

Chương 7: Quá trình quang học trong bán dẫn

Sưu tầm: www.mientayvn.com

Xem bản gốc tiếng Anh tại đây

Chúng ta sẽ tập trung vào những quá trình trong bán dẫn ở đó electron thay đổi trạng thái của nó khi hấp thụ hoặc phát xạ photon, nhưng cũng cần phải theo dõi tinh thể có thay đổi trạng thái dao động của nó hay không nữa.

Những quá trình này phải tuân theo quy tắc chọn lựa trong đó những định luật quan trọng nhất là

(a) **Bảo toàn năng lượng:**

$$E_{\text{photon}} = E_f - E_i$$

E_f – Trạng thái cuối của tinh thể (bao gồm bất kỳ sự thay đổi nào trong trạng thái dao động)

E_i – Trạng thái đầu của tinh thể

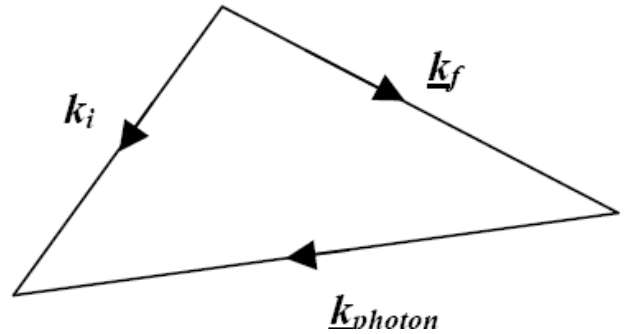
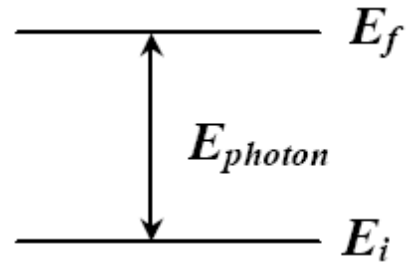
(b) **Bảo toàn vectơ sóng hoặc động lượng tinh thể:**

$$\begin{aligned} \mathbf{k}_{\text{photon}} \\ &= \mathbf{k}_f \\ &- \mathbf{k}_i \end{aligned}$$

\mathbf{k}_f là trạng thái cuối

\mathbf{k}_i là trạng thái đầu

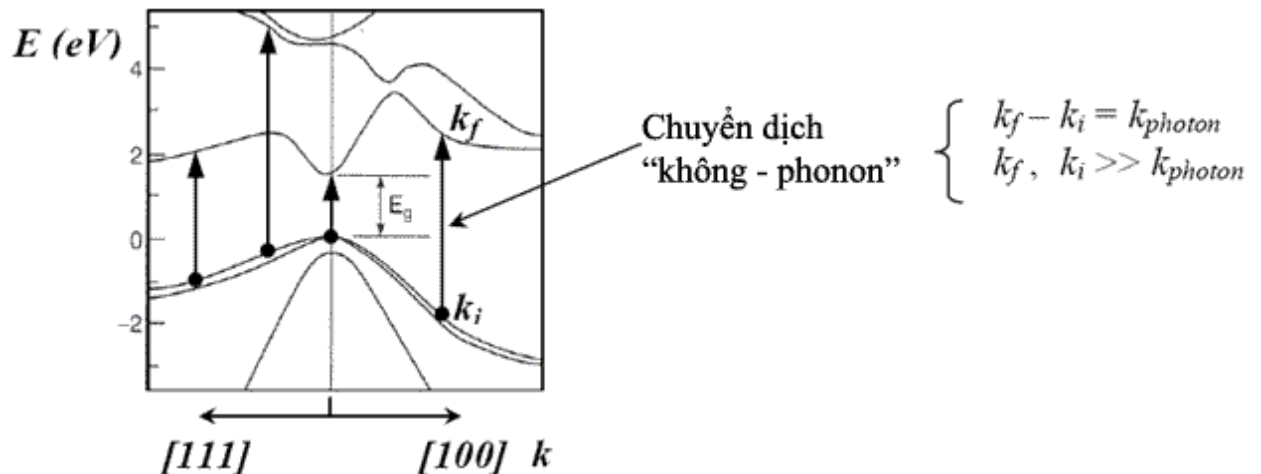
Quy luật này bắt nguồn từ bậc đối xứng tịnh tiến của tinh thể; nó tương tự với định luật bảo toàn động lượng liên quan đến đối xứng tịnh tiến liên tục trong không gian tự do.



Nếu trạng thái dao động của tinh thể không thay đổi thì quá trình này được gọi là quá trình chuyển dịch không phonon, ngược lại quá trình được gọi là được phonon hỗ trợ. Nói chung, bởi vì cả photon và phonon chỉ làm nhiễu hàm sóng của electron rất ít nên xác suất chuyển dời liên quan đến đồng thời cả photon và phonon thường nhỏ hơn rất nhiều so với chuyển dời không phonon. Vì thế, chỉ cần xét quá trình dịch chuyển được phonon hỗ trợ khi quá trình dịch chuyển không phonon bị cấm, chẳng hạn do vi phạm định luật bảo toàn năng lượng.

(1) Phổ hấp thụ toàn phần

Ngoại trừ những trường hợp năng lượng photon rất gần với năng lượng vùng cấm E_g . Trong phổ hấp thụ, những quá trình không phonon thường chiếm ưu thế. Bởi vì bước sóng của photon quang học thường lớn so với bước sóng của electron, cũng có nghĩa là vecto sóng của photon quang học nhỏ hơn vecto sóng của electron nên một quá trình hấp thụ không phonon sẽ được biểu diễn bằng một đường thẳng đứng trên giản đồ E-k (bởi vì ta đã bỏ qua vecto sóng của photon).

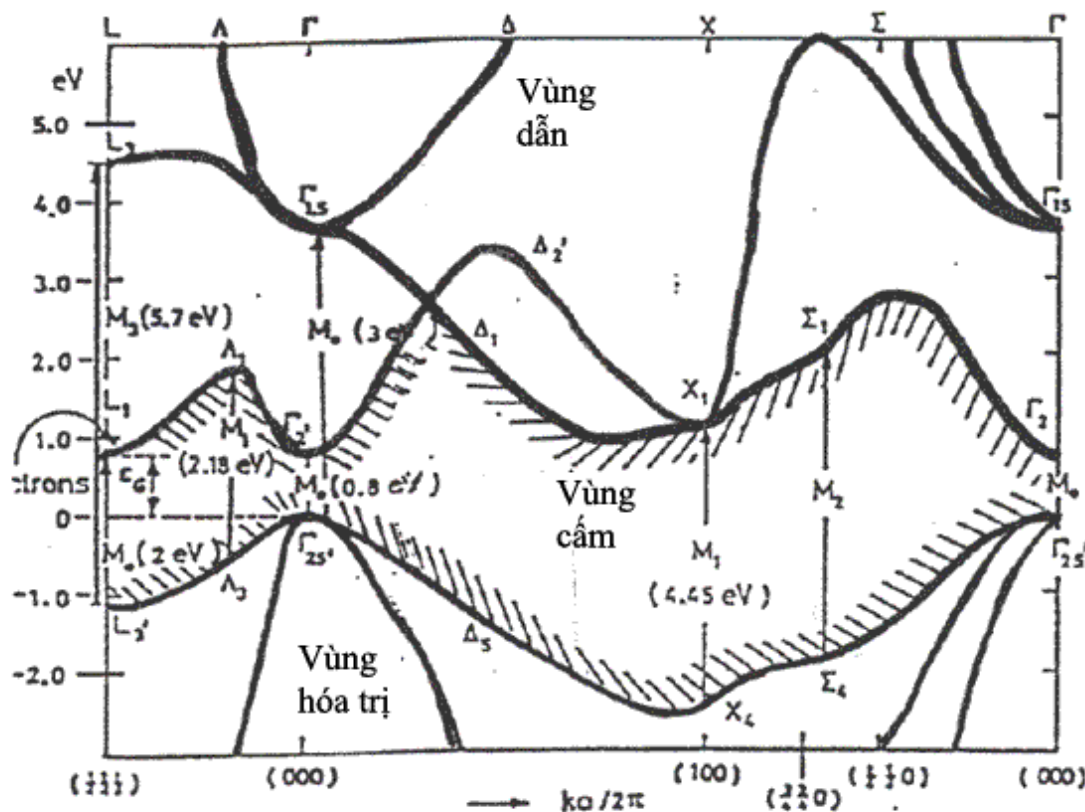


Hấp thụ toàn phần năng lượng photon nào đó (Total absorption for a particular photon energy) là tổng của tất cả các dịch chuyển thẳng đứng có thể xảy ra do những trạng thái trống và những trạng thái được làm đầy trên giản đồ cấu trúc vùng năng

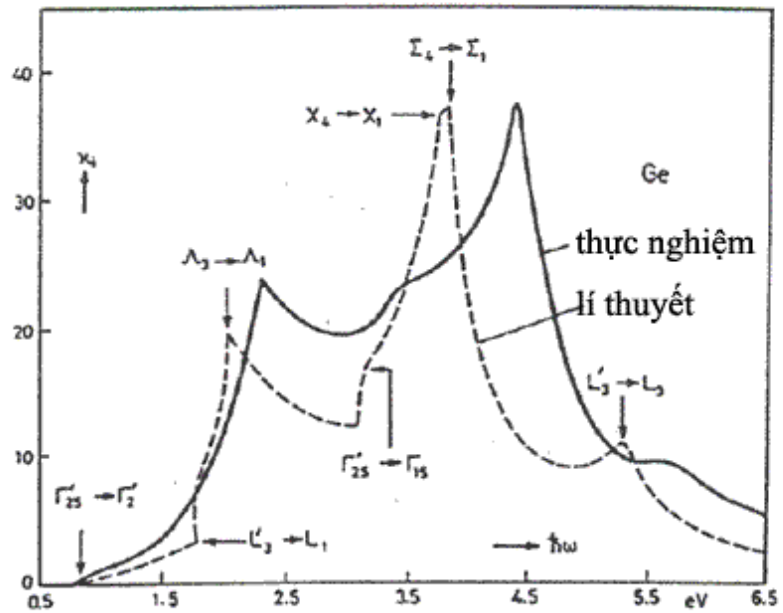
lượng. Đỉnh (hoặc điểm kỳ dị) thường tương ứng với những điểm uốn trên giản đồ $E-k$. Theo một hướng nào đó, hàm mật độ trạng thái tỉ lệ nghịch với độ dốc

$$g(E)dE = g(k) \frac{dk}{dE} dE = g(k) \left(\frac{dE}{dk} \right)^{-1} dE$$

Và biểu thức này sẽ không xác định ở những phần nằm ngang của đường cong $E-k$. Trong trường hợp ba chiều, mọi thứ trở nên phức tạp hơn nhưng ý tưởng cơ bản vẫn là có một đặc tính của một vài loại trong $g(E)$ nơi đường cong $E-k$ phẳng vẫn còn đúng (In 3-dimensions, things are more complicated but the basic idea that there is a feature of some sort in $g(E)$ where the dispersion curve is flat holds good).



Giản đồ năng lượng $E-k$ của Ge với những chuyển dịch quang học chính được biểu diễn

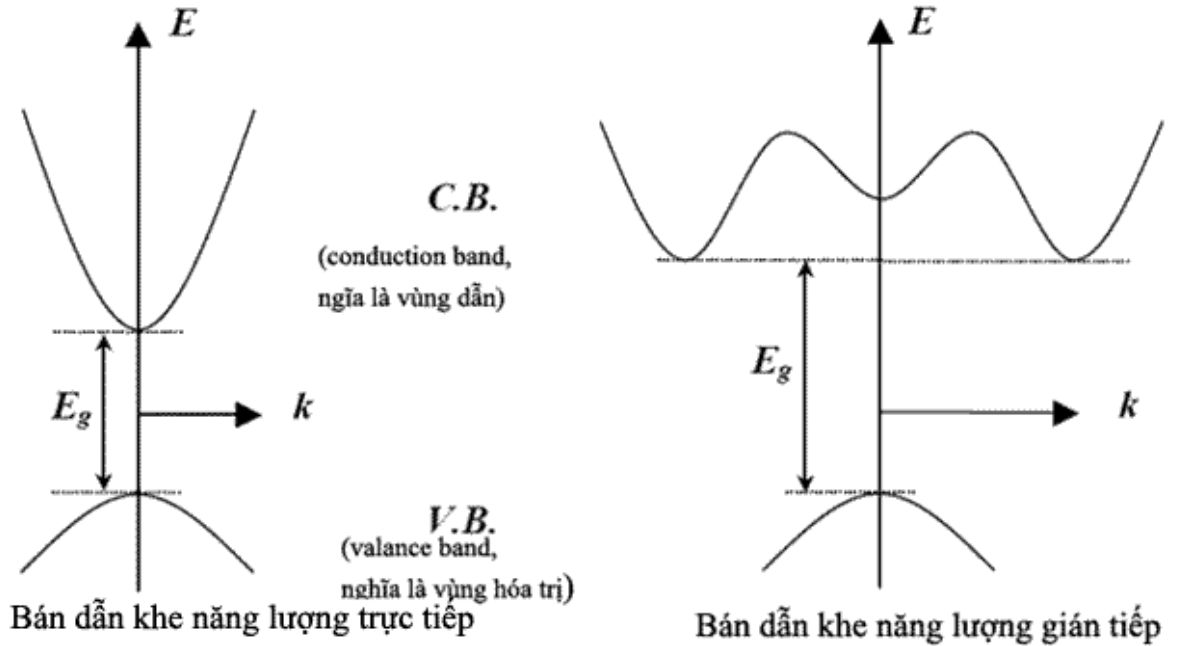


Phổ hấp thụ toàn phần của Ge, so sánh kết quả thực nghiệm và lí thuyết

Hai bức ảnh này chứng tỏ rằng phổ lí thuyết và thực nghiệm hoàn toàn phù hợp nhau và vì thế giản đồ năng lượng $E-k$ hoàn toàn chính xác.

(2) Hấp thụ tại khe vùng (E_g)

Điều này phụ thuộc chủ yếu vào việc bán dẫn thuộc loại khe năng lượng trực tiếp hay gián tiếp



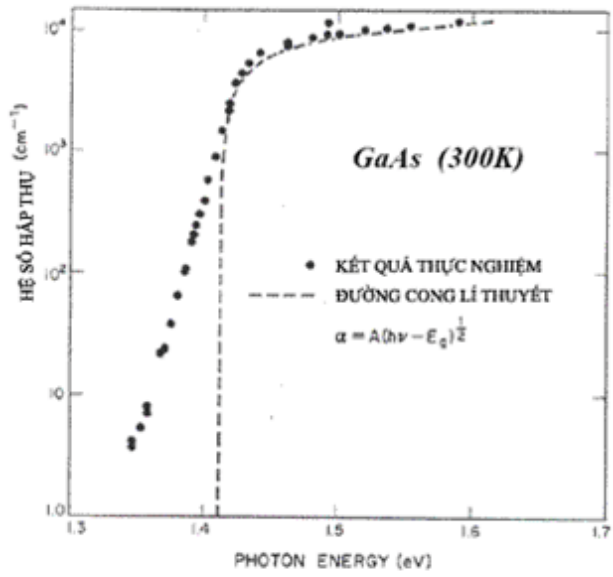
Đối với bán dẫn khe năng lượng trực tiếp, việc hấp thụ photon năng lượng E_g có thể xảy ra mà không có sự hỗ trợ của phonon. Quy tắc chọn lựa là:

$$E_{\text{photon}} = E_f - E_i \text{ ở đây } E_f \text{ và } E_i \text{ thuần túy là năng lượng điện tử.}$$

Và

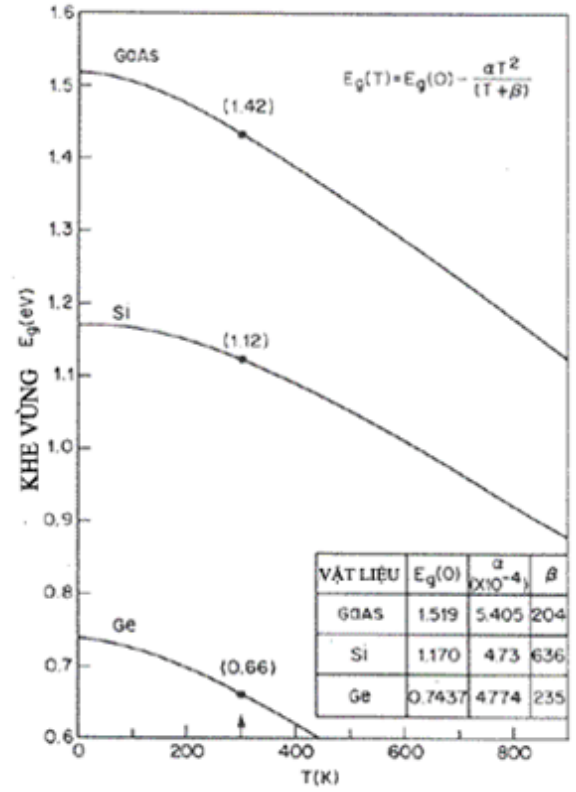
$$\mathbf{k}_{\text{photon}} = \mathbf{k}_f - \mathbf{k}_i \approx 0 \text{ (chuyển dịch thẳng)}$$

- Bắt đầu hấp thụ tại E_g rất đột ngột
- Hình dạng của bờ hấp thụ không thay đổi theo nhiệt độ mà nó chỉ dịch chuyển theo nhiệt độ.

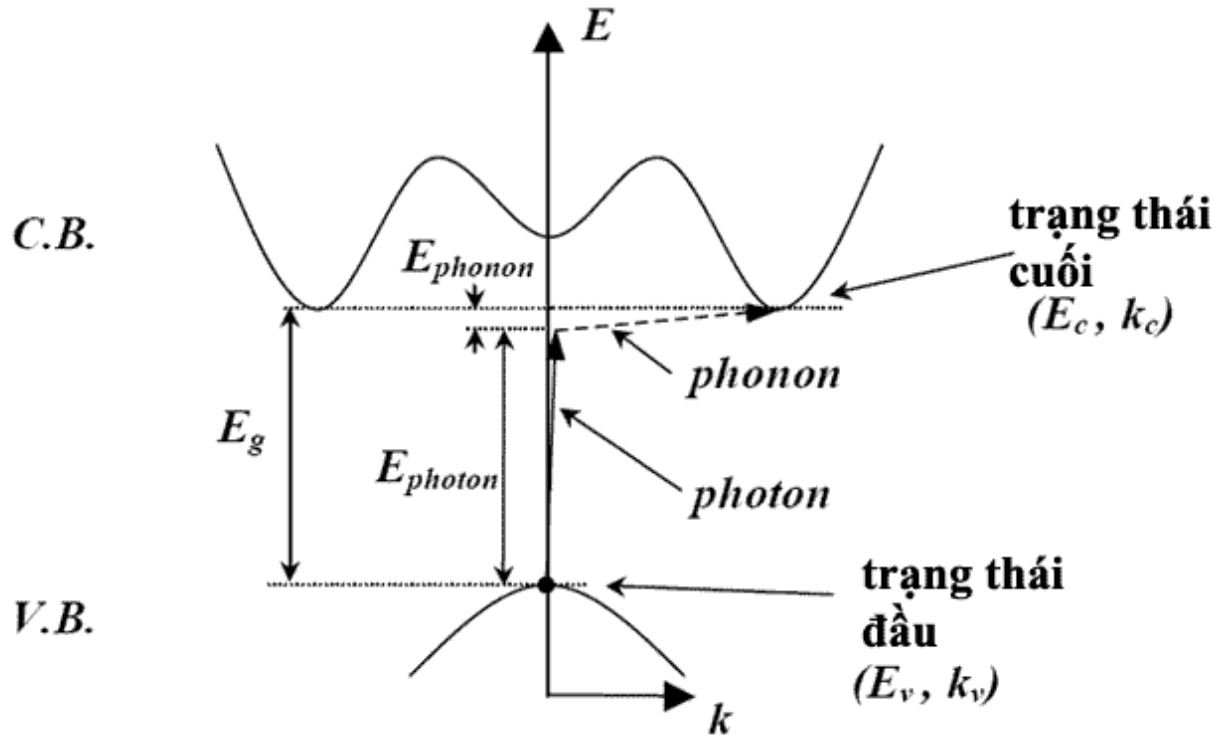


**Đồ thị hệ số hấp thụ của GaAs
 Sự mở rộng là do tạp chất**

3

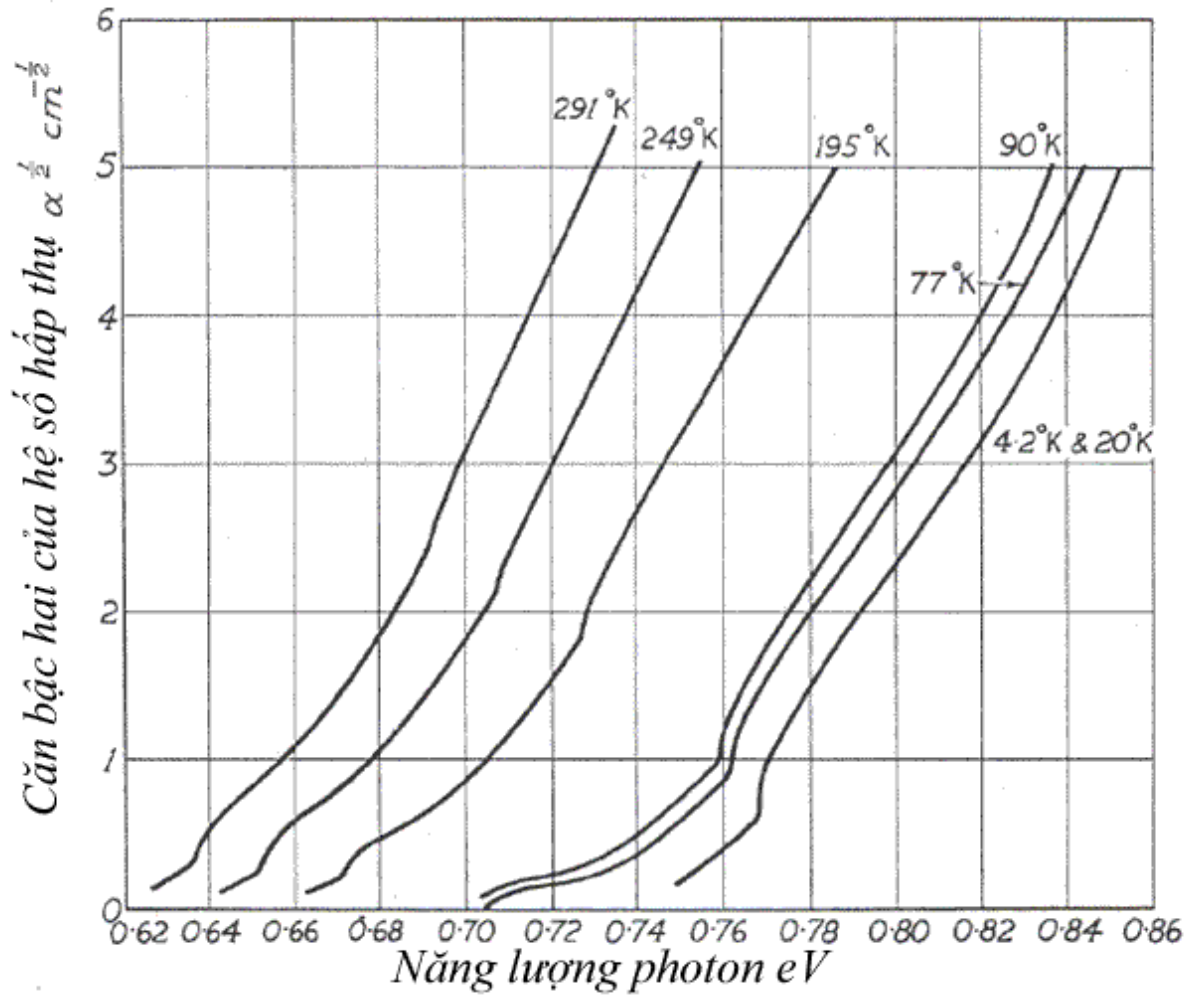


Đối với trường hợp bán dẫn khe năng lượng gián tiếp, quá trình hấp thụ tại E_g đòi hỏi sự hỗ trợ của phonon



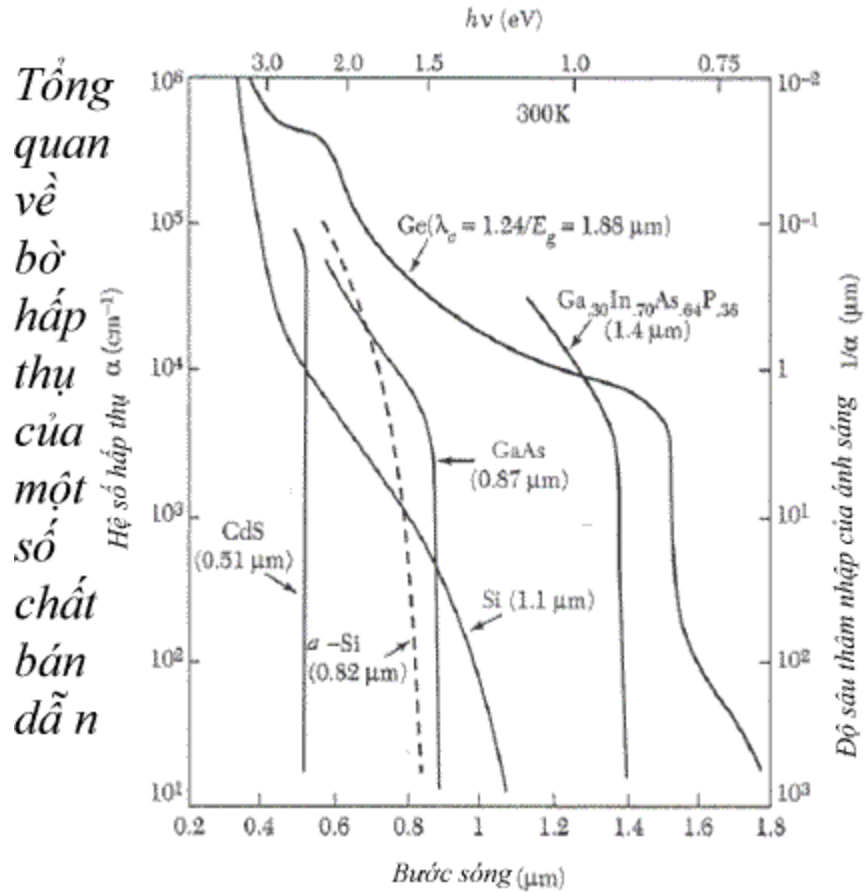
Quy tắc chọn lựa có dạng

$$E_g = E_c - E_v = E_{photon} \pm E_{phonon}$$



Hình bên trên biểu diễn bờ hấp thụ của Ge tại một vài nhiệt độ khác nhau.

- Dịch chuyển toàn phần theo nhiệt độ là hiển nhiên—nó có cùng nguồn gốc như dịch chuyển trong bán dẫn khe năng lượng trực tiếp.
- Có sự bắt đầu tăng mạnh dần độ hấp thụ theo năng lượng.....

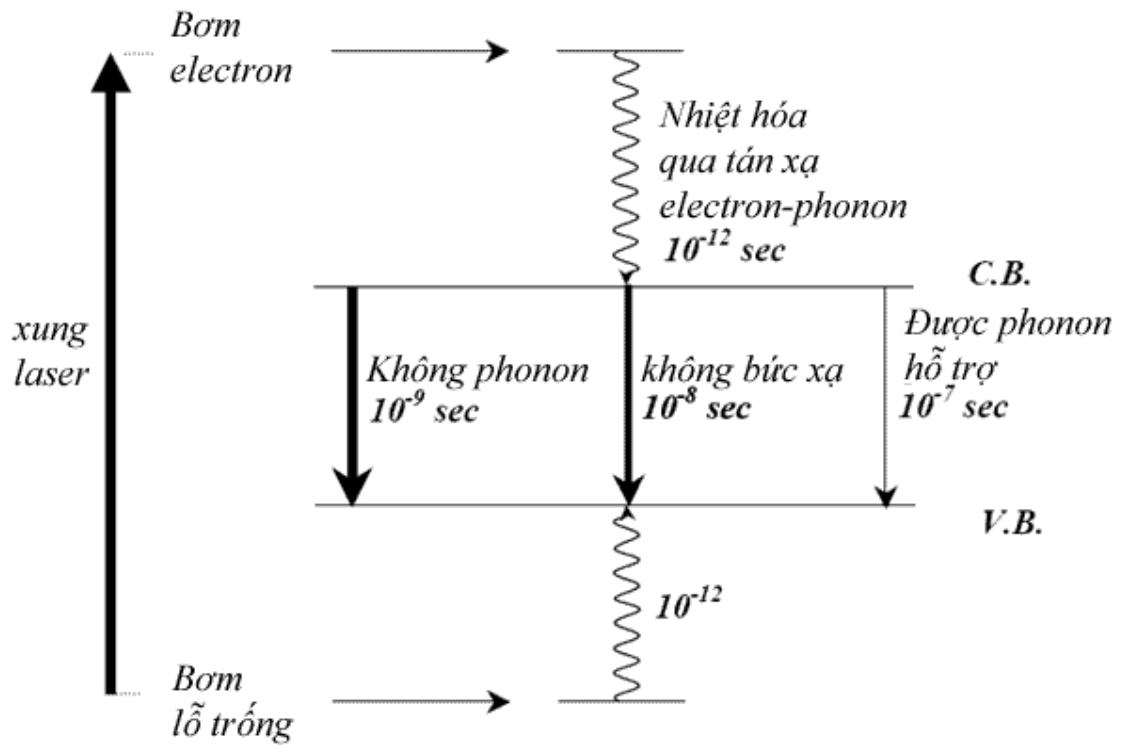


(3) Phát xạ photon

Để photon được phát ra, chúng ta cần có sự hiện diện đồng thời của electron và lỗ trống. Giả sử chúng ta bơm mật độ (chẳng hạn bằng cách hấp thụ xung laser) chúng nhanh chóng đạt đến trạng thái cân bằng nhiệt trong vùng dẫn và vùng hóa trị. Thời gian (tính trung bình) cho quá trình nhiệt hóa gần bằng thời gian tán xạ electron-phonon do chuyển động ở nhiệt độ phòng và khoảng 10^{-12} s.

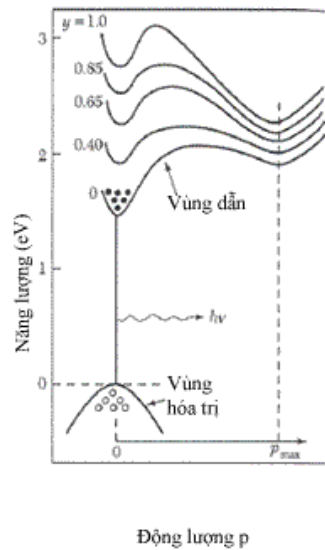
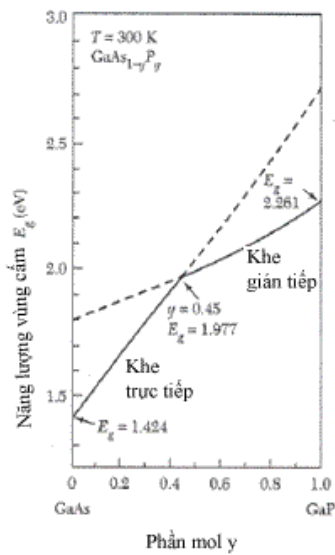
Sự kết hợp lại của electron và lỗ trống chậm hơn nhiều, diễn hình khoảng 10^{-9} s hoặc dài hơn. Nó có thể được thực hiện bằng cách phát ra một photon (sự kết hợp lại có bức xạ), hoặc có thể là những quá trình không bức xạ nhanh hơn. Sự kết hợp lại có bức xạ thường thấy trong bán dẫn khe năng lượng trực tiếp ở đó nó là quá trình không phonon. Sự kết hợp lại không bức xạ

chiếm ưu thế trong bán dẫn khe năng lượng gián tiếp bởi vì quá trình phát xạ phải được phonon hỗ trợ. Vì thế bán dẫn khe năng lượng trực tiếp là nguồn phát xạ có hiệu quả trong khi bán dẫn khe năng lượng gián tiếp thì không.

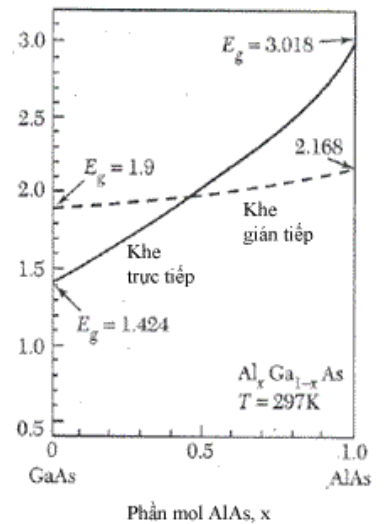


Chú ý rằng bán dẫn có khe năng lượng rộng nhất ở chương 5 là GaAs.....và đây là bước sóng không nhìn thấy. Để có được nguồn phát bức xạ nhìn thấy chúng ta phải dùng một vật liệu khác để chế tạo hơn.

Một cách là sử dụng hợp kim chẳng hạn như GaAsP và AlGaAs. Cả GaP và AlAs đều có khe năng lượng lớn hơn GaAs vì vậy hợp kim làm tăng năng lượng photon phát xạ. Nhưng cả GaP và AlAs đều là bán dẫn khe năng lượng gián tiếp. Vì vậy.....



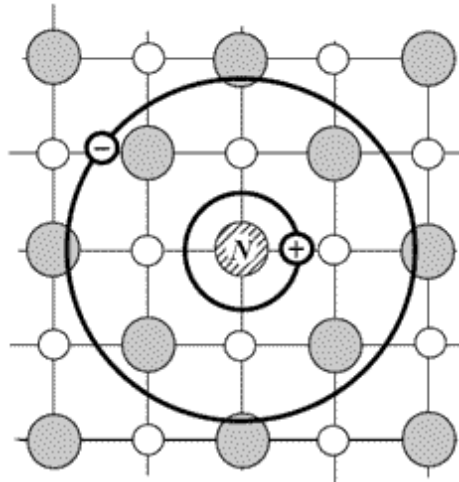
Hợp kim GaAs/GaP



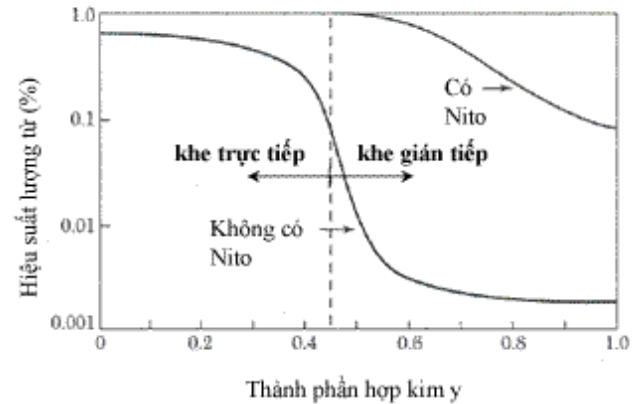
Hợp kim GaAs/AlAs

(4) Phát xạ tạp chất – cảm ứng

Khi bán dẫn khe năng lượng gián tiếp chứa nồng độ tạp chất cao, đối xứng tịnh tiến của mạng tinh thể bị phá vỡ làm cho định luật bảo toàn vecto sóng không còn nghiệm đúng nữa. Sự kết hợp lại có phát xạ không phonon có thể xảy ra. Về mặt vật lí, những gì xảy ra là electron và lỗ trống trở nên định xứ ở những tạp chất thay vì tự do di chuyển trong tinh thể và sự kết hợp lại có bức xạ xuất hiện tại phía tạp chất. Tạp chất hiệu quả nhất là điện môi, chẳng hạn như Nitơ trong GaP. Phương pháp này vẫn còn được dùng để chế tạo LED trong vùng khả kiến nhưng đang dần dần ít được sử dụng bởi sự xuất hiện của những hợp kim AlGaAs và GaN có khe vùng trực tiếp.



Bẫy N trong GaP
Sự kết hợp lại của những cặp
electron-lỗ trống định xứ



Hợp kim GaAs/GaP có và
không có tạp chất Nito

(5) Excitons

Khi một cặp electron-lỗ trống được tạo ra do quá trình hấp thụ photon, phổ hấp thụ chứa những đường nhọn ở ngay bên dưới năng lượng vùng cấm. Những cái này là do tương tác giữa electron và lỗ trống. Chúng là những vạch exciton.

Để hiểu về exciton cần nhớ rằng năng lượng vùng cấm E_g là cái cần để tạo ra cặp electron-lỗ trống chứ không phải điện tích của chúng. Khi điện tích xuất hiện, tương tác Coulomb làm cho chỉ cần một năng lượng hơi nhỏ hơn E_g cũng có thể gây ra sự hấp thụ. Sự giảm này –năng lượng liên kết exciton– chỉ là năng lượng liên kết của electron và lỗ trống trong trạng thái orbital 1s gần một trạng thái khác. Quả thực, những phép đo cẩn thận chứng tỏ rằng có một chuỗi những trạng thái exciton–1s, 2s, 3s...được phát hiện hội tụ tại khe năng lượng E_g . Nó tương tự như những mức năng lượng của nguyên tử hydro.

Năng lượng của exciton 1s được đo so với E_g là

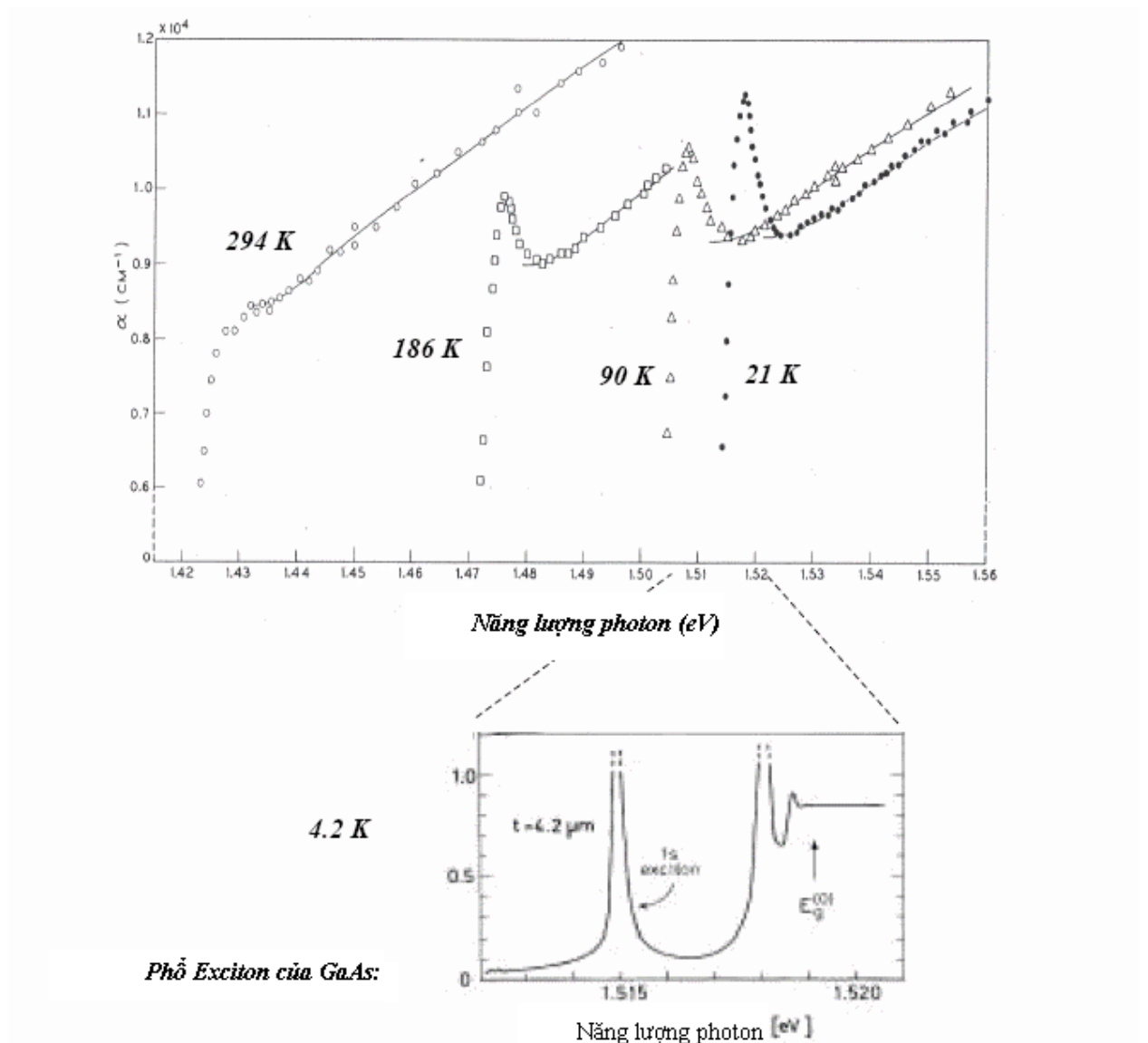
$$E_B = -R_\infty \frac{m_{ex}^*}{m_0} \frac{1}{\epsilon_r^2} \quad (\text{nghĩa là giảm so với giá trị của Hydro})$$

Ở đây R_∞ là hằng số Rydberg=13.6 eV, ϵ_r là hằng số điện môi của bán dẫn thông thường gần bằng 10 và

$$\frac{1}{m_{ex}^*} = \frac{1}{m_e^*} + \frac{1}{m_h^*}$$

Đối với GaAs: $E_B = -4meV$

Bởi vì nó rất nhỏ so với kT ở nhiệt độ phòng (25 meV) nên chỉ có thể quan sát được phổ exciton rõ ràng ở nhiệt độ thấp.



Phổ Exciton của GaAs ở một vài nhiệt độ khác nhau. Tại 294K phổ giống như ở trang 3. Đối với nhiệt độ thấp hơn hoạt động dịch chuyển lên vùng năng lượng cao hơn (cũng xem trang 3) do sự tăng của E_g , và phổ exciton 1s thu được rõ ràng hơn. Tại 4.2K và trong mẫu cực kì sạch) những đỉnh 1s, 2s, và 3s có thể được phân tích bằng cách phóng to.

Một exciton lớn như thế nào? Giống như trong nguyên tử hydro năng lượng liên kết bị giảm so với năng lượng liên kết của các electron ở trạng thái 1s, vì thế, thể tích của exciton sẽ tăng. Bán kính Bohr của exciton là

$$a_{ex} = a_0 \varepsilon_r \frac{m_0}{m_{ex}^*}$$

ở đây a_0 là bán kính quỹ đạo Bohr của nguyên tử Hydro = $0.53 \cdot 10^{-10}$ m. Đối với GaAs

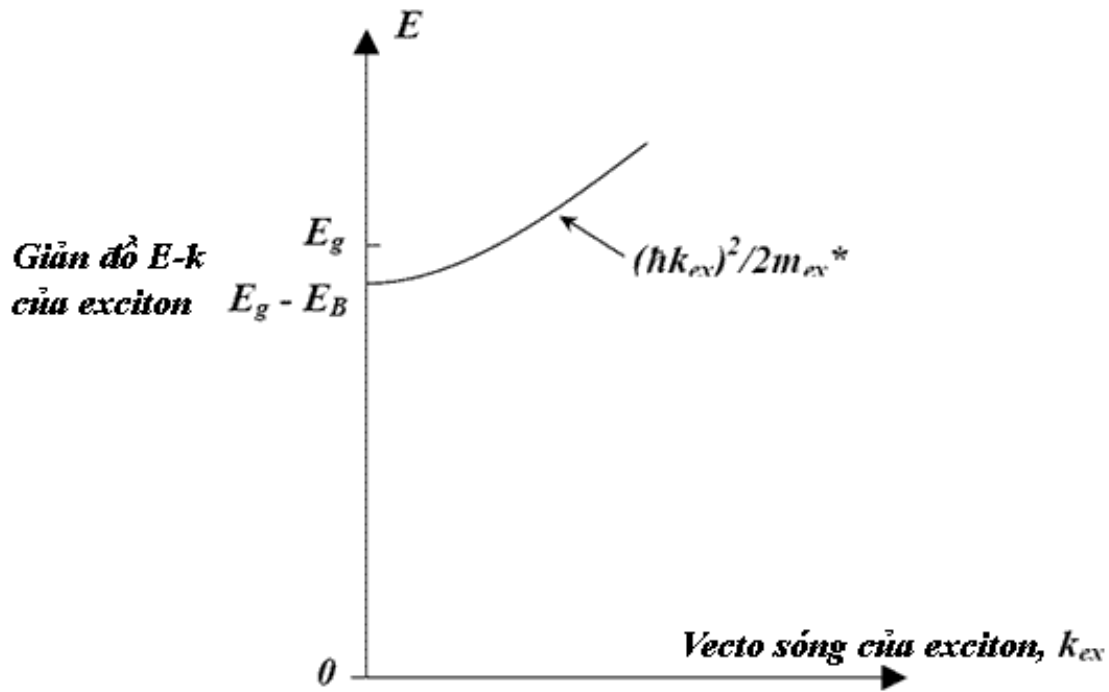
$$a_{ex} = 130 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Chú ý rằng đại lượng này lớn so với khoảng cách mạng của GaAs. Do đó, giả sử hơi thô thiển rằng electron và lỗ trống đang chuyển động trong môi trường có hằng số điện môi trung bình ε_r cũng được.

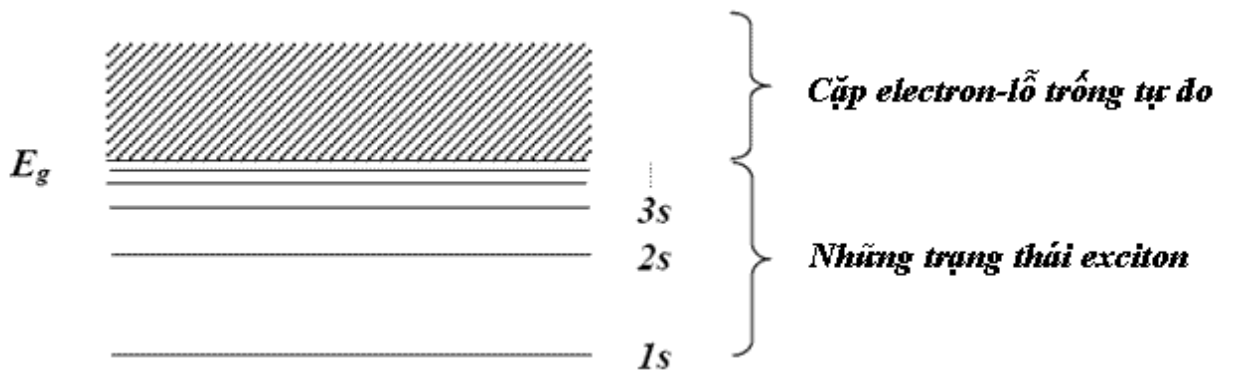
Exciton có đường cong E theo k không? Có. Nó có dạng

$$E_{ex}(k) = \frac{\hbar^2}{2m_{ex}^*} k_{ex}^2 + (E_g - E_B)$$

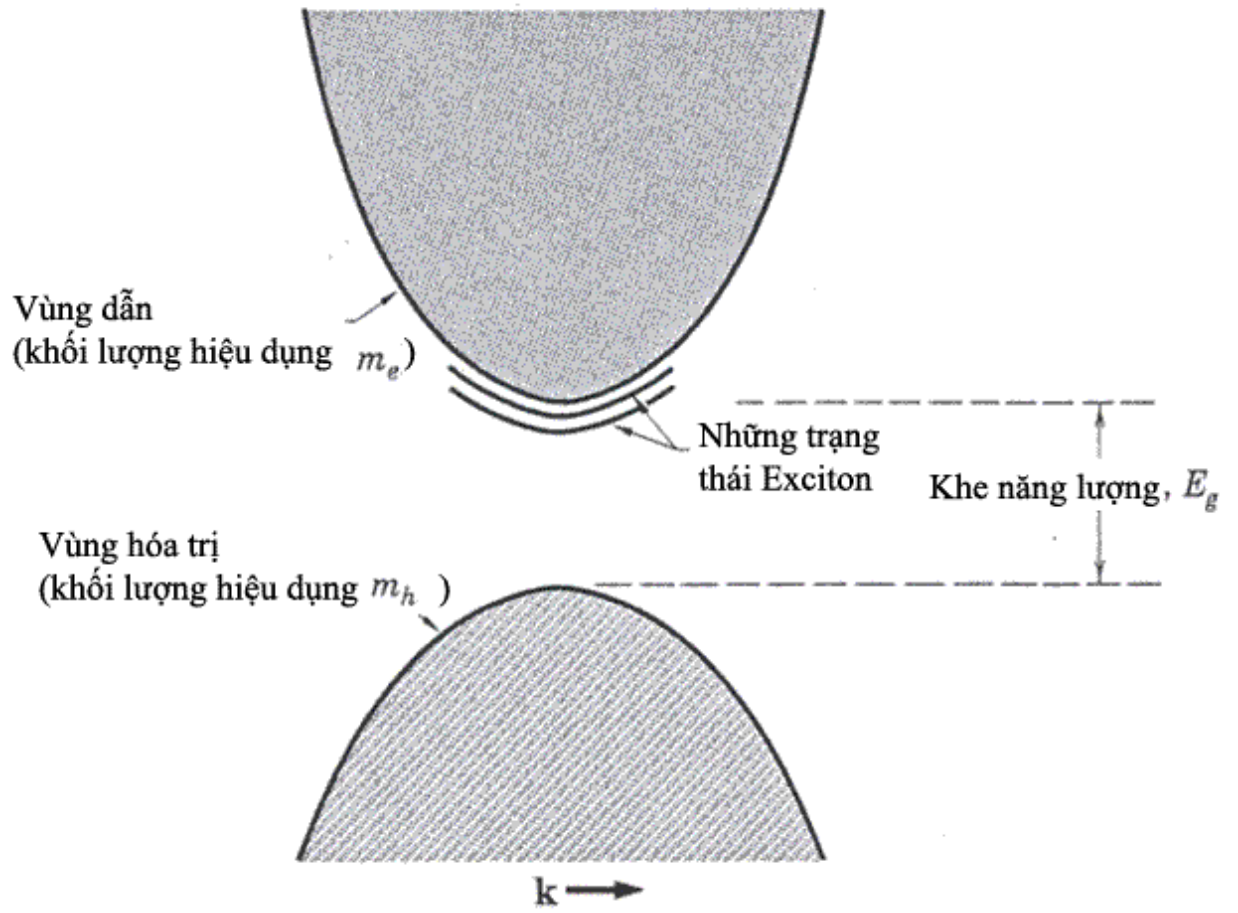
ở đây k_{ex} là vecto sóng của tâm khối của cặp electron-lỗ trống.



Chúng ta nên nghĩ về exciton như thế nào ? Exciton là một trạng thái kích thích của toàn hệ



Một bức ảnh khó hiểu (Được tìm thấy trong sách của Kittel), cần tránh kết hợp những trạng thái vùng và những trạng thái exciton



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.