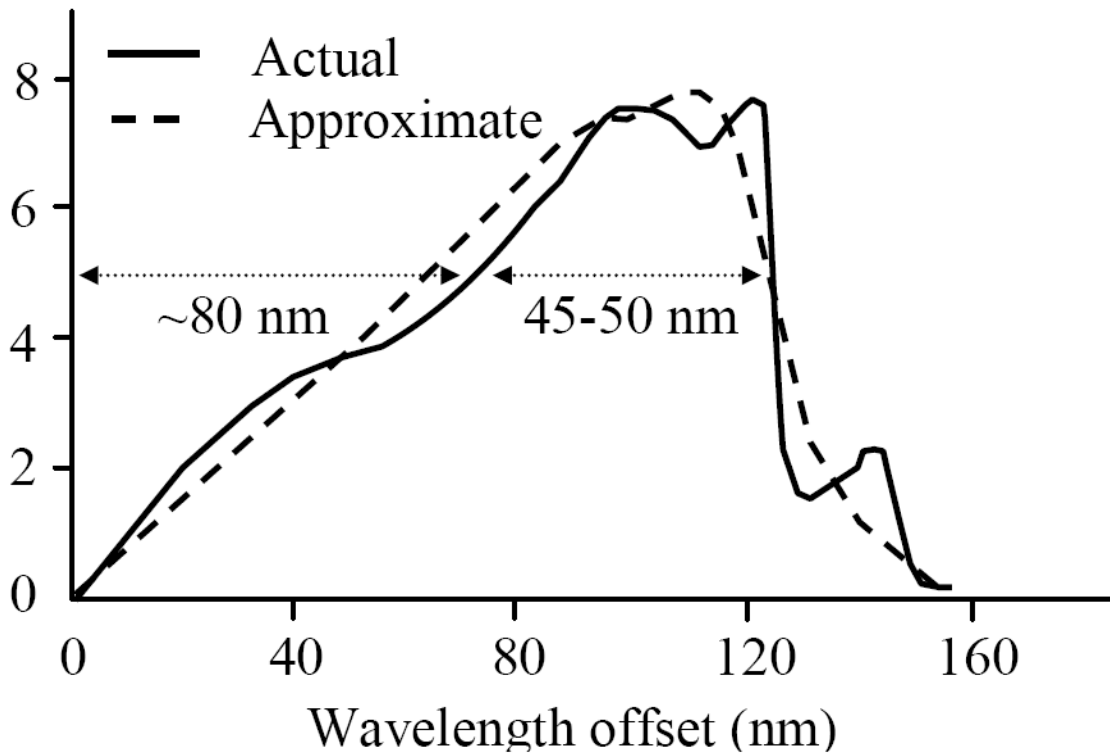
Bộ ghép (Coupler): dùng để ghép bước sóng tín hiệu vào với sóng bơm.

Laser bơm (Pump laser): dùng để cung cấp năng lượng cho các nguyên tử của sợi quang chuyển lên trạng thái kích thích, giúp tạo ra sự nghịch đảo nồng độ.

Bộ cách ly (Isolator): đặt ở hai đầu của bộ khuếch đại quang để ngăn chặn tín hiệu phản xạ ở hai đầu bộ khuếch đại. Đồng thời nó cũng giúp loại trừ nhiễu ASE theo hướng ngược về phía đầu vào có thể gây ảnh hưởng đến tín hiệu đầu vào.

2.4.2 Độ rộng băng tần và hệ số khuếch đại

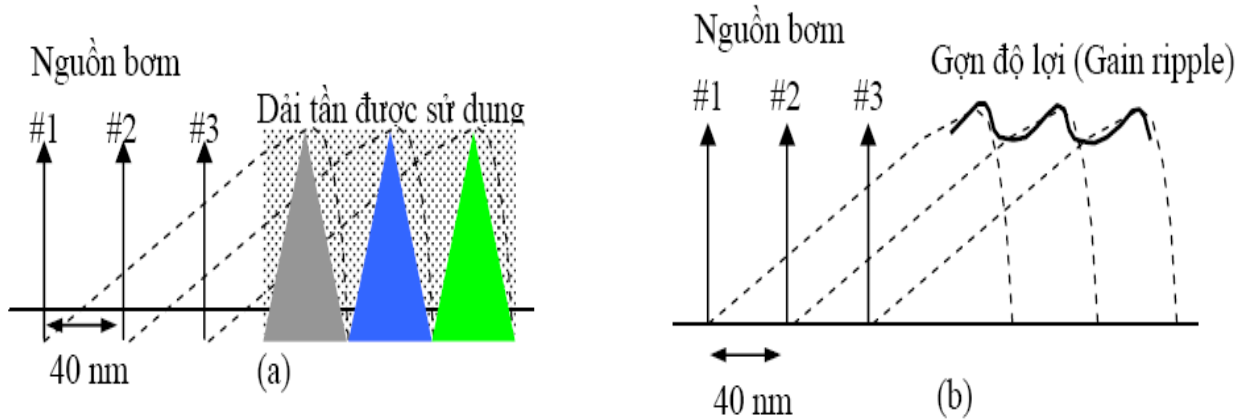
Hệ số khuếch đại Raman tăng hầu như tuyến tính với độ chênh lệch bước sóng giữa tín hiệu và nguồn bơm (wavelength offset), đạt giá trị đỉnh tại 100 nm và giảm nhanh chóng sau đó. Trong hình cũng cho thấy, băng thông độ lợi của khuếch đại Raman có thể đạt được từ 45-50nm.



Hình 7.25. Hệ số độ lợi Raman thay đổi theo độ chênh lệch bước sóng của tín hiệu và nguồn bơm (wavelength offset)

Nếu dải tần của các tín hiệu cần khuếch đại Raman lớn hơn băng thông độ lợi của khuếch đại Raman (giả sử 40nm), cần phải sử dụng nhiều nguồn bơm khác nhau. Mỗi nguồn bơm có bước sóng cách nhau khoảng 40nm (bằng với băng thông độ lợi). Khi đó, dải tần lớn của các tín hiệu có thể được khuếch đại một cách hiệu quả (xem Hình 7.26.-a). Tuy nhiên, do đặc tính khuếch đại của khuếch đại Raman và do khoảng của các bước sóng bơm, băng thông độ lợi tổng cộng có dạng gợn sóng như hình Hình 7.26.-b.

Với ưu điểm băng thông độ lợi lớn, khuếch đại Raman được quan tâm đến trong các ứng dụng thông tin quang. Tuy nhiên hiệu suất độ lợi của khuếch đại Raman không cao. Để đạt được hệ số khuếch đại lớn, cần phải sử dụng công suất bơm tương đối cao.



Hình 7.26.

(a) Với khoảng cách các nguồn bơm 40nm, các kênh nằm trong dải tần rộng được khuếch đại

(b) Gợn độ lợi do khuếch đại Raman và do khoảng cách các nguồn bơm

2.4.3 Ưu khuyết điểm của khuếch đại Raman:

So với các loại khuếch đại quang khác, khuếch đại Raman có những ưu điểm sau:

- Tạp âm nhiễu thấp
- Cấu trúc đơn giản, không cần sợi đặc biệt.
- Dễ chọn băng tần.
- Có thể đạt được băng thông rộng nhờ kết hợp vài laser bơm.

Tuy nhiên, bên cạnh những ưu điểm đó bộ khuếch đại Raman cũng có những nhược điểm như sau:

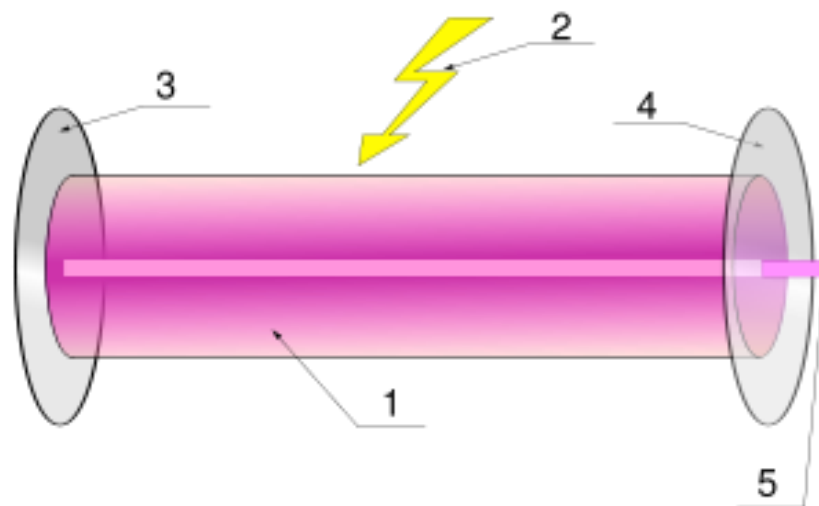
- Xuyên âm giữa các kênh tín hiệu do hiện tượng tán xạ Raman kích thích SRS. Đây là một trong các hiệu ứng phi tuyến của sợi quang có thể gây ảnh hưởng đến chất lượng của hệ thống ghép kênh theo bước sóng WDM.
- Hệ số khuếch đại thấp.
- Hiệu suất khuếch đại thấp hơn so với EDFA: khuếch đại Raman cần một công suất bơm lớn hơn để đạt cùng một giá trị độ lợi

Chương 8 LASER

Giới thiệu chung

Laser là tên viết tắt của cụm từ Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation có nghĩa là "khuếch đại ánh sáng bằng phát xạ cưỡng bức". Laser được phỏng theo maser (Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation-Sự khuếch đại sóng viba do Sự phát xạ cưỡng bức), một thiết bị có cơ chế tương tự nhưng tạo ra tia vi sóng hơn là các bức xạ ánh sáng. Maser đầu tiên được tạo ra bởi Charles H. Townes và sinh viên tốt nghiệp J.P. Gordon và H.J. Zeiger vào năm 1953. Maser đầu tiên đó không tạo ra tia sóng một cách liên tục. Nikolay Gennadiyevich Basov và Aleksandr Mikhailovich Prokhorov của Liên bang Xô Viết đã làm việc độc lập trên lĩnh vực lượng tử dao động và tạo ra hệ thống phóng tia liên tục bằng cách dùng nhiều hơn 2 mức năng lượng. Hệ thống đó có thể phóng ra tia liên tục mà không cho các hạt xuống mức năng lượng bình thường. Năm 1964, Charles Townes, Nikolai Basov và Aleksandr Prokhorov cùng nhận giải thưởng Nobel vật lý về nền tảng cho lĩnh vực điện tử lượng tử, dẫn đến việc tạo ra máy dao động và phóng đại dựa trên thuyết maser-laser.

8.1 Các phần tử của quang laser



Hình 8.1. Các phần tử của quang laser

- (1) Buồng cộng hưởng (vùng bị kích thích)
- (2) Nguồn nuôi (năng lượng bơm vào vùng bị kích thích)
- (3) gương phản xạ toàn phần
- (4) gương bán mạ
- (5) tia laser

Buồng cộng hưởng chứa hoạt chất laser, đó là một chất đặc biệt có khả năng khuếch đại ánh sáng bằng phát xạ cưỡng bức để tạo ra laser. Tính chất của laser phụ thuộc vào hoạt chất đó, do đó người ta căn cứ vào hoạt chất để phân loại laser.

Nguồn nuôi là phần cung cấp năng lượng cho hệ thống laser. Bao gồm cực phóng điện, đèn nháy, đèn hồ quang, ánh sáng từ laser khác. Việc lựa chọn loại nguồn nuôi nào để sử dụng dựa chủ yếu vào môi trường kích thích là loại gì, và điều này là yếu tố chủ chốt quyết định làm sao mà năng lượng truyền vào trong môi trường.

Ví dụ: Laser He-Ne dùng cực phóng điện trong hỗn hợp khí Heli Neon. Laser Nd:YAG dùng ánh sáng hội tụ từ đèn nháy Xenon.

Môi trường kích thích là yếu tố chính quyết định bước sóng, và các tính chất khác của tia laser. Có hàng trăm môi trường kích thích có thể làm được. Môi trường kích thích bị kích thích bằng nguồn bơm tạo ra sự kích thích đồng đều giữa các electron, cần thiết cho sự phát xạ cưỡng bức các hạt photon, dẫn đến hiện tượng khuếch đại ánh sáng.

Một ví dụ về cơ chế hoạt động của laser có thể được miêu tả cho laser thạch anh. Dưới sự tác động của hiệu điện thế cao, các electron của thạch anh di chuyển từ mức năng lượng thấp lên mức năng lượng cao tạo nên trạng thái đảo nghịch mật độ của electron.

Ở mức năng lượng cao, một số electron sẽ rơi ngẫu nhiên xuống mức năng lượng thấp, giải phóng hạt ánh sáng được gọi là photon. Các hạt photon này sẽ toả ra nhiều hướng khác nhau từ một nguyên tử, và phải các nguyên tử khác, kích thích electron ở các nguyên tử này rơi xuống tiếp, sinh thêm các photon cùng tần số, cùng pha và cùng hướng bay, tạo nên một phản ứng dây chuyền khuếch đại dòng ánh sáng.

Các hạt photon bị phản xạ qua lại nhiều lần trong vật liệu, nhờ các gương để tăng hiệu suất khuếch đại ánh sáng. Một số photon ra ngoài nhờ có gương phản xạ tại một đầu của vật liệu. Tia sáng đi ra chính là tia laser.

8.2 Nguyên tắc hoạt động laser

8.2.1 Sự phát xạ cưỡng bức

Ta đã biết rằng sự phát xạ bởi các hạt (nguyên tử, phân tử, ion) trong các nguồn sáng thông thường là các quá trình xảy ra một cách tự phát, hoàn toàn ngẫu nhiên. Khi nhận được một năng lượng thích hợp, hạt sẽ từ trạng thái bền nhảy lên trạng thái kích thích có mức năng lượng cao hơn. Sau một thời gian, hạt sẽ rơi trở về trạng thái bền và phóng thích năng lượng (đã hấp thụ) dưới dạng ánh sáng, nghĩa là phát ra photon.

Năm 1917, khi nghiên cứu quá trình tương tác giữa ánh sáng và vật chất, Einstein cho rằng: Không những các hạt phát xạ một cách ngẫu nhiên như trên mà còn có thể phát xạ do tác động của bên ngoài. Khi ta chiếu vào hệ

một bức xạ, thì các hạt đang ở mức năng lượng kích thích E₂ sẽ rơi trở về trạng thái căn bản E₁ và phát ra bức xạ : Đó là hiện tượng bức xạ kích thích động (hay bức xạ cảm ứng, bức xạ cưỡng bức). Đây là cơ sở hoạt động của máy Laser.

Các hạt thay đổi giữa hai mức năng lượng E₁ (căn bản) và E₂ (kích thích). Khi ta kích thích bằng quang tử (photon) có năng lượng.

$$h\nu = E_2 - E_1$$

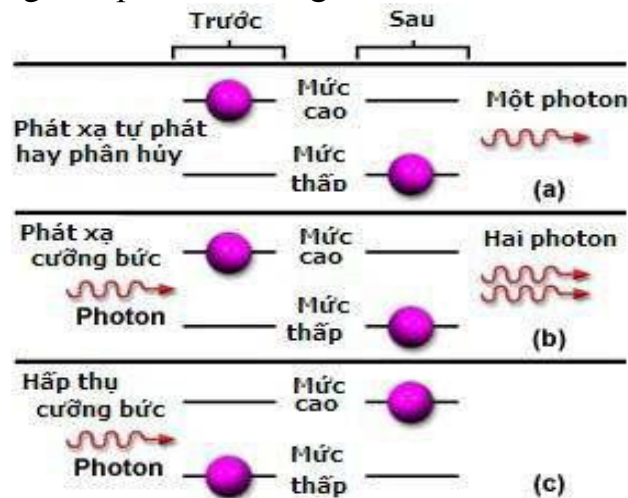
Thì các hạt từ mức E₁ sẽ nhảy lên mức E₂.

Số hạt ở mức năng lượng kích thích E₂ (cao hơn) bình thường ít hơn ở mức năng lượng căn bản E₁ (thấp hơn).

❖ Tóm lại, khi ta chiếu vào hệ một chùm tia sáng kích thích có năng lượng photon là $h\nu$ (thì trong một thời gian đó sẽ làm cho một số hạt từ trạng thái cơ bản E₁ nhảy lên trạng thái kích thích E₂ (sự hấp thụ), trong thời gian đó, một số hạt từ mức E₂ tự phát rơi trở về E₁, một số hạt khác bị đụng với photon kích thích cũng rơi trở về E₁ (sự phát xạ ngẫu nhiên và phát xạ cưỡng bức). Nhưng luôn luôn $n_2 < n_1$. Do đó, các photon kích thích $h\nu$ (gặp các hạt ở mức E₁ nhiều hơn gặp các hạt ở mức E₂, nghĩa là hiện tượng hấp thụ mạnh hơn hiện tượng phát xạ ánh sáng. Vì vậy, ở điều kiện bình thường, khi đi qua một môi trường vật chất bao giờ ánh sáng cũng bị yếu đi.

Khi một photon gặp một hạt ở trạng thái kích thích và làm hạt này rơi trở về mức căn bản thì photon được hạt phóng thích cũng là $h\nu$ (năng lượng do hạt hấp thụ khi đi từ E₁ lên E₂), photon mới sinh ra này hoàn toàn giống photon.

Như vậy kết quả của sự kích thích là từ một photon tới hạt, ta được hai photon phát xạ. Ta gọi là phát xạ cưỡng bức



Hình 8.2. Các quá trình phát xạ tự phát và phát xạ cưỡng bức

8.2.2 Sự khuếch đại ánh sáng đi qua một môi trường

Bây giờ ta thử giả thuyết có một trường hợp: Trong một môi trường số hạt ở trạng thái kích thích lớn hơn số hạt ở trạng thái căn bản : $n_2 > n_1$. Trong trường hợp này, photon kích thích sẽ gặp các hạt ở trạng thái kích thích nhiều

hơn ở trạng thái căn bản. Khi đó hiện tượng bức xạ sẽ mạnh hơn hiện tượng hấp thụ và kết quả ngược với trường hợp trên, khi truyền qua môi trường, ánh sáng mạnh hơn lên.

Thực vậy, khi một photon kích thích gặp một hạt ở trạng thái kích thích và gây ra sự phát xạ thì một photon thành hai. Cứ như thế số photon tăng lên rất nhanh, và khi truyền qua môi trường, ta được một chùm tia sáng có cường độ mạnh.

Như vậy, vấn đề 1à: Muốn có một chùm tia sáng cực mạnh bằng cách được khuếch đại lên như trên, ta phải làm cách nào có $n_2 > n_1$. Đó là sự “đảo ngược mật độ (nồng độ)”. Môi trường khi bị đảo ngược mật độ (nồng độ) như vậy được gọi là môi trường hoạt tính.

Để số hạt có năng lượng cao nhiều hơn hạt số hạt có năng lượng thấp, người ta phải cung cấp năng lượng cho môi trường, phải “bơm” năng lượng cho nó. Một trong các cách làm nghịch đảo mật độ (nồng độ) là phương pháp “bơm” quang học. Kỹ thuật này đưa đến giải Nobel về vật lý cho nhà bác học Pháp Kastler năm 1966 (công trình này của Kastler được thực hiện từ năm 1950). Kastler dùng một chùm tia sáng có cường độ mạnh làm bơm để bơm năng lượng cho môi trường khiến nó trở thành hoạt tính. Phương pháp bơm quang học thường được dùng với các chất rắn và chất lỏng. Với laser khí, người ta thường nghịch đảo mật độ (nồng độ) bằng cách phóng điện trong khí kém.

8.2.3 Bộ cộng hưởng

Với điều kiện $n_2 > n_1$, môi trường cho khả năng có thể thực hiện sự khuếch đại cường độ ánh sáng, nhưng muốn có được một chùm tia Laser có đặc tính định hướng cao độ thì chỉ có môi trường hoạt tính thì chưa đủ, mà còn cần một bộ phận gọi là bộ cộng hưởng. Bộ phận này vừa có tác dụng tăng cường cường độ ánh sáng, vừa có tác dụng định hướng chùm tia laser khi nó phóng ra khỏi máy. Trong trường hợp đơn giản nhất, bộ phận cộng hưởng gồm hai gương phẳng M1 và M2, đặt ở hai đầu máy.

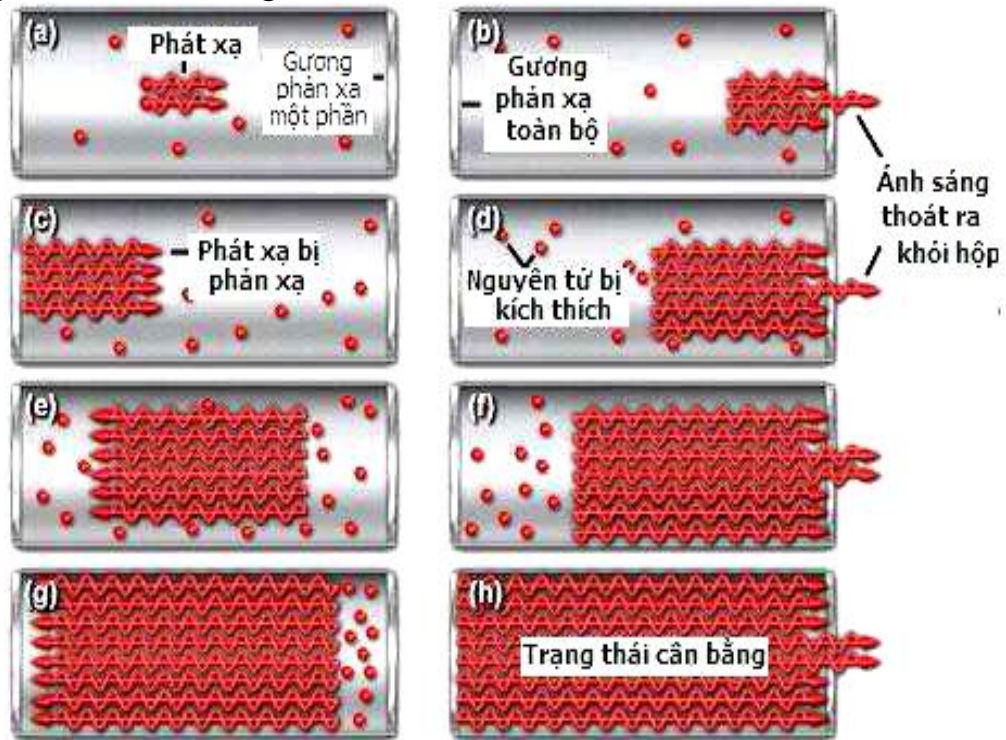
Các photon có phương di chuyển thẳng góc với hai gương sẽ dội đi, dội lại nhiều lần trong môi trường hoạt tính. Như vậy bộ phận cộng hưởng đóng vai trò như một cái bẫy ánh sáng. Trong khi phản chiếu qua lại như thế, các photon đập vào các hạt ở trạng thái kích thích, làm phóng thích các photon khác. Các photon này lại phản chiếu qua lại giữa M1 và M2, đập vào các hạt ở trạng thái kích thích và lại làm bật ra các photon mới nữa, cứ như thế cường độ ánh sáng tăng lên rất mạnh.

Với các photon này không di chuyển thẳng góc với hai gương thì sau một hồi di chuyển, chúng bị lọt ra ngoài máy.

8.2.4 Thêm phát xạ cưỡng bức

Ta nhận thấy trong cách cấu tạo trên của máy laser, có thể một phần năng lượng sẽ bị mất đi do sự phản chiếu trên hai gương M1, M2 và do sự

nhiều xạ làm lệch phương di chuyển của các photon. Do đó, ta chỉ thực sự có hiện tượng khuếch đại cường độ ánh sáng nếu công suất P sinh ra do sự phát xạ cưỡng bức lớn hơn công suất P' bị mất đi



Hình 8.3. Sự phát xạ cưỡng bức trong buồng cộng hưởng laser

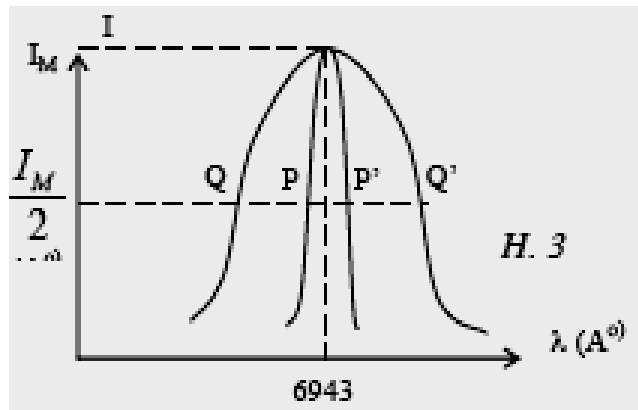
Như vậy muốn có được sự khuếch đại cường độ ánh sáng, không những ta phải có điều kiện đầu tiên $n_2 > n_1$ mà $n_2 - n_1$ phải lớn hơn một trị số (dương) xác định. Trị số này được gọi là thêm phát xạ cưỡng bức. Ta có trị số càng lớn thì thêm phát xạ cưỡng bức càng thấp.

Chỉ khi vào $n_2 - n_1$ vượt qua thêm, thì mới có ánh sáng laser phát ra.

8.2.5. Các đặc tính của tia laser

1. Tính đơn sắc

Các photon phát xạ cưỡng bức mang cùng một năng lượng hạt nên ánh sáng rất đơn sắc. Nếu xét ánh sáng phát ra bởi ngọc hồng tảo thì trong trường hợp laser, bề rộng PP' của vạch 6943A⁰ hẹp khoảng 10^{-4} lần so với bề rộng QQ' của vạch này trong trường hợp phát xạ thông thường.



Hình 8.4. Tính đơn sắc

2. Tính đồng pha

Với một nguồn sáng thông thường, ánh sáng phát ra bởi các hạt là ánh sáng không đồng pha nhau, nghĩa là không có một sự liên hệ nào về pha giữa các dao động phát ra bởi các hạt. Trong trường hợp nguồn sáng laser, các photon phát ra đều đồng pha nên ánh sáng laser là 1 chùm ánh sáng điều hợp. Chính vì vậy, chùm tia laser có thể gây ra các tác dụng rất mạnh (tổng hợp các dao động đồng pha).

3. Tính song song

Chùm tia laser phát ra song song với trục, với một góc loe rất nhỏ.

Năm 1962, người ta tạo ra một chùm tia laser có góc loe là 3×10^{-5} rad.

8.2.6. Các chế độ hoạt động

1. Chế độ phát liên tục

Trong chế độ phát liên tục, công suất của một laser tương đối không đổi so với thời gian. Sự đảo nghịch mật độ (electron) cần thiết cho hoạt động laser được duy trì liên tục bởi nguồn bơm năng lượng đều đặn.

2. Chế độ phát xung

Trong chế độ phát xung, công suất laser luôn thay đổi so với thời gian, với đặc trưng là các giai đoạn “đóng” và “ngắt” cho phép tập trung năng lượng cao nhất có thể trong một thời gian ngắn nhất có thể.

Các dao laser là một ví dụ, với năng lượng đủ để cung cấp một nhiệt lượng cần thiết, chúng có thể làm bốc hơi một lượng nhỏ vật chất trên bề mặt mẫu vật trong thời gian rất ngắn. Tuy nhiên, nếu cùng năng lượng như vậy nhưng tiếp xúc với mẫu vật trong thời gian dài hơn thì nhiệt lượng sẽ có thời gian để xuyên sâu vào trong mẫu vật do đó phần vật chất bị bốc hơi sẽ ít hơn.

Có rất nhiều phương pháp để đạt được điều này, như

- + Phương pháp chuyển mạch Q (Q-switching)
- + Phương pháp khóa kiểu (modelocking)

+ Phương pháp bơm xung (pulsed pumping)

Dao laser: Thiết bị là sự kết hợp giữa 2 công nghệ: laser femto giây và hiển vi huỳnh quang hai photon, thành một loại máy thăm dò linh hoạt cỡ nhỏ duy nhất. Máy thăm dò có thể xác định các tế bào đơn lẻ trong không gian 3 chiều, đâm xuyên tới 250 micromet vào trong khối mô.

8.2.7. Dạng phổ

Hiện tượng laser xảy ra do sự tương tác của hai hệ thống

+ Hệ nguyên tử có chuyển mức năng lượng của điện tử làm phát sinh photon.

+ Hốc cộng hưởng tạo bởi các gương đầu cuối.

1. Tương tác giữa bức xạ với hệ nguyên tử

Một photon sẽ phát sinh khi 1 điện tử chuyển từ 1 mức năng lượng cao xuống 1

mức năng lượng thấp hơn:

$$h\nu = E_2 - E_1$$

Trong thực tế có sự mở rộng vạch phổ do 2 quá trình sau:

- Homogeneous broadening: đặc trưng cho tất cả các nguyên tử trong hệ,
- Inhomogeneous broadening: vạch phổ bị mở rộng do các hiệu ứng nguyên tử riêng biệt. Trong tinh thể các nguyên tử khác nhau có thể có các chuyển mức năng lượng khác nhau ít do các nguyên tử lân cận. Các nguyên tử trong khi chuyển động theo các hướng khác nhau với các vận tốc khác nhau, do đó gây ra các dịch chuyển Doppler khác nhau lên tần số

* Quá trình này chiếm ưu thế với laser khí; laser Helium-neon có độ rộng bán phổ $\approx 1.1 \times 10^9$ Hz đến 1.4×10^9 Hz

* Phổ của laser thực có thể bị ảnh hưởng do tổn hao phản xạ bởi gương và tán xạ không khí

2. Hốc cộng hưởng tạo bởi các gương đầu cuối

Điều kiện cộng hưởng: hành trình qua hốc $2L =$ số nguyên m lần bước sóng

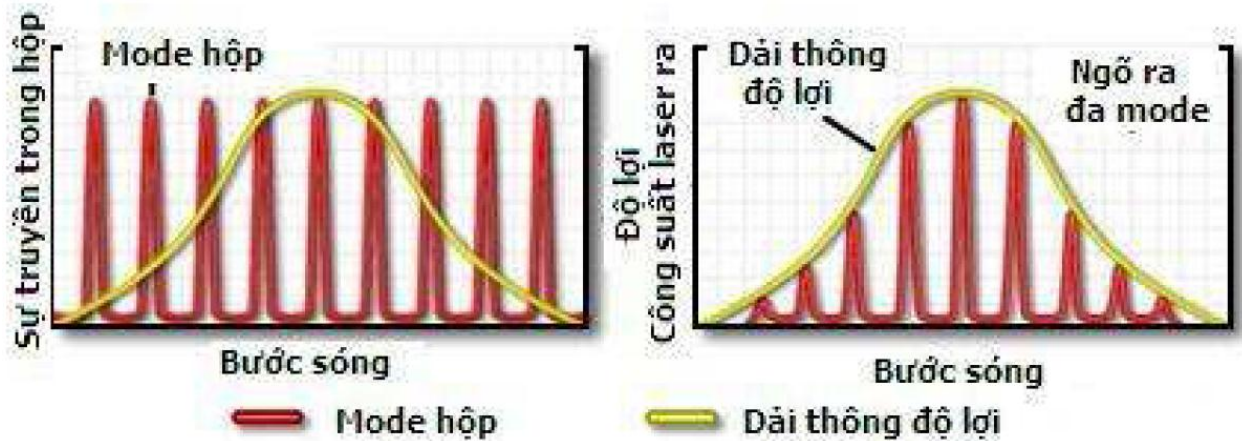
$$2L = m\lambda$$

Có rất nhiều tần số laser được phép, cách nhau các khoảng

$$\Delta f = \frac{c}{2L}$$

gọi là các mode hốc cộng hưởng (cavity modes) hay mode dọc (longitudinal modes)

Người thiết kế laser phải tối ưu hoá thiết kế cho tần số mong muốn nhờ việc điều khiển hỗn hợp khí, các đặc trưng kích thích và phản xạ của hốc và có thể dùng bộ lọc, hoặc tăng khoảng cách giữa các gương (tăng L).



Hình 8.5. mode dọc (longitudinal modes)

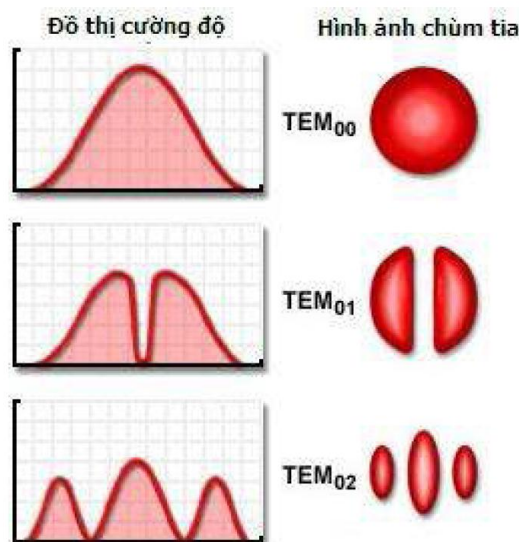
Trong thực tế chỉ có những chuyển mức năng lượng với thời gian sống tương đối lớn mới có thể tạo ra các vạch phổ có thể sử dụng được.

Năng lượng laser khả dụng nhận được khi độ lợi của hốc được điều chỉnh để chọn 1 trong các vạch laser khả dĩ.

Sự Phát xạ đồng thời này được gọi là longitudinal modes.

Ngoài ra, hốc laser có thể tạo ra một số mode không gian hay TEM modes (mode ngang Transverse Electric Magnetic). Các mode này hình thành do các tia hơi lệch so với trục chính.

Trong thực tế, mode mong muốn là TEM₀₀, là tia đơn với phân bố năng lượng theo phân bố Gauss.



Hình 8.6. mode ngang

8.2.8. Điều khiển Laser

Công suất bức xạ, bước sóng, dòng hoạt động và thời gian sử dụng của Laser đều thay đổi theo nhiệt độ, do đó cần có các vòng điều khiển điện và điều khiển nhiệt.

+ Vòng điều khiển điện:

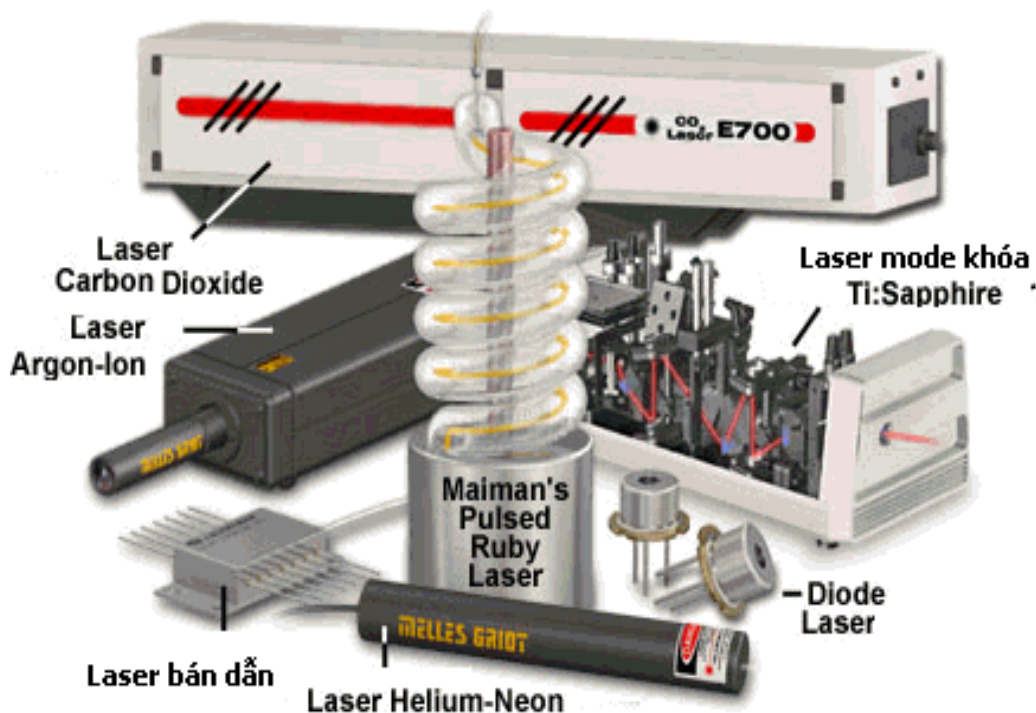
- Chống các xung dòng và thể phá hủy.
- Điều chế dòng laser
- Điều chỉnh dòng ngưỡng

+ Vòng điều khiển nhiệt:

- Tiếp xúc nhiệt với vỏ laser.
- Thường chứa linh kiện bơm nhiệt bán dẫn gọi là thermoelectric cooler hoặc Peltier device có tác dụng thu nhiệt (bơm nhiệt từ laser ra vỏ ngoài của đầu laser).

- Bơm nhiệt điện: dùng điện tử chuyển nhiệt lượng từ mặt hấp thụ nhiệt ra mặt truyền nhiệt thông qua dây các bán dẫn BiTe (Bismuth Telluride) loại N và P ghép luân phiên với kim loại tiếp xúc với các mặt truyền nhiệt và mặt hấp thụ nhiệt.

8.3. Các kiểu laser



Hình 8.7. Các loại laser thông dụng

8.3.1. Laser chất rắn

Có khoảng 200 chất rắn có khả năng dùng làm môi trường hoạt chất laser. Một số loại laser chất rắn thông dụng:

+ YAG-Neodym: hoạt chất là Yttrium Aluminium Garnet (YAG) cộng thêm 2-5% Neodym, có bước sóng 1060nm thuộc phổ hồng ngoại gần. Có thể phát liên tục tới 100W hoặc phát xung với tần số 1000-10 000Hz.

+ Hồng ngọc (Rubi): hoạt chất là tinh thể Alluminium có gắn những ion chrom, có bước sóng 694,3nm thuộc vùng đỏ của ánh sáng trắng.

+ Bán dẫn: loại thông dụng nhất là diot Gallium Arsen có bước sóng 890nm thuộc phổ hồng ngoại gần. (trình bày kỹ ở phần 8.4.)

8.3.2. Laser chất khí

- He-Ne: hoạt chất là khí Heli và Neon, có bước sóng 632,8nm thuộc phổ ánh sáng đỏ trong vùng nhìn thấy, công suất nhỏ từ một đến vài chục mW.

- Argon: hoạt chất là khí argon, bước sóng 488 và 514,5nm.

CO₂: bước sóng 10 600nm thuộc phổ hồng ngoại xa, công suất phát xạ có thể tới megawatt (MW). Trong y học ứng dụng làm dao mổ.

Môi trường kích thích và loại	Bước sóng	Nguồn kích thích	Ứng dụng và ghi chú
Laser khí He-Ne	632.8 nm (543.5 nm, 593.9 nm, 611.8 nm, 1.1523 μm, 1.52 μm, 3.3913 μm)	Cực phóng điện	Giao thoa kế, holograph, quang phổ học, đọc mã vạch, căn chỉnh, miêu tả quang học.
Laser khí ion Argon	488.0 nm, 514.5 nm, (351 nm, 465.8 nm, 472.7 nm, 528.7 nm)	Cực phóng điện	Chữa trị vông mạc bằng ánh sáng (cho người bệnh tiểu đường), in thạch bản, là nguồn kích thích các laser khác.
Laser khí Ion Kryton	416 nm, 530.9 nm, 568.2 nm, 647.1 nm, 676.4 nm, 752.5 nm, 799.3 nm	Cực phóng điện	Nghiên cứu khoa học, trình diễn ánh sáng.
Laser khí ion Xenon	Nhiều vạch từ cực tím đến hồng ngoại.	Cực phóng điện	Nghiên cứu khoa học.
Laser khí Nitơ	337.1 nm	Cực phóng điện	Là nguồn kích thích cho laser màu, đo độ ô nhiễm, nghiên cứu khoa học, Laser nitơ có khả năng hoạt động ở cường độ yếu.
Laser H-F	2.7 đến 2.9 μm (H-F) 3.6 đến 4.2 μm (D-F)	Phản ứng cháy ethylene và	Dùng cho nghiên cứu vũ khí laser, dùng sóng phát ra liên tục và có tính công phá lớn.

		NF ₃	
Laser hoá học Ôxy-Iốt	1.315 μm	Phản ứng hoá học trong giữa Ô-xy và I-ốt,	Vũ khí laser, nghiên cứu vật liệu và khoa học.
Laser khí CO ₂	10.6 μm, (9.4 μm)	Phóng điện ngang (công suất cao) hay dọc (công suất thấp)	Gia công vật liệu (cắt, hàn), phẫu thuật.
Laser khí CO	2.6 đến 4 μm, 4.8 đến 8.3 μm	Cực phóng điện	Gia công vật liệu (chạm khắc, hàn), phổ học quang-âm.
Excimer laser	193 nm (ArF), 248 nm (KrF), 308 nm (XeCl), 353 nm (XeF)	Excimer tái hợp nhờ phóng điện	Quang thạch bản cực tím cho chế tạo link kiện bán dẫn, phẫu thuật laser, LASIK.

Hình 8.8. Bảng mô tả các loại laser khí

8.3.3. Laser chất lỏng

Môi trường hoạt chất là chất lỏng, thông dụng nhất là laser màu.

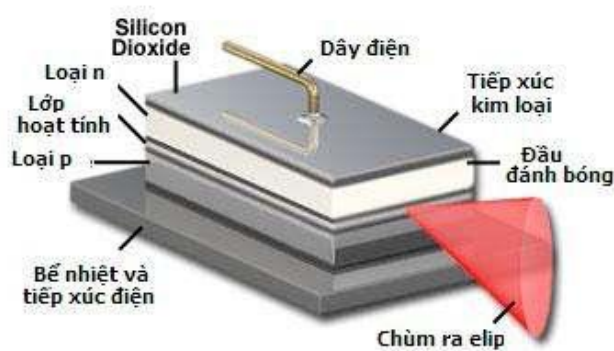
➤ Tính chất:

+ Độ định hướng cao: tia laser phát ra hầu như là chùm song song do đó khả năng chiếu xa hàng nghìn km mà không bị tán xạ.

+ Tính đơn sắc rất cao: chùm sáng chỉ có một màu (hay một bước sóng) duy nhất. Đây là tính chất đặc biệt nhất mà không nguồn sáng nào có.

+ Tính đồng bộ của các photon trong chùm tia laser: Có khả năng phát xung cực ngắn: cỡ mili giây (ms), nano giây, pico giây, cho phép tập trung năng lượng tia laser cực lớn trong thời gian cực ngắn.

8.4. Laser Diode (LD)



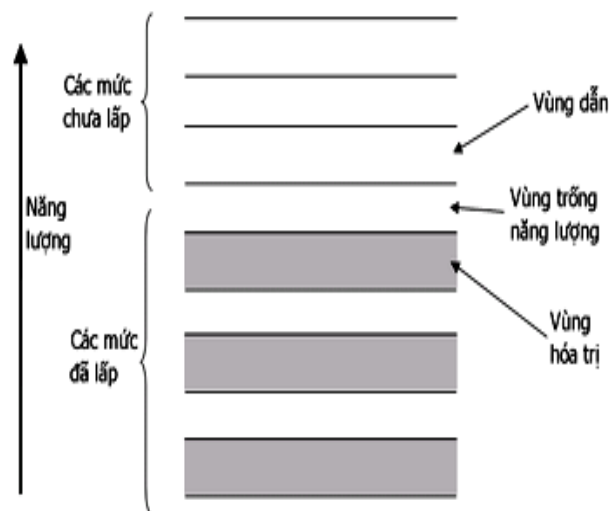
Hình 8.9. Diode laser bán dẫn

Một loại laser có cấu tạo tương tự như một diod. Nó có môi trường kích thích là chất bán dẫn. Diod laser hoạt động gần giống với diod phát quang. Nó cũng được gọi là đèn diode nội xạ và được viết tắt là LD hay ILD.

Chất bán dẫn (Semiconductor) là vật liệu trung gian giữa chất dẫn điện và chất cách điện. Chất bán dẫn hoạt động như một chất cách điện ở nhiệt độ thấp và có tính dẫn điện ở nhiệt độ phòng. Gọi là "bán dẫn" nghĩa là có thể dẫn điện ở một điều kiện nào đó, hoặc ở một điều kiện khác sẽ không dẫn điện.

8.4.1. Vùng năng lượng trong chất bán dẫn

Tính chất dẫn điện của các vật liệu rắn được giải thích nhờ lý thuyết vùng năng lượng. Như ta biết, điện tử tồn tại trong nguyên tử trên những mức năng lượng gián đoạn (các trạng thái dừng). Nhưng trong chất rắn, khi mà các nguyên tử kết hợp lại với nhau thành các khối, thì các mức năng lượng này bị phủ lên nhau, và trở thành các vùng năng lượng và sẽ có ba vùng chính.



Hình 8.10. Vùng năng lượng trong chất bán dẫn

8.4.2. Cấu trúc năng lượng điện tử trong mạng nguyên tử của chất bán dẫn

Vùng hóa trị được lấp đầy, trong khi vùng dẫn trống. Mức năng lượng Fermi nằm ở vùng trống năng lượng.

- Vùng hoá trị (valence band): Là vùng có năng lượng thấp nhất theo thang năng lượng, là vùng mà điện tử bị liên kết mạnh với nguyên tử và không linh động.

- Vùng dẫn (Conduction band): Vùng có mức năng lượng cao nhất, là vùng mà điện tử sẽ linh động (như các điện tử tự do) và điện tử ở vùng này sẽ là điện tử dẫn, có nghĩa là chất sẽ có khả năng dẫn điện khi có điện tử tồn tại trên vùng dẫn. Tính dẫn điện tăng khi mật độ điện tử trên vùng dẫn tăng.

• Vùng cấm (Forbidden band): Là vùng nằm giữa vùng hoá trị và vùng dẫn, không có mức năng lượng nào do đó điện tử không thể tồn tại trên vùng cấm. Nếu bán dẫn pha tạp, có thể xuất hiện các mức năng lượng trong vùng cấm (mức pha tạp). Khoảng cách giữa đáy vùng dẫn và đỉnh vùng hoá trị gọi là độ rộng vùng cấm, hay năng lượng vùng cấm (Band Gap). Tùy theo độ rộng vùng cấm lớn hay nhỏ mà chất có thể là dẫn điện hoặc không dẫn điện.

Như vậy, tính dẫn điện của các chất rắn và tính chất của chất bán dẫn có thể lý giải một cách đơn giản nhờ lý thuyết vùng năng lượng như sau:

• Kim loại có vùng dẫn và vùng hoá trị phủ lên nhau (không có vùng cấm) do đó luôn luôn có điện tử trên vùng dẫn vì thế mà kim loại luôn luôn dẫn điện.

• Các chất bán dẫn có vùng cấm có một độ rộng xác định. Ở không độ tuyệt đối (0 K), mức Fermi nằm giữa vùng cấm, có nghĩa là tất cả các điện tử tồn tại ở vùng hoá trị, do đó chất bán dẫn không dẫn điện. Khi tăng dần nhiệt độ, các điện tử sẽ nhận được năng lượng nhiệt $k_B T$ (với k là hằng số Boltzmann) nhưng năng lượng này chưa đủ để điện tử vượt qua vùng cấm nên điện tử vẫn ở vùng hoá trị. Khi tăng nhiệt độ đến mức đủ cao, sẽ có một số điện tử nhận được năng lượng lớn hơn năng lượng vùng cấm và nó sẽ nhảy lên vùng dẫn và chất rắn trở thành dẫn điện. Khi nhiệt độ càng tăng lên, mật độ điện tử trên vùng dẫn sẽ càng tăng lên, do đó, tính dẫn điện của chất bán dẫn tăng dần theo nhiệt độ (hay điện trở suất giảm dần theo nhiệt độ). Một cách gần đúng, có thể viết sự phụ thuộc của điện trở chất bán dẫn vào nhiệt độ như sau:

$$R = R_0 \exp\left(\frac{\Delta E_g}{2k_B T}\right)$$

Ta có:

R_0 là hằng số,
 ΔE_g là độ rộng vùng cấm.

Ngoài ra, tính dẫn của chất bán dẫn có thể thay đổi nhờ các kích thích năng lượng khác, ví dụ như ánh sáng. Khi chiếu sáng, các điện tử sẽ hấp thụ năng lượng từ photon, và có thể nhảy lên vùng dẫn nếu năng lượng đủ lớn. Đây chính là nguyên nhân dẫn đến sự thay đổi về tính chất của chất bán dẫn dưới tác dụng của ánh sáng (quang-bán dẫn).

8.4.3. Bán dẫn pha tạp

Chất bán dẫn loại p có tạp chất là các nguyên tử thuộc nhóm III, dẫn điện chủ yếu bằng các lỗ trống (viết tắt cho chữ positive, nghĩa là dương). Chất bán dẫn loại n có tạp chất là các nguyên tử thuộc nhóm V, các nguyên tử này dùng 4 electron tạo liên kết và một electron lớp ngoài liên kết lỏng lẻo với nhân, đây chính là các electron dẫn chính. Có thể giải thích một cách đơn giản về bán dẫn pha tạp nhờ vào lý thuyết vùng năng lượng như sau: Khi pha tạp, sẽ xuất hiện các mức pha tạp nằm trong vùng cấm, chính các mức này khiến

cho điện tử dễ dàng chuyển lên vùng dẫn hoặc lỗ trống dễ dàng di chuyển xuống vùng hoá trị để tạo nên tính dẫn của vật liệu. Vì thế, chỉ cần pha tạp với hàm lượng rất nhỏ cũng làm thay đổi lớn tính chất dẫn điện của chất bán dẫn.

8.4.4. Các đặc tính phổ của diode laser

Trong diode Laser chỉ có một số sóng ánh sáng có bước sóng nhất định mới có thể lan truyền được trong Buồng Cộng Hưởng. Điều kiện để truyền lan ánh sáng là sóng phản xạ và sóng tới phải đồng pha với nhau.

Như vậy Laser chỉ khuếch đại những bước sóng λ_0 thoả mãn điều kiện (n, N các số tự nhiên)

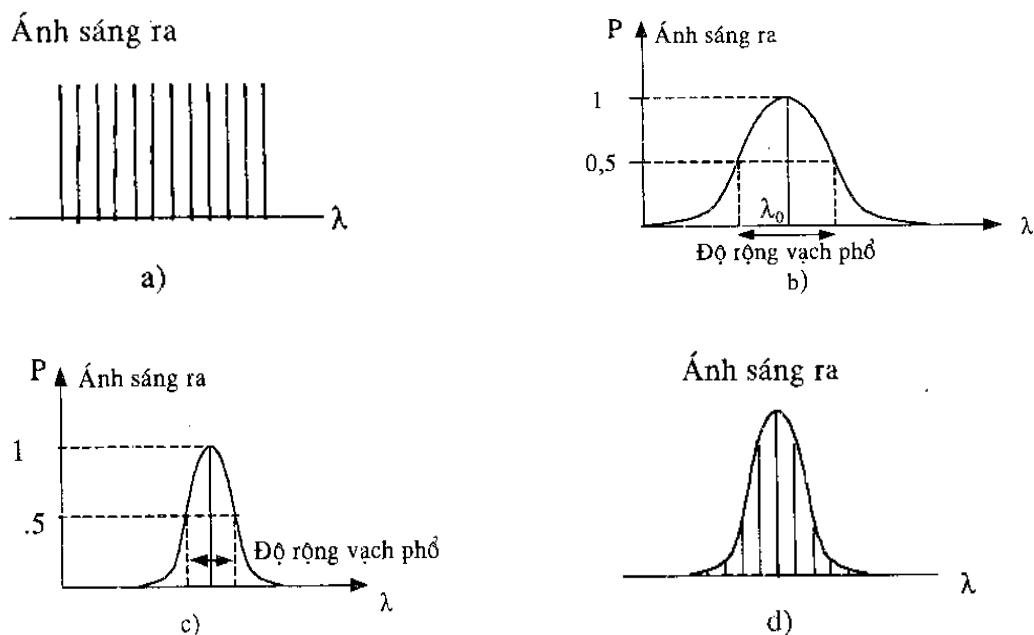
$$\lambda_0 = \frac{2nL}{N}$$

Mỗi bước sóng đó được gọi là mode dọc, hay đơn giản là mode. Tập hợp đỉnh của các mode này sẽ tạo thành đường bao phổ bức xạ của diode Laser.

Ta sẽ tìm được khoảng cách về mặt tần số giữa hai mode liên tiếp nhau.

$$\Delta f = \frac{c}{2L}$$

Phổ bức xạ của Laser phụ thuộc rất nhiều vào dòng điện định thiên. Khi Laser hoạt động ở chế độ dưới ngưỡng, bức xạ tự phát chiếm ưu thế và do đó độ rộng vạch phổ giống với LED. Tuy nhiên, nếu diode Laser hoạt động ở chế độ lớn hơn chế độ ngưỡng thì độ vạch phổ sẽ giảm xuống. Vạch phổ hẹp lại do tác động của buồng cộng hưởng và khuếch đại theo hàm mũ những mode đạt tới mức ngưỡng, đồng thời bỏ qua tất cả các mode khác.



Hình 8.11.

a) Các mode trong Laser bán dẫn;

- b) Đường bao vạch phổ khi Laser hoạt động dưới mức ngưỡng;
- c) Đường bao vạch phổ khi Laser hoạt động trên mức ngưỡng;
- d) Phổ bức xạ.

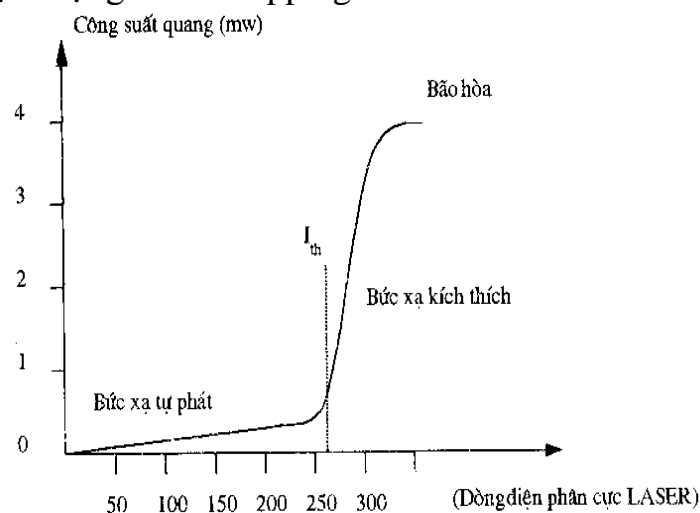
Khi diode Laser hoạt động dưới mức ngưỡng thì tất cả các mode truyền dẫn được khuếch đại như nhau. Nếu tăng dòng điện phân cực diode lên thì hệ số khuếch đại tăng. Tuy nhiên mode có bước sóng gần với bước sóng hoạt động danh định hơn cả sẽ được khuếch đại nhiều nhất. Hiện tượng này được biểu diễn như hình trên. Như vậy có thể thấy rằng, khi diode Laser hoạt động trên mức ngưỡng thì độ rộng vạch phổ sẽ hẹp đáng kể so với LED.

Bên cạnh các mode dọc, còn có các mode ngang và các mode bên (lateral mode). Các mode này có xu hướng làm cho các chùm tia ra phân kì mạnh, kết quả là việc ghép nối với sợi quang sẽ kém hiệu quả. Trạng thái lý tưởng chỉ có một trong các mode ngang cơ bản và mode bên của nó tồn tại (điều này sẽ làm cho chùm sáng ra song song và có đường kính ngang nhỏ).

Với hầu hết các diode Laser, vùng hoạt tính đều có bề dày nhỏ hơn 1 μm

8.4.5. Sự biến thiên công suất quang theo dòng điều khiển

Ta nhận thấy rằng với diode Laser hoạt động trên mức ngưỡng, công suất ra tỉ lệ trực tiếp với dòng điện chênh lệch so với mức ngưỡng. Trong thực tế, diode Laser hoạt động trên mức ngưỡng không thể hiện quan hệ tuyến tính hoàn toàn giữa lượng ánh sáng ra và dòng điện định thiên. Điều này có nguyên nhân từ hiện tượng mode-hopping.



Hình 8.12. Sự biến thiên công suất quang theo dòng điều khiển.

Biểu diễn sự biến thiên của công suất ra theo dòng điện diode đối với một diode Laser phát quang ở bước sóng 850nm. Hình vẽ này cho thấy, ở trên điểm ngưỡng diode Laser mới hoạt động như một Laser. Ta cũng biết rằng

công suất ra sẽ bão hoà khi dòng điện đủ lớn. Bởi vì do dòng điện có cường độ cao làm nóng diode, điều này làm giảm hiệu suất nghịch đảo.

8.4.6. Các yếu tố ảnh hưởng đến tuổi thọ của Laser

- Lắp đặt và thử nghiệm
- Các xung điện từ phát sinh bên ngoài trong thời gian ngắn
- Mức dòng
- Nhiệt độ
- Mức bức xạ cực đại
- Sự già hoá linh kiện

8.5. Các ứng dụng của laser

Vào thời điểm được phát minh năm 1960, laser được gọi là "giải pháp để tìm kiếm các ứng dụng". Từ đó, chúng trở nên phổ biến, tìm thấy hàng ngàn tiện ích trong các ứng dụng khác nhau trên mọi lĩnh vực của xã hội hiện đại, như phẫu thuật mắt, hướng dẫn phương tiện trong tàu không gian, trong các phản ứng hợp nhất hạt nhân... Laser được cho là một trong những phát minh ảnh hưởng nhất trong thế kỷ 20.

Ích lợi của laser đối với các ứng dụng trong khoa học, công nghiệp, kinh doanh nằm ở tính đồng pha, đồng màu cao, khả năng đạt được cường độ sáng cực kỳ cao, hay sự hợp nhất của các yếu tố trên. Ví dụ, sự đồng pha của tia laser cho phép nó hội tụ tại một điểm có kích thước nhỏ nhất cho phép bởi giới hạn nhiễu xạ, chỉ rộng vài nanômét đối với laser dùng ánh sáng. Tính chất này cho phép laser có thể lưu trữ vài gigabyte thông tin trên các rãnh của DVD. Cũng là điều kiện cho phép laser với công suất nhỏ vẫn có thể tập trung cường độ sáng cao và dùng để cắt, đốt và có thể làm bốc hơi vật liệu trong kỹ thuật cắt bằng laser. Ví dụ, một laser Nd:YAG, sau quá trình nhân đôi tần số, phóng ra tia sáng xanh tại bước sóng 523 nm với công suất 10 W có khả năng, trên lý thuyết, đạt đến cường độ sáng hàng triệu W trên một cm vuông. Trong thực tế, thì sự tập trung hoàn toàn của tia laser trong giới hạn nhiễu xạ là rất khó.

Tia sáng laser với cường độ cao có thể cắt thép và các kim loại khác. Tia từ laser thường có độ phân kỳ rất nhỏ, (độ chuẩn trực cao). Độ chuẩn trực tuyệt đối là không thể tạo ra, bởi giới hạn nhiễu xạ. Tuy nhiên, tia laser có độ phân kỳ nhỏ hơn so với các nguồn sáng. Một tia laser được tạo từ laser He-Ne, nếu chiếu từ Trái Đất lên Mặt Trăng, sẽ tạo nên một hình tròn đường kính khoảng 1 dặm (1,6 kilômét). Một vài laser, đặc biệt là với laser bán dẫn, có với kích thước nhỏ dẫn đến hiệu ứng nhiễu xạ mạnh với độ phân kỳ cao. Tuy nhiên, các tia phân kỳ đó có thể chuyển đổi về tia chuẩn trực bằng các thấu kính hội tụ. Trái lại, ánh sáng không phải từ laser không thể làm cho chuẩn trực bằng các thiết bị quang học dễ dàng, vì chiều dài đồng pha ngắn hơn rất

những tia laser. Định luật nhiễu xạ không áp dụng khi laser được truyền trong các thiết bị dẫn sóng như sợi quang. Laser cường độ cao cũng tạo nên các hiệu ứng thú vị trong quang học phi tuyến tính.

