

[www.mientayvn.com](http://www.mientayvn.com)

Dịch tiếng anh chuyên ngành khoa học tự nhiên và kỹ thuật.

Dịch các bài giảng trong chương trình học liệu mở của học viện MIT, Yale.

Tìm và dịch tài liệu phục vụ cho sinh viên làm seminar, luận văn.

Tại sao mọi thứ đều miễn phí và chuyên nghiệp ???

Trao i tr c tuy n t i:

[www.mientayvn.com/chat\\_box\\_li.html](http://www.mientayvn.com/chat_box_li.html)



1956 - 2006

TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI  
50 NĂM XÂY DỰNG VÀ PHÁT TRIỂN

TRẦN ĐÌNH TUỜNG  
HOÀNG HỒNG HẢI

# QUANG KỸ THUẬT



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT



TRƯỜNG ĐẠI HỌC BÁCH KHOA HÀ NỘI  
**50** NĂM XÂY DỰNG VÀ PHÁT TRIỂN

TRẦN ĐÌNH TƯỜNG  
HOÀNG HỒNG HẢI

# QUANG KỸ THUẬT



NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT  
HÀ NỘI

## LỜI GIỚI THIỆU

Các thiết bị và dụng cụ quang - quang điện tử đã được sử dụng hữu hiệu rộng rãi trong tất cả các ngành từ kinh tế, giao thông vận tải, an ninh, quốc phòng, văn hoá xã hội, y tế giáo dục đến nghiên cứu khoa học, vui chơi giải trí hàng ngày. Việc trang bị các kiến thức cơ bản về chúng là rất cần thiết và bổ ích.

Với ý tưởng như vậy, cuốn sách "QUANG KỸ THUẬT" đề cập tới một số nội dung chính sau đây:

Nội dung thứ nhất đề cập tới cấu tạo và các đặc tính chi tiết và hệ chi tiết quang học cũng như vai trò của chúng trong hệ quang như: thấu kính, gương, lăng kính, bản song song, nêm quang, vòng chắn...

Nội dung thứ hai đề cập tới nguyên lý cấu tạo, phương pháp tính thiết kế một số dụng cụ quang thông dụng.

Nội dung thứ ba giới thiệu cô đọng về những khái niệm và một số ứng dụng tiêu biểu trong ngành công nghệ cơ khí chính xác quang học và thiết bị đo lường như: giao thoa ánh sáng, nhiễu xạ ánh sáng, phân cực ánh sáng, màng mỏng quang học, quang sợi, laser và ảnh nổi.

Cuốn sách chứa đựng nội dung của giáo trình "Quang kỹ thuật" chuyên ngành Máy chính xác Trường Đại học Bách khoa Hà Nội. Cuốn sách cũng được sử dụng làm tài liệu học tập cho sinh viên đại học, cao học chuyên ngành Cơ khí Chính xác, Quang - Quang điện tử, Đo lường tự động hoá và Cơ điện tử... Cuốn sách cũng là tài liệu bổ ích cho cán bộ khoa học kỹ thuật trong công tác nghiên cứu, thiết kế chế tạo, khai thác sử dụng các thiết bị quang - quang điện tử, đo lường tự động hoá...

Do lần đầu xuất bản, cuốn sách không tránh khỏi những thiếu sót. Chúng tôi mong nhận được những đóng góp chân thành của độc giả. Thư ý kiến đóng góp xin gửi về Ban Biên tập Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, Hà Nội hoặc Bộ môn Cơ khí Chính xác và Quang học Trường Đại học Bách khoa Hà Nội.

**Tập thể tác giả**

# MỤC LỤC

Ký hiệu và quy ước về dấu.....	9
<b>Chương I. Vật liệu quang</b>	
1.1. Thủy tinh quang học .....	11
1.2. Tinh thể .....	14
1.3. Thủy tinh hữu cơ.....	15
<b>Chương II. Thấu kính và hệ thấu kính</b>	
2.1. Truyền ánh sáng qua mặt cầu khúc xạ .....	16
2.2. Truyền tia sáng qua nhiều mặt cầu .....	19
2.3. Thấu kính quang .....	24
2.4. Các loại thấu kính .....	28
2.5. Chuyển thấu kính mỏng thành thấu kính dày .....	32
2.6. Hệ thấu kính .....	33
2.7. Các thấu kính đặc biệt.....	36
<b>Chương III. Gương phẳng và hệ gương phẳng</b>	
3.1. Gương phẳng.....	45
3.2. Hệ gương phẳng.....	47
3.3. Xoay ảnh và đảo hệ tọa độ của hệ gương phẳng .....	48
3.4. Gương góc .....	51
3.5. Hệ gương phức tạp .....	54
<b>Chương IV. Lăng kính và hệ lăng kính</b>	
4.1. Lăng kính phản xạ.....	55
4.2. Lăng kính có mái phản xạ .....	59
4.3. Hệ lăng kính phản xạ .....	61
4.4. Mặt phẳng khúc xạ.....	64
4.5. Bàn song song.....	64
4.6. Lăng kính khúc xạ.....	65
4.7. Nêm quang và hệ nêm.....	70
4.8. Cơ cấu đọc số lẻ.....	72
4.9. Chi tiết phân chia chùm sáng.....	75

<b>Chương V. Vòng chấn trong hệ quang</b>	
5.1. Vòng chấn sáng .....	78
5.2. Vòng chấn trường.....	83
5.3. Hiện tượng giảm độ rọi ở mép ảnh.....	85
5.4. Giới hạn độ rọi của ảnh .....	87
<b>Chương VI. Mắt - một dụng cụ quang học hoàn thiện</b>	
6.1. Cấu tạo của mắt người.....	89
6.2. Các tính chất quang của mắt.....	90
6.3. Tật của mắt và cách chữa.....	92
<b>Chương VII. Một số dụng cụ quang học thông dụng</b>	
7.1. Những đặc tính dụng cụ quang học.....	97
7.2. Kính lúp .....	99
7.3. Kính hiển vi .....	102
7.4. Hệ vô tiêu và ống nhòm .....	114
<b>Chương XIII. Quang sai</b>	
8.1. Quang sai và tạo ảnh đồng dạng tuyệt đối.....	122
8.2. Xác định độ lớn quang sai và biên dạng ảnh của vật điểm.....	122
8.3. Xác định quang sai bậc ba của hệ quang.....	125
8.4. Quang sai sai sắc.....	145
8.5. Một số cơ sở liên quan .....	150
<b>Chương IX. Tính thiết kế các hệ quang cơ bản</b>	
9.1. Tính các viễn vật kính .....	156
9.2. Tính cận vật kính .....	171
9.3. Tính thị kính .....	175
9.4. Tính ống kính hệ chiếu sáng.....	179
9.5. Tính kính đeo mắt .....	187
9.6. Tính hệ ghép. ....	190
<b>Chương X. Giao thoa ánh sáng và ứng dụng</b>	
10.1. Một số khái niệm .....	192
10.2. Một số ứng dụng của giao thoa ánh sáng .....	196
<b>Chương XI. Nhiễu xạ ánh sáng và ứng dụng</b>	
11.1. Một số khái niệm.....	202
11.2. Cách tử nhiễu xạ .....	204
11.3. Ứng dụng của cách tử nhiễu xạ.....	206

<b>Chương XII. Phân cực ánh sáng</b>	
12.1. Một số khái niệm và định nghĩa về phân cực ánh sáng.....	209
12.2. Quỹ đạo vectơ cường độ điện trường của chùm sáng phân cực ....	210
12.3. Phương pháp tạo chùm sáng phân cực .....	212
12.4. Một số linh kiện phân cực ánh sáng.....	216
12.5. Những ứng dụng phân cực ánh sáng .....	223
<b>Chương XIII. Màng mỏng quang học</b>	
13.1. Cơ sở lý thuyết màng mỏng quang học .....	227
13.2. Một số linh kiện màng mỏng quang học .....	230
<b>Chương XIV. Quang sợi</b>	
14.1. Cấu tạo và các tính chất của sợi quang.....	241
14.2. Các loại cáp quang .....	246
14.3. Phương pháp chế tạo sợi quang.....	253
<b>Chương XV. Laser và ứng dụng</b>	
15.1. Một số khái niệm .....	257
15.2. Các loại laser thông dụng .....	265
15.3. Một số ứng dụng của laser.....	271
<b>Phụ lục</b> .....	279
<b>Tài liệu tham khảo và trích dẫn.</b> ....	315

# KÝ HIỆU VÀ QUY ƯỚC VỀ DẤU

## 1. Một số ký hiệu chính

Tên	Ký hiệu
Tiêu cự thứ nhất	$f$
Tiêu cự đỉnh thứ nhất	$s_F$
Tiêu cự thứ hai	$f'$
Tiêu cự đỉnh thứ hai	$s'_F$
Tụ số thứ nhất	$D$
Tụ số thứ hai	$D'$
Mặt phẳng chính thứ nhất	$H$
Mặt phẳng chính thứ hai	$H'$
Vị trí mặt phẳng chính thứ nhất	$s_H$
Vị trí mặt phẳng chính thứ hai	$s'_H$
Tỷ lệ tạo ảnh	$\beta'$
Độ phóng đại	$\Gamma'$
Chiết suất	$n$
Bán kính cong mặt cầu	$r$
Khoảng cách hai đỉnh hai mặt cầu liên tiếp	$d$
Quang sai merion	$\delta G$
Quang sai sakitan	$\delta g$
Thù độ số	$A = n \sin u$
Vị trí vật	$s$
Vị trí ảnh	$s'$
Vị trí pupin vào	$t_p$
Vị trí pupin ra	$t'_F$

## 2. Quy ước về dấu của góc và đoạn thẳng

Để hạn chế nhầm lẫn khi tính truyền ánh sáng qua hệ quang cần quy ước thống nhất về dấu của các góc và của đoạn thẳng.

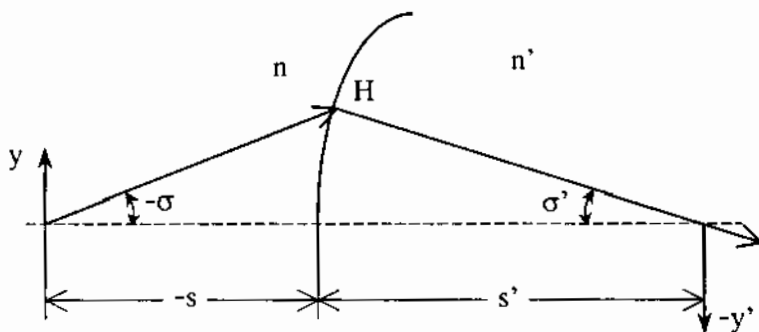
### *Quy ước dấu của các góc*

- Các góc tới, phản xạ và khúc xạ mang dấu dương khi quay các tia sáng theo chiều quay kim đồng hồ về trùng với pháp tuyến góc nhỏ hơn  $90^\circ$ . Ngược



lại, khi quay các tia sáng theo chiều quay ngược chiều quay kim đồng hồ về trùng với pháp tuyến góc nhỏ hơn  $90^\circ$  thì các góc đó mang dấu âm.

- Góc nhỏ hơn  $90^\circ$  lập bởi tia sáng và trục quang mang dấu dương khi tia sáng truyền từ trên xuống dưới và từ trái sang phải (góc  $\sigma'$  - hình 0.1). Ngược lại, góc mang dấu âm khi tia sáng truyền từ dưới lên trên và cũng từ trái sang phải (góc  $\sigma$  - hình 0.1).



Hình 0.1. Quy ước về dấu của góc và đoạn thẳng.

#### **Quy ước dấu của các đoạn thẳng**

- Các đoạn thẳng dọc theo chiều tia sáng từ trái sang phải có điểm đầu nằm trước thì đoạn đó mang dấu dương (khoảng cách ảnh  $s'$  - hình 0.1), ngược lại, có điểm đầu nằm sau thì đoạn đó mang dấu âm (khoảng cách vật  $s$  - hình 0.1).
- Các đoạn thẳng nằm trên và vuông góc với trục quang mang dấu dương (vật  $y$  - hình 0.1). Các đoạn thẳng nằm dưới và vuông góc với trục quang mang dấu âm (ảnh  $y'$  - hình 0.1).

# Chương I

## VẬT LIỆU QUANG

### 1.1. THUYẾT TINH QUANG HỌC

Thuyết tinh quang học (TTQH) là vật liệu vô định hình, trong suốt, đồng tính và đẳng hướng. Chúng được sử dụng chế tạo các chi tiết quang học: thấu kính, lăng kính, nêm quang, bản song song, phin lọc các loại...

Một số chỉ tiêu quan trọng của thuyết tinh quang học là.

#### 1.1.1. Chiết suất

Chiết suất của TTQH phụ thuộc vào bước sóng ánh sáng  $\lambda$  (ký hiệu  $n_\lambda$ ). Trong miền ánh sáng trắng ( $\lambda = 380 + 800$  nm) chiết suất của TTQH giảm khi bước sóng ánh sáng tăng lên. Chiết suất TTQH nằm trong khoảng từ  $1,4 + 2$ .

Quan hệ giữa chiết suất ( $n_\lambda$ ) và bước sóng ánh sáng được thể hiện qua một số công thức thực nghiệm:

$$\left. \begin{aligned} n_\lambda^2 &= A_0 + A_1\lambda^2 + A_2\lambda^{-2} + A_3\lambda^{-4} + A_4\lambda^{-6} + A_5\lambda^{-8} \dots \\ n_\lambda &= A + \frac{B}{\lambda^2} \\ n_\lambda &= a + b\lambda^2 \frac{E}{\lambda^2} \end{aligned} \right\} \quad (1.1)$$

Hoặc theo công thức của Hartmann:

$$n_\lambda = n_0 + \frac{A}{(\lambda - \lambda_0)^B} \quad (1.2)$$

Trong đó  $A_1 \dots A_5$ ,  $A_0$ ,  $A$ ,  $B$ ,  $E$  và  $\lambda_0$  là các chỉ số phụ thuộc vào các loại TTQH và được xác định bằng thực nghiệm. Theo Hartmann thì  $B$  trong khoảng  $0,5 + 2$ .

Ví dụ: thuyết tinh SF4 có  $n_0 = 1,715$ ;  $\lambda_0 = 295,7$  nm;  $A = 11,65$  nm;  $B = 1$ .

Với  $\lambda = 587,6$  nm, theo (1.2) tính được  $n_\lambda = 1,7549$ . Giá trị đo được qua thực nghiệm là  $n_\lambda = 1,7552$ .

Chiết suất TTQH được quy định theo một số bước sóng quang phổ vạch của các nguyên tử bức xạ (bảng 1.1).

**Bảng 1.1.** Ký hiệu chiết suất của thủy tinh quang học ứng với một số tia sáng chuẩn

Màu	Đỏ	Đỏ	Vàng	Xanh lơ	Xanh	Xanh thẫm	Tím
Nguyên tố	K	H	He	Hg	H	Hg	Hg
$\lambda$ (nm)	768,2	656,3	587,6	546,1	486,1	435,8	404,7
Ký hiệu	A'	C	d	e	F	g	h
Chiết suất	$n_{A'}$	$n_C$	$n_d$	$n_e$	$n_F$	$n_g$	$n_h$

### 1.1.2. Độ tán sắc cơ bản $n_F - n_C$

Độ tán sắc cơ bản được quy định theo hiệu số giữa chiết suất của thủy tinh ứng với hai tia cơ bản  $\lambda_F$  và  $\lambda_C$ .

TTQH có độ tán sắc cơ bản dương vì  $n_F > n_C$ .

Thủy tinh kron có  $n_F - n_C$  vào khoảng  $0,0065 \div 0,013$ .

Thủy tinh flin có  $n_F - n_C$  vào khoảng  $0,009 \div 0,044$ .

Các giá trị lớn nhất và nhỏ nhất của độ tán sắc cơ bản thuộc loại thủy tinh đặc biệt.

### 1.1.3. Chỉ số tán sắc

Chỉ số tán sắc hay còn gọi **chỉ số Abbe** kí hiệu là  $v_d$  thể hiện mức độ tán sắc ánh sáng khác nhau của các loại thủy tinh quang học.

$$v_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} \quad (1.3)$$

TTQH có chỉ số Abbe:  $20 < v_d < 100$ .

TTQH được chia thành hai loại chính: kron và flin.

Thủy tinh kron có chỉ số Abbe  $v_d > 55$ .

Thủy tinh flin có  $v_d < 50$ .

Chỉ số Abbe càng lớn thì độ tán sắc càng yếu. Chỉ số Abbe của TTQH nằm trong khoảng  $20 \div 100$ . Chỉ số Abbe của thủy tinh thông dụng  $30 \div 60$ .

Từ hai loại chính, TTQH được chia thành gần 200 loại khác nhau. Bảng 1.2 liệt kê một số TTQH với hai thông số chính là chiết suất  $n$  và chỉ số Abbe  $v_d$ .

Chi phí cho công nghệ và thiết bị để chế tạo TTQH rất tốn kém nên chúng thuộc vật liệu quý đắt tiền. Những năm của thập kỷ 80, giá TTQH của Đức vào khoảng từ 30 DM/kg đến 1000 DM/kg.

#### 1.1.4. Chỉ số tán sắc thành phần tương đối $\mathfrak{S}$

Khi tính thiết kế hệ quang (các hệ phải được chữa sai sắc) ta cần biết chỉ số tán sắc thành phần của các loại thủy tinh. Chỉ số này được quy định theo:

$\mathfrak{S}_{gF}$ ,  $\mathfrak{S}_{gC}$

$$\mathfrak{S}_{gF} = \frac{n_g - n_F}{n_F - n_C} \quad (1.4)$$

$$\mathfrak{S}_{gC} = \frac{n_g - n_C}{n_F - n_C} \quad (1.5)$$

Quan hệ giữa chỉ số Abbe và độ tán sắc thành phần tương đối được xác định theo hàm số thực nghiệm:

$$\mathfrak{S}_{gC} = 1,648 - 0,00175 v_d \quad (1.6)$$

TTQH cũng được quy định chặt chẽ về độ bọt, rỗ, ứng suất, giãn nở nhiệt, về chống ăn mòn hoá học, về tán màu, về phân cực về truyền qua và hấp thụ ánh sáng.

**Bảng 1.2.** Một số loại TTQH chính

Loại TT	Mã số	$n_F$	$n_d$	$n_C$	$v_d$
BK7	517642	1,52283	1,51872	1,51472	63,96
K 5	522595	1,52910	1,52458	1,52024	59,22
ZK N 7	508612	1,51470	1,51045	1,50633	60,98
BaK4	569561	1,57648	1,57125	1,56625	55,85
SK 15	623581	1,63108	1,62555	1,62025	57,79
SK 16	620603	1,62814	1,62286	1,61777	60,08
F 2	620364	1,63310	1,62408	1,61582	36,11
SF 2	648339	1,66238	1,65222	1,64297	33,60
SF 6	805254	1,82970	1,81265	1,79750	25,24
SF 10	728284	1,74805	1,73430	1,72200	28,19

## 1.2. TINH THỂ

Các chi tiết quang còn được chế tạo từ tinh thể tự nhiên hoặc nhân tạo. Chúng được sử dụng rộng rãi của dụng cụ quang ở miền hồng ngoại và tử ngoại. Ở các miền này hệ số cho qua lớn hơn ở miền ánh sáng khả kiến. Các tinh thể nhân tạo ngày càng được sử dụng rộng rãi hơn. Bảng 1.3 liệt kê những tinh thể chính và các tính chất của nó được sử dụng chế tạo chi tiết quang dùng trong miền hồng ngoại và tử ngoại.

**Bảng 1.3.** Tinh thể được sử dụng chế tạo chi tiết quang học

Tinh thể	Sử dụng trong miền $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Chiết suất của các tinh thể			Đặc tính
		$\lambda - n$	$\lambda - n$	$\lambda - n$	
LiF	0,11...8	0,2 - 1,45	1,0 - 1,39	5,0 - 1,33	Tán sắc yếu, ít hoà tan
CaF <sub>2</sub>	0,12...12	0,2 - 1,47	5,0 - 1,44	10,6 - 1,28	Tán sắc yếu, ít hoà tan
NaCl	0,21...20	3,0 - 1,52	10,6 - 1,49	20 - 1,37	Tán sắc cao, dễ tan
KBr	0,28...37	0,59 - 1,56	10,6 - 1,53	30 - 1,44	Tán sắc cao, dễ tan
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,17...3,5	1,0 - 1,76	3 - 1,71	5,0 - 1,63	Rất cứng, ít thay đổi do nhiệt
CsJ	0,26...60	5,0 - 1,74	30 - 1,71	50 - 1,64	Hệ số cho qua lớn với hồng ngoại, dễ tan.
ZnS	0,4...14	1,0 - 2,29	5,0 - 2,25	10,6 - 2,19	Cứng, khó vỡ
KRS 5 TiBr /TiJ	0,45...45	1,0 - 2,45	10,6 - 2,37	30,0 - 2,29	Tán sắc cao, ít tan
GaAs	1,5...15	3,0 - 3,32	10,6 - 3,28	15 - 2,7	Cứng, khó vỡ, dẫn nhiệt tốt
ZnSe	0,5...20	1,0 - 2,48	10,6 - 2,4	20 - 2,3	Chiết suất ít ảnh hưởng của nhiệt
CdTe	1...25	5 - 2,69	10,6 - 2,67	20 - 2,63	Ít cứng, dẫn nhiệt tối
Si	1,2...15	1,36 - 3,5	3 - 3,43	10,6 - 3,42	Làm pin lọc tốt
Ge	1,8...23	3,0 - 4,05	10,6 - 4,0	15 - 4,0	Rất cứng, bền nhiệt
SiO <sub>2</sub>	0,15...4	0,19 - 1,68	0,26 - 1,6	2,0 - 1,52	Dùng tốt ở miền tử ngoại

### 1.3. THỦY TINH HỮU CƠ

Một số loại thủy tinh hữu cơ cũng được sử dụng chế tạo các chi tiết quang học.

Trước hết phải kể đến polystirol (chiết suất  $n_d = 1,590$ , chỉ số Abbe  $v_d = 30,8$ ) có tính chất tương tự như flin.

Thủy tinh poly methyl methacrylat (chiết suất  $n_d = 1,491$ , chỉ số Abbe  $v_d = 57,2$ ) - viết tắt là PMMA hay plexiglas có tính chất như thủy tinh kron.

Hai loại polystirol và PMMA được sử dụng nhiều để chế tạo ống kính tạo ảnh allyl diglycol carbonat - CR-39 (chiết suất  $n_d = 1,499$ , chỉ số Abbe  $v_d = 57,8$ ) cứng hơn hai loại trên. Chúng được sử dụng đúc ép kính mắt các loại nhiều hơn so với duroplast.

Poly carbonat (chiết suất  $n_d = 1,585$ , chỉ số Abbe  $v_d = 30,0$ ) chịu nhiệt tốt hơn là polystirol.

Nhờ độ chênh lệch cao về chiết suất và độ tán sắc, nên thủy tinh hữu cơ cũng được sử dụng để lập hệ quang có chất lượng cao. Trong số đó thì PMMA được dùng rộng rãi nhất.

Các chi tiết quang với hình dạng phức tạp (các thấu kính Fresnel, các thấu kính mặt parabol, hyperbol... lăng kính tổ hợp) được đúc ép bằng thủy tinh hữu cơ không phải qua nguyên công mài đánh bóng lần cuối nên đã giảm giá thành các hệ quang một cách đáng kể.

Do trọng lượng thấp và ít vỡ, thủy tinh hữu cơ được sử dụng tốt trong ngành kính mắt.

Ngày nay các chi tiết quang bằng thủy tinh hữu cơ đang dần dần thay thế thủy tinh quang học của các hệ quang không phức tạp như: kính lúp, ống nhòm, máy ảnh, vật kính và thị kính đơn giản.

Tuy vậy việc sử dụng thủy tinh hữu cơ vẫn còn hạn chế để chế tạo các hệ quang chính xác có chất lượng tạo ảnh tốt bởi chúng có độ cứng kém và có hệ số giãn nở nhiệt cao.

## Chương II

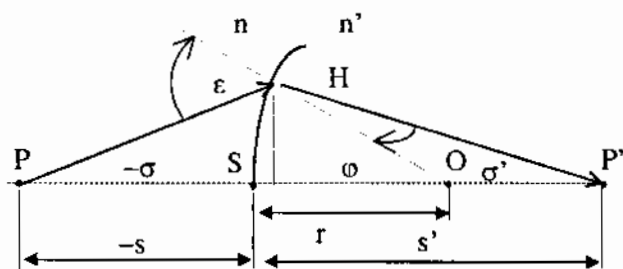
# THẤU KÍNH VÀ HỆ THẤU KÍNH

### 2.1. TRUYỀN ÁNH SÁNG QUA MẶT CẦU KHÚC XẠ

Thấu kính quang học được giới hạn bởi các mặt cầu khúc xạ. Mỗi mặt cầu ngăn cách hai môi trường chiết suất khác nhau  $n$  và  $n'$ . Đỉnh cầu và tâm cầu nằm trên trục chính hay còn gọi là trục quang. Đường qua tâm cầu gọi là trục phụ. Mặt cầu khúc xạ có một trục chính và nhiều trục phụ. Chùm sáng gặp mặt cầu khúc xạ lệch hướng đi vào môi trường thứ hai. Ta phân biệt chùm sáng vào mặt cầu theo hai miền khác nhau: miền xa trục và miền gần trục quang.

#### 2.1.1. Khúc xạ ánh sáng qua mặt cầu ở miền xa trục

Mặt cầu khúc xạ (hình 2.1) bán kính  $r$  nằm trong mặt Merion (mặt Merion chứa tia chính và trục quang). Tia sáng từ vật điển  $P$  trên quang trục gặp mặt cầu tại  $H$ , khi khúc xạ cho ảnh  $P'$ . Ảnh  $P'$  cũng trên



Hình 2.1. Truyền tia sáng qua mặt cầu.

quang trục cách đỉnh cầu khoảng cách ảnh  $s'$ . Từ các quan hệ hình học và định luật khúc xạ ánh sáng ở  $H$ , khoảng cách ảnh  $s'$  được tính theo:

$$\sin \varepsilon = \frac{s-r}{r} \sin \sigma \quad (2.1)$$

$$\sin \varepsilon' = \frac{n}{n'} \sin \varepsilon \quad (2.2)$$

$$\varphi = \sigma + \varepsilon \quad (2.3)$$

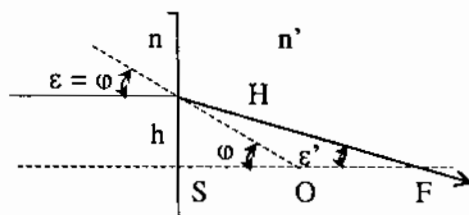
$$\sigma' = \varphi - \varepsilon' \quad (2.4)$$

$$s' = r \frac{\sin \varepsilon'}{\sin \sigma'} + r \quad (2.5)$$

Khoảng cách ảnh  $s'$  phụ thuộc không những vào bán kính  $r$ , các chiết suất

$n$ ,  $n'$  và khoảng cách vật mà còn vào độ lớn góc mở vật  $\sigma$ . Như vậy mỗi vị trí vật P có nhiều vị trí ảnh P', nên ở miền xa trục xảy ra quá trình tạo ảnh không phải là ảnh điểm.

Khi vật ở vô cùng (tia tới song song với trục quang) thì theo quan hệ ở hình 2.2 có thể thay:



Hình 2.2. Vật ở vô cùng.

$$\varphi = \varepsilon \quad (2.6)$$

$$\sin \varepsilon = \frac{h}{r} \quad (2.7)$$

vào (2.3) và (2.1) để tính khoảng cách ảnh  $s'$ .

### 2.1.2. Khúc xạ ánh sáng qua mặt cầu ở miền gần trục

Khi các tia sáng lập với trục quang những góc mở  $\sigma$ ,  $\sigma'$  nhỏ (có thể coi:  $\sin \sigma = \text{tg} \sigma = \sigma$  và  $\sin \sigma' = \text{tg} \sigma' = \sigma'$ ) thì quy ước chúng nằm trong miền gần trục. Với quy ước này, các góc tới  $\varepsilon$  và các góc khúc xạ  $\varepsilon'$  cũng nhỏ nên coi  $\sin \varepsilon = \varepsilon$  và  $\sin \varepsilon' = \varepsilon'$ ;  $h \ll s$ . Từ kết quả định luật khúc xạ ánh sáng tại H và các mối liên hệ hình học (hình 2.1) tìm được khoảng cách ảnh  $s'$ :

$$\sigma' - \sigma = \varepsilon - \varepsilon' \quad (2.8)$$

$$\sigma' - \sigma = \varepsilon' \frac{n' - n}{n} \quad (2.9)$$

$$\sigma' n' - \sigma n = \varphi (n' - n) \quad (2.10)$$

Thay giá trị góc bằng số đo của cung thì:

$$n' \frac{h}{s'} - n \frac{h}{s} = (n' - n) \frac{h}{r} \quad (2.11)$$

Khoảng cách vật  $s$  và khoảng cách ảnh  $s'$  có mối quan hệ sau:

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{(n' - n)}{r} \quad (2.12)$$

#### • Bất biến Abbe

Chuyển các thừa số phía vật và phía ảnh của (2.12) về hai phía sẽ được:

$$Q = n \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s} \right) = n' \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{s'} \right) \quad (2.13)$$



Quan hệ (2.13) được gọi là bất biến Abbe. Bất biến Abbe còn đề cập tới mối quan hệ vị trí của vật và ảnh của từng mặt cầu bất kì trong hệ nhiều mặt cầu.

• **Khoảng cách ảnh**

Từ (2.13) sẽ được:

$$s' = \frac{n'}{\frac{n}{s} + \frac{n' - n}{r}} \quad (2.14)$$

Như vậy mỗi vị trí vật P chỉ có một vị trí ảnh P'. Trong miền gần trục xảy ra quá trình tạo ảnh điểm.

• **Tiêu cự mặt cầu**

Theo quan hệ (2.14) khi  $s = \infty$  thì tiêu cự thứ hai của mặt cầu khúc xạ  $f' = s'$ :

$$f' = \frac{r \cdot n'}{n' - n} \quad (2.15)$$

Tiêu cự thứ nhất:

$$f = \frac{r \cdot n}{n' - n} \quad (2.16)$$

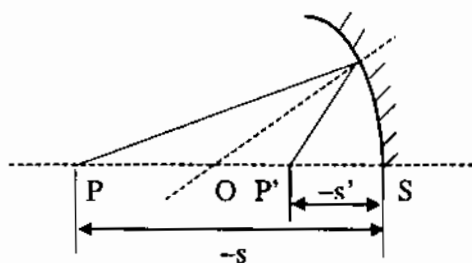
Quan hệ giữa tiêu cự và chiết suất:

$$\frac{f}{f'} = -\frac{n}{n'} \quad (2.17)$$

Gương cầu tạo ảnh P (P nằm gần đỉnh cầu S) thành P' (hình 2.3). Có thể coi gương cầu cũng là mặt cầu khúc xạ và  $n' = -n$ .

Từ (2.16) tính tiêu cự gương cầu theo:

$$f' = -\frac{r}{2} \quad \text{và} \quad f = \frac{r}{2} \quad (2.18)$$



Hình 2.3. Gương cầu.

Quan hệ giữa khoảng cách ảnh  $s'$  và khoảng cách vật  $s$  của gương cầu:

$$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = -\frac{2}{r} \quad (2.19)$$

• **Bất biến Lagrang - Helmholtz**

Ở miền gần trục, qua mặt cầu vật y tạo ảnh thành y':

$$\operatorname{tg} \varepsilon = \varepsilon = \frac{y}{s} \quad \text{và} \quad \operatorname{tg} \varepsilon' = \varepsilon' = \frac{y'}{s'}$$

$$\frac{\varepsilon}{\varepsilon'} = \frac{y}{y'} \cdot \frac{s'}{s}$$

Từ định luật khúc xạ  $n \sin \varepsilon = n' \sin \varepsilon'$  thì tỷ lệ tạo ảnh  $\beta' = y' / y$  xác định theo:

$$\beta' = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \cdot \frac{n}{n'} \quad (2.20)$$

Ngoài ra từ hình 2.4 ta có:

$$\frac{h}{s} = \sigma \quad \text{và} \quad \frac{h}{s'} = \sigma'$$

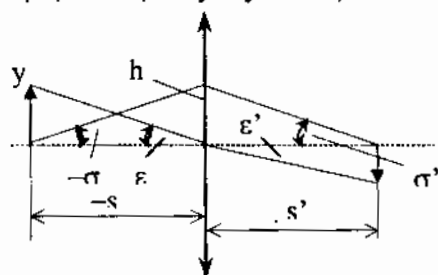
$$\text{s. } \sigma = s' \cdot \sigma'$$

Bất biến Lagrang - Helmholtz

$$n \cdot y \cdot \sigma = n' \cdot y' \cdot \sigma' \quad (2.21)$$

Bất biến Lagrang - Helmholtz

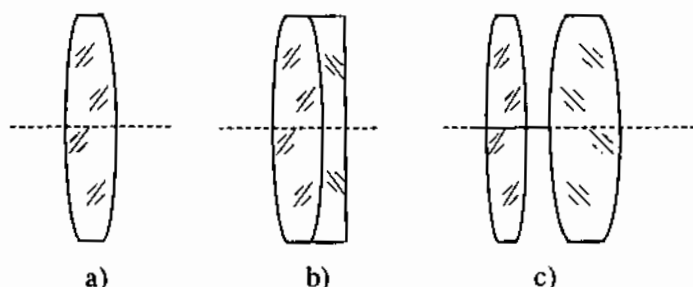
mô tả quan hệ giữa độ lớn danh nghĩa của vật và của ảnh ở từng mặt cầu trong hệ nhiều mặt cầu.



**Hình 2.4.** Mô phỏng quan hệ bất biến Lagrang - Helmholtz.

## 2.2. TRUYỀN TIA SÁNG QUA NHIỀU MẶT CẦU

Thông thường hệ quang gồm từ hai thấu kính trở lên. Như vậy số mặt cầu không phải chỉ là một mà là từ hai trở lên (hình 2.5a - một thấu kính có hai mặt cầu, hình 2.5b và c - hệ hai thấu kính có ba và bốn mặt cầu). Các hệ phức tạp có số mặt cầu lên tới hàng chục. Trục quang của hệ nhiều mặt cầu trùng với trục quang của từng mặt cầu. Hệ nhiều mặt cầu có các thông số chủ yếu như tiêu cự, tiêu cự đỉnh, vị trí các mặt phẳng chính. Chúng là các thông số quang của hệ.



**Hình 2.5.** Các hệ nhiều mặt cầu:

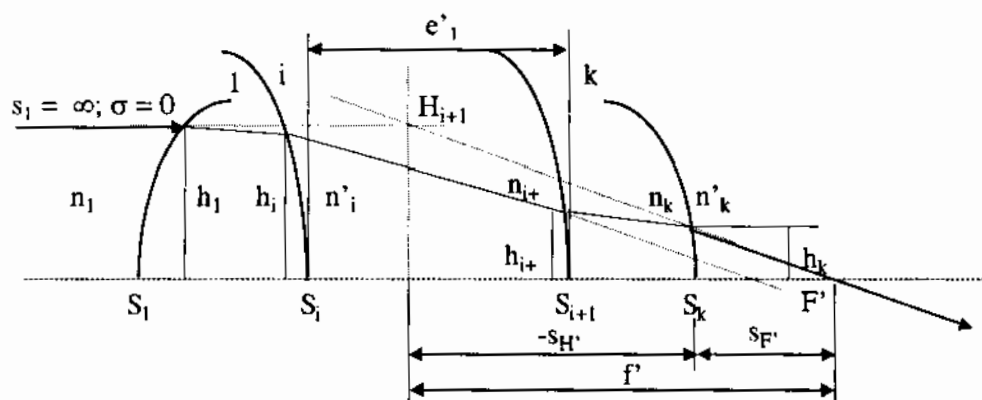
a- thấu kính hai mặt cầu; b- hệ ba mặt cầu (hai thấu kính);

c- hệ bốn mặt cầu (hai thấu kính).

• Vị trí ảnh của hệ nhiều mặt cầu

Việc xác định khoảng cách ảnh  $s'$  khi có vị trí vật  $s$  tạo ảnh qua hệ nhiều mặt cầu được tiến hành lần lượt từ mặt thứ nhất đến mặt cuối của hệ (hình 2.6).

Ta cũng xét ở hai miền khác nhau: miền gần trục và miền xa trục. Hãy áp dụng các quan hệ từ (2.1) đến (2.7) và (2.14) để xác định  $s'$  ở miền xa trục và gần trục.

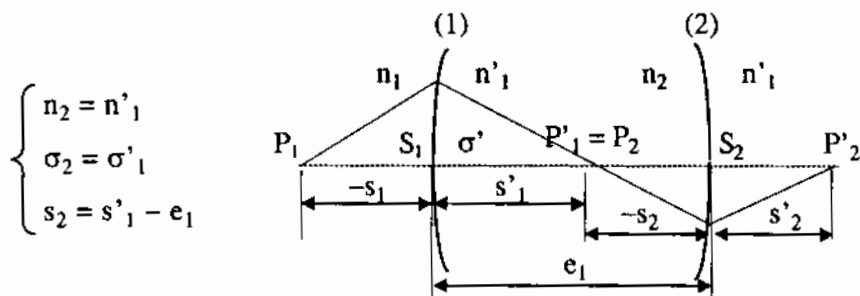


Hình 2.6. Hệ nhiều mặt cầu.

Như vậy sẽ tìm được khoảng cách ảnh sau mỗi mặt cầu 1, 2,... i...k là  $s'_1, s'_2, \dots, s'_i, \dots, s'_k$ . Khoảng cách  $s'_k$  chính là khoảng cách ảnh  $s'$  sau cả hệ mặt cầu.

Khi tính ở miền xa trục cần sử dụng các quan hệ chuyển tiếp:

- Giữa mặt cầu thứ nhất và thứ hai: (hình 2.7).



Hình 2.7. Công thức chuyển tiếp của hệ hai mặt cầu.

- Giữa mặt cầu thứ  $i$  và  $i+1$  trong hệ  $k$  mặt cầu:

$$\left. \begin{aligned} n_{i+1} &= n'_i \\ \sigma_{i+1} &= \sigma'_i \\ s_{i+1} &= s'_i - e'_i \end{aligned} \right\} \quad (2.22)$$

Như vậy khoảng cách ảnh  $s'$  của hệ phụ thuộc vào góc mở vật. Các góc mở  $\sigma_i$  khác nhau cho các khoảng cách ảnh khác nhau. Ảnh một điểm cho nhiều ảnh điểm không trùng nhau. Ảnh là hình tròn nhờ nhiễu.

Khi tính ở miền gần trục cần sử dụng các quan hệ chuyển tiếp:

$$\begin{aligned} n_{i+1} &= n'_i \\ s_{i+1} &= s'_i - e_i \end{aligned}$$

Khác với miền xa trục khoảng cách ảnh trong miền gần trục không phụ thuộc vào góc mở vật. Nghĩa là một vị trí vật chỉ có một vị trí ảnh.

#### • Tỷ lệ tạo ảnh của hệ nhiều mặt cầu

$$\begin{aligned} \beta' &= \frac{y'_k}{y_1} = \frac{y'_1}{y_1} \cdot \frac{y'_2}{y_2} \dots \frac{y'_k}{y_k} \\ \beta' &= \prod_{i=1}^{i=k} \beta'_i \\ \beta' &= \frac{n_1}{n'_k} \prod_{i=1}^{i=k} \frac{S'_i}{S_i} \end{aligned} \quad (2.23)$$

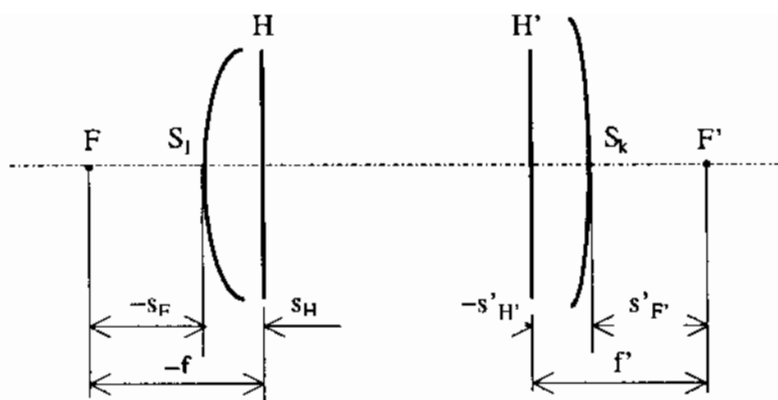
#### • Tiêu cự của hệ nhiều mặt cầu

Tiêu cự thứ hai  $f'$  của hệ nhiều mặt cầu được xác định khi  $s = \infty$ , lúc này  $f' = s'$ :

$$f' = \left[ S'_1 \prod_{i=2}^{i=k} \frac{S'_i}{S_i} \right] \quad (2.24)$$

#### • Hệ nhiều mặt cầu tương đương

Ta thay hệ nhiều mặt cầu bán kính  $r_i$ , chiết suất  $n_i$ , các khoảng cách  $d_i$  giữa các mặt cầu bằng hệ nhiều mặt cầu tương đương với các thông số quang: tiêu cự thứ  $f, f'$ ; tiêu cự đỉnh  $s_F, s'_F$ , và vị trí các mặt phẳng chính  $H, H'$  ( $s_H, s'_H$ ).



Hình 2.8a. Hệ nhiều mặt cầu tương đương.

Các thông số quang của hệ nhiều mặt cầu:

Tiêu cự thứ hai  $f'$ :

$$f' = h_1 \cdot \frac{n'_k}{I'_k} \quad (2.25)$$

Tiêu cự đỉnh thứ hai  $s'_{F'}$ :

$$s'_{F'} = h_k \cdot \frac{n'_k}{I'_k} \quad (2.26)$$

Vị trí mặt phẳng chính thứ hai  $s'_{H'}$ :

$$s'_{H'} = s'_{F'} - f' \quad (2.27)$$

Các giá trị  $h_1$  và  $I'_k$  của (2.25) và (2.26) tính theo các quan hệ chuyển tiếp (2.28) và (2.29):

$$n'_1 \sigma'_i = n_i \sigma_i + \frac{n'_i - n_i}{r_i} \cdot h_i \quad (2.28a)$$

Thay  $I'_i = n'_i \sigma'_i$  và  $I_i = n_i \sigma_i$  thì:

$$I'_i = I_i + \frac{n'_i - n_i}{r_i} \cdot h_i \quad (2.28b)$$

Ở mặt cầu thứ nhất:

$$I_1 = n_1 \cdot \frac{h_1}{s_1} \quad (2.28c)$$

Từ đó có các phương trình chuyển tiếp sau được sử dụng để tính truyền tia sáng qua hệ nhiều mặt cầu:

$$I_{i+1} = I'_i \quad (2.29a)$$

và: 
$$h_{i+1} = h_i - \frac{d_i}{n'_i} \cdot I'_i \quad (2.29b)$$

$$n_{i+1} = n'_i \quad \text{và} \quad \sigma_{i+1} = \sigma'_i$$

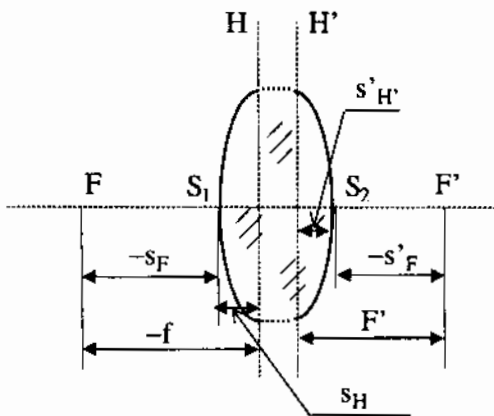
Để xác định tiêu cự thứ nhất  $f$ ; tiêu cự đỉnh thứ nhất  $s_F$  và vị trí mặt phẳng chính thứ nhất  $s_H$  phải để tia sáng đi phải sang trái từ mặt thứ  $k$  đến mặt thứ nhất. Điều đó có nghĩa là đảo ngược lại hệ: mặt cầu mặt thứ nhất trở thành mặt thứ  $k$  và mặt thứ  $k$  bây giờ là mặt thứ nhất. Tia sáng đi đúng chiều từ trái sang phải. Chú ý cần đổi dấu các bán kính cong mặt cầu ( $r_1 = -r_k$ ). Cuối cùng các kết quả tính được phải đổi dấu mới có các giá trị đúng của tiêu cự thứ nhất; tiêu cự đỉnh thứ nhất và vị trí mặt phẳng chính thứ nhất.

$$f = -f'_{(N)}; s_F = -s'_{F'(N)} \quad \text{và} \quad s_H = -s'_{H'(N)} \quad (2.30)$$

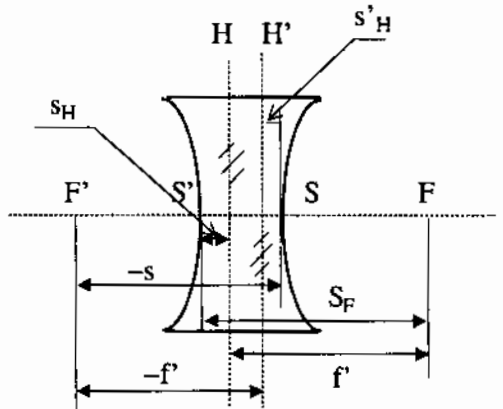
Ký hiệu  $(N)$  có nghĩa tính theo hành trình ngược của tia sáng từ phải sang trái. Nếu trong hệ có các mặt cầu phân xạ thì tia sáng không qua mà phản xạ trên mặt cầu đó. Quan hệ (2. 28b) chuyển thành:

$$I'_i = I_i + \frac{2n_i}{(-r_i)} \cdot h_i \quad (2.31)$$

Thông qua lập trình có thể tính truyền tia sáng qua hệ mặt cầu rất thuận lợi.



**Hình 2.8b.** Các thông số thấu kính hội tụ.



**Hình 2.8c.** Các thông số thấu kính phân kỳ.

Hình 2.8b và 2.8c mô phỏng các cặp tiêu cự  $f, f'$ ; tiêu cự đỉnh  $s_F, s'_F$  và vị trí các mặt phẳng chính  $s_H, s'_H$  của hệ hai mặt cầu tương đương ứng với hai loại thấu kính hội tụ và phân kỳ.

## 2.3. THẤU KÍNH QUANG

### 2.3.1. Cấu tạo và các thông số của thấu kính

Thấu kính là chi tiết quang quan trọng thay đổi các chùm sáng: từ song song thành hội tụ hoặc phân kỳ; từ các chùm hội tụ thành song song, phân kỳ hoặc thành hội tụ nhiều hơn hay ít hơn; từ các chùm phân kỳ thành hội tụ, song song hoặc thành phân kỳ nhiều hơn hay ít hơn. Thấu kính từ thủy tinh có hai mặt chiết quang tiếp xúc với môi trường xung quanh trong đó ít nhất là một mặt cầu. Mặt còn lại hoặc là mặt cầu, mặt phẳng hay các mặt cầu biến dạng như mặt parabol, hyperbol, mặt trụ, mặt tang trống v.v...

Các thông số cấu tạo của thấu kính hai mặt cầu là: bán kính  $r_1$  và  $r_2$ , bề dày  $d$ , chiết suất  $n$ . Trục quang của thấu kính trùng với trục quang mỗi mặt cầu. Chiết suất trước thấu kính là  $n_1$  và sau thấu kính là  $n'_2$ .

Các thông số quang thấu kính phụ thuộc trực tiếp vào  $n, r_1, r_2, d, n_1, n'_2$  được xác định theo:

Tiêu cự thứ hai của thấu kính:

$$f = \frac{n \cdot n'_2 \cdot r_1 \cdot r_2}{n \cdot r_2 \cdot (n - n_1) - (n - n'_2) \cdot [n \cdot r_1 - (n - n_1) \cdot d]} \quad (2.32a)$$

Tiêu cự thứ nhất của thấu kính:

$$f = \frac{n \cdot n_1 \cdot r_1 \cdot r_2}{n \cdot r_1 \cdot (n - n'_2) - (n - n_1) \cdot [n \cdot r_2 - (n - n'_2) \cdot d]} \quad (2.32b)$$

Giữa  $f$  và  $f'$  có quan hệ:

$$f = -f' \cdot \frac{n_1}{n'_2} \quad (2.33)$$

Tiêu cự đỉnh thứ hai thấu kính:

$$s'_F = \frac{n'_2 \cdot r_2 \cdot [n \cdot r_1 - (n - n_1) \cdot d]}{n \cdot r_2 \cdot (n - n_1) - (n - n'_2) \cdot [n \cdot r_1 - (n - n_1) \cdot d]} \quad (2.34a)$$

Tiêu cự đỉnh thứ nhất thấu kính:

$$s_F = \frac{n_1 \cdot r_1 \cdot [n \cdot r_2 + (n - n'_2) \cdot d]}{n \cdot r_1 \cdot (n - n'_2) - (n - n_1) \cdot [n \cdot r_2 - (n - n'_2) \cdot d]} \quad (2.34b)$$

Vị trí hai mặt phẳng chính:

$$s'_{H'} = \frac{n'_2 \cdot r_2 \cdot (n - n_1) \cdot d}{n \cdot r_2 \cdot (n - n_1) - (n - n'_2) \cdot [n \cdot r_1 - (n - n_1) \cdot d]} \quad (2.35a)$$

và:

$$s_H = \frac{n_1 \cdot r_1 \cdot (n - n'_2) \cdot d}{n \cdot r_1 \cdot (n - n'_2) - (n - n_1) \cdot [n \cdot r_2 - (n - n'_2) \cdot d]} \quad (2.35b)$$

Trước và sau thấu kính là môi trường không khí thì  $n_1 = n'_2 = 1$  thì:

Tiêu cự thứ hai thấu kính (trong không khí):

$$f' = \frac{1}{n - 1} \cdot \frac{n \cdot r_1 \cdot r_2}{(n - 1) \cdot d + n \cdot (r_2 - r_1)} \quad (2.36a)$$

Tiêu cự thứ nhất thấu kính (trong không khí):

$$f = -f' \quad (2.36b)$$

$$f = -\frac{1}{n - 1} \cdot \frac{n \cdot r_1 \cdot r_2}{(n - 1) \cdot d + n \cdot (r_2 - r_1)} \quad (2.36c)$$

Vị trí các mặt phẳng chính của thấu kính trong không khí:

$$s_H = \frac{r_1 \cdot d}{n \cdot (r_1 - r_2) - (n - 1) \cdot d} \quad (2.37a)$$

và:

$$s'_{H'} = \frac{r_2 \cdot d}{n \cdot (r_1 - r_2) - (n - 1) \cdot d} \quad (2.37b)$$

Tiêu cự đỉnh:

$$s_F = f \left[ 1 + \frac{(n - 1) \cdot d}{n \cdot r_2} \right]; \quad s'_{F'} = f' \left[ 1 - \frac{(n - 1) \cdot d}{n \cdot r_1} \right] \quad (2.38)$$

Quan hệ giữa  $r_1$ ,  $r_2$  và vị trí các mặt phẳng chính:

$$\frac{s_H}{s'_{H'}} = \frac{r_1}{r_2} \quad (2.39)$$

Khoảng cách giữa hai mặt phẳng chính:

$$HH' = d \left[ 1 - \frac{r_1 - r_2}{(n - 1) \cdot d + n \cdot (r_2 - r_1)} \right] \quad (2.40)$$

### **Tụ số thấu kính**

Giá trị nghịch đảo tiêu cự thấu kính được gọi là tụ số thấu kính. Đơn vị tụ



số là dioptrie (điopt) khi tiêu cự tính bằng met (m).

$$D = (1/f) \quad (2.41a)$$

$$D' = (1/f') \quad (2.41b)$$

Tỷ số thấu kính trong môi trường không khí:

$$D = (n - 1) \left[ -\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right] - \frac{(n - 1)^2 \cdot d}{n \cdot r_1 \cdot r_2} \quad (2.41c)$$

$$D' = -D = (n - 1) \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] + \frac{(n - 1)^2 \cdot d}{n \cdot r_1 \cdot r_2} \quad (2.41d)$$

### 2.3.2. Thấu kính mỏng

Nếu bề dày thấu kính nhỏ nhiều so với bán kính cong  $r_1$  và  $r_2$  thì có thể bỏ qua bề dày trong các công thức tính thông số quang thấu kính. Lúc này thấu kính được gọi là thấu kính mỏng.

#### • Các thông số thấu kính mỏng

Tiêu cự thấu kính mỏng:

$$f' = -f = \frac{1}{n - 1} \cdot \left( \frac{r_1 \cdot r_2}{r_2 - r_1} \right) \quad (2.42)$$

Tỷ số thấu kính mỏng:

$$D' = -D = (n - 1) \left[ \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (2.43)$$

### 2.3.3. Tạo ảnh qua thấu kính

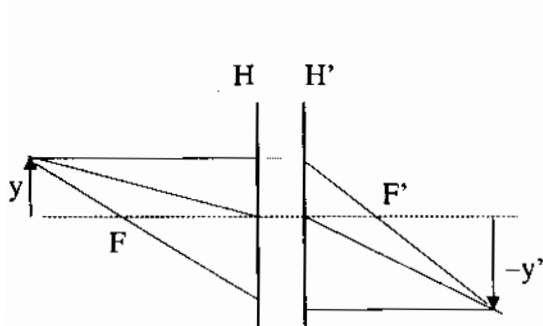
#### • Phương pháp vẽ ảnh qua thấu kính

Sử dụng hai trong ba tia sau đây để xác định ảnh qua thấu kính (hình 2.9 và 2.10).

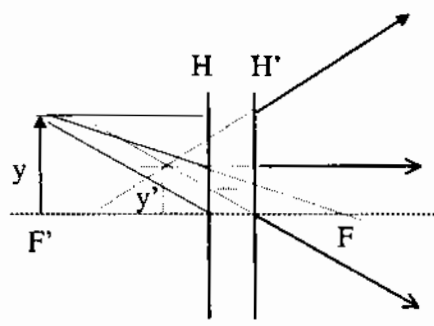
- Tia thứ nhất từ vật đi song song với trục quang qua thấu kính khúc xạ đi qua tiêu điểm thứ hai  $F'$ .

- Tia thứ hai từ vật đi qua tiêu điểm thứ nhất  $F$  khúc xạ qua thấu kính thì song song với trục quang.

- Tia thứ ba từ vật đi qua điểm thất  $K$  và  $K'$  không bị lệch hướng.



**Hình 2.9.** Tạo ảnh qua thấu kính hội tụ.



**Hình 2.10.** Tạo ảnh qua thấu kính phân kỳ.

### Các công thức tạo ảnh

Từ các mối quan hệ hình học (hình 2.9 và 2.10) ta có:

Quan hệ giữa vị trí vật và ảnh:

$$\frac{f}{a} + \frac{f'}{a'} = 1 \quad (2.44)$$

Phương trình tạo ảnh Newton:  $z \cdot z' = f \cdot f'$  (2.45)

Tỷ lệ tạo ảnh:

$$\beta' = \frac{y'}{y} = -\frac{f}{z} = -\frac{z'}{f'} = \frac{n_1 \cdot a'}{n_2 \cdot a} = -\frac{f \cdot a'}{f' \cdot a} \quad (2.46)$$

Độ phóng đại góc hay hệ số bội giác:

$$\gamma' = \frac{\sigma'}{\sigma} = \frac{f}{z'} = \frac{z}{f'} = \frac{a}{a'} \quad (2.47)$$

Tỷ lệ tạo ảnh dọc trục:

$$\alpha' = \frac{\Delta z'}{\Delta z} = -\frac{z'}{z} = -\frac{f \cdot a'^2}{f' \cdot a^2} = \frac{n_1 \cdot a'^2}{n_2 \cdot a^2} \quad (2.48)$$

**Các công thức tạo ảnh của thấu kính ở môi trường không khí ( $n_1 = n_2 = 1$ )**

Quan hệ giữa vị trí ảnh và vật:

$$-\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} \quad (2.49)$$

Từ quan hệ (2.49) ta có:

$$a' = \frac{a.f'}{a + f'} \quad (2.49a)$$

$$a = \frac{a'.f'}{f' - a'} \quad (2.49b)$$

$$f' = \frac{a.a'}{a - a'} \quad (2.49c)$$

Phương trình tạo ảnh Newton:

$$z. z' = -f'^2 \quad (2.50)$$

Tỷ lệ tạo ảnh:

$$\beta' = \frac{a'}{a} = \frac{f'}{a + f'} \quad (2.51)$$

Hệ số bội giác:

$$\gamma' = \frac{a}{a'} = \frac{a + f'}{f'} \quad (2.52)$$

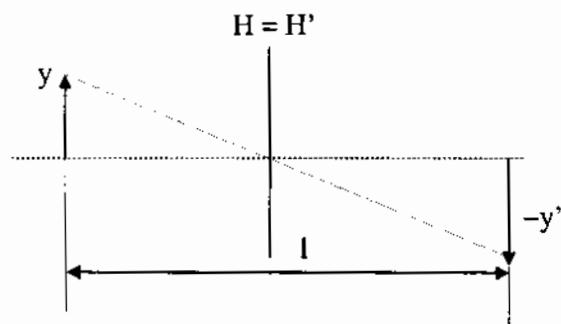
Tỉ lệ tạo ảnh dọc trục:

$$\alpha' = \frac{a'^2}{a^2} = \frac{f'^2}{(a + f')^2} \quad (2.53)$$

Khi cho trước khoảng cách giữa vật và ảnh  $l = -a + a'$  (hình 2.11) và tỉ lệ tạo ảnh  $\beta'$  sẽ tìm tiêu cự thấu kính:

$$f' = \frac{l}{2 - \beta' - (1/\beta')} \quad (2.54)$$

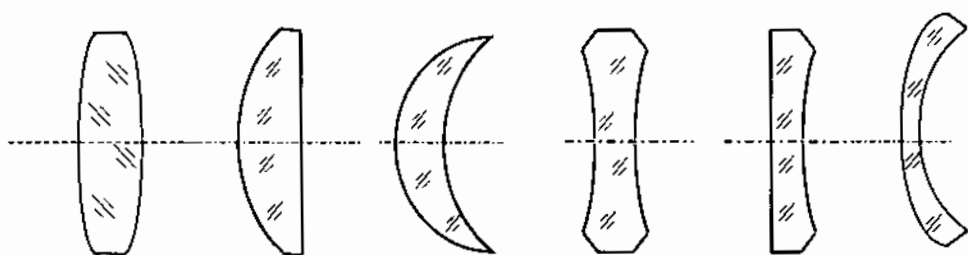
**Hình 2.11.** Xác định tiêu cự khi có khoảng cách vật tới ảnh và tỷ lệ tạo ảnh.



## 2.4. CÁC LOẠI THẤU KÍNH

Thấu kính được chia hai loại chính: Thấu kính hội tụ và thấu kính phân kỳ. Thấu kính hội tụ có tụ số dương ( $D' > 0$ ) và nói chung ở giữa thấu kính dày hơn ở biên. Thấu kính phân kỳ có tụ số âm ( $D' < 0$ ), ở biên thấu kính dày hơn ở

giữa thấu kính. Hình 2.14 liệt kê các dạng cơ bản của hai loại thấu kính hội tụ và thấu kính phân kỳ.



**Hình 2.12.** a- Các thấu kính hội tụ; b- các thấu kính phân kỳ.

### Một số thấu kính tiêu biểu

- Thấu kính hội tụ hai mặt lồi đều ( $r_1 = -r_2 = r$ , hình 2.13)

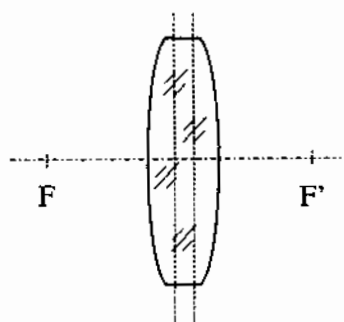
Tụ số thấu kính:

$$D' = \frac{n-1}{r} \left[ 2 - \frac{(n-1).d}{n.r} \right] \quad (2.55)$$

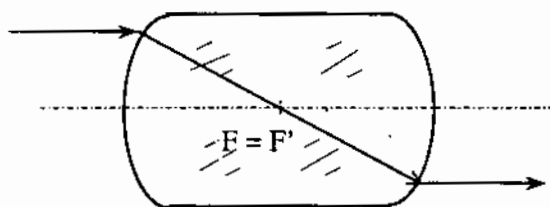
Vị trí mặt phẳng chính:

$$s_H = -s'_H = \frac{r.d}{2n.r - (n-1).d} \quad (2.56)$$

Trường hợp đặc biệt khi  $d = 2nr / (n - 1)$  thì  $f' = 0$ , thấu kính thuộc loại vô tiêu (hình 2.14)



**Hình 2.13.** Thấu kính hội tụ hai mặt cầu lồi đều.



**Hình 2.14.** Thấu kính vô tiêu.

- **Thấu kính phân kỳ hai mặt lõm đều** ( $r_1 = -r_2 = -r$ , hình 2.15)

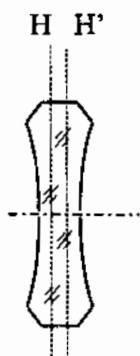
Tỷ số thấu kính:

$$D' = \frac{-2.(n-1)}{r} - \frac{(n-1)^2 d}{n.r^2} \quad (2.57)$$

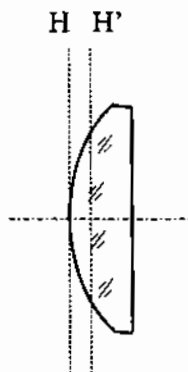
Vị trí mặt phẳng chính:

$$s_H = -a'_H = \frac{r.d}{2n.r + (n-1).d} > 0 \quad (2.58)$$

Hai mặt phẳng chính nằm trong thấu kính và cách đều đỉnh.



**Hình 2.15.** Thấu kính phân kỳ hai mặt cầu đều.



**Hình 2.16.** Thấu kính một lồi và một phẳng.

- **Thấu kính một mặt lồi và một mặt phẳng** ( $r_1 = r > 0$ ;  $r_2 = \infty$ , hình 2.16)

Tỷ số thấu kính:

$$D' = \frac{n-1}{r} \quad (2.58)$$

Vị trí hai mặt phẳng chính:

$$a_H = \lim_{r_2 \rightarrow \infty} \frac{\frac{r_1}{r_2} d}{\left(\frac{r_1}{r_2} - 1\right).n - \frac{d.(n-1)}{r_2}} = 0 \quad (2.59)$$

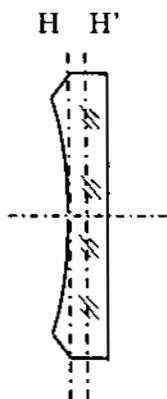
$$a'_H = \lim_{r_2 \rightarrow \infty} \frac{d}{\left(\frac{r_1}{r_2} - 1\right).n - \frac{d.(n-1)}{r_2}} = -\frac{d}{n} \quad (2.60)$$

Mặt phẳng chính thứ nhất H trùng với đỉnh cầu. Mặt phẳng chính thứ hai H' nằm trong thấu kính.

• **Thấu kính phân kỳ một mặt lõm và một mặt phẳng** ( $r_1 = -r < 0$  và  $r_2 = \infty$ , hình 2.17)

Tỷ số thấu kính:

$$D' = -\frac{n-1}{r} \quad (2.61)$$



**Hình 2.17.** Thấu kính phân kỳ một mặt phẳng, một mặt lõm.

Vị trí mặt phẳng chính xác định theo (2.59) và (2.60), trong đó một mặt phẳng chính trùng với đỉnh cầu. Mặt còn lại nằm trong thấu kính và cách mặt phẳng thấu kính khoảng  $d/n$ .

• **Thấu kính Menis dương** ( $r_1 > 0$  và  $r_2 > 0$ , hình 2.18)

Tỷ số thấu kính:

$$D' = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2}{n \cdot r_1 \cdot r_2} > 0 \quad (2.62)$$

Vị trí hai mặt phẳng chính:

$$s_H = \frac{r_1 \cdot d}{n \cdot (r_1 - r_2) - (n-1) \cdot d} \quad (2.63)$$

$$s'_{H'} = \frac{r_2 \cdot d}{n \cdot (r_1 - r_2) - (n-1) \cdot d}$$

Mặt phẳng chính thứ nhất H nằm trước và mặt phẳng chính thứ hai H' nằm trước hoặc nằm sau thấu kính.

• **Thấu kính Menis âm** ( $r_1 > 0$ ;  $r_2 > 0$  và  $r_1 > r_2$ , hình 2.19)

Tỷ số thấu kính tính theo:

$$D' = (n-1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \frac{(n-1)^2}{n \cdot r_1 \cdot r_2} < 0 \quad (2.64)$$

Vị trí các mặt phẳng chính cũng tính theo các công thức (2.62 và 2.63). Hai mặt phẳng chính đều nằm sau thấu kính.

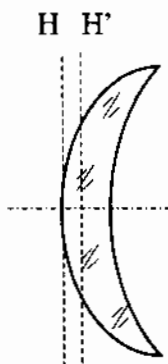
Trường hợp  $r_1 = r_2$

Tỷ số thấu kính:

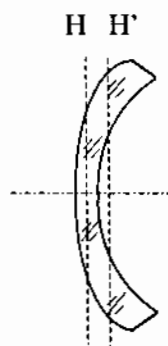
$$D' = \frac{(n-1)^2 \cdot d}{r^2} \quad (2.65)$$

Vị trí hai mặt phẳng chính:

$$s_H = s'_H = -\frac{r}{n-1} \quad (2.66)$$



Hình 2.18. Thấu kính Menis dương.



Hình 2.19. Thấu kính Menis âm.

## 2.5. CHUYỂN THẤU KÍNH MỎNG THÀNH THẤU KÍNH DÀY

Thực tế, các thấu kính được dùng riêng lẻ để tạo ảnh như kính lúp các loại, kính soi sợi, kính mắt v.v... Khi thiết kế, thường cho trước tiêu cự và đường kính ngoài thấu kính. Từ các yêu cầu này ta chọn các bản vẽ và kết quả tính có sẵn (theo tiêu chuẩn). Trường hợp đặc biệt thì phải tính thiết kế mới cho số lượng sản phẩm lớn. Lúc tính hãy chọn thủy tinh kron có độ tán sắc thấp trong không khí. Trước hết phải tính theo thấu kính mỏng (công thức 2.43) và độ cong Q (quan hệ 2.13) để tìm hai bán kính cong  $r_1$  và  $r_2$ .

Từ  $r_1$  và  $r_2$  của thấu kính mỏng sẽ chuyển thành thấu kính có bề dày  $d$ . Đường kính ngoài quyết định bề dày  $d$ . Tùy thuộc vào loại thấu kính và kích thước thấu kính chọn được bề dày  $d$  thích hợp. Bộ thông số  $n$ ,  $d$ ,  $r_1$  và  $r_2$  có tiêu cự khác với tiêu cự cần thiết kế, vậy phải tính các bán kính  $r_1$  và  $r_2$  của thấu kính dày và gọi là hiệu chỉnh bán kính. Công tác hiệu chỉnh tiến hành như sau:

- Xác định vị trí mặt phẳng chính khi có bề dày  $d$  theo quan hệ (2.63):

- Xác định  $s_1^*$  và  $s_2^*$  của thấu kính bề dày  $d$  khi có  $s_1$  và  $s_2$  của thấu kính mỏng:

$$s_1^* = s_1 + a_H \quad \text{và} \quad s_2^* = s_2 + a'_H \quad (2.67)$$

- Xác định bán kính cong của thấu kính có  $d$  khi đã hiệu chỉnh đợt đầu:

$$r_1^* = \frac{r_1}{1 - \frac{a_H}{s_1^*}} \quad \text{và} \quad r_2^* = \frac{r_2}{1 - \frac{a'_H}{s_2^*}} \quad (2.68)$$

- Tính tiêu cự thấu kính  $f^*$  theo bộ thông kết cấu  $n$ ,  $d$ ,  $r_1^*$  và  $r_2^*$ . Nếu tiêu cự  $f^*$  nằm trong khoảng dung sai của  $f$  cho trước thì không phải tính hiệu chỉnh lần hai. Ngược lại, phải tính hiệu chỉnh lần hai hoặc lần ba... cho tới khi nào tiêu cự thoả mãn dung sai thì dừng lại. Cách tính lần hai cũng giống như lần đầu nhưng bán kính cong cần hiệu chỉnh không phải là  $r_1, r_2$  mà là  $r_1^*, r_2^*$ ...

## 2.6. HỆ THẤU KÍNH

Các thấu kính được ghép với nhau thành hệ. Hệ đơn giản từ hai ba thấu kính đến các hệ phức tạp có sáu, bảy trở lên. Hệ quang phức tạp có hai, ba chục thấu kính là bình thường. Hệ thấu kính giải quyết một số chức năng sau đây mà thấu kính đơn không có:

- Tăng độ phóng đại và khả năng phân giải.
- Tạo nhiều hình ảnh trong cùng một hệ.
- Hạn chế các loại quang sai tăng chất lượng tạo ảnh.
- Thay đổi các tính năng của một hệ tùy thuộc và điều kiện sử dụng...

Hệ thấu kính có hai thông số tương đương là: tiêu cự  $f$ ,  $f'$  và vị trí mặt phẳng chính  $s_H$ ,  $s'_H$ . Các thông số tương đương này phụ thuộc vào các thông số của từng thấu kính và vị trí giữa chúng với nhau.

### • Tiêu cự hệ hai thấu kính

$$f' = -\frac{f'_1 \cdot f'_2}{t} \quad ; \quad f = \frac{f_1 \cdot f_2}{t} \quad (2.69)$$

hoặc:

$$f' = \frac{f'_1 \cdot f'_2}{f'_1 + f'_2 - e_1} \quad (2.70)$$

Ở đây  $e_1$  là khoảng cách từ mặt phẳng chính thứ hai thấu kính thứ nhất  $H'_1$  đến mặt phẳng chính thứ nhất thấu kính thứ hai  $H_2$ :  $e_1 = H'_1 H_2$ ;  $t$  là

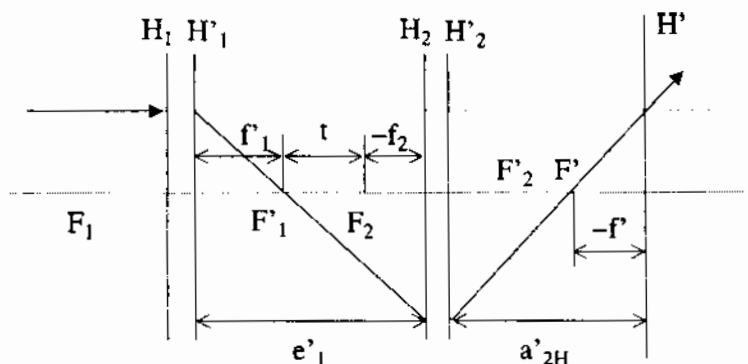


khoảng quang được xác định từ tiêu điểm thứ hai thấu kính thứ nhất  $F'_1$  đến tiêu điểm thứ nhất của thấu kính thứ hai  $F_2$ :  $t = F'_1F_2$  (hình 2.20).

• Vị trí hai mặt phẳng chính hệ hai thấu kính

$$a'_{H'} = \frac{f'_2 \cdot e_t}{t} \quad \text{và} \quad a_H = \frac{f_1 \cdot e_t}{t} \quad (2.71)$$

Hình 2.20 mô phỏng các thông số quang (thứ hai) của hệ hai thấu kính cũng như cách xác định chúng bằng hình vẽ. Khi vẽ xác định các vị trí thứ nhất  $F$  và  $H$  hãy để tia sáng vào hệ song song với trục quang theo hướng ngược lại từ phải sang trái.



Hình 2.20. Các thông số hệ hai thấu kính.

• Tiêu cự hệ nhiều thấu kính

Tiêu cự hệ quang có  $m$  thấu kính (hình 2.21) được xác định theo:

$$\frac{1}{f'} = D' = \sum_{k=1}^{k=m} (\omega_k)_{a_1=\infty} \cdot D'_k \quad (2.72)$$

$\omega_k$  là hệ số chiều cao của mặt thứ  $k$  so với mặt thứ nhất.

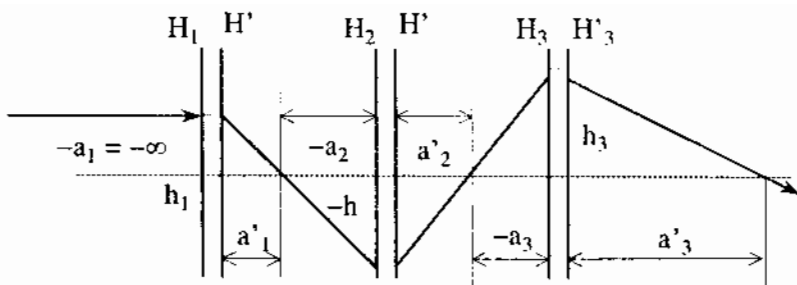
$$\omega_k = \frac{h_k}{h_1} \quad (2.73)$$

Hệ mỏng (coi các bề dày  $d_i = 0$ ) thì:

$$\frac{1}{f'} = D' = \sum_{k=1}^m D'_k \quad (2.74)$$

hay

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} + \frac{1}{f'_3} + \dots + \frac{1}{f'_k} + \dots + \frac{1}{f'_m} \quad (2.75)$$



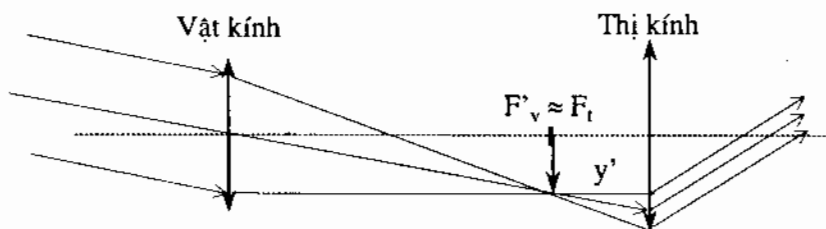
Hình 2.21. Hệ nhiều thấu kính.

• Hai hệ thấu kính tiêu biểu

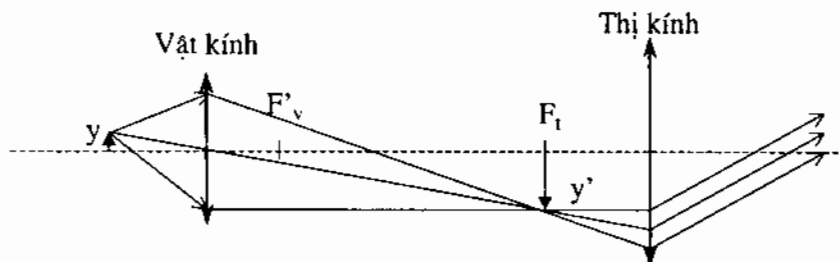
Các hệ vô tiêu và hệ hiển vi gồm nhiều thấu kính và được sắp xếp theo hai hệ thành phần: thị kính và vật kính.

Ở hệ vô tiêu (hình 2.22) vật kính tạo ảnh thật của vật ở xa lên màn ảnh giữa  $y'$ ;  $y'$  trùng với tiêu diện thứ hai vật kính  $F'_v$ . Thị kính đưa ảnh thật  $y'$  ra vô cùng và trùng với điểm cực viễn của mắt chúng ta.  $y'$  cũng trùng với tiêu diện thứ nhất thị kính. Như vậy  $F'_v$  trùng với  $F_t$ . Do kết cấu như thế hệ vô tiêu có tiêu cự  $f' = \infty$ .

Ở các hệ hiển vi (hình 2.23) vật kính tạo ảnh thật  $y'$  của vật  $y$  (gắn sát vật kính) lên màn ảnh giữa. Thị kính đưa ảnh thật  $y'$  ra vô cùng và trùng với điểm cực viễn của mắt chúng ta.  $y'$  cũng trùng với tiêu diện thứ nhất thị kính  $F_t$ .



Hình 2.22. Hệ vô tiêu.



Hình 2.23. Hệ hiển vi.

## 2.7. CÁC THẤU KÍNH ĐẶC BIỆT

### 2.7.1. Thấu kính trụ

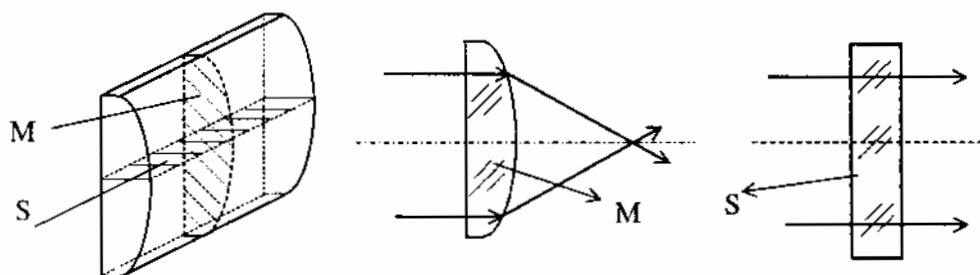
Thấu kính trụ có hai mặt khúc xạ, một trong hai mặt là mặt trụ hoặc cả hai mặt đều là mặt trụ. Thấu kính có mặt trụ lồi là thấu kính dương ( $D' > 0$ ). Thấu kính có mặt trụ lõm là thấu kính âm ( $D' < 0$ ). Thấu kính trụ đơn giản nhất có một mặt trụ và một mặt phẳng (hình 2.24). Trụ số mặt trụ thay đổi tùy thuộc vào các mặt tới với mặt cầu. Mặt tới trùng với mặt vuông góc với trục trụ (gọi là mặt Merion - ký hiệu là M) có số lớn nhất:

$$D' = \frac{n-1}{r} \quad (2.76)$$

Trụ số theo mặt tới chứa trục trụ và đường sinh trụ (Mặt Sakitan - Ký hiệu là S) là nhỏ nhất và  $D' = 0$ .

Khi mặt tới bất kì lập với mặt Sakitan góc nghiêng  $\alpha$ , thì trụ số  $D'_\alpha$  được xác định theo:

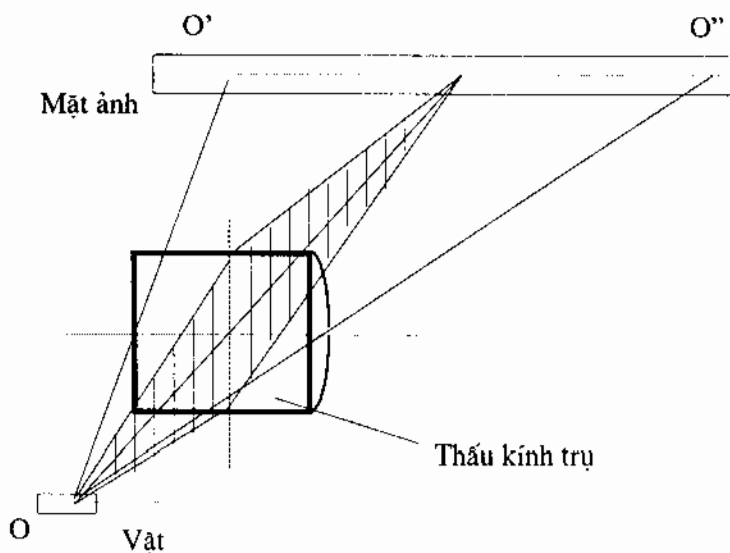
$$D'_\alpha = D' \cdot \sin\alpha \quad (2.77)$$



**Hình 2.24.** Thấu kính trụ:  
M - mặt merion; S - mặt sakitan.

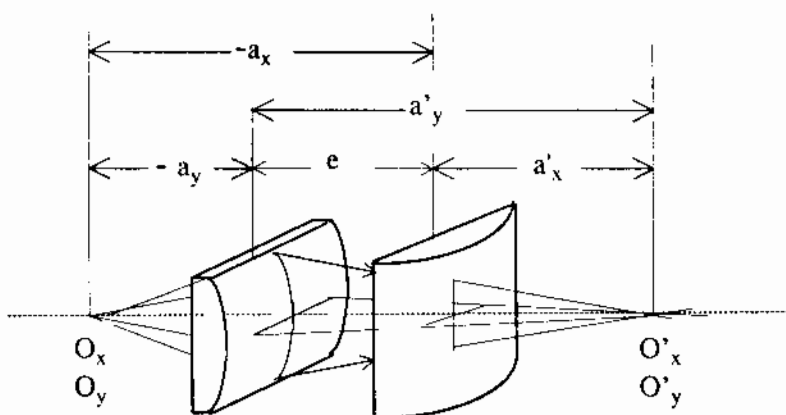
Do trụ số của thấu kính thay đổi nên khi tạo ảnh thì tỉ lệ tạo ảnh không giống nhau (Tỷ lệ tạo ảnh  $\beta'_\alpha$  thay đổi theo mặt nghiêng khác nhau) nên hình ảnh không đồng dạng với vật. Hình ảnh dài ra hoặc bé lên so với vật. Giả sử vật điểm O tạo ảnh thành đoạn thẳng O'O'' (hình 2.25).

Như vậy khi cần có hình ảnh theo hai chiều x và y với tỉ lệ tạo ảnh khác nhau  $\beta'_x \neq \beta'_y$  cần ghép hai thấu kính trụ tiêu cự  $f_1$  và  $f_2$  có các mặt ( $M_1$ ) và mặt ( $M_2$ ) lệch nhau góc  $90^\circ$  (hình 2.26) Hai thấu kính cách nhau khoảng cách e. Vật O được thấu kính thứ nhất tạo ảnh O'y (bởi các tia ở mặt  $M_1$  tạo thành). Vật O lại được thấu kính thứ hai tạo ảnh O'x (bởi các tia ở mặt  $M_2$  tạo thành).



**Hình 2.25.** Tạo ảnh qua thấu kính trụ.

Để các ảnh  $O'_x$  và  $O'_y$  trùng nhau thì khoảng cách từ vật  $O$  đến thấu kính thứ nhất  $a_1$  được tính theo:



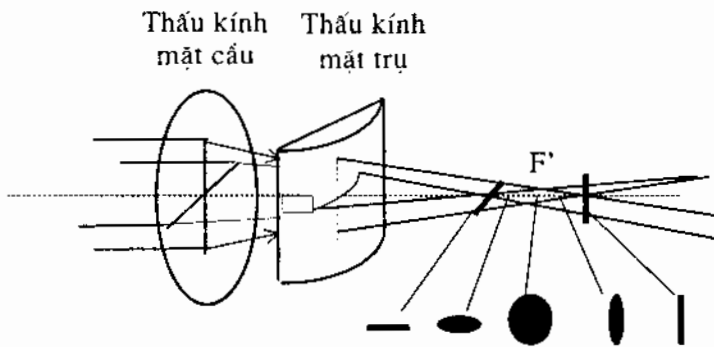
**Hình 2.26.** Tạo ảnh qua hệ hai thấu kính trụ.

$$\frac{1}{a_1} = \frac{1}{e} - \frac{1}{2f'_1} \pm \sqrt{1 + \frac{4f'_2 f'_1}{e^2}} \quad (2.78)$$

Thấu kính trụ được sử dụng rộng rãi ở nhiều lĩnh vực khác nhau:

Phim ảnh màn ảnh rộng: Máy quay nhờ ống kính có thấu kính trụ tạo lên phim những hình ảnh có tỉ lệ tạo ảnh sao cho  $|\beta'_x| < |\beta'_y|$ . Hình ảnh ở phim gầy đi so với vật thực tế. Khi chiếu phim phải có ống kính thấu kính trụ tương thích. Tỉ lệ tạo ảnh từ phim lên màn ảnh  $|\beta'_x| > |\beta'_y|$ . Hình ảnh trên màn béo hơn so với phim và tương thích với vật thực tế.

Các hệ chiếu sáng trong kỹ thuật và đời sống hàng ngày cũng sử dụng các thấu kính trụ một cách rộng rãi. Các nguồn sáng có tiết diện hình vuông qua thấu kính trụ thành nguồn thứ cấp hình chữ nhật ( $y \gg x$  - giống vệt sáng) của các bộ đọc tiếng, các bộ tách âm, chỉnh âm, các hệ đọc số của dụng cụ đo quang học... Hình 2.27 là hệ quang loạn thị gồm một thấu kính mặt cầu và một thấu kính mặt trụ. Chùm sáng từ vật điểm trên trục quang được hệ loạn thị tạo trên tiêu diện thứ hai  $F'$  hình tròn sáng đều. Khi lấy ảnh bởi các vị trí khác nhau khác với  $F'$ , ta luôn được các hình elip hoặc đứng hoặc nằm ngang. Hệ loạn thị được sử dụng trong bộ đầu đọc của đĩa CD để chỉnh vị trí đầu đọc so với đĩa.



Hình 2.27. Hệ quang loạn thị.

### 2.7.2. Thấu kính mặt xuyên

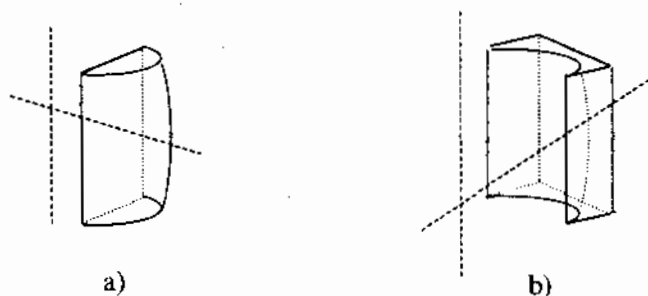
Thấu kính mặt xuyên có một mặt chiết quang là mặt xuyên. Khi mặt xuyên lồi thì tụ số thấu kính dương ( $D' > 0$ ), ta gọi nó là thấu kính mặt xuyên hội tụ. Hình 2.28a là thấu kính có một mặt xuyên lồi và một mặt phẳng.

Khi mặt xuyên lõm thì tụ số thấu kính âm ( $D' < 0$ ), ta gọi nó là thấu kính mặt xuyên phân kỳ. Hình 2.28b là thấu kính có một mặt xuyên lõm và một mặt phẳng.

Tỷ số thấu kính mặt xuyên thay đổi tùy theo mật chứa chùm sáng tới. Mặt tới vuông góc với trục mặt xuyên (mặt M) có tỷ số lớn nhất ( $D'_{\max}$ ):

$$D'_{\max} = \frac{n-1}{r_1} \quad (2.79)$$

$r_1$  là bán kính hình trụ.



**Hình 2.28.** a- Thấu kính mặt xuyên lõm; b- thấu kính mặt xuyên lồi.

Mặt tới chứa trục mặt xuyên và đường sinh mặt xuyên (mặt S) có tỷ số nhỏ nhất ( $D'_{\min}$ ):

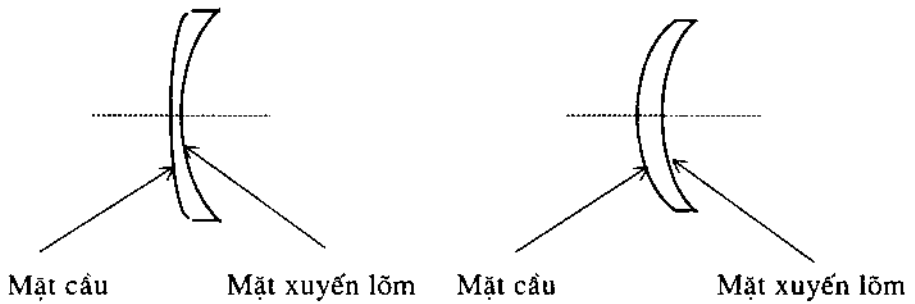
$$D'_{\min} = \frac{n-1}{r_2} \quad (2.80)$$

trong đó  $r_2$  là bán kính mặt xuyên.

Tỷ số của các mặt tới nghiêng với mặt S các góc  $\alpha$  khác nhau là  $D'_\alpha$  tính theo:

$$\begin{aligned} D'_\alpha &= (1 - \sin \alpha)D'_{\min} + D'_{\max} \sin \alpha \\ &= D'_{\min} - (D'_{\max} - D'_{\min}) \sin \alpha \end{aligned} \quad (2.81)$$

Mặt thứ hai của thấu kính mặt xuyên thường là mặt phẳng và được sử dụng trong kỹ thuật như các thấu kính trụ. Khi mặt thứ hai là mặt cầu thì chúng được sử dụng rộng rãi trong kỹ thuật kính đeo mắt. Kính loại này được gọi là kính thuốc chữa loạn thị. Kính loạn thị có một mặt cầu lõm (bán kính R) nằm trước và một mặt xuyên lồi nằm sau. Khi  $R > r_1$  thì kính thuốc là kính cận loạn (hình 2.29a). Khi  $R < r_1$  thì kính thuốc loại này là kính viễn loạn (hình 2.29b).

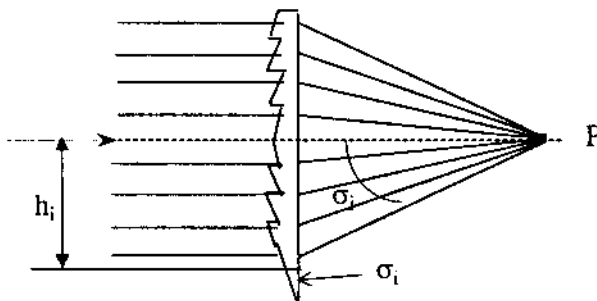


**Hình 2.29a.** Kính cận loạn.

**Hình 2.29b.** Kính viễn loạn.

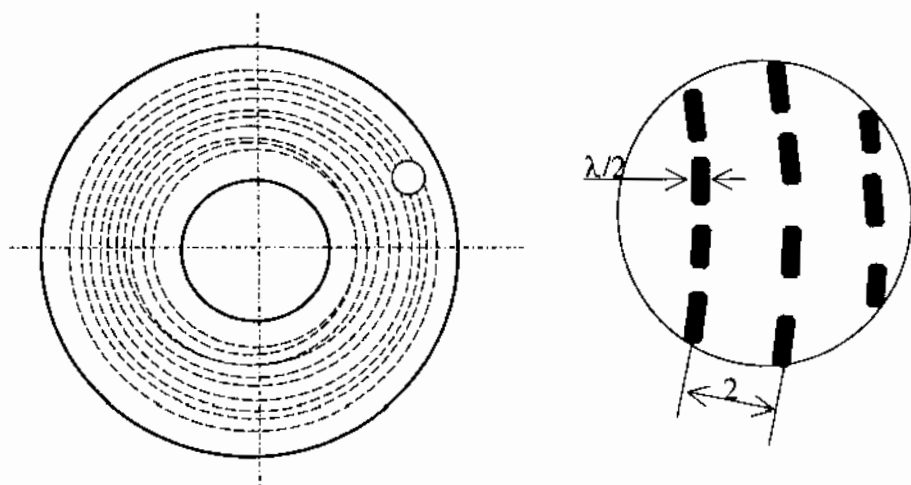
### 2.7.3. Thấu kính Fresnel

Thấu kính Fresnel được tạo thành theo phương pháp đúc ép. Vật liệu chủ yếu là thủy tinh hữu cơ. Mặt thứ nhất thường là mặt phẳng. Mặt thứ hai là nhiều mặt côn ghép lại (hình 2.30). Trên mặt Merion, chúng được biểu diễn bằng các đoạn nghiêng với mặt thấu kính những góc khác nhau, giảm dần từ ngoài vào trong ở Fresnel hội tụ, và tăng dần từ ngoài vào trong ở Fresnel phân kỳ. Như vậy mỗi miền thấu kính với chiều cao  $h_i$  có một góc  $\sigma_i$  thích ứng và bằng góc mở vật của chùm tia với chiều cao  $h_i$  đó. Nhờ cách cấu tạo này, thấu kính Fresnel có cấu sai rất nhỏ và trọng lượng của nó cũng giảm đi rất nhiều so với thấu kính cùng tính chất. Thấu kính Fresnel được sử dụng rộng rãi nhất ở các hệ chiếu sáng kỹ thuật nơi mà cần tập trung chùm sáng theo cùng một hướng nhất định.



**Hình 2.30.** Thấu kính Fresnel hội tụ.

## 2.7.4. Hệ quang đầu đọc đĩa CD



Hình 2.31. Cấu tạo đĩa CD.

### a. Cấu tạo đĩa CD

Đĩa CD ghi các đường tín hiệu âm thanh, hình ảnh, các ký tự, các mã số v.v... theo các đường đồng tâm hoặc xoắn acximet (hình 2.31). Đường kính đĩa 120 mm. Khoảng cách các đường tín hiệu  $2\lambda$  (bước sóng ánh sáng sử dụng cho đầu đọc CD là laser  $\lambda = 780 \text{ nm}$ ). Ký hiệu số nhị phân được ghi trên đường tín hiệu theo các hố (pits) và các phần phẳng (lands). Bề rộng của các hố bằng  $\lambda/2 = 400 \text{ nm}$ . Chiều sâu hố là  $\lambda/4 = 200 \text{ nm}$ . Chiều dài các hố và phần phẳng định bởi số ký tự "0" (cho hố) và số ký tự "1" cho phần phẳng. Mỗi đĩa ghi được khoảng 2,5 tỉ ký tự. Bề mặt đĩa được mạ lớp phản xạ nhôm để các phần phẳng ghi ký tự "1" phản xạ tốt chùm laser. Đĩa quay với tốc độ sao cho thời gian đọc một ký tự là  $0,223 \mu\text{s}$ .

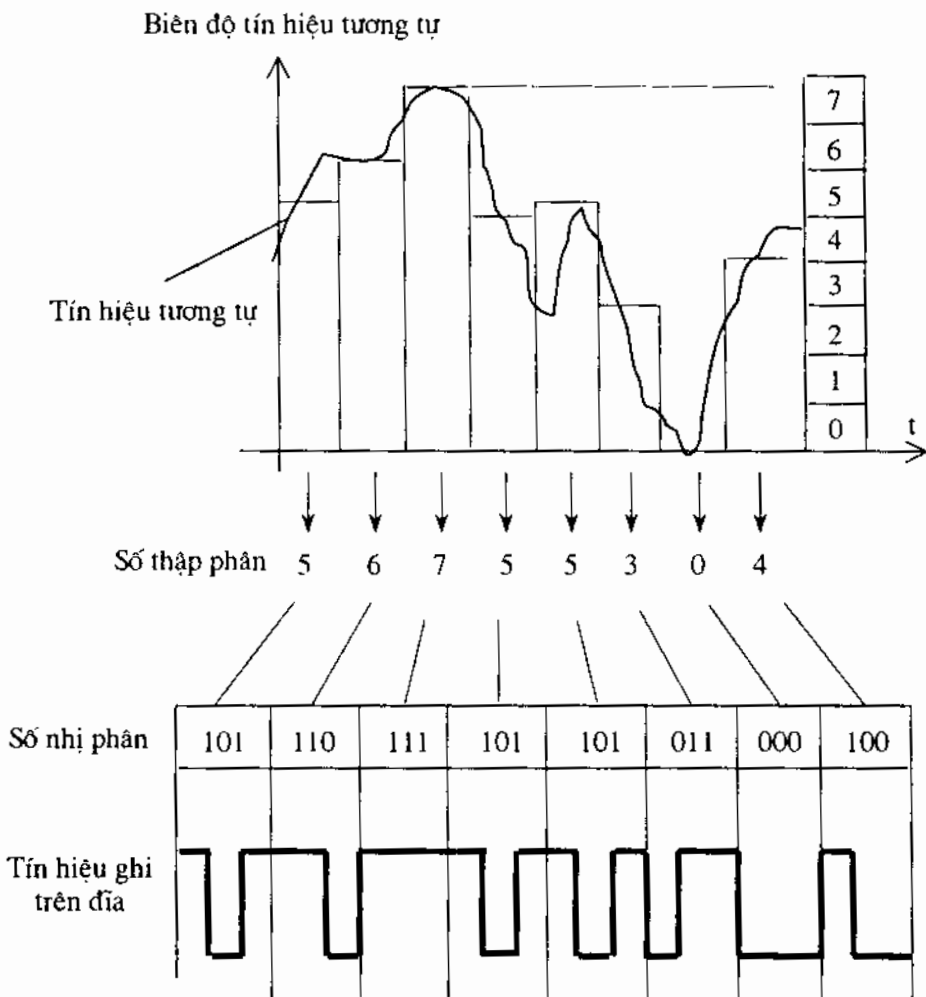
### b. Chuyển tín hiệu tương tự thành tín hiệu số

Quan hệ giữa số thập phân và số nhị phân

Số thập phân	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Số nhị phân	000	001	010	011	100	101	110	111	1000	1001

Hình 2.32 mô tả tín hiệu tương tự của một đoạn âm. Trục tung mô tả biên độ tín hiệu. Trục hoành là thời gian phát tín hiệu. Độ lớn biên độ của tín hiệu tương tự được định mức bởi các số thập phân. Các số này được chuyển thành số nhị phân. Từ đó chuyển thành tín hiệu số và ghi trên đĩa CD theo đường tín hiệu của các "pits" và các "lands".

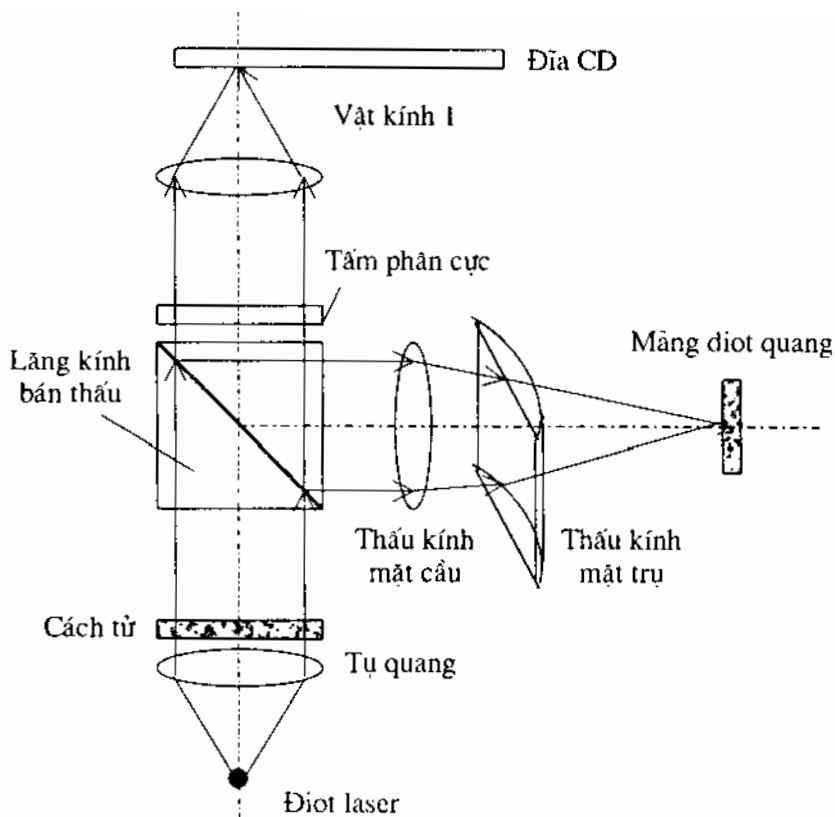




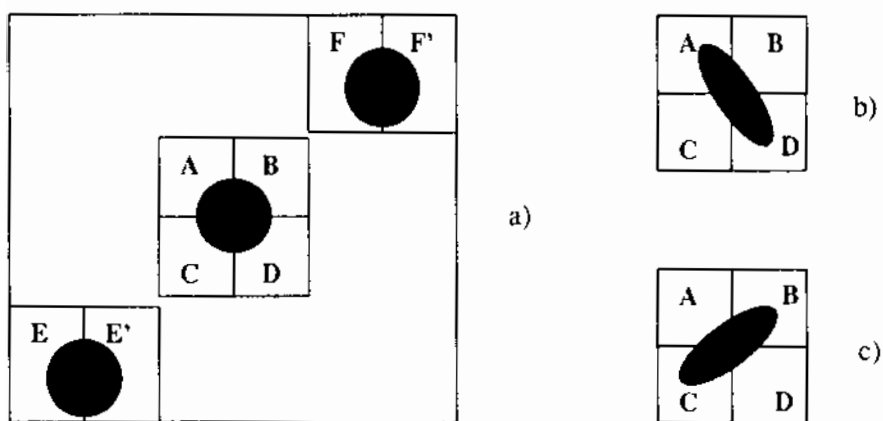
**Hình 2.32.** Nguyên tắc chuyển tín hiệu tương tự thành tín hiệu số.

**c. Hệ quang đầu đọc đĩa CD (hình 2.33)**

- Chùm laser song song ( $\lambda = 780 \text{ nm}$ ) sau khi qua tụ quang và tấm nhiễu xạ đi vào lăng kính có mặt bán thấu, qua tấm phân cực và được vật kính (1) hội tụ lên mặt đĩa. Chùm sáng phản xạ trên mặt đĩa trở lại. Vật kính (1) đưa chùm sáng song song qua tấm phân cực phản xạ tại lớp bán thấu đi vào tổ hợp thấu kính mặt cầu và thấu kính mặt trụ (hệ quang loạn thị - hình 2.27). Màng diot quang nằm trên tiêu diện chung của tổ hợp thấu kính, nơi mà các màng A, B, C và D cùng nhận được 1/4 ánh sáng là hình tròn chung đều đặn (hình 2.34a).



**Hình 2.33.** Sơ đồ quang đầu đọc đĩa CD.



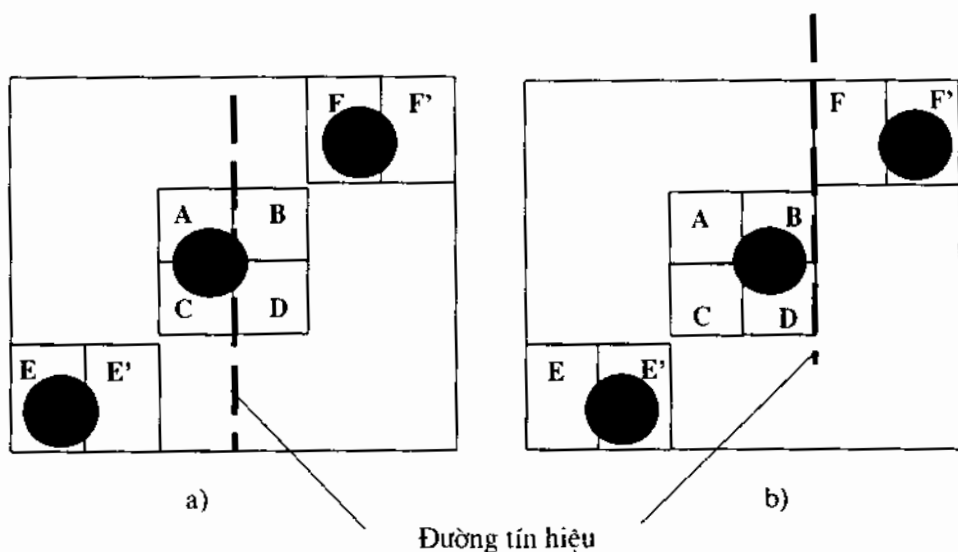
**Hình 2.34.** Mảng điốt quang điều khiển vị trí đầu đọc trên đĩa CD.

Mảng diot quang có một số chức năng:

- Chuyển các tín hiệu quang thành tín hiệu điện.

- Điều khiển đầu đọc giữ đúng khoảng cách với mặt đĩa CD. Khi chênh lệch dòng do mảng  $A + C$  tạo nên lớn hơn dòng do mảng  $B + D$  (hình 2.34b) thì đầu đọc quá gần với đĩa. Đầu đọc được điều khiển lui ra xa khỏi đĩa để trở về đúng vị trí (2.34a). Ngược lại, khi chênh lệch dòng do mảng  $A + C$  tạo nên nhỏ hơn dòng do mảng  $B + D$  (hình 2.34c) thì đầu đọc quá xa với đĩa. Đầu đọc được điều khiển tiến lại gần đĩa để trở về đúng vị trí.

- Điều khiển đầu đọc bám theo đường tín hiệu. Khi chênh lệch dòng do mảng  $F + E$  tạo nên lớn hơn dòng do mảng  $F' + E'$  (hình 2.35a) thì đầu đọc lệch sang trái đường tín hiệu. Đầu đọc lập tức được điều khiển về đúng vị trí (hình 2.34a). Ngược lại, khi chênh lệch dòng do mảng  $F + E$  tạo nên nhỏ hơn dòng do mảng  $F' + E'$  (hình 2.35b) thì đầu đọc lệch sang phải đường tín hiệu. Đầu đọc lập tức được điều khiển về đúng vị trí (hình 2.34a).



**Hình 2.35.** Điều khiển đầu đọc bám theo đường tín hiệu trên đĩa.

## Chương III

# GUƠNG PHẪNG VÀ HỆ GUƠNG PHẪNG

### 3.1. GUƠNG PHẪNG

Giương phẳng là chi tiết quang gồm hai phần chính: đế giương và lớp phản xạ.

#### 3.1.1. Đế giương

Đế giương là bản song song bằng thuỷ tinh quang học và được gia công với yêu cầu về độ sóng và độ nhám bề mặt cao.

Khi lớp phản xạ ở mặt trên của đế, thì được gọi giương phản xạ mặt trên. Các tia sáng tới lớp phản xạ bị phản xạ trực tiếp ngay mà không vào đế giương. Giương phản xạ mặt trước có hệ số phản xạ cao hơn giương phản xạ mặt sau. Dù lớp phản xạ khó được bảo vệ để bị suy giảm tuổi thọ, song các dụng cụ quang chính xác thường dùng các giương phản xạ mặt trên.

Khi lớp phản xạ ở mặt dưới của đế, ta gọi giương phản xạ mặt sau. Các tia sáng tới đế vào đế, phản xạ ở lớp phản xạ trở lại đế một lần nữa rồi mới ra môi trường cũ. Các lớp phản xạ dễ được bảo vệ, hệ số phản xạ ổn định hơn theo thời gian sử dụng. Tuy vậy chất lượng của đế giương ảnh hưởng trực tiếp tới chất lượng chùm sáng phản xạ. Do đó giương phản xạ mặt dưới được dùng trong các dụng cụ quang học thông dụng với chất lượng tạo ảnh trung bình.

#### 3.1.2. Lớp phản xạ

Lớp phản xạ được chế tạo theo các phương pháp khác nhau: mạ hoá, mạ theo dòng hơi bề mặt, mạ theo phương pháp vật lý.

Tuỳ thuộc vào tính chất của giương mà vật liệu màng cũng khác nhau.

• Vật liệu màng là kim loại: nhôm, đồng, bạc, vàng, crôm, thuỷ ngân... có hệ số phản xạ cao trong miền ánh sáng trắng. Bảng 3.1 liệt kê một số kim loại chính làm lớp phản xạ được sử dụng trong miền bước sóng ánh sáng từ 300 nm đến 1000 nm.

- Vật liệu là oxyt các loại:  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;  $\text{TiO}$ ;  $\text{SiO}$ ...
- Vật liệu là muối các loại:  $\text{ZnS}$ ,  $\text{MgF}_2$ ...

Tùy thuộc vào tính chất và phạm vi sử dụng, gương được chia thành: gương phản xạ toàn phần, gương bán thấu, gương cân nhiệt (gương lạnh), gương giao thoa, gương laser...

**Bảng 3.1.** Hệ số phản xạ của các lớp kim loại chế tạo bằng phương pháp tạo màng trong chân không

$\lambda$ [nm]	Nhôm	Bạc	Vàng	Đồng	Platin
300	0,923	0,176	0,377	0,336	0,576
400	0,924	0,956	0,387	0,475	0,663
500	0,918	0,979	0,477	0,600	0,714
600	0,911	0,986	0,919	0,933	0,752
700	0,897	0,989	0,970	0,975	0,772
800	0,867	0,992	0,980	0,981	0,785
900	0,891	0,993	0,984	0,984	0,805
1000	0,940	0,994	0,986	0,985	0,807
5000	0,984	0,995	0,994	0,964	0,949
10000	0,987	0,995	0,994	0,980	0,962

### 3.1.3. Tính chất và ứng dụng gương phẳng

Gương phẳng được sử dụng:

- Làm lệch chùm sáng;
- Xoay chiều ảnh và đảo hệ tọa độ ảnh so với tọa độ vật;
- Phân chia chùm sáng;
- Tăng tỷ số truyền trong các dụng cụ đo...

Có thể nói gương phẳng cũng là chi tiết quang rất quan trọng trong kết cấu các hệ quang, 85% hệ quang có gương phẳng.

Gương phẳng có một số tính chất:

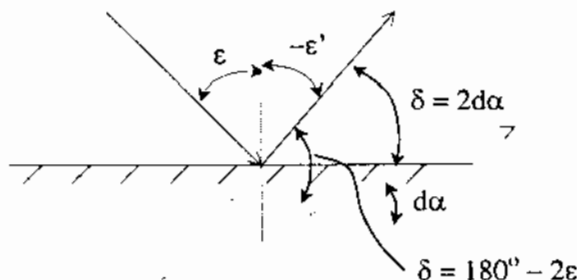
- Gương phẳng tạo vật thực thành ảnh ảo hoặc vật ảo thành ảnh thực. Ảnh và vật đối xứng qua gương. Tỷ lệ tạo ảnh  $\beta' = +1$ .
- Ảnh bị đảo một chiều (hoặc x hoặc y) so với vật. Hệ tọa độ ảnh khác loại so với hệ tọa độ vật.

• Gương phẳng làm lệch chùm sáng góc lệch  $\delta$ . Góc lệch  $\delta$  (hình 3.1) được xác định theo:

$$\delta = 180^\circ - 2\varepsilon \quad (3.1)$$

• Gương phẳng dao động góc  $d\alpha$  thì tia phản xạ thay đổi một góc  $\Delta\delta = 2d\alpha$  (hình 3.1). Tỷ số truyền của các dụng cụ đo có gương được tính theo:

$$i = \Delta\delta / d\alpha = 2 d\alpha / d\alpha = 2$$



Hình 3.1. Góc lệch  $\delta$  do gương phẳng tạo nên.

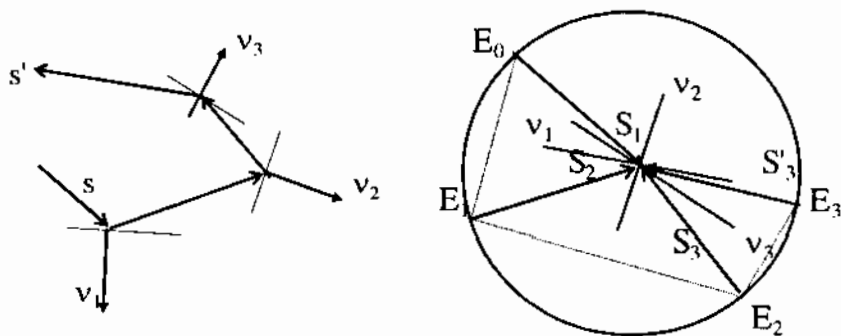
### 3.2. HỆ GƯƠNG PHẪNG

Hệ gương phẳng gồm từ hai hay nhiều gương phẳng trở lên. Chúng được ghép theo hệ đơn giản (mặt tới của mỗi gương nằm trong cùng một mặt phẳng) hoặc hệ phức tạp (các mặt phẳng tới của mỗi gương không cùng mặt phẳng chung). Hệ gương phẳng được sử dụng:

- Thay đổi hướng đi các tia sáng;
- Đảo hệ toạ độ, xoay chiều của ảnh so với vật;
- Hạn chế không gian của dụng cụ quang học... mà một gương không thực hiện nổi.

Để xác định tia ló  $s'$  sau hệ gương khi biết tia tới  $s$  và vị trí các gương của hệ (pháp tuyến của các gương là  $p_1, p_2, \dots, p_k$ ), trước tiên ta chuyển song song các gương về có cùng pháp cắt tuyến chung. Cắt tuyến này vuông góc với mặt tới ở điểm  $O$ . Từ  $O$  làm tâm dựng đường tròn bán kính bất kì cắt tia tới đã tịnh tiến lại tại điểm  $E_0$ . Lấy đối xứng qua các mặt gương  $p_1, p_2, \dots, p_k$  sẽ được các

điểm  $E_1, E_2, \dots, E_k$ . Chiều  $E_1O, E_2O, \dots, E_kO$  là chiều tia phản xạ sau mỗi gương.  $E_0O$  là chiều tia tới  $s$  và  $E_kO$  là chiều tia ló  $s'$  sau hệ. Tịnh tiến các tia  $E_1O, E_2O, \dots, E_kO$  trở về hệ gương ta được hình ảnh toàn cảnh các tia phản xạ và tia tới trong hệ (hình 3.2).



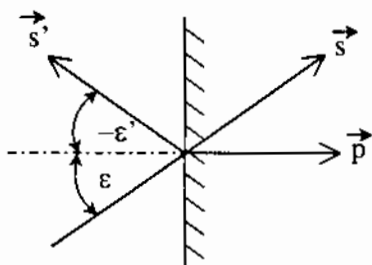
**Hình 3.2.** Xác định tia ló sau hệ ba gương phẳng phân xạ.

Bằng các phép toán vectơ cũng tìm được tia  $s'$  sau hệ. Lúc này định luật phản xạ ánh sáng được viết theo phương trình vectơ (hình 3.3):

$$\vec{s} \times \vec{p} = [\vec{s}' \times \vec{p}] \quad (3.2)$$

Từ tích vô hướng (3.2) suy ra tia phản xạ  $s'$ :

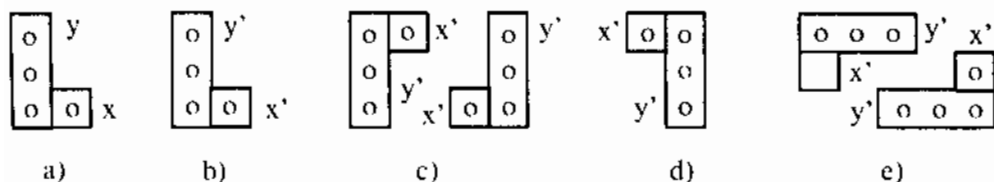
$$\vec{s}' = \vec{s} - 2(\vec{s} \cdot \vec{p})\vec{p} \quad (3.2a)$$



**Hình 3.3.** Mô tả định luật phản xạ ánh sáng bằng phương trình.

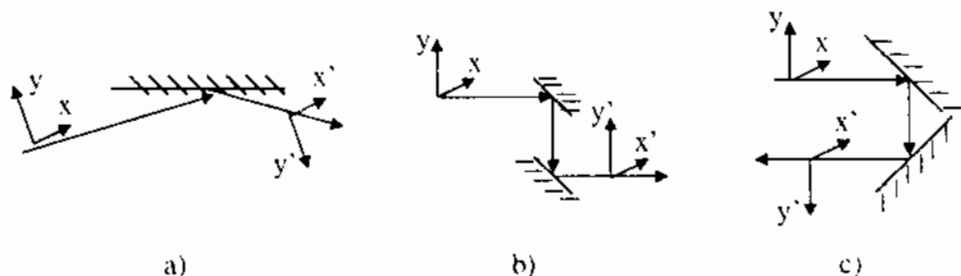
### 3.3. XOAY ẢNH VÀ ĐẢO HỆ TOẠ ĐỘ CỦA HỆ GƯƠNG PHẪNG

Để hiểu việc xoay các chiều của ảnh so với các chiều của vật ta hãy quan sát hình 3.4. Vật có dạng L và hai chiều  $x, y$  (hình 3.4a). Ảnh cùng chiều cả chiều  $x'$  và  $y'$  (hình 3.4b), đổi cả hai chiều  $x', y'$  (hình 3.4d), đổi một trong hai chiều (hình 3.4c) hoặc quay đi một góc  $90^\circ$  (hình 3.4e) so với vật.



**Hình 3.4.** Xoay các chiều của ảnh (từ b đến e) so với chiều của vật a.

Hình 3.5 thể hiện việc xoay ảnh so với vật qua một gương và hệ gương. Ở hình 3.5a ảnh đảo một chiều (xoay chiều  $y'$  đi  $180^\circ$ ). Trong hình 3.5b cả  $x'$  và  $y'$  vẫn giữ nguyên như các chiều  $x$  và  $y$  của vật. Hệ hai gương của hình 3.5c đã làm xoay chiều  $y'$  của ảnh đi  $180^\circ$ . Như vậy tùy thuộc vào số lượng của gương trong hệ và vị trí giữa chúng mà các chiều của ảnh đã xoay đi như thế nào so với chiều của vật. Việc xoay ảnh cũng tuân theo những quy tắc nhất định.



**Hình 3.5.** Xoay các chiều  $x'$  và  $y'$  so với các chiều  $x$  và  $y$  của vật.

Giả sử vật được mô tả theo hệ tọa độ ba chiều  $x; y; z$

$$e = \begin{pmatrix} e_x \\ e_y \\ e_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3.3a)$$

và ảnh cũng được mô tả theo hệ tọa độ ba chiều  $x'; y'; z'$ . Có vectơ đơn vị  $e'$ :

$$e' = \begin{pmatrix} e'_x \\ e'_y \\ e'_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\delta & -\sin\delta \\ 0 & \sin\delta & \cos\delta \end{pmatrix} \quad (3.3b)$$

$\delta$  là góc lệch giữa tia ló  $s'$  so với tia tới  $s$ .

$$\delta = 2 \sum_{i=1}^{i=k} (-1)^{i-1} \alpha_i \quad (3.4)$$



Trong đó  $k$  là số gương hay số lần phản xạ,  $\alpha_i$  là góc lập giữa chiều truyền của tia sáng và gương phẳng.

Căn cứ vào định thức của vectơ đơn vị ảnh và vật để xét hệ tọa độ ảnh cùng loại hay khác loại với hệ tọa độ vật.

Định thức tọa độ vật:

$$\Delta e = \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 1$$

Định thức hệ tọa độ ảnh:

$$\Delta^k e' = (-1)^k \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\delta & -\sin\delta \\ 0 & \sin\delta & \cos\delta \end{vmatrix} = (-1)^k \quad (3.5)$$

Khi  $\Delta^k e' = 1$  hệ tọa độ ảnh cùng loại với hệ tọa độ vật.

Khi  $\Delta^k e' = -1$  hệ tọa độ ảnh khác loại với hệ tọa độ vật.

Căn cứ vào tích vô hướng các vectơ đơn vị xác định được các chiều của ảnh đã xoay đi so với chiều của vật:

$$\begin{aligned} e_x \cdot e'_x &= 1 \\ e_y \cdot e'_y &= \cos\delta \\ e_z \cdot e'_z &= \cos\delta \end{aligned}$$

Chiều  $y'$  đã xoay đi một góc so với chiều  $y$  của vật là  $\delta$ .

Tia ló (theo chiều  $z'$ ) lệch so với tia tới (chiều  $z$ ) cũng một góc là  $\delta$ .

Một số trường hợp đặc biệt xảy ra của hệ gương và lăng kính phản xạ:

$e_z \cdot e'_z = 1$ ; ( $\delta = 0$ ). Tia ló giữ nguyên chiều và hướng so với tia tới.

Hai tia có thể lệch song song hoặc không lệch song (hình 3.4b).

$e_z \cdot e'_z = -1$ ; ( $\delta = 180^\circ$ ). Tia ló giữ nguyên hướng song ngược chiều so với tia tới. Hai tia có thể lệch song song hoặc không lệch song (hình 3.4c).

$e_z \cdot e'_z = 0$ ; ( $\delta = 90^\circ$ ). Tia ló vuông góc với tia tới.

Các chiều của ảnh:

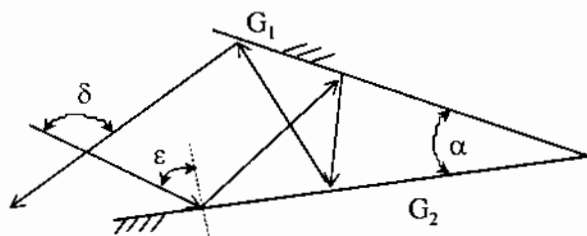
$e_x \cdot e'_x = 1$  và  $e_y \cdot e'_y = 1$ . Cả chiều  $y'$  và  $x'$  giữ nguyên so với vật.

$e_x \cdot e'_x = \pm 1$  và  $e_y \cdot e'_y = \pm 1$ . Chiều  $y'$  hoặc chiều  $x'$  xoay đi  $180^\circ$  so với  $y$  và  $x$  của vật.

$e_x \cdot e'_x = -1$  và  $e_y \cdot e'_y = -1$ . Cả hai chiều đều xoay đi  $180^\circ$  so với vật.

### 3.4. GƯƠNG GÓC

Gương góc (hình 3.6) gồm hai gương phẳng  $G_1$  và  $G_2$  ghép với nhau thành góc gương  $\alpha$ .



**Hình 3.6.** Gương góc - phản xạ nhiều lần trong gương góc.

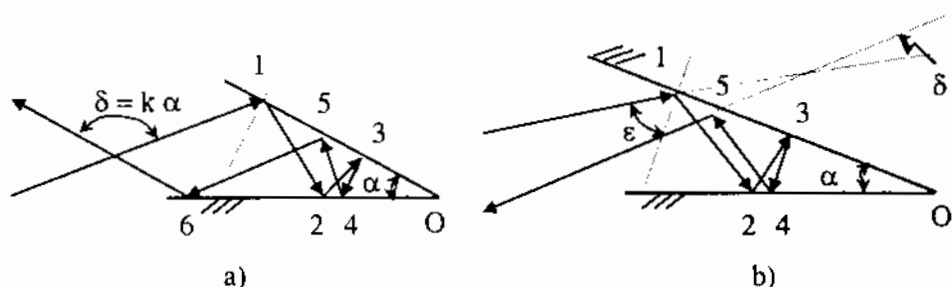
Tia tới lập với mặt gương thứ nhất góc tới  $\epsilon$  sau khi phản xạ  $k$  lần, tia ló ra khỏi gương góc lập với tia tới góc lệch  $\delta$  được xác định theo:

Khi  $k$  là số lần phản xạ chẵn (hình 2.37a):

$$\delta = k \alpha \quad (3.6)$$

và khi  $k$  là số lần phản xạ lẻ (hình 3.7b):

$$\delta = (180^\circ - 2\epsilon) + (k - 1) \alpha \quad (3.7)$$



**Hình 3.7.** Phản xạ nhiều lần trong gương góc  
a- số lần phản xạ chẵn; b- số lần phản xạ lẻ.

Góc lệch  $\delta$  của số lần phản xạ chẵn không phụ thuộc góc tới  $\epsilon$  (quan hệ 3.6) nên khi xoay gương góc những vị trí khác nhau (nhưng độ lớn góc gương và hướng tia tới không thay đổi) thì hướng tia ló cũng không thay đổi. Ngược lại, khi số lần phản xạ lẻ thì tia ló lại thay đổi hướng so với khi chưa quay gương góc do vậy góc lệch  $\delta$  phụ thuộc góc tới  $\epsilon$  (quan hệ 3.7).

Gương phẳng và gương góc được sử dụng nhiều trong các dụng cụ đo lường bởi chúng trực tiếp tăng hệ số khuếch đại. Hệ số khuếch đại  $i$  được định nghĩa theo:

$$i = \frac{\text{Độ dịch chuyển khâu bị động}}{\text{Độ dịch chuyển khâu chủ động}}$$

Khi góc gương  $\alpha$  của gương góc thay đổi một lượng  $\Delta\alpha$  (do tác dụng của đối tượng đo) thì góc lệch  $\delta$  thay đổi một giá trị  $\Delta\delta$  được xác định theo:

Với số lần phản xạ chẵn:

$$\Delta\delta = k\Delta\alpha \quad (3.8)$$

Tỷ số truyền:

$$i = \frac{\Delta\delta}{\Delta\alpha} = \frac{k\Delta\alpha}{\Delta\alpha} = k \quad (3.9)$$

Với số lần phản xạ lẻ:

$$\Delta\delta = (k - 1)\Delta\alpha \quad (3.10)$$

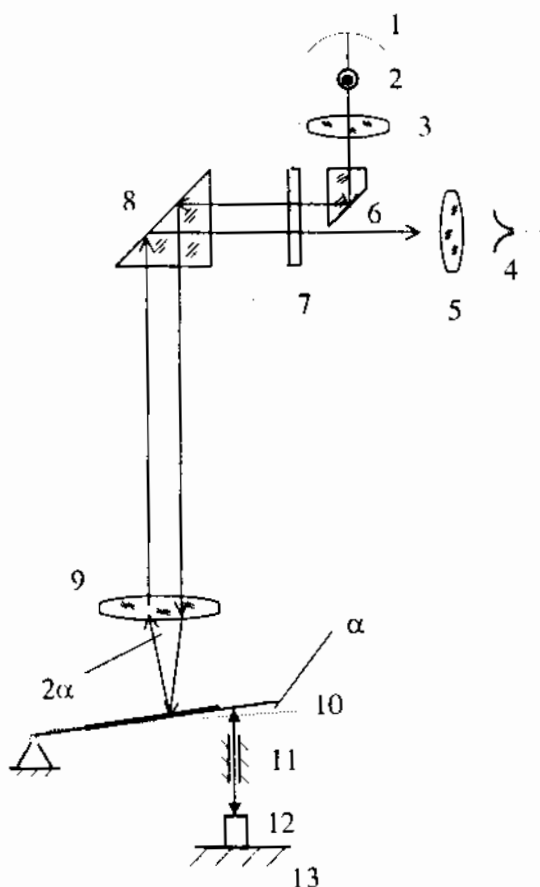
Tỷ số truyền:

$$i = \frac{\Delta\delta}{\Delta\alpha} = \frac{(k - 1)\Delta\alpha}{\Delta\alpha} = k - 1 \quad (3.11)$$

Gương phẳng và gương góc được sử dụng nhiều trong kết cấu các thiết bị và dụng cụ đo quang cơ. Hình 3.8 là sơ đồ quang dụng cụ đo optimet.

**Hình 3.8.** Sơ đồ quang optimet:

- 1- gương cầu;
- 2- nguồn sáng;
- 3- tụ quang;
- 4- mắt quan sát;
- 5- thị kính;
- 6- lăng kính phản xạ;
- 7- thước khắc vạch;
- 8- lăng kính phản xạ;
- 9- vật kính;
- 10- đòn mang gương phẳng;
- 11- dấu đo;
- 12- vật đo;
- 13- bàn đo.



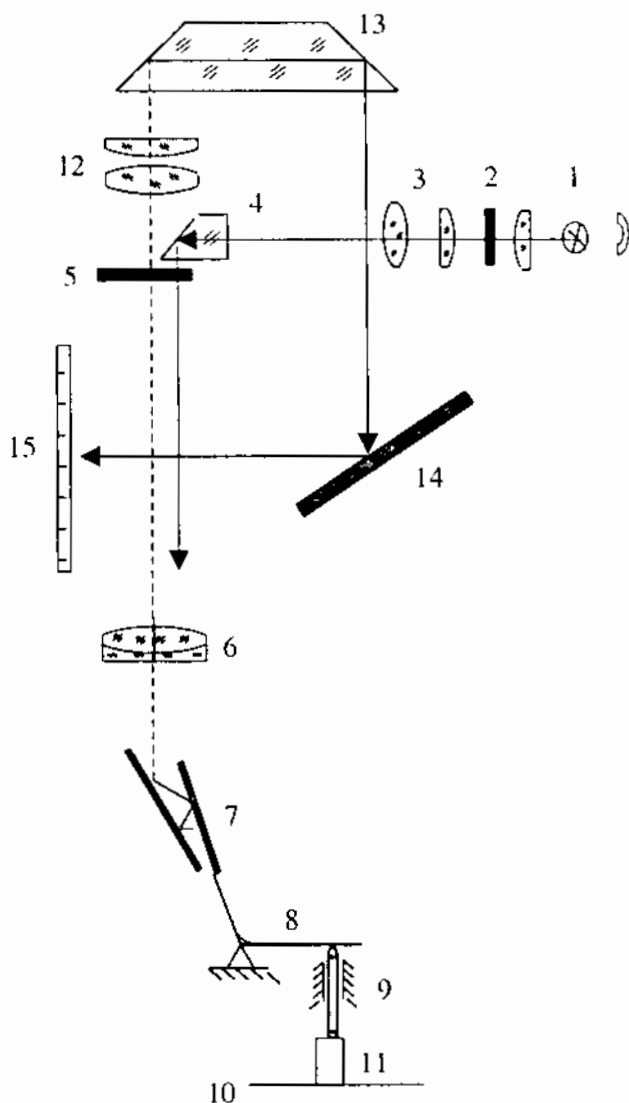
Hệ chiếu sáng (gương cầu (1), nguồn (2), tụ quang (3) và lăng kính phản xạ (6) dội sáng thước (7). Vật kính (9) tạo ảnh thước ra vô cùng và phản xạ trên gương (10) trở về vật kính.

Do tác dụng của chi tiết đo (12) làm đầu đo (11) chuyển vị dẫn đến đòn (10) mang gương phẳng lệch đi góc  $\alpha$  chùm sáng có ảnh thước (7) phản xạ lệch trở lại vật kính (9) góc  $2\alpha$  đem ảnh trở về thước và lệch khỏi vị trí ban đầu lượng  $\Delta z$ . Nhờ thị kính (5), mắt (4) đọc giá trị  $\Delta z$ . Optimet có giá trị mỗi vạch chia của thước là  $1 \mu\text{m}$  và phạm vi đo  $\pm 0,1 \text{ mm}$ .

**Hình 3.9.** Sơ đồ quang

Optimet siêu cấp

- 1- hệ chiếu sáng (gương cầu, nguồn sáng và tụ quang);
- 2- vạch chuẩn;
- 3- vật kính;
- 4- lăng kính phản xạ;
- 5- thước;
- 6- vật kính;
- 7- gương góc;
- 8- đòn gương phẳng;
- 9- đầu đo;
- 10- bàn đo;
- 11- chi tiết đo;
- 12- vật kính;
- 13- lăng kính phản xạ;
- 14- gương phản xạ;
- 15- màn ảnh.



Để có giá trị vạch chia giảm đi năm lần, nghĩa là giá trị vạch chia là  $0,2 \mu\text{m}$  phải sử dụng Optimet siêu cấp. Nhờ gương góc thay thế gương phẳng mà độ khuếch đại đã tăng lên năm lần. Hình 3.9 là sơ đồ quang của Optimet siêu cấp.

Hệ chiếu sáng (1) dội sáng vạch chuẩn (2). Vật kính (3) tạo ảnh vạch chuẩn lên thước (5) sau khi lăng kính (4) làm lệch chùm sáng  $90^\circ$ . Vật kính (6) tạo ảnh vạch chuẩn một lần nữa ra vô cùng lên gương góc.

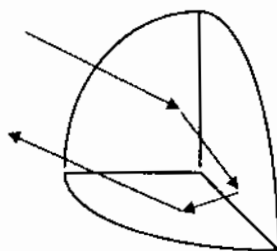
Do tác dụng của chi tiết (11), đầu đo (9) dịch chuyển theo và làm đòn gương phẳng (8) quay góc  $\Delta\alpha$ . Gương góc (7) thay đổi thành  $\alpha \pm \Delta\alpha$ . Chùm sáng phản xạ trong gương góc về vật kính (6) lệch đi một giá trị  $\Delta\delta = (k - 1)\Delta\alpha$ . Ảnh vạch chuẩn được vật kính (6) tạo ảnh một lần nữa lên thước (5) song lệch so với vị trí ban đầu là  $\Delta z$ . Vật kính (12) tạo ảnh thước trong đó có  $\Delta z$  thành  $\Delta z'$  lên màn ảnh (15).  $\Delta z'$  biểu thị chuyển vị do chi tiết đo tạo nên.

Optimet siêu cấp có giá trị mỗi vạch chia của thước là  $0,2 \mu\text{m}$  và phạm vi đo  $\pm 0,025 \text{ mm}$ .

### 3.5. HỆ GƯƠNG PHỨC TẠP

Hệ gương phức tạp gồm các gương phẳng ghép lại với nhau mà các mặt tới mỗi gương không cùng mặt tới chung của cả hệ. Tia tới và tia ló không cùng trên một mặt phẳng. Hướng và chiều tia ló được xác định thông qua các phép toán các vectơ (xem phần hệ gương phẳng).

Hình 3.10 là một hệ gương phức tạp gồm ba gương vuông góc với nhau. Tia ló lệch với tia tới góc lệch  $180^\circ$ . Ở đây, dù hệ có dao động xoay đi một góc nhỏ quanh bất kỳ trục quay nào thì tia ló vẫn không đổi cả về hướng lẫn chiều. Góc lệch vẫn là  $180^\circ$ .



Hình 3.10. Hệ gương phức tạp.

## Chương IV

# LĂNG KÍNH VÀ HỆ LĂNG KÍNH

### 4.1. LĂNG KÍNH PHẢN XẠ

#### 4.1.1. Cấu tạo lăng kính phản xạ

Lăng kính phản xạ là chi tiết quang có các mặt phản xạ toàn phần cố định với nhau. Ngoài các mặt phản xạ còn có các mặt chiết quang và các mặt phụ. Ở các mặt phản xạ, tia phản xạ vừa tuân theo định luật phản xạ vừa tuân theo tính chất phản xạ toàn phần tại điểm tới. Ở các mặt chiết quang, chùm sáng vào lăng kính gọi là mặt tới và chùm sáng từ lăng kính ra ngoài gọi là mặt ló.

Để có điều kiện phản xạ toàn phần thì các tia tới phải có góc tới lớn hơn góc giới hạn:

$$\sin \varepsilon_g = \frac{1}{n} \quad (4.1)$$

Chiết suất thủy tinh quang học  $n = 1,45 \div 2$ , nên góc giới hạn trong khoảng  $\varepsilon_g = 42^\circ \div 30^\circ$ .

Tương tự như bản song song, lăng kính phản xạ cũng biến đổi chùm sáng sau khi qua lăng kính: hướng đi, độ phân kỳ hay độ hội tụ, xoay ảnh và đảo hệ tọa độ. Khi thiết kế và sử dụng lăng kính phản xạ cần quan tâm các chỉ tiêu.

#### *a. Độ dịch ảnh*

Độ dịch ảnh  $\Delta s$  được xác định từ vị trí của ảnh khi hệ chưa có lăng kính và khi có lăng kính.  $\Delta s$  phụ thuộc vào quãng đường hình học  $d$  tia sáng theo chiều trục quang trong lăng kính và chiết suất của lăng kính.

$$\Delta s = d \frac{n-1}{n} \quad (4.2)$$

#### *b. Kích thước nhỏ nhất lăng kính*

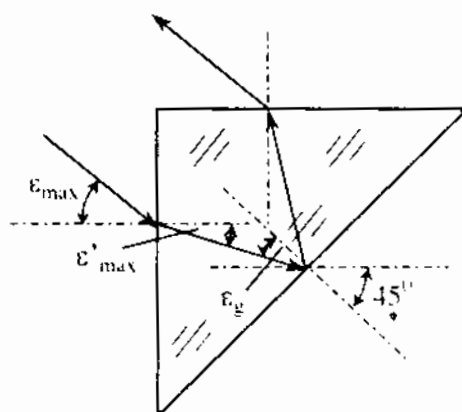
Kích thước nhỏ nhất của lăng kính  $D_{\min}$  quyết định chùm sáng vào hệ quang đều qua lăng kính. Kích thước  $D_{\min}$  phụ thuộc vào độ lớn các vòng chắn sáng vòng chắn trường và vị trí của lăng kính trong hệ. Kích thước  $D_{\min}$  được xác định từ các mối quan hệ hình học thông thường.

### c. Góc nghiêng lớn nhất

Góc nghiêng lớn nhất  $\epsilon_{\max}$  (hình 4.1) của tia sáng vào mặt tới. Các tia khác có góc nghiêng lớn hơn  $\epsilon_{\max}$  vào lăng kính thì có góc tới tại mặt phản xạ nhỏ hơn góc giới hạn  $\epsilon_g$ . Các tia này không được phản xạ trên mặt phản xạ để truyền tiếp vào hệ quang.

$$\sin(\epsilon_{\max}) = n \cdot \sin(\epsilon'_{\max})$$

và 
$$\epsilon'_{\max} + \epsilon_g = 45^\circ$$



Hình 4.1. Góc nghiêng lớn nhất.

Ví dụ:

- Chiết suất thủy tinh K8 có  $n = 1,51630$ . Theo (4.1) góc giới hạn  $\epsilon_g = 40^\circ 12'$  thì góc nghiêng lớn nhất  $\epsilon_{\max} = 7^\circ 15'$ ;
- Chiết suất thủy tinh F4 có  $n = 1,6242$ . Theo (4.1) góc giới hạn  $\epsilon_g = 37^\circ$  thì góc nghiêng lớn nhất  $\epsilon_{\max} = 13^\circ 08'$ .

### d. Đảo hệ và xoay chiều của ảnh so với vật

Lăng kính phản xạ cũng đảo hệ tọa độ, xoay chiều ảnh so với vật tùy thuộc vào vị trí và số lần phản xạ của chùm sáng trong lăng kính. Lăng kính phản xạ để lắp ráp vào hệ quang hơn so với hệ gương có cùng số mặt phản xạ.

Đảo hệ và xoay chiều của ảnh so với vật được ký hiệu cho mỗi lăng kính:

$$\langle k | e_x, e'_x; e_y, e'_y; e_z, e'_z \rangle$$

$k$  là số mặt phản xạ.  $k$  chẵn thì hai hệ tọa độ cùng loại - hệ tọa độ ảnh giống hệ tọa độ vật. Khi  $k$  là lẻ thì hai hệ tọa độ khác loại - hệ tọa độ ảnh đảo đi so với hệ tọa độ vật.

Vị trí giữa các mặt lăng kính (các mặt phản xạ và mặt chiết quang) là cố

định nên khi có sai số về góc giữa chúng với nhau thì không có điều kiện hiệu chỉnh sai số góc lệch giữa tia tới và tia ló.

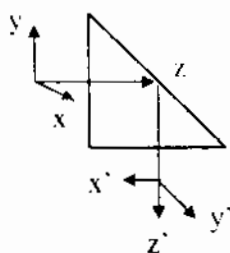
#### 4.1.2. Một số lăng kính thông dụng

- **Lăng kính tam giác vuông cân phản xạ một lần (PV1)**

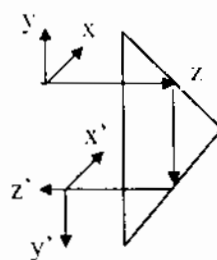
Lăng kính PV1 (hình 4.2) có ký hiệu  $< 1 | 1; 0; 0$ . Toạ độ ảnh đã đảo di so với toạ độ vật (hai hệ toạ độ khác loại). Chiều  $x'$  xoay đi so với chiều  $x$  góc  $\delta = 90^\circ$ . Tia ló dọc trục quang sau lăng kính vuông góc tia tới dọc trục quang trước lăng kính. Quãng đường hình học trong lăng kính  $d = D$  ( $D$  đường kính chùm sáng vào lăng kính).

- **Lăng kính tam giác vuông cân phản xạ hai lần (PV2)**

Lăng kính PV2 (hình 4.3) có ký hiệu  $< 2 | 1; -1; -1$ . Toạ độ ảnh cùng loại với toạ độ vật. Chiều  $y'$  xoay đi so với chiều  $y$  góc  $\delta = 180^\circ$ . Tia ló dọc trục quang sau lăng kính cùng phương ngược chiều và lệch song song tia tới dọc trục quang trước lăng kính. Quãng đường hình học trong lăng kính  $d = 2D$ .



Hình 4.2. Lăng kính tam giác vuông cân phản xạ một lần.



Hình 4.3. Lăng kính tam giác vuông cân phản xạ hai lần.

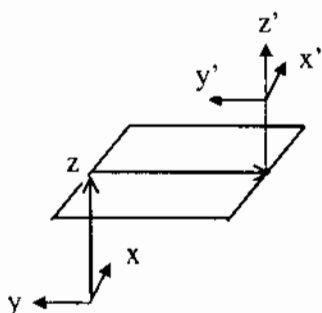
- **Lăng kính hình bình hành (hình 4.4)**

Ký hiệu:  $< 2 | 1; 1; 1$ . Tia ló cùng chiều ( $\delta = 180^\circ$ ) và lệch song song với tia tới một khoảng  $v$ . Số lần phản xạ là hai. Hai hệ toạ độ ảnh và vật cùng loại với nhau. Quãng đường hình học trong lăng kính  $d = v + 2D$ .

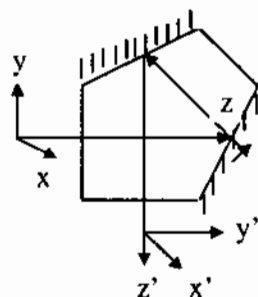
- **Lăng kính ngũ giác hay lăng kính Penta**

Lăng kính Penta (hình 4.5) có ký hiệu  $< 2 | 1; 0; 0$ . Toạ độ ảnh cùng loại với toạ độ vật. Chiều  $y'$  xoay đi so với chiều  $y$  góc  $\delta = 90^\circ$ . Tia ló dọc trục quang sau lăng kính vuông góc tia tới dọc trục quang trước lăng kính. Quãng đường hình học trong lăng kính  $d = 2D + D\sqrt{2}$ .





Hình 4.4. Lăng kính bình hành.



Hình 4.5. Lăng kính Penta.

• Lăng kính hình thang (hình 4.6a).

Ký hiệu:  $\langle 1 \mid 1; -1; 1 \rangle$ .  $z'$  trùng và cùng chiều với  $z$ . Số lần phản xạ là một:  $k = 1$ . Hai hệ toạ độ ảnh và vật khác loại với nhau. Quỹ đường hình học trong lăng kính  $d$  và độ lớn đáy phụ thuộc vào chiết suất lăng kính.

$$d = 2D \frac{\cos \epsilon'}{\cos \epsilon' - \sin \epsilon'} \quad (4.3)$$

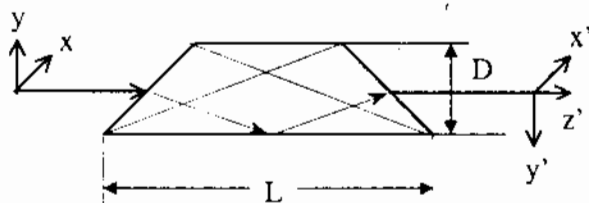
$$L = D \sqrt{2} \frac{1}{\cos \epsilon' - \sin \epsilon'} \quad (4.4)$$

Khi  $n = 1,5$ , góc tới  $\epsilon = 45^\circ$  thì góc khúc xạ tại mặt thứ nhất là  $\epsilon' = 28,1^\circ$ . Từ đó có chiều dài đáy là  $L = 4,29D$  và quỹ đường hình học  $d = 3,44D$ .

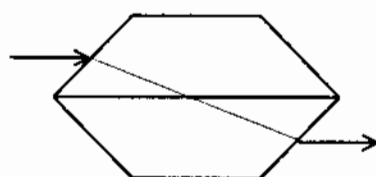
Do  $\epsilon \neq 0$  nên chùm sáng đi trong lăng kính coi như đi qua bản song song (hình 4.6b), bởi vậy độ dịch ảnh do lăng kính tại nên được tính theo:

$$\Delta z = d \left[ 1 - \frac{\cos 45^\circ}{\sqrt{n^2 - \sin^2 45^\circ}} \right] \quad (4.5)$$

Khi  $n = 1,5$  thì  $\Delta z = 0,46 D$  (góc tới  $\epsilon = 45^\circ$ ) so với  $\Delta z = 0,33 D$  (góc tới  $\epsilon = 0$ ).



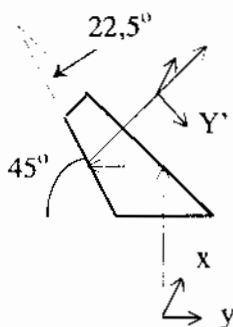
Hình 4.6a. Lăng kính hình thang.



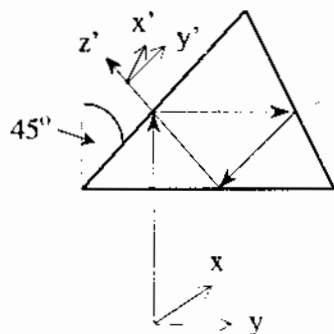
Hình 4.6b. Coi lăng kính như bản song song.

• **Lăng kính Baue** (hình 4.7)

Ký hiệu:  $\langle 2 \mid 1; \cos 45^\circ; \cos 45^\circ \rangle$ . Tia ló lệch với tia tới góc lệch  $\delta = 45^\circ$ . Chiều ảnh  $y'$  xoay đi so với chiều  $y$  của vật góc  $\delta = 45^\circ$ . Số lần phản xạ là hai. Hai hệ toạ độ cùng loại. Quang đường hình học trong lăng kính  $d = 1,71D$ .



Hình 4.7. Lăng kính Baue.



Hình 4.8. Lăng kính Schmid - đơn.

• **Lăng kính Schmid-đơn** (hình 4.8)

Ký hiệu:  $\langle 2 \mid 1; \cos 45^\circ; \cos 45^\circ \rangle$ . Tia ló lệch với tia tới góc lệch  $\delta = 45^\circ$ . Chiều ảnh  $y'$  xoay đi so với chiều  $y$  của vật góc  $\delta = 45^\circ$ . Số lần phản xạ là 2. Hai hệ toạ độ ảnh và vật cùng loại với nhau. Quang đường hình học trong lăng kính  $d = 3,66D$ .

## 4.2. LĂNG KÍNH CÓ MÁI PHẢN XẠ

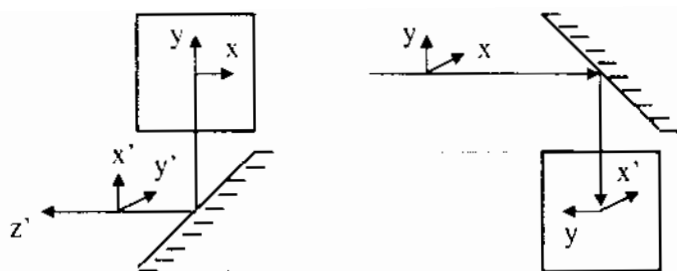
### 4.2.1. Cấu tạo lăng kính có mái phản xạ

Chiều  $x'$  của ảnh ở lăng kính phản xạ ở các hình 4.3 đến hình 4.8 luôn vuông góc và hướng từ trước ra sau mặt giấy, trong khi chỉ có chiều  $y'$  là xoay hoặc đảo so với  $y$  của vật trên mặt biểu diễn. Để đảo cả chiều  $x'$  so với  $x$  thì các lăng kính có thêm mái phản xạ.

Mái phản xạ là thay mặt phản xạ bằng một góc gương  $\alpha = 90^\circ$  và được mô tả như hình 4.9. Hai mặt mái lập với mặt bản vẽ góc  $+ 45^\circ$ . Qua mái phản xạ chiều  $x'$  của ảnh đã xoay đi một góc  $180^\circ$  so với  $x$  của vật. Ở hai mặt mái, các tia tới có góc tới đều lớn hơn góc giới hạn nên đã thoả mãn điều kiện phản xạ toàn phần.

Ký hiệu lăng kính có mái phản xạ:

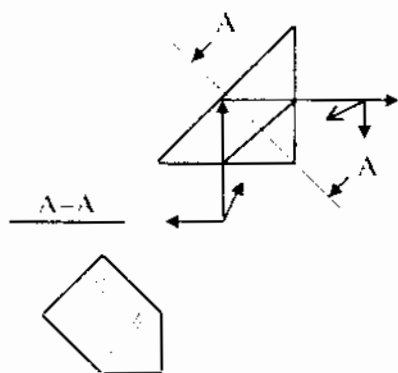
$$\langle \hat{k} \mid e_x.e'_x; e_y.e'_y; e_z.e'_z \rangle$$



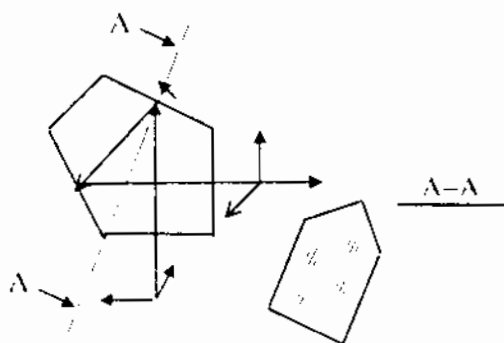
**Hình 4.9.** Mô phỏng tách mặt phản xạ thành mái phản xạ.

#### 4.2.2. Một số lăng kính phản xạ có mái

Nói chung các lăng kính phản xạ thường (không có mái) đều có các lăng kính phản xạ có mái tương đương, nghĩa là một trong những mặt phản xạ của lăng kính đã được thay thế bởi một mái phản xạ.



**Hình 4.10.** Lăng kính PV1 có mái.



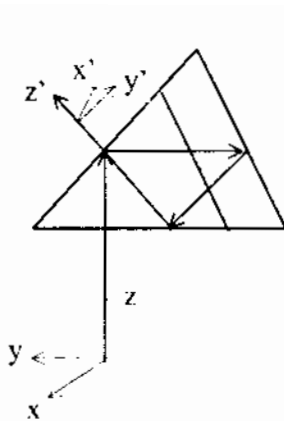
**Hình 4.11.** Lăng kính Penta có mái.

Hình 4.10 là lăng kính tam giác vuông cân phản xạ một lần có mái và được ký hiệu:  $\langle \hat{1} | -1; 0; 0 \rangle$ . Chiều  $x'$  đã xoay đi  $180^\circ$  so với  $x$ .

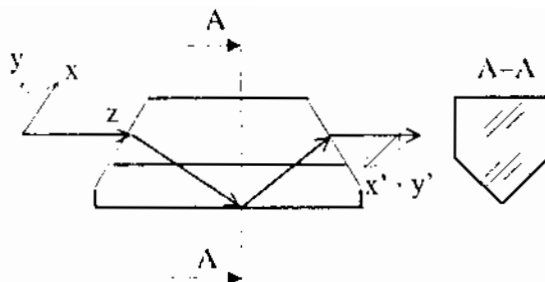
Hình 4.11 lăng kính Penta có mái và được ký hiệu  $\langle \hat{2} | -1; 0; 0 \rangle$ , Chiều  $x'$  đã xoay đi  $180^\circ$  so với  $x$ .

Hình 4.12 là lăng kính Schmid có mái. Chiều  $x'$  đã xoay đi góc  $180^\circ$  so với chiều  $x$ . Lăng kính này có ký hiệu:  $\langle \hat{3} | -1; \cos 45^\circ; \cos 45^\circ \rangle$ .

Hình 4.13 là lăng kính thang có mái và có ký hiệu:  $\langle \hat{1} | -1; -1; 1 \rangle$ . Cả chiều  $y'$  và chiều  $x'$  đều xoay đi  $180^\circ$  so với  $y$  và  $x$ .



**Hình 4.12.** Lăng kính Schmid có mái.



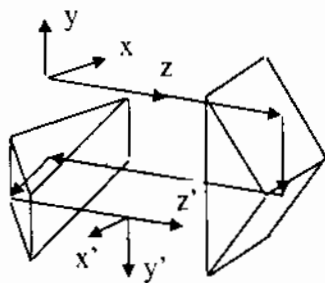
**Hình 4.13.** Lăng kính hình thang có mái.

### 4.3. HỆ LĂNG KÍNH PHẢN XẠ

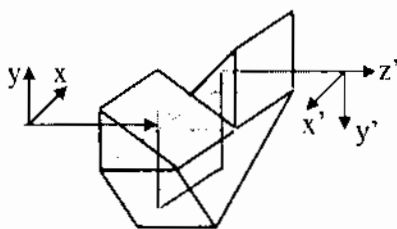
Các lăng kính phản xạ cũng được ghép thành hệ. Hệ lăng kính gồm từ hai lăng kính trở lên. Trong các hệ quang, các lăng kính được ghép một cách rất phong phú và đa dạng thoả mãn nhiều mục đích khác nhau như xoay ảnh, đảo hệ toạ độ, hạn chế kích thước của dụng cụ quang học v.v...

Hệ lăng kính được ký hiệu theo:  $\langle k | e_x, e'_x; e_y, e'_y; e_z, e'_z | \rangle$ .

Hệ Perro I (hình 4.14) ký hiệu  $\langle 4 | -1; -1; 1 | \rangle$  được ghép bởi hai lăng kính PV1. Hệ Perro II (hình 4.15) ký hiệu  $\langle 4 | -1; -1; 1 | \rangle$  được ghép bởi hai lăng kính PV1 và một lăng kính PV2. Hai hệ Perro I và Perro II đã xoay hai chiều  $x', y'$  của ảnh góc  $180^\circ$  so với chiều  $x, y$  của vật. Tia ló lệch song song nhưng vẫn giữ nguyên chiều và hướng so với tia tới. Hai hệ toạ độ vật và ảnh vẫn cùng loại với nhau. Hai hệ lăng kính này được sử dụng đảo ảnh trong các hệ vô tiêu ống nhòm.



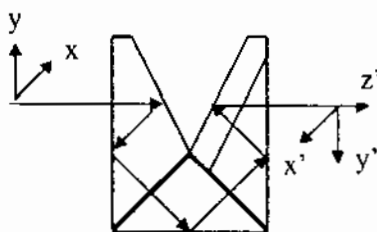
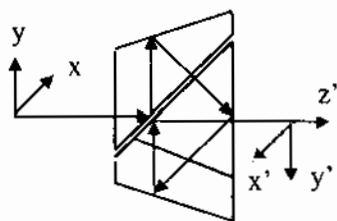
**Hình 4.14.** Hệ Perro I.



**Hình 4.15.** Hệ Perro II.

Hệ lăng kính Schmid (hình 4.16) được ghép bởi một lăng kính Baue và một lăng kính Schmid có mái. Hai hệ toạ độ vật và ảnh cùng loại. Cả hai chiều  $x'$  và  $y'$  đều quay đi so với  $x$  và  $y$  góc  $180^\circ$ , ký hiệu của hệ  $\langle \widehat{5} | -1, -1, 1 | \rangle$ .

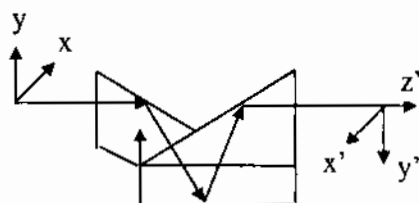
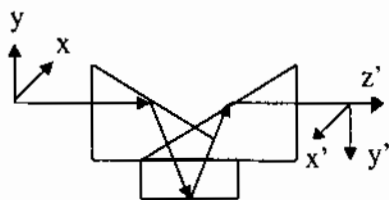
Hệ lăng kính Uppenda (hình 4.17) được ghép bởi một lăng kính PV1, một lăng kính Schmid có mái và một lăng kính Schmid không có mái. Hai hệ toạ độ vật và ảnh cùng loại. Cả hai chiều  $x'$  và  $y'$  đều quay đi so với  $x$  và  $y$  góc  $180^\circ$ , ký hiệu của hệ  $\langle \widehat{5} | -1, -1, 1 | \rangle$ .



**Hình 4.16.** Hệ lăng kính Schmid.

**Hình 4.17.** Hệ lăng kính Uppenda.

Hệ lăng kính Dialit ghép bởi một lăng kính Schmid không có mái và một lăng kính Schmid có mái theo hình 4.18. ký hiệu của hệ  $\langle \widehat{3} | -1, -1, 1 | \rangle$ . Hai hệ toạ độ vật và ảnh cùng loại. Cả hai chiều  $x'$  và  $y'$  đều quay đi so với  $x$  và  $y$  góc  $180^\circ$ . Hệ lăng kính Abbe ghép bởi một lăng kính hình thang không có mái và một lăng kính Schmid có mái theo hình 4.19. ký hiệu của hệ  $\langle \widehat{3} | -1, -1, 1 | \rangle$ . Hai hệ toạ độ vật và ảnh cùng loại. Cả hai chiều  $x'$  và  $y'$  đều quay đi so với  $x$  và  $y$  góc  $180^\circ$ .

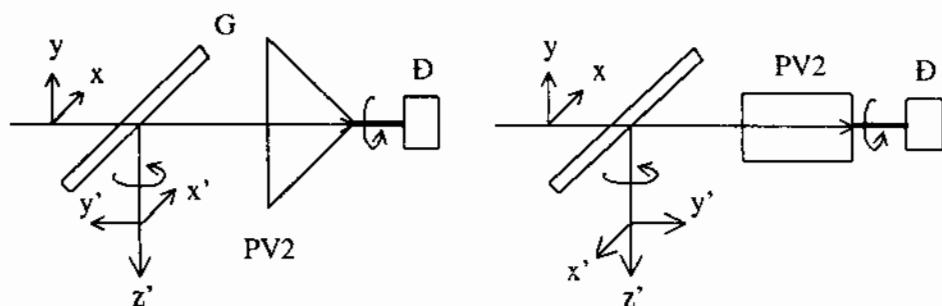


**Hình 4.18.** Hệ lăng kính Dialit.

**Hình 4.19.** Hệ lăng kính Abbe.

Lăng kính được ghép với các chi tiết quang khác như gương, thấu kính, bản song song, nêm quang... thành những hệ phức tạp. Các hệ này giải quyết nhiều yêu cầu kỹ thuật rất đa dạng. Hình 4.20a mô tả lăng kính PV2 ghép với

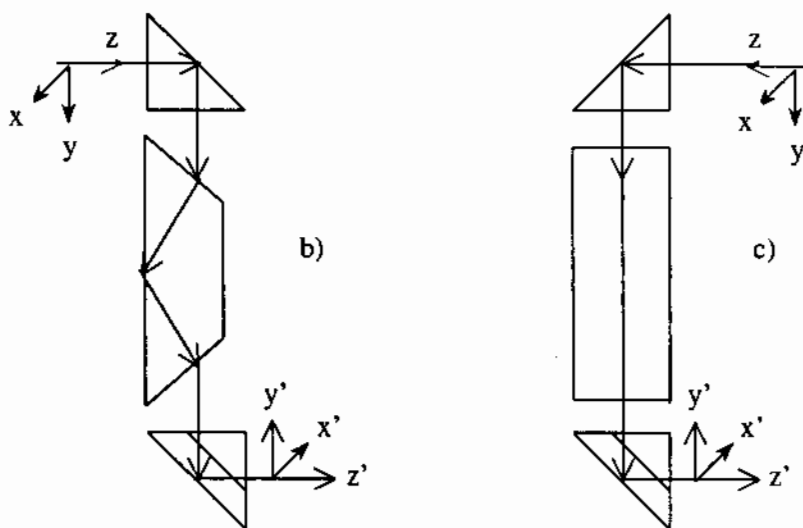
gương phẳng tạo thành hệ hệ xoay ảnh liên tục. Hệ gồm gương bán thấu G và lăng kính PV2. Hệ quay nhờ động cơ Đ với tần số góc  $\omega$  thì ảnh quay với tần số góc  $2\omega$ . Cụ thể là khi ảnh quay góc  $180^\circ$  khi lăng kính quay một góc  $90^\circ$ .



**Hình 4.20a.** Hệ gương lăng kính xoay ảnh liên tục:

G- gương bán thấu; Đ- động cơ điện; PV2- lăng kính.

Hình 4.20b mô tả hệ lăng kính một kính PV1, một lăng kính hình thang tạo thành hệ xoay ảnh trong ống quan sát dùng trong quân sự. Khi đồng thời lăng kính PV1 quay góc  $2\omega$  và lăng kính hình thang quay góc  $\omega$  quanh trục thẳng đứng (trong hình 4.20c- lăng kính PV1 quay góc  $180^\circ$  và lăng kính hình thang quay một góc  $90^\circ$ ) thì các chiều ảnh và hệ tọa độ ảnh sau lăng kính PV1 có mãi vẫn giữ nguyên so với khi chưa quay.



**Hình 4.20b, c.** Hệ lăng kính của ống quan sát.

#### 4.4. MẶT PHẪNG KHÚC XẠ

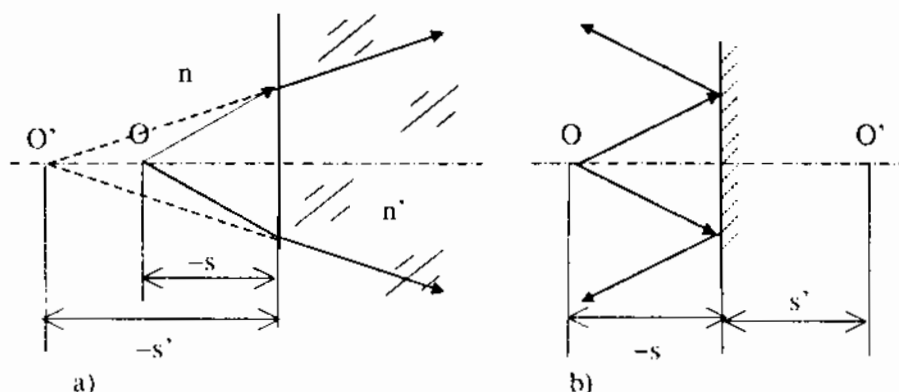
Mặt phẳng ngăn cách hai môi trường chiết suất khác nhau ( $n$  và  $n'$ ) gọi là mặt phẳng khúc xạ. Qua mặt khúc xạ, tia qua  $O$  khúc xạ qua  $O'$  (hình 4.21). ta coi đó là ảnh của  $O$ . Vị trí ảnh với khoảng cách  $s'$  được xác định theo:

$$s' = s \cdot \frac{n'}{n} \quad (4.6)$$

Khoảng cách giữa ảnh và vật sẽ là:

$$OO' = s \frac{n' - n}{n} \quad (4.7)$$

Gương phẳng (hình 4.21b) được coi là mặt phẳng khúc xạ khi giả thiết  $n' = -n$ , và vị trí ảnh  $s' = -s$ , khoảng cách giữa ảnh và vật là  $OO' = -2s$ . Tỷ lệ tạo ảnh của gương phẳng  $\beta' = +1$ .



Hình 4.21. a- Mặt phẳng khúc xạ; b- gương phẳng.

#### 4.5. BẢN SONG SONG

Hai mặt phẳng khúc xạ song song và cách nhau một khoảng  $d$  chiết suất giữa chúng là  $n$  gọi là bản song song. Bản song song được sử dụng làm các nắp che, các đế gương, các đế phim lọc, các tấm bảng chỉ thị, các thước chia...

Trong môi trường không khí  $n_1 = n_2 = 1$  thì vật  $O$  qua bản thành ảnh  $O'$  (hình 4.22). Vị trí ảnh được xác định theo:

$$s'_2 = s' = s_1 \cdot \frac{d}{n} \quad (4.8)$$

$OO'$  là khoảng cách ảnh và vật (hay độ lệch dọc trục):

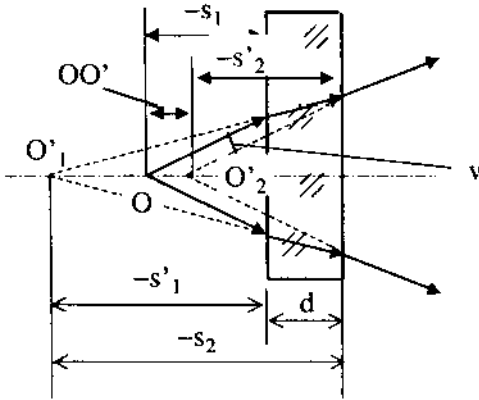
$$OO' = d \frac{n-1}{n} \quad (4.9)$$

Ví dụ khi  $n = 1,5$  thì  $OO' = d / 3$ .

Qua bản song song vật thật được tạo thành ảnh ảo, vật ảo thành ảnh thật. Tỷ lệ tạo ảnh  $\beta' = +1$ .

Bản song song làm lệch tia sáng một giá trị gọi là độ lệch song song  $v$ :

$$v = \varepsilon \cdot d \frac{n-1}{n} \quad (4.10)$$



**Hình 4.22.**  
Tia sáng qua bản song song.

Nhiều dụng cụ quang học như các máy đo lường quang học... đã sử dụng bản song song để phát hiện độ lệch song song tia sáng  $\Delta v$  khi bản nghiêng đi giá trị  $\Delta \varepsilon$ .

## 4.6. LĂNG KÍNH KHÚC XẠ

### 4.6.1. Truyền ánh sáng qua lăng kính khúc xạ

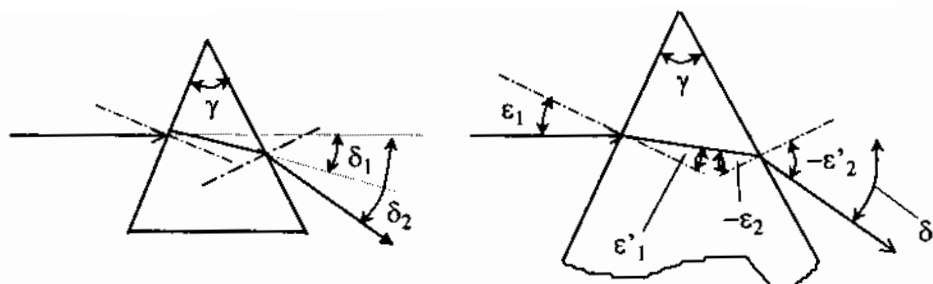
Lăng kính khúc xạ có hai mặt phẳng khúc xạ tạo thành góc chiết quang  $\gamma$ . Khi tia tới có góc tới  $\varepsilon_1$ , thì tia khúc xạ qua mặt 1 là  $\varepsilon_1'$ . Góc lệch giữa tia khúc xạ và tia tới là  $\delta_1 = \varepsilon_1' - \varepsilon_1$ . Góc lệch của tia sau lăng kính với tia tới mặt hai là  $\delta_2 = \varepsilon_2' - \varepsilon_2$ . Vì  $\gamma = \varepsilon_1' - \varepsilon_2$  nên góc lệch qua cả lăng kính được xác định theo (hình 4.23):

$$\delta = \gamma + \varepsilon_2' - \varepsilon_1 \quad (4.11)$$

Mặt khác, góc khúc xạ sau mặt thứ hai  $\varepsilon_2'$  lại phụ thuộc vào góc tới của mặt thứ nhất  $\varepsilon_1$

$$\varepsilon_2' = \arcsin (\cos \alpha \cdot \sin \varepsilon_1 - \sin \alpha \sqrt{n'^2 - \sin^2 \varepsilon_1}) \quad (4.12)$$





**Hình 4.23.** Truyền tia sáng qua lăng kính khúc xạ.

Điền (4.12) vào (4.11) cho biết góc lệch  $\delta$  phụ thuộc vào góc tới  $\epsilon_1$  và  $\delta$  là hàm số có giá trị cực tiểu. Khi tăng dần góc  $\epsilon_1$  thì góc khúc xạ  $\epsilon'_2$  giảm dần, tới khi  $\epsilon_1 = \epsilon_{1d}$  thì góc lệch đạt giá trị nhỏ nhất  $\delta = \delta_{\min}$ . Tiếp tục tăng góc tới  $\epsilon_1$  thì góc lệch không giảm mà tăng lên. Góc lệch nhỏ nhất xảy ra khi và chỉ khi tia tới và tia ló đối xứng qua đường phân giác của góc chiết quang  $\gamma$ . Khi đó  $\epsilon'_2 = -\epsilon_1$  và  $\epsilon'_1 = -\epsilon_2$  (hình 4.24). Lúc này góc tới ký hiệu  $\epsilon_{1d}$ :

$$\sin \epsilon_{1d} = n' \cdot \sin \left( \frac{\gamma}{2} \right) \quad (4.13)$$

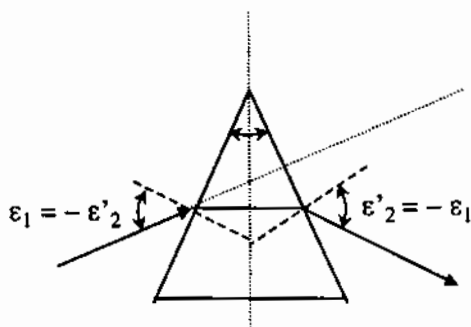
Góc lệch nhỏ nhất:

$$\delta_{\min} = \gamma - 2 \cdot \epsilon_{1d} \quad (4.14)$$

Từ (4.13) và (4.14) nhận được:

$$\sin \left( \frac{\gamma - \delta_{\min}}{2} \right) = n \cdot \sin \left( \frac{\gamma}{2} \right) \quad (4.15)$$

$$n = \frac{\sin \left( \frac{\gamma - \delta_{\min}}{2} \right)}{\sin \frac{\gamma}{2}} \quad (4.15a)$$



**Hình 4.24.** Lăng kính với góc lệch nhỏ nhất.

Dựa theo quan hệ (4.15a) để đo chiết suất  $n$  của thủy tinh quang học. Nhờ giác kế quang học mà đo được các góc chiết quang  $\gamma$  và góc lệch nhỏ nhất  $\delta_{\min}$  của một lăng kính tạo bởi chiết suất cần tìm. Điền các giá trị đo được vào quan hệ (4.15a) cho kết quả  $n$ .

#### 4.6.2. Tán sắc ánh sáng

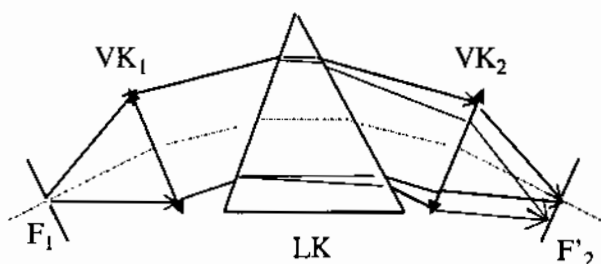
Do góc lệch  $\delta$  trực tiếp phụ thuộc vào chiết suất  $n$  của lăng kính (mà chiết suất  $n$  lại phụ thuộc vào bước sóng ánh sáng  $\lambda$ ) nên chùm tới song song và đa sắc vào lăng kính thì các tia có bước sóng  $\lambda$  khác nhau sẽ khúc xạ theo những góc lệch khác nhau. Hiện tượng trên được gọi tán sắc qua lăng kính.

Độ tán sắc được xác định theo:

$$\frac{d\delta}{d\lambda} = \frac{d\delta}{dn} \cdot \frac{dn}{d\lambda}$$
$$\frac{d\delta}{d\lambda} = \frac{2 \sin \frac{\alpha}{2}}{\sqrt{1 - n'^2 \sin^2 \frac{\alpha}{2}}} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad (4.16)$$

Mỗi loại thủy tinh quang học có mỗi giá trị  $dn/d\lambda$  và được liệt kê ở các bảng kê thủy tinh. Do tính chất tán sắc ánh sáng của lăng kính khúc xạ mà được gọi là lăng kính tán sắc. Nó là thành phần quan trọng của các thiết bị quang phổ.

Hình 4.25 lăng kính tán sắc nằm giữa hệ tạo vạch chuẩn và vật kính hệ vô tiêu. Tại tiêu diện thứ nhất hệ tạo vạch chuẩn là khe hẹp. Khe hẹp cho qua chùm sáng đa sắc của một miền nhất định nào đó. Vật kính VK1 đưa ảnh khe hẹp ra vô cùng. Chùm sáng song song khúc xạ qua lăng kính. Vật kính hệ vô tiêu tạo ảnh khe hẹp lên tiêu diện thứ hai của nó. Tại đây ta nhận được chùm tia đơn sắc mong muốn nhờ quay lăng kính tán xạ LK theo vị trí góc lệch nhỏ nhất. Phương pháp ghép này có hai nhược điểm: Một là chùm đơn sắc có độ bán rộng  $d\lambda$  lớn. Hai là không thỏa mãn điều kiện tạo góc lệch nhỏ nhất cho tất cả bước sóng  $\lambda$  khác nhau. Bởi vậy lăng kính tán sắc thường được ghép với nhau hoặc với gương phẳng để loại trừ hai nhược điểm trên.

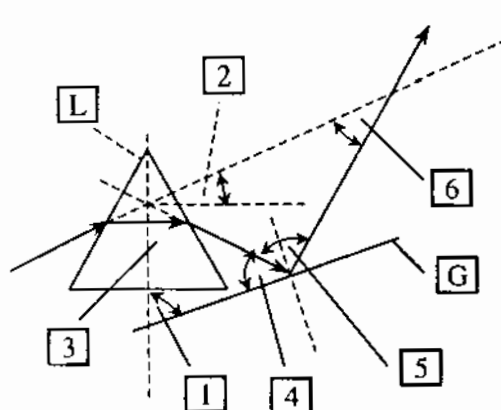


Hình 4.25. Lăng kính đơn trong máy quang phổ.

### 4.6.3. Ghép các lăng kính tán sắc

Để làm hẹp độ bán rộng của các chùm tia đơn sắc, trong các máy quang phổ, các lăng kính được ghép lại với nhau thành hệ lăng kính khúc xạ và gương phẳng từ hình 4.26 đến 4.32 là một số ví dụ ghép lăng kính tán xạ của một số thiết bị quang phổ.

Hình 4.26 là hệ ghép lăng kính tán sắc với gương phẳng. Góc lệch sau hệ  $\delta$  không phụ thuộc vào góc tới  $\epsilon_1$  và bước sóng ánh sáng:  $\delta_{L+G} = 180^\circ - 2\beta$ .



$$\begin{aligned} \text{Góc 1} &= \beta; \\ \text{Góc 2} &= \delta_L / 2; \\ \text{Góc 3} &= 90^\circ - (\delta_L / 2); \\ \text{Góc 4} &= 180^\circ - \beta - [90^\circ - (\delta_L / 2)] \\ &= 90^\circ - \beta + (\delta_L / 2); \\ \text{Góc 5} &= 180^\circ - 2[90^\circ - \beta + (\delta_L / 2)] \\ &= 2\beta - \delta_L; \\ \text{Góc 6} &= \delta_{L+G} \\ &= 180^\circ - \delta_L - (2\beta - \delta_L) \\ &= 180^\circ - 2\beta; \end{aligned}$$

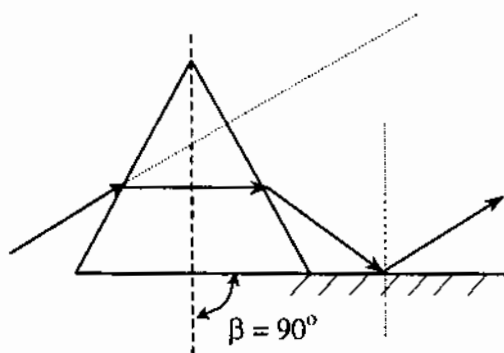
$\delta_L$  - góc lệch của lăng kính;

$\delta_{L+G}$  - góc lệch của hệ lăng kính và gương.

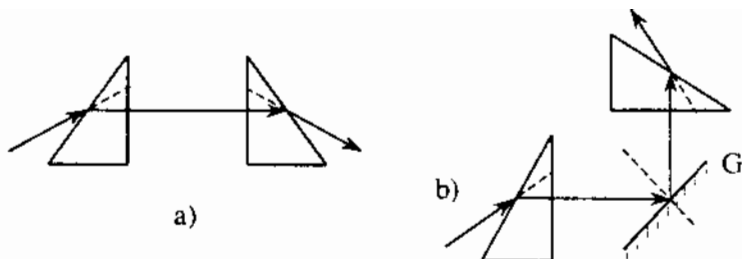
**Hình 4.26.** Hệ lăng kính L và gương G.

Watvot ghép hệ lăng kính và gương phẳng có  $\beta = 90^\circ$  để cho góc lệch của cả hệ bằng không:  $\delta_{L+G} = 0$ . Chùm tới song song với chùm sau hệ (hình 4.27).

- Hình 4.28a là hệ hai lăng kính giống nhau được tách từ một lăng kính như hình 4.27 nhằm mở rộng dải tán sắc và làm hẹp bán rộng dλ. Để ổn định góc lệch nhỏ nhất của các chùm tia, hệ được ghép thêm gương phẳng phản xạ G (hình 4.28b).

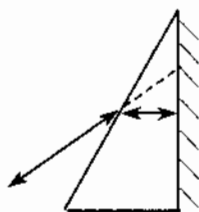


**Hình 4.27.** Hệ Watvot.

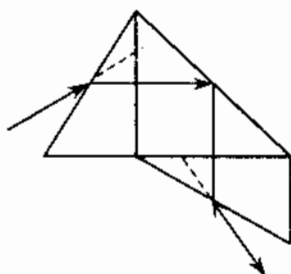


**Hình 4.28.** a- Hệ hai nêm giống nhau; b- hệ hai nêm với gương phẳng G.

• Lăng kính tự chuẩn Litrou (hình 4.29) có mặt sau được mạ lớp phản xạ hoàn toàn. Góc lệch giữa tia tới và tia ló là  $180^\circ$ . Sau khi phản xạ ở lớp phản xạ, tia ló cùng hướng và ngược chiều với tia tới.



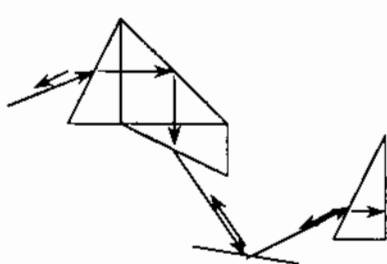
**Hình 4.29.** Hệ lăng kính Litrou.



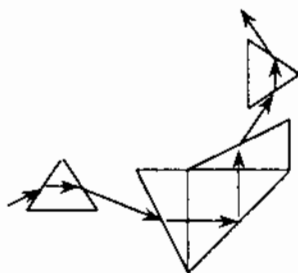
**Hình 4.30.** Hệ lăng kính Abbe.

• Hệ lăng kính khúc xạ Abbe gồm ba lăng kính ghép theo hình 4.30. Hai tia tới và tia ló lập với nhau góc  $90^\circ$ .

• Hai hệ kết cấu theo hình 4.31 và 4.32 đã làm giảm đáng kể bán rộng dải. Các kết cấu này được dùng trong các thiết bị quang phổ hiện đại. Hình 4.31 được ghép bởi một hệ Abbe, một lăng kính Litrou và một gương phẳng. Tia ló trùng phương nhưng ngược chiều với tia tới. Hệ theo hình 4.32 được ghép bởi hai lăng kính tam giác đều và một hệ Abbe. Tia ló vuông góc với tia tới.

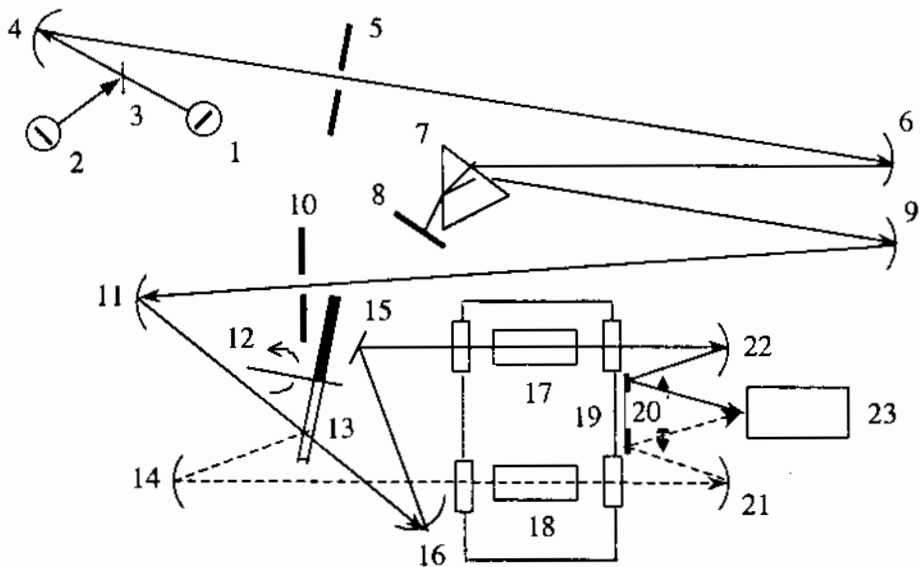


**Hình 4.31.** Hệ Abbe với lăng kính Litrou và gương phẳng.



**Hình 4.32.** Hệ hai tam giác đều và hệ Abbe.

• Hình 4.33 là sơ đồ quang của của một loại thiết bị phân tích quang phổ. Hai nguồn sáng (1) và (2) sử dụng cho hai miền ánh sáng: tự nhiên VIS và hồng ngoại UV. Qua các gương (3), (4), (6), chùm sáng song song vào lăng kính (7). Chùm tán sắc ánh sáng qua lăng kính, qua hai gương (9) và (11) tới chong chóng sáng (13). Chong chóng sáng (13) được trục (12) quay để tách chùm sáng theo hai kênh. Một kênh qua gương cầu (14) rồi qua vật thử (18), gương cầu (21), gương phẳng (19) và vật kính (20) để tới bộ thu tín hiệu (23). Kênh thứ hai qua gương (15), (16), qua mẫu chuẩn (17), qua gương cầu (22), gương phẳng (19), qua vật kính (20) cũng tới bộ thu tín hiệu (23). Sự khác biệt về định lượng giữa hai kênh mà bộ thu nhận (23) phát hiện được chính là sự khác biệt về định lượng của vật thử (18) so với mẫu chuẩn (17).



Hình 4.33. Sơ đồ quang của máy phân tích quang phổ - SPECORD UV VIS.

#### 4.7. NÊM QUANG VÀ HỆ NÊM

Nêm quang là lăng kính khúc xạ với góc chiết quang nhỏ. Khi sử dụng, chùm sáng tới với góc tới sấp xỉ bằng 0. Thay các giá trị  $\cos \alpha \cong 1$ ,  $\sin(\alpha, \epsilon_1, \epsilon'_2) \cong (\alpha, \epsilon_1, \epsilon'_2) \sin^2 \epsilon_1 = 0$  thì  $\epsilon'_2 = \epsilon_1 - n$ .  $\gamma$  nên quan hệ 4.16 chuyển thành:

$$\delta = -\gamma(n - 1) \quad (4.17)$$

Góc lệch của nêm quang  $\delta$  khi tia tới vuông góc với mặt thứ nhất của nêm được xác định theo (4.17) và là một giá trị cố định của mỗi nêm.

Để thay đổi được góc lệch  $\delta$  của nêm, từ đó thay đổi được hướng đi của tia khúc xạ theo các góc khác nhau, người ta đã ghép nêm thành hệ.

Hai thấu kính hội tụ và phân kỳ cùng bán kính cong nhưng ngược dấu, cùng có một mặt phẳng, cùng chiết suất được ghép lại thành hệ (hình 4.34a). Khi dịch thấu kính hội tụ trượt theo mặt cong của thấu kính phân kỳ tạo nên nêm có góc  $\gamma$  thay đổi, dẫn tới góc lệch  $\delta$  cũng thay đổi theo.

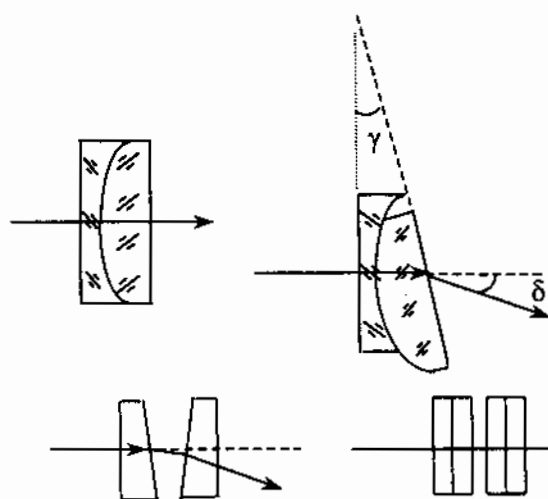
Hệ hai nêm hoàn toàn giống nhau (hình 4.34b) có cùng góc chiết quang  $\gamma$  chiết suất  $n$ . Khi quay đồng thời hai nêm với góc  $\alpha$  quanh trục quang nhưng ngược chiều nhau thì góc lệch  $\delta$  cũng thay đổi theo. Quan hệ giữa  $\delta$  và  $\alpha$  được xác định theo:

$$\delta = -2|\gamma|(n-1)\cos\alpha \quad (4.18)$$

Ví dụ: Ở vị trí 1 góc quay  $\alpha = 0^\circ$ , góc lệch là  $\delta = -2|\gamma|(n-1)$ .

Tại vị trí 2:  $\alpha = 90^\circ$  thì  $\delta = 0$ .

Ở vị trí 3:  $\alpha = 180^\circ$  góc lệch  $\delta = +2|\gamma|(n-1)$  và ngược chiều với vị trí 1.



**Hình 4.34.** Hệ nêm quang thay đổi được góc lệch  $\delta$  và hướng đi của tia khúc xạ.

Trong các thiết bị đo lường, nêm phải được khử tán sắc ánh sáng. Mỗi nêm được tách thành hai nêm thành phần có các góc nêm  $\gamma_1$  và  $\gamma_2$  (góc chiết quang) và ghép quay ngược chiều nhau (hình 4.35). Các góc chiết quang của mỗi nêm xác định theo góc lệch  $\delta$ :

$$\gamma_1 = \frac{\delta}{(n_{F1} - n_{C1})(v_1 - v_2)} \quad (4.19)$$

$$\gamma_2 = \frac{\delta}{(n_{F2} - n_{C2})(v_1 - v_2)} \quad (4.20)$$

$(n_{F1} - n_{C1})$  - độ tán sắc nêm thứ nhất;

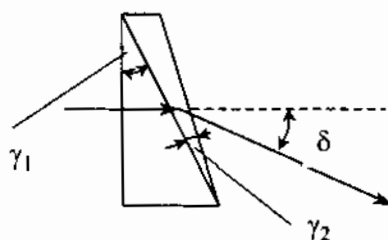
$(n_{F2} - n_{C2})$  - độ tán sắc nêm thứ hai;

$v_1$  - chỉ số Abbe nêm thứ nhất;

$v_2$  - chỉ số Abbe nêm thứ hai.

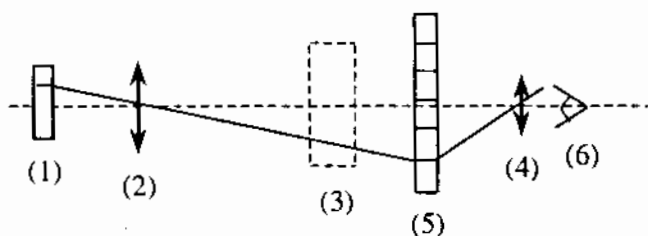
Cách ghép này đã làm cho một số bước sóng ánh sáng có góc lệch giống nhau. Ví dụ góc lệch  $\delta_F$  tia  $\lambda_F$  bằng góc lệch  $\delta_C$  của tia  $\lambda_C$ .

**Hình 4.35.**  
Ghép nêm khử sai sắc.



#### 4.8. CƠ CẤU ĐỌC SỐ LÊ

Cơ cấu đọc số lẻ dùng để đọc các giá trị phần trăm và phần nghìn mm của các dụng cụ đo lường. Bộ đọc số quang gồm có thước vật kính, vật kính, thước thị kính, thị kính và cơ cấu đọc số lẻ (hình 4.36). Giá trị mỗi vạch chia thước vật kính là mm. Khoảng cách hai vạch là  $a$ . Thước vật kính ở trước tiêu diện thứ nhất vật kính các kính hiển vi đo lường. Thước vật kính của hệ vô tiêu đo lường ở vô cùng. Vật kính tạo ảnh thước về trùng với thước thị kính. Thước thị kính được chia thành 10 khoảng. Khoảng cách mỗi khoảng  $b = (a \cdot \beta'_{VK})/10$ . Giá trị mỗi vạch chia là 0,1 mm. Qua thị kính, mắt đọc được các giá trị mm và 0,1 mm. Nhờ cơ cấu đọc số lẻ để đọc được các giá trị phần trăm và phần nghìn mm.



**Hình 4.36.** Sơ đồ quang của kính hiển vi đo lường:

1- thước vật kính; 2- vật kính; 3- thước thị kính;

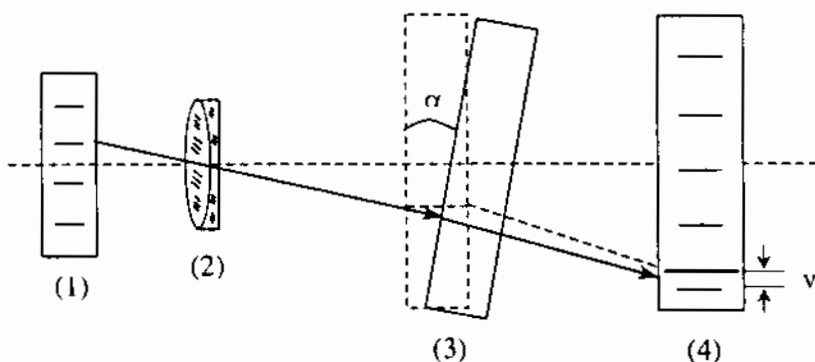
4- thị kính; 5- cơ cấu đọc số lẻ; 6- mắt.

Các cơ cấu đọc số lẻ gồm hai bộ phận: bộ phận đọc số (đọc số ngoài hoặc đọc số trong) và cơ cấu dịch chuyển tinh quang học thông qua thay đổi vị trí hình dáng của các bản song song, các nêm quang v.v...

#### 4.8.1. Cơ cấu dịch chuyển tế vi nhờ xoay bản song song

Quay bản song song (chiết suất  $n$  bề dày  $d$ ) đi góc  $\alpha$ . Chùm sáng mang ảnh vạch chuẩn vật kính dịch một đoạn  $v$  về trùng với một vạch gần nhất của thước thị kính (hình 4.37). Độ lớn  $v$  chính là giá trị lẻ phần trăm và phần nghìn cần xác định. Bộ đọc số (ngoài hoặc trong) xác định độ lớn góc xoay  $\alpha$ , tức là đọc được độ lớn  $v$ . Giữa  $\alpha$  và  $v$  có mối quan hệ:

$$\alpha = \frac{n.v}{(n-1).d} \quad (4.21)$$



**Hình 4.37.** Quay nêm của cơ cấu đọc số lẻ:

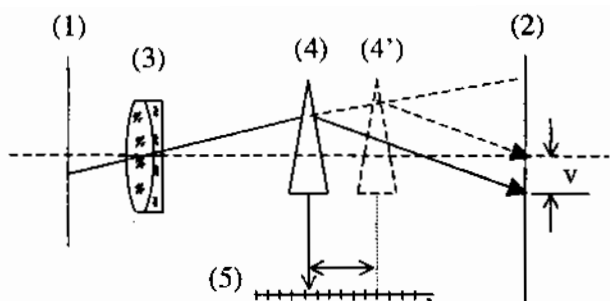
1- thước vật kính; 2- vật kính; 3- bản song song; 4- thước thị kính.

#### 4.8.2. Cơ cấu dịch chuyển tế vi nhờ dịch chuyển nêm

Dịch chuyển nêm (góc chiết quang  $\gamma$ , chiết suất  $n$ ) đi một đoạn  $l$ . Chùm sáng mang ảnh vạch chuẩn vật kính dịch một đoạn  $v$  về trùng với một vạch gần nhất của thước thị kính (hình 4.38). Độ lớn  $v$  chính là giá trị lẻ phần trăm và phần nghìn cần xác định. Bộ đọc số lẻ (ngoài hoặc trong) xác định độ lớn dịch chuyển  $l$  tức là đọc được độ lớn  $v$ . Giữa  $l$  và  $v$  có mối quan hệ:

$$l = \frac{v}{\gamma(n-1)} \quad (4.22)$$



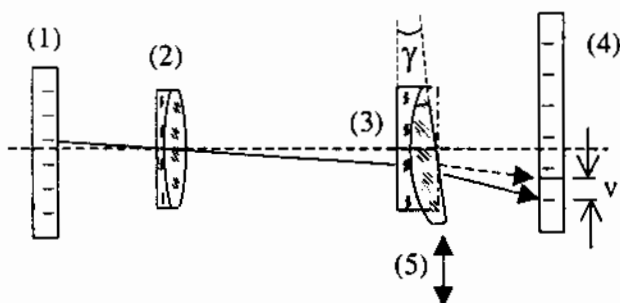


**Hình 4.38.** Dịch nôm quang của cơ cấu đọc số lẻ:

1- mặt vật; 2- mặt ảnh; 3- vật kính; 4- nôm quang; 5- cơ cấu đọc số lẻ.

#### 4.8.3. Cơ cấu dịch chuyển tế vi nhờ thay đổi góc nôm

Nôm gồm hai thấu kính hội tụ và phân kỳ (hình 4.39). Khi dịch một trong hai thấu kính thì góc chiết quang  $\gamma$  thay đổi, góc lệch  $\delta$  thay đổi theo. Chùm sáng mang ảnh vạch thước vật kính dịch một đoạn  $v$  về trùng với một vạch gần nhất của thước thị kính. Độ lớn  $v$  chính là giá trị lẻ phần trăm và phần nghìn cần xác định. Bộ đọc số lẻ (ngoài hoặc trong) xác định độ lớn dịch chuyển  $v$ . Giá trị  $v$  có mối quan hệ  $v = f (f', n, \Delta\gamma, b...)$  (ở đây:  $f'$  - tiêu cự thứ hai vật kính;  $\Delta\gamma$  - thay đổi góc nôm,  $b$  - khoảng cách từ nôm đến thước thị kính).



**Hình 4.39.** Cơ cấu đọc số lẻ nhờ thay đổi góc nôm:

1- thước vật kính; 2- vật kính; 3- nôm quang;

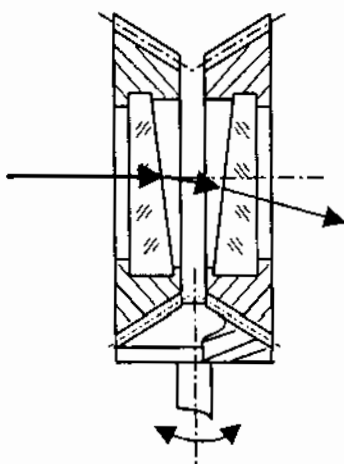
4- thước thị kính; 5- cơ cấu đọc số lẻ.

#### 4.8.4. Cơ cấu dịch chuyển tế vi nhờ quay cặp nôm

Cặp nôm và nguyên tắc quay cặp nôm đã nêu ở hình 4.40. Với góc quay  $\alpha$  của mỗi nôm (cặp nôm quay ngược chiều nhau nhờ hệ bánh răng nón), chùm

sáng mang ảnh vạch thước vật kính dịch một đoạn  $v$  về trùng với một vạch gần nhất của thước thị kính.

**Hình 4.40.** Cơ cấu đọc số lẻ quay cặp nôm.



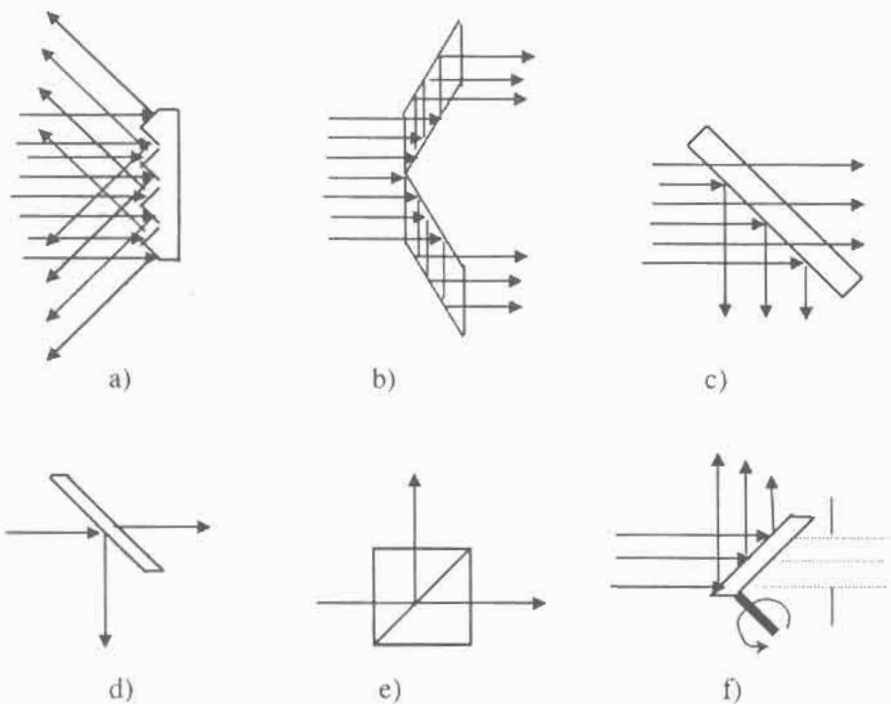
## 4.9. CHI TIẾT PHÂN CHIA CHÙM SÁNG

Chi tiết phân chia chùm sáng được sử dụng nhiều trong các dụng cụ quang. Các chi tiết này chia chùm sáng thành các chùm riêng rẽ với lượng quang năng đều nhau hoặc không đều nhau. Có hai phương pháp chủ yếu được sử dụng để phân chia chùm sáng.

### a. Phân chia chùm sáng theo phương pháp hình học

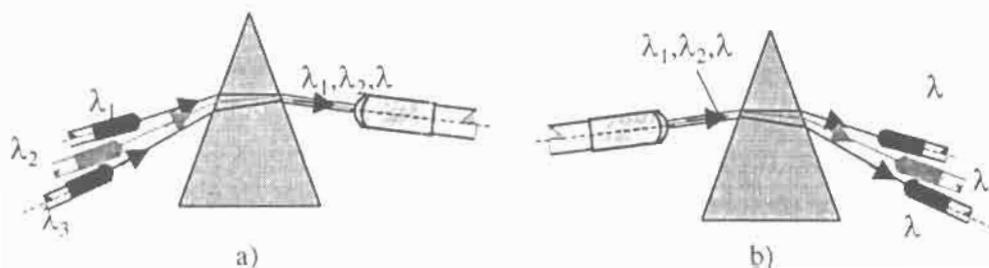
Các hình 4.41a, b và c là một số ví dụ mô tả cách chia chùm sáng theo phương pháp hình học.

- Gương Fresnel phản xạ chùm tới theo hai hướng khác nhau (hình 4.41a).
- Hệ hai lăng kính hình bình hành (hình 4.41b) chia đôi chùm tới thành hai chùm riêng song song với nhau.
- Vị trí các phần tử mạ và không mạ xen kẽ nhau trên gương phẳng sẽ phản xạ và cho qua hai chùm sáng thành phần. Như vậy chùm tới được chia thành hai chùm riêng biệt đi theo hai hướng khác nhau. Khi gương nghiêng góc  $45^\circ$  với tia tới thì hai chùm thành phần vuông góc với nhau (hình 4.41c).
- Lá chắn sáng mang gương phản xạ khi quay chắn chùm sáng (hình 4.41f) cũng chia chùm sáng thành hai phần và được ứng dụng nhiều trong kỹ thuật.



**Hình 4.41.** Chia chùm sáng theo phương pháp hình học và vật lý.

- Trong ghép kênh và tách kênh tín hiệu, kỹ thuật thông tin đã dùng lăng kính khúc xạ (xem phần 6 cùng chương 4). Tín hiệu có các bước sóng tải khác nhau, được truyền vào lăng kính khúc xạ. Khi qua lăng kính, các kênh đơn được ghép lại theo đường dẫn lớn nhất nhiều kênh (hình 4.42a). Ngược lại (hình 4.42b) mô tả cách tách các kênh có bước sóng tải khác nhau từ đường dẫn lớn.

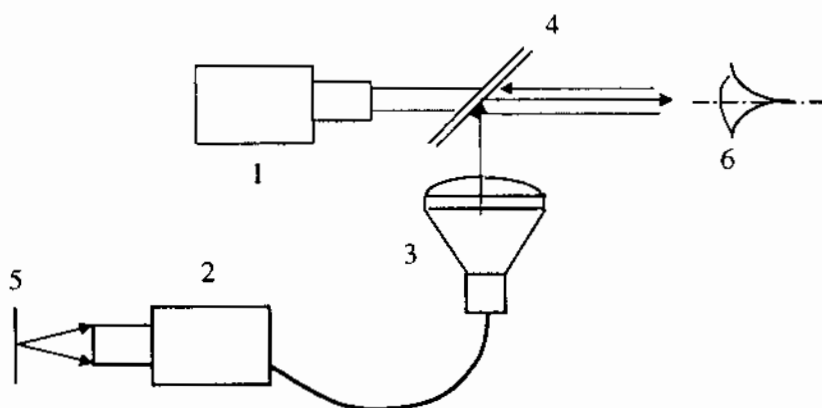


**Hình 4.42.** a- Tổ hợp; b- tách các kênh tín hiệu bằng lăng kính khúc xạ.

## b. Phân chia chùm sáng theo phương pháp vật lý

- Phương pháp vật lý cho phép tách chùm sáng thành các phần riêng nhờ lớp bán thấu mạ trên mặt gương - gương bán thấu (hình 4.41d) hoặc trên các mặt lăng kính phân xạ (hình 4.41e). Lớp bán thấu tách chùm sáng thành hai phần có lượng quang năng đều nhau hoặc không đều nhau tùy thuộc vào cấu tạo, vật liệu và bề dày của màng bán thấu.

Hình 4.43 là một ứng dụng trong kỹ thuật truyền hình. Trước phát thanh viên là ống kính máy quay vừa và màn hình ghi bài cho phát thanh viên đọc. Phát thanh viên vừa nhìn thẳng vào khán giả (ống kính máy quay) vừa đọc được bài viết trên màn hình.



**Hình 4.43.** Ứng dụng của bán thấu trong kỹ thuật truyền hình:

1- ống kính máy quay; 2- ống kính máy thu bài đọc; 3- màn hình phát bài đọc; 4- tấm bán thấu; 5- bài đọc; 6- phát thanh viên.

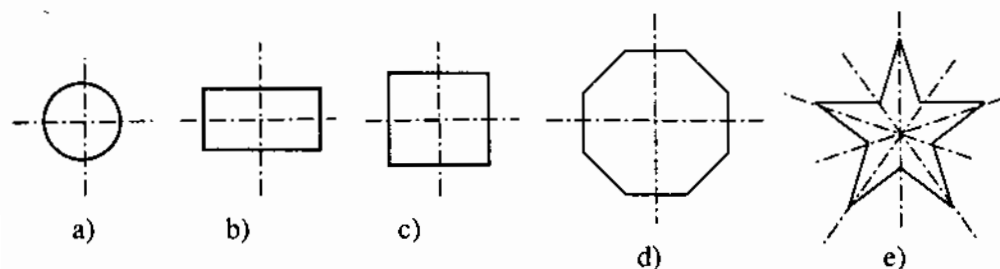
## Chương V

# VÒNG CHẮN TRONG HỆ QUANG

Vòng chắn là chi tiết quang quan trọng. Hệ quang nào cũng có vòng chắn. Số lượng, vị trí, hình dáng và kích thước của vòng chắn phụ thuộc vào chức năng của chúng trong mỗi hệ quang. Chúng được gọi là vòng chắn thực. Vòng chắn thực là các vòng thực. Các giá đỡ thấu kính, giá đỡ các bảng chỉ thị, giá đỡ các phim lọc, giá đỡ các lăng kính... hoặc các vòng chắn đứng riêng trong hệ.

Vòng chắn tham gia trực tiếp vào quá trình tạo ảnh: tăng hoặc giảm lượng quang thông của chùm sáng từ vật vào hệ quang, tăng độ đậm nhạt và rõ nét của hình ảnh được tạo nên, giới hạn phạm vi vật được tạo ảnh, giảm quang sai, tăng khả năng phân giải...

Hình dáng các vòng chắn cũng khác nhau: chủ yếu là hình tròn (hình 5.1a), hình chữ nhật (hình 5.1b), hình vuông (hình 5.1c), hình nhiều cạnh đều (hình 5.1d), hình sao (hình 5.1e)...



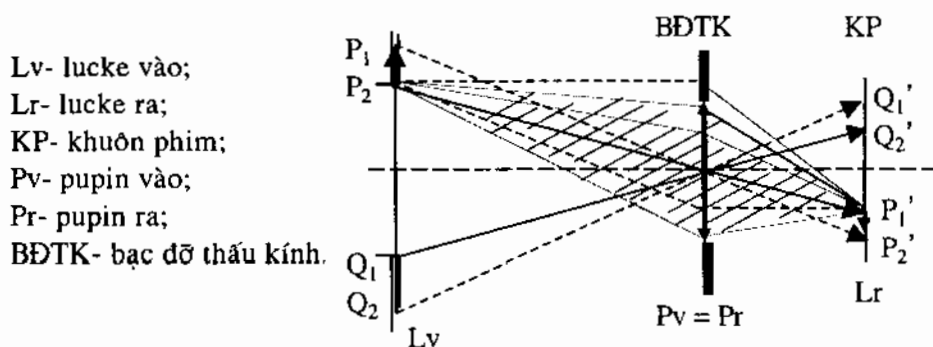
**Hình 5.1.** Hình dạng các vòng chắn thực.

### 5.1. VÒNG CHẮN SÁNG

Vòng chắn sáng là vòng chắn thực, giới hạn chùm sáng vào hệ quang để tạo ảnh. Lượng quang thông qua hệ quang nhiều hay ít là do độ lớn vòng chắn sáng quyết định. Các đĩafram của máy ảnh, máy quay các loại là các vòng chắn sáng của chúng.

Giả sử bề mặt chứa vật của các điểm  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $Q_1$  và  $Q_2$  được tạo ảnh qua ống kính máy ảnh OK. Ảnh của chúng trên mặt phim là  $P'_1$ ,  $P'_2$ ,  $Q'_1$  và  $Q'_2$

(hình 5.2). Thực tế các tia sáng không đi vào hệ theo như quy định vẽ hình, mà chỉ nằm trong miền do giá đỡ thấu kính của ống kính giới hạn (phần gạch chéo của hình 5.2). Như vậy giá đỡ vật kính là vòng chắn sáng.



**Hình 5.2.** Vòng chắn sáng giới hạn chùm sáng tạo ảnh.

Tùy thuộc vào các hệ quang mà vị trí vòng chắn sáng không cố định. Nó nằm trước (hình 5.3), nằm sau (hình 5.4) và có thể nằm giữa hệ các thấu kính. Ảnh vòng chắn sáng là pupin vào (Pv) và pupin ra (Pr).

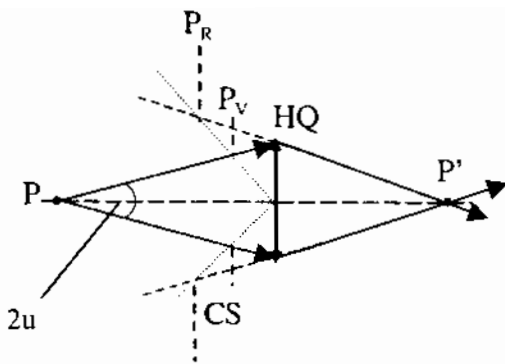
### 5.1.1. Pupin vào

Pupin vào Pv giới hạn chùm sáng tạo ảnh ở phía vật (hình 5.3). Pv là ảnh của vòng chắn sáng khi tạo ảnh từ phải sang trái hệ. Pupin vào Pv có thể là ảnh thật, là ảnh ảo và cũng có thể là vòng chắn thực. Nó nằm trước, nằm sau hay nằm giữa hệ quang. Nhiều trường hợp Pv trùng với vòng chắn sáng (hình 5.3).

### 5.1.2. Pupin ra

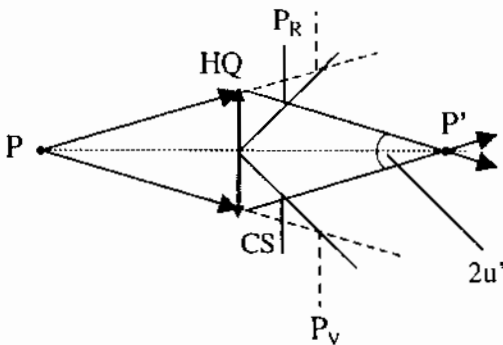
Pupin ra Pr giới hạn chùm sáng tạo ảnh ở phía ảnh (hình 5.4). Pr là ảnh của vòng chắn sáng khi tạo ảnh vòng chắn sáng từ trái sang phải hệ. Như vậy Pr có thể là ảnh thật, là ảnh ảo, nằm trước, nằm sau hay nằm giữa hệ quang. Nhiều trường hợp Pr trùng với vòng chắn sáng (hình 5.4).

Hệ quang có nhiều vòng chắn thực song chỉ có một vòng chắn sáng và một vòng chắn trường. Do vậy cũng chỉ có một cặp pupin (Pv và Pr). Để xác định vòng chắn sáng trong hệ quang ta phải tìm pupin vào hoặc pupin ra tức là ảnh của vòng chắn sáng trước.



**Hình 5.3.** Vòng chắn sáng trước hệ quang:

P - vật điểm trên quang trục;  
 CS - vòng chắn sáng;  
 HQ - hệ quang;  
 Pv - pupin vào.



**Hình 5.4.** Vòng chắn sáng sau hệ quang:

P - vật điểm trên quang trục;  
 CS - vòng chắn sáng;  
 HQ - hệ quang;  
 Pv - pupin vào;

### 5.1.3. Đặc tính của vòng chắn sáng

Các điểm mép pupin vào lập với vật điểm trên quang trục góc nhỏ nhất gọi là góc mở vật  $2u$  (hình 5.3). Trong khi đó mép của các vòng chắn khác (hoặc mép các ảnh vòng chắn khác được tạo ảnh từ phải sang trái) lập với vật điểm những góc lớn hơn. Do vậy mà pupin vào giới hạn chùm sáng ở phần vật. Chỉ những tia sáng qua pupin vào nằm trong góc mở  $2u$  mới vào hệ quang để tham gia tạo ảnh.

Các điểm mép pupin ra lập với ảnh điểm trên quang trục góc nhỏ nhất gọi là góc mở ảnh  $2u'$  (hình 5.4), trong khi đó mép của các vòng chắn khác (hoặc mép các ảnh vòng chắn khác được tạo ảnh từ trái sang phải) lập với ảnh điểm những góc lớn hơn. Do vậy mà pupin ra giới hạn chùm sáng ở phần ảnh. Chỉ những tia sáng qua pupin ra mới trực tiếp tạo ảnh.

Các vật điểm khác nhau trên quang trục cũng có thể nhận các vòng chắn khác nhau làm vòng chắn sáng cho chúng.

Đặc tính của vòng chắn sáng được đánh giá bởi hệ số mở  $k$  hoặc thủ độ số  $A$ .

Những hệ tạo ảnh vật ở xa hay ở vô cùng như các hệ vô tiêu, ống nhòm, ống kính máy ảnh máy quay và chiếu phim... thì sử dụng hệ số mở k để định đặc tính của vòng chắn sáng.

$$k = \frac{f'}{D_{pv}} \quad (5.1)$$

f' - tiêu cự hệ quang;

k - hệ số mở tương đối;

$D_{pv}$  - đường kính pupin vào.

Khi pupin vào có tiết diện không phải là hình tròn thì phải tính tiết diện bề mặt pupin từ đó tìm đường kính trung bình.

Hệ số mở k định lượng quang thông vào hệ quang tham gia tạo ảnh. Khi k lớn lên (theo 5.1) thì lượng quang thông vào hệ ít đi và ngược lại.

Các ống kính máy ảnh sử dụng hệ số mở tương đối k để định lượng quang thông vào hệ quang. Vành ngoài ống kính ghi dãy số của hệ số mở tương đối

$$k = 2; 2,8; 3,2; 4; 5,6; 6,4; 8; 16.$$

và đường kính vòng chắn sáng  $D_{pv}$  (chính bằng bạc đỡ vật kính).

Ví dụ: khi kí hiệu ghi ở vành vật kính  $4 \times 15$  thì hiểu: hệ số mở của hệ vô tiêu và ống nhòm được ghi trực tiếp bởi độ phóng đại là độ phóng đại là bốn lần và đường kính vòng chắn sáng là 15 mm.

Các hệ tạo ảnh tiêu cự nhỏ, khoảng cách quan sát ngắn như kính hiển vi các loại thì dùng thủ độ số A để định khả năng giới hạn chùm sáng của vòng chắn sáng.

$$A = n \cdot \sin u \quad (5.2)$$

n - chiết suất trước vật kính;

A - thủ độ số;

u - góc mở vật.

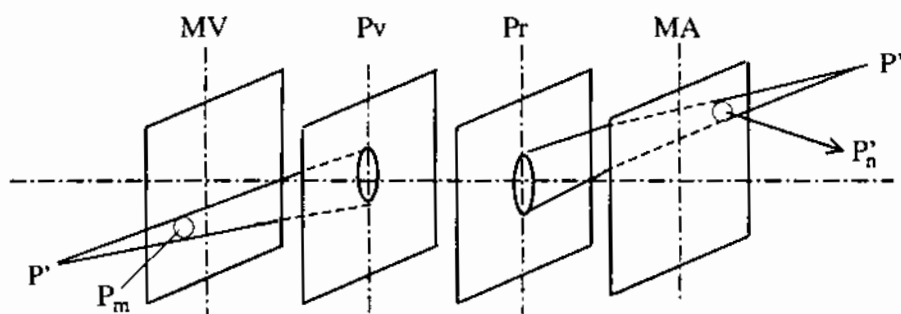
Có hai khả năng được sử dụng để thay đổi tính năng của vòng chắn sáng hay là thay đổi lượng quang thông vào hệ quang.

Một là thay đổi đường kính vòng chắn sáng. Các ống kính máy ảnh và các máy quay chiếu phim đã sử dụng phương pháp này bằng cách dùng một đĩafram trong hệ. Chúng gồm những lá kim loại mỏng ghép thành. Đường kính đĩafram thay đổi phù hợp với dãy số của hệ số mở tương đối k.



Khả năng thứ hai sử dụng ở các kính hiển vi là thay đổi trực tiếp đường kính vòng chắn sáng của hệ chiếu sáng (xem phần hệ chiếu sáng cho kính hiển vi).

Vòng chắn sáng còn ảnh hưởng trực tiếp đến bề dày vật được tạo ảnh rõ nét. Vật là không gian ba chiều, còn ảnh tạo nên trên mặt phim (ảnh của các hệ quang tạo ảnh thật) hoặc trên võng mạc chúng ta (ảnh của hệ tạo ảnh ảo) lại chỉ ở hai chiều. Chiều sâu hoặc bề dày không gian của vật còn được tạo ảnh rõ nét gọi là bề dày vật được tạo ảnh. Vật điểm P nằm ngoài mặt vật MV (hình 5.5) được tạo ảnh thành ảnh P' cũng nằm ngoài mặt ảnh MA. Trên mặt ảnh, có ảnh P'\_N là một hình nhoè nhiều. Khi ảnh này nhỏ hơn khả năng phân giải của mắt thì mắt vẫn coi ảnh đó là một điểm và ảnh vẫn được coi là rõ nét.



**Hình 5.5.** Bề dày vật được tạo ảnh rõ nét:

P - vật điểm nằm ngoài mặt chứa vật; P' - ảnh điểm nằm ngoài mặt ảnh; MA - mặt chứa vật; MA - mặt ảnh.

Khoảng cách  $b_x$  (kể đến mặt chứa vật) của vật điểm xa nhất và khoảng cách  $b_g$  (kể đến mặt chứa vật) của vật điểm gần nhất so với pupin vào mà các vật điểm đó còn tạo ảnh rõ nét thì phụ thuộc vào vị trí và độ lớn của pupin vào. (hình 5.6).

$$b_x = \frac{p_v}{\frac{f'|\beta'|}{2kp'} - 1} ; \quad b_g = -\frac{p_v}{\frac{f'|\beta'|}{2kp'} + 1} \quad (5.3)$$

trong đó:  $b_x$  - khoảng cách đến mặt chứa vật của vật điểm xa nhất;  
 $b_g$  - khoảng cách đến mặt chứa vật của vật điểm gần nhất;  
 $f'$  - tiêu cự của hệ tạo ảnh;  
 $\beta'$  - tỉ lệ tạo ảnh từ mặt vật đến mặt ảnh;  
 $p_v$  - khoảng cách từ MA đến pupin vào;

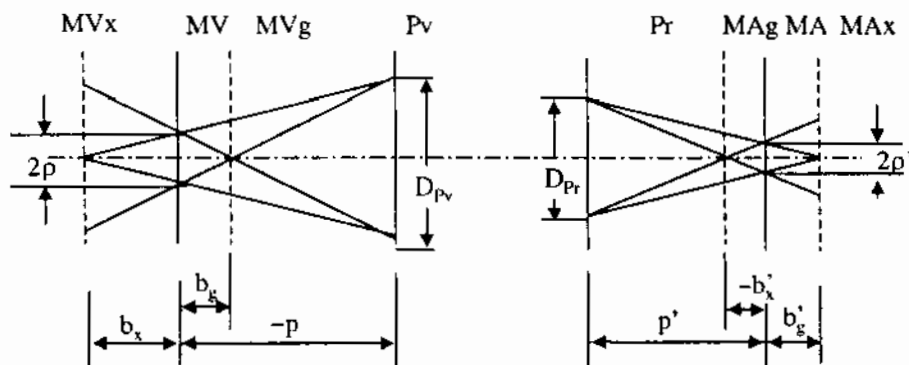
$k$  - hệ số mờ tương đối;

$2\rho'$  - độ lớn ảnh  $P'_N$  trên mặt ảnh.

Bề dày vật tạo ảnh rõ nét:

$$\Delta z = -b_x + b_g$$

$$\Delta z = -2k\rho' \left( \frac{1}{f'|\beta| - 2k\rho'} + \frac{1}{f'|\beta| + 2k\rho'} \right) \quad (5.4)$$



**Hình 5.6.** Bề dày của vật được tạo ảnh rõ nét:

$b_x$  - khoảng cách đến mặt chứa vật của điểm xa nhất;

$b_g$  - khoảng cách đến mặt chứa vật của điểm gần nhất;

$2\rho'$  - độ lớn ảnh  $P'_N$  trên mặt ảnh;

MV, MVx, MVg - mặt chứa vật (x) xa nhất, (g) gần nhất;

MA, MAx, MAg - mặt ảnh (x) xa nhất, (g) gần nhất;

Pv - pupin vào;

Pr - pupin ra.

## 5.2. VÒNG CHẮN TRƯỜNG

Vòng chắn trường trong hệ quang là vòng chắn thực giới hạn phạm vi vật được tạo ảnh. Vòng chắn trường phải trùng với mặt chứa vật (khuôn phim trong máy chiếu phim) hoặc trùng với mặt ảnh (khuôn phim của máy ảnh), nhiều khi cũng trùng với mặt ảnh giữa. Ngoài ba vị trí trên vòng chắn trường gây nên hiện tượng giảm dần cường độ sáng ở mép ảnh. Ảnh vòng chắn trường là lucke vào ( $L_v$ ) và lucke ra ( $L_r$ ).

### 5.2.1. Lucke vào

Lucke vào (Lv) giới hạn phạm vi tạo ảnh của vật (trong hình 5.2, P<sub>1</sub> và Q<sub>1</sub> còn nằm trong miền lucke vào và được tạo ảnh lên mặt phim, còn P<sub>2</sub> và Q<sub>2</sub> nằm ngoài Lv nên không được tạo ảnh lên mặt phim). Lucke vào thường là vòng chắn thực hoặc ảnh thật tùy thuộc vị trí của vòng chắn trường. Khi vòng chắn trường trùng với mặt vật thì lucke vào là vòng chắn thực. Khi vòng chắn trường trùng với ảnh giữa hoặc mặt ảnh cuối thì lucke vào là ảnh thật.

### 5.2.2. Lucke ra

Lucke ra Lr giới hạn phạm vi tạo ảnh của vật ở phần ảnh. Lr thường là vòng chắn thực hoặc ảnh thật tùy thuộc vị trí của vòng chắn trường. Khi vòng chắn trường trùng với mặt ảnh thì lucke ra là vòng chắn thực. Khi vòng chắn trường trùng với ảnh thật giữa (hình 5.7) hoặc mặt vật thì lucke ra là ảnh thật.

Để giới hạn được phạm vi tạo ảnh thì mép lucke vào phải lập với điểm giữa pupin vào góc nhỏ nhất 2w (hình 5.7) so với các mép vòng chắn khác hoặc các ảnh vòng chắn khác (tạo ảnh các vòng chắn thực từ phải sang trái). Tương tự như vậy mép lucke ra lập với điểm giữa pupin ra góc nhỏ nhất 2w' (hình 5.7) so với các mép vòng chắn khác hoặc các ảnh vòng chắn khác (tạo ảnh các vòng chắn thực từ trái sang phải). Để xác định vòng chắn trường trước hết phải xác định pupin vào (hoặc pupin ra) rồi tìm lucke vào (hoặc lucke ra) từ đó suy ra vòng chắn trường trong hệ quang.

Góc trường vật 2w và góc trường ảnh 2w' đặc trưng độ lớn vật được tạo ảnh (hình 5.7).

$$\tan w = \frac{y}{z_t} \text{ và } \tan w' = \frac{y'}{z'_t} \quad (5.5)$$

trong đó: y - độ lớn lucke vào;

y' - độ lớn lucke ra;

w - góc trường vật;

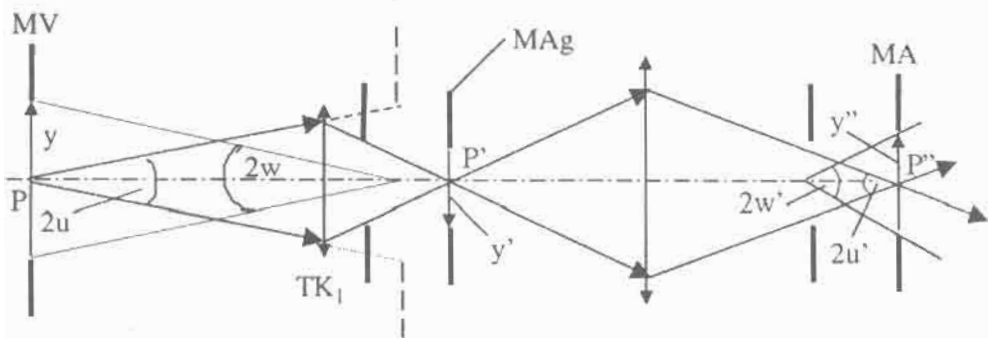
w' - góc trường ảnh;

z<sub>t</sub> - khoảng cách từ pupin vào tới lucke vào;

z'<sub>t</sub> - khoảng cách từ pupin ra tới lucke ra.

Hình 5.7 là hệ quang hai thấu kính. Vật y được tạo ảnh y' ở màn ảnh giữa MAg và y'' ở mặt cuối MA. Chắn sáng CS nằm sau thấu kính thứ nhất. Pupin vào là ảnh ảo nằm sau thấu kính thứ nhất và giới hạn chùm sáng ở phía vật.

Pupin ra là ảnh thật của chắn sáng, nằm sau thấu kính thứ hai và giới hạn chùm sáng ở phía ảnh. Chắn trường trùng với mặt ảnh giữa. Lucke vào là ảnh thật của chắn trường nằm trùng với mặt chứa vật và giới hạn phần vật được tạo ảnh. Lucke ra là ảnh thật của chắn trường, nằm trùng với mặt ảnh cuối và giới hạn phần ảnh được tạo nên.

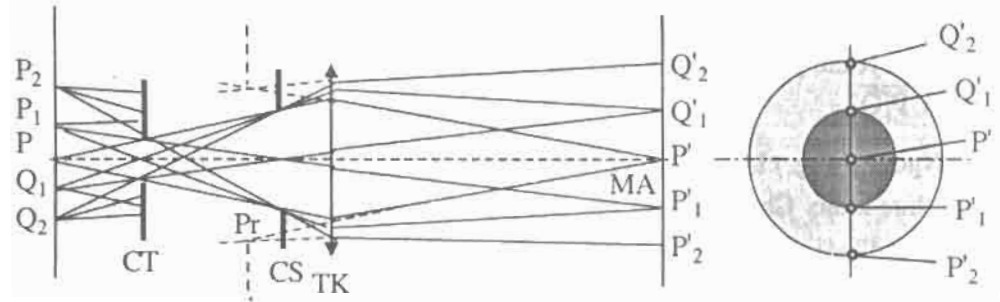


**Hình 5.7.** Chắn sáng và chắn trường của hệ hai thấu kính:

CS - chắn sáng; CT - chắn trường; TK<sub>1</sub>, TK<sub>2</sub> - thấu kính (1) và thấu kính (2); Pv và Pr - pupin vào và pupin ra; Lv và Lr - lucke vào và lucke ra; y - vật; y' - ảnh giữa; y'' - ảnh cuối.

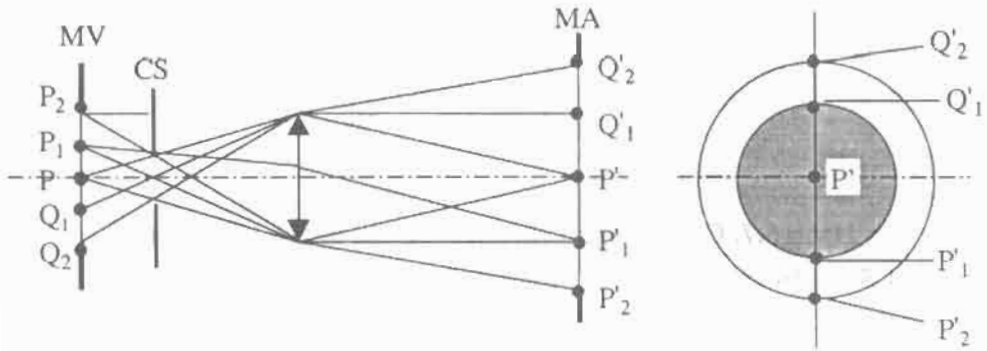
### 5.3. HIỆN TƯỢNG GIẢM DẪN ĐỘ RỜI Ở MÉP ẢNH

Hiện tượng giảm dần độ rời ở mép ảnh là do những nguyên nhân sau đây: Hoặc là vị trí của vòng chắn trường không đúng cho nên lucke vào không trùng với mặt chứa vật và lucke ra không trùng mặt ảnh (hình 5.8); hoặc là vòng chắn trường quá lớn (hình 5.9). Như vậy cần chọn vị trí và độ lớn thích hợp cho vòng chắn trường.



**Hình 5.8.** Lucke vào không đúng vị trí.

Ở hình 5.8, chắn trường nằm ngoài mặt chứa vật nên che khuất một phần lượng quang thông (kể từ các vật điểm  $P_1, Q_1$ ) hoặc hoàn toàn (cho đến các vật điểm  $P_2, Q_2$ ) qua hệ quang để tạo ảnh. Vì vậy, tuy các vật điểm trên toàn bộ mặt chứa vật cùng độ rọi nhưng ở mặt ảnh chỉ các ảnh điểm nằm trong miền với đường kính  $\overline{P'_1Q'_1}$  có độ rọi như nhau. Các ảnh điểm nằm trong miền vành khăn từ  $P'_1$  đến  $P'_2$  và  $Q'_1$  đến  $Q'_2$  thì có độ rọi giảm dần từ trong ra ngoài. Như vậy chắn trường tạo nên giảm dần độ rọi ở mép ảnh. Hiện tượng này được hạn chế bằng cách đưa vòng chắn trường về trùng với mặt vật hay mặt ảnh.



**Hình 5.9.** Vòng chắn trường quá lớn.

Ở hình 5.9 chắn trường nằm trùng mặt vật nhưng quá lớn. Tuy các vật điểm trên toàn bộ mặt chứa vật cùng độ rọi nhưng ở mặt ảnh chỉ các ảnh điểm nằm trong miền với đường kính  $\overline{P'_1Q'_1}$  thì có độ rọi như nhau. Các ảnh điểm nằm ở miền vành khăn từ  $P'_1$  đến  $P'_2$  thì có độ rọi giảm dần từ trong ra ngoài, do một lượng quang thông không qua thấu kính TK để vào hệ quang. Lượng quang thông từ những vật điểm càng xa  $P_1$  ra ngoài (song vẫn nằm trong chắn trường) càng bị che khuất nhiều. Do chắn trường lớn dẫn tới giảm dần độ rọi ở mép ảnh. Khắc phục hiện tượng trên bằng cách làm nhỏ vòng chắn trường bằng độ lớn  $\overline{P'_1Q'_1}$ .

Ngoài vòng chắn sáng và vòng chắn trường, hệ quang còn nhiều vòng chắn thực khác. Chúng là các giá đỡ thấu kính, đỡ gương, đỡ lăng kính và tấm che ốp các loại. Chúng không tham gia quá trình tạo ảnh, nhưng khi kích thước và vị trí của chúng không thích hợp với vòng chắn sáng và vòng chắn trường thì chúng ảnh hưởng tới chất lượng ảnh. Ảnh bị che khuất một phần, không rõ nét, giảm dần độ rọi ở mép v.v...

## 5.4. GIỚI HẠN ĐỘ RỌI CỦA ẢNH

Độ rọi trên mặt ảnh phụ thuộc vào nhiều yếu tố: độ chói của vật B, lượng quang thông vào hệ quang, vị trí vật điểm trên bề mặt vật, vị trí và độ lớn pupin vào, các hệ số tán xạ, phản xạ, hấp thụ của hệ quang. Hãy xét hai trường hợp:

### • Vật trong miền gần trục

Giả sử phần tử vật  $dF$  có độ chói B, được tạo ảnh thành  $dF'$  qua hệ quang với góc mở là  $2u$  thì lượng quang thông vào hệ để tạo ảnh được tính theo:

$$d\Phi = \pi \cdot B \cdot n^2 \cdot \sin^2 u \cdot dF \quad (5.6)$$

$$= \pi \cdot B \cdot A^2 \cdot dF; \text{ lm} = \text{sb} \cdot \text{sr} \cdot \text{cm}^2 \quad (5.7)$$

Lượng quang thông qua hệ quang trực tiếp tạo độ rọi E của ảnh sẽ là:

$$d\Phi' = \rho \cdot d\Phi = \rho \cdot \pi \cdot B \cdot n^2 \cdot \sin^2 u \cdot dF \quad (5.8)$$

Do  $dF = dF'/\beta^2$  nên:

$$d\Phi' = \frac{\rho \cdot \pi \cdot B \cdot n^2 \cdot \sin^2 u \cdot dF'}{\beta'^2} \quad (5.9)$$

Độ rọi E trên mặt ảnh ở miền gần trục:

$$E = \frac{d\Phi'}{dF'}$$

$$E = \rho \cdot \pi \cdot B \cdot \frac{A^2}{\beta'^2}; \text{ lux} \quad (5.10)$$

$\rho$  - hệ số cho qua của hệ quang.

Hệ quang có hệ số hấp thụ  $\sigma$ , hệ số phản xạ  $\tau$ , hệ số tán xạ là  $\iota$  thì hệ số cho qua  $\rho$  được tính theo:

$$\rho = (1 - \sigma)(1 - \tau)(1 - \iota) \quad (5.11)$$

### • Vật ở xa trục

Phần tử vật  $dF$  với góc mở trường  $w$  thì lượng quang thông vào hệ với góc mở  $u$  được tính theo:

$$d\Phi = \pi \cdot B \cdot n^2 \cdot \sin^2 u \cdot dF \cdot \cos^4 w \quad (5.12)$$

Lượng quang thông qua hệ trực tiếp tạo độ rọi của hệ:

$$d\Phi' = \rho \cdot \pi \cdot B \cdot n^2 \cdot \sin^2 u \cdot dF \cdot \cos^4 w$$

$$d\Phi' = \frac{\rho \cdot \pi \cdot B \cdot n^2 \cdot \sin^2 u \cdot dF' \cdot \cos^4 w}{\beta'^2} \quad (5.13)$$

Độ rọi E trên mặt ảnh ở miền xa trục:

$$E = \rho \cdot \pi \cdot B \frac{A^2}{\beta'^2} \cos^4 w ; \text{ lux} \quad (5.14)$$

Các dụng cụ quang tạo ảnh vật ở xa hoặc ở vô cùng cho ảnh có tiết diện F' thì với cách tính gần đúng có sẽ sử dụng các công thức tính quang thông và độ rọi như sau:

Quang thông vào hệ:

$$\Phi = \frac{\rho \cdot \pi \cdot B \cdot F'}{4k^2 [1 - (\beta' / \beta'_p)^2]} ; \text{ lm} = \text{sb sr cm}^2 \quad (5.15)$$

Độ rọi của ảnh F':

$$E = \frac{\rho \cdot \pi \cdot B}{4k^2 [1 - (\beta' / \beta'_p)^2]} ; \text{ lux} \quad (5.16)$$

## Chương VI

# MẮT - MỘT DỤNG CỤ QUANG HỌC HOÀN THIỆN

### 6.1. CẤU TẠO CỦA MẮT NGƯỜI (hình 6.1)

Về phương diện quang học mắt là một thể hình cầu. Bỏ đôi mắt ta có thể nhận thấy mắt gồm một số phần chính sau:

1. Giác mạc: Hình một chòm cầu, cứng, chiết suất 1,378; bán kính cong mặt trước  $r_1 = 7,7$  mm; bán kính cong mặt sau  $r_2 = 6,8$  mm. Giác mạc ngăn cách môi trường không khí với buồng trước của mắt.

2. Buồng trước mắt: Liên kế sau giác mạc, chứa thủy tinh dịch - là chất lỏng trong suốt, chiết suất  $n = 1,336$ .

3. Con ngươi: Đường kính cong của con ngươi thay đổi được từ 2 đến 8 mm.

4. Thủy tinh thể: Có dạng một thấu kính hội tụ hai bán kính cong  $r_1$  và  $r_2$ . Chiết suất tăng từ ngoài ( $n = 1,338$ ) vào trong ( $n = 1,406$ ). Các bán kính cong của thủy tinh thể thay đổi được phù hợp với nhìn thực tế. Khi nhìn xa  $r_1 = 10$  mm và  $r_2 = -6$  mm. Khi nhìn gần  $r_1 = r_2 = 5,33$  mm. Nhờ đó mà bề dày thủy tinh thể thay đổi được từ  $d = 3,6$  đến  $d = 4$  mm.

5. Buồng sau mắt: Màng sau thủy tinh thể chứa thủy tinh dịch, chiết suất  $n = 1,336$ .

6. Vỡng mạc: Là màng mỏng ở đáy mắt, chứa đựng các tế bào thần kinh thị giác nhận biết tín hiệu hình ảnh và màu sắc. Hai loại tế bào thị giác: tế bào nón và tế bào gậy. Có khoảng  $1,2 \cdot 10^8$  tế bào gậy. Đường kính tế bào gậy khoảng 2  $\mu\text{m}$ . Có khoảng  $7 \cdot 10^6$  tế bào nón. Đường kính mỗi tế bào nón khoảng 4  $\mu\text{m}$ . Tế bào nón và tế bào gậy phân bố xen kẽ nhau trên vỡng mạc. Tế bào nón nhận biết tốt với ba màu sắc: đỏ, lơ và lam nhạt. Tế bào gậy nhạy cảm tốt với độ đậm nhạt của ánh sáng. Khi đêm tối hoặc chiếu sáng kém thì chỉ có tế bào gậy cảm giác, bởi vậy ta không nhận biết được màu sắc trong đêm tối.

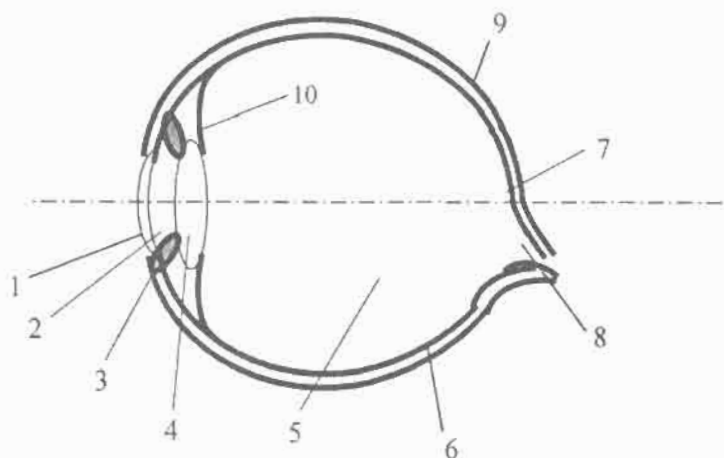
7. Điểm vàng: Đường kính khoảng 1 mm. Nơi chỉ tập trung các tế bào nón. Nơi đây nhạy cảm nhất về màu sắc. Càng xa điểm vàng, sự phân bố các tế bào nón càng giảm đi.



8. Điểm mù: Đây là đầu nối các dây thần kinh lên não. Điểm mù nằm lệch xuống dưới so với trục quang gốc khoảng  $2^{\circ} + 3^{\circ}$ .

9. Vòm mắt: Hộp với hình cầu bao bọc lấy các phần của mắt. Các mạch máu nuôi mắt được dẫn trên vòm mắt. Lớp dưới vòm mắt được bao phủ một lớp màu đen để chống phản xạ nhiều ánh sáng trong vòm mắt.

10. Cơ kính mắt: Bám chặt quanh thủy tinh thể để đảm bảo điều tiết xa gần của mắt.



**Hình 6.1.** Cấu tạo của mắt.

## 6.2. CÁC TÍNH CHẤT QUANG CỦA MẮT

Giác mạc, buồng trước, thủy tinh thể, buồng sau của mắt được coi là hệ quang tổng hợp tiêu cự  $f = -17,14 \text{ mm}$  và  $f' = 22,9 \text{ mm}$ . Con người mắt làm nhiệm vụ vòng chắn sáng. Võng mạc là màn ảnh tiếp nhận hình ảnh và màu sắc. Mắt là hệ quang phức tạp có một số đặc tính sau:

1- Khả năng phân giải: Mắt bình thường nhận biết các vật lập với mắt góc nhìn  $\sigma \geq 1$ . Giá trị  $\sigma = 1'$  ( $\cong 0,00029 \text{ rad}$ ) được gọi là khả năng phân giải của mắt. Khả năng phân giải phụ thuộc vào tuổi tác, vào sức khỏe của mỗi người. Nói chung càng về già khả năng phân giải càng kém. Khả năng phân giải còn phụ thuộc vào điều kiện vật được chiếu sáng nhiều ít khác nhau. Khả năng phân giải giảm đi khi vật được chiếu sáng không tốt.

2- Khả năng nhận biết sáng tối: Mắt có khả năng thích ứng với độ chói khác nhau. Mắt hoàn toàn nhận biết sự vật với thông lượng  $4.10^{-17}$  tương ứng

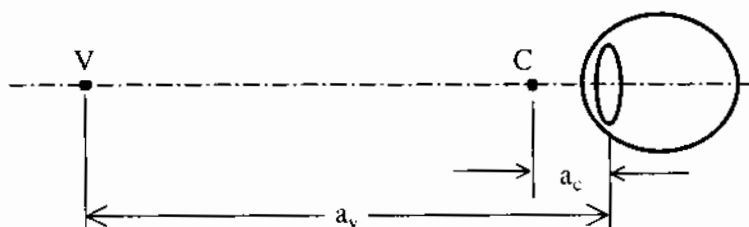
với  $5 \cdot 10^{-19}$ , lux đến  $2 \cdot 10^{-5}$  tương đương  $2,5 \cdot 10^7$  lux. Để thích nghi sáng tối, con người thay đổi độ lớn từ 2mm đến 8mm.

3- Khả năng nhận biết màu sắc: Nhờ các tế bào nón nhận biết ba màu cơ bản đỏ, lơ và lam nhạt mà con người nhận được màu sắc vô cùng phong phú của vật thể tự nhiên. Khả năng nhận biết màu sắc của mắt phụ thuộc trực tiếp và đáng kể vào điều kiện vật được chiếu sáng.

4- Khả năng điều tiết khoảng cách của mắt: Nói chung vật bất kỳ ở vị trí nào – xa hay gần so với mắt, vẫn được mắt điều tiết để ảnh rõ nét trên võng mạc. Điểm xa nhất mắt vẫn nhìn rõ nét mà mắt không phải điều tiết được gọi là điểm cực viễn V và cách mắt khoảng nhìn cực viễn  $a_v$ . Mắt người bình thường không có khuyết tật thì điểm cực viễn ở vô cùng. Điểm gần nhất mắt vẫn điều tiết được để nhìn rõ vật gọi là điểm cực cận và cách mắt khoảng nhìn cực cận  $a_c$ . Mắt bình thường không có khuyết tật thì điểm cực cận ở cách mắt khoảng 200 mm. Như vậy mắt điều tiết để rõ vật trong khoảng L (hình 6.2):

$$L = a_v - a_c$$

L được gọi là khoảng điều tiết khoảng cách của mắt. Nó phụ thuộc vào tuổi và sức khoẻ của con người.



Hình 6.2. Khoảng điều tiết của mắt.

5- Khả năng lưu ảnh: Mắt có khả năng lưu lại những hình ảnh trên võng mạc một thời gian nhất định. Mắt bình thường thời gian lưu ảnh khoảng 1/25 giây. Chính nhờ khả năng này mà những hình ảnh xảy ra không liên tục, gián đoạn với tần số  $f > 25$  Hz được mắt cảm nhận là hình ảnh liên tục. Các hình ảnh trên vô tuyến truyền hình, màn ảnh chiếu phim là những hình ảnh chiếu không liên tục. Mắt chúng ta tưởng lầm là hình ảnh là liên tục.

6- Khả năng lập thể: Khả năng lập thể của mắt là mắt nhận biết được vật thể có kích thước ba chiều. Con người có khả năng lập thể là nhờ hai con mắt đồng thời cùng quan sát sự vật.

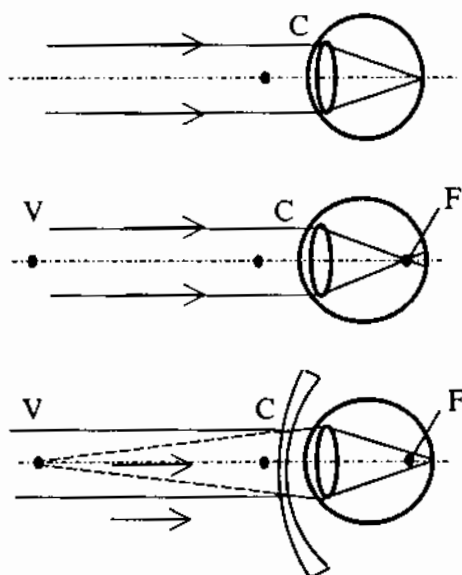
## 6.3. TẬT CỦA MẮT VÀ CÁCH CHỮA

Có thể coi mắt là hệ quang rất phức tạp. Mắt cũng có nhiều sai sót và lỗi tật. Ngoài những lỗi bẩm sinh, còn có lỗi hình thành và thay đổi trong suốt cuộc đời của con người.

### 6.3.1. Cận thị và cách chữa

Mắt không có lỗi, nhìn vật ở vô cùng không phải điều tiết. Điểm cực viễn ở vô cùng  $a_v = \infty$  và tiêu cự thứ hai  $f'$  nằm trùng với võng mạc (hình 6.3a). Nhiều người có nhãn cầu mắt quá dài hoặc tiêu cự mắt nhỏ nên tiêu diện thứ hai  $F'$  của mắt không trùng với võng mạc (hình 6.3b) mà nằm trước võng mạc. Bởi vậy họ không nhìn được vật ở xa mà chỉ nhìn rõ vật ở gần mắt. Mắt của họ có lỗi cận thị. Điểm cực viễn  $V$  của người cận thị ở rất gần mắt, thậm chí chỉ vài trăm cm. Khoảng điều tiết  $L$  của mắt cận thị hẹp hơn nhiều so với mắt bình thường.

Người cận thị phải đeo kính cận – một loại kính phân kỳ tụ số âm. Độ tụ của kính  $D' = 1/a_v$ . Kính cận tạo ảnh của vật ngoài phạm vi điều tiết thành ảnh ảo nằm trong miền điều tiết (hình 6.3c). Mắt đưa các ảnh ảo này lên võng mạc để nhìn rõ vật.

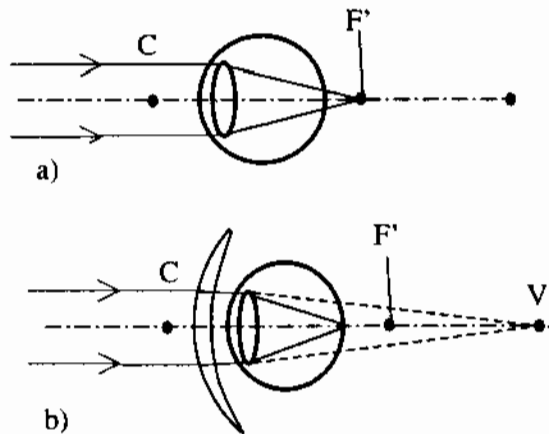


Hình 6.3. Mắt người:

- a- mắt người bình thường; b- mắt người cận thị;
- c- mắt người cận thị mang kính cận.

### 6.3.2. Viễn thị và cách chữa

Một số người lại không nhìn gần được. Mắt không đủ khả năng điều tiết để nhìn vật ở gần. Tiêu cự mắt quá lớn hoặc nhãn cầu mắt quá ngắn (hình 6.4a). nên điểm cực cận nằm xa khỏi võng mạc mắt. Lỗi này của mắt được gọi là viễn thị. Người viễn thị cần đeo kính viễn để nhìn vật ở gần (hình 6.4b). Kính viễn là một loại thấu kính hội tụ, tụ số dương. Kính viễn tạo ảnh của vật ngoài phạm vi điều tiết thành ảnh ảo nằm trong miền điều tiết. Mắt đưa các ảnh ảo này lên võng mạc để nhìn rõ vật.



Hình 6.4. a- mắt viễn thị; b- mắt viễn thị mang kính viễn.

### 6.3.3. Lão thị và cách chữa

Tuổi càng cao thì điểm cực cận càng xa khỏi mắt. Khi tuổi từ 8 đến 9 thì khoảng nhìn cực cận  $a_c$  : từ 9 đến 10 cm. Khi 18 tuổi đến 25 tuổi thì  $a_c \approx 15$  đến 20 cm. Người già tuổi từ 60 đến 70 thì  $a_c \approx 90$  đến 100 cm. Những vật gần mắt nằm sau điểm cực cận mắt không điều tiết nổi để ảnh rõ nét trên võng mạc. Người lão thị cần đeo kính lão để nhìn vật ở gần. Kính lão là thấu kính hội tụ có tụ số dương.

### 6.3.4. Lão cận, lão viễn và cách chữa

Khi già mắt người viễn còn có lỗi lão thị và gọi là mắt lão viễn. Người lão viễn phải có hai kính để tiếp xúc với thế giới xung quanh: kính viễn để nhìn xa, kính lão để đọc sách và nhìn gần.

Khi già mắt người cận còn có lỗi lão thị và gọi là mắt lão cận. Người lão cận phải có hai kính để tiếp xúc với thế giới xung quanh: kính cận để nhìn xa, kính lão để đọc sách và nhìn gần.

### 6.3.5. Loạn thị và cách chữa

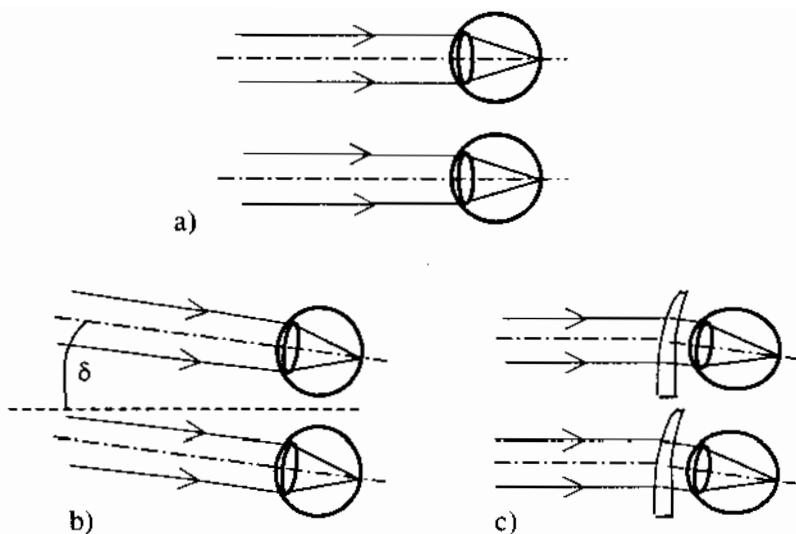
Tụ số của mắt không đổi theo mọi mặt cắt dọc chứa trục mắt. Thực tế, hầu hết mắt người có tụ số  $D'$  thay đổi theo các mặt cắt chứa trục quang khác nhau. Trong số các mặt cắt đó có một mặt mà tụ số lớn nhất  $D'_{\max}$  và một mặt có tụ số nhỏ nhất  $D'_{\min}$ . Hình ảnh hiện lên võng mạc không cùng tỉ lệ tạo ảnh và méo không đồng dạng với vật. Ngoài ra mỗi vật điểm lại có nhiều điểm ảnh ứng với mỗi độ tụ  $D'$  khác nhau, chúng ở xa gần khác nhau không trùng trên võng mạc. Do vậy hình ảnh hiện lên võng mạc bị nhòe đi và không đồng dạng. Ta gọi lỗi này của mắt là lỗi loạn thị. Độ lớn loạn thị phụ thuộc vào độ lệch độ tụ gọi là độ tụ loạn thị  $\Delta D' = D'_{\max} - D'_{\min}$ . Để nhìn vật, hoặc mắt điều tiết rõ nét theo ảnh do  $D_{\max}$  tạo nên thì ảnh do  $D'_{\min}$  lại nằm quá xa võng mạc. Ngược lại khi điều tiết cho rõ nét ứng với mắt chứa  $D'_{\min}$  thì ảnh do  $D'_{\max}$  thì nằm ngoài võng mạc. Chẳng bao giờ người loạn thị nhìn rõ nét cả. Số người loạn thị là rất lớn, do độ loạn nhỏ nên họ vẫn cảm giác là hình ảnh rõ nét.

Mắt loạn phải đeo kính loạn. Người mang kính loạn không những phải sử dụng đúng số loạn mà còn đảm bảo sao cho trục loạn của mắt và trục loạn của kính tương thích với nhau. Kính loạn là các thấu kính có các mặt tang trống hoặc mặt hình xuyên (Phần thấu kính chương III). Nhiều người cận thị và viễn thị còn mắc thêm lỗi loạn thị. Để nhìn rõ vật họ phải mang kính cận loạn hoặc viễn loạn.

### 6.3.6. Mắt lé và cách chữa

Mỗi người có hai mắt, hai trục quang của hai mắt song song với nhau và trùng với hướng quan sát (hình 6.5a). Người có lỗi mắt lé thì khi quan sát, hướng hai trục mắt không trùng với hướng quan sát, mà lập với nhau một góc  $\delta$  (hình 6.5b). Tùy thuộc lé nhiều hay ít mà góc lé lớn nhỏ khác nhau.

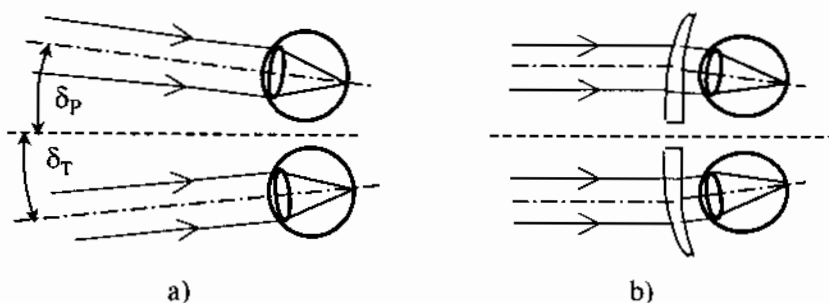
Có thể chữa mắt lé bằng phẫu thuật để đặt lại đúng vị trí hai cầu mắt trong hốc mắt. Phương pháp phổ biến nhất chữa mắt lé là đeo kính lé (hình 6.5c). Kính lé có dạng như nêm quang học với góc nêm  $\gamma = \delta / (n - 1)$ . Các đơn thuốc cho kính lé gồm hai phần: phần ký hiệu về độ lé và phần thứ hai là góc lệch của trục lé so với phương nằm ngang của mắt.



**Hình 6.5.** a- Hai mắt người không lé; b- hai mắt người lé; c- hai mắt người lé mang kính lé.

### 6.3.7. Mắt lác và cách chữa

Người lác có hai trục quang của hai cầu mắt không song song với nhau mà lập với hướng quan sát hai góc khác nhau  $\delta_T$  và  $\delta_P$ . Người mắt lác rất khó khăn khi quan sát sự vật. Thường họ phải nhắm một mắt để làm những công việc chính xác (hình 6.6a). Cũng như mắt lé, có thể chữa mắt lác bằng phẫu thuật để đặt lại đúng vị trí hai cầu mắt trong hốc mắt. Phương pháp phổ biến chữa mắt lác là đeo kính lác (hình 6.6b). Kính lác có dạng như nêm quang học với góc nêm kính trái  $\gamma_T = \delta_T / (n - 1)$  và góc nêm kính phải  $\gamma_P = \delta_P / (n - 1)$ .



**Hình 6.6.** a- Hai mắt người lác; b- hai mắt người lác mang kính lác.

### 6.3.8. Mất loạn màu

Ba loại tế bào nón nhận màu sắc: loại nhận cảm giác màu đỏ, loại nhận màu lục và loại nhận màu xanh lơ. Ba màu trên được gọi là ba màu cơ bản. Chùm sáng có màu sắc kích thích các tế bào nón. Tùy thuộc vào tỉ lệ các màu có trong chùm sáng mà các tế bào đỏ lục lơ cảm nhận nhiều hay ít khác nhau. Nhờ vậy con người nhận biết vật thể có màu sắc trung thực của thế giới tự nhiên.

Khi một trong ba loại tế bào trên không làm việc (bị hỏng) thì mắt không nhận biết chính xác màu sắc nữa và hình ảnh trên võng mạc có màu khác hẳn với màu của vật thể bên ngoài. Lỗi này là của mắt được gọi là mất loạn màu hay mù màu. Người mù màu lơ khi các tế bào lơ bị hỏng, người mù màu lục khi các tế bào lục bị hỏng và người mù màu đỏ khi các tế bào đỏ bị hỏng.

Người mù màu đỏ thì với anh ta các màu đỏ, da cam, vàng cùng có một màu là vàng. Người mù màu lơ thì với anh ta các màu lơ, lam, chàm, tím cùng có một màu lam. Rất ít người mù màu lục. Hiện nay chưa chữa được mù màu cho mắt.

## Chương VII

# MỘT SỐ DỤNG CỤ QUANG HỌC THÔNG DỤNG

### 7.1. NHỮNG ĐẶC TÍNH DỤNG CỤ QUANG HỌC

Dụng cụ quang học được sử dụng làm tăng khả năng tiếp xúc con người với thế giới xung quanh. Nhờ quang cụ mà mắt người quan sát vật lớn hơn, gần lại hơn, sáng hơn, hoặc lưu lại lâu hơn. Nói chung, dụng cụ quang học được chia thành hai nhóm chính. Nhóm tạo ảnh thật gọi là quang cụ khách quan và nhóm tạo ảnh ảo gọi là quang cụ chủ quan.

- Quang cụ khách quan tạo ảnh thật lên màn ảnh thật. Ảnh tồn tại không phụ thuộc vào mắt có quan sát chúng hay không. Các máy chiếu phim, máy ảnh, chiếu phóng hình, dụng cụ quang giảng bài, các hệ chiếu sáng... thuộc nhóm quang cụ khách quan.

- Quang cụ chủ quan tạo ảnh của vật thành ảnh ảo. Mắt đưa ảnh ảo trùng lên võng mạc mà quan sát được vật. Kính mắt, kính lúp, kính hiển vi, hệ thiên văn ống nhòm... thuộc nhóm quang cụ chủ quan. Việc chia ra hai nhóm như thế cũng chỉ tương đối bởi vì nhiều quang cụ khác có cả hai chức năng: vừa tạo ảnh thật vừa tạo ảnh ảo.

#### • Tỷ lệ tạo ảnh

Khi vật  $y$  trên mặt chứa vật  $Q$  được tạo ảnh thành  $y'$  trên mặt ảnh  $Q'$  thì tỷ lệ tạo ảnh được xác định theo:

$$\beta' = \frac{y'}{y}$$

Khi sử dụng, tỷ lệ tạo ảnh một số dụng cụ quang thay đổi tùy thuộc vào vị trí vật và vị trí ảnh như máy quay, máy chiếu... Một số hệ khác như vật kính hiển vi, một số dụng cụ tạo ảnh trong dụng cụ đo, khi mà mặt chứa vật và mặt chứa ảnh đã cố định, thì tỷ lệ tạo ảnh không đổi. Tỷ lệ tạo ảnh không liên quan tới tác động của mắt người quan sát.



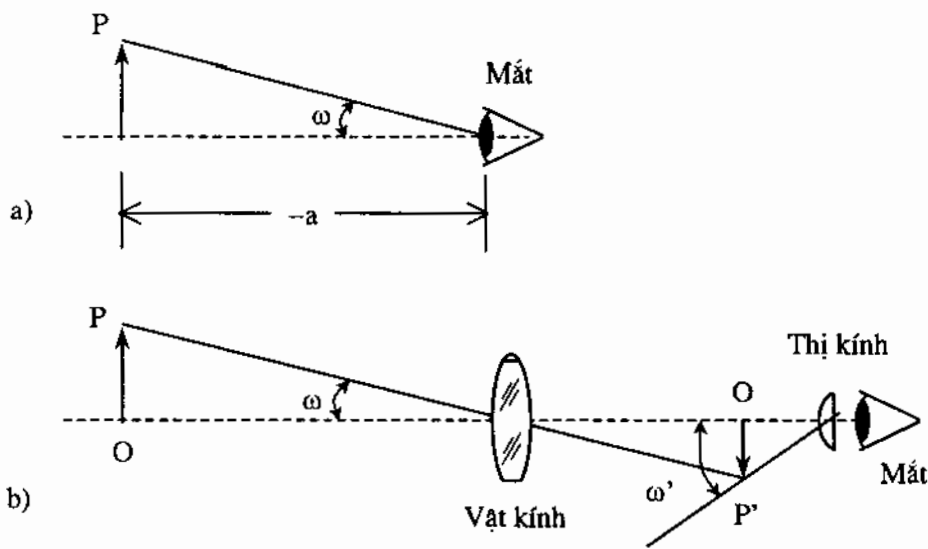
### • Độ phóng đại của quang cụ

Độ phóng đại của quang cụ là chỉ tiêu quan trọng liên quan trực tiếp với mắt người quan sát. Quan sát trực tiếp vật  $y$  cách mắt một khoảng  $a$  dưới góc nhìn  $\omega$  (hình 7.1a) thì biểu thức  $\text{tg } \omega$  được gọi là độ lớn danh nghĩa của vật:

$$\text{tg } \omega = y / a$$

Vật  $y$  được quang cụ (hình 7.1b) tạo ảnh thành  $y'$ . Mắt quan sát với góc nhìn  $\omega'$  lớn hơn. Lúc này độ lớn danh nghĩa của ảnh là  $\text{tg } \omega'$ .

$$\text{tg } \omega' = y' / a$$



**Hình 7.1.** a- Mắt quan sát vật không quang cụ;

b- mắt quan sát vật qua vật kính và thị kính.

Trường hợp này độ lớn danh nghĩa của vật khi quan sát bằng quang cụ  $\text{tg } \omega'$  lớn hơn so với quan sát khi không có quang cụ  $\text{tg } \omega$ . Tỷ số giữa độ lớn danh nghĩa của vật khi quan sát bằng quang cụ và độ lớn danh nghĩa của vật khi qua quang cụ được gọi là độ phóng đại  $\Gamma'$ :

$$\Gamma' = \frac{\text{tg } \omega'}{\text{tg } \omega} \quad (7.1)$$

Hãy phân biệt độ phóng đại và tỉ lệ tạo ảnh của dụng cụ quang như sau:

- Tỉ lệ tạo ảnh  $\beta' = y'/y$  - so sánh độ lớn của ảnh và vật khi hai mặt ảnh và mặt vật không ở vô cùng. Tỷ lệ tạo ảnh thường dùng để đặc tính của các

dụng cụ quang học khác quan.

- Độ phóng đại hệ quang là khả năng mở rộng góc nhìn của dụng cụ so với góc khi nhìn bằng mắt thường (không qua quang cụ). Độ phóng đại thường dùng chỉ đặc tính của các dụng cụ quang học chủ quan.

Độ phóng đại của tổ hợp nhiều hệ quang được xác định theo các hệ quang thành phần. Hãy lấy ví dụ để minh họa. Máy quay đưa vật  $y$  lên mặt phim, máy chiếu hình đưa ảnh ở phim dương bản lên màn hình. Hai dụng cụ quang đã cùng tham gia tạo ảnh. Độ lớn danh nghĩa của vật khi qua máy quay:  $\tan \omega = y / a$ . Ở đây tỷ lệ tạo ảnh của máy quay  $\beta'_1 = f'_1 / (a + f'_1)$ . Máy chiếu hình đưa phim lên màn hình với tỷ lệ tạo ảnh là  $\beta'_2$ . Tỷ lệ chung của tổ hợp là  $\beta' = \beta'_1 \cdot \beta'_2$ . Độ lớn trên màn ảnh là  $y' = y \cdot \beta'$ . Người xem quan sát ảnh  $y'$  với khoảng cách  $a_A$  và độ lớn danh nghĩa là  $\tan \omega' = y' / a_A$ . Độ phóng đại của tổ hợp:

$$\Gamma' = \frac{f'_1 \cdot \beta'_2}{a + f'_1} \cdot \frac{a}{a_A} \quad (7.2)$$

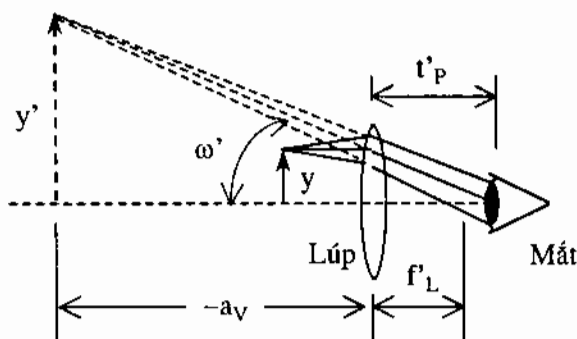
Khi  $a \gg f'_1$  thì

$$\Gamma' = \frac{f'_1 \cdot \beta'_2}{a_A} \quad (7.3)$$

Ví dụ: Tiêu cự máy ảnh  $f'_1 = 50$  mm;  $a = -10$  m;  $\beta'_2 = -72$ ;  $a_A = -6$  m. Theo (7.3) tìm được độ phóng đại  $\Gamma' = 0,6$ . Như vậy ảnh được nhìn trên màn ảnh dưới góc nhìn nhỏ hơn góc nhìn khi nhìn trực tiếp vật.

## 7.2. KÍNH LÚP

### 7.2.1. Cấu tạo và nguyên tắc tạo ảnh qua kính lúp



Hình 7.2. Tạo ảnh qua kính lúp.

- Kính lúp là một hoặc một số thấu kính tạo thành. Kính lúp có tụ số dương  $D' = 1/f'_L > 0$ .

- Khi quan sát vật, kính lúp tạo ảnh ảo  $y'$  lên khoảng cách điều tiết của mắt. Mắt đưa ảnh này lên võng mạc mà nhìn thấy vật. Như vậy, vật  $y$  của kính lúp nằm từ tiêu điểm thứ nhất đến gần kính lúp (hình 7.2).

- Mắt bình thường không có lỗi, vật trùng với tiêu diện thứ nhất của lúp  $F_L$ , ảnh do lúp tạo nên nằm ở vô cùng, trùng với điểm cực viễn của mắt.

### 7.2.2. Độ phóng đại kính lúp

Khi tính xác định các thông số cấu tạo kính lúp, độ phóng đại được xác định theo:

$$\Gamma' = \frac{\text{tg}\omega'}{\text{tg}\omega} = \frac{250}{f'_L} \quad (7.4)$$

Khi vật trùng với tiêu diện  $F$ , độ phóng đại cũng được tính theo (7.4). Những trường hợp khác, độ phóng đại xác định theo:

$$\Gamma' = 1 - \frac{a_v + t'_p}{f'_L} \quad (7.4a)$$

### 7.2.3. Các loại lúp

- Lúp phổ thông: được sử dụng rất rộng rãi. Theo thói quen và tiện lợi, mà mặt nào của lúp cũng có thể quay về phía vật. Mặt khác khi sử dụng, vị trí vật  $a_v$  và nơi đặt mắt  $t'_p$  không cố định. Do vậy khi thiết kế lúp một thấu kính, các mặt cong của lúp thường đối xứng nhau và lúp nhiều thấu kính thì các thấu kính đối xứng nhau (hình 7.3a; 7.3c; 7.3d và 7.3g).

- Lúp thợ cơ khí chính xác. Lúp có vị trí đặt mắt cố định  $t'_p = f'_L$ . Khi sử dụng con người mắt trùng với tiêu diện thứ hai kính lúp. Thợ lắp ráp, sửa chữa đồng hồ dùng loại lúp này và đeo trực tiếp lúp cố định với mắt (hình 7.3b).

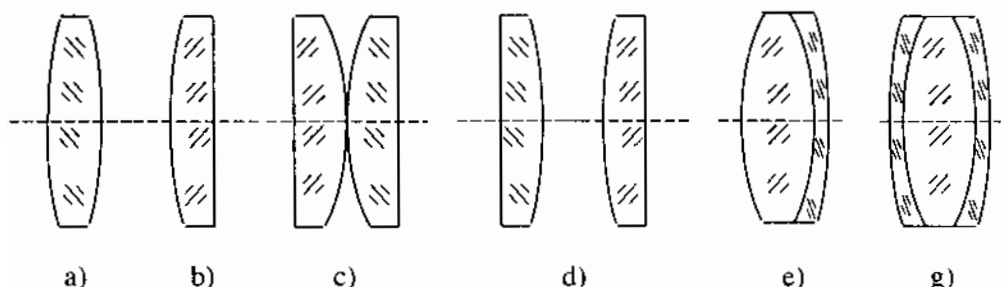
- Lúp có vị trí vật cố định  $-a_v = -f_L$ . Khi sử dụng vật quan sát trùng với tiêu diện thứ nhất của lúp. Lúp soi đếm sợi thuộc loại này. Qua lúp, thợ dệt đếm số sợi của vải trên một đơn vị chiều dài (hình 7.3b).

### 7.2.4. Xác định các thông số cấu tạo của lúp

Các thông số cấu tạo của lúp là: số mặt thấu kính  $k$ , các bán kính cong  $r_i$ , bề dày lúp  $d_i$  và chiết suất của lúp  $n_i$ . Thông thường lúp có một thấu kính. Khi

cân độ phóng đại lớn hơn và hạn chế một số loại quang sai, lúp có hai hoặc ba thấu kính. Để xác định các thông số cấu tạo lúp phải biết độ phóng đại của lúp. Từ độ phóng đại, theo (7.1) tìm được tiêu cự của lúp  $f'_L$ .

#### 7.2.4.1. Lúp đơn giản



Hình 7.3. Một số loại lúp thông dụng.

- Lúp là một thấu kính hội tụ hai mặt cầu đối xứng. Đây là loại lúp phổ thông. Mặt thứ nhất là mặt cầu ( $r_1 = r$ ), mặt thứ hai là mặt cầu ( $r_2 = -r$ ) (hình 7.3a). Chọn trước chiết suất thủy tinh và bề dày thấu kính, rồi tính bán kính cong của hai mặt cầu theo:

$$n.r^2 - 2n.f'_L.(n-1).r + (n-1)^2.d.f'_L = 0 \quad (7.5)$$

Giải ra được hai nghiệm. Chọn nghiệm dương lớn hơn làm bán kính cong  $r$  cho lúp. Phép tính gần đúng coi lúp là thấu kính mỏng thì bán kính cong được xác định theo:

$$r = 2f'_L.(n-1) \quad (7.6)$$

- Lúp có một mặt cầu và một mặt phẳng. Mặt thứ nhất là mặt cầu ( $r_1 > 0$ ), mặt thứ hai là mặt phẳng ( $r_2 = \infty$ ) (hình 7.3b). Lúp được sử dụng khi cố định  $-a_v = -f'_L$  (lúp soi đếm sợi) và hoặc cố định  $t'_p = f'_L$  (lúp thợ cơ khí chính xác). Khi tính cũng chọn trước chiết suất rồi tính bán kính cong mặt cầu thứ nhất theo (7.6). Tùy thuộc vào đường kính ngoài của lúp để chọn bề dày  $d$  cho phù hợp.

#### 7.2.4.2. Lúp phức tạp

Để có độ phóng đại lớn hơn, lúp được ghép từ hai, ba thấu kính (hình 7.3c đến 7.3g). Lúp loại này còn hạn chế một số loại quang sai như méo ảnh và sai sắc.

- Lúp hai thấu kính hội tụ một mặt phẳng một mặt cong được ghép đối xứng nhau (hình 7.3c). Hai thấu kính có cùng bán kính cong  $r$  và cùng chiết suất  $n$ . Hai thấu kính được ghép có khoảng cách giữa chúng bằng "0".

Tiêu cự của mỗi thấu kính  $f'_1$  được tính theo:

$$f'_1 = 2f'_L \quad (7.7)$$

Từ tiêu cự  $f'_1$  tìm được bán kính cong  $r$  của hai thấu kính. Do hệ đối xứng nên loại lúp này chủ yếu hạn chế quang sai méo ảnh.

- Lúp hai thấu kính hội tụ một mặt phẳng một mặt cong được ghép đối xứng nhau (hình 7.3d) và cách nhau khoảng  $d_2$ . Hai thấu kính có cùng bán kính cong  $r$  và cùng chiết suất  $n$ . Ngoài hạn chế méo ảnh do hệ là đối xứng, lúp còn được hạn chế quang sai sắc khi khoảng cách giữa hai thấu kính bằng:

$$d_2 = \frac{f'_1 + f'_2}{2} = f'_1 \quad (7.8)$$

Tiêu cự lúp được xác định theo:

$$f'_L = \frac{f'_1 \cdot f'_2}{f'_1 + f'_2 - d_2} = f'_1 \quad (7.9)$$

Từ tiêu cự  $f'_1$  tìm được bán kính cong  $r$  của hai thấu kính.

- Lúp hai thấu kính dính liền. Hai thấu kính hội tụ và phân kỳ ghép liền nhau bằng hai loại thủy tinh kron và flin (hình 7.3e) và lúp ba thấu kính (hình 7.3e). Hình ảnh do các lúp hai, ba thấu kính tạo nên có phẩm chất tốt hơn bởi khi thiết kế đã chú ý hạn chế các loại quang sai sắc, koma và loạn thị (chương 9). Do vậy độ phóng đại của chúng lớn hơn so với các loại lúp một thấu kính.

## 7.3. KÍNH HIỂN VI

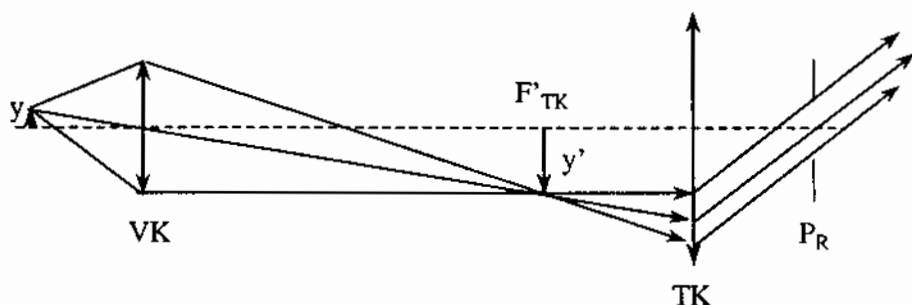
### 7.3.1. Cấu tạo và nguyên lý tạo ảnh qua kính hiển vi

Lúp có độ phóng đại nhỏ, thường độ phóng đại kính lúp khoảng từ 3x đến 10x. Để có độ phóng đại lớn hơn tới hàng trăm lần, phải sử dụng hệ hai thành phần: hệ thứ nhất tạo ảnh thật có tỷ lệ tạo ảnh lớn và thành phần thứ hai đóng vai trò như một lúp đưa ảnh do thành phần thứ nhất tạo nên, lên khoảng điều tiết khoảng cách của mắt. Hệ như vậy được gọi là kính hiển vi.

Hệ hiển vi gồm hai thành phần: vật kính có tiêu cự  $f_{VK}$ , thị kính có tiêu cự  $f_{TK}$ .

Vật thật  $y$  nhỏ và ở rất gần tiêu diện thứ nhất  $F_{VK}$  được vật kính tạo thành ảnh thật  $y'$ , với tỷ lệ tạo ảnh  $\beta'_{VK} = y'/y$ . Tỷ lệ tạo ảnh là thông số quan trọng của mỗi vật kính. Thị kính đưa ảnh thật  $y'$  thành ảnh  $y''$  lên điểm cực viễn của mắt người quan sát (điểm cực viễn của mắt người bình thường ở vô cùng). Thị

kính được coi là một lớp có độ phóng đại  $\Gamma'_{TK} = 250/f'_{TK}$ . Độ phóng đại là thông số quan trọng của mỗi thị kính. Mắt đưa ảnh ảo  $y''$  lên võng mạc thành ảnh  $y'''$  mà mắt quan sát nhìn thấy vật  $y$ . Như vậy ảnh giữa  $y'$  trùng với tiêu diện thứ nhất thị kính  $F_{TK}$ . Hình 7.4 mô tả quá trình tạo ảnh qua kính hiển vi.



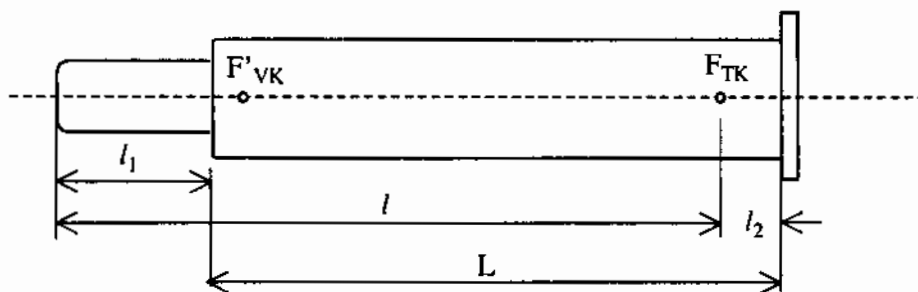
**Hình 7.4.** Cấu tạo và tạo ảnh qua kính hiển vi.

Các loại hiển vi thương mại được thiết kế theo một số quy định chung như sau:

- Độ phóng đại hiển vi thông qua: Độ phóng đại thị kính và tỷ lệ tạo ảnh vật kính. Các thông số này được quy định thống nhất. Thông thường độ phóng đại thị kính: 5×; 6,3×; 8×; 10×; 12,5×; 16×; 20×; 25×. Tỷ lệ tạo ảnh vật kính (mang dấu âm):  $\beta' = 1; 3,2; 4; 6,3; 8; 10; 12,5; 16; 20; 25; 40; 50; 63; 80; 100; 120$ .

- Khoảng cách vật kính  $l_1$  (hình 7.5): Được tính từ vật đến mặt ghép vật kính với ống cơ hiển vi. Khoảng cách này cũng được tiêu chuẩn:  $l_1 = 37$  mm và 45 mm tùy theo mỗi nước.

- Khoảng cách thị kính  $l_2$ : Được tính từ màn ảnh giữa ( $F_{TK}$ ) đến mặt ghép của thị kính với ống cơ hiển vi. Tùy theo các nước khác nhau, khoảng này cũng được quy chuẩn:  $l_2 = 10; 13; 18$  mm.



**Hình 7.5.** Quy chuẩn các khoảng cách của hiển vi.

- Ống cơ hiển vi: còn được gọi là khoảng cơ: được tính từ nơi ghép của vật kính đến nơi ghép của thị kính. Khoảng cơ cũng được quy chuẩn  $L = 160 \div 170$  mm.

- Khoảng cách từ vật đến ảnh giữa:  $l = 192 \div 195$  mm.

- Độ lớn vòng chắn trường hoặc góc mở thị kính. Các thông số này cũng được quy chuẩn:  $2\omega' = 7; 8; 10; 12; 12,5; 14; 15; 19; 23$ .

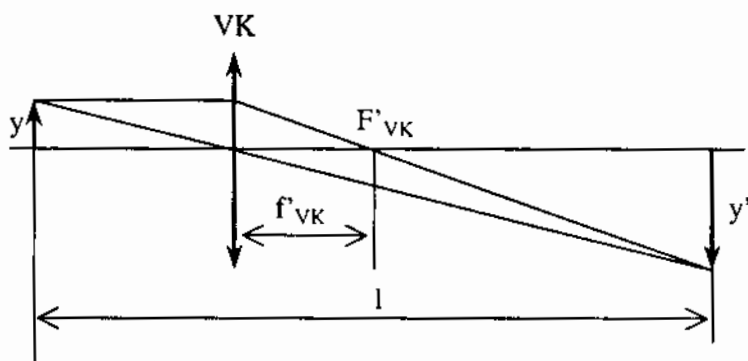
$$2\omega' = 21^{\circ}; 25^{\circ}; 27^{\circ}; 32^{\circ}; 35^{\circ}; 40^{\circ}; 43^{\circ} \dots$$

### 7.3.2. Vật kính hiển vi

Hiển vi là hệ quang chủ quan có tiêu cự vật kính nhỏ và rất nhỏ. Các vật kính thông dụng có  $f'_{VK}$  khoảng vài chục đến vài mm. Thông thường vật kính hiển vi có tỷ lệ tạo ảnh không lớn thì gồm hai thấu kính dính liền: một hội tụ một phân kỳ và từ hai loại thủy tinh: kron và flin, hoặc hai thấu kính rời. Các vật kính có tiêu cự càng nhỏ thì số thấu kính càng nhiều và độ lớn các thấu kính càng bé. Các loại vật kính được hạn chế ba loại quang sai: sai sắc vị trí  $ds'$ , cầu sai  $\delta l_C$  và koma  $\delta l_K$ .

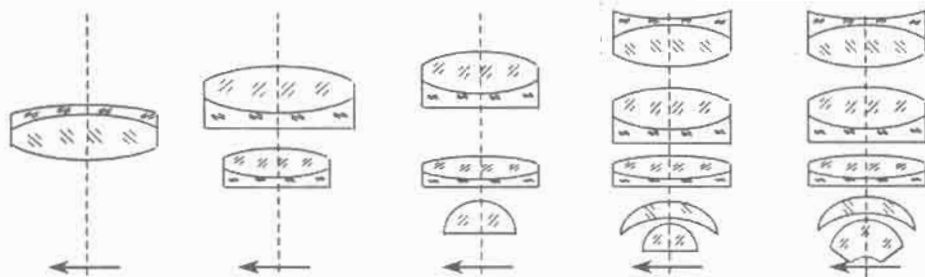
Vật kính hiển vi là một dạng hệ quang tạo ảnh thật vị trí vật gần với tiêu điểm thứ nhất. Khi thiết kế được biết trước tỷ lệ tạo ảnh  $\beta'_{VK}$  và khoảng cách giữa vị trí vật và vị trí ảnh  $l$ . Theo quan hệ quang hình (hình 7.5a), tiêu cự của vật kính được xác định như theo:

$$f' = \frac{-l\beta'_{VK}}{(1 - \beta'_{VK})^2} \quad (7.10)$$



Hình 7.5a. Xác định tiêu cự vật kính.

Hình 7.6 mô phỏng một số loại vật kính. Tỷ lệ tạo ảnh và thủ độ số của các vật kính tăng theo số thấu kính của mỗi vật kính. Các vật kính có thủ độ số lớn thì vật càng tiến sát tới vật kính.



Hình 7.6. Mô phỏng một số loại vật kính.

Bảng 7.1. Một số loại vật kính của Đức và các chỉ tiêu chính

Loại vật kính	Tỷ lệ tạo ảnh $ \beta $	Thủ độ số A	Tiêu cự (f/mm)	Khoảng cách vật (a/mm)
Achromat	2,3	0,08	56,3	9,5
	8	0,20	18	9
	20	0,40	8,3	1,6
	40	0,65	4,4	0,55
	90	1,25	2	0,11
Apochromat	10	0,3	16,2	5
	20	0,65	8,3	0,7
	40	0,95	4,3	0,12
	60	1	2,9	0,22
	90	1,3	2	0,11
Achromat phẳng	2,5	0,07	30,4	8,6
	10	0,25	14,7	5,1
	40	0,65	4,38	1
	100	1,25	1,72	0,03
Achromat trường rộng	25	0,65		0,12
	40	0,65		0,22
	100	1,25		0,08
Apochromat trường rộng	10	0,30		1,8
	25	0,65		0,25
	63	0,90		0,1
	100	1,32		0,09



Hãy phân biệt một số loại vật kính như sau:

**Vật kính achromat** là loại vật kính khử sai sắc hai lần, song vẫn còn tán sắc thứ cấp. Vật kính này được khử tốt cầu sai, loạn thị và méo ảnh nhỏ, méo ảnh dưới khả năng phân giải của mắt. **Vật kính apochromat** là loại vật kính khử sai sắc ba lần, tán sắc thứ cấp hầu như không còn. Các loại quang sai cầu sai, koma và loạn thị rất nhỏ. Quang sai méo ảnh lớn hơn của vật kính achromat, ta có thể ghép với thị kính để hạn chế quang sai méo ảnh.

**Vật kính achromat phẳng và apochromat phẳng** là vật kính có mặt ảnh phẳng, thuận tiện chụp lấy ảnh trên phim, trong khi đó các vật kính khác có mặt ảnh cong về phía trước.

**Các vật kính trường rộng** là các vật kính có đường kính màn ảnh giữa là  $28 \div 32$  mm, trong khi đó các vật kính thường thì đường kính này chỉ có 20 mm.

### 7.3.3. Thị kính hiển vi

Thị kính là một thấu kính có rất nhiều nhược điểm: độ phóng đại nhỏ; không có khả năng hạn chế các loại quang sai và phạm vi tạo ảnh hẹp. Để hạn chế nhược điểm này ta có hai khả năng giải quyết.

Một là tại màn ảnh giữa đặt một kính mờ làm màn ảnh, nhận lấy ảnh thật  $y'$ . Sau màn mờ là thị kính tạo ảnh trực tiếp ảnh này lên khoảng điều tiết khoảng cách  $L$  của mắt. Tuy mở rộng được trường quan sát, nhưng các sai sót lỗi tật của kính mờ và bụi bẩn trên kính đồng thời cũng được tạo ảnh với ảnh  $y'$  lên khoảng điều tiết  $L$  của mắt. Mắt lẫn lộn giữa hình ảnh và sai sót của kính mờ. Nhược điểm quan trọng là kính mờ đã giảm phần lớn cường độ sáng khi qua nó.

Hai là tại màn ảnh giữa đặt một thấu kính hội tụ có xu hướng làm lệch chùm sáng tập trung vào thị kính. Cường độ sáng không giảm so với trường hợp thứ nhất, song các sai sót lỗi tật của kính hội tụ và bụi bẩn trên đó cũng được tạo ảnh với ảnh  $y'$  lên khoảng điều tiết  $L$  của mắt. Để khắc phục hạn chế thứ hai người ta dịch thấu kính hội tụ này ra phía trước một chút hoặc ra sau một chút. Từ nguyên lý đó xuất hiện hai loại thị kính chính là thị kính Huygen và thị kính Ramden.

#### • Thị kính Huygen

Thị kính Huygen có hai thấu kính thành phần, mỗi thấu kính có một mặt lồi và một mặt phẳng. Hai thấu kính cùng loại thủy tinh và được ghép theo hình 7.7a. Hai thấu kính cách nhau một khoảng  $\delta$ . Thấu kính thứ nhất (nằm trước)

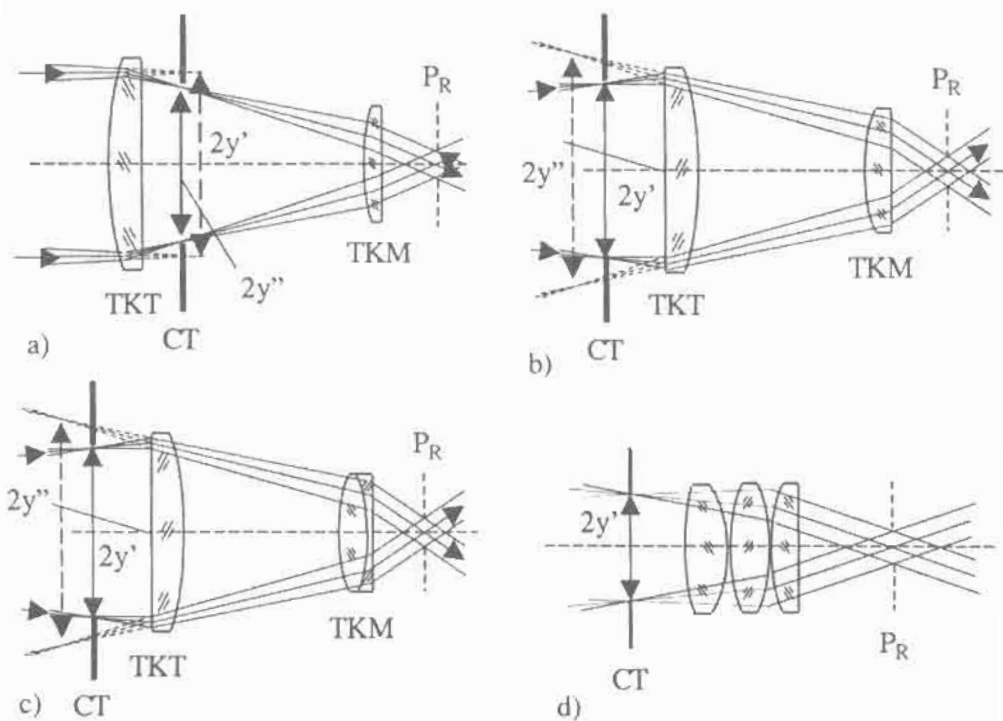
gắn với ảnh  $y'$  gọi là thấu kính trường có  $f'_{TKT} > 0$  và thấu kính thứ hai gắn mắt quan sát gọi là thấu kính mắt. Thấu kính mắt cũng có tiêu cự dương  $f'_{TKM} > 0$ .

Độ lớn  $f'_{TKT}$ ,  $f'_{TKM}$ ,  $d_2$  phụ thuộc tiêu cự thị kính  $f'_{TK}$  và khoảng cách thấu kính mắt với vị trí pupin ra của hệ vô tiêu. Theo [1] thì đối với thị kính Huygen  $t'_P = (0,3 + 0,4) f'_{TK}$  và độ lớn trường quan sát tối đa là  $2.\omega' \leq 40^\circ$ .

#### • Thị kính Ramden

Thị kính Ramden có hai thấu kính thành phần, mỗi thấu kính có một mặt lồi và một mặt phẳng. Hai thấu kính cùng loại thủy tinh và được ghép theo hình 7.7b. Hai thấu kính cách nhau một khoảng  $\delta$ . Thấu kính thứ nhất (nằm sau) gắn với ảnh  $y'$  gọi là thấu kính trường có  $f'_{TKT} > 0$  và thấu kính thứ hai gắn mắt quan sát gọi là thấu kính mắt. Thấu kính mắt cũng có tiêu cự dương  $f'_{TKM} > 0$ .

Độ lớn  $f'_{TKT}$ ,  $f'_{TKM}$ ,  $d_2$  phụ thuộc tiêu cự thị kính  $f'_{TK}$  và khoảng cách thấu kính mắt với vị trí pupin ra của hệ vô tiêu. Theo [1] thì đối với thị kính Ramden  $t'_P = (0,3 + 0,4) f'_{TK}$  và độ lớn trường quan sát tối đa là  $2.\omega' \leq 40^\circ$ .



Hình 7.7. Các loại thị kính:

a- thị kính Huygen; b- thị kính Ramden; c- thị kính Kenle; d- thị kính Othokop.

### • Thị kính Kenle

Về mặt quá trình tạo ảnh, thị kính Kenle giống như thị kính Ramden. Khác nhau ở chỗ, thấu kính mắt của thị kính Kenle được ghép bởi hai thấu kính (hình 7.7c): một hội tụ và một phân kỳ. Chiết suất của thấu kính thứ nhất là kron thì thấu kính thứ hai là flin. Sở dĩ có kết cấu đặc biệt này nhằm để hạn chế sai sắc vị trí. Thị kính Kenle do đó có độ phóng đại lớn hơn và góc mở  $2\omega'$  cũng lớn hơn.

### • Thị kính Othokop

Khoảng cơ của Othokop (hình 7.7d) ngắn hơn, độ phóng đại cũng lớn hơn so với hai loại thị kính Huygen và Ramden.

## 7.3.4. Vòng chắn sáng và vòng chắn trường trong kính hiển vi

### • Vòng chắn sáng

Vòng chắn sáng giới hạn chùm sáng từ vật vào hiển vi để tạo ảnh. Tùy thuộc vào cấu tạo vật kính, vào khả năng chiếu sáng mà vị trí vòng chắn sáng cũng thay đổi theo. Thông thường vị trí vòng chắn sáng chia vật kính thành hai thành phần đối xứng nhau. Vòng chắn sáng trùng với tiêu diện thứ hai vật kính khi vật được chiếu sáng bởi chùm song song. Vật kính có tỷ lệ tạo ảnh thấp, gồm hai thấu kính dính liền hoặc gắn nhau thì vòng chắn sáng trùng với giá đỡ vật kính hoặc pupin vào nằm trước hoặc nằm sau không xa vật kính. Pupin ra hiển vi nằm sau thấu kính mắt một khoảng  $t'_p$  đủ để mắt quan sát thuận tiện. Khoảng này không quá lớn, mắt khó tìm vị trí đặt mắt để quan sát. Khoảng cách này cũng không quá nhỏ đến nỗi mắt không tiến sát được tới vị trí đặt mắt. Vị trí đặt mắt trùng với vị trí pupin ra hiển vi. Khi thiết kế thường chọn  $t'_p$  từ 10 đến 15 mm là thích hợp.

Độ lớn của pupin vào liên quan trực tiếp tới độ lớn con ngươi mắt. Độ lớn con ngươi mắt có thể điều tiết được từ 2 đến 8 mm. Như vậy độ lớn pupin ra được chọn trong khoảng điều tiết lớn bé của con người mắt người.

### • Vòng chắn trường

Vòng chắn trường giới hạn phạm vi vật được tạo ảnh. Vòng chắn trường của hiển vi trùng với ảnh thật  $y'$ . Lucke vào là ảnh thật của vòng chắn trường trùng với mặt chứa vật  $y$ , giới hạn phạm vi vật được tạo ảnh. Lucke ra là ảnh ảo của vòng chắn trường trùng với ảnh ảo  $y''$ . Khi kính hiển vi có thị kính Huygen thì vòng chắn trường trùng với tiêu diện thứ nhất thấu kính mắt. Khi kính hiển

vi có thị kính Ramden thì vòng chắn trường trùng với tiêu diện thứ hai vật kính.

### 7.3.5. Độ phóng đại và khả năng phân giải của kính hiển vi

Độ phóng đại của hiển vi phụ thuộc vào tỷ lệ tạo ảnh của vật kính và độ phóng đại thị kính:

$$\Gamma'_{HV} = \beta'_{VK} \cdot \Gamma'_{TK} \quad (7.11)$$

Hiển vi cũng được coi như một lupa tiêu cự  $f'_{HV}$  nên độ phóng đại cũng được xác định theo:

$$\Gamma'_{HV} = \frac{250}{f'_{HV}} \quad (7.12)$$

trong đó:

$$f'_{HV} = \frac{f'_{VK} \cdot f'_{TK}}{-t} \quad (7.13)$$

$t$  được gọi là khoảng quang của hiển vi, tính từ tiêu điểm thứ hai vật kính  $F'_{VK}$  đến tiêu điểm thứ nhất thị kính  $F_{TK}$ :

$$t = F_{VK} F_{TK}$$

Với điều kiện Relay thì vật kính hiển vi còn phân biệt hai vật điểm kề nhau  $y_{min}$  khi:

$$y_{min} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{2n \cdot \sin u} \quad (7.14)$$

$y_{min}$  được gọi là khả năng phân giải của vật kính hiển vi.

Khả năng phân giải của vật kính hiển vi  $y_{min}$  còn phụ thuộc vào độ phóng đại thị kính và phải nằm trong phạm vi phân giải của mắt (1 đến 2') cho nên độ phóng đại hữu ích của các kính hiển vi phải nằm trong khoảng:

$$\Gamma'_T = 500 A \div 1000 A \quad (7.15)$$

(khi sử dụng ánh sáng trắng  $\lambda = 550 \text{ nm}$  và  $A = n \cdot \sin u$ ).

Khi sử dụng, cần chọn cặp vật kính và thị kính cho phù hợp, để cho độ phóng đại không nhỏ hơn 500 A vì chưa phát huy hết công suất hiển vi. Nhưng nếu chọn độ phóng đại lớn hơn 1000 A thì mắt không phân biệt được các tiết tiết của vật quan sát.

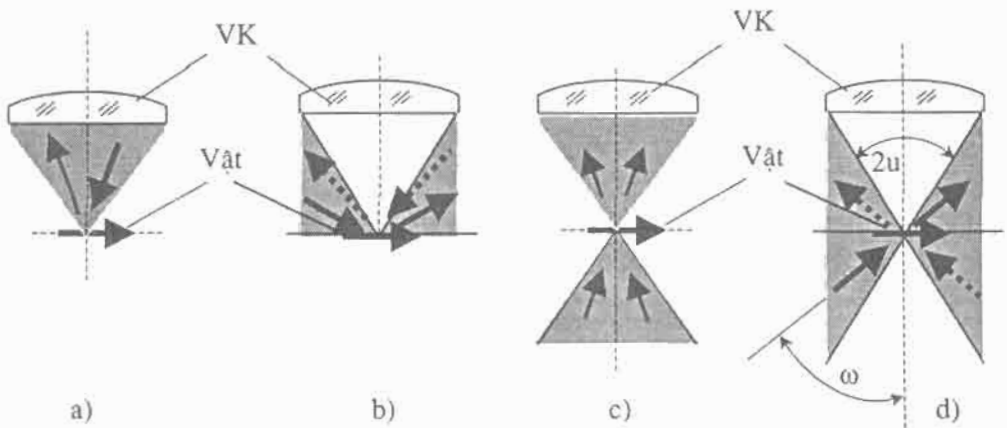
Ví dụ; Khi chọn vật kính có ký hiệu 179.0,17; 40:1.0,65 có nghĩa là: khoảng quang  $t = 179 \text{ mm}$ ; bề dày tấm lam kính che vật là 0,17; vật kính có tỷ lệ tạo ảnh là - 40; thủ độ số  $A = 0,65$ . Theo (7.15) thì  $\Gamma'_T = 325 \div 650$ . Để độ

phóng đại có nghĩa thì nên chọn thị kính có độ phóng đại  $\Gamma'_{TK} = 12,5x$  là phù hợp. Lúc này độ phóng đại của hiển vi sẽ là  $\Gamma'_{HV} = -500$ .

### 7.3.6. Chiếu sáng cho kính hiển vi

Vật kính hiển vi có tỷ lệ tạo ảnh lớn. Khi tỷ lệ tạo ảnh là  $\beta'_{VK}$  thì phần tử bề mặt ảnh lớn hơn  $(\beta'_{VK})^2$  lần so với phần tử bề mặt vật tạo nên nó. Do vậy độ rọi E mặt ảnh đã giảm đi  $(\beta'_{VK})^2$  lần so với độ rọi trên bề mặt vật. Với lý do đó, vật của kính hiển vi phải được chiếu sáng và chiếu sáng với cường độ lớn.

Tùy thuộc vào vật được quan sát mà có bốn phương pháp chiếu sáng:



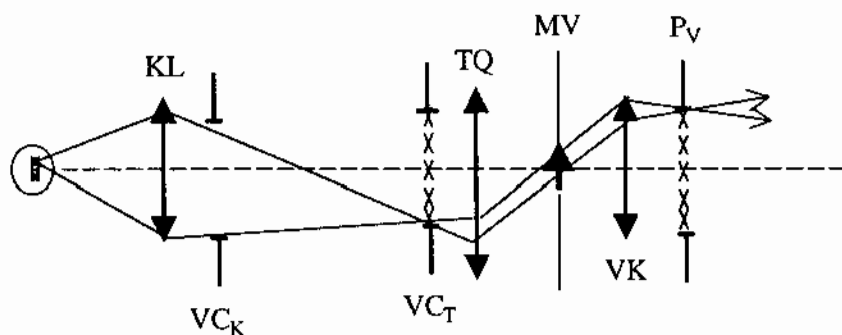
**Hình 7.8.** Các phương pháp chiếu sáng:  
 a- chiếu phản xạ tỏ; b- chiếu phản xạ bóng;  
 c- chiếu xuyên tỏ; d- chiếu xuyên bóng.

Để chiếu sáng cho kính hiển vi cần thỏa mãn ba yêu cầu chính:

- Có khả năng thay đổi độ rọi của vật: Vật có độ rọi yếu, phải chiếu sáng với cường độ lớn, ngược lại vật có độ rọi lớn hơn, phải chiếu sáng với cường độ nhỏ hơn. Để giải quyết yêu cầu này, thì thay đổi kích thước của nguồn sáng thông qua thay đổi độ lớn ảnh của nguồn.
- Phải chiếu sáng đồng đều bề mặt vật: Để giải quyết yêu cầu này, thì chùm sáng qua vật, hoặc phản xạ trên mặt vật là chùm sáng song song. Cũng có thể ảnh của nguồn sáng được tạo ảnh lên pupin vào vật kính.
- Thay đổi được độ lớn phạm vi quan sát của vật phù hợp với độ phóng đại hiển vi. Mỗi hiển vi có nhiều vật kính và nhiều thị kính, nên có nhiều độ phóng đại khác nhau. Khi hiển vi có độ phóng đại càng lớn thì phạm vi vật được tạo

ảnh càng nhỏ và ngược lại, hệ chiếu sáng chỉ chiếu sáng phần vật được tạo ảnh đó. Để giải quyết yêu cầu này, thì vòng chắn trường của hệ chiếu sáng được tạo ảnh lên mặt vật. Thay đổi độ lớn vòng chắn trường là thay đổi được phạm vi chiếu sáng.

Hệ chiếu sáng Kôle thoả mãn cả ba yêu cầu trên có nguyên lý cấu tạo như sau (hình 7.9):



Hình 7.9. Hệ chiếu sáng Kôle.

Nguồn sáng được thấu kính kôlek KL tạo ảnh về trùng với vòng chắn tụ quang  $VC_T$ . Tụ quang TQ và vật kính hiển vi VK tạo ảnh của nguồn sáng lên pupin vào  $P_V$  vật kính. Như vậy khi thay đổi độ lớn  $VC_T$  là thay đổi được cường độ sáng qua vật MV tức là thoả mãn điều kiện thứ nhất và thứ hai. Tụ quang TQ tạo ảnh vòng chắn kôlek  $VC_K$  lên mặt chứa vật MV, khi thay đổi độ lớn vòng chắn kôlek, là thay đổi độ lớn phạm vi vật được tạo ảnh tức là thoả mãn điều kiện thứ ba. Hình 7.9 mô tả nguyên lý hệ chiếu sáng Kôle sử dụng chiếu xuyên tỏ cho vật kính hiển vi, hệ chiếu sáng kôle cũng dùng chiếu xuyên bóng khi ghép nó nằm khác phía với vật kính hiển vi. Tương tự, hệ chiếu sáng Kôle cũng dùng chiếu phản xạ tỏ và phản xạ bóng khi ghép nó nằm cùng phía với vật kính.

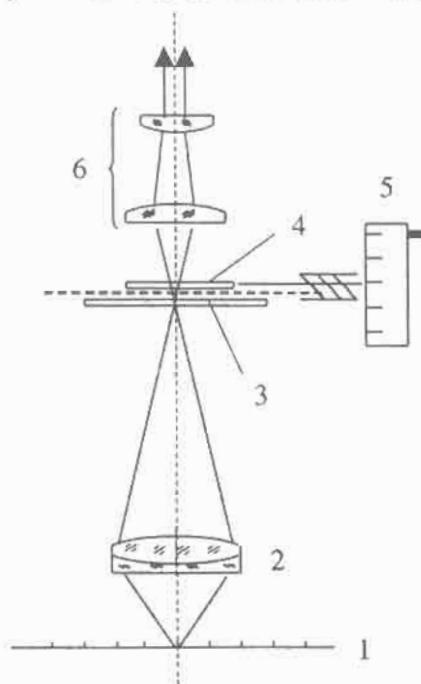
### 7.3.7. Các loại kính hiển vi

#### • Kính hiển vi đo lường

Kính hiển vi đo lường là bộ phận quan trọng trong các dụng cụ đo quang cơ chính xác: Các máy đo toạ độ hai chiều (UMM của Đức và YIM-21 của Nga), đầu phân độ quang học IB-21(của Nga), máy đo độ nhám...

Ngoài vật kính (2) và thị kính (6), các kính hiển vi đo lường (hình 7.10)

còn có thước vật kính (1), thước thị kính (3), thước phụ (4) và bộ đọc số lẻ phần trăm và phần nghìn (5). Có nhiều loại đọc số lẻ trong kính hiển vi đo lường (xem chương IV phần bộ đọc số quang học). Nhờ kính hiển vi đo lường ta phát hiện được các dịch chuyển chiều dài tới 0,001 mm và về góc tới 2".

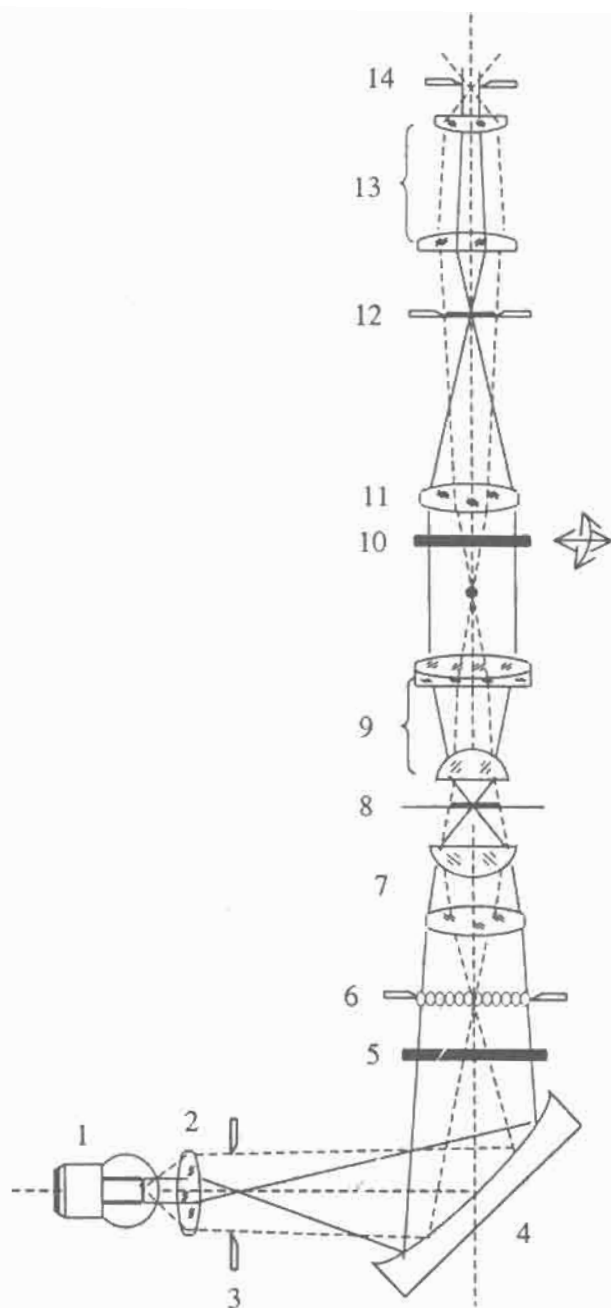


**Hình 7.10.** Kính hiển đo lường:

- 1- thước vật kính; 2- vật kính; 3- thước thị kính;  
4- thước phụ; 5- cơ cấu đọc số lẻ; 6- thị kính.

### ***Kính hiển vi phân cực***

Kính hiển vi phân cực được sử dụng để nghiên cứu cấu trúc vật thể không đồng nhất: xác định cấu trúc của các tế bào, phân tích thành phần các chất trong các mẫu quặng, xác định thành phần phối liệu cho công nghệ chế tạo thủy tinh và sành sứ và công nghệ vải sợi, cấu trúc than đá muối ăn và các hỗn hợp không đồng nhất khác. Hình 7.11 mô tả kính hiển vi phân cực được chiếu sáng bằng hệ Kôle theo chiều xuyên bóng. Tấm phân cực (5) đặt trước vòng chắn tụ quang (6) để tạo chùm phân cực phẳng qua tụ quang (7) rọi lên bề mặt vật (8). Vật kính (9) tạo ảnh vật ra vô cùng. Kính điều tiết (11) đa tiếp ảnh về trùng với tiêu diện thứ hai của nó. Đó là ảnh thật (12). Thị kính Ramden (13) đa ảnh giữa ra vô cùng. Qua quay hoặc dịch chỉnh kính phân tích 10 và bằng mắt qua thị kính ta quan sát được cấu trúc vật không đồng nhất hoặc các thông số cần xác định của vật.



**Hình 7.11.** Kính hiển vi phân cực:

1- nguồn sáng; 2- TK kolek; 3- vòng chắn kolek; 4- gương cầu; 5- tấm phân cực; 6- vòng chắn tụ quang; 7- tụ quang; 8- vật; 9- vật kính hiển vi; 10- kính phân tích; 11- kính điều tiết; 12- ảnh giữa; 13- thị kính; 14- pupin ra



### • Kính hiển vi sinh học

Kính hiển vi sinh học có nhiều kích cỡ khác nhau và dùng trong nhiều công việc khác nhau. Độ phóng đại của hiển vi sinh học là rất lớn tới trên nghìn lần, đặc biệt khi kính được ghép với vật kính chìm có thủ độ số  $A = n \cdot \sin u$  lớn.

### • Kính hiển vi nhiễu xạ

Kính hiển vi nhiễu xạ sử dụng nghiên cứu cấu trúc mạng tinh thể, chúng được sử dụng với chùm tia có bước sóng ngắn tương đương với khoảng cách các nguyên tử. Chùm sóng thích hợp cho loại hiển vi này là chùm tia Røngen (tham khảo chương XI phần 11.3).

## 7.4. HỆ VÔ TIÊU ỐNG NHÒM

### 7.4.1. Cấu tạo và nguyên lý tạo ảnh qua hệ vô tiêu

Khi vật ở xa, khoảng cách từ vật đến người quan sát rất lớn đến nỗi có thể coi chúng bằng vô cùng, do vậy độ lớn danh nghĩa  $\theta$  rất nhỏ. Để quan sát được những vật như vậy ta dùng hệ vô tiêu.

Hệ vô tiêu gồm hai thành phần: vật kính có tiêu cự  $f_{VK}$ , thị kính có tiêu cự  $f_{TK}$ . Hai hệ này được ghép với nhau sao cho tiêu diện thứ hai của vật kính  $F'_{VK}$  trùng với tiêu diện thứ nhất của thị kính  $F_{TK}$ . Do cách ghép như vậy mà chùm sáng song song vào vật kính cũng là chùm sáng song song ra khỏi thị kính. Hệ không có tiêu diện, không có tiêu điểm cho nên gọi là hệ vô tiêu.

Vật thật  $y$  ở xa được vật kính tạo ảnh  $y'$  trên tiêu diện thứ hai  $F'_{VK}$ , thị kính đưa ảnh  $y'$  thành ảnh  $y''$  lên điểm cực viễn của mắt người quan sát, mắt đưa ảnh  $y''$  lên võng mạc thành ảnh  $y'''$  mà mắt quan sát nhìn thấy vật  $y$ . Như vậy ảnh  $y'$  trùng với tiêu diện thứ nhất thị kính  $F_{TK}$ .

Ống nhòm được thiết kế theo nguyên lý trên. Tuy vậy, khi sử dụng qua ống nhòm có thể quan sát được những vật không ở vô cùng mà gần người quan sát. Mặt khác, để những người cận thị và viễn thị cũng quan sát vật mà không phải đeo kính cận hoặc viễn thì thị kính phải được chỉnh sao cho nó lùi xa hoặc tiến lại gần vật kính một cách thích hợp.

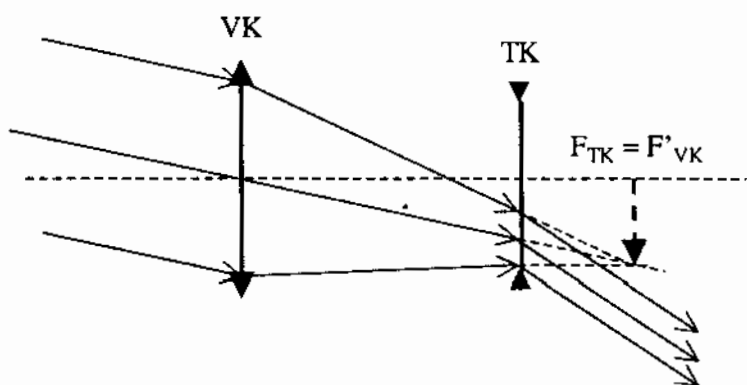
Có hai loại hệ vô tiêu: Hệ Galile và hệ Keple.

Hình 7.12 mô tả hệ vô tiêu Galile có vật kính có  $f_{VK} > 0$  ghép với thị kính tiêu cự  $f_{TK} < 0$ . Qua hệ Galile, ảnh mà mắt quan sát được cùng chiều với vật.

Góc mở vật  $2\omega$  qua hệ vô tiêu Galile thành góc  $2\omega'$ .

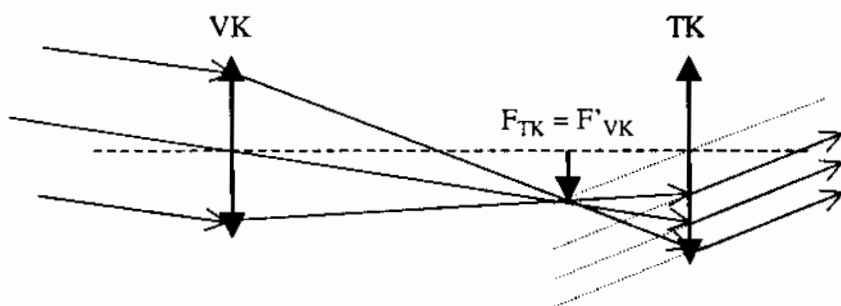
Độ phóng đại hệ Galile:

$$\Gamma = \frac{\text{tg}\omega'}{\text{tg}\omega} \quad (7.16)$$



Hình 7.12. Hệ vô tiêu Galile.

Ngược lại, ở hệ vô tiêu Keple (hình 7.13) thì vật kính có tiêu cự dương  $f_{VK} > 0$  ghép với thị kính cũng có tiêu cự dương  $f_{TK} > 0$ . Do cách ghép này thì ảnh mà mắt quan sát được ngược chiều với vật (ngược cả chiều x và chiều y).



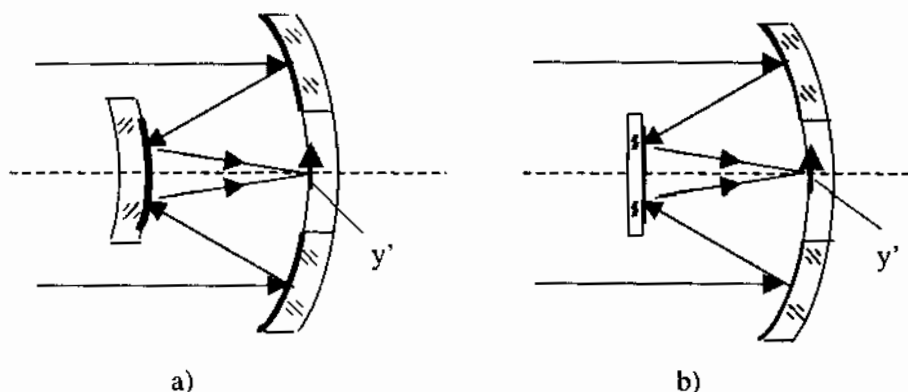
Hình 7.13. Hệ vô tiêu Keple.

#### 7.4.2. Vật kính hệ vô tiêu

Các vật kính hệ vô tiêu có tiêu cự lớn và rất lớn từ 100 mm đến hàng chục nghìn mm. Các kính thiên văn có tiêu cự lớn nhất. Các kính ngắm xa (dùng trong quốc phòng) có tiêu cự lớn. Các kính kinh vĩ, trắc địa có tiêu cự trung bình và các hệ vô tiêu đo lường và ống nhòm xem hát... có tiêu cự nhỏ nhất.

### • Hai loại vật kính hệ vô tiêu

Vật kính hệ vô tiêu bằng thấu kính. Thông dụng nhất vật kính hệ vô tiêu gồm hai thấu kính dính liền. Hai thấu kính bằng hai loại thủy tinh khác nhau: kron và flin. Tụ số hai thấu kính cũng khác nhau một hội tụ và một phân kỳ (xem phần 9.1 - thiết kế viễn vật kính). Bảng PL.4 liệt kê một số vật kính hệ vô tiêu của Nga.



Hình 7.14. Vật kính gương phản xạ.

Vật kính hệ vô tiêu bằng gương phản xạ. Ghép các gương cầu (hình 7.14a) hoặc gương cầu với gương phẳng (hình 7.14b) thành vật kính gương. Vật kính gương có kích thước lớn nên có tỷ lệ tạo ảnh lớn. Để tăng chất lượng ảnh được tạo nên, các gương cầu còn được thay bởi gương mặt parabol tròn xoay.

### 7.4.3. Thị kính hệ vô tiêu

Thị kính giống như lupa đưa ảnh giữa  $y'$  ra vô cùng, mắt đưa ảnh này lên võng mạc mà nhìn thấy được. Chỉ tiêu tiêu biểu của thị kính là độ phóng đại:  $\Gamma_{TK} = 250/f'_{TK}$ .

Hai loại thị kính: Thị kính có tụ số dương (xem phần 7.2.3) ghép với vật kính để được hệ vô tiêu Keple. Thị kính tụ số âm để ghép với vật kính thành hệ vô tiêu Galile.

### 7.4.4. Chắn sáng và chắn trường của hệ vô tiêu

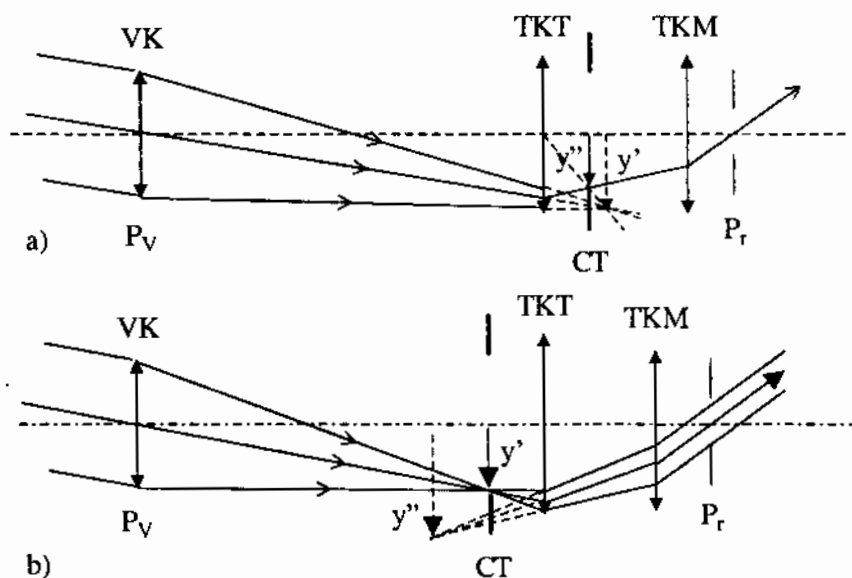
#### • Vòng chắn sáng

Vòng chắn sáng giới hạn chùm sáng từ vật vào hệ vô tiêu. Vòng chắn sáng trùng với giá đỡ vật kính. Pupin ra nằm sau thấu kính mắt một khoảng  $t'_p$  đủ để

mắt quan sát thuận tiện (hình 7.15). Khoảng này không quá lớn, mắt khó tìm vị trí đặt mắt để quan sát. Khoảng cách này cũng không quá nhỏ đến nỗi mắt không tiến sát được tới vị trí đặt mắt. Vị trí đặt mắt trùng với vị trí pupin ra. Khi thiết kế thường chọn  $t'_p$  từ 10 đến 15 mm là thích hợp. Độ lớn pupin ra nằm trong khoảng điều tiết của con người mắt: từ 2 đến 8 mm.

### • Vòng chắn trường

Vòng chắn trường giới hạn phạm vi vật được tạo ảnh. Vòng chắn trường của hệ vô tiêu Keple trùng với ảnh  $y'$ . Lucke vào là ảnh thật của vòng chắn trường trùng với mặt chứa vật  $y$ , giới hạn phạm vi vật được tạo ảnh. Lucke ra là ảnh ảo của vòng chắn trường trùng với ảnh ảo  $y''$ . Khi hệ vô tiêu có thị kính Huygen thì vòng chắn trường CT trùng với tiêu diện thứ nhất thấu kính mắt (trùng với ảnh thật  $y''$ ) (hình 7.15a). Hệ vô tiêu có thị kính Ramden thì vòng chắn trường CT trùng với tiêu diện thứ hai vật kính (trùng với ảnh thật  $y'$ ) (hình 7.15b).



Hình 7.15. Chấn sáng và chắn trường của hệ vô tiêu Keple.

### • Chấn sáng và chắn trường trong hệ Galile

Do thị kính có tụ số âm, nên vòng chắn sáng của vô tiêu Galile chính là con người mắt người quan sát. Khi quan sát mắt trùng với tiêu diện thứ nhất thị kính thì pupin vào của vô tiêu trùng với tiêu diện thứ nhất vật kính. Chấn trường của vô tiêu Galile là giá đỡ vật kính. Do chắn trường không trùng với vật hoặc ảnh

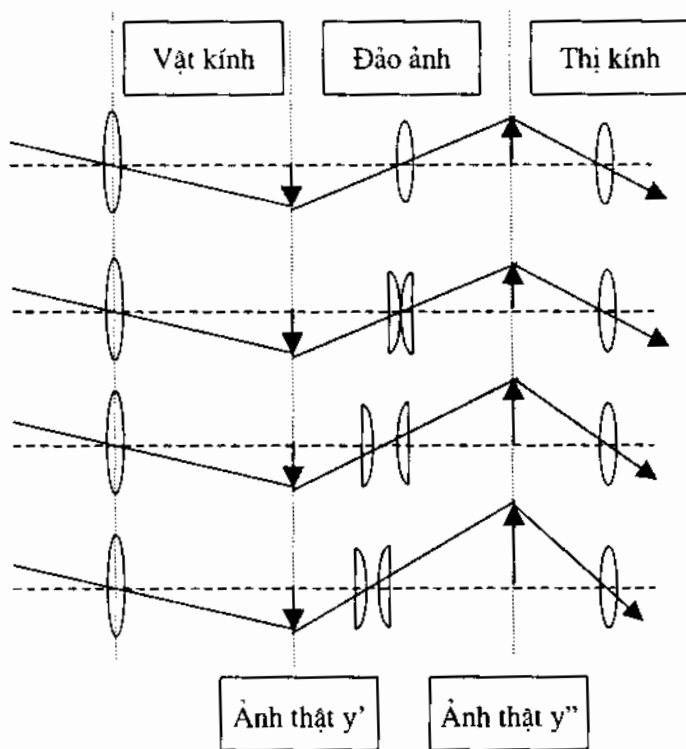
thật, nên ảnh được tạo nên có hiện tượng giảm dần cường độ sáng ở mép ảnh (xem phần 5.2 chương 5).

#### 7.4.5. Hệ đảo ảnh ở vô tiêu Keple

Ở hệ vô tiêu Keple, ảnh quan sát ngược chiều với vật, do vậy ngoài vật kính và thị kính, hệ còn có bộ đảo ảnh. Bộ đảo ảnh vừa đảo được hai chiều  $x$  và  $y$  vừa giữ nguyên đặc tính hệ tọa độ. Bộ đảo ảnh có thể là hệ thấu kính tạo ảnh thật  $y'$  thành  $y''$ , tỷ lệ tạo ảnh là  $\beta_D$  hoặc hệ lăng kính phản xạ Prero I.

##### • Bộ đảo ảnh là hệ thấu kính

Thường bộ đảo ảnh chỉ có một thấu kính với tỷ lệ tạo ảnh  $\beta'_D = -1$  (hình 7.16a) hoặc hai thấu kính một mặt phẳng một mặt cầu ghép theo hình 7.16b, c, d. Khoảng cách giữa hai ảnh thật  $y'$  và  $y''$  là cố định. Khi thay vị trí giữa hai thấu kính với nhau và với vị trí các ảnh thật thì thay đổi độ lớn  $y''$  dẫn đến thay đổi được tỷ lệ tạo ảnh của bộ đảo ảnh. Nhược điểm chủ yếu của đảo ảnh bằng hệ thấu kính là kích thước của hệ quá lớn.

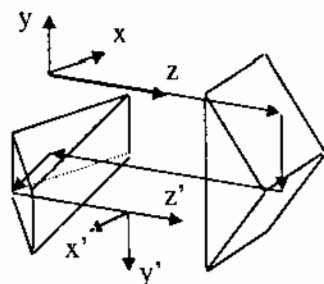


Hình 7.16. Bộ đảo ảnh của vô tiêu Keple.

### • Bộ đảo ảnh bằng hệ lăng kính Pero I

Hệ Perro I kí hiệu  $\langle 4| -1, -1, 1 \rangle$  được ghép bởi các lăng kính tam giác vuông cân phản xạ một lần ghép chéo  $90^\circ$  với nhau sao cho hai mặt của cạnh huyền quay lại với nhau. Hệ này đã xoay hai chiều  $x', y'$  của ảnh góc  $180^\circ$  so với chiều  $x, y$  của vật. Tia ló lệch song song nhưng vẫn giữ nguyên chiều và hướng so với tia tới. Hai hệ tọa độ vật và ảnh vẫn cùng loại với nhau (hình 7.17). Ưu điểm của hệ vô tiêu có đảo ảnh bằng lăng kính là kích thước của hệ ngắn gọn hơn so với đảo ảnh bằng hệ thấu kính, nhưng độ phóng đại chỉ phụ thuộc vào thị kính và vật kính.

Hình 7.17. Hệ Perro 1.



### 7.4.6. Độ phóng đại của hệ vô tiêu ống nhòm

Độ phóng đại hệ vô tiêu ống nhòm phụ thuộc vào đặc tính của vật kính và thị kính qua hai thông số quan trọng là tiêu cự  $f'_{VK}$  và  $f'_{TK}$ :

$$\Gamma_{VT} = -(f'_{VK} / f'_{TK}) \quad (7.17)$$

Hệ Keple có độ phóng đại “-” nên ảnh ngược chiều với vật. Khi hệ vô tiêu có bộ đảo ảnh bằng thấu kính thì độ phóng đại được tính theo:

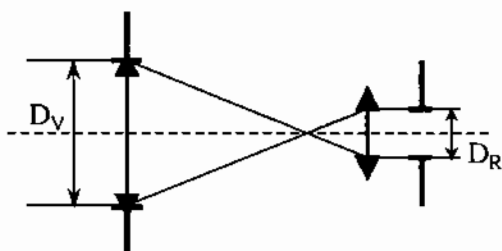
$$\Gamma_{VT} = -(f'_{VK} / f'_{TK}) \cdot \beta'_D$$

Hệ Galile có độ phóng đại “+” nên ảnh cùng chiều với vật.

Khi sử dụng vật có khoảng cách tới người quan sát là  $a$  thì độ phóng đại thay đổi một chút và được tính theo:

$$\Gamma_{VT} = -\frac{f'_{VK}}{f'_{TK}} \cdot \frac{a}{a + f'_{VK}} \quad (7.18)$$

Hình 7.18. Quan hệ giữa pupin vào và pupin ra.



Từ (hình 7.18):  $f'_{VK} / f'_{TK} = D_V / D_R$

Nên độ phóng đại hệ vô tiêu còn được xác định theo:

$$\Gamma_{VT} = -(D_V / D_R) \quad (7.19)$$

Do độ lớn pupin ra  $D_R$  nằm trong khoảng khả năng điều tiết lớn nhỏ của con người mắt ( $2 \div 8$  mm), nên độ phóng đại của hệ vô tiêu phụ thuộc trực tiếp vào độ lớn pupin vào tức là độ lớn giá đỡ vật kính.

#### 7.4.7. Các loại vô tiêu ống nhòm

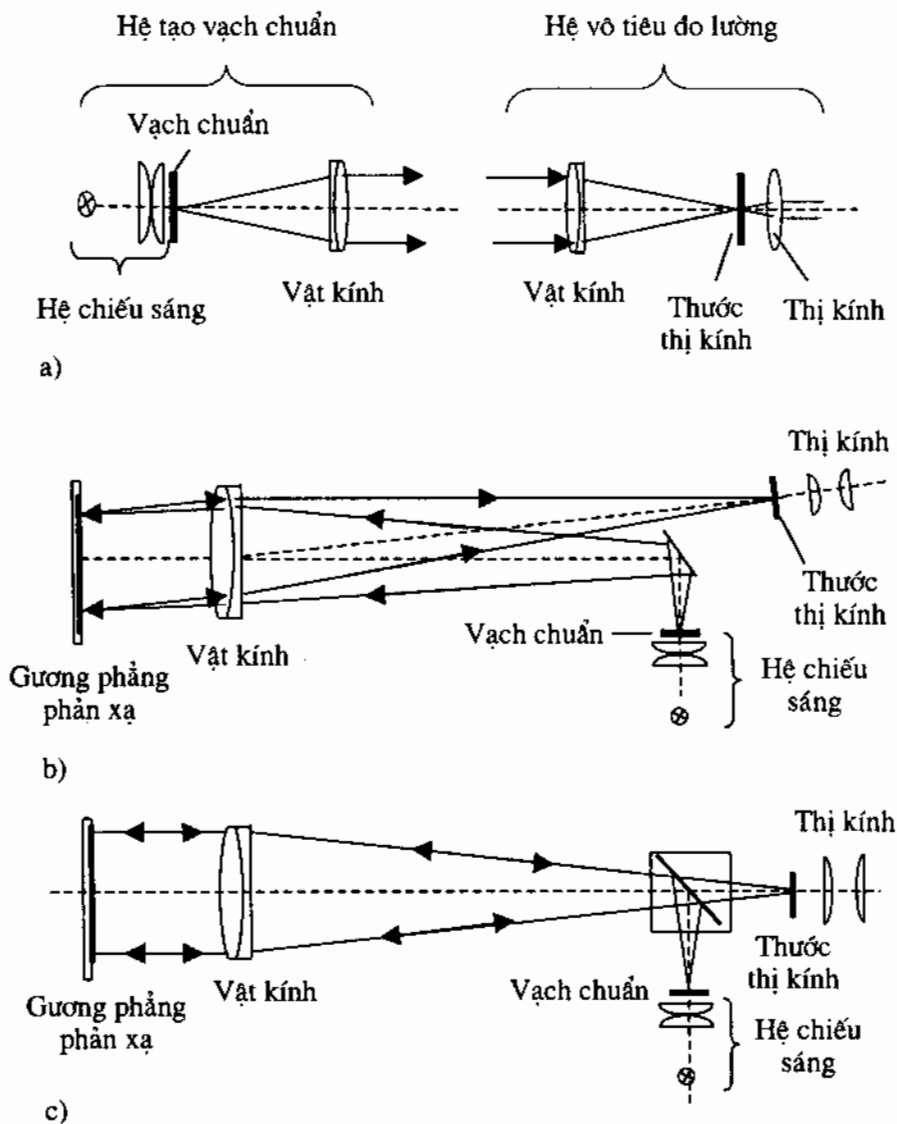
- **Kính thiên văn.** Vật nằm ở rất xa, hàng trăm nghìn km. Tiêu cự vật kính rất lớn tới hàng trăm mét. Vật kính bằng thấu kính: được ghép bởi hai thấu kính dính liền hoặc rời nhau (phần 9.2 chương 9). Vật kính loại này có đường kính tối đa là 1000 mm. Những vật kính lớn hơn, sẽ khó chế tạo cả về công nghệ gia công cả về công nghệ vật liệu. Ngoài ra vật kính càng lớn khó khăn hơn khi khử quang sai đặc biệt là quang sai sai sắc. Để có các kính thiên văn có độ phóng đại lớn hơn, các vật kính là các gương cầu phản xạ (hình 7.12) hay gương parabol tròn xoay. Các vật kính gương với độ lớn hàng chục mét không còn xa lạ gì.

- **Ống nhòm quan sát.** Kết cấu thông dụng gồm hai hệ vô tiêu ghép song song với nhau. Hệ này có độ phóng đại thấp (2x; 3x cho ống nhòm Galile và tới 10x cho ống nhòm Keple). Khi quan sát vật không ở vô cùng ( $a \neq \infty$ ) thì ảnh giữa rời khỏi tiêu diện thứ hai vật kính. Người quan sát cần dịch lui thị kính về phía sau một chút để nhìn rõ vật.

- **Hệ vô tiêu trong các thiết bị đo lường.** Các máy kinh vĩ, các máy trắc địa, các hệ vô tiêu dùng để định vị trí tầm và hướng... Các loại vật kính này gồm các thấu kính hoặc bằng hệ gương. Các thiết bị đọc số của dụng cụ đo lường chính xác (optimet thường và optimet siêu cấp - chương IV)..., ngoài hệ vô tiêu còn có bảng chỉ thị thị kính để xác định định lượng các dịch chuyển thẳng, dịch chuyển góc. Thường gọi là hệ vô tiêu đo lường.

- **Hệ chuẩn trực.** Hệ chuẩn trực được tổ hợp bởi hai hệ thống: hệ vô tiêu đo lường và hệ tạo vạch chuẩn. Hình 7.19 mô phỏng kết cấu chính của hệ chuẩn trực dùng trong đo lường. Hình 7.19a là hệ chuẩn trực gồm hệ vô tiêu đo lường và hệ tạo vạch chuẩn rời nhau. Hệ chiếu sáng chiếu sáng vạch chuẩn. Vạch chuẩn được vật kính tạo ảnh ra vô cùng. Vật kính hệ vô tiêu đo lường đưa ảnh vạch chuẩn trùng với thước thị kính. Thị kính tạo ảnh đồng thời cả thước thị

kính và ảnh vạch chuẩn lên mắt người quan sát. Hệ chuẩn trực được ghép tổ hợp hai hệ thành phần nhờ gương phản xạ G (hình 7.19b) và nhờ lăng kính tách chùm L (hình 7.19c). Khi hệ tạo vạch chuẩn (hình 7.16a) hoặc gương phẳng phản xạ (hình 7.19b và hình 7.19c) thay đổi vị trí về góc (do tác động của đối tượng đo  $\Delta z$ ) làm ảnh vạch chuẩn trên thước thị kính dịch khỏi thước những giá trị  $\Delta z'$  tương ứng, qua thị kính xác định được giá trị này.



Hình 7.19. Hệ chuẩn trực.



## Chương VIII

# QUANG SAI

### 8.1. QUANG SAI VÀ TẠO ẢNH ĐỒNG DẠNG TUYỆT ĐỐI

Ảnh trên bề mặt ảnh  $Q'$  được gọi là ảnh đồng dạng tuyệt đối so với vật trên mặt chứa vật  $Q$  (hình 8.1) khi có đủ ba điều kiện:

- Một vật điểm chỉ có một điểm ảnh và ngược lại;
- Một đoạn thẳng vật thì chỉ có một đoạn thẳng ảnh tương ứng và ngược lại;
- Một phần tử vật cũng chỉ một phần tử ảnh tương ứng và ngược lại.

Khi hệ tạo ảnh đồng dạng tuyệt đối thì vật điểm  $B$  có độ lớn so với trục quang là  $l$  thì ảnh điểm  $B'_0$ , cách trục quang là  $l'_0$ . Tỷ lệ tạo ảnh cho mặt ảnh  $Q'_0$  so với mặt chứa vật  $Q$  là  $\beta'_0 = l'_0/l$ . Tỷ lệ tạo ảnh này không đổi với mọi điểm ảnh của các điểm vật tương ứng.

Do hệ quang tạo ảnh có quang sai nên ảnh có quang sai  $B'$  dịch khỏi ảnh lý tưởng  $B'_0$ . Giá trị sai lệch giữa  $B'$  so với  $B'_0$  chính là quang sai do hệ quang tạo nên. Chúng được hình thành bởi các thông số cấu tạo của các chi tiết quang và bản chất chùm sáng nhiều bước sóng truyền qua hệ.

### 8.2. XÁC ĐỊNH ĐỘ LỚN QUANG SAI VÀ BIẾN DẠNG ẢNH CỦA VẬT ĐIỂM

#### 8.2.1. Vai trò xác định quang sai

Để thiết kế hệ quang đáp ứng những yêu cầu cho trước, cán bộ kỹ thuật thường sử dụng một trong hai phương pháp sau:

1- Phương pháp thứ nhất: Từ các thông số quang và chỉ tiêu quang sai phải tính thiết kế một hệ quang có các thông số kết cấu: số lượng mặt cầu  $k$ , bán kính cong  $r_i$ , bề dày thấu kính cùng với khoảng cách giữa các thấu kính  $d_i$  và chiết suất  $n_i$  của hệ.

2- Phương pháp thứ hai: Chọn các linh kiện quang, các tổ hợp quang có sẵn thiết lập hệ đảm bảo các thông số quang. Sau đó tính quang sai của hệ. Nếu quang sai này thoả mãn yêu cầu quang sai cho trước thì việc thiết lập hệ quang

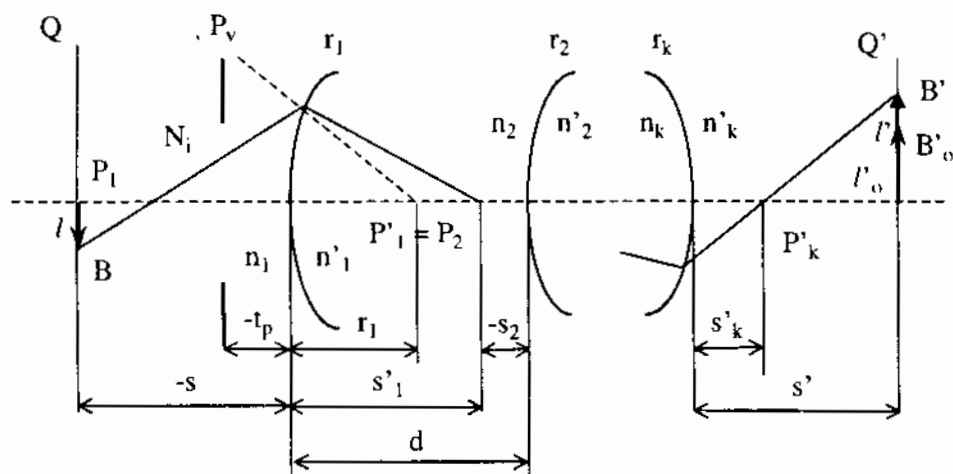
trên là thích hợp vừa đảm bảo các thông số quang lại vừa thoả mãn yêu cầu quang sai. Nếu không, người cán bộ thiết kế phải chọn lại các tổ hợp và linh kiện quang khác.

Cả hai phương pháp đều cần phải xác định quang sai của hệ.

### 8.2.2. Các thông số ảnh hưởng đến quang sai

Quang sai hệ quang phụ thuộc vào bốn nhóm thông số:

- Nhóm các thông số kết cấu: Số lượng mặt cầu  $k$  tạo nên các thấu kính, bán kính cong  $r_i$ , khoảng cách các thấu kính  $d_i$  và chiết suất  $n_i$ .
- Nhóm các thông số về vị trí và độ lớn pupin vào:
  - Vị trí pupin vào  $t_p$ : là khoảng cách từ đỉnh mặt cầu thứ nhất tới pupin vào
  - Độ lớn pupin vào: Toạ độ điểm gặp của tia sáng với mặt phẳng pupin vào  $N_i(m;M)$ .
- Nhóm các thông số về vị trí và độ lớn vật điểm:
  - Vị trí của vật được xác định từ đỉnh mặt cầu thứ nhất đến mặt chứa vật:  $s_p$ .
  - Độ lớn của vật tính từ vật điểm đến quang trục:  $l$ .
- Chùm sáng nhiều bước sóng ánh sáng khác nhau.



Hình 8.1. Các thông số ảnh hưởng đến quang sai tổng.

### 8.2.3. Cách xác định quang sai

Muốn tìm quang sai tổng do tia sáng từ vật điểm  $B$  qua pupin vào với toạ

độ  $N_i$  ( $m; M$ ) phải lần lượt theo các bước sau:

- Từ vật điểm B và điểm  $N_i$  lập được phương trình đường thẳng (tia tới)  $f_1$ :

$$f_1(x, y, z) = 0 \quad (8.1)$$

(Gốc toạ độ trùng với đỉnh cầu  $S_1$ ; chiều z trùng với chiều tia sáng và dọc theo trục quang).

- Mặt cầu với tâm cầu  $O_1$  đỉnh cầu  $S_1$  và bán kính  $r_1$  có phương trình bề mặt là  $\varphi_1$ :

$$\varphi_1(x, y, z) = 0 \quad (8.2)$$

- Từ phương trình đường thẳng (8.1) và phương trình mặt cầu (8.2) tìm được toạ độ điểm gặp nhau của chúng. Điểm đó cũng chính là điểm tới của tia sáng gặp mặt cầu thứ nhất  $P_1(x_1, y_1, z_1)$ .

- Từ hai điểm  $P_1$  và tâm cầu  $O_1$  xác định được phương trình pháp tuyến của mặt cầu tại điểm tới  $P_1$  là  $\psi_1$ :

$$\psi_1(x, y, z) = 0 \quad (8.3)$$

- Từ phương trình (8.1) và (8.3) xác định được góc tới  $i_1$  tại  $P_1$ :

$$\cos i_1 = \lambda_1 \cdot \lambda'_1 + \mu_1 \cdot \mu'_1 + \nu_1 \cdot \nu'_1 \quad (8.4)$$

Đối với  $f_1(x, y, z) = 0$  thì  $\lambda_1 = \cos \alpha_1$ ;  $\mu_1 = \cos \beta_1$ ;  $\nu_1 = \cos \xi_1$ ;

và với  $\psi_1(x, y, z) = 0$  thì  $\lambda'_1 = \cos \alpha'_1$ ;  $\mu'_1 = \cos \beta'_1$ ;  $\nu'_1 = \cos \xi'_1$ .

$$(\lambda + \mu + \nu = 1)$$

- Từ định luật khúc xạ ánh sáng tìm được góc khúc xạ  $i'_1$ :

$$\sin i'_1 = (n_1 / n_2) \sin i_1$$

- Xác định phương trình tia khúc xạ sau mặt cầu thứ nhất  $f_2$  khi có góc khúc xạ  $i'_1$  và phương trình pháp tuyến (8.3):

$$f_2(x, y, z) = 0 \quad (8.5)$$

- Tia khúc xạ qua mặt cầu thứ nhất cũng chính là tia tới của mặt cầu thứ hai.

Tìm tia khúc xạ sau mặt cầu thứ hai ta lần lượt lặp lại các phép toán từ (8.1) đến (8.5) khi đã chuyển gốc toạ độ về đỉnh cầu  $S_2$ .

- Lần lượt thực hiện tính tiếp như vậy qua mặt cầu thứ ba; thứ tư... và qua mặt cầu k của hệ có k mặt cầu để tìm được phương trình tia khúc xạ  $f_k$ .

Tia khúc xạ  $f_k$  gặp mặt ảnh  $Q'_0$  tại  $B'(x', y', z')$  cách trục quang đoạn  $l'$ . Ảnh  $B'$  do tia  $BN_i$  tạo nên lệch so với  $B'_0$  các giá trị  $\delta g$  (theo chiều y) và  $\delta G$

(theo chiều x):

$$\delta g = y' - l'_0 = l' - l'_0$$

$$\delta G = x'$$

$\delta g$  - gọi là quang sai ngang Merion hay quang sai Merion;

$\delta G$  - gọi là quang sai ngang Sakitan hay quang sai Sakitan.

Như vậy quang sai ngang  $\delta g$  và  $\delta G$  phụ thuộc vào bốn nhóm yếu tố kể trên và có thể mô tả theo:

$$\delta g = f_1(s, l, t_p, m, M, r_i, d_i, n_i) \quad (8.6)$$

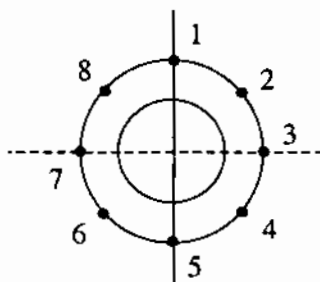
$$\delta G = f_2(s, l, t_p, m, M, r_i, d_i, n_i) \quad (8.7)$$

Bằng các phép toán vectơ thực hiện tuần tự mặt cầu một; hai... rồi qua mặt cầu thứ k ta nhận được quang sai  $\delta g$  và  $\delta G$ .

### 8.2.4. Xác định biến dạng ảnh của vật điểm

Có nhiều tia sáng từ vật điểm B qua pupin vào tại các tọa độ khác nhau  $N_i (m_i; M_i)$ . Khi qua toàn bộ các mặt cầu các tia này cũng gặp mặt ảnh  $Q'$  với các điểm  $B'_i$  khác nhau. Do đó quang sai  $\delta g$  và  $\delta G$  có các giá trị không giống nhau.

Để vẽ biến dạng ảnh của vật điểm phải chia mặt pupin vào thành những lớp. Bán kính mỗi lớp  $\rho = D_p/2$ ; chia lớp ngoài ( $\rho = D_p/2$ ) thành tám điểm  $\rho = \sqrt{2} D_p/4$ ;  $\rho = 0$ ;  $\rho = -\sqrt{2} D_p/4$ ;  $\rho = -D_p/2$ . Mỗi lớp chia thành tám điểm để xét tia sáng đi qua.



Hình 8.2. Tọa độ  $N_i (m_i; M_i)$  ở mặt pupin vào.

## 8.3. XÁC ĐỊNH QUANG SAI BẬC BA CỦA HỆ QUANG

### 8.3.1. Vai trò quang sai bậc ba

Các mối quan hệ (8.6) và (8.7) không thể mô tả bằng các công thức tương minh mà từ đó có thể sử dụng tính quang sai hoặc tính các thông số cấu tạo của hệ quang được.

Các mối quan hệ (8.6) và (8.7) cũng không áp dụng để xét các quang sai thành phần như cầu sai, koma, loạn thị, méo ảnh... của các hệ quang.

Để giải quyết hai tồn tại trên ta áp dụng lý thuyết quang sai bậc ba.

### 8.3.2. Thiết lập các công thức tính quang sai bậc ba

Các mối quan hệ (8.6) và (8.7) được thể hiện một đa thức gồm tổng các thừa số phụ thuộc:

$$\delta g = \sum g_{abc} m^a \cdot M^b \cdot l^c \quad (8.8)$$

$$\delta G = \sum t_{abc} m^a \cdot M^b \cdot l^c \quad (8.9)$$

trong đó:

$g_{abc}$  và  $t_{abc}$  chứa đựng các thông số  $s$ ,  $t_p$  và nhóm ba thông số cấu tạo ( $r_j$ ,  $d_j$ ,  $n_j$ ).

$a$ ,  $b$ ,  $c$  là các số tự nhiên và tổng  $a + b + c$  được gọi là bậc các thừa số trong tổng (8.8) và (8.9).

$a + b + c = 1$  thì bậc các thừa số là 1

$a + b + c = 3$  thì bậc các thừa số là 3

$a + b + c = 5$  thì bậc các thừa số là 5 ...

Từ tính chất của hệ quang ta có những nhận xét sau:

- Hệ có tính đối xứng toả tròn quanh quang trục, nên khi thay các thông số  $m$ ,  $M$  và  $l$  thành  $-m$ ,  $-M$  và  $-l$  thì độ lớn  $\delta g$  và  $\delta G$  không thay đổi về độ lớn, mà chỉ thay đổi về dấu. Do vậy quan hệ (8.8) và (8.9) không chứa các thừa số bậc chẵn mà chỉ chứa các thừa số bậc lẻ. Nghĩa là  $a + b + c = 1, 3, 5, 7, \dots$

- Khi tổng gồm các thừa số bậc một ( $a + b + c = 1$ ) thì:

$$\delta g = g_{100} m + g_{010} M + g_{001} l$$

$$\delta G = t_{100} m + t_{010} M + t_{001} l \quad (8.10)$$

Các quan hệ (8.10) mô tả quang sai trên mặt ảnh tốt nhất  $Q'_1$  chứ không phải trên mặt ảnh lý tưởng  $Q_0'$  đang xét, vậy các quan hệ (8.8) và (8.9) không chứa các thừa số bậc một mà chỉ chứa các thừa số bậc 3, 5, 7, ...

- Khi thay  $+M$  bằng  $-M$  thì  $\delta g$  không thay đổi về độ lớn và về dấu cho nên các quan hệ (8.8) và (8.9) không chứa  $M$  với thừa số bậc lẻ nghĩa là không chứa  $M$ ,  $M^3$ ,  $M^5, \dots$

- Khi  $M = 0$  thì  $\delta G = 0$  điều đó nghĩa là tất cả các thừa số của  $\delta G$  đều chứa  $M$ .

- Thay  $+M$  bằng  $-M$  thì  $\delta G$  thay đổi về dấu, như vậy  $\delta G$  chứa các thừa số bậc lẻ:  $M$ ,  $M^3$ ,  $M^5, \dots$

- Các thừa số bậc ba trong  $\delta g$  và  $\delta G$  lớn hơn rất nhiều so với các thừa số

bậc 5, 7,... Cho nên trong các phép tính gần đúng về quang sai ta bỏ qua các thừa số bậc năm trở lên mà chỉ dùng các thừa số bậc ba. Cách tính quang sai như vậy được gọi là quang sai bậc ba.

Từ những nhận xét trên quan hệ (8.8) và (8.9) được viết thành:

$$\begin{aligned} \delta g &= g_{300}m^3 + g_{201}m^2l + g_{120}mM^2 + g_{102}ml^2 + g_{021}M^2l + g_{003}l^3 \\ \delta G &= t_{120}mM^2 + t_{111}mMl + t_{030}M^3 + t_{012}Ml^2 \end{aligned} \quad (8.11)$$

Để thuận tiện tính quang sai, các quan hệ (8.11) được chuyển thành:

$$\begin{aligned} \delta g &= A(m^2 + M^2)m + B(3m^2 + M^2) + Cl^2m + El^3 \\ \delta G &= A(m^2 + M^2)M + 2B/M + Dl^2M \end{aligned} \quad (8.12)$$

Nhiều trường hợp tính quang sai bậc ba còn thay tọa độ để các ở mặt chứa pupin vào bằng hệ tọa độ cực:

$$\begin{aligned} m &= \rho \cos\varphi \\ M &= \rho \sin\varphi \end{aligned}$$

Nghĩa là thay tọa độ N(m, M) thành N( $\rho \cos\varphi$ ,  $\rho \sin\varphi$ ).

Quan hệ (8.12) chuyển thành:

$$\begin{aligned} \delta g &= A\rho^3 \cos\varphi + B\rho^2(2 + \cos 2\varphi) + Cl^2m\rho \cos\varphi + El^3 \\ \delta G &= A\rho^3 \sin\varphi + B\rho^2 \sin 2\varphi + Dl^2\rho \sin\varphi \end{aligned} \quad (8.13)$$

Khi vật ở vô cùng ( $s = -\infty$ ) thì:

$$\begin{aligned} \delta g &= A^*\rho^3 \cos\varphi + B^*\omega\rho^2(2 + \cos 2\varphi) + C^*\omega^2\rho \cos\varphi + E^*\omega^3 \\ \delta G &= A^*\rho^3 \sin\varphi + B^*\omega\rho^2 \sin 2\varphi + D^*\omega^2\rho \sin\varphi \end{aligned} \quad (8.14)$$

( $\omega$ : góc đo tia chính từ vật điểm ngoài quang trục)

### 8.3.3. Xác định các tham số phụ thuộc

Theo các quan hệ (8.12); (8.13) và (8.14) thì các hệ số A, B, C, D, và E chứa các thông số cấu tạo hệ quang, vị trí mặt chứa vật Q và vị trí pupin vào. Chúng được gọi là hệ số phụ thuộc.

$$\begin{aligned} A &= -\frac{1}{2n'_k(s-t_p)^3 \cdot \alpha'_1 \cdot \alpha'_k} \cdot S_I \\ B &= \frac{1}{2n'_k(s-t_p)^3 \cdot \alpha_1^2 \cdot \alpha'_k \theta_1} \cdot S_{II} \\ C &= -\frac{1}{2n'_k(s-t_p)^3 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha'_k \cdot \theta_1^2} \cdot (3S_{III} + I^2 \cdot S_{IV}) \end{aligned}$$

$$D = -\frac{1}{2n'_k(s-t_p)^3 \alpha_1 \cdot \alpha'_k \cdot \theta_1^2} \cdot (S_{III} + I^2 \cdot S_{IV})$$

$$E = \frac{1}{2n'_k(s-t_p)^3 \alpha'_k \cdot \theta_1^3} \cdot S_V \quad (8.15)$$

Trong đó  $S_I \dots S_V$  được gọi là các tổng ảnh hưởng. Chúng phụ thuộc trực tiếp vào các thông số cấu tạo hệ quang  $r_i, d_i$  và  $n_i$ .

Và khi vật ở vô cùng ( $s = -\infty; \alpha_1 = 0$ ) thì:

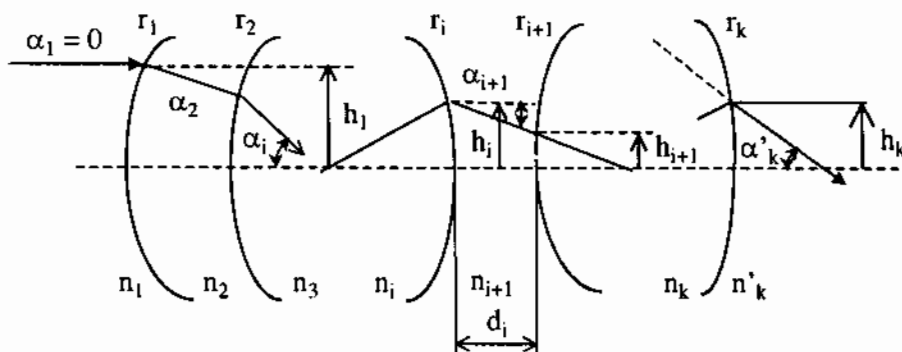
$$|(s-t_p) \alpha_1|_{s=-\infty; \alpha_1=0} = h_1$$

Các hệ số A, B, C, D và E của (8.13) được thay bằng  $A^*, B^*, C^*, D^*$  và  $E^*$ :

$$\left. \begin{aligned} A^* = A &= -\frac{1}{2n'_k \cdot h_1^3 \cdot \alpha'_k} \cdot S_I \\ B^* = -B \cdot (s-t_p) &= -\frac{1}{2n'_k \cdot h_1^2 \cdot \alpha'_k \cdot \theta_1} \cdot S_{II} \\ C^* = C \cdot (s-t_p)^2 &= -\frac{1}{2n'_k \cdot h_1 \cdot \alpha'_k \cdot \theta_1^2} \cdot (3S_{III} + I^2 \cdot S_{IV}) \\ D^* = D \cdot (s-t_p)^2 &= -\frac{1}{2n'_k \cdot h_1 \cdot \alpha'_k \cdot \theta_1^2} \cdot (S_{III} + I^2 \cdot S_{IV}) \\ E^* = -E \cdot (s-t_p)^3 &= -\frac{1}{2n'_k \cdot \alpha'_k \cdot \theta_1^3} \cdot S_V \end{aligned} \right\} \quad (8.16)$$

### 8.3.4. Xác định các tổng ảnh hưởng

Để xác định các tổng ảnh hưởng  $S_I \dots S_V$  và các thông số còn lại trong quan hệ (8.15) và (8.16) cần sử dụng hai tia cơ bản tự chọn như sau:



**Hình 8.3.** Tia cơ bản tự chọn thứ nhất qua nhiều mặt cầu.

• **Tia thứ nhất** (hình 8.3)

Tia tự chọn thứ nhất từ vật điểm trên quang trục của mặt Q lập với quang trục góc  $\alpha_1$ , sau khi khúc xạ qua các mặt cầu cắt quang trục với các góc  $\alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha'_k$  đồng thời gặp các mặt cầu với các chiều cao so với quang trục là  $h_1, h_2, \dots, h_k$ .

Như vậy qua tia thứ nhất, khi chọn  $\alpha_1$  và  $h_1$  ta tìm các giá trị  $\alpha_i$  và  $h_i$  theo quan hệ:

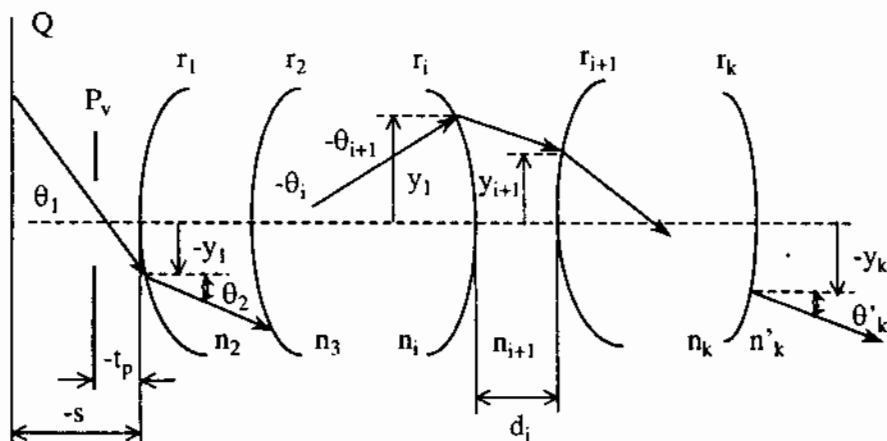
$$h_{i+1} = h_i - \alpha_{i+1} \cdot d_i$$

$$\alpha_{i+1} = \frac{n_i}{n_{i+1}} \cdot \alpha_i + \frac{n_{i+1} - n_i}{n_{i+1} \cdot r_i} \cdot h_i \quad (8.17)$$

Từ (8.17) cũng suy ra:

$$r_i = \frac{(n_{i+1} - n_i) \cdot h_i}{n_{i+1} \cdot \text{tg}\alpha_{i+1} - n_i \cdot \text{tg}\alpha_i} = \frac{(n_{i+1} - n_i) \cdot h_i}{n_{i+1} \cdot \alpha_{i+1} - n_i \cdot \alpha_i}$$

$$d_i = \frac{h_i - h_{i+1}}{\text{tg}\alpha_{i+1}} = \frac{h_i - h_{i+1}}{\alpha_{i+1}} \quad (8.18)$$



Hình 8.4. Tia cơ bản tự chọn thứ hai qua nhiều mặt cầu.

• **Tia thứ nhất** (hình 8.4)

Tia tự chọn thứ hai từ vật điểm ngoài quang trục của mặt Q lập với quang trục tại điểm giữa pupin vào góc  $\theta_1$ , sau khi khúc xạ qua các mặt cầu cắt quang trục với các góc  $\theta_2, \theta_3, \dots, \theta'_k$  đồng thời gặp các mặt cầu với các chiều cao so với quang trục là  $h_1, h_2, \dots, h_k$ .



Như vậy qua tia thứ nhất, khi chọn  $\theta_1$  và  $y_1$  ta tìm được các giá trị  $\theta_i$  và  $y_i$  theo quan hệ:

$$\begin{aligned} y_{i+1} &= y_i - \theta_{i+1} \cdot d_i \\ \theta_{i+1} &= \frac{n_i}{n_{i+1}} \cdot \theta_i + \frac{n_{i+1} - n_i}{n_{i+1} \cdot r_i} \cdot y_i \end{aligned} \quad (8.19)$$

Từ (3.11) cũng suy ra:

$$\begin{aligned} r_i &= \frac{(n_{i+1} - n_i) \cdot y_i}{n_{i+1} \cdot \text{tg}\theta_{i+1} - n_i \cdot \text{tg}\theta_i} = \frac{(n_{i+1} - n_i) \cdot y_i}{n_{i+1} \cdot \theta_{i+1} - n_i \cdot \theta_i} \\ d_i &= \frac{y_i - y_{i+1}}{\text{tg}\theta_{i+1}} = \frac{y_i - y_{i+1}}{\theta_{i+1}} \end{aligned} \quad (8.20)$$

*Các tổng ảnh hưởng quang sai bậc ba*

$$\begin{aligned} S_I &= \sum_{i=1}^{i=k} h_i \cdot P_i \\ S_{II} &= \sum_{i=1}^{i=k} h_i \cdot P_i \left( \frac{\Delta\theta_i}{\Delta\alpha_i} \right) \\ S_{III} &= \sum_{i=1}^{i=k} h_i \cdot P_i \left( \frac{\Delta\theta_i}{\Delta\alpha_i} \right)^2 \\ S_{IV} &= - \sum_{i=1}^{i=k} \frac{1}{r_i} \cdot \frac{1}{\Delta n_i} = \sum_{i=1}^{i=k} \frac{\Delta(\alpha_i \cdot n_i)}{h_i \cdot n_i \cdot n_{i+1}} \\ S_V &= \sum_{i=1}^{i=k} \left[ h_i \cdot P_i \left( \frac{\Delta\theta_i}{\Delta\alpha_i} \right)^2 - I^2 \cdot \frac{\Delta(\alpha_i \cdot n_i)}{h_i \cdot n_i \cdot n_{i+1}} \right] \cdot \frac{\Delta\theta_i}{\Delta\alpha_i} \end{aligned} \quad (8.21)$$

Trong đó:

$$P_i = \left( \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{\mu_{i+1} - \mu_i} \right)^2 \cdot (\alpha_{i+1} \cdot \mu_{i+1} - \alpha_i \cdot \mu_i) = \left( \frac{\Delta\alpha_i}{\Delta\mu_i} \right)^2 \cdot \Delta\alpha_i \mu_i$$

$$\mu_i = \frac{1}{n_i}$$

$$\Delta\mu_i = \mu_{i+1} - \mu_i$$

$$\Delta\alpha_i = \alpha_{i+1} - \alpha_i$$

$$\Delta\alpha_i \mu_i = \alpha_{i+1} \cdot \mu_{i+1} - \alpha_i \cdot \mu_i$$

$$\Delta\alpha_i \cdot n_i = \alpha_{i+1} \cdot n_{i+1} - \alpha_i \cdot n_i$$

$$\Delta n_i = n_{i+1} - n_i$$

$$\Delta\theta_i = \theta_{i+1} - \theta_i$$

$$I = n_1 \cdot \alpha_1 \cdot l_1 = \dots = n'_k \cdot \alpha'_k \cdot l'_k$$

ở đây  $l_1 = l = -(s - t_p) \cdot \theta_1$

nên  $I = -n_1 \cdot (s - t_p) \cdot \alpha_1 \cdot \theta_1$

và khi vật ở vô cùng ( $s = -\infty$ ;  $\alpha_1 = 0$ ) thì:

$$\left. (s - t_p) \cdot \alpha_1 \right|_{s = -\infty; \alpha_1 = 0} = h_1$$

$$I = -n_1 \cdot h_1 \cdot \theta_1$$

### 8.3.5. Tính quang sai bậc ba

Tính quang sai bậc ba của hệ khi biết các thông số kết cấu  $r_i$ ,  $n_i$ ,  $d_i$  vị trí pupin vào  $t_p$  và vị trí mặt phẳng chứa vật Q cần thực hiện tuân tự theo các bước sau:

\* Sử dụng tia cơ bản thứ nhất (chọn  $\alpha_1$ ;  $h_1$ ) để tìm tất cả  $\alpha_i$ ;  $h_i$  của hệ theo quan hệ (8.17).

\* Sử dụng tia cơ bản thứ hai (chọn  $\theta_1$ ;  $y_1$ ) để tìm tất cả  $\theta_i$ ;  $y_i$  của hệ theo quan hệ (8.19).

\* Tính các tổng ảnh hưởng  $S_I \dots S_V$  theo mối quan hệ (8.21).

\* Xác định các hệ số A, B, C, D và E theo mối quan hệ (8.15).

\* Tính quang sai  $\delta g$  và  $\delta G$  theo (8.12) và (8.13) với độ lớn vật  $l$  và toạ độ  $N(m; M)$ .

Để tính theo (8.14) khi  $s = -\infty$  (mặt vật Q ở vô cùng) ứng với  $\omega$  và toạ độ  $N(m; M)$  thì:

\* Tính các hệ số  $A^*$ ,  $B^*$ ,  $C^*$ ,  $D^*$  và  $E^*$  theo (8.16).

\* Tính quang sai  $\delta g$  và  $\delta G$  theo (8.12) với  $\omega$  và toạ độ  $N(m; M)$ .

Như vậy chỉ khi các tổng ảnh hưởng tiết tiêu thì quang sai  $\delta g = 0$  và  $\delta G = 0$ . Tuy nhiên điều đó mới có quang sai bậc ba bằng không và hệ quang vẫn còn quang sai nhỏ ở bậc năm, bậc bảy v.v...

### 8.3.6. Xác định biến dạng ảnh của vật điểm

Tương tự như bài hai, việc xác định biến dạng ảnh được thực hiện cho các tia sáng tới pupin vào ở những toạ độ  $N_i(m; M)$  khác nhau quy định theo các lớp với bán kính  $\rho$  và các góc  $\varphi = 0$ ;  $\varphi = 45^\circ$ ;  $\varphi = 90^\circ$ ;  $\varphi = 125^\circ$ ;  $\varphi = 180^\circ$ ;  $\varphi = 225^\circ$ ;  $\varphi = 270^\circ$  và  $\varphi = 315^\circ$ . Từ các toạ độ  $\delta g_i$  và  $\delta G_i$  của các điểm  $B'_i$  tìm được biến dạng ảnh của vật điểm B.

### 8.3.7. Quang sai bậc ba trên mặt ảnh bất kỳ

Khi nhận ảnh trên mặt ảnh  $Q'$  nào đó cách  $Q'_0$  một khoảng bất kỳ  $\zeta$  thì ảnh có quang sai bậc ba được xác định theo:

$$\delta g^* = \delta g - \frac{n_1 \cdot \zeta \cdot m}{n'_k \cdot (s - t_p) \cdot \beta} = \delta g - \frac{n_1 \cdot \zeta \cdot \rho \cdot \cos \varphi}{n'_k \cdot (s - t_p) \cdot \beta}$$

và:

$$\delta G^* = \delta G - \frac{n_1 \cdot \zeta \cdot M}{n'_k \cdot (s - t_p) \cdot \beta} = \delta G - \frac{n_1 \cdot \zeta \cdot \rho \cdot \sin \varphi}{n'_k \cdot (s - t_p) \cdot \beta} \quad (8.22)$$

$\beta$  là tỷ lệ tạo ảnh từ  $Q$  thành  $Q'_0$ .

Khi vật ở vô cùng thì mặt  $Q'_0$  trùng với tiêu diện thứ hai hệ quang với tiêu cự  $f'$ . Lúc này  $(s - t_p) = -\infty$  và  $\beta = 0$ . Như vậy cần thay thế:

$$(s - t_p) \cdot \beta = \frac{(s - t_p) \cdot n_1 \cdot \alpha_1}{n'_k \cdot \alpha'_k} = \frac{h_1 \cdot n_1}{n'_k \cdot \alpha'_k} = \frac{n_1}{n'_k} \cdot f' \quad (8.23)$$

Quan hệ (8.23) được chuyển thành:

$$\delta g^*|_{s=-\infty} = \delta g - \frac{n_1 \cdot \zeta \cdot m}{n'_k \cdot (s - t_p) \cdot \beta} = \delta g - \frac{\zeta \cdot \rho \cdot \cos \varphi}{f'}$$

và:

$$\delta G^*|_{s=-\infty} = \delta G - \frac{n_1 \cdot \zeta \cdot M}{n'_k \cdot (s - t_p) \cdot \beta} = \delta G - \frac{\zeta \cdot \rho \cdot \sin \varphi}{f'} \quad (8.24)$$

### 8.3.8. Các loại quang sai thành phần

Độ lớn quang sai theo (8.12) gồm có các quang sai thành phần: cầu sai, Koma, loạn thị méo mặt ảnh và quang sai méo ảnh.

#### 8.3.8.1. Quang sai cầu sai

Nếu  $A \neq 0$  và  $B = C = D = E = 0$  thì hệ quang chỉ có quang sai cầu sai.

Độ lớn cầu sai:

$$\begin{aligned} \delta g_C &= A \cdot \rho^3 \cdot \cos \varphi \\ \delta G_C &= A \cdot \rho^3 \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (8.25)$$

Bán kính hình tròn nhiễu của ảnh vật điểm được xác định theo:

$$\begin{aligned} (r_C)^2 &= (\delta g)^2 + (\delta G)^2 = (A \rho^3)^2 \\ r_C &= \frac{-\rho^3 \cdot S_1}{2n'_k \cdot (s - t_p)^3 \alpha_1^3 \alpha'_k} \end{aligned} \quad (8.26)$$

Ảnh nhiễu do cầu sai tạo nên tỷ lệ với lập phương của độ lớn vòng chắn sáng. Để cầu sai nhỏ thì phải giảm bớt độ lớn vòng chắn sáng  $\rho$ .

### 8.3.8.2. Quang sai koma

Khi  $B \neq 0$  và  $A = C = D = E = 0$  thì hệ quang chỉ có quang sai koma.

Độ lớn quang sai koma:

$$\begin{aligned}\delta g_k &= B l \rho^2 \cdot (2 + \cos 2\varphi) \\ \delta G_k &= B l \rho^2 \cdot \sin 2\varphi\end{aligned}\quad (8.27)$$

Ảnh vật điểm do có quang sai koma cũng là hình tròn nhiễu với bán kính  $r_k$ :

$$(r_k)^2 = (\delta g_k - 2B l \rho^2)^2 + (\delta G_k)^2 = (B l \rho^2)^2$$

Hình tròn nhiễu do koma tạo nên có tâm nằm trên trục  $\delta g_k$  và cách điểm ảnh lý tưởng  $B'_0$  một khoảng  $2r_C = 2B \cdot l \cdot \rho^2$ . Vật điểm càng xa trục quang thì ảnh nhiễu càng lớn.

Chùm tia từ vật điểm qua pupin vào càng xa trục quang ( $\rho$  càng lớn) thì tâm ảnh nhiễu càng xa ảnh điểm lý tưởng của nó. Tất cả các hình nhiễu do  $\rho$  khác nhau nhận hai cạnh của góc  $60^\circ$  làm tiếp tuyến. Giữa quang sai merion và sakitan của koma có mối quan hệ:

$$\delta g_k = \pm \sqrt{3} \cdot \delta G_k = \pm \operatorname{tg} 60^\circ \cdot \delta G_k$$

Bảng 8.1 liệt kê độ lớn  $\delta g_k$  và  $\delta G_k$  theo  $r_k$  của các tia từ 1... 8 ứng với hình 8.5.

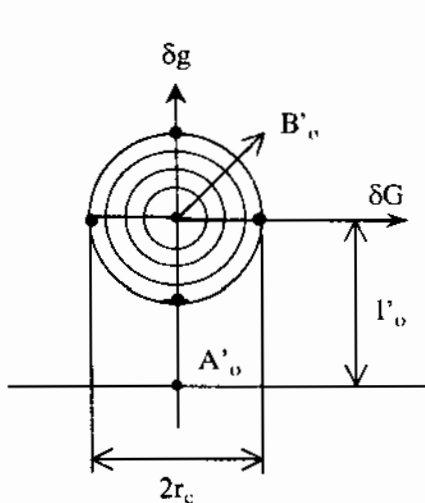
**Bảng 8.1.** Độ lớn koma ứng với các tia sáng khác nhau

Tia	$\varphi$	$2\varphi$	$\cos 2\varphi$	$\sin 2\varphi$	$\delta g_k$	$\delta G_k$
1	$0$	$0$	1	0	$3r_k$	0
2	$45^\circ$	$90^\circ$	0	-1	$2r_k$	$r_k$
3	$90^\circ$	$180^\circ$	-1	0	$r_k$	0
4	$135^\circ$	$270^\circ$	0	1	$2r_k$	$-r_k$
5	$180^\circ$	$360^\circ$	1	0	$3r_k$	0
6	$225^\circ$	$450^\circ$	0	-1	$2r_k$	$r_k$
7	$270^\circ$	$540^\circ$	-1	0	$r_k$	0
8	$315^\circ$	$630^\circ$	0	1	$2r_k$	$-r_k$

Từ bảng 8.1 có một số nhận xét:

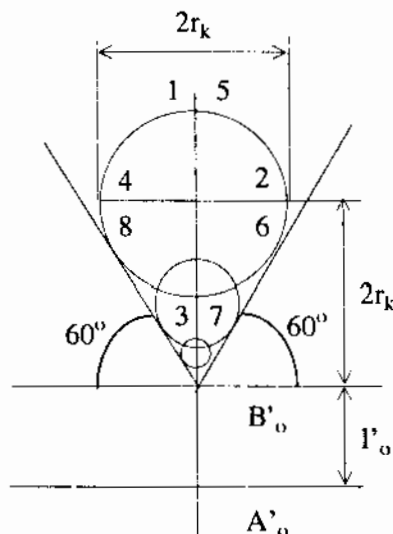
- Các tia 1, 3, 5, 7 không có quang sai sakitan ( $\delta G_k = 0$ ).

- Các tia 1 và 5 có quang sai merion lớn gấp ba lần các tia 3 và 7.
- Các tia sáng qua pupin vào theo hai trục 1 và 5 và trục 3 và 7 thì gặp mặt ảnh trên trục  $A'_0B'_0$ .



**Hình 8.5a.**

Ảnh của B do tạo ảnh có koma.



**Hình 8.5b.**

Biến dạng quang sai koma.

Độ lớn hình tròn nhiễu do koma tạo nên được xác định theo:

$$r_k = B.l.\rho^2 = \frac{l\rho^2.S_{II}}{2n'_k.(s-t_p)^3\alpha'_1.\alpha'_k.\theta_1} \quad (8.28)$$

Như vậy hệ quang không có quang sai Koma chỉ khi tạo ảnh vật điểm trên quang trục hoặc tổng ảnh hưởng  $S_{II} = 0$ . Để hệ quang có koma nhỏ thì cần phải làm cho  $S_{II}$  nhỏ. Hệ quang vừa khử quang sai cầu sai vừa triệt tiêu koma được gọi là hệ Anlanat.

### 8.3.8.3. Quang sai loạn thị và cong mặt ảnh

Khi và  $A = B = E = 0$ ;  $D \neq 0$  và  $C \neq 0$  thì hệ quang chỉ có quang sai loạn thị và cong mặt ảnh. Hình 8.6 mô tả hình thành quang sai loạn thị và méo mặt ảnh của vật điểm B ngoài quang trục.

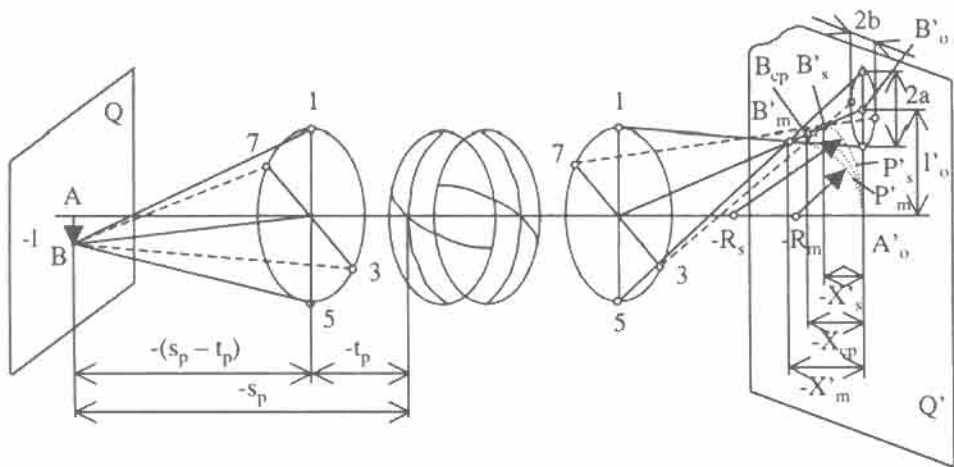
Độ lớn quang sai của chúng được xác định theo:

$$\begin{aligned} \delta g_m &= C.l^2\rho.\cos\varphi \\ \delta G_s &= D.l^2\rho.\sin\varphi \end{aligned} \quad (8.29)$$

Từ (3.21) có quan hệ:

$$\frac{(\delta g_m)^2}{(C.l^2\rho)^2} + \frac{(\delta G_s)^2}{(D.l^2\rho)^2} = 1 \quad (8.30)$$

Quan hệ (8.30) là phương trình đường elip, vậy ảnh điểm cho vật là hình elip. Tâm hình elip trùng với ảnh điểm lý tưởng  $B'_o$ . Hai bán kính elip là  $a = C.l^2\rho$  và  $b = D.l^2\rho$ .



**Hình 8.6.** Mô phỏng quang sai loạn thị và méo mặt ảnh.

Khi nhận trên bề mặt  $Q'_i$  bất kỳ và cách  $Q'_o$  một khoảng  $\zeta$  thì độ lớn quang sai loạn thị trên mặt đó được tính theo:

$$\begin{aligned} \delta g^*_m &= \delta g_m - \frac{n_1 \cdot \zeta \cdot \rho \cdot \cos \varphi}{n'_k \cdot (s - t_p) \cdot \beta} = (C.l^2 - k \cdot \zeta) \cdot \rho \cdot \cos \varphi \\ \delta G^*_s &= \delta G_s - \frac{n_1 \cdot \zeta \cdot \rho \cdot \sin \varphi}{n'_k \cdot (s - t_p) \cdot \beta} = (D.l^2 - k \cdot \zeta) \cdot \rho \cdot \sin \varphi \end{aligned} \quad (8.31)$$

ở đây:

$$k = \frac{n_1}{n'_k \cdot (s - t_p) \cdot \beta}$$

Từ (8.31) lại lập được quan hệ:

$$\frac{(\delta g^*_m)^2}{(a^*)^2} + \frac{(\delta G^*_s)^2}{(b^*)^2} = 1 \quad (8.32)$$

Quan hệ (8.32) cũng là phương trình đường elip. Hai bán kính elip là  $a^*$  và  $b^*$ :

$$\begin{aligned} a^* &= (C.l^2 - k.\zeta).\rho \\ b^* &= (D.l^2 - k.\zeta).\rho \end{aligned} \quad (8.33)$$

Các mối quan hệ (8.32) và (8.33) cho những nhận xét sau:

- Có một mặt  $Q'_S$  cách mặt ảnh lý tưởng  $Q'_0$  một khoảng  $\zeta = x'_S$  mà ở đó ảnh của vật điểm có quang sai ngang  $\delta G^*_S = 0$  ( $2b^* = 0$ ) và ảnh là đoạn thẳng (hình 8.6):

$$\delta g^*_m = 2a^* = 2(C.l^2 - k.x'_S) = 2l^2.(C - D).\rho$$

Mặt ảnh  $Q'_S$  được gọi là mặt ảnh sakitan cách mặt  $Q'_0$  một khoảng  $x'_S$ :

$$\begin{aligned} x'_S &= \frac{D.l^2}{k} \\ x'_S &= -\frac{l^2(S_{III} + I^2.S_{IV})}{2n'_k.(s - t_p)^2.(\alpha'_k)^2.\theta_1^2} \end{aligned}$$

Hoặc:

$$x'_S = -\frac{\omega^2(S_{III} + I^2.S_{IV})}{2n'_k.(\alpha'_k)^2.\theta_1^2} \quad (8.34)$$

Mặt ảnh sakitan  $Q'_S$  không phải là mặt phẳng mà là mặt cong. Bán kính mặt cong sakitan  $R_S$  được tính theo:

$$\frac{1}{R_S} = -\frac{n'_k.(S_{III} + I^2.S_{IV})}{n_1^2.(s - t_p)^2.\alpha_1^2.\theta_1^2} \quad (8.35)$$

- Có một mặt  $Q'_m$  cách mặt ảnh lý tưởng  $Q'_0$  một khoảng  $\zeta = x'_m$  mà ở đó ảnh của vật điểm có quang sai ngang  $\delta g^*_S = 0$  ( $2a^* = 0$ ) và ảnh là đoạn thẳng:

$$\delta G^*_S = 2b^* = 2(D.l^2 - k.x'_m) = 2l^2.(C - D).\rho$$

Mặt ảnh  $Q'_m$  được gọi là mặt ảnh merion cách mặt  $Q'_0$  một khoảng  $x'_m$ :

$$\begin{aligned} x'_m &= \frac{C.l^2}{k} \\ x'_m &= -\frac{l^2(3S_{III} + I^2.S_{IV})}{2n'_k.(s - t_p)^2.(\alpha'_k)^2.\theta_1^2} \end{aligned}$$

Hoặc

$$x'_m = -\frac{\omega^2(3S_{III} + I^2.S_{IV})}{2n'_k.(\alpha'_k)^2.\theta_1^2} \quad (8.36)$$

Mặt ảnh merion  $Q'_m$  không phải là mặt phẳng mà là mặt cong. Bán kính mặt cong merion  $R_m$  được tính theo:

$$\frac{1}{R_s} = -\frac{n'_k \cdot (3S_{III} + I^2 \cdot S_{IV})}{n'_l \cdot (s - t_p)^2 \cdot \alpha'_l \cdot \theta_l^2} \quad (8.37)$$

- Độ lớn loạn thị: sai lệch giữa vị trí hai mặt ảnh sakitan và merion được gọi là độ lớn loạn thị:

$$x'_s - x'_m = \frac{l^2 \cdot S_{III}}{n'_k \cdot (s - t_p)^2 \cdot (\alpha'_k)^2 \cdot \theta_l^2} \quad (8.38a)$$

Hoặc:

$$x'_s - x'_m = \frac{\omega^2 \cdot S_{III}}{n'_k \cdot (\alpha'_k)^2 \cdot \theta_l^2} \quad (8.38b)$$

- Lại có mặt ảnh  $Q'_c$  cách mặt  $Q'_o$  một khoảng  $\zeta = x'_c$  (hình 8.7):

$$\zeta = x'_c = \frac{C \cdot l^2 + D \cdot l^2}{k}$$

Tại  $Q'_c$ , ảnh của vật điểm là hình tròn với bán kính là  $r_o$ . Tâm hình tròn trùng với điểm gặp của tia chính và mặt  $Q'_c$ :

$$r_o^2 = (a^*)^2 + (b^*)^2$$

Độ lớn ảnh hình tròn:

$$2r_o = (C - D) \cdot l^3 \cdot \rho$$

Vị trí của các mặt ảnh  $Q'_c$ ;  $Q'_s$  và  $Q'_m$  liên quan với nhau theo:

$$x'_c = \frac{x'_s + x'_m}{2}$$

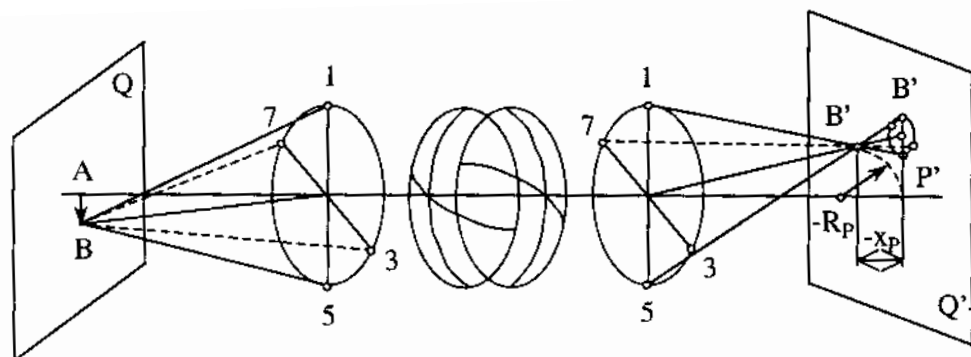
$$x'_c = \frac{\omega^2 (2S_{III} + I^2 \cdot S_{IV})}{2n'_k \cdot (\alpha'_k)^2 \cdot \theta_l^2} \quad (8.39)$$

Khi  $C = D$  thì  $2r_o = 0$ . Ảnh của vật điểm hứng trên mặt  $Q'_c$  cũng là ảnh điểm. Mặt ảnh  $Q'_c$  lúc này ký hiệu là  $Q'_p$  và được gọi là mặt ảnh Petwan. Cả ba mặt ảnh  $Q'_s$ ;  $Q'_m$  và  $Q'_p$  trùng nhau và cùng cách mặt ảnh  $Q'_o$  một khoảng  $x'_p$ .

$$x'_p = x'_s = x'_m = \frac{C \cdot l^2}{k} = \frac{D \cdot l^2}{k} \quad (8.40)$$

Mặt ảnh Petwan  $Q'_p$  (trường hợp  $C = D$ ) là mặt cong. Vật trên mặt phẳng  $Q$  tạo ảnh điểm rõ nét trên mặt cong  $Q'_p$ . Ảnh không chứa quang sai loạn thị mà chỉ có quang sai méo mặt ảnh (hình 8.7).





Hình 8.7. Quang sai méo mặt ảnh.

Mặt  $Q'_p$  cách mặt ảnh lý tưởng  $Q'_o$  một khoảng  $\zeta = x'_p$ :

$$x'_p = - \frac{\omega^2 \cdot I^2 \cdot S_{IV}}{2n'_k \cdot (\alpha'_k)^2 \cdot \theta_1^2} \quad (8.41)$$

Hoặc khi thay  $I^2 = n_1^2 \cdot (s - t_p)^2 \cdot \alpha_1^2 \cdot \theta_1^2$  sẽ được:

$$x'_p = - \frac{n'_k \cdot \omega^2 \cdot (s - t_p)^2 \cdot \beta^2 \cdot S_{IV}}{2} \quad (8.42)$$

Bán kính mặt cong Petzvan  $R_p$ :

$$\frac{1}{R_p} = - \frac{n'_k \cdot I^2 \cdot S_{IV}}{n_1^2 \cdot (s - t_p)^2 \cdot \alpha_1^2 \cdot \theta_1^2} \quad (8.43)$$

Hoặc khi thay  $I^2 = n_1^2 \cdot (s - t_p)^2 \cdot \alpha_1^2 \cdot \theta_1^2$  sẽ được:

$$\frac{1}{R_p} = -n'_k \cdot S_{IV}$$

Hệ quang không có quang sai loạn thị và méo mặt ảnh k thì các tổng ảnh hưởng  $S_{III}$  và  $S_{IV} = 0$ , nghĩa là độ lớn loạn thị  $x'_s - x'_m = 0$  và  $x'_p = 0$ .

Khi tính thiết kế hệ quang cần phải giảm độ lớn của  $S_{III}$  và  $S_{IV}$  để hệ có loạn thị và méo mặt ảnh nhỏ.

#### 8.3.8.4. Quang sai méo ảnh

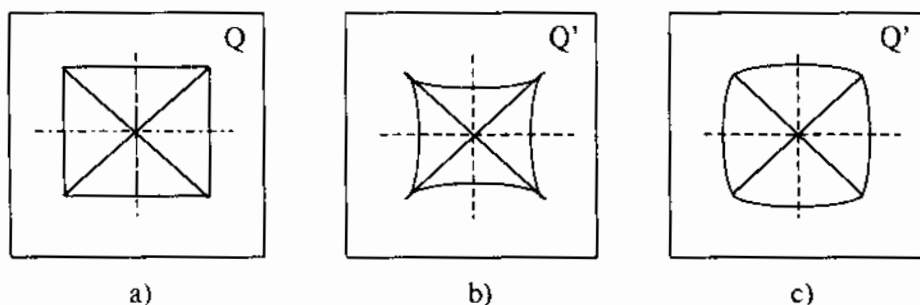
Quang sai méo ảnh là thay đổi tỷ lệ tạo ảnh trên bề mặt  $Q'_o$ . Vật điểm ở các vị trí khác nhau tạo ảnh với các tỷ lệ tạo ảnh không giống nhau. Méo ảnh xảy ra khi  $A = B = C = D = 0$  và  $E \neq 0$ .

Độ lớn quang sai méo ảnh:

$$\delta g_d = E.l^3 \text{ và } \delta G_d = 0 \quad (8.44)$$

Quang sai méo ảnh không phụ thuộc vào tọa độ của điểm gặp tia sáng với pupin vào (vì quan hệ 8.44 không chứa  $\rho$  và  $\varphi$ ). Như vậy chùm sáng từ vật điểm qua pupin vào đều gặp mặt ảnh  $Q'_o$  tại cùng một ảnh điểm  $B'$  nhưng cách  $B'_o$  một khoảng  $\delta g_d = E.l^3$  (hình 8.8):

$$x'_d = -\frac{l^3.S_V}{2n_1^2.(s-t_p)^3.\alpha'_k.\theta_1^3} = -\frac{\omega^3.S_V}{2n'_k.\alpha'_k.\theta_1^3} \quad (8.45)$$



Hình 8.8. Dạng ảnh do quang sai méo ảnh tạo nên.

Như vậy ảnh  $l'$  và ảnh lý tưởng  $l'_o$  có quan hệ:

$$l' = l'_o + \delta g_d = \beta.l + \delta g_d = \beta.l + E.l^3 \quad (8.46)$$

Giữa tỷ lệ tạo ảnh  $\beta$  ( $l$  thành  $l'_o$ ) và  $\beta^*$  ( $l$  thành  $l'$ ) có mối quan hệ:

$$\beta^* = \beta + E.l^3 \quad (8.47)$$

Như vậy tùy thuộc vào vị trí vật điểm (độ lớn  $l$ ) mà tỷ lệ tạo ảnh có quang sai méo ảnh đã thay đổi đi. Hình ảnh được tạo nên không đồng dạng với hình thật của vật. Hình 3.6 mô tả hai trường hợp ảnh không đồng dạng với vật. Trường hợp thứ nhất là vật hình vuông (hình 8.8a) tạo thành ảnh là hình gổ khi  $E > 0$  (hình 8.8b) và tạo thành ảnh là hình tang trống  $E < 0$  (hình 8.8c).

Tính quang sai méo ảnh theo %:

$$100 \frac{l' - l'_o}{l'_o} \% = 100 \frac{\delta g_d}{l'_o} \% = \frac{E.l^3}{l'_o} \% = 100 \frac{E.l^2}{\beta} \% \quad (8.48)$$

Hệ quang không có méo ảnh khi  $E = 0$ . Hệ được gọi là Otokopi. Khi tính thiết kế hệ quang cần làm cho  $S_V \rightarrow 0$  để cho hệ có quang sai méo ảnh nhỏ.

Qua xét quang sai thành phần, ta thấy hệ luôn có quang sai. Quang sai thành phần phụ thuộc vào kết cấu hệ và xuất hiện lớn nhỏ khác nhau, không tách rời nhau. Tùy thuộc và phạm vi sử dụng của hệ mà người thiết kế cần hạn chế loại quang sai nào là chủ yếu.

### 8.3.9. Ví dụ

Thấu kính có:  $r_1 = \infty$ ;  $d = 10$ ;  $r_2 = -50$ ;  $n_1 = 1$ ;  $n_2 = 1,5$ ;  $n_3 = 1$ ; tiêu cự  $f' = 100$ ; Độ lớn pupin vào  $D_p = 10$ ;  $t_p = 0$  tạo ảnh vật ở vô cùng.

Hãy xác định quang sai  $\delta g$ ;  $\delta G$  và biến dạng ảnh của hai vật điểm:

1. Nằm trên quang trục:  $\omega = 0$
2. Nằm ngoài quang trục:  $\omega = -3^u$  ( $\omega = -0,0525$ ).

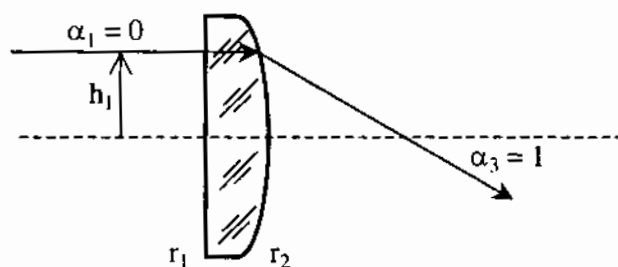
#### Giải

Tia cơ bản tự chọn thứ nhất (hình 8.9).

Chọn  $\alpha_1 = 0$  (vật ở vô cùng). Qua mặt thứ nhất không bị lệch hướng ( $r_1 = \infty$ ); gặp mặt thứ hai cũng có  $\alpha_2 = 0$ . Qua mặt hai, tia này cắt quang trục góc  $\alpha_3 = h_1/f'$ . Để thuận tiện khi tính ta chọn  $h_1 = f'$  nên  $\alpha_3 = 1$ .

Như vậy:  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$  và  $\alpha_3 = 1$

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 \cdot d = 100 - 0 \cdot d = 100.$$



Hình 8.9. Tia cơ bản tự chọn thứ nhất.

Tia cơ bản tự chọn thứ hai (hình 8.9).

Tia qua điểm giữa pupin vào.  $t_p = 0$  nên tia qua đỉnh cầu thứ nhất. Vậy  $y_1 = 0$ . Để dễ tính, ta chọn  $\theta_1 = 1$ :

$$\theta_2 = (n_1/n_2)\theta_1 = (1/1,5) \cdot 1 = 0,67$$

$$y_2 = y_1 - \theta_1 \cdot d = 0 - 0,67 \cdot 10 = -6,7.$$

$$\theta_3 = (n_2/n_3)\theta_2 + [(n_3 - n_2) / n_3 \cdot r_2] y_2$$

$$= (1,5/1) \cdot 0,67 + [(-0,5) / 1 \cdot (-50)] (-0,67) = 0,9333$$

Như vậy tia thứ hai cho ta:

$$\begin{aligned}\theta_1 &= 1; & y_1 &= 0 \\ \theta_2 &= 0,67; & y_2 &= -6,7 \\ \theta_3 &= 0,9333\end{aligned}$$

Tính các tổng ảnh hưởng  $S_I \dots S_V$  theo (8.21) khi sử dụng cách lập bảng 8.2. Tính các hệ số phụ thuộc  $A^*, B^*, C^*, D^*$  và  $E^*$  theo (8.16):

$$A^* = \frac{S_I}{2n_3 \cdot h_1^3 \cdot \alpha_3} = -\frac{900}{2.1.100^3 \cdot 1} = -0,00045$$

$$B^* = -\frac{S_{II}}{2n_3 \cdot h_1^2 \cdot \alpha_3 \cdot \theta_1} = -\frac{240}{2.1.100^2 \cdot 1.1} = -0,012$$

$$C^* = -\frac{3S_{III} + I^2 \cdot S_{IV}}{2n_3 \cdot h_1 \cdot \alpha_3 \cdot \theta_1^2} = -\frac{3.64 + 100^2 \cdot 0,0067}{2.1.100 \cdot 1.1} = -1,293333$$

$$D^* = -\frac{S_{III} + I^2 \cdot S_{IV}}{2n_3 \cdot h_1 \cdot \alpha_3 \cdot \theta_1^2} = -\frac{64 + 100^2 \cdot 0,0067}{2.1.100 \cdot 1.1} = -0,653333$$

$$E^* = -\frac{S_V}{2n_3 \cdot \alpha_3 \cdot \theta_1^3} = \frac{55,2667}{2.1.1.1} = 28,13333$$

Xác định công thức tổng quát tính quang sai. Ta lập được:

$$\begin{aligned}\delta g &= -0,00045\rho^3 \cdot \cos\varphi - 0,012\omega \cdot \rho^2 \cdot (2 + \cos 2\varphi) - \\ &\quad - 1,293333\omega^2 \cdot \rho \cdot \cos\varphi + 28,133\omega^3\end{aligned}$$

$$\delta G = -0,00045\rho^3 \cdot \sin\varphi - 0,012\omega \cdot \rho^2 \cdot \sin 2\varphi - 0,653333\omega^2 \cdot \rho \cdot \sin\varphi$$

**Bảng 8.2**

i	$\alpha_i$	$\mu_i$	$\alpha_i \mu_i$	$\Delta \alpha_i \mu_i$	$\Delta \alpha_i$	$\Delta \mu_i$	$\Delta \alpha_i / \Delta \mu_i$	$\Delta \alpha_i \cdot \Delta \alpha_i \mu_i / \Delta \mu_i$	$P_i$
1	0	1	0	0	0	-0,33	0	0	0
2	0	0,67	0	1	1	0,33	3	3	9
	1	1	1						

i	$h_i$	$h_i P_i$	$\theta_i$	$\Delta \theta_i$	$\Delta \theta_i / \Delta \alpha_i$	$h_i P_i \cdot \Delta \theta_i / \Delta \alpha_i$	$h_i P_i \cdot (\Delta \theta_i / \Delta \alpha_i)^2$
1	100	0	1	-0,3333	$\infty$	0	0
2	100	900	0,6667 0,9333	0,26667	0,26667	240	64

$$S_I = 900$$

$$S_{II} = 240$$

$$S_{III} = 64$$

i	$\alpha_i$	$n_i$	$\alpha_i n_i$	$\Delta \alpha_i n_i$	$n_i n_{i+1}$	$\Delta \alpha_i n_i / n_i n_{i+1}$	$h_i$	$\Delta \alpha_i n_i / h_i n_i n_{i+1}$	$l^2$
1	0	1	0	0	1,5	0	100	0	$100^2$
2	0	1,5	0	1	1,5	0,6667	100	0,0067	$100^2$
	1	1	1						

$$S_{V1} = 0,0067$$

i	$l^2 \Delta \alpha_i n_i / h_i n_i n_{i+1}$	$h_i P_i (\Delta \theta_i / \Delta \alpha_i)^2$	$e_i$	$\Delta \theta_i / \Delta \alpha_i$	$e_i (\Delta \theta_i / \Delta \alpha_i)$
1	0	0	0	$\infty$	-55,568 (*)
2	67	64	-2,62	0,26667	-0,699

$$S_V = -56,267$$

(\*) **Chú ý:** Vì  $e_1 (\Delta \theta_1 / \Delta \alpha_1) = 0, \infty$  nên phải chuyển cách tính như sau:

$$e_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta \alpha_1} = \left[ h_1 P_1 \left( \frac{\Delta \theta}{\Delta \alpha_1} \right)^2 - l^2 \frac{\Delta \alpha_1 n_1}{h_1 n_1 n_2} \right] \cdot \frac{\Delta \theta_1}{\Delta \alpha_1} =$$

$$= h_1 \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)^2}{(\mu_2 - \mu_1)^2} (\alpha_2 \mu_2 - \alpha_1 \mu_1) \frac{(\theta_2 - \theta_1)^3}{(\alpha_2 - \alpha_1)^3} - l^2 \frac{(\alpha_2 n_2 - \alpha_1 n_1)^2}{h_1 n_1 n_2} \cdot \frac{(\theta_2 - \theta_1)}{(\alpha_2 - \alpha_1)}$$

Do thừa số thứ hai triệt tiêu nên còn lại thừa số thứ nhất. Mặt khác  $n_1 = 1$ ,  $\mu_1 = 1$  và  $\alpha_2 = \mu_2 \alpha_1$  nên:

$$e_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta \alpha_1} = h_1 \frac{(\theta_2 - \theta_1)^3}{(\mu_2 - 1)^2} \cdot \frac{\alpha_1 \mu_2^2 - \alpha_1}{\alpha_1 \mu_2 - \alpha_1}$$

Như vậy:

$$e_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta \alpha_1} = h_1 \frac{\mu_2 + 1}{(\mu_2 - 1)^2} (\theta_2 - \theta_1)^3$$

Điền  $h_1 = 100$ ,  $\mu_2 = 0,67$  và  $\theta_2 - \theta_1 = -0,33$  được:

$$e_1 \frac{\Delta \theta_1}{\Delta \alpha_1} = -55,568$$

Hãy xét hai trường hợp của ví dụ:

\* Vật trên quang trục  $\omega = 0$

Ảnh chỉ gồm cầu sai:  $\delta g = -0,00045 \rho^3 \cdot \cos \phi$

$\delta G = -0,00045 \rho^3 \cdot \sin \phi$

Ảnh của vật điểm là hình tròn nhiễu.

Bán kính ảnh nhiễu  $r_C = 0,00045\rho^3$ .

Khi  $\rho = 0,5.D_p = 10 / 2 = 5$  thì  $r_C = 0,056$  mm.

**Bảng 8.3**

Tia	$\varphi$	$\rho$	$\delta g_C$	$\delta g_k$	$\delta g_m$	$\delta g_d$	$\delta g$
1	$0^\circ$	5	-0,056	0,047	-0,018	-0,004	-0,031
2	$45^\circ$	5	-0,04	0,032	-0,013	-0,004	-0,025
3	$90^\circ$	5	0	0,016	0	-0,004	0,012
4	$135^\circ$	5	0,04	0,032	0,013	-0,004	0,08
5	$180^\circ$	5	0,056	0,047	0,018	-0,004	0,117
6	$225^\circ$	5	0,04	0,032	0,013	-0,004	0,08
7	$270^\circ$	5	0	0,016	0	-0,004	0,012
8	$315^\circ$	5	-0,04	0,031	-0,013	-0,004	-0,025

Tia	$\varphi$	$\rho$	$\delta G_C$	$\delta G_k$	$\delta G_m$	$\delta G$
1	$0^\circ$	5	0	0	0	0
2	$45^\circ$	5	-0,04	0,016	0,006	-0,03
3	$90^\circ$	5	-0,056	0	-0,009	-0,065
4	$135^\circ$	5	-0,04	-0,016	-0,006	-0,062
5	$180^\circ$	5	0	0	0	0
6	$225^\circ$	5	0,04	0,016	0,006	0,062
7	$270^\circ$	5	0,056	0	0,009	0,064
8	$315^\circ$	5	0,04	-0,016	0,006	0,03

\* Vật điểm ngoài quang trục  $\omega = -3^\circ = -0,0525$

Ảnh có các quang sai: cầu sai, koma, loạn thị và méo ảnh

$$\delta g = \delta g_C + \delta g_k + \delta g_m + \delta g_d$$

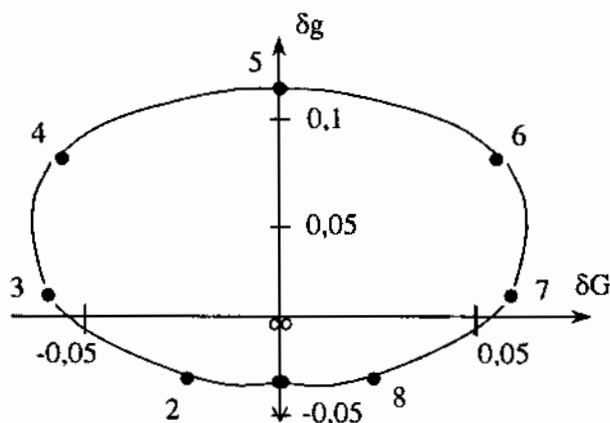
$$\delta G = \delta G_C + \delta G_k + \delta G_m$$

Độ lớn quang sai được tính theo:

$$\delta g = -0,00045\rho^3 \cdot \cos\varphi - 0,00063\rho^2 \cdot (2 + \cos 2\varphi) - 0,0037\rho \cdot \cos\varphi - 0,0042$$

$$\delta G = -0,00045\rho^3 \cdot \sin\varphi - 0,00063\rho^2 \cdot \sin 2\varphi - 0,0018\rho \cdot \sin\varphi$$

Quang sai ứng với  $\rho = D_p / 2 = 5$  mm và các giá trị  $\varphi$  lập theo bảng 8.3. Từ các kết quả của bảng 8.3 vẽ được biến dạng ảnh của vật điểm ngoài quang trục (hình 8.10).



**Hình 8.10.** Biến dạng ảnh của vật điểm ngoài quang trục.

Độ lớn loạn thị được xác định theo:

$$x'_s = -\frac{\omega^2 \cdot (S_{III} + I^2 \cdot S_{IV})}{2n'_k \cdot (\alpha'_k)^2 \cdot \theta_1^2} = -\frac{0,02756 \cdot (64 + 67)}{2 \cdot 1 \cdot 1^2 \cdot 1^2} = -0,1805$$

$$x'_m = -\frac{\omega^2 \cdot (3S_{III} + I^2 \cdot S_{IV})}{2n'_k \cdot (\alpha'_k)^2 \cdot \theta_1^2} = -\frac{0,028 \cdot (192 + 67)}{2 \cdot 1 \cdot 1^2 \cdot 1^2} = -0,3569$$

$$x'_s - x'_m = -0,3569 + 0,1805 = -0,1764$$

Độ lớn méo ảnh:  $\delta g_d = -0,0042$  được tính theo %:

$$100 \cdot \frac{\delta g_d}{l'_0} \% = -100 \cdot \frac{-0,0042}{f' \cdot \omega} \% = -0,08\%$$

### 8.3.10. Quang sai trên mặt merion

Hệ quang có tính đối xứng toả tròn và quang sai theo mặt merion lớn hơn quang sai theo mặt saktan. Bởi vậy nhiều trường hợp và đặc biệt khi tính thiết kế hệ quang cần quan tâm tới quang sai theo mặt merion. Phương trình quang sai bậc ba được viết thành:

$$\begin{aligned} \delta l' &= \delta l'_C + \delta l'_k + \delta l'_m + \delta l'_d \\ &= -\frac{m^3 \cdot S_I}{2n'_k \cdot (s - t_p)^3 \cdot \alpha_1^3 \cdot \alpha'_k} - \frac{3m^3 \cdot \omega \cdot S_{II}}{2n'_k \cdot (s - t_p)^2 \cdot \alpha_1^2 \cdot \alpha'_k \cdot \theta_1} \\ &= -\frac{m \cdot \omega^2 \cdot (3S_{III} + I^2 \cdot S_{IV})}{2n'_k \cdot (s - t_p) \cdot \alpha_1 \cdot \alpha'_k \cdot \theta_1^2} - \frac{\omega^3 \cdot S_V}{2n'_k \cdot \alpha'_k \cdot \theta_1^3} \end{aligned} \quad (8.49)$$

Khi vật ở xa ( $-s \rightarrow \infty$ ) thay ( $s + t_p$ ),  $\alpha_1 = h_1$ . Như vậy quang sai bậc ba được xác định theo:

$$\begin{aligned} \delta l' &= \delta l'_C + \delta l'_k + \delta l'_m + \delta l'_d \\ &= -\frac{m^3 \cdot S_I}{2n'_k \cdot h_1^3 \cdot \alpha'_k} - \frac{3m^3 \cdot \omega \cdot S_{II}}{2n'_k \cdot h_1^2 \cdot \alpha'_k \cdot \theta_1} \\ &= -\frac{m \cdot \omega^2 \cdot (3S_{III} + I^2 \cdot S_{IV})}{2n'_k \cdot h_1 \cdot \alpha'_k \cdot \theta_1^2} - \frac{\omega^3 \cdot S_V}{2n'_k \cdot \alpha'_k \cdot \theta_1^3} \end{aligned} \quad (8.50)$$

## 8.4. QUANG SAI SAI SẮC

### 8.4.1. Chiết suất và độ tán sắc của vật liệu quang

Các thiết bị quang được sử dụng với chùm sáng có nhiều bước sóng khác nhau. Miền ánh sáng khả kiến có bước sóng  $\lambda$  khoảng từ 400 nm đến 800 nm.

Do tán sắc ánh sáng mà các tia  $\lambda$  khác nhau truyền theo các hướng không giống nhau, dẫn đến sai lệch về tạo ảnh điểm lý tưởng. Quang sai do chùm tia nhiều bước sóng tạo nên được gọi là quang sai sai sắc. Do quang sai sai sắc mà vị trí và độ lớn ảnh cũng thay đổi. Quang sai sai sắc cũng tính được một cách gần đúng theo quang sai bậc ba của các hệ quang.

Vật liệu quang có chiết suất phụ thuộc trực tiếp vào bước sóng ánh sáng. Theo các nhà quang học thực hành đã xác định được mối quan hệ trên theo các công thức nghiệm:

Công thức của Kosi:  $n_\lambda = A + B / \lambda^2$

Công thức của Gartman:  $n_\lambda = n_0 + c / (\lambda - \lambda_0)^\alpha$

Công thức của Kettle:  $n_\lambda = a + b\lambda^2 + c / \lambda^2$

Trong đó A, B, a, b, c,  $n_0$ ,  $\lambda_0$  và  $\alpha$  là các hệ số phụ thuộc vào loại vật liệu quang. Theo Kosi, khi biết chiết suất vật liệu quang ứng với hai tia thì tìm được các hệ số A và B. Theo Gartman và Kettle, để tìm các hệ số phụ thuộc c,  $n_0$ ,  $\lambda_0$  và  $\alpha$  phải đo biết trước chiết suất của vật liệu với ba tia khác nhau. Nhờ cách xác định như vậy mà lập được các bảng tra cứu chúng sử dụng trong công nghiệp chế tạo thiết bị quang học.

Như vậy trong cả miền  $\lambda_a \dots \lambda_b$  vật liệu quang có các chiết suất tương ứng  $n_a \dots n_b$ . Các bước sóng chính trong miền ánh sáng khả kiến được sử dụng thiết lập các bảng thủy tinh quang học là:



$$\lambda_F = 486 \text{ nm}; \lambda_C = 656 \text{ nm}; \lambda_D = 589 \text{ nm}$$

Các chiết suất tương ứng:  $n_F$ ,  $n_C$  và  $n_D$ . Chiết suất  $n_D$  là chiết suất cơ bản vì khi nói đến tiêu cự hệ quang hoặc khi tính quang sai các tia đơn sắc đều sử dụng nó trong các phép tính.

Hai trong các chỉ tiêu quan trọng vật liệu quang là độ tán sắc cơ bản và trị số tán sắc Abbe:

$$\text{Độ tán sắc cơ bản: } n_F - n_C$$

Trị số tán sắc Abbe:

$$v = \frac{(n_D - 1)}{(n_F - n_C)}$$

Hai chỉ tiêu này được tra cứu theo các bảng vật liệu quang học.

#### 8.4.2. Sai sắc vị trí

Chùm sáng nhiều bước sóng  $\lambda_a \dots \lambda_b$  từ vật điểm trên quang trục (hình 8.11) qua hệ quang thì ứng với các bước sóng khác nhau gặp nhau trên quang trục ở những vị trí khác nhau  $s'_a \dots s'_b$  (tạo các ảnh điểm ở các vị trí khác nhau). Hiện tượng trên được gọi là quang sai sai sắc vị trí. Trong miền ánh sáng khả kiến ta quy định độ lớn sai sắc vị trí là khoảng cách giữa hai vị trí  $s'_F$  (vị trí ảnh điểm do chùm tia  $\lambda_F$ ) và vị trí  $s'_C$  (vị trí ảnh điểm do chùm tia  $\lambda_C$ ):

$$ds' = s'_F - s'_C$$

Độ lớn sai sắc vị trí phụ thuộc trực tiếp vào cấu tạo hệ quang, vào tính chất vật liệu quang vào vị trí vật và vị trí pupin vào.

Cơ sở quang sai bậc ba cho phép tính độ lớn sai sắc vị trí theo:

$$ds' = \frac{n_j \cdot \alpha_j^2}{n'_k \cdot \alpha_k'^2} \cdot ds_1 + \frac{S_{IS}}{n'_k \cdot \alpha_k'^2} \quad (8.51)$$

Trong đó  $ds_1$  là sai sắc vị trí của vật, và  $S_{IS}$  là tổng ảnh hưởng sai sắc vị trí.

$$S_{IS} = \sum_{i=1}^{i=k} h_i \cdot C_i \quad (8.52)$$

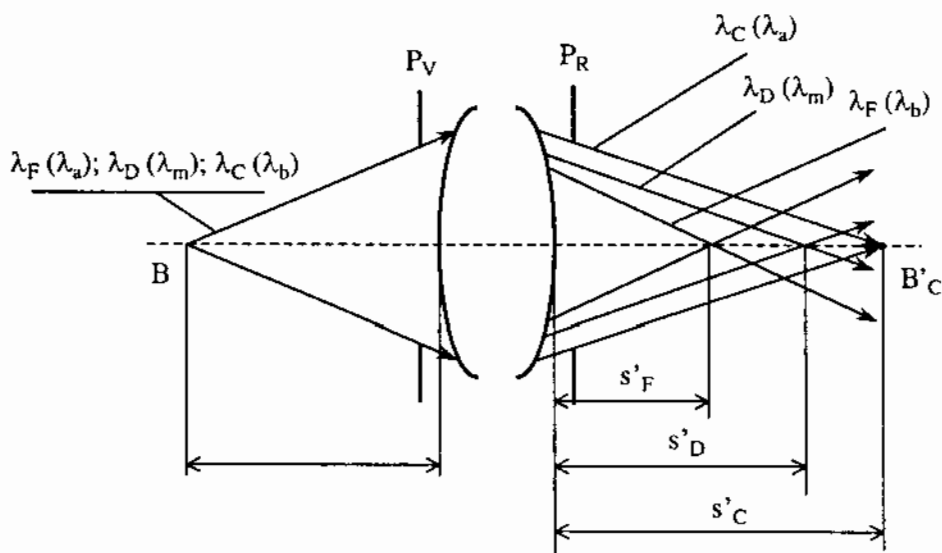
Trong đó:

$$C_i = \left( \frac{\alpha_{i+1} - \alpha_i}{\mu_{i+1} - \mu_i} \right) \cdot \left( \frac{1 - \mu_{i+1}}{v_{i+1}} - \frac{1 - \mu_i}{v_i} \right) = \frac{\Delta \alpha_i}{\Delta \mu_i} \cdot \Delta \frac{1 - \mu_i}{v_i} \quad (8.53)$$

$$\mu_i = \frac{n_j - 1}{n_{Fi} - n_{Ci}}$$

Coi chiết suất không khí  $n = 1$ , lúc này biểu thức:

$$\frac{1 - \mu_i}{v_i} = 0$$



**Hình 8.11.** Sai sắc vị trí khi tạo ảnh bằng chùm sáng nhiều bước sóng.

Vật điểm không có sai sắc vị trí ( $ds_1 = 0$ ) thì sai sắc vị trí của hệ được tính theo:

$$ds' = \frac{S_{IS}}{n'_k \cdot \alpha_k'^2} \quad (8.54)$$

Để tính quang sai sai sắc vị trí theo (8.51) và (8.54) thì sử dụng tia cơ bản tự chọn thứ nhất để tìm các  $\alpha_i$  và  $h_i$ . Theo (8.17):

$$\begin{aligned} h_{i+1} &= h_i - \alpha_{i+1} \cdot d_i \\ \alpha_{i+1} &= \frac{n_i}{n_{i+1}} \cdot \alpha_i + \frac{n_{i+1} - n_i}{n_{i+1} \cdot r_i} \cdot h_i \end{aligned} \quad (8.55)$$

Từ đó tìm  $C_i$  theo (8.53) và  $S_{IS}$  theo (8.52).

Hệ quang có sai sắc vị trí nhỏ khi tổng ảnh hưởng  $S_{IS}$  nhỏ. Khi tính thiết kế hệ quang ta cần làm cho  $S_{IS}$  càng nhỏ càng tốt. Hệ quang không có sai sắc ứng với  $s'_F - s'_C = 0$  được gọi là hệ Cromat. Hệ này mới thoả mãn vị trí ảnh của hai chùm.

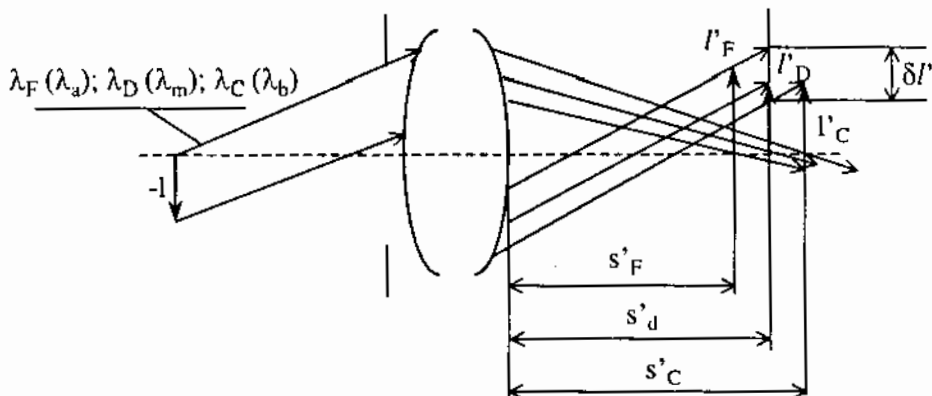
$\lambda_F$  và  $\lambda_C$  trùng nhau. Như vậy hệ Cromat mới khử sai sắc một lần. Các hệ

quang cần chất lượng cao phải khử sai sắc hai lần và được gọi hệ Apocromat. Các hệ Apocromat có các vị trí ảnh  $s'_F = s'_C = s'_D$ . Ảnh do các bước sóng  $\lambda_F, \lambda_C$  và  $\lambda_D$  trùng nhau.

### 8.4.3. Quang sai sai sắc độ lớn ảnh

Hệ quang tạo ảnh vật  $l$  thành ảnh  $l'$  với tỷ lệ tạo ảnh:

$$\beta = \frac{l'}{l} = -\frac{f}{z} = -\frac{z'}{f'} \quad (8.56)$$



Hình 8.12. Sai sắc tỷ lệ tạo ảnh.

Do tiêu cự hệ quang  $f'$  phụ thuộc vào chiết suất  $n$ , song chiết suất  $n$  lại phụ thuộc vào bước sóng ánh sáng nên độ lớn ảnh do hệ quang tạo nên cũng thay đổi theo bước sóng chùm sáng.

$$l'_\lambda = -l \cdot \frac{z'}{f'_\lambda}$$

Hiện tượng trên tạo nên quang sai ở bề mặt ảnh và được gọi là quang sai sai sắc độ lớn ảnh. Khi sử dụng chùm sáng khả kiến thì sai sắc độ lớn ảnh được xác định bởi:

$$\frac{\delta l'}{l'} = \frac{l'_F - l'_C}{l_D} = \frac{\delta n_1}{n_1} - \frac{\delta n'_k}{n'_k} + \frac{1}{I} \sum_{i=1}^{i=k} y_i \cdot C_i \quad (8.57)$$

Ở đây:

$$\delta n_1 = n_{1F} - n_{1C}$$

$$\delta n'_k = n'_{kF} - n'_{kC}$$

$$ds' = s'_F$$

$$I = -n_1 \cdot \alpha_1 \cdot (s - t_p) \cdot \theta_1$$

Khi trước và sau hệ cùng môi trường thì:

$$\frac{\delta l'}{l'} = \frac{l'_F - l'_C}{l_D} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^{i=k} y_i \cdot C_i = S_{IIS} \quad (8.58)$$

$S_{IIS}$  được gọi là tổng ảnh hưởng sai sắc độ lớn ảnh.

Để tìm tổng ảnh hưởng  $S_{IIS}$  phải sử dụng tia phụ tự chọn thứ hai. Tia này cho ta  $y_i$  và  $\theta_i$  (8.19).

Từ đó tìm  $C_i$  theo (8.53) và  $S_{IIS}$  theo (8.57).

#### 8.4.4. Ví dụ

Thấu kính quang có  $r_1 = 50$  mm,  $r_2 = \infty$ , bề dày  $d = 10$  mm, chiết suất  $n = 1,5$ , trị số Abbe  $\nu = 60$ , tạo ảnh vật điểm trên quang trục ở vô cùng. Hãy xác định quang sai sắc vị trí.

**Giải**

Như vậy  $r_1 = 50$ ,  $r_2 = \infty$ ,  $d = 10$ ,  $n_1 = 1$ ,  $\mu_1 = 1$ ,  $n_2 = 1,5$ ,  $\mu_2 = 0,67$ ,  $n_3 = 1$ ,  $\mu_3 = 1$  và  $\nu_2 = 60$ .

**Tia thứ nhất được chọn:**  $h_1 = 12$ ,  $\alpha_1 = 0$ .

Tìm các  $h_i$  và  $\alpha_i$  theo (8.17):

$$\alpha_2 = 0 + 12 \cdot \frac{1,5 - 1}{1,5 \cdot 50} = 0,08$$

$$h_2 = 12 - 0,08 \cdot 10 = 11,2$$

$$\alpha_3 = \frac{1,5}{1} \cdot 0,08 + 11,2 \cdot \frac{1 - 1,5}{1, \infty} = 0,12$$

**Tia tự chọn thứ hai:**  $y_1 = 0$  và  $\theta_1 = 1$

Tìm các  $y_i$  và  $\theta_i$  theo (8.19):

$$\theta_2 = \frac{1}{1,5} \cdot 1 + \frac{1,5 - 1}{1,5 \cdot 50} \cdot 12 = 0,75$$

$$y_2 = 0 - 0,75 \cdot 10 = -7,5$$

$$\theta_3 = \frac{1,5}{1} \cdot 0,75 + \frac{1,5 - 1}{1, \infty} \cdot (-7,5) = 1,125$$

Lập bảng tính ta sẽ được bảng 8.4.

Độ lớn sai sắc vị trí tính theo 8.54:

$$ds' = \frac{1}{1 \cdot (0,12)^2} \cdot (-0,0232) = -1,62 \text{ mm}$$

$C_i$	$y_i$	$C_i y_i$
-0,00132	0	0
-0,00066	-7,5	0,0049

$$\Sigma = 0,0049$$

$$I = -1.12.1 = -12$$

Sai sắc độ lớn ảnh theo 4.8:

$$\delta L' = \frac{\delta l'}{l'} = \frac{0,0049}{-12} = -0,0004 \approx -0,04\%$$

**Bảng 8.4**

$\alpha_i$	$\Delta\alpha_i$	$\mu_i$	$\Delta\mu_i$	$\frac{\Delta\alpha_i}{\Delta\mu_i}$	$1 - \mu_i$	$\frac{1 - \mu_i}{v_i}$	$\Delta \frac{1 - \mu}{v_i}$	$C_i$	$h_i$	$C_i h_i$
0	0,08	1	-0,3	-0,24	0	0	0,0055	-0,00132	12	-0,0158
0,08	0,04	0,67	3	0,12	0,33	0,0055	-0,0055	-0,00066	11,2	-0,0074
0,12		1	0,33		0	0				

$$S_{IS} = -0,0232$$

## 8.5. MỘT SỐ CƠ SỞ LIÊN QUAN

### 8.5.1. Nội dung hai bài toán thiết kế

Khi thiết kế hệ quang cần sử dụng tốt hai bài toán: bài toán thuận và bài toán ngược. Cả hai bài toán đều dùng khi tính ghép chọn hoặc tính mới hệ quang. Cả hai bài toán đều giải quyết quan hệ giữa quang sai ( $\delta g$ ,  $\delta G$  và  $\delta s'$ ) và các thông số kết cấu hệ quang ( $r_i$ ,  $n_i$ ,  $d_j$ ,  $t_p$ ,  $D_p$ ,  $s$  và  $l$ ). Chúng được thực hiện theo lý thuyết quang sai bậc ba.

#### • Nội dung bài toán thuận

Khi biết các thông số thiết kế (các bán kính cong  $r_j$ , chiết suất các thấu kính  $n_j$  và bề dày  $d_j$  giữa các thấu kính cũng như của các thấu kính  $d_j$ ); vị trí và độ lớn pupin vào ( $s_p$ ,  $t_p$ ) và vị trí độ lớn vật ( $s$ ,  $l$ ) phải xác định các độ lớn quang sai tổng ( $\delta g$ ,  $\delta G$ ) và quang sai thành phần: cầu sai ( $\delta g_C$ ,  $\delta G_C$ ), koma ( $\delta g_k$ ,  $\delta G_k$ ), loạn thị méo màn ảnh ( $\delta g_m$ ,  $\delta G_s$ ), méo ảnh ( $\delta g_d$ ) và quang sai sai sắc ( $\delta s'$ ,  $\delta L'$ ). Bài toán thuận thường dùng tính quang sai của hệ được tính theo chọn ghép nghĩa là dựa theo các thông số quang và yêu cầu tạo ảnh cho trước, người thiết

kế chọn các chi tiết quang hoặc nhóm chi tiết có sẵn ghép lại thành hệ. Sau đó tính kiểm tra quang sai có thích hợp với điều kiện tạo ảnh hay không. Kết quả sẽ xảy ra một số trường hợp sau:

- Một là quang sai tính được lớn hơn độ lớn quang sai yêu cầu. Trường hợp này phải chọn lại các chi tiết quang khác và tính lại quang sai. Công việc được kết thúc tới khi chọn được hệ có quang sai thích hợp.

- Hai là quang sai tính được lại nhỏ hơn nhiều so với yêu cầu cho trước. Như vậy hoặc là chọn lại các chi tiết quang và tính lại quang sai. Việc chọn kết thúc khi hệ có quang sai nhỏ hơn một ít hoặc bằng quang sai do yêu cầu đề ra. Cách chọn này nhằm tạo ra các hệ quang vừa đáp ứng được yêu cầu tạo ảnh lại vừa thoả mãn tính kinh tế.

- Ba là quang sai tính được vừa bằng hoặc nhỏ hơn một ít so với yêu cầu thiết kế thì việc chọn ghép là thích hợp.

Bài toán thuận còn được sử dụng tính quang sai của hệ thiết kế mới hoàn toàn. Dựa trên các thông số thiết kế đã tính được, phải tìm xem độ lớn quang sai thực của hệ là bao nhiêu. Nếu chúng lớn hơn yêu cầu thiết kế thì phải tính hiệu chỉnh hệ để tìm ra bộ thông số thiết kế cho phù hợp.

#### • Nội dung bài toán ngược

Khi thiết kế mới hệ quang thường biết trước yêu cầu về quang sai và các thông số quang cũng như điều kiện tạo ảnh, phải tìm bộ thông số kế cấu mới (các bán kính cong  $r_i$ , chiết suất các thấu kính  $n_i$  và bề dày  $d_i$  giữa các thấu kính cũng như của các thấu kính  $d_i$ ).

#### 8.5.2. Quang sai hệ nhiều thấu kính mỏng

Để tính quang sai cho hệ nhiều nhóm thấu kính (có  $m$  nhóm), mỗi nhóm có  $z$  thấu kính. Các thấu kính của từng nhóm được coi là thấu kính mỏng. Bề dày chung của từng nhóm cũng được coi là rất nhỏ xấp xỉ 0 cho nên ở mỗi nhóm các chiều cao do hai tia tự chọn là không đổi:

$$h_1 = h_2 = \dots = h_k = h_j$$

và 
$$y_1 = y_2 = \dots = y_k = y_j$$

Các tổng ảnh hưởng của của nhóm  $j$ .

Tổng ảnh hưởng thứ nhất:

$$S_i = \sum_{i=1}^{i=k} h_i \cdot P_i = h_j \cdot \sum_{i=1}^{i=k} P_i = h_j \cdot P_j^* \quad (8.59)$$

ở đây:  $P_j^* = \sum_{i=1}^{i=k} P_i$

Tổng ảnh hưởng thứ hai:

$$S_{IP} = \sum_{i=1}^{i=k} y_i \cdot P_i - I \sum_{i=1}^{i=k} W_i = y_j \cdot P_j^* - I \cdot W_j^* \quad (8.60)$$

ở đây:  $W_j^* = \sum_{i=1}^{i=k} W_i$

Tổng ảnh hưởng thứ ba:

$$S_{IPi} = \frac{y_j^2}{h_j} \cdot P_j^* - 2I \cdot \frac{y_j}{h_j} \cdot W_j^* + I^2 \cdot D_j \quad (8.61)$$

ở đây:  $D_j = \sum_{t=1}^{t=z} D_t$

Tổng ảnh hưởng thứ tư:

$$S_{IVj} = \sum_{t=1}^{t=z} \frac{D_t}{n_t} = D_j^* \cdot \sum \frac{\varphi_t}{n_t} = D_j \cdot \pi_j \quad (8.62)$$

ở đây:  $\varphi_t = \frac{D_t}{D_j}$   
 $= \frac{\text{Tỷ số thấu kính } t \text{ của nhóm } j}{\text{Tỷ số của cả nhóm } j}$

$$D_j = D_1 + D_2 + D_3 + \dots + D_z = \sum_{t=1}^{t=z} D_z \quad (8.63)$$

$$\varphi_j = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \dots + \varphi_z = 1 \quad (8.64)$$

$$\pi_j = \sum_{t=1}^{t=z} \frac{\varphi_t}{n_t} = \frac{1}{D_j} \cdot \sum_{t=1}^{t=z} \frac{D_t}{n_t} \quad (8.65)$$

Tổng ảnh hưởng thứ năm:

$$S_{Vj} = \frac{y_j^3}{h_j^3} \cdot P_j^* - 3I \cdot \frac{y_j^2}{h_j^2} \cdot W_j^* + I^2 \cdot \frac{y_j}{h_j} \cdot (3 + \pi_j) D_j \quad (8.66)$$

Tổng ảnh hưởng sai sắc vị trí:

$$S_{1Sj} = h_j \cdot \sum_{i=1}^{i=k} C_i = h_j \cdot C_j = h_j^2 \sum_{t=1}^{t=z} \frac{D_t}{v_t} \quad (8.67)$$

ở đây: 
$$C_j = \sum_{t=1}^{t=z} C_t$$

Tổng ảnh hưởng sai sắc độ lớn ảnh:

$$S_{11Sj} = \frac{1}{I} \cdot y_j \cdot h_j \sum \frac{D_t}{v_t} \quad (8.68)$$

### 8.5.3. Quan hệ giữa $P^*$ và $W^*$ khi vật gần hệ với $P^*_{\infty}$ và $W^*_{\infty}$ khi vật ở $\infty$

Bộ thông số kết cấu  $r_i$ ,  $n_i$  và  $d_i$  của mỗi hệ là cố định, nhưng với các vị trí khác nhau có các giá trị khác nhau về  $P^*$  và  $W^*$  dẫn tới khi tạo ảnh của vật ở những vị trí khác nhau thì ảnh có quang sai hệ khác nhau. Hãy phân biệt hai trường hợp vật ở vô cùng và vật ở gần hệ:

Khi vật ở gần hệ có hai tham số  $P^*$ ,  $W^*$  và vật ở vô cùng có hai tham số  $P^*_{\infty}$ ,  $W^*_{\infty}$  thì giữa chúng có mối liên hệ chặt chẽ với nhau. Biết cặp  $P^*_{\infty}$  và  $W^*_{\infty}$  suy ra cặp  $P^*$  và  $W^*$  và ngược lại.

Khi vật ở vô cùng, tính  $P^*_{\infty}$  và  $W^*_{\infty}$  theo tia phụ tự chọn thứ nhất với  $\alpha_{1\infty}$ ,  $h_{1\infty}$  và  $\theta_{1\infty}$ ,  $y_{1\infty}$ . Khi vật ở gần hệ, tính  $P^*$  và  $W^*$  theo tia phụ tự chọn thứ nhất với  $\alpha_i$ ,  $h_i$  và  $\theta_i$ ,  $y_i$ .

#### 8.5.3.1. Từ cặp $P^*_{\infty}$ và $W^*_{\infty}$ suy ra cặp $P^*$ và $W^*$

(Khi biết  $P^*_{\infty}$  và  $W^*_{\infty}$  của vật ở vô cùng sẽ tìm được  $P^*$  và  $W^*$  của vật ở bất kỳ vị trí).

Xét hai trường hợp:

\* Trường hợp thứ nhất: Vật ở vô cùng và chọn  $\alpha_{1\infty} = 0$  và  $\alpha'_{k\infty} \neq 1$

$$P^* = \frac{(\alpha'_k - \alpha_1)^3}{(\alpha'_k)^3} P^*_{\infty} + 4 \frac{\alpha_1 \cdot (\alpha'_k - \alpha_1)^2}{(\alpha'_k)^2} W^*_{\infty} + \alpha_1 \cdot (\alpha'_k - \alpha_1) \cdot [2\alpha_1 \cdot (2 + \pi) - \alpha'_k] \quad (8.69)$$

$$W^* = \frac{(\alpha'_k - \alpha_1)^2}{(\alpha'_k)^2} W^*_{\infty} + \alpha_1 \cdot (\alpha'_k - \alpha_1) \cdot (2 + \pi) \quad (8.70)$$

\* Trường hợp thứ hai: Vật ở vô cùng và chọn  $\alpha_{1\infty} = 0$  và  $\alpha'_{k\infty} = 1$

(Trường hợp này đổi ký hiệu  $P^*_{\infty}$  và  $W^*_{\infty}$  thành  $P_{\infty}$  và  $W_{\infty}$ )



$$P^* = (\alpha'_k - \alpha_1)^3 \cdot P_\infty + 4 \cdot \alpha_1 \cdot [(\alpha'_k - \alpha_1)^2 \cdot W_\infty + \alpha_1 \cdot (\alpha'_k - \alpha_1) \cdot [2\alpha_1 \cdot (2 + \pi) - \alpha'_k]] \quad (8.71)$$

$$W^* = (\alpha'_k - \alpha_1)^2 \cdot W_\infty + \alpha_1 \cdot (\alpha'_k - \alpha_1) \cdot (2 + \pi) \quad (8.72)$$

### 8.5.3.2. Từ cặp $P^*$ và $W^*$ suy ra cặp $P^*_\infty$ và $W^*_\infty$

(Khi biết  $P^*$  và  $W^*$  của vật ở bất kỳ vị trí nào cũng tìm được  $P^*_\infty$  và  $W^*_\infty$  của vật ở vô cùng).

Xét hai trường hợp:

\* Trường hợp thứ nhất: Vật ở vô cùng và chọn  $\alpha_{1\infty} = 0$  và  $\alpha'_{k\infty} \neq 1$

$$P^*_\infty = \frac{(\alpha'_{k\infty})^3}{(\alpha'_k - \alpha_1)} \{P^* + 4\alpha_1 W^* + \alpha_1 \cdot (\alpha'_k - \alpha_1) \cdot [2\alpha_1 \cdot (2 + \pi) + \alpha'_k]\} \quad (8.73)$$

$$W^*_\infty = \frac{(\alpha'_{k\infty})^2}{(\alpha'_k - \alpha_1)^2} [W^* - \alpha_1 \cdot (\alpha'_k - \alpha_1) \cdot (2 + \pi)] \quad (8.74)$$

\* Trường hợp thứ hai: Vật ở vô cùng và chọn  $\alpha_{1\infty} = 0$  và  $\alpha'_{k\infty} = 1$

(Trường hợp này thay ký hiệu  $P^*_\infty$  và  $W^*_\infty$  thành  $P_\infty$  và  $W_\infty$ )

$$P_\infty = \frac{1}{(\alpha'_k - \alpha_1)^3} \{P^* - 4\alpha_1 W^* + \alpha_1 \cdot (\alpha'_k - \alpha_1) \cdot [2\alpha_1 \cdot (2 + \pi) + \alpha'_k]\} \quad (8.75)$$

$$W_\infty = \frac{1}{(\alpha'_k - \alpha_1)^2} [W^* - \alpha_1 \cdot (\alpha'_k - \alpha_1) \cdot (2 + \pi)] \quad (8.76)$$

$$P^* = \sum_{i=1}^{i=k} P_i^* \quad (8.77)$$

$$W^* = \sum_{i=1}^{i=k} W_i^* \quad (8.78)$$

### 8.5.4. Tính quang sai theo hành trình ngược tia sáng

Tia sáng truyền từ điểm thứ nhất nào đó đến điểm thứ hai qua nhiều môi trường khác nhau, thì khi truyền ngược lại từ điểm thứ hai đến điểm thứ nhất tia sáng cũng theo con đường cũ. Áp dụng đặc tính này mà có thể tính quang sai theo hành trình ngược của tia sáng. Nghĩa là tia sáng đi ngược lại từ mặt cầu thứ k qua k-1... đến mặt cầu thứ nhất.

Để áp dụng những kết quả về quang sai bậc ba khi tính thì chuyển mặt cầu thứ

$k, k-1, k-2, \dots, 2, 1$  thành các mặt cầu thứ  $1, 2, 3, \dots, k-1, k$ ;

$d_k, d_{k-1}, \dots, d_2, d_1$  thành  $d_1, d_2, \dots, d_{k-1}, d_k$

và:  $n_k, n_{k-1}, \dots, n_2, n_1$  thành  $n_1, n_2, \dots, n_{k-1}, n_k$ .

Giả sử hệ chưa chuyển có bộ tham số  $P^*$  và  $W^*$ :

$$P^* = P_\infty - 4W_\infty + 4 + 2\pi \quad (8.79)$$

$$W^* = W_\infty - 2 - \pi \quad (8.80)$$

Khi chuyển và giữ nguyên chiều tia sáng từ trái sang phải hệ thì có bộ thông số  $\overleftarrow{P}$  và  $\overleftarrow{W}$ . Quan hệ giữa  $P^*, W^*$  và  $\overleftarrow{P}, \overleftarrow{W}$  được xác định theo:

$$\overleftarrow{P} = P^* = P_\infty - 4W_\infty + 4 + 2\pi \quad (8.81)$$

$$\overleftarrow{W} = -W^* = -W_\infty + 2 + \pi \quad (8.82)$$

Do  $P^*, W^*$  khác  $\overleftarrow{P}, \overleftarrow{W}$  nên quang sai hệ thay đổi đi khi quay ngược hệ quang lại.

### 8.5.5. Quang sai của bản mỏng song song

Chùm sáng tạo ảnh qua bản song song cũng có quang sai. Quang sai phụ thuộc vào bề dày  $d$ , chiết suất và mở thú độ số và góc mở vật. Các loại quang sai được xác định theo:

$$\text{Cầu sai: } \delta l_{C-} = \frac{n^2 - 1}{2n^3} \cdot u_1^2 d \quad (8.83)$$

Koma:

$$\delta l_K = \frac{3 \cdot (n^2 - 1) \cdot \omega}{2n^3} \cdot u_1 d$$

Loạn thị:

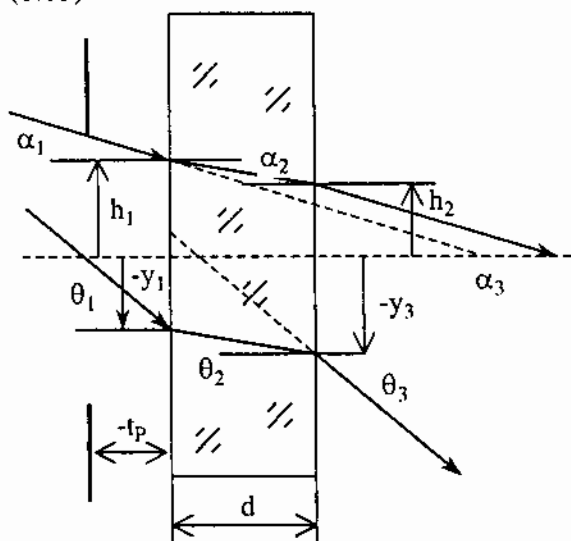
$$x'_s - x'_m = \frac{n^2 - 1}{n^3} \cdot \omega^2 d$$

Méo ảnh:

$$\delta l_D = \frac{n^2 - 1}{2n^3} \cdot \omega^3 d$$

$$\text{Sai sắc: } ds'_L = \frac{n-1}{n^2 \cdot v} \cdot u_1^2 d$$

$$\text{Có thể thay: } u_1 \approx \frac{m}{s - t_p}$$



Hình 8.13. Xác định quang sai của bản song song.

## Chương IX

# TÍNH THIẾT KẾ CÁC HỆ QUANG CƠ BẢN

Ba hệ tiêu biểu khi tính thiết kế hệ quang: vật kính, thị kính và hệ chiếu sáng. Các hệ thành phần này có thể đứng độc lập (các ống kính máy quay phim máy chụp ảnh, các hệ chiếu sáng...) hoặc ghép lại với nhau (kính hiển vi, hệ vô tiêu ống nhòm..) thành hệ phức tạp hơn.

- Hệ vật kính tạo ảnh thật. hai hệ vật kính chính là hệ cận vật kính và hệ viễn vật kính. Hệ cận vật kính có tiêu cự nhỏ (từ một vài mm đến dưới 100 mm) tạo ảnh của các vật thể nhỏ thành ảnh thật lớn hơn nhiều lần. Các vật kính hiển vi, máy chiếu phim và phóng hình... thuộc loại cận vật kính. Hệ viễn vật kính có tiêu cự lớn (từ vài chục mm đến hàng nghìn mm), chúng tạo ảnh thật từ vật rất xa hoặc xa lên tiêu diện thứ hai vật kính. Vật kính hệ vô tiêu ống nhòm, các máy quay phim chụp ảnh... thuộc viễn vật kính.

- Thị kính. Hệ này có vật nằm trùng hoặc sau tiêu diện thứ nhất, hệ đưa ảnh ra vô cùng hoặc ảnh ảo trước hệ.

- Hệ chiếu sáng. Hệ tập trung chùm sáng chiếu lên mặt vật làm cho độ dọi vật tăng lên hoặc thay đổi được khi tạo ảnh.

### 9.1. TÍNH CÁC VIỄN VẬT KÍNH

Vật kính hệ tạo ảnh vật ở xa như vật kính hệ vô tiêu ống nhòm, vật kính thiên văn, vật kính quay chụp ảnh... được gọi là các viễn vật kính. Vật thường ở rất xa (gọi là vô cùng) hoặc khoảng cách vật lớn hơn hàng trăm, hàng nghìn lần so với tiêu cự vật kính. Vật kính loại này có tiêu cự  $f' > 0$ . Vật kính đưa ảnh ở vô cùng hoặc ở xa thành ảnh thật  $y'$  lên màn ảnh giữa. Vật kính hệ vô tiêu ống nhòm thường có tiêu cự từ 100 đến 250 mm. Song cũng có vật kính tiêu cự nhỏ  $f' = 30 \div 100$  mm và tiêu cự lớn (tới ba, bốn nghìn m).

Thông thường vật kính gồm hai thấu kính: một hội tụ và một là phân kỳ được ghép liền khít với nhau (vật kính hai thấu kính dính liền) hoặc cách rời nhau. Vật liệu của một trong hai thấu kính là kron và của thấu kính kia là flin. Bảng PL.4 liệt kê một số vật kính hệ vô tiêu ống nhòm của Liên Xô trước đây kèm

theo các thông số chính của chúng. Vật kính được tính theo phương pháp khử quang sai bậc của ba loại: cầu sai, koma và sai sắc.

Vật kính ghép với thị kính thành hệ có vòng chắn sáng trùng với giá đỡ vật kính, pupin ra trùng với vị trí con người mắt người quan sát và cách mặt phẳng chính thứ hai thị kính khoảng  $t'_p = 10 + 15 \text{ mm}$ .

### 9.1.1. Tính viên vật kính hệ hai thấu kính mặt tiếp

Cách tính này được dùng tính vật kính hệ vô tiêu và được áp dụng theo hai hướng khác nhau hoặc chọn cặp vật liệu theo bảng quy chuẩn sẵn hoặc chọn theo yêu cầu của cơ sở.

#### 9.1.1.1. Tính viên vật kính hai thấu kính mặt tiếp tự chọn cặp thủy tinh

Vật kính này tạo ảnh ở vô cùng có tiêu cự là  $f'$  và hiệu chỉnh ba loại quang sai: sai sắc, cầu sai và koma. Cần hiểu việc hiệu chỉnh ở đây là phụ thuộc vào yêu cầu thiết kế hệ quang để: hoặc là chúng bằng không hoặc là bù với hệ thị kính và bộ đảo ảnh để cả hệ cũng có ba loại quang sai bằng không. Các quang sai loạn thị méo mặt ảnh và quang sai méo ảnh được tính kiểm nghiệm sau khi đã có bộ thông số thiết kế.

Như vậy điều kiện ban đầu cho trước là:

- Coi vật ở vô cùng  $s = -\infty$ ;
- Tiêu cự  $f'$ , sai sắc  $ds'$ , cầu sai  $\delta l_C$ , koma  $\delta l_K$ ;
- Vòng chắn sáng trùng với giá đỡ vật kính (nghĩa là  $s_p = 0$ ) và độ lớn vòng chắn sáng  $D_p$ .

Để tính cần chọn trước thủy tinh cho thấu kính thứ nhất  $n_2, v_2$  và thủy tinh thấu kính thứ hai  $n_3, v_3$ . Việc chọn cặp thủy tinh dựa theo vật liệu có sẵn tại cơ sở và cần chú ý một loại là thủy tinh kron và loại kia là thủy tinh flin để hạn chế sai sắc.

Như vậy thông số cần tìm của bài toán là thông số thiết kế:  $r_1, r_2, r_3, d_1$  và  $d_2$ . Cách tính được thực hiện tuần tự theo các bước sau:

1. Chọn cặp vật liệu;
2. Tìm tổng ảnh hưởng sai sắc  $S_{1S}$ , cầu sai  $S_I$  và koma  $S_{1J}$ :

$$S_{1S} = ds' \quad (9.1)$$

$$S_I = \frac{-2.f'^3 \cdot \delta l_C}{m^3} \quad (9.2)$$

$$S_{11} = \frac{-2.f'^2.\delta l_K}{3m^2.\omega} \quad (9.3)$$

3. Tìm tụ số hai thấu kính:

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 1 \quad (9.4)$$

$$C = -\left(\frac{\varphi_1}{v_1} + \frac{\varphi_2}{v_2}\right) = \frac{S_{1S}}{f'} \quad (9.5)$$

ở đây:

$$\varphi_1 = \frac{D'_1}{D'} \quad (9.6)$$

$$\varphi_2 = \frac{D'_2}{D'} \quad (9.7)$$

$$D'_1 + D'_2 = D' = \frac{1}{f'} \quad (9.8)$$

từ đó suy ra:

$$\varphi_1 = \frac{v_1.(1 + v_2.C)}{v_1 - v_2} \quad (9.9)$$

$$\varphi_2 = \frac{v_2.(1 + v_1.C)}{v_1 - v_2} = 1 - \varphi_1 \quad (9.10)$$

4. Xác định  $Q_1$  và  $Q_2$ :

$$P_\infty = a.Q^2 + b.Q + c = S_I \quad (9.11)$$

trong đó:

$$a = 1 + 2 \cdot \frac{\varphi_1}{n_2} + 2 \cdot \frac{\varphi_2}{n_3}$$

$$b = 3 \cdot \frac{\varphi_1^2}{n_2 - 1} - 3 \cdot \frac{\varphi_2^2}{n_3 - 1} - 2\varphi_2$$

$$c = \frac{n_2.\varphi_1^3}{(n_2 - 1)^2} + \frac{n_3.\varphi_2^3}{(n_3 - 1)^2} + \frac{n_3.\varphi_2^2}{n_3 - 1} \quad (9.12)$$

5. Tìm  $W_\infty$  để xác định cặp  $P_\infty$ ,  $W_\infty$  của vật kính:

$$W_\infty = -\frac{a+1}{2}.Q + \frac{\varphi_2 - b}{3} \quad (9.13)$$

Khi giải (9.11) sẽ được hai giá trị của của  $Q$  là  $Q_1$  và  $Q_2$ . Cho nên cũng có hai giá trị của  $W_\infty$  là  $W_{\infty 1}$  và  $W_{\infty 2}$ .

Từ (9.12) và (9.13) có hai cặp  $P_{\infty}, W_{\infty 1}$  và  $P_{\infty}, W_{\infty 2}$ . Chọn một trong hai cặp số trên để tìm các góc nội  $\alpha_2$  và  $\alpha_3$ . Cặp số được chọn có độ lớn tổng ảnh hưởng thứ hai  $S_{II}$  (tính theo 9.14) nhỏ hơn  $S_{II}$  (tính theo 9.3).

$$S_{II} = y_1 \cdot P_{\infty} + W_{\infty} \quad (9.14)$$

Lưu ý sẽ có ba trường hợp khác nhau xảy ra:

- Cả hai cặp đều cho  $S_{II}$  (tính theo 9.14) nhỏ hơn  $S_{II}$  (tính theo 9.3) thì chọn Q cho  $S_{II}$  nhỏ hơn.

- Cả hai cặp đều cho  $S_{II}$  (tính theo 9.14) lớn hơn  $S_{II}$  (tính theo 9.3) thì chọn lại cặp thủy tinh khác. Tuần tự tính lại từ bước 1.

6. Tìm các góc  $\alpha_2$  và  $\alpha_3$ :

$$\alpha_2 = \left(1 - \frac{1}{n_2}\right) \cdot Q + \varphi_1 \quad (9.15)$$

$$\alpha_3 = \left(1 - \frac{1}{n_3}\right) \cdot Q + \varphi_1 \quad (9.16)$$

7. Tra bảng (6.1) hoặc tính để tìm  $d_1$  và  $d_2$  rồi tính  $h_i$ .

8. Tìm các thông số kết cấu của hệ:  $r_1, r_2, r_3$ :

$$r_i = \frac{(n_{i+1} - n_i) \cdot h_i}{n_{i+1} \cdot \alpha_{i+1} - n_i \cdot \alpha_i}$$

9. Tính kiểm nghiệm các quang sai hệ vật kính:

Sau khi tìm được bộ thông số thiết kế  $r_1, r_2, r_3, d_1, d_2, n_2, v_2, n_3$  và  $v_3$  phải tính kiểm nghiệm quang sai vật kính theo bài toán thuận.

Độ lớn loạn thị của bộ thông số thiết kế được xác định theo:

$$x'_S \sim x'_m$$

trong đó:

$$x'_m = [-\omega^2 \cdot (3S_{III} + I^2 \cdot S_{IV})] / 2$$

$$x'_S = [-\omega^2 \cdot (S_{III} + I^2 \cdot S_{IV})] / 2$$

**Ví dụ 9.1:** Tính tìm thông số thiết kế của vật kính ống nhòm có  $f' = 100$  mm, góc mở vật  $2\omega = 11^\circ$ , độ lớn vòng chắn sáng  $D_p = 2\rho = 30$  mm và độ lớn quang sai  $ds' = -0,01$  mm,  $\delta l_C = -0,002$  mm,  $\delta l_K = -0,002$  mm khi  $\omega = -3^\circ$  ( $-0,0524$  rad).

Bài toán được thực hiện theo các bước sau:

1. Chọn cặp vật liệu: Thấu kính thứ nhất K8 có  $n_2 = 1,5163$  và  $v_2 = 64,1$ ;

Thấu kính thứ hai TF4 có  $n_3 = 1,7398$  và  $v_3 = 28,2$ .

2. Tìm các  $S_{IS}$  và  $S_I$  và  $S_{II}$ :

$$S_{IS} = ds' = -0,01 \text{ và } C = -0,0001$$

$$S_I = \frac{-2f'^3 \cdot \delta / C}{m^3} = \frac{-2 \cdot (-0,002) \cdot 100^3}{15^3} = 1,185$$

$$S_{II} = \frac{-2f'^2 \cdot \delta / K}{3m^3 \cdot \omega} = \frac{-2 \cdot 100^2 \cdot (-0,005)}{3 \cdot 15^2 \cdot (-0,0524)} = -2,83$$

3. Tìm tỷ số hai thấu kính  $\varphi_1$  và  $\varphi_2$ :

Thấu kính thứ nhất:

$$\varphi_1 = \frac{v_1 \cdot (1 + v_2 \cdot C)}{v_1 - v_2} = \frac{64,1 \cdot [1 + 28,2 \cdot (-0,0001)]}{64,1 - 28,2} = 1,79$$

Tiêu cự thấu kính thứ nhất  $f'_1$ :

$$f'_1 = f' / \varphi_1 = 100 / 1,79 = 55,85 \text{ mm}$$

Thấu kính thứ hai:

$$\varphi_2 = 1 - \varphi_1 = 1 - 1,79 = -0,79$$

Tiêu cự thấu kính thứ hai:

$$f'_2 = f' / \varphi_2 = 100 / -0,79 = -126,58 \text{ mm}$$

4. Xác định Q:

$$a = 1 + 2 \frac{\varphi_1}{n_2} + 2 \frac{\varphi_2}{n_3} = 1 + 2 \frac{1,79}{1,5163} + 2 \frac{-0,79}{1,7398}$$

$$= 1 + 2,36 - 0,91 = 2,45$$

$$b = 3 \frac{\varphi_1^2}{n_2 - 1} - 3 \frac{\varphi_2^2}{n_3 - 1} - 2\varphi_2 = \frac{3 \cdot 1,79^2}{0,5163} - \frac{3 \cdot (-0,79)^2}{0,7398} - 2 \cdot (-0,79)$$

$$= 18,62 - 2,53 + 1,58 = 17,67$$

$$c = \frac{n_2 \cdot \varphi_1^3}{(n_2 - 1)^2} + \frac{n_3 \cdot \varphi_2^3}{(n_3 - 1)^2} + \frac{n_3 \cdot \varphi_2^2}{n_3 - 1}$$

$$= \frac{1,5163 \cdot (1,79)^2}{0,5163^2} + \frac{1,7398 \cdot (-0,79)^3}{0,7398^2} + \frac{1,7398 \cdot (-0,79)^2}{0,7398}$$

$$= 32,62 - 1,57 + 1,47 = 32,52$$

$$2,45.Q^2 + 17,67.Q + 32,52 = 1,185$$

$$2,45.Q^2 + 17,67.Q + 31,335 = 0$$

Hai nghiệm:  $Q_1 = -4,07$  và  $Q_2 = -3,14$ .

5. Tìm  $W_{\infty 1}$  và  $W_{\infty 2}$ :

Với  $Q_1$  có:

$$\begin{aligned} W_{\infty 1} &= -\frac{a+1}{2} \cdot Q_1 + \frac{\varphi_2 - b}{3} \\ &= -\frac{2,45+1}{2} \cdot (-4,07) + \frac{-0,79-17,67}{3} = 0,867 \end{aligned}$$

Với  $Q_2$  có:

$$\begin{aligned} W_{\infty 2} &= -\frac{a+1}{2} \cdot Q_2 + \frac{\varphi_2 - b}{3} \\ &= -\frac{2,45+1}{2} \cdot (-3,14) + \frac{-0,79-17,67}{3} = -0,737 \end{aligned}$$

Kết quả cặp  $P_{\infty}$ ,  $W_{\infty 1}$  cho  $S_{II} = y_1 \cdot P_{\infty} + W_{\infty 1} = 0,867$

và cặp  $P_{\infty}$ ,  $W_{\infty 2}$  cho  $S_{II} = y_1 \cdot P_{\infty} + W_{\infty 2} = -0,737$

Cặp  $P_{\infty}$ ,  $W_{\infty 1}$  có  $S_{II}$  lớn hơn  $S_{II}$  (tính theo 9.3) nên chọn  $Q = -3,14$  (ứng với cặp  $P_{\infty}$ ,  $W_{\infty 2}$  cho  $S_{II}$  nhỏ hơn) để tìm các thông số kết cấu cho vật kính.

6. Tìm các góc  $\alpha_2$  và  $\alpha_3$ :

$$\alpha_2 = \left(1 - \frac{1}{n_2}\right) \cdot Q + \varphi_1 = (1 - 0,659) \cdot (-3,14) + (1,79) = 0,619$$

$$\alpha_3 = \left(1 - \frac{1}{n_3}\right) \cdot Q + \varphi_1 = (1 - 0,574) \cdot (-3,14) + (1,79) = 0,452$$

7. Tra bảng (PL.1) tìm  $d_1$ ,  $d_2$  rồi tính tìm  $h_2$  và  $h_3$ .

Căn cứ vào  $D_p = 30$  để chọn bề dày thấu kính hội tụ là 5 (thấu kính thứ nhất).

Căn cứ vào  $D_p = 30$  để chọn bề dày thấu kính phân kỳ là 3 (thấu kính thứ hai).

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 \cdot d_1 = 100 - 0,619 \cdot 5 = 96,9$$

$$h_3 = h_2 - \alpha_3 \cdot d_2 = 96,9 - 0,452 \cdot 3 = 95,5$$



8. Tìm các bán kính cong của vật kính  $r_1, r_2, r_3$ :

$$r_1 = \frac{(n_2 - n_1) \cdot h_1}{n_2 \cdot \alpha_2 - n_1 \cdot \alpha_1} = \frac{0,5163}{1,5163 \cdot 0,619} \cdot 100 = 57,54$$

$$r_2 = \frac{(n_3 - n_2) \cdot h_2}{n_3 \cdot \alpha_3 - n_2 \cdot \alpha_2} = \frac{0,2235}{1,7398 \cdot 0,452 - 1,5163 \cdot 0,619} \cdot 96,9 = -142,29$$

$$r_3 = \frac{(n_4 - n_3) \cdot h_3}{n_4 \cdot \alpha_4 - n_3 \cdot \alpha_3} = \frac{-0,7398}{1 - 1,7398 \cdot 0,452} \cdot 95,5 = -530,76$$

9. Tính kiểm nghiệm các quang sai hệ vật kính:

Bộ thông số để tính kiểm nghiệm quang sai:

$$r_1 = 57,54; r_2 = -142,29; r_3 = -530,76$$

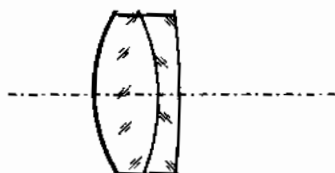
$$d_1 = 5; d_2 = 3;$$

$$n_1 = 1; n_4 = 1$$

$$n_2 = 1,5763; v_2 = 64,1;$$

$$n_3 = 1,7398; v_3 = 27,5$$

$$f' = 100; \omega = -3^\circ \text{ và } D_p = 30.$$



Hình 9.1. Mô phỏng ví dụ 9.1.

### 9.1.1.2. Tính viễn vật kính hai thấu kính mặt tiếp dùng bảng cặp thủy tinh quy chuẩn

Vật kính gồm hai thấu kính dính liền. Tiêu cự vật kính  $f'$ . Tỷ số vật kính  $D'$ . Tiêu cự các thấu kính là  $f'_1, f'_2$  và tỷ số là  $D'_1, D'_2$ . Khi coi tỷ số của vật kính là một đơn vị thì các tỷ số thành phần cho các thấu kính là  $\varphi_1$  và  $\varphi_2$  theo (9.4); (9.6) và (9.7):

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 1$$

ở đây:

$$\varphi_1 = \frac{D'_1}{D'}$$

$$\varphi_2 = \frac{D'_2}{D'}$$

Khi thiết kế, vật kính được hiệu chỉnh ba loại quang sai: sai sắc, cầu sai và koma. Nghĩa là hoặc các loại quang sai của vật kính bằng không hoặc được bù với quang sai của thị kính và bộ đảo ảnh để tổng ba loại quang sai của cả hệ bằng "0". Khi tính được bộ thông số thiết kế cho vật kính, cần phải tính kiểm nghiệm các quang sai thực của bộ thông số đó. Nếu sai lệch giữa quang sai

thực của hệ so với quang sai yêu cầu thiết kế nhỏ hơn  $0,1 \div 0,2$  của các loại quang sai cho trước thì chấp nhận kết quả tìm được làm bộ thông số thiết kế vật kính. Ngược lại, sự sai lệch vượt quá giá trị trên thì phải tính lại để tìm bộ thông số mới thích hợp.

Các điều kiện ban đầu tính vật kính là:

- Vật ở vô cùng  $s = -\infty$ ;
- Tiêu cự  $f'$ , sai sắc  $ds'$ , cầu sai  $\delta l_C$ , koma  $\delta l_K$  ứng với góc mở vật  $\omega$ ;
- Vòng chắn sáng trùng với giá đỡ vật kính (nghĩa là  $s_p = 0$ ) và độ lớn vòng chắn sáng  $D_p$ .

Để thực hiện các phép tính cần sử dụng các mối quan hệ sau:

Tổng ảnh hưởng sai sắc vị trí ảnh:

$$S_{IS} = ds'$$

Tổng ảnh hưởng thứ nhất:

$$S_I = \frac{-2f'^3 \cdot \delta l_C}{m^3} \quad (9.17)$$

Tổng ảnh hưởng thứ hai:

$$S_{II} = \frac{-2f'^3 \cdot \delta l_K}{3m^3 \cdot \omega} \quad (9.18)$$

và các tham số  $C$ ,  $P_\infty$  và  $W_\infty$ :

$$C = \frac{S_{IS}}{f'} = \frac{ds'}{f'} \quad (9.19)$$

$$W_\infty = \frac{S_{II}}{f'} = \frac{-2 \cdot \delta l_K \cdot f'}{3m^2 \cdot \omega} \quad (9.20)$$

$$P_\infty = \frac{S_I}{f'} = \frac{-2f'^2 \cdot \delta l_C}{m^3} \quad (9.21)$$

$$P_{\min} = P_\infty - 0,85 \cdot (W_\infty - 0,15)^2 \quad (9.22)$$

Cách tính được thực hiện tuần tự theo các bước sau:

1. Tìm  $C$  theo (9.19).
2. Tìm  $W_\infty$  theo (9.20).
3. Tìm  $P_\infty$  theo (9.21).
4. Tìm  $P_{\min}$  theo (9.22).
5. Tra chọn cặp thủy tinh.

- Từ  $P_{\min}$  và C sử dụng toán đồ (PL.5) xác định được số ký hiệu các cặp thủy tinh.

- Từ số ký hiệu tra bảng số (PL.6a) và bảng số (PL.6b) tìm các cặp thủy tinh thích hợp.

- Lấy giá trị  $W_{\infty} = W$  để tra bảng số (6.2) hay bảng số (PL.6b).

Nếu  $W < 0,8$  tra bảng (PL.6a) để thấu kính thứ nhất là thủy tinh Kron (kron đứng trước) flin (flin đứng sau). Nếu  $W > 0,8$  tra bảng (PL.6b) để thấu kính thứ nhất là thủy tinh flin (flin đứng trước) và thấu kính thứ hai là thủy tinh kron (kron đứng sau).

6. Tra tìm các tham số C,  $P_0$ ,  $Q_0$ ,  $\varphi_k$  và  $n_2$ ,  $v_2$ ,  $n_3$ ,  $v_3$  theo bảng (PL.7) và (PL.8).

7. Xác định Q:

$$Q = Q_0 - \frac{W_{\infty} - 0,15}{1,67} \quad (9.23)$$

8. Xác định các góc nội  $\alpha_2$  và  $\alpha_3$  theo (9.15) và (9.16):

$$\alpha_2 = \left(1 - \frac{1}{n_2}\right) \cdot Q + \varphi_1$$

$$\alpha_3 = \left(1 - \frac{1}{n_3}\right) \cdot Q + \varphi_1$$

Khi thấu kính thứ nhất là thủy tinh kron thì  $\varphi_1 = \varphi_k$  ( $\varphi_k$  tra trong bảng).

Khi thấu kính thứ nhất là thủy tinh flin thì  $\varphi_1 = 1 - \varphi_k$  ( $\varphi_k$  tra trong bảng).

9. Tra bảng (6.1) tìm các bề dày  $d_1$ ,  $d_2$  và tính  $h_i$ . Cũng có thể tính bề dày theo:

$$d_1 = \frac{D_p}{10} + \frac{D_p^2 \cdot \varphi_1}{8f'}$$

$$d_2 = \frac{D_p}{10} + \frac{D_p^2 \cdot \varphi_2}{8f'}$$

10. Tìm các bán kính cong vật kính  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ :

$$r_i = \frac{(n_{i+1} - n_i) \cdot h_i}{n_{i+1} \cdot \alpha_{i+1} - n_i \cdot \alpha_i}$$

11. Tính kiểm nghiệm các quang sai hệ vật kính:

Sau khi tìm được bộ thông số thiết kế  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ ,  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $n_2$ ,  $v_2$ ,  $n_3$  và  $v_3$  phải

tính kiểm nghiệm:

- Tiêu cự vật kính;
- Quang sai vật kính theo bài toán thuận.

**Ví dụ 9.2:** Tính tìm thông số thiết kế của vật kính ống nhòm có  $f' = 250$  mm, góc mở vật  $\omega = -5^\circ$ , độ lớn vòng chân sáng  $D_p = 2\rho = 30$  mm và độ lớn quang sai cầu sai  $\delta l_C = -0,02$  mm, quang sai koma  $\delta l_K = -0,01$  mm và sai sắc vị trí  $ds' = -0,02$  mm.

1. Tìm C:

$$C = \frac{S_{IS}}{f'} = \frac{ds'}{f'} = \frac{-0,02}{250} = -0,00008$$

2. Tìm  $W_\infty$ :

$$W_\infty = \frac{S_{II}}{f'} = \frac{-2f' \cdot \delta l_K}{3m^2 \cdot \omega} = \frac{-2 \cdot 250^2 \cdot (-0,01)}{3 \cdot 15^2 \cdot (-0,0875)} = -0,08466$$

3. Tìm  $P_\infty$ :

$$P_\infty = \frac{S_I}{f'} = \frac{-2f'^2 \cdot \delta l_C}{m^3} = \frac{-2 \cdot 250^2 \cdot (-0,02)}{15^3} = 0,74$$

4. Tìm  $P_{\min}$ :

$$P_{\min} = P_\infty - 0,85 \cdot (W_\infty - 0,15)^2 = 0,74 - 0,85 \cdot (-0,08466 - 0,15)^2 = 0,69$$

5. Tra chọn cặp thủy tinh:

- Với  $P_{\min} = 0,69$  và  $C = -0,00008$  tra toán đồ (PL.5) xác định được số ký hiệu 10 cho các cặp thủy tinh.

- Từ số ký hiệu số 10 và  $W = -0,00034 < 0,8$  tra bảng (PL.6a) tìm các cặp thủy tinh TK1TF5 (thấu kính thứ nhất là thủy tinh kron, thấu kính thứ nhất là thủy tinh flin).

6. Tra tìm các tham số  $C$ ,  $P_0$ ,  $Q_0$ ,  $\varphi_k$  và  $n_2$ ,  $v_2$ ,  $n_3$ ,  $v_3$  theo bảng (PL.7).

Thấu kính thứ nhất TK1 có  $n_2 = 1,5638$  và  $v_2 = 60,8$ .

Thấu kính thứ hai TF5 có  $n_3 = 1,7550$  và  $v_2 = 27,5$ .

$C = 0$ ;  $P_0 = 0,74$ ,  $Q_0 = -3,48$  và  $\varphi_k = \varphi_1 = 1,826$ ; ( $\varphi_2 = 1 - \varphi_1 = -0,826$ ).

7. Xác định Q:

$$\begin{aligned} Q &= Q_0 - \frac{W_\infty - 0,15}{1,67} = -3,48 - \frac{-0,00034 - 0,15}{1,67} \\ &= -3,48 + 0,09 = -3,39 \end{aligned}$$

8. Xác định các góc nội  $\alpha_2$  và  $\alpha_3$  theo:

$$\alpha_2 = \left(1 - \frac{1}{n_2}\right) \cdot Q + \varphi_1 = \left(1 - \frac{1}{1,5638}\right) \cdot (-3,39) + 1,826 = 0,604$$

$$\alpha_3 = \left(1 - \frac{1}{n_3}\right) \cdot Q + \varphi_1 = \left(1 - \frac{1}{1,7550}\right) \cdot (-3,39) + 1,826 = 0,368$$

9. Tìm  $d_1$ ;  $d_2$ ;  $h_2$  và  $h_3$ :

Từ  $D_p = 30$  tra bảng (PL.1) để tìm  $d_1$  và  $d_2$ ; hoặc tính theo công thức sau:

Bề dày của thấu kính hội tụ:

$$d_1 = \frac{D_p}{10} + \frac{D_p^2 \cdot \varphi_1}{8f'} = \frac{30}{10} + \frac{30^2 \cdot 1,826}{8 \cdot 250} \approx 4 \text{ mm}$$

Bề dày của thấu kính phân kỳ:

$$d_2 = \frac{D_p}{10} + \frac{D_p^2 \cdot \varphi_2}{8f'} = \frac{30}{10} + \frac{30^2 \cdot (-0,826)}{8 \cdot 250} \approx 3 \text{ mm}$$

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 \cdot d_1 = 250 - 0,578 \cdot 4 = 247,7$$

$$h_3 = h_2 - \alpha_3 \cdot d_2 = 247,7 - 0,346 \cdot 3 = 246,6$$

10. Tìm các thông số kết cấu của hệ:  $r_1, r_2, r_3$ :

$$r_i = \frac{(n_{i+1} - n_i) \cdot h_i}{n_{i+1} \cdot \alpha_{i+1} - n_i \cdot \alpha_i}$$

$$r_1 = \frac{(n_2 - n_1) \cdot h_1}{n_2 \cdot \alpha_2 - n_1 \cdot \alpha_1} = \frac{0,5638}{1,5638 \cdot 0,604} \cdot 250 = 149,2$$

$$r_2 = \frac{(n_3 - n_2) \cdot h_2}{n_3 \cdot \alpha_3 - n_2 \cdot \alpha_2} = \frac{0,1912}{1,755 \cdot 0,368 - 1,5638 \cdot 0,604} \cdot 247,7 = -158,55$$

$$r_3 = \frac{(n_4 - n_3) \cdot h_3}{n_4 \cdot \alpha_4 - n_3 \cdot \alpha_3} = \frac{-0,755}{1 - 1,755 \cdot 0,368} \cdot 246,6 = -525,70$$

11. Tính kiểm nghiệm các quang sai hệ vật kính:

Bộ thông số để tính kiểm nghiệm quang sai:

$$r_1 = 149,2; r_2 = -158,55 \text{ và } r_3 = -525,7$$

$$d_1 = 4 \text{ và } d_2 = 3$$

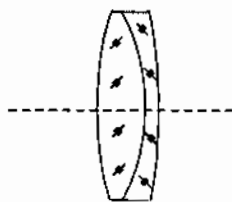
$$n_1 = 1$$

$$n_2 = 1,5638; v_2 = 60,8$$

$$n_3 = 1,755; v_3 = 27,5$$

$$n_4 = 1$$

$$f' = 250; \omega = -5^\circ \text{ và } D_p = 30 \text{ mm.}$$



**Hình 9.2.** Mô phỏng ví dụ 9.2.

## 9.1.2. Tính viễn vật kính gồm hai thấu kính rời

### 1. Cấu tạo vật kính

Vật kính gồm hai thấu kính rời nhau, bán kính thứ hai thấu kính thứ nhất không bằng và không tiếp xúc trực tiếp với bán kính thứ nhất thấu kính thứ hai. Tiêu cự vật kính  $f'$ . Tỷ số vật kính  $D'$ . Tiêu cự các thấu kính là  $f'_1, f'_2$  và tỷ số là  $D'_1, D'_2$ .

Khi thiết kế, vật kính được hiệu chỉnh ba loại quang sai: sai sắc, cầu sai và koma. Nghĩa là hoặc các loại quang sai của vật kính bằng không hoặc được bù với quang sai của thị kính và bộ đảo ảnh để tổng ba loại quang sai của cả hệ bằng không. Sau khi tính được bộ thông số thiết kế, phải tính kiểm nghiệm các quang sai có đảm bảo các yêu cầu cho trước hay không. Khi sai lệch giữa quang sai thực của hệ so với quang sai yêu cầu thiết kế lớn hơn  $10 + 15\%$  thì phải tính lại để tìm bộ thông số mới cho phù hợp.

Như vậy điều kiện để tính vật kính loại này cần biết trước là:

- Vật ở vô cùng  $s = -\infty$ ;
- Tiêu cự  $f'$ , sai sắc  $ds'$ , cầu sai  $\delta l_C$ , koma  $\delta l_K$  ứng với góc mở vật  $\omega$ ;
- Vòng chắn sáng trùng với giá đỡ vật kính (nghĩa là  $s_p = 0$ ) và độ lớn vòng chắn sáng  $D_p$ .

Khi tính bộ thông số thiết kế phải sử dụng hai tia phụ tự chọn để xác định các  $\alpha_i, h_i$  và  $\theta_i, y_i$ . Các  $\alpha_i, \theta_i$  ngoại được chọn tùy ý, song các  $\alpha_i, \theta_i$  nội phải tìm dựa trên các  $P_1, W_1$  và  $P_2, W_2$  của hai thấu kính.

### 2. Quan hệ quang sai với bộ tham số vật kính

$$P_\infty = P_{1\infty} + P_{2\infty} = S_I / f' \quad (9.24)$$

$$W_\infty = W_{1\infty} + W_{2\infty} = S_{II} / I$$

$$\frac{D'_1}{v_2} + \frac{D'_2}{v_4} = S_{IS} \quad (9.25)$$

Trong đó:

- Tổng ảnh hưởng sai sắc vị trí ảnh:

$$S_{IS} = ds' \quad (9.26)$$

- Tổng ảnh hưởng thứ nhất:

$$S_I = \frac{2f'^3 \cdot \delta l_C}{m^3} \quad (9.27)$$

- Tổng ảnh hưởng thứ hai:

$$S_{II} = \frac{-2f' \cdot \delta l_K}{3m^2 \cdot \omega} \quad (9.28)$$

### 3. Các mối quan hệ P và W của mỗi thấu kính

Tham số  $P_{1\infty}$ ,  $P_{2\infty}$  của hai thấu kính khi vật ở vô cùng xác định theo:

$$P_{1\infty} = P_{1\min} + 0,85 \cdot (W_{1\infty} - W_{01})^2 \quad (9.29)$$

$$P_{2\infty} = P_{2\min} + 0,85 \cdot (W_{2\infty} - W_{02})^2 \quad (9.30)$$

trong đó:

$$P_{\min} = \frac{n \cdot (4n - 1)}{4 \cdot (2 + n) \cdot (n - 1)^2} \quad (9.31)$$

$$W_0 = \frac{n}{n - 1} \cdot \left[ 1 - \frac{(n + 1) \cdot (2n + 1)}{2n \cdot (2 + n)} \right] \quad (9.32)$$

### 4. Tham số $P_\infty$ và $W_\infty$ của hệ hai thấu kính được xác định

$$P_\infty = P_{1\infty} + P_{2\infty} \quad (9.33)$$

$$W_\infty = W_{1\infty} + W_{2\infty} \quad (9.34)$$

### 5. Các bước tính được thực hiện

5.1. Chọn cặp vật liệu: Tuỳ thuộc vào điều kiện vật tư của cơ sở sản xuất mà chọn các loại thuỷ tinh để tính, trong đó: một thấu kính là kron và một thấu kính là flin.

5.2. Tìm tụ số hai thấu kính theo và

$$D'_1 + D'_2 = D' \quad (9.35)$$

$$\varphi_1 = D'_1 / D' ; \varphi_2 = D'_2 / D' \quad (9.36)$$

$$\varphi_1 + \varphi_2 = 1 \quad (9.37)$$

5.3. Chọn các góc ngoại  $\alpha_1$ ,  $\alpha_3$  và  $\alpha_5$  theo tia phụ thứ nhất: trường hợp này vật ở vô cùng, hãy chọn  $\alpha_1 = 0$  và  $\alpha_5 = 1$ . Do  $h_1 = f'$ ,  $\alpha_5$  nên  $\alpha_3 = h_1 \cdot D'_1$ .

5.4. Tìm các tham số  $P_{1\min}$ ,  $P_{2\min}$ ,  $W_{01}$  và  $W_{02}$  theo (9.29) đến (9.32).

5.5. Tìm các tham số  $W_{1\infty}$ ,  $W_{2\infty}$  cho thấu kính thứ nhất và thứ hai theo bốn phương trình sau đây (9.33); (9.34) (9.29) và (9.30). Ta được:

$$\begin{aligned} (1) P_\infty &= P_{1\infty} + P_{2\infty} \\ &= (\alpha_3 - \alpha_1)^3 \cdot P_{1\infty} + 4 \cdot \alpha_1 \cdot (\alpha_3 - \alpha_1)^2 \cdot W_{1\infty} + \\ &\quad + \alpha_1 \cdot (\alpha_3 - \alpha_1) \cdot [2\alpha_1 \cdot (2 + \pi_1) - \alpha_3] + (\alpha_5 - \alpha_3)^3 \cdot P_{2\infty} + \\ &\quad + 4 \cdot \alpha_3 \cdot (\alpha_5 - \alpha_3)^2 \cdot W_{2\infty} + \alpha_3 \cdot (\alpha_5 - \alpha_3) \cdot [2\alpha_3 \cdot (2 + \pi_2) - \alpha_5] \\ &= S_I / f' \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 (2) \quad W_{\infty} &= W_{1\infty} + W_{2\infty} \\
 &= (\alpha_3 - \alpha_1)^2 \cdot W_{1\infty} + \alpha_1 \cdot (\alpha_3 - \alpha_1) \cdot (2 + \pi_1) + \\
 &\quad + (\alpha_5 - \alpha_3)^2 \cdot W_{2\infty} + \alpha_3 \cdot (\alpha_5 - \alpha_3) \cdot (2 + \pi_1) \\
 &= S_{II} / I
 \end{aligned}$$

$$(3) \quad P_{1\infty} = P_{1\min} + 0,85 \cdot (W_{1\infty} - W_{01})^2$$

$$(4) \quad P_{2\infty} = P_{2\min} + 0,85 \cdot (W_{2\infty} - W_{02})^2$$

trong đó:

$$\pi = \frac{\varphi}{n} \quad (9.38)$$

Chú ý: có hai cặp nghiệm cho  $W_1$  và  $W_2$ . Chọn cặp nghiệm để các góc  $\alpha_2$  và  $\alpha_4$  nhỏ.

5.6. Tìm các góc nội  $\alpha_2$  và  $\alpha_4$ :

$$\alpha_2 = \frac{n_2}{n_2 + 1} - \frac{n_2 - 1}{n_2 + 1} \cdot W_1 \quad (9.39)$$

$$\alpha_4 = \frac{n_4}{n_4 + 1} - \frac{n_4 - 1}{n_4 + 1} \cdot W_2 \quad (9.40)$$

5.7. Xác định các  $h_i$ .

5.8. Tìm các bán kính cong vật kính:  $r_1, r_2, r_3$ :

$$r_i = \frac{(n_{i+1} - n_i) \cdot h_i}{n_{i+1} \cdot \alpha_{i+1} - n_i \alpha_i}$$

5.9. Tính kiểm nghiệm các quang sai hệ vật kính.

**Ví dụ 9.3:** Tính vật kính hệ vô tiêu hai thấu kính rời.

Các yêu cầu cho trước:  $ds' = \delta l_C = \delta l_K = 0$

Tiêu cự vật kính  $f' = 250$  mm.

1. Chọn cặp vật liệu: Thấu kính thứ nhất có  $n_2 = 1,5$  và  $v_2 = 60$ ;

Thấu kính thứ hai có  $n_4 = 1,7$  và  $v_4 = 30$ .

2. Tìm tụ số hai thấu kính:

$ds' = 0$  nên  $S_{IS} = 0$  và:

$$\frac{D'_1}{v_2} + \frac{D'_2}{v_4} = 0$$

$$D'_1 + D'_2 = D' = 4 \text{ (chọn } h_1 = f' = 250 \text{ mm)}$$

Tìm được  $D'_1 = 8$ ;  $f'_1 = 125$  mm và  $D'_2 = -4$ ;  $f'_2 = -250$  mm.



3. Chọn các góc ngoại  $\alpha_1, \alpha_3$  và  $\alpha_5$  theo tia phụ thứ nhất: trường hợp này vật ở vô cùng, hãy chọn  $\alpha_1 = 0$  và  $\alpha_5 = 1$ . Do  $h_1 = f' \cdot \alpha_5$  nên  $\alpha_3 = h_1 / f'_1 = 2,4$ .  
 Tìm các tham số  $P_{1min}, P_{2min}, W_{01}$  và  $W_{02}$  khi  $n_2 = 1,5$  và  $n_4 = 1,7$  được:

$$P_{1min} = 2,14; \quad P_{2min} = 1,36$$

$$W_{01} = 0,142; \quad W_{02} = 0,135$$

5. Tìm các tham số  $W_1, W_2$  cho thấu kính thứ nhất và thứ hai.

Sau khi điền các giá trị góc ngoại  $\alpha_1 = 0; \alpha_3 = 2; \alpha_5 = 1$  và  $W_{01}, W_{02}$  vào 4 phương trình (9.30) tìm được:

$$W_{1\infty} = 1,62; \quad W_{2\infty} = -1,28$$

6. Tìm các góc nội  $\alpha_{2\infty}$  và  $\alpha_{4\infty}$ :

$$\alpha_2 = \frac{1,5}{1,5+1} - \frac{1,5-1}{1,5+1} \cdot 1,62 = 0,28$$

$$\alpha_4 = \frac{1,7}{1,7+1} - \frac{1,7-1}{1,7+1} \cdot (-1,28) = 0,96$$

7. Xác định các  $h_i$  khi chọn  $d_2 = 5; d_2 = 1$  và  $d_3 = 2$  mm.

$$h_2 = 250 - 0,56 \cdot 5 = 247,2$$

$$h_3 = 247,2 - 2 \cdot 1 = 245,2$$

$$h_4 = 245,2 - 0,22 \cdot 2 = 244,8$$

8. Tìm các bán kính cong vật kính  $r_1, r_2, r_3$  và  $r_4$ :

$$r_i = \frac{(n_{i+1} - n_i) \cdot h_i}{n_{i+1} \cdot \alpha_{i+1} - n_i \alpha_i}$$

Ta được:

$$r_1 = 148,8; \quad r_2 = -106,55; \quad r_3 = -105,56; \quad r_4 = -251,39$$

9. Tính kiểm nghiệm các quang sai hệ vật kính với các số liệu:

$$r_1 = 148,8; \quad r_2 = -106,55; \quad r_3 = -105,56; \quad r_4 = -251,39$$

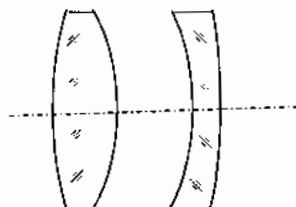
$$d_1 = 5; \quad d_2 = 7; \quad d_3 = 2$$

$$n_1 = 1; \quad n_2 = 1,5; \quad v_2 = 60; \quad n_3 = 1;$$

$$n_4 = 1,7; \quad v_4 = 30; \quad n_5 = 1$$

$$f' = 250 \text{ mm}; \quad \omega = -5^\circ.$$

Hình 9.3. Mô phỏng ví dụ 9.3.



## 9.2. TÍNH CẬN VẬT KÍNH

### 9.2.1. Cơ sở thiết kế

Cận vật kính là vật kính tạo ảnh vật ở gần. Tiêu cự vật kính nhỏ. Khoảng cách từ vật đến vật kính không lớn hơn nhiều so với tiêu cự vật kính. Các loại vật kính máy phóng hình, các loại vật kính hiển vi... thuộc loại vật kính kiểu này.

Vật kính thường gồm hai thấu kính dính liền. Tiêu cự vật kính  $f'$ . Tỷ số vật kính  $D'$ . Tiêu cự các thấu kính là  $f'_1, f'_2$  và tỷ số là  $D'_1, D'_2$ . Vật kính tạo ảnh thật vật không ở vô cùng mà rất gần với tiêu diện vật kính. Tỷ lệ tạo ảnh  $\beta'$  giữa hai mặt phẳng vật và mặt phẳng ảnh cố định. Khoảng cách này và tỷ lệ tạo ảnh thường biết trước khi thiết kế. Vật kính được hiệu chỉnh ba loại quang sai: sai sắc, cầu sai và koma. Nghĩa là hoặc các loại quang sai của vật kính bằng không hoặc được bù với quang sai của các các hệ cùng ghép tiếp với nó. Sau khi tính được bộ thông số thiết kế, cần phải tính kiểm nghiệm các quang sai có đảm bảo các yêu cầu cho trước hay không. Khi sai lệch giữa quang sai thực của hệ so với quang sai yêu cầu thiết kế lớn hơn  $0,1 + 0,3$  thì phải tính lại tìm bộ thông số mới.

Như vậy điều kiện ban đầu cho trước là:

- Tỷ lệ tạo ảnh  $\beta'$ ;
- Khoảng cách hai mặt ảnh và mặt ảnh vật (hoặc tiêu cự  $f'$ );
- Các độ lớn quang sai: sai sắc  $ds'$ , cầu sai  $\delta l_C$ , koma  $\delta l_K$  ứng với góc mở vật  $\omega$  (hoặc độ lớn vật  $2l$ );
- Thụ độ số  $A = \sin u$ ;
- Vòng chắn sáng trùng với giá đỡ vật kính (nghĩa là  $s_p = 0$ ).

Để tính vật kính cần sử dụng các mối quan hệ sau:

Tổng ảnh hưởng sai sắc vị trí ảnh:

$$S_{IS} = ds'$$

Tổng ảnh hưởng thứ nhất:

$$S_I = \frac{-2\beta'^3 \cdot \delta l_C}{u^3} \quad (9.41)$$

Tổng ảnh hưởng thứ hai:

$$S_{II} = \frac{-2\beta'^2 \cdot \delta l_K}{3u^2 \cdot \omega} \quad (9.42)$$

Và các tham số  $C, P, W, P_\infty$  và  $W_\infty$ :

$$C = f' \cdot S_{IS} / h_1^2 \quad (9.43)$$

$$W = -S_{II} / I \quad (9.44)$$

$$P = S_I / h_1 \quad (9.45)$$

$$P_\infty = [1 / (1 - \beta')^3] \cdot \{P - 4\beta'W + \beta'(1 - \beta') \cdot [2\beta'(2 + \pi) + 1]\} \quad (9.46)$$

$$W_\infty = [1 / (1 - \beta')^2] \cdot [W - \beta'(1 - \beta') \cdot (2 + \pi)] \quad (9.47)$$

$$P_{\min} = P_\infty - 0,85 \cdot (W_\infty - 0,15)^2 \quad (9.48)$$

$$\pi = \pi_{TB} = 0,67$$

### 9.2.2. Các bước tính

Cách tính được thực hiện tuần tự theo các bước sau:

1. Tìm vị trí và tiêu cự thấu kính:

$$\text{Vị trí vật:} \quad a = \frac{-L}{1 - \beta'}$$

$$\text{Vị trí ảnh:} \quad a' = \beta' \cdot a$$

$$\text{Tiêu cự vật kính:} \quad f' = \frac{-L\beta}{(1 - \beta)^2}$$

2. Dùng hai tia phụ tự chọn tìm các tham số:  $\alpha_1 = \beta'$ ;  $\alpha_4 = 1$ ;  $h_1 = a \cdot \alpha$ ;  $t_p = 0$ ;  $y_1 = 0$ ;  $I = -\beta'(a - t_p)$ .

3. Tìm các tổng ảnh hưởng:  $S_{IS}$ ,  $S_I$  và  $S_{II}$ .

4. Tìm  $C, P, W, P_\infty, W_\infty$  và  $P_{\min}$ .

5. Tra bảng chọn cặp thủy tinh:

- Từ  $P_{\min}$  và  $C$  sử dụng toán đồ (PL.5) xác định được số ký hiệu các cặp thủy tinh.

- Từ số ký hiệu tra bảng số (PL.6a) và bảng số (PL.6b) tìm các cặp thủy tinh thích hợp.

Nếu  $W < 0,8$  tra bảng (PL.6a) để thấu kính thứ nhất là thủy tinh kron (kron đứng trước), flin (flin đứng sau). Nếu  $W > 0,8$  tra bảng (PL.6b) để thấu kính thứ nhất là thủy tinh flin (flin đứng trước) và thấu kính thứ hai là thủy tinh kron (kron đứng sau).

6. Tìm các tham số  $C, P_0, Q_0, \phi_k$  và  $n_2, v_2, n_3, v_3$  theo bảng (PL.7) và (PL.8).

7. Xác định  $Q$ :

$$Q = Q_0 - \frac{W_\infty - 0,15}{1,67}$$

8. Xác định các góc nội  $\alpha_2$  và  $\alpha_3$  theo (9.15) và (9.16):

$$\alpha_2 = \left(1 - \frac{1}{n_2}\right) \cdot Q + \varphi_1$$

$$\alpha_3 = \left(1 - \frac{1}{n_3}\right) \cdot Q + \varphi_1$$

Khi thấu kính thứ nhất là thủy tinh kron thì  $\varphi_1 = \varphi_k$  ( $\varphi_k$  tra trong bảng).

Khi thấu kính thứ nhất là thủy tinh flin thì  $\varphi_1 = -\varphi_k$  ( $\varphi_k$  tra trong bảng).

9. Tra bảng (PL.1) tìm các bề dày  $d_1$ ,  $d_2$  và tính  $h_i$ . Cũng có thể tính bề dày theo:

$$d_1 = \frac{D_p}{11} + \frac{D_p^2 \cdot \varphi_1}{8f'}$$

$$d_2 = \frac{D_p}{10} + \frac{D_p^2 \cdot \varphi_2}{8f'}$$

10. Tìm các bán kính cong vật kính  $r_1$ ,  $r_2$ ,  $r_3$ :

$$r_i = \frac{(n_{i+1} - n_i) \cdot h_i}{n_{i+1} \cdot \alpha_{i+1} - n_i \cdot \alpha_i}$$

11. Tính kiểm nghiệm các quang sai hệ vật kính.

**Ví dụ 9.4:** Tính tìm thông số thiết kế của vật kính hiển vi tỷ lệ tạo ảnh  $\beta' = -4$  giữa hai mặt ảnh và mặt phẳng vật  $L = 250$  mm. Độ lớn vật  $2l = 4$  mm. Thủ độ số  $A = \sin u = 0,2$ . Độ lớn sai sắc vị trí  $ds' = 0$ , quang sai cầu sai  $\delta l_C = 0,01$  mm và quang sai koma  $\delta l_K = 0,01$  mm khi  $\omega = 0,08$  rad.

1. Tìm vị trí và tiêu cự thấu kính:

$$\text{Vị trí vật: } a = (-L) / (1 - \beta') = -250 / [1 - (-4)] = -50 \text{ mm}$$

$$\text{Vị trí ảnh: } a' = \beta' \cdot a = -4 \cdot (-50) = 200 \text{ mm}$$

$$\text{Tiêu cự vật kính: } f' = -L \cdot \beta' / (1 - \beta')^2 = (250 \cdot 4) / 5^2 = 40 \text{ mm}$$

2. Dùng hai tia phụ tự chọn tìm các tham số:

$$\alpha_1 = \beta' = -4; \alpha_4 = 1;$$

$$h_1 = a \cdot \alpha_1 = 50 \cdot 4 = 200;$$

$$t_p = 0; y_l = 0;$$

$$I = -\beta'(a - t_p) = 4 \cdot (-50) = -200.$$

3. Tìm các tổng ảnh hưởng:  $S_{IS}$ ,  $S_I$  và  $S_{II}$ :

$$S_{IS} = 0$$

$$S_I = [-2.(-4)^3 \cdot 0,01] / 0,2^3 = 160$$

$$S_{II} = [-2.(-4)^2 \cdot 0,01] / 3 \cdot 0,2^2 \cdot 0,08 = -33,3$$

4. Tìm  $C$ ,  $P$ ,  $W$ ,  $P_\infty$ ,  $W_\infty$  và  $P_{\min}$ :

Tìm  $C$  theo (9.33):  $C = 0$

Tìm  $W$  theo (9.34):  $W = -S_{II} / I = -33,3 / 200 = -0,166$

Tìm  $P$  theo (9.35):  $P = S_I / h_1 = 160 / 200 = 0,8$

Tìm  $P_\infty$  theo (9.36) và  $W_\infty$  theo (9.37):

$$P_\infty = (1 / (1 + 4)^3) \cdot \{0,8 - 4 \cdot 4 \cdot 0,166 - 4 \cdot (1 + 4)[-8 \cdot 2,67 + 1]\} = 3,24$$

$$W_\infty = (1 / (1 + 4)^2) \cdot [-0,166 + 4 \cdot (1 + 4) \cdot 2,67] = 2,13$$

Tìm  $P_{\min}$  theo (9.38):  $P_{\min} = P_0 = 3,24 - 0,85 \cdot (2,13 - 0,15)^2 = -0,092$

5. Tra chọn cặp thủy tinh:

- Với  $P_{\min} = -0,092$  và  $C = 0$  tra toán đồ xác định được số ký hiệu 15 cho các cặp thủy tinh.

- Từ số ký hiệu số 15 và  $W = -0,166 < 0,8$  tra bảng (PL.6a) tìm các cặp thủy tinh K14F3 (thấu kính thứ nhất là thủy tinh kron, thấu kính thứ nhất là thủy tinh flin).

6. Tra tìm các tham số  $C$ ,  $P_0$ ,  $Q_0$ ,  $\varphi_k$  và  $n_2$ ,  $\nu_2$ ,  $n_3$ ,  $\nu_3$  theo bảng (6.4):

Thấu kính thứ nhất K14 có  $n_2 = 1,5147$  và  $\nu_2 = 60,6$ .

Thấu kính thứ hai TF3 có  $n_3 = 1,7172$  và  $\nu_3 = 29,5$ .

$$C = 0; P_0 = 0,01, Q_0 = -4,11 \text{ và } \varphi_k = \varphi_1 = 1,949; (\varphi_2 = 1 - \varphi_1 = -0,949)$$

7. Xác định  $Q$ :

$$Q = Q_0 - \frac{W_\infty - 0,15}{1,67} = -4,11 - \frac{2,13 - 0,15}{1,67} = -5,3$$

8. Xác định các góc nội  $\alpha_2$  và  $\alpha_3$  theo:

$$\alpha_2 = (1 - 1/n_2) \cdot Q + \varphi_1 = (1 - 1/1,5147) \cdot (-5,3) + 1,949 = 0,148$$

$$\alpha_3 = (1 - 1/n_3) \cdot Q + \varphi_1 = (1 - 1/1,7172) \cdot (-5,3) + 1,949 = -0,265$$

9. Tính  $d_1$  và  $d_2$  và các chiều cao  $h_2$ ,  $h_3$ :

Với  $\sin u = 0,2$  và  $a = -50$  suy ra  $D_p / 2 = 10$ .

Bề dày của thấu kính hội tụ:

$$d_1 = \frac{D_p}{10} + \frac{D_p^2 \cdot \varphi_1}{8 \cdot f'} = \frac{20}{10} + \frac{20^2 \cdot 1,949}{8 \cdot 40} \approx 5 \text{ mm}$$

Bề dày của thấu kính phân kỳ:

$$d_2 = \frac{D_p}{10} + \frac{D_p^2 \cdot \varphi_2}{8 \cdot f'} = \frac{20}{10} + \frac{20^2 \cdot (-0,949)}{8 \cdot 40} \approx 2 \text{ mm}$$

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 \cdot d_1 = 200 - 0,148 \cdot 5 = 199,26$$

$$h_3 = h_2 - \alpha_3 \cdot d_2 = 199,26 + 0,265 \cdot 2 = 199,79$$

10. Tìm các thông số kết cấu của hệ  $r_1, r_2, r_3$ :

$$r_i = \frac{(n_{i+1} - n_i) \cdot h_i}{n_{i+1} \cdot \alpha_{i+1} - n_i \cdot \alpha_i}$$

$$r_1 = \frac{(n_2 - n_1) \cdot h_1}{n_2 \cdot \alpha_2 - n_1 \cdot \alpha_1} = \frac{0,5147}{1,5147 \cdot 0,148 + 1,4} \cdot 200 = 24,37$$

$$r_2 = \frac{(n_3 - n_2) \cdot h_2}{n_3 \cdot \alpha_3 - n_2 \cdot \alpha_2} = \frac{0,2025}{-1,7172 \cdot 0,265 - 1,5147 \cdot 0,148} \cdot 199,26 = -59,4$$

$$r_3 = \frac{(n_4 - n_3) \cdot h_3}{n_4 \cdot \alpha_4 - n_3 \cdot \alpha_3} = \frac{-0,7172}{1 + 1,7172 \cdot 0,265} \cdot 199,79 = -98,5$$

11. Tính kiểm nghiệm các quang sai hệ vật kính:

Sau khi tìm được bộ thông số thiết kế  $r_1, r_2, r_3, d_1, d_2, n_2, v_2, n_3$  và  $v_3$  phải tính kiểm nghiệm quang sai vật kính theo bài toán thuận.

Bộ thông số để tính kiểm nghiệm quang sai:

$$r_1 = 24,37; r_2 = -59,4 \text{ và } r_3 = -98,5$$

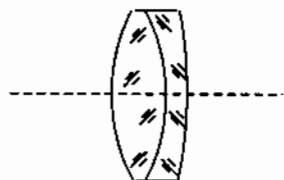
$$d_1 = 5 \text{ và } d_2 = 2$$

$$n_1 = n_4 = 1$$

$$n_2 = 1,5167; v_2 = 60,6$$

$$n_3 = 1,7172; v_3 = 29,5$$

$$f' = 40; \sin u = 0,2 \text{ và } 2l = 4$$



Hình 9.4. Mô phỏng ví dụ 9.4.

### 9.3. TÍNH THỊ KÍNH

Thị kính được ghép với vật kính vô tiêu thành hệ vô tiêu ống nhòm, ghép với vật kính kính hiển vi thành kính hiển vi. Thị kính đưa ảnh giữa do vật kính tạo nên ra vô cùng. Hai loại thị kính thông dụng được ghép với vật kính là thị

kính Ramden, thị kính Huygen. Các thông số quang của thị kính: tiêu cự  $f'_{TK}$ , góc mở  $\omega'$  và vị trí pupin ra (trùng với nơi đặt con người mắt người quan sát)  $t'_p$ .

### 9.3.1. Thị kính Ramden

Thị kính Ramden gồm hai thấu kính có tụ số dương. Mỗi thấu kính có một mặt lồi và một mặt phẳng và cùng một loại thủy tinh. Chúng ghép lại với nhau sao cho hai mặt lồi quay lại nhau và cách nhau một khoảng  $\delta$  (hình 9.5). Thấu kính thứ nhất gắn với ảnh giữa  $y'$  và được gọi là thấu kính trường. Thấu kính trường có tiêu cự  $f'_T > 0$ . Thấu kính thứ hai gắn mắt người quan sát và được gọi thấu kính mắt. Thấu kính mắt có tiêu cự dương  $f'_M > 0$ .

Tiêu cự  $f'_T$ ,  $f'_M$  và khoảng cách  $\delta$  phụ thuộc vào tiêu cự chung thị kính  $f'_{TK}$  và vị trí pupin ra  $t'_p$ . Thị kính Ramden có góc mở  $2\omega_{TK} \leq 40''$ . Các thông số thị kính Ramden được xác định theo:

$$\begin{aligned} f'_T = f'_M = 5 f'_{TK} / 4 ; \quad \delta = 3f'_{TK} / 4 \\ s_F = -f'_{TK} [ 1 - (\delta / f'_M) ] \\ s'_F = f'_{TK} [ 1 - (\delta / f'_T) ] \end{aligned} \quad (9.49)$$

Do cách ghép như vậy mà tiêu diện thứ nhất thị kính nằm trước thấu kính trường và cách thấu kính trường một khoảng  $s_F$ . Thấu kính trường đưa ảnh giữa  $y'$  thành ảnh ảo  $y''$ . Thấu kính mắt đưa ảnh ảo  $y''$  ra trùng với điểm cực viễn người quan sát. Tiêu diện thứ hai thị kính nằm sau thấu kính mắt một khoảng  $s'_F$ . Độ lớn thấu kính trường phụ thuộc vào độ lớn tối đa của ảnh giữa  $y'$  (độ lớn vòng chắn trường) và độ lớn vòng chắn sáng. Độ lớn thấu kính mắt phụ thuộc vào độ lớn, vị trí pupin ra và góc mở  $2\omega_{TK}$ .

Các bán kính thấu kính trường được xác định theo:

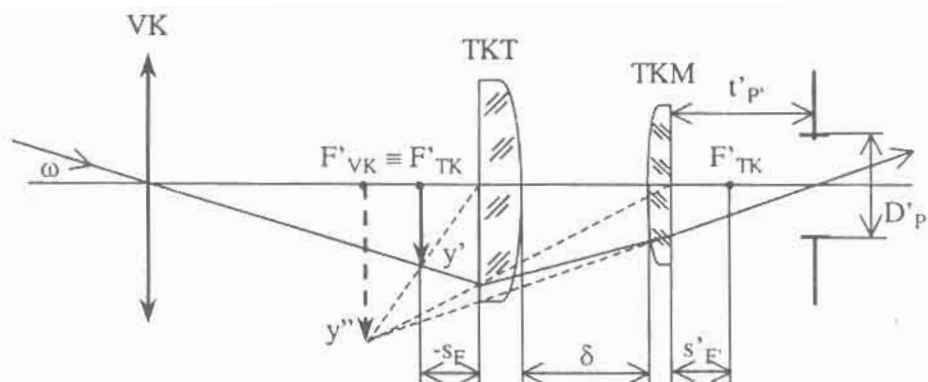
$$r_1 = \infty \text{ và } r_2 = -f'_T \cdot (n - 1)$$

Các bán cong thấu kính mắt:

$$r_1 = f'_M \cdot (n - 1) \text{ và } r_2 = \infty$$

Từ các thông số kết cấu:  $r_1, r_2, n_1 = 1, n_2 = n, n_3 = 1$ , và  $d_1$  (cho thấu kính trường).

$r_3, r_4, n_3 = 1, n_4 = n, n_5 = 1$  và  $d_3$  (cho thấu kính mắt) và khoảng cách hai thấu kính  $d_2 = \delta$  sử dụng bài toán thuận để tìm quang sai của thị kính. Ở đây cần sử dụng phương pháp hành trình ngược của tia sáng để tính quang sai thị kính.



**Hình 9.5.** Thị kính Ramden ở hệ vô tiêu Kepler.

**Ví dụ 9.5:**

Xác định các thông số quang và thông số kết cấu thị kính Ramden có độ phóng đại  $\Gamma'_{TK} = 10\times$ . Góc mở thị kính  $\omega_{TK} = 40^\circ$ .

Tiêu cự thị kính  $f_{TK} = 250 / 10 = 25 \text{ mm}$ .

Tiêu cự thấu kính trường và thấu kính mắt:  $f'_T = f'_M = 5 \cdot 25 / 4 = 31,25 \text{ mm}$ .

Khoảng cách giữa hai thấu kính:  $\delta = 3 \cdot 25 / 4 = 18,75 \text{ mm}$ .

Tiêu cự đỉnh thứ nhất:  $s_F = -25 \cdot [1 - (18,75 / 31,25)] = -10 \text{ mm}$ .

Tiêu cự đỉnh thứ hai:  $s'_F = 25 \cdot [1 - (18,75 / 31,25)] = 10 \text{ mm}$ .

Vật liệu cho hai thấu kính: K2 có  $n = 1,5004$  và  $\nu = 66$ .

Bán kính thứ nhất thấu kính trường:  $r_1 = \infty$ .

Bán kính thứ hai thấu kính trường:  $r_2 = -31,25 \cdot (1,5004 - 1) = -15,64 \text{ mm}$ .

Bán kính thứ nhất thấu kính mắt:  $r_3 = 31,25 \cdot (1,5004 - 1) = 15,64 \text{ mm}$ .

Bán kính thứ hai thấu kính mắt:  $r_4 = \infty$ .

### 93.2. Thị kính Huygen

Thị kính Huygen gồm hai thấu kính có tụ số dương. Mỗi thấu kính có một mặt lồi và một mặt phẳng và cùng một loại thủy tinh. Chúng được ghép lại với nhau sao cho hai mặt lồi ở trước và hai mặt phẳng đứng sau (hình 9.6). Hai thấu kính cách nhau một khoảng  $\delta$ . Thấu kính thứ nhất là thấu kính trường. Thấu kính trường có tiêu cự  $f'_T > 0$ . Thấu kính thứ hai là thấu kính mắt. Thấu kính mắt có tiêu cự dương  $f'_M > 0$ .



Tiêu cự  $f'_T$ ,  $f'_M$  và khoảng cách  $\delta$  phụ thuộc vào tiêu cự chung thị kính  $f'_{TK}$  và vị trí pupin ra  $t'_p$ . Thị kính Huygen có góc mở  $2\omega_{TK} \leq 40^\circ$ . Các thông số thị kính Huygen được xác định theo:

$$\left. \begin{aligned} f'_T &= 2f'_M = 3f'_{TK} / 2 \\ \delta &= 9f'_{TK} / 8 \\ s_F &= -f'_{TK} \cdot [1 - (\delta / f'_M)] \\ s'_{F'} &= f'_{TK} \cdot [1 - (\delta / f'_T)] \end{aligned} \right\} \quad (9.50)$$

Do cách ghép như vậy mà tiêu diện thứ nhất thị kính nằm sau thấu kính trường và cách thấu kính trường một khoảng  $s_F$ . Thấu kính trường đưa ảnh giữa  $y'$  thành ảnh thật  $y''$ . Thấu kính mắt đưa ảnh thật  $y''$  ra trùng với điểm cực viễn người quan sát. Tiêu diện thứ hai thị kính nằm sau thấu kính mắt một khoảng  $s'_{F'}$ . Độ lớn thấu kính trường phụ thuộc vào độ lớn tối đa của ảnh giữa  $y'$ , (độ lớn vòng chắn trường) và độ lớn vòng chắn sáng. Độ lớn thấu kính mắt phụ thuộc vào độ lớn, vị trí pupin ra và góc mở  $2\omega_{TK}$ .

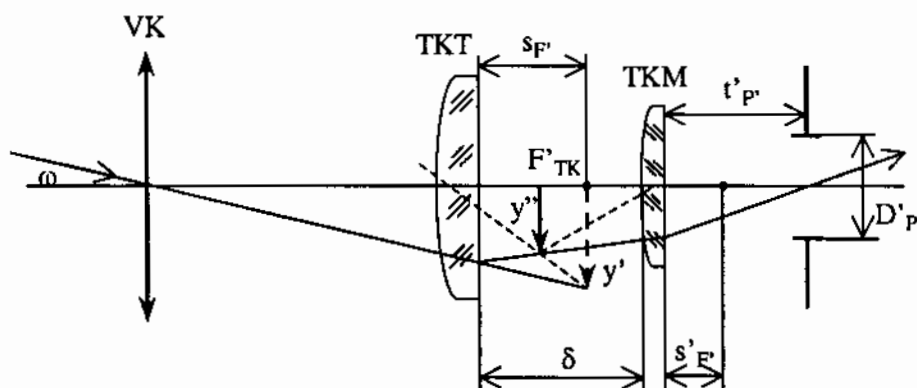
Các bán kính thấu kính trường được xác định theo:

$$r_1 = f'_T \cdot (n - 1) \quad \text{và} \quad r_2 = \infty$$

Các bán cong thấu kính mắt:

$$r_1 = f'_M \cdot (n - 1) \quad \text{và} \quad r_2 = \infty$$

Từ các thông số kết cấu:  $r_1, r_2, n_1 = 1, n_2 = n, n_3 = 1$ , và  $d_1$  (cho thấu kính trường);  $r_3, r_4, n_3 = 1, n_4 = n, n_5 = 1$ , và  $d_3$  (cho thấu kính mắt) và khoảng cách hai thấu kính  $d_2 = \delta$  sử dụng bài toán thuận để tìm quang sai của thị kính. Ở đây cần sử dụng phương pháp hành trình ngược của tia sáng để tính quang sai thị kính.



Hình 9.6. Thị kính Huygen ở hệ vô tiêu Keple.

**Ví dụ 9.6:** Xác định các thông số quang và thông số kết cấu thị kính Huygen có độ phóng đại  $\Gamma'_{TK} = 10\times$ . Góc mở thị kính  $\omega_{TK} = 40^\circ$ .

Tiêu cự thị kính  $f_{TK} = 250 / 10 = 25 \text{ mm}$ .

Tiêu cự thấu kính trường:  $f'_T = 3 \cdot 25 / 2 = 37,5 \text{ mm}$ .

Tiêu cự thấu kính mắt:  $f'_M = f'_T / 2 = 18,75 \text{ mm}$ .

Khoảng cách giữa hai thấu kính  $\delta = 9 \cdot 25 / 8 = 28,125 \text{ mm}$ .

Tiêu cự đỉnh thứ nhất:  $s_F = -25 \cdot [1 - (28,125 / 18,75)] = 12,5 \text{ mm}$ .

Tiêu cự đỉnh thứ hai:  $s'_F = 25 \cdot [1 - (28,125 / 31,25)] = 2,5 \text{ mm}$ .

Vật liệu cho hai thấu kính: K2 có  $n = 1,5004$  và  $\nu = 66$ .

Bán kính thứ nhất thấu kính trường:  $r_1 = \infty$ .

Bán kính thứ hai thấu kính trường:  $r_2 = -37,75 \cdot (1,5004 - 1) = -18,89 \text{ mm}$ .

Bán kính thứ nhất thấu kính mắt:  $r_3 = \infty$ .

Bán kính thứ hai thấu kính mắt:  $r_4 = -18,75 \cdot (1,5004 - 1) = -9,38 \text{ mm}$ .

## 9.4. TÍNH ỐNG KÍNH HỆ CHIẾU SÁNG

Ống kính chiếu sáng còn được gọi tụ quang. Để hạn chế quang sai tụ quang được thiết kế theo hai loại:

Tụ quang gồm một số thấu kính có cùng tụ số dương  $D'_i$  mà tổng tụ số các thấu kính thành phần bằng tụ số của tụ quang  $D'$ :

$$D' = k \cdot D'_i \quad (9.51)$$

Tuy tụ số các thấu kính giống nhau nhưng bán kính cong các thấu kính không giống nhau. Nghĩa là độ cong các thấu kính khác nhau. Tụ quang thiết kế theo nguyên tắc này được gọi là hệ đồng tụ.

Tụ quang gồm các thấu kính Aplanat menis (các thấu kính có các điểm đặc biệt của vật mà khi tạo ảnh không có cầu sai và koma) và được gọi là tụ quang A-menis. Thấu kính cuối cùng của hệ này là thấu kính bình thường không phải menis, nhưng có cầu sai nhỏ nhất. Tụ số hệ A-menis  $D'$ :

$$D' = D'_1 + D'_2 + D'_3 + \dots + D'_z \quad (9.52)$$

Để thiết kế tụ quang cần biết tỷ lệ tạo ảnh  $\beta$  của nguồn  $y$  thành nguồn thứ cấp  $y'$ ; vị trí của nguồn  $y$  so với tụ quang  $s$  (hoặc khoảng cách giữa nguồn và ảnh của nguồn  $l$ , hoặc tiêu cự của hệ), từ đó có tụ số  $D'$  của tụ quang. Việc còn lại là tìm các thông số kết cấu của tụ quang khi có  $z$  thấu kính trong hệ.

### 9.4.1. Tính xác định các thông số kết cấu cho hệ đồng tụ

Hệ gồm  $z$  thấu kính nên số mặt cầu hệ là  $2z$ . Khi tính phải coi đây là hệ mỏng để thỏa mãn điều kiện tụ số (9.41) và các bề dày thấu kính bằng 0 ( $d_1 = d_2 = d_3 = \dots = d_z = 0$ ), khoảng cách giữa các thấu kính cũng được coi bằng 0. Bởi vậy bề dày của tụ quang  $\Sigma d_i \approx 0$  (chỉ số chạy  $i = 1, 2, \dots, 2z$ ).

Từ tia phụ thứ nhất ta chọn:

$$\alpha_1 = \beta \quad \text{và} \quad \alpha'_k = \alpha_{2z+1} = 1$$

Từng thấu kính thứ  $t$  trong hệ có hai góc ngoại (số lẻ) là  $\alpha_{2t-1}$  và  $\alpha_{2t+1}$  cùng với một góc nội là  $\alpha_{2t}$ . Giữa các góc ngoại có mối quan hệ theo:

$$\alpha_{2t+1} = \alpha_{2t-1} + (1 + \beta) / z \quad (9.53)$$

Góc nội của thấu kính  $z$  được tìm theo điều kiện có cấu sai nhỏ nhất, nghĩa là tham số  $P_t$  của thấu kính thứ  $t$  được tính theo  $P_{tmin}$ . Trên cơ sở này các góc nội của từng thấu kính  $t$  trong hệ được xác định theo:

$$\alpha_{2t} = \frac{(2n_{2t} + 1) \cdot (\alpha_{2t-1} - \alpha_{2t+1})}{2 \cdot (n_{2t} + 2)} \quad (9.54)$$

Khi đã xác định được các góc ngoại (số lẻ) và góc nội (số chẵn) mỗi thấu kính tính được các bán kính cong của hệ.

**Ví dụ 9.7:** Tính các thông số kết cấu tụ quang hệ đồng tụ gồm ba thấu kính có tụ số giống nhau. Tụ quang tạo ảnh nguồn thứ cấp có tỷ lệ tạo ảnh  $\beta = -3$  và khoảng cách từ nguồn tới thấu kính thứ nhất là  $-s = -50$  mm. Đường kính tụ quang 40 mm.

1. Chọn cho tia phụ thứ nhất:

Hệ có ba thấu kính nên có số mặt là  $2z = 6$ .

Các góc ngoại:  $\alpha_1; \alpha_3; \alpha_5$  và  $\alpha_7$ .

Các góc nội:  $\alpha_2; \alpha_4$  và  $\alpha_6$ .

Chọn:  $\alpha_1 = \beta$

$$\alpha'_k = \alpha_{2z+1} = \alpha_7 = 1.$$

Tính các góc ngoại theo (6.43):

$$\alpha_{2t+1} = \alpha_{2t-1} + (1 - \beta) / z = \alpha_{2t-1} + 1,33$$

$$\alpha_1 = -3; \alpha_3 = -1,67; \alpha_5 = -0,33; \alpha_7 = 1.$$

Tính các góc nội theo (9.44):

Chọn thủy tinh cho các thấu kính cùng chiết suất  $n = 1,5$  sẽ có:

$$\alpha_{2i} = \frac{4 \cdot (\alpha_{2i-1} - \alpha_{2i+1})}{5}$$

$$\alpha_2 = -2,67; \alpha_4 = -1,14; \alpha_6 = -0,38$$

2. Chọn bề dày các thấu kính và khoảng cách giữa các thấu kính:

Từ đường kính tụ quang là 40 mm chọn bề dày các thấu kính 10 mm và khoảng cách giữa chúng với nhau là 0,1 mm. Như vậy:

$$d_1 = 10; d_2 = 0,1; d_3 = 10; d_4 = 0,1; d_5 = 10$$

Chọn  $h_1 = s$ .  $\alpha_1 = (-50) \times (-3) = 150$ .

3. Lập bảng tính các bán kính cong  $r_i$ :

$\alpha_i$	$n_i$	$\alpha_i \cdot n_i$	$\Delta\alpha_i \cdot n_i$	$\Delta n_i$	$\frac{\Delta n_i}{\Delta\alpha_i \cdot n_i}$	$d_i$	$\alpha_{i+1} \cdot d_i$	$h_i$	$r_i$
-3	1	-3	-1	0,5	-0,5			150	-75
-2,67	1,5	-4	2,33	-0,5	-0,215	10	-26,7	176,7	-38
-1,67	1	-1,67	-0,04	0,5	-12,5	0,1	-0,17	176,9	-2210
-1,14	1,5	-1,71	1,38	-0,5	-0,363	10	-11,4	188,3	-68,3
-0,33	1	-0,33	0,9	0,5	0,555	0,1	-0,03	188,3	140
0,38	1,5	0,57	0,43	-0,5	-1,16	10	3,8	184,6	-214
1	1	1							

4. Tính kiểm nghiệm các quang sai tụ quang:

Sau khi tìm được bộ thông số thiết kế  $r_i$ ,  $d_i$  và  $n_i$  cần tính kiểm nghiệm quang sai tụ quang theo bài toán thuận.

Bộ thông số để tính kiểm nghiệm quang sai:

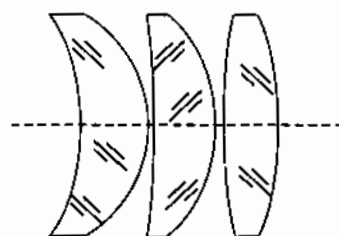
$$r_1 = -75; r_2 = -38; r_3 = -2210$$

$$r_4 = -68,3; r_5 = 104; r_6 = -214$$

$$d_1 = d_3 = d_5 = 10; d_2 = d_4 = 0,1$$

$$n_1 = n_3 = n_5 = n_7 = 1$$

$$n_2 = n_4 = n_6 = 1,5$$



**Hình 9.7.** Cấu tạo tụ quang theo ví dụ 9.7.

### 9.4.2. Tính xác định các thông số kết cấu cho hệ Aplanat menis

#### Thấu kính Aplanat menis

Thấu kính Aplanat menis (A-menis) là thấu kính hội tụ có hai bán kính cong khác nhau về độ lớn nhưng giống nhau về dấu. Thấu kính A-menis có một vị trí của vật mà khi tạo ảnh không có cầu sai và koma.

Theo [1], mỗi mặt cầu khúc xạ có ba vị trí của vật mà khi tạo ảnh qua mặt cầu không có cầu sai và koma;

Vị trí thứ nhất: vật điểm trùng với đỉnh cầu:  $s = 0$ .

Vị trí thứ hai: vật điểm trùng với tâm cầu:  $-s = -r$ .

Vị trí thứ ba: vật điểm cách đỉnh cầu khoảng:

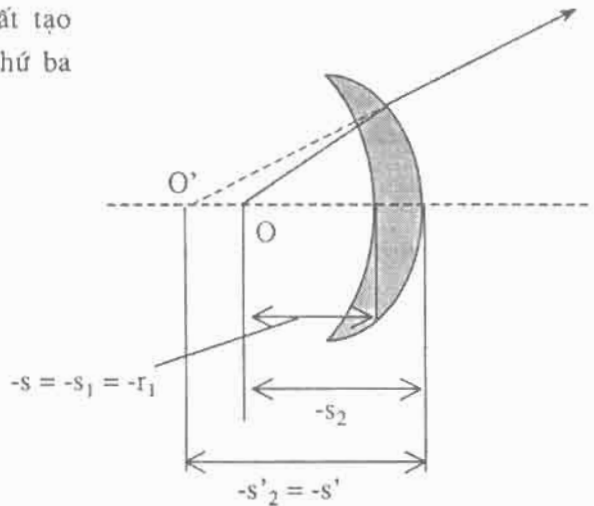
$$s = r \cdot \frac{n + n'}{n} \quad (9.55)$$

Vị trí ảnh xác định theo:

$$s' = r \cdot \frac{n + n'}{n'} \quad (9.56)$$

Dựa theo nguyên tắc trên mà thấu kính A-menis được cấu tạo như sau:

Vật trùng với tâm mặt cầu thứ nhất, ảnh do mặt cầu thứ nhất tạo nên trùng với điểm đặc biệt thứ ba của mặt cầu thứ hai (hình 9.8).



Hình 9.8. Tạo ảnh qua thấu kính A-menis.

Tại mặt cầu thứ nhất:  $-s = -s_1 = -r_1$  và  $-s'_1 = -r_1$  (9.57)

Từ tia tự chọn thứ nhất ta có:  $\alpha_1 = \alpha_2$

Tỷ lệ tạo ảnh:  $\beta_1 = s'_1 / s_1 = \alpha_1 / \alpha_2 = 1$

Tại mặt cầu thứ hai:  $-s_2 = -r_1$  (tính gần đúng coi thấu kính mỏng  $d = 0$ )

$$s'_2 = r_2 \cdot (n + 1) \quad (9.58)$$

Tỷ lệ tạo ảnh:  $\beta_2 = s'_2 / s_2 = n$

Từ tia tự chọn thứ nhất ta có:  $\alpha_3 = \beta_2$ ,  $\alpha_4 = n$ ,  $\alpha_4$

Tỷ lệ tạo ảnh của thấu kính A-menis:  $\beta = \beta_1$ ,  $\beta_2 = n$

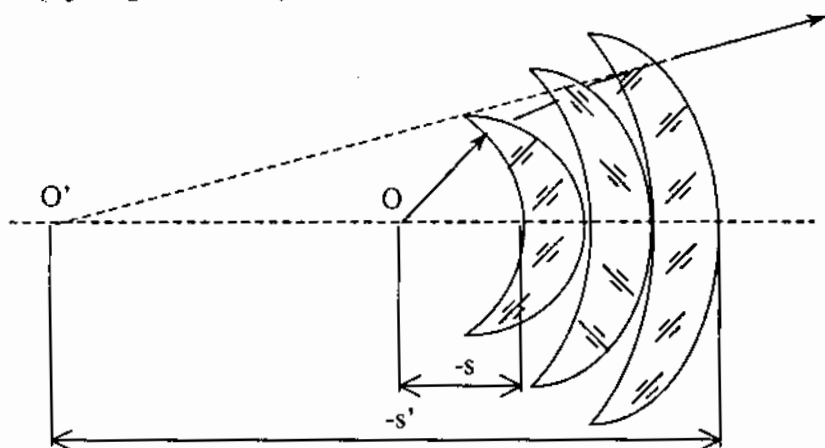
### **Tụ quang là một thấu kính A-menis**

Các dụng cụ quang đơn giản như máy chiếu hình giăng bài, tụ quang chỉ một thấu kính A-menis. Nguồn sáng trùng với tâm cầu mặt cầu thứ nhất. Ảnh của nguồn do tụ quang tạo ra là ảnh ảo nằm trước nguồn. Nhờ tụ quang mà lượng quang thông của nguồn trong góc khối  $2\omega$  chuyển vào hệ tạo ảnh theo góc khối  $2\omega'$  nhỏ hơn. Khi tính thiết kế một tụ quang dạng này cần biết vị trí nguồn đến tụ quang  $s$  và tỷ lệ tạo ảnh hoặc tiêu cự của hệ. Từ đó tìm các bán kính  $r_1$  theo (9.57) và  $r_2$  theo (9.58).

### **Tụ quang gồm nhiều thấu kính A-menis**

Để tăng mật độ chùm quang thông qua hệ tạo ảnh phải ghép hệ từ hai thấu kính A-menis trở lên. Hai cách ghép được sử dụng: tụ quang tạo ảnh ảo và tụ quang tạo ảnh thật.

#### **a. Tụ quang A-menis tạo ảnh ảo**



**Hình 9.9.** Tụ quang A-menis tạo ảnh ảo.

Hệ thường có hai hoặc ba thấu kính được ghép như sau: ảnh của thấu kính đứng trước trùng với tâm cầu của mặt thứ nhất thấu kính đứng sau (hình 9.9).

Các thấu kính A-menis có cùng tỷ lệ tạo ảnh và cùng chiết suất. Tụ quang tạo ảnh của nguồn sáng thành ảnh ảo nằm xa về phía trước tụ quang.

Như vậy, cho hệ z thấu kính thì  $\beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_z = \beta = n$  và tỷ lệ tạo ảnh của hệ:

$$\beta_H = n^z \quad (9.59)$$

Khi tính tụ quang A-menis cần biết tỷ lệ tạo ảnh  $\beta_H$ , vị trí vật đến tụ quang s hoặc tiêu cự của hệ. Từ đó tìm các bán kính  $r_i$ .

**Ví dụ 9.8:** Tính tụ quang với các yếu tố sau:

Tỷ lệ tạo ảnh của tụ quang  $\beta_H = -3$ .

Khoảng cách từ nguồn tới thấu kính thứ nhất là 50 mm.

Đường kính tụ quang 30 mm.

Theo (9.49) thì chiết suất của các thấu kính:

$n = \sqrt[3]{\beta_H}$ . Do  $|\beta_H| = 3$  nên số thấu kính chỉ có thể là hai và chiết suất  $n = 1,7320$ .

Với đường kính tụ quang là 40 chọn bề dày mỗi thấu kính là 8 mm.

Khoảng cách giữa hai thấu kính là 0,1 mm.

Bán kính mặt cầu thứ nhất thấu kính thứ nhất  $-r_1 = -s = 50$  mm.

Vị trí vật của mặt cầu thứ hai thấu kính một:  $-s_2 = -r_1 + d_1 = 50 + 8 = 58$  mm.

Bán kính mặt cầu thứ hai thấu kính thứ nhất tính theo (9.55):

$$\begin{aligned} r_2 &= s_2 \cdot n / (n + 1) \\ &= -58 \cdot 1,732 / (1,732 + 1) = -36,77 \text{ mm} \end{aligned}$$

Vị trí ảnh do mặt cầu thứ hai thấu kính thứ nhất tính theo (9.56):

$$s'_2 = r_2 \cdot (n + 1) = -36,77 \cdot (1,732 + 1) = -100,456$$

Bán kính mặt cầu thứ nhất thấu kính thứ hai:

$$-r_3 = -s_3 = -s'_2 + d_2 = 100,456 + 0,1 = 100,556$$

Vị trí vật của mặt cầu thứ hai thấu kính thứ hai:

$$-s_4 = -r_3 + d_3 = 100,556 + 8 = 108,556$$

Bán kính mặt cầu thứ hai thấu kính thứ hai tính theo (9.55):

$$\begin{aligned} r_4 &= s_4 \cdot n / (n + 1) \\ &= -108,556 \cdot 1,732 / (1,732 + 1) = -68,82 \text{ mm} \end{aligned}$$

Kết quả tìm được:

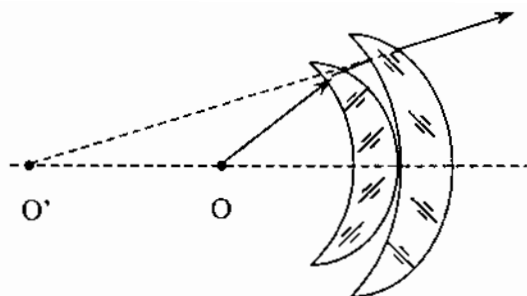
$$r_1 = -50; r_2 = -36,77$$

$$r_3 = -100,546; r_4 = -68,81$$

$$d_1 = d_3 = 8; d_2 = 0,1$$

$$n_1 = n_3 = n_5 = 1$$

$$n_2 = n_4 = 1,732$$



Hình 9.10. Cấu tạo tụ quang theo ví dụ 9.8.

### b. Tụ quang A-menis tạo ảnh thật

Nhiều hệ quang tạo ảnh phức tạp (các loại kính hiển vi sinh vật, các máy phóng hình cỡ lớn...) cần có hệ chiếu sáng tạo ảnh thật của nguồn sáng. Ảnh này hoặc trùng với pupin vào hệ tạo ảnh hoặc gần với mặt chứa vật.

Hệ được ghép bởi  $z$  thấu kính. Trong đó có  $z - 1$  thấu kính đầu là A-menis và thấu kính cuối không phải là A-menis. Các thấu kính từ 1 đến  $z - 1$  được sắp xếp tương tự như hệ tạo ảnh ảo. Thấu kính thứ  $z$  cũng có tụ số dương, tạo ảnh từ vật ảo thành ảnh thật. Thấu kính này được thiết kế có cầu sai nhỏ nhất. Các thấu kính của hệ được ghép sát với nhau (hình 9.11).

Tỷ lệ tạo ảnh của thấu kính A-menis thứ  $t$  của hệ:  $\beta_t = n$ .

Tỷ lệ tạo ảnh của hệ:  $\beta_H = n^{z-1}$ .

Các góc  $\alpha$  do mặt cầu lồi của các thấu kính A-menis tạo thành:

Thấu kính 1:  $\alpha_2 = \alpha_1$

Thấu kính 2:  $\alpha_4 = \alpha_3$

...

Thấu kính  $t$ :  $\alpha_{2t} = \alpha_{2t-1}$

Các góc lồi  $\alpha$  của các thấu kính A-menis tạo thành:

$$\alpha_{2t+1} = \alpha_{2t-1} / \beta_t = \alpha_{2t-1} / n \quad (9.60)$$

(Chỉ số chạy của thấu kính từ 1 đến  $z - 1$ ).

Như vậy từ tia phụ tự chọn thứ nhất đã có:

$$\alpha_1 = \beta_H; \alpha_{2t} = \alpha_{2t-1}; \alpha_{2t+1} = \alpha_{2t-1} / n \text{ và } \alpha_{2z+1} = 1$$

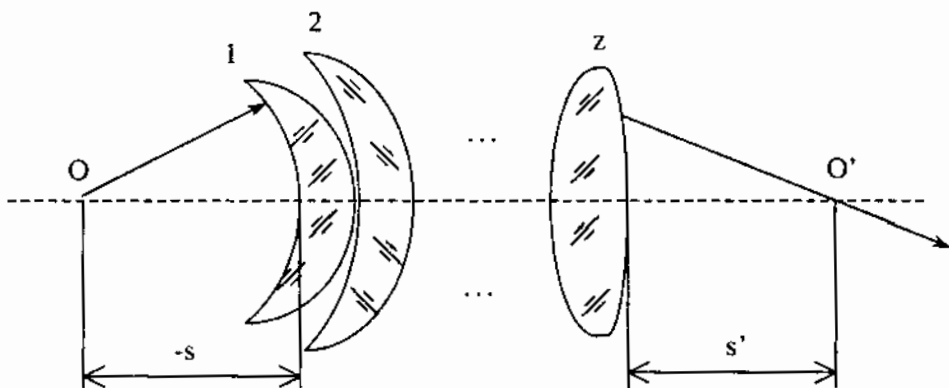
Góc nội của thấu kính thứ  $z$  được xác định theo điều kiện thấu kính có cầu sai nhỏ nhất:  $P_z = P_{zmin}$ .



$$\alpha_{2z} = \frac{(2n_{2t} + 1) \cdot (\alpha_{2t-1} - \alpha_{2t+1})}{2 \cdot (n_{2t} + 2)} \quad (9.61)$$

Từ đường kính tụ quang tra tìm hoặc chọn bề dày các thấu kính.

Tính các bán kính cong  $r_i$ :



Hình 9.11. Tụ quang A-menis tạo ảnh thật.

**Ví dụ 9.9:** Tính tụ quang A-menis tạo ảnh thật ba thấu kính. Tỷ lệ tạo ảnh của tụ  $\beta = -3$ . Tiêu cự của tụ  $f' = 150$  mm. Thấu kính thứ nhất có đường kính 30 mm, đường kính thấu kính thứ hai 36 mm và đường kính thấu kính thứ ba 40 mm.

Chọn chiết suất các thấu kính  $n = 1,5$ .

Hệ có hai thấu kính A-menis và một thấu kính dương có cấu sai nhỏ nhất. Hệ có bìa góc  $\alpha_i$  nội và ngoại.

Tia phụ thứ nhất chọn được:  $\alpha_1 = -3$ ;  $\alpha_7 = 1$  và  $h_1 = f' = 150$ .

Thấu kính thứ nhất:  $\alpha_2 = \alpha_1 = -3$  và  $\alpha_3 = \alpha_1 / n = -3 : 1,5 = -2$ .

Thấu kính thứ hai:  $\alpha_4 = \alpha_3 = -2$  và  $\alpha_5 = \alpha_3 / n = -2 : 1,5 = -1,33$ .

Góc nội  $\alpha_6$  thấu kính thứ ba tính theo (9.61):

$$\alpha_6 = \frac{[(2 \cdot 1,5) + 1] \cdot (-1,33 + 1)}{2 \cdot (1,5 + 2)}$$

Lập bảng tính các bán kính cong  $r_i$ :

$\alpha_i$	$n_i$	$\alpha_i n_i$	$\Delta\alpha_i n_i$	$\Delta n_i$	$\frac{\Delta n_i}{\Delta\alpha_i n_i}$	$d_i$	$\alpha_{i+1} d_i$	$h_i$	$r_i$
-3	1	-3	-1,5	0,5	-0,33			150	-75
-3	1,5	-4,5	2,5	-0,5	-0,2	10	-30	180	-36
-2	1	-2	-1	0,5	-0,5	0,1	-0,2	179,8	-89,9
-2	1,5	-3	1,67	-0,5	-0,3	10	-20	199,8	-60
-1,33	1	-1,33	1,045	0,5	0,49	0,1	-0,133	199,9	98
-0,19	1,5	-0,285	1,285	-0,5	-0,39	10	-1,9	202,8	-83,5
1	1	1							

Kết quả tính được:

$$r_1 = -75; r_2 = -36$$

$$r_3 = -89,9; r_4 = -60$$

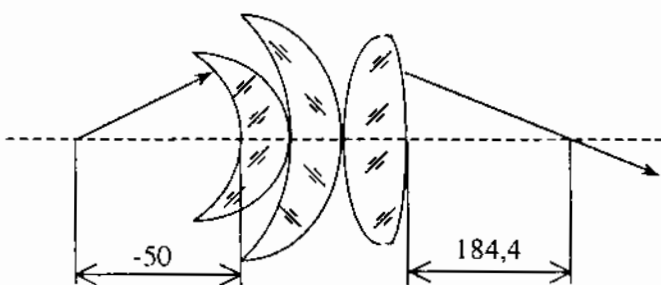
$$r_5 = 98; r_6 = -83,5$$

$$d_1 = d_3 = d_5 = 10$$

$$d_2 = d_4 = 0,1$$

$$n_1 = n_3 = n_5 = n_7 = 1$$

$$n_2 = n_4 = n_6 = 1,5$$



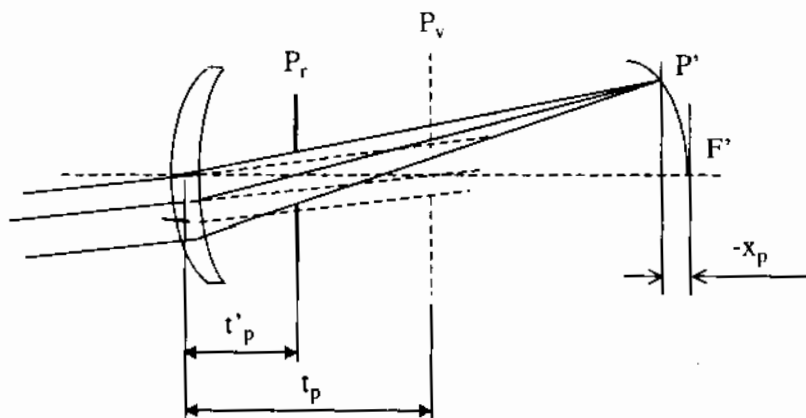
Hình 9.12. Cấu tạo tụ quang theo ví dụ 9.9.

## 9.5. TÍNH KÍNH ĐEO MẮT

Có nhiều loại kính đeo mắt: kính cận, kính viễn, kính lão, kính lão viễn, kính lão cận, kính cận loạn, kính viễn loạn... Quang kỹ thuật đã đề cập đầy đủ nội dung này. Thiết kế kính mắt là tính được các bán kính cong thích hợp vừa thoả mãn các thông số quang vừa đảm bảo hạn chế ảnh hưởng của quang sai ở mức độ nhỏ nhất. Các kính cận và viễn đều có các yếu tố chung là cần có khoảng cách từ mắt đến kính nằm trong khoảng nhất định. Khoảng cách này không quá lớn để thuận tiện tạo gá định vị trí trên sống mũi lại không được quá ngắn để tránh mi mắt và lông mày không chạm vào kính. Thông thường khoảng cách này vào khoảng 15 mm. Các mặt của kính đều có đỉnh cầu nằm trước tâm cầu nghĩa là các bán kính cong mang dấu dương. Mắt và kính mắt lập thành hệ quang có vòng chắn sáng là con ngươi mắt. Khoảng cách  $t'_p \approx 15$  mm. Con ngươi mắt cũng chính là pupin ra của hệ. Pupin vào của hệ là ảo và nằm sau kính mắt một khoảng  $t_p$  (hình 9.13).

$$\frac{1}{t'_p} - \frac{1}{t_p} = \frac{1}{f'} = D' \quad (9.62)$$

$$t_p = \frac{t'_p}{1 - t'_p \cdot D'} \quad (9.63)$$



**Hình 9.13.** Vị trí pupin của kính đeo mắt.

Kính mắt có đường kính lớn (50 mm) nên được chú ý hạn chế quang sai loạn thị.

Khi tính thiết kế phải làm cho tổng ảnh hưởng thứ ba  $S_{III} = 0$ .

Các bước tính được thực hiện theo:

1. Từ tự số, chọn vật liệu kính mắt có chiết suất  $n$  và trị số Abbe  $v$ , vị trí đặt mắt so với kính mắt ( $t'_p$ ) tìm vị trí pupin vào  $t_p$  theo (9.63).

2. Xác định góc nội  $\alpha_2$  theo:

$$\begin{aligned} S_{III} &= y_1^2 \cdot P_\infty + 2 \cdot y_1 \cdot W_\infty + I = 0 \quad (9.64) \\ &= \frac{y_1^2 \cdot (2\mu_2 + 1)}{(1 - \mu_2)^2} \cdot \alpha_2^2 - \left[ \frac{y_1^2 \cdot (2 + \mu_2)}{1 - \mu_2} + \frac{2y_1 \cdot (1 + \mu_2)}{1 - \mu_2} \right] \cdot \alpha_2 + \\ &\quad + \frac{y_1^2}{(1 - \mu_2)^2} + \frac{2y_1}{1 - \mu_2} + I = 0 \end{aligned}$$

ở đây  $y_1 = t_p D' = t'_p / (f' - t'_p)$ .

Giải tìm được hai giá trị của  $\alpha_2$ . Chọn giá trị nhỏ làm góc nội  $\alpha_2$ .

### 3. Tính các bán kính cong.

Nhờ hai tia tự chọn đã có:

$$\alpha_1 = 0 \text{ và } \alpha_3 = 1.$$

$\alpha_2$  tìm được ở bước 2.

$$h_1 = f'.$$

$h_2 = h_1 - \alpha_2 \cdot d$  (chọn  $d = 2$  đến  $3$  mm cho kính tụ số âm và  $d = 3$  đến  $5$  mm cho kính có tụ số dương).

### 4. Tính kiểm nghiệm quang sai.

**Ví dụ 9.10:** Tính các bán kính cong cho kính viễn  $D' = 2$  diop,  $f' = 500$  mm.

Chọn vật liệu  $n = 1,6$ . Vị trí đặt mắt  $t'_p = 20$  mm.

Vị trí pupin vào:

$$t_p = 20 / (1 - 20 / 500) = 20,8$$

Xác định góc nội  $\alpha_2$ :

$$y_1 = 20 / 500 = 0,04$$

Lập phương trình bậc ba theo (6.63):

$$\frac{0,04^2 \cdot (2 \cdot 0,625 + 1)}{(1 - 0,625)^2} \cdot \alpha_2^2 - \left[ \frac{0,04^2 \cdot (2 + 0,625)}{(1 - 0,625)^2} + \frac{2 \cdot 0,04 \cdot (1 + 0,625)}{1 - 0,625} \right] \cdot \alpha_2 + \frac{0,04^2}{(1 - 0,625)^2} + \frac{2 \cdot 0,04}{1 - 0,625} + 1 = 0$$

$$0,0256 \cdot \alpha_2^2 - 0,3765 \cdot \alpha_2 + 1,2247 = 0$$

$$256 \cdot \alpha_2^2 - 3765 \cdot \alpha_2 + 12247 = 0$$

Giải tìm được hai giá trị của  $\alpha_2$ :  $\alpha_2 = 4,86$  và  $\alpha_2 = 9,85$ . Chọn  $\alpha_2 = 4,86$  để tính tiếp vì nó có giá trị nhỏ hơn.

$$h_2 = h_1 - \alpha_2 \cdot d = 500 - 4,86 \cdot 3 = 484$$

$$r_1 = 0,6 \cdot 500 / 1,6 \cdot 4,86 = 38,6$$

$$r_2 = -0,6 \cdot 484 / (1 - 1,6 \cdot 4,86) = 42,9$$

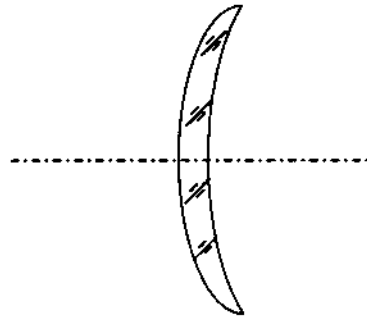
Kết quả tìm được:

$$r_1 = 38,6$$

$$r_2 = 42,9$$

$$n = 1,6$$

$$d = 3$$



**Hình 9.14.** Kính viễn tính theo ví dụ 9.10.

## 9.6. TÍNH HỆ GHÉP

Điều kiện cơ bản khi tính tìm thông số cấu tạo hệ ghép (áp dụng lý thuyết quang sai bậc ba) là làm tổng quang sai của toàn hệ phải bằng "0". Cụ thể hệ được khử ba loại quang sai: sai sắc, cầu sai và koma. Với điều kiện về quang sai như vậy ta tách được quang sai của các hệ thành phần. Hãy xét một số hệ cụ thể sau đây:

### *Tính cho hệ hiển vi*

- Từ thông số quang của thị kính xác định các thông số kết cấu (theo 9.3):  $r_i$ ,  $d_i$  và  $n_i$ .

- Tính quang sai của thị kính theo bài toán thuận để được độ lớn cầu sai thị kính  $\delta l_{C-T}$ , độ lớn koma thị kính  $\delta l_{K-T}$  và sai sắc thị kính  $ds'_{TK}$ .

- Từ các kết quả thị kính, ta tìm điều kiện quang sai để tính vật kính:

$$\delta l_{C-V} = -\delta l_{C-T}$$

$$\delta l_{K-V} = -\delta l_{K-T}$$

$$ds'_{VK} = -ds'_{TK}$$

- Tụ số quang vật kính và các giá trị quang sai của vật kính tìm các thông số kết cấu vật kính (theo 9.2)  $r_i$ ,  $d_i$  và  $n_i$ .

- Tính kiểm nghiệm quang sai: sử dụng bài toán thuận tính quang sai vật kính (nội dung chương VIII).

### *Tính cho hệ vô tiêu Keple*

- Từ thông số quang của thị kính xác định các thông số kết cấu (theo 9.3)  $r_i$ ,  $d_i$  và  $n_i$ .

- Tính quang sai của thị kính theo bài toán thuận để được độ lớn cầu sai thị kính  $\delta l_{C-T}$ , độ lớn koma thị kính  $\delta l_{K-T}$  và sai sắc thị kính  $ds'_{TK}$ .

- Tính bộ đảo ảnh lăng kính:

- Tính các kích thước hình học và tìm được quỹ đường hình học của tia sáng đi trong lăng kính  $d$ .

- Xác định quang sai của lăng kính: Cầu sai  $\delta l_{C-L}$ , koma  $\delta l_{K-L}$ , sai sắc  $ds'_{LK}$  theo (8.83):

$$\text{Cầu sai} \quad \delta l_{C-L} = \frac{n^2 - 1}{2n^3} \cdot u_l^2 \cdot d$$

Koma: 
$$\delta l_{KL} = \frac{3 \cdot (n^2 - 1) \cdot \omega}{2n^3} \cdot u_1 \cdot d$$

Loạn thị: 
$$x'_s - x'_m = \frac{n^2 - 1}{n^3} \cdot \omega^2 \cdot d$$

Méo ảnh: 
$$\delta l_{D-L} = \frac{n^2 - 1}{2n^3} \cdot \omega^3 \cdot d$$

Sai sắc: 
$$ds'_{Lk} = \frac{n - 1}{n^2 \cdot v} \cdot u_1^2 \cdot d$$

Có thể thay:

$$u_1 \approx \frac{m}{s - t_p}$$

- Từ các thông số quang vật kính và các giá trị quang sai của vật kính:

$$\delta l_{C-v} = -\delta l_{C-T} - \delta l_{C-L}$$

$$\delta l_{K-v} = -\delta l_{K-T} - \delta l_{K-L}$$

$$ds'_{vk} = -ds'_{Tk} - ds'_{Lk}$$

tìm được các thông số kết cấu vật kính (theo 9.1)  $r_i$ ,  $d_i$  và  $n_i$ .

- Tính kiểm nghiệm quang sai: Sử dụng bài toán thuận tính quang sai vật kính (nội dung chương VIII).

## Chương X

# GIAO THOA ÁNH SÁNG VÀ ỨNG DỤNG

### 10.1. MỘT SỐ KHÁI NIỆM

• Các chùm sáng kết hợp: Chùm sáng kết hợp là chùm sáng đơn sắc được bức xạ từ nguồn kết hợp và có chiều dài bước sóng không đổi trong suốt chiều dài truyền sóng. Chỉ có các chùm sáng kết hợp mới tạo được giao thoa ánh sáng. Biên độ dao động của vectơ cường độ điện trường của sóng kết hợp tại thời điểm  $t$  cách nguồn sáng quang lộ  $L$  được xác định theo:

$$r = R \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} L\right)$$

• Nguồn sáng kết hợp là nguồn tạo các chùm kết hợp. Để có giao thoa thì hai nguồn sáng phải là hai chùm kết hợp và phải có sự chồng chập của hai đoạn sáng cùng loại.

• Giao thoa của các chùm sáng kết hợp. Giả sử tại thời điểm  $t$  hai tia sáng từ hai nguồn sáng kết hợp  $S_1$  và  $S_2$  (hình 10.1), có biên độ dao động tại  $P$  :

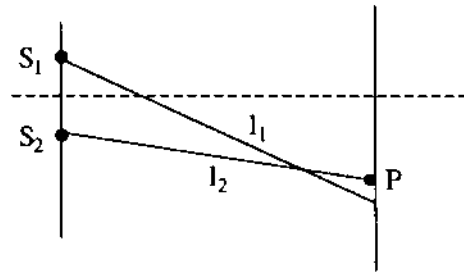
$$r_1 = R_1 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} L_1\right)$$

$$r_2 = R_2 \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{\lambda} L_2\right)$$

Tại đó có giao thoa ánh sáng. Biên độ dao động tổng tại  $P$  của hai tia sáng phụ thuộc vào hiệu quang lộ  $(L_1 - L_2)$  hoặc vào độ lệch pha  $\Delta\varphi = (2\pi/\lambda).(L_1 - L_2)$ . Khi  $\Delta\varphi = 2k\pi$  nghĩa là  $(L_1 - L_2) = k\lambda$  thì biên độ dao động tổng hợp và cường độ sáng tại đó là lớn nhất. Nếu  $\Delta\varphi = (2k + 1)\pi$  nghĩa là  $(L_1 - L_2) = (2k + 1)\lambda/2$  thì biên độ dao động tổng hợp và cường độ sáng tại đó là nhỏ nhất.

Như vậy tại miền giao thoa của hai chùm sáng kết hợp có các điểm sáng nhất khi  $(L_1 - L_2) = k\lambda$  và các điểm cường độ sáng nhỏ nhất khi  $(L_1 - L_2) = (2k + 1)\lambda/2$  trong đó  $k = 0; \pm 1; \pm 2; \pm 3...$  Các điểm sáng nhất liên kết với nhau thành các vân sáng. Các điểm tối nhất liên kết với nhau thành các vân tối. Khi nhận các vân đó trên bề mặt nào đó, ta được các vân sáng tối xen kẽ nhau chính là hệ vân giao thoa của hai chùm sáng.

Tóm lại, sự giao thoa của hai chùm sáng để nhận biết được các vân sáng xen lẫn các vân tối chỉ xảy ra khi: hai chùm đó là hai chùm kết hợp và phải có sự chồng chập của hai đoạn sáng cùng loại. Thực tế không thể tạo ra hai nguồn sáng kết hợp riêng biệt để chúng giao thoa với nhau. Vì các đoạn sáng của hai nguồn khác nhau không phụ thuộc lẫn nhau, các pha dao động của chúng không liên quan với nhau. Bởi vậy phải tách từ một nguồn thành hai nguồn kết hợp. Các chùm sáng từ hai nguồn đó truyền theo hai hướng khác nhau. Sau khi mỗi chùm thực hiện quãng đường quang học (quang lộ)  $L = n.d$ , chúng kết hợp lại mới giao thoa ánh sáng. Ngoài ra muốn có giao thoa thì hiệu quang lộ của hai chùm thành phần  $\Delta(n.d)$  không quá lớn so với chiều dài kết hợp của các đoạn sáng. Chiều dài kết hợp phụ thuộc vào độ bán rộng tần số dao động ánh sáng  $\Delta\nu$ :



**Hình 10.1.** Giao thoa của hai chùm sáng  $S_1$  và  $S_2$ .

$$d_k = c / \Delta\nu \quad (10.1)$$

trong đó:  $c$ - vận tốc ánh sáng;  $\Delta\nu$ - độ bán rộng tần số.

Với hiệu quang lộ  $\Delta(n.d)$  hai chùm thành phần đã nhanh hoặc chậm so với nhau một số lần  $m$  bước sóng ánh sáng:

$$m = \Delta(n.d) / \lambda \quad (10.2)$$

Vì số lần bước sóng  $m$  rất dễ xác định bằng cách đếm các vân giao thoa mà giao thoa ánh sáng được ứng dụng rộng rãi trong các phép đo lường chính xác.

Căn cứ vào quan hệ (15.2) có thể phân biệt ba loại thiết bị giao thoa:

- Thiết bị giao thoa đo chiều dài: Đo các kích thước chiều dài và hình dáng các bề mặt (do  $d$ )
- Thiết bị phổ kế giao thoa: Xác định bước sóng  $\lambda$  của các nguồn và vật liệu ánh sáng.
- Thiết bị khúc xạ kế giao thoa: Xác định chiết suất của vật liệu hoặc vật thể có tính quang học.
- Bảng 10.1 so sánh tính chất các nguồn sáng kết hợp. Trong đó  $d_k/\lambda$  được gọi là số lần bước sóng ánh sáng của hai đoạn sáng giao thoa.



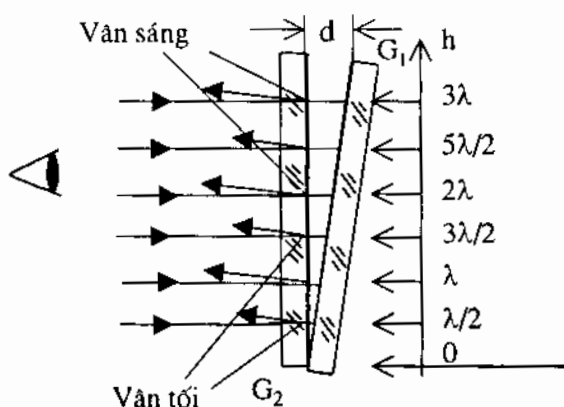
**Bảng 10.1.** Đặc tính một số nguồn sáng

	Bán rộng tần số $\Delta\nu$	Chiều dài kết hợp $d_k$	$d_k / \lambda$
Nguồn sáng trắng	Tới $2 \cdot 10^{14} \cdot \text{s}^{-1}$	Tới $1,5 \mu\text{m}$	Tới $3 \cdot \lambda$
Quang phổ vạch Kr 86- $\lambda = 606 \text{ nm}$	Tới $3,57 \cdot 10^8 \cdot \text{s}^{-1}$	Tới $84 \text{ cm}$	Tới $1,39 \cdot 10^6 \cdot \lambda$
Laser HeNe $\lambda = 633 \text{ nm}$	Tới $5 \cdot 10^6 \cdot \text{s}^{-1}$	Tới $60 \text{ m}$	Tới $10^8 \cdot \lambda$

Các nguồn ánh sáng trắng có chiều dài kết hợp hai đoạn sáng rất ngắn, nguồn laser có chiều dài kết hợp rất lớn.

• Vân giao thoa có cùng bề dày

Gương phẳng  $G_1$  phản xạ mặt trên và gương bán thấu  $G_2$  phản xạ mặt dưới tạo thành gương góc  $\alpha$ . Giữa hai gương tạo thành nêm không khí (hình 10.2). Khi rọi chùm sáng song song với góc tới nhỏ vào nêm sẽ có hai chùm phản xạ trở lại: chùm phản xạ trên bán thấu qua để gương  $G_2$  rồi ra ngoài. Tia thứ hai qua bán thấu vào



**Hình 10.2.** Giao thoa cùng bề dày.

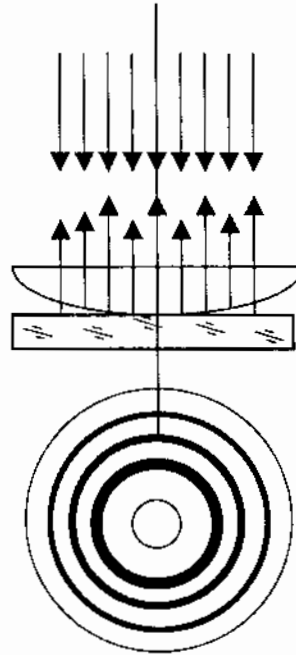
nêm, phản xạ trên mặt gương  $G_1$  về qua gương  $G_2$  ra ngoài cùng phía với tia thứ nhất. Hiệu quang lộ của hai chùm tia được xác định theo:  $\Delta(n.d) = 2.d + \lambda/2$  (bởi  $n=1$ , quãng đường hình học  $2.d$  và độ nhảy pha  $\lambda/2$  tại mặt  $G_2$ ). Hai chùm tia phản xạ giao thoa với nhau hình thành hệ thống vân sáng tối. Khi hiệu quang lộ  $\Delta(n.d)$  bằng số lẻ lần  $\lambda/2$  có vân tối, khi  $\Delta(n.d)$  số chẵn lần  $\lambda/2$  có vân sáng. Mỗi vân được hình thành do những điểm phản xạ có cùng vị trí  $d$ . Hệ vân như vậy gọi là **vân giao thoa có cùng bề dày**. Bề dày  $d$  tăng tỷ lệ thuận với chiều cao  $h$  nên khoảng cách giữa các vân sáng tối đều nhau. Hệ vân như vậy còn được gọi là **hệ vân Fizaui**.

Nếu thay  $G_2$  bằng mặt cầu (hình 10.3) ta nhận được hệ vân Fizaui. Hệ vân này gồm các vòng tròn sáng tối chen nhau nên gọi là **vân tròn Newton**.

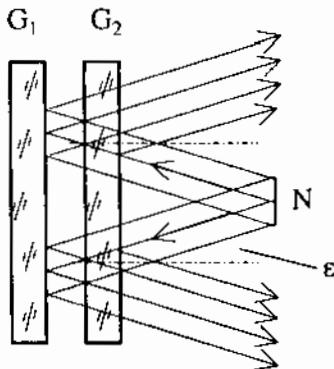
• **Vân giao thoa có cùng độ nghiêng**

Giữa hai tấm thủy tinh  $G_1$  và  $G_2$  (hình 10.4) tạo nên bản không khí song song. Chùm tới với góc tới nhỏ qua  $G_2$  vào bản không khí, xuất hiện hai chùm phản xạ ra khỏi bản  $G_2$  giao thoa với nhau. Do bề dày  $d$  của lớp không khí là không đổi nên hiệu quang lộ hình thành là do góc nghiêng  $\epsilon$  của chùm tới. Với mỗi giá trị nhất định của  $\epsilon$  ta có một hệ vân sáng tối xen kẽ nhau. Hệ vân này được gọi **vân giao thoa có cùng độ nghiêng**.

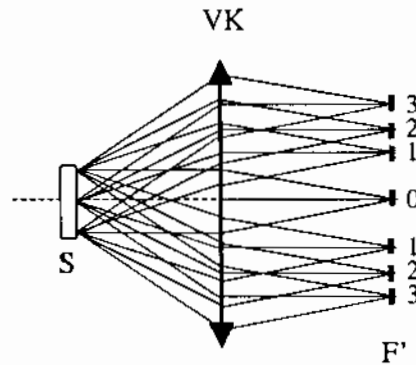
Vân cùng độ nghiêng định xứ ở vô cùng. Sử dụng vật kính VK đưa chúng về tiêu diện thứ hai  $F'$  sẽ được hệ vân tròn sáng tối xen kẽ nhau. Trung tâm là hình tròn cường độ sáng cực tiểu. Các vân bậc lẻ có cường độ sáng cực đại và các vân bậc chẵn có cường độ sáng cực tiểu. Hệ vân này còn gọi **vân tròn Haiding**.



**Hình 10.3.** Vân tròn Newton.



**Hình 10.4.** Giao thoa cùng độ nghiêng.



**Hình 10.5.** Vân tròn Haiding.

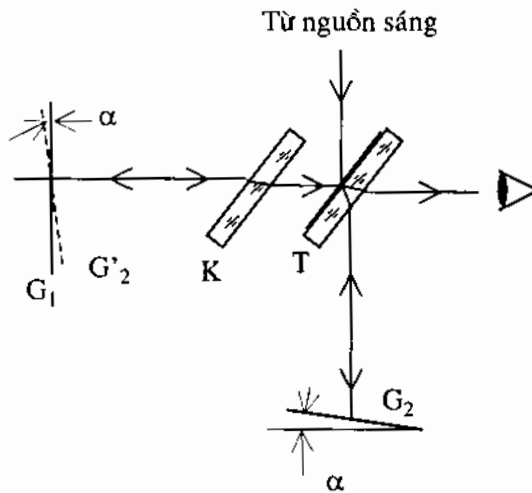
## 10.2. MỘT SỐ ỨNG DỤNG GIAO THOA ÁNH SÁNG

### 10.2.1. Thiết bị giao thoa đo chiều dài

- Nguyên lý giao thoa kế Maikenson

Hình 10.6 mô tả nguyên lý cấu tạo giao thoa kế Maikenson. Chùm sáng từ nguồn gặp gương bán thấu T chia thành hai chùm thành phần: **Chùm phản xạ** ở lớp bán thấu T qua bản K rồi phản xạ trên gương  $G_1$  đặt vuông với góc với trục quang, chùm sáng trở lại lớp bán thấu của T. **Chùm qua T** phản xạ trên gương  $G_2$  đặt nghiêng góc nhỏ  $\alpha$ , chùm này trở lại lớp bán thấu của T để giao thoa với chùm thứ nhất. Mắt quan sát được các vân giao thoa định xứ sau lớp bán thấu T. Bản K được sử dụng để cân bằng quang lộ hai chùm thành phần. Ảnh ảo  $G_2'$  tạo với gương  $G_1$  nằm không khí

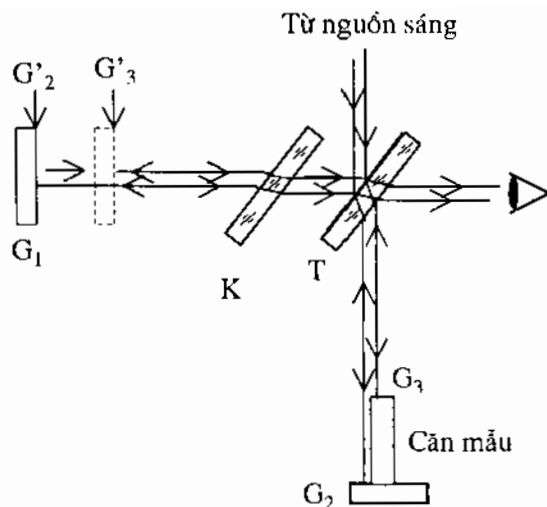
(hình 10.6). Nguyên lý giao thoa kế Maikenson vận dụng cả hai khả năng: tạo vân cùng bề dày và vân cùng độ nghiêng. Khi hai gương lập với nhau góc  $\alpha$  phù hợp với giao thoa cùng bề dày (hình 10.2) có hệ vân Fizeau. Khi chỉnh để hai gương song song với nhau phù hợp với giao thoa cùng độ nghiêng (hình 10.4) có các vân Haiding.



Hình 10.6. Nguyên lý giao thoa kế Maikenson.

- Máy giao thoa đo chiều dài tuyệt đối

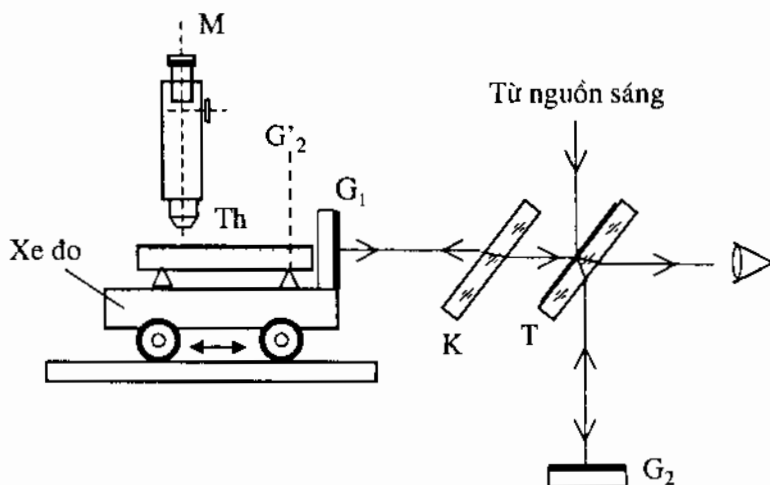
Hình 10.7 là sơ đồ quang của máy giao thoa đo chiều dài xác định kích thước của các căn mẫu thiết kế theo nguyên lý Maikenson. Hai hệ vân được hình thành. Hệ thứ nhất do giao thoa hai chùm sáng phản xạ từ  $G_2$  và  $G_1$  tương ứng với cặp  $G'_2$  và  $G_1$ . Hệ thứ hai do giao thoa hai chùm sáng phản xạ từ  $G_3$  và  $G_1$  tương ứng với cặp  $G'_3$  và  $G_1$ . Khoảng cách  $G'_3$  và  $G'_2$  chính là chiều dài căn mẫu.



**Hình 10.7.** Máy giao thoa đo chiều dài.

- Máy giao thoa xác định sai số của thước số

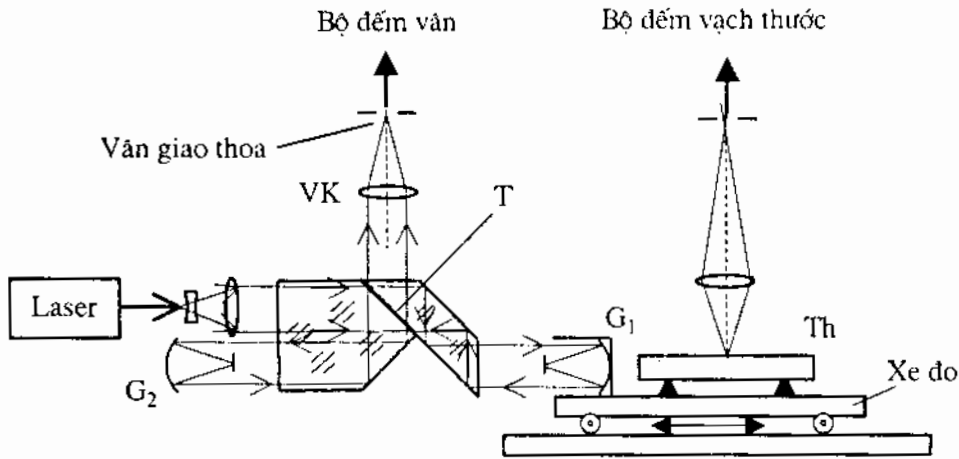
Hình 10.8 là sơ đồ quang của máy giao thoa xác định sai số của các thước đo thiết kế theo nguyên lý Maikenson. Hệ vân giao thoa được hình thành, do giao thoa hai chùm sáng phản xạ từ  $G_2$  và  $G_1$ . Xe đo dịch chuyển thước theo khoảng cách mỗi vạch nhờ kính hiển vi quan sát M. Độ lệch hệ vân với chuẩn là sai số của từng vạch trên thước.



**Hình 10.8.** Máy giao thoa chuẩn thước.

- Máy giao thoa xác định dịch chuyển bằng chùm laser

Hình 10.9 là sơ đồ quang của máy giao thoa xác định sai số của các thước đo thiết kế theo nguyên lý Maikenson sử dụng chùm sáng laser. Hệ vân giao thoa được hình thành tại tiêu diện thứ hai vật kính  $VK_1$ . Chùm laser được phân thành hai chùm tại lớp bán thấu T. Chùm phản xạ đi theo tới gương cầu  $G_2$  rồi trở lại vào vật kính  $VK_1$ . Chùm thứ hai qua bán thấu T để đến gương cầu  $G_1$  rồi trở lại và phản xạ trên T vào vật kính  $VK_1$  và tạo hệ vân giao thoa trên  $F'$ . Xe đo dịch chuyển thước theo khoảng cách mỗi vạch. Nhờ bộ đếm vạch thước và bộ đếm vân xác định vị trí tức thời của thước. Nhờ đó xác định được khoảng cách giữa hai vị trí tức thời.



Hình 10.9. Đo dịch chuyển độ dài bằng giao thoa kế laser.

### 10.2.2. Ứng dụng giao thoa tạo ảnh nổi

- Gabe phát minh ra ảnh nổi từ năm 1948 và được dùng trong quay chiếu phim ảnh nổi. Chỉ từ khi phát minh ra kỹ thuật laser, ảnh nổi đã được ứng dụng đặc biệt rộng rãi trong đo lường chính xác và cơ khí quang học.

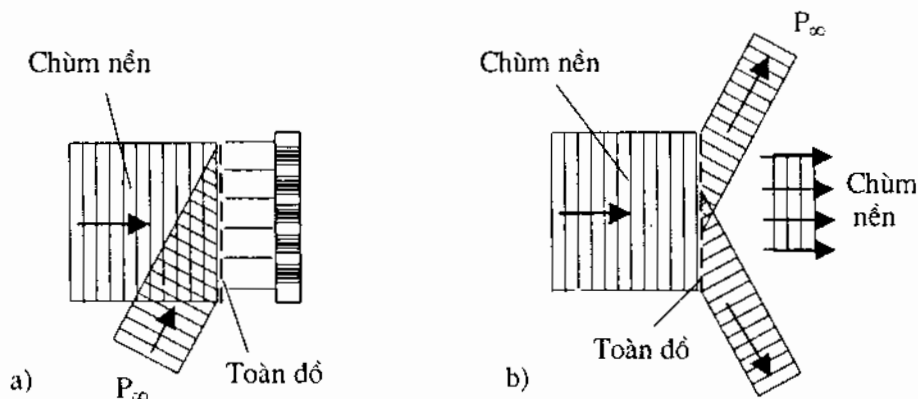
- Khi chụp ảnh thông thường, vật không gian ba chiều cho ảnh hai chiều trên mặt phim ( $z = 0$ ). Ảnh nổi hay ảnh toàn ký, ảnh được tạo nên theo không gian ba chiều. Hình ảnh của vật được ghi lại trên phim là tập hợp những hệ vân giao thoa phức tạp chồng chập lên nhau. Các hệ vân này hình thành do các chùm sáng tán xạ từ các vật điểm của vật và chùm sáng nền. Tấm phim được gọi tấm toàn đồ.

Để tái tạo lại hình ảnh từ bức tranh giao thoa của toàn đồ lưu giữ, thì toàn

đồ lại được chiếu chùm sáng nguồn giống hệt như chùm sáng nguồn khi tạo toàn đồ. Qua các vân trên toàn đồ, các tia sáng bị lệch hướng giống hệt như các tia sáng từ điểm vật được tạo ảnh. Dẫn tới mắt quan sát sau toàn đồ các ảnh thật ba chiều diễn ra sau toàn đồ. Hình ảnh này đối xứng với ảnh ảo trước toàn đồ.

Ta hãy xét hai trường hợp sau đây:

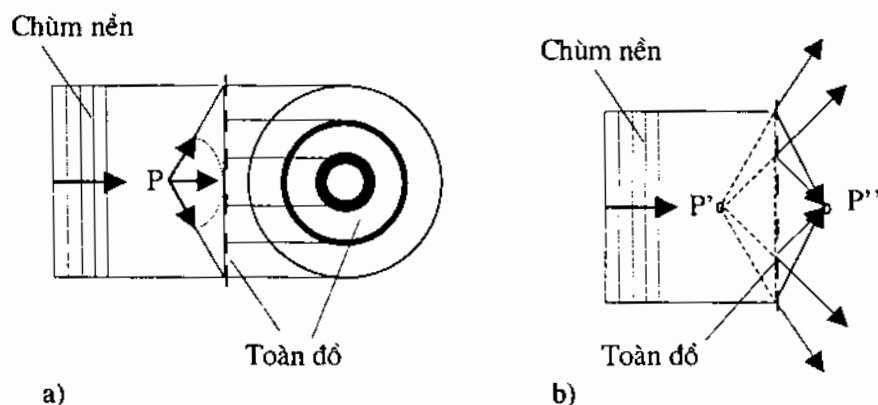
- Trường hợp thứ nhất (hình 10.10): Vật điểm P ở vô cùng truyền chùm sáng mặt đầu sóng phẳng tới toàn đồ. Trong khi đó chùm nền (chùm kết hợp với chùm từ P) cũng có mặt đầu sóng là mặt phẳng, rọi lên toàn đồ. Hai chùm sáng giao thoa và các vân sáng tối định xứ trên mặt toàn đồ tạo lên một cách tử nhiễu xạ. Như vậy, vật P ở vô cùng, toàn đồ ghi nhận thành các vân giao thoa thẳng sáng tối xen kẽ nhau (hình 10.10a). Để tái tạo lại hình P, sử dụng chùm nền chiếu qua toàn đồ. Chùm sáng bị lệch hướng theo phương khi tạo toàn đồ. Mắt nhìn thấy vật điểm P ở vô cùng (hình 10.10a).



**Hình 10.10.** Vật ở vô cùng:

a- xây dựng toàn đồ vật điểm P; b- tái tạo ảnh của P.

- Trường hợp thứ hai (hình 10.11): Vật điểm P ở gần truyền mặt đầu sóng cầu tới toàn đồ. Chùm nền (chùm kết hợp với chùm từ P) có mặt đầu sóng là mặt phẳng, rọi lên toàn đồ. Hai chùm sáng giao thoa và các vân sáng tối hình tròn định xứ trên mặt toàn đồ. Như vậy, vật P ở gần cùng với chùm nền, toàn đồ ghi nhận thành các vân giao thoa tròn sáng tối xen kẽ nhau (hình 10.11a). Để tái tạo lại hình P, sử dụng chùm nền chiếu qua toàn đồ. Các tia chùm nền bị lệch hướng tạo ảnh P'' (hình 10.11b). Ảnh P'' là ảnh đối xứng của P' do vật tạo nên. Mắt nhìn thấy vật điểm P ở gần thông qua ảnh P'.



**Hình 10.11.** Vật ở gần:

a- xây dựng toàn đồ vật điểm P; b- tái tạo ảnh của P.

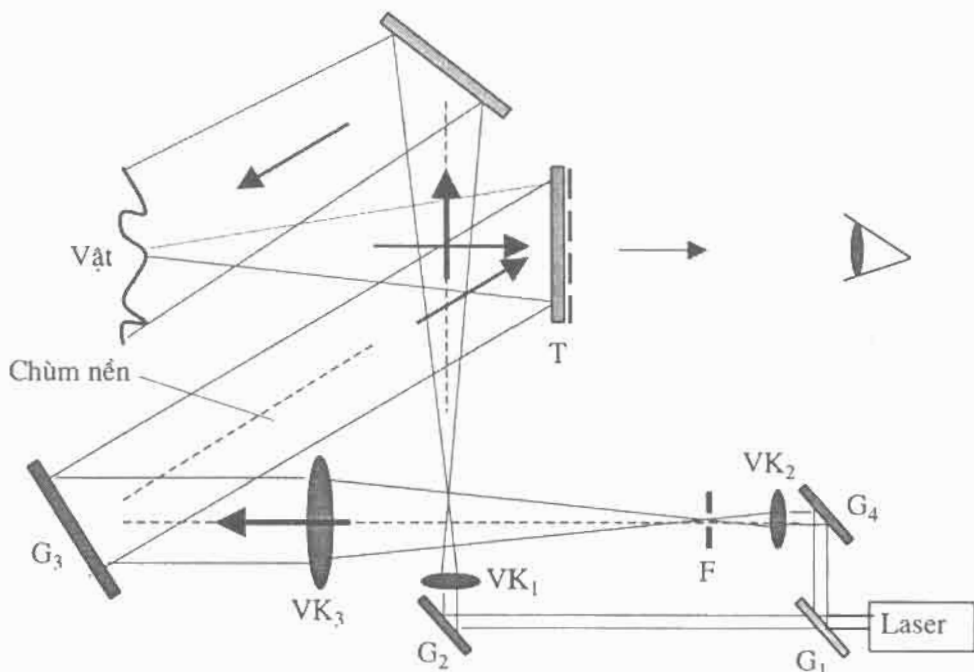
Từ hai trường hợp trên ta hiểu rằng có thể xây dựng được hệ vân giao thoa ở toàn đồ với mọi điểm của vật từ vô cùng đến gần người quan sát. Từ đó cũng tái tạo được ảnh nổi của vật từ toàn đồ tương ứng.

Cốt lõi cho giao thoa tạo toàn đồ là hình thành được các nguồn sáng kết hợp để một nguồn tạo chùm nền và một nguồn rọi chiếu lên vật, để mỗi vật điểm trở thành các nguồn thứ cấp bức xạ chùm sáng kết hợp với chùm nền. Thông qua lăng kính chia chùm, gương bán thấu hoặc ghép gương và lăng kính... có thể thực hiện tách từ một chùm sáng thành hai chùm kết hợp riêng biệt đảm bảo điều kiện giao thoa với nhau.

Hình 10.12 mô phỏng kết cấu một loại thiết bị tạo ảnh nổi. Chùm laser được gương bán thấu  $G_1$  tách thành hai chùm (1) và (2). Chùm (1) qua bán thấu, phản xạ tại gương  $G_2$ , đi vào vật kính  $VK_1$ . Chùm sáng hội tụ tại tiêu diện thứ hai vật kính  $VK_1$ . Chùm sáng tiếp tục phản xạ tại gương  $G_3$  để rọi lên vật. Các vật điểm bức xạ các chùm sáng lên toàn đồ. Tia thứ hai (2) phản xạ trên gương bán thấu, hội tụ tại tiêu diện thứ hai vật kính  $VK_2$  sau khi phản xạ tại gương  $G_4$ . Tại đây được đặt một phim lọc F chắn ánh sáng nhiễu. Chùm (2) lại được vật kính  $VK_3$  tạo chùm sáng song song làm chùm nền, để rọi lên toàn đồ. Hai chùm sáng (1) và (2) gặp nhau và giao thoa tạo toàn đồ T. Sau toàn đồ, chúng ta thấy được ảnh toàn cảnh.

#### • Một số khái niệm về toàn đồ

Ta phân biệt hai loại toàn đồ: toàn đồ phẳng và toàn đồ khối. Toàn đồ phẳng được coi là một “miếng phim” bề dày không đáng kể (chiều  $z \approx 0$ ) còn



Hình 10.12. Mô phỏng kết cấu một hệ tạo ảnh nổi.

toàn đồ khối có bề dày nhất định ( $z \neq 0$ ). Thường toàn đồ phẳng được sử dụng khi tạo ảnh toàn cảnh có chiều sâu của vật không lớn và thường tạo ảnh nổi tĩnh. Toàn đồ khối dùng với ảnh nổi động và chiều sâu toàn cảnh lớn.

Ta cũng phân biệt toàn đồ động và toàn đồ tĩnh. Toàn đồ tĩnh tạo hình ảnh hệ vân một lần. Sau khi “rửa, tráng phim” ta được toàn đồ cố định, lưu giữ để khảo sát đo đạc đánh giá nhiều lần sau này. Toàn đồ động tạo ảnh nổi tức thời, các phần tử toàn đồ hoạt động nhiều hay ít, có hay không phụ thuộc vào thời gian. Toàn đồ này được sử dụng tạo ảnh nổi di động.

Các toàn đồ được cấu thành bởi các tinh thể rắn hoặc tinh thể lỏng, chúng là các tinh thể quang hoạt nhạy cảm với ánh sáng. Có thể nói công nghệ giao thoa ảnh nổi gắn liền với sự phát triển công nghệ vật liệu tinh thể.

- **Giao thoa ảnh nổi** được sử dụng rộng rãi trong nhiều ngành khoa học khác đặc biệt đo lường chính xác. Thông qua toàn đồ động hoặc qua các toàn đồ tĩnh tạo được ở nhiều thời điểm khác nhau, mà đánh giá được độ biến dạng bề mặt vật liệu liên tục hoặc từng thời điểm một cách thuận tiện. Một ưu điểm khác của phương pháp này là tiến hành đo kiểm cùng một lúc ở một diện rộng bề mặt theo không gian ba chiều.



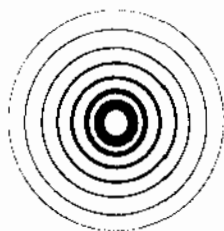
## Chương XI

# NHIỄU XẠ ÁNH SÁNG VÀ ỨNG DỤNG

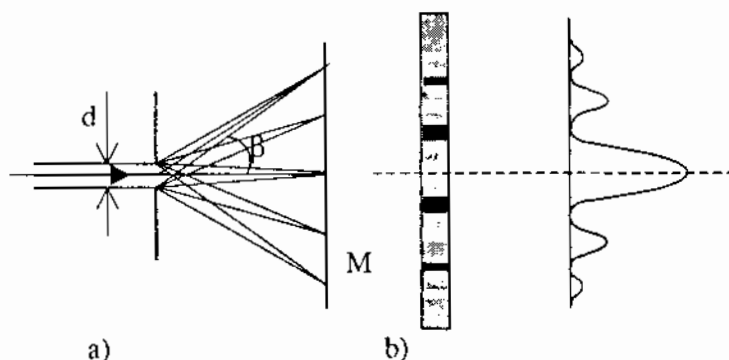
### 11.1. MỘT SỐ KHÁI NIỆM

- Nhiễu xạ ánh sáng là hiện tượng tia sáng bị lệch phương truyền thẳng khi đi gần các chướng ngại vật.

- Nhiễu xạ ánh sáng qua lỗ nhỏ. Khi chùm sáng qua lỗ nhỏ đường kính  $d$  thì sau lỗ có hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng. Hình ảnh nhiễu xạ trên bề mặt nào đó là các đường tròn sáng tối đồng tâm (hình 11.1) xen kẽ nhau. Hình ảnh này là kết quả sự giao thoa ánh sáng của các chùm thứ cấp từ các điểm sáng thứ cấp của mép lỗ nhỏ. Hình nhiễu xạ qua lỗ nhỏ giống như ảnh giao thoa cùng độ dày.



Hình 11.1. Các vân nhiễu xạ qua khe hẹp.



Hình 11.2. Nhiễu xạ qua khe hẹp:

- a- vị trí các vân nhiễu xạ phụ thuộc theo góc nghiêng  $\varphi$ ;
- b- sự phân bố cường độ sáng của các vân sáng và các vân tối.

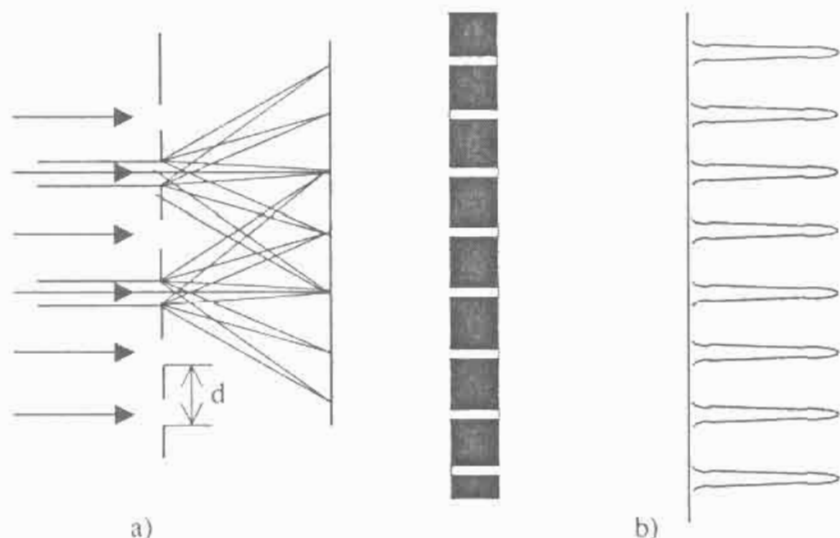
- Nhiễu xạ qua khe hẹp. Khi chùm sáng qua hẹp với độ lớn  $d$  thì sau khe có hiện tượng nhiễu xạ ánh sáng. Hình ảnh nhiễu xạ trên bề mặt ảnh M sau khe hẹp là các vạch sáng tối song song xen kẽ với nhau và song với khe hẹp (hình 11.2). Hình ảnh này là kết quả sự giao thoa ánh sáng của các chùm thứ cấp từ các điểm sáng thứ cấp của mép khe hẹp nhỏ. Vị trí của các vân sáng tối nhiễu xạ phụ thuộc vào góc nghiêng  $\beta$  so với phương truyền thẳng của ánh sáng. Khi:

$\sin\beta = 0$  vân sáng cực đại ở trung tâm.

$\sin\beta = \pm \lambda/d = \pm 2\lambda/d = \pm 3\lambda/d \dots$  vị trí các vân cực đại nhiễu xạ.

$\sin\beta = \pm 3\lambda/2d = \pm 5\lambda/2d = \pm 7\lambda/2d \dots$  vị trí các vân cực tiểu nhiễu xạ.

- Cách tử nhiễu xạ. Nhiễu xạ hẹp được sắp khít liền nhau và song song với nhau tạo thành lưới nhiễu xạ hay cách tử nhiễu xạ. Khoảng cách giữa các vạch là  $g$ . Quy cách của mỗi cách tử tính bởi số khe trên 1 mm. Số lượng vạch tùy thuộc vào yêu cầu sử dụng, vào khoảng từ 400 đến 1200 vạch/mm. Chiều dài mỗi vạch tới 100 mm. Khi chùm sáng qua cách tử, hiện tượng nhiễu xạ diễn ra tổng hợp nhiễu xạ qua từng khe hẹp. Kết quả là hình ảnh nhiễu xạ là các vạch sáng hẹp đều nhau và rõ nét trên khoảng tối rộng (hình 11.3). Hình nhiễu xạ qua lưới nhiễu xạ giống như ảnh giao thoa cùng độ nghiêng.



**Hình 11.3.** Cách tử nhiễu xạ:

a- vị trí các vân nhiễu xạ sau lưới;

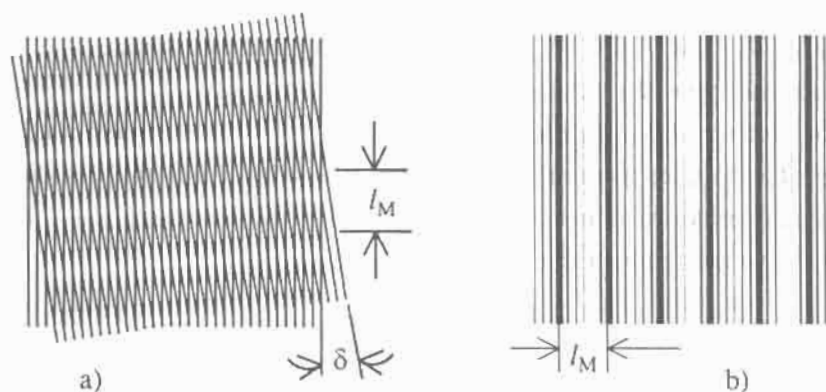
b- sự phân bố cường độ sáng của các vân sáng.

• Phương pháp cách tử nhiễu xạ More. More ghép hai cách tử giống nhau  $G_1$  và  $G_2$  (với bước lưới  $g_2 = g_1$ ) chéo nhau góc  $\delta$  (hình 11.8a). Hệ vân nhiễu xạ có các vân cực đại cách nhau khoảng  $l_M$ .

$$l_M = \frac{g}{2 \cdot \sin \frac{\delta}{2}}; \text{ gần đúng } l_M \approx \frac{g}{\delta} \quad (11.1)$$

More cũng sử dụng hai cách tử  $G_1$  và  $G_2$  khác nhau về bước ( $g_2 \neq g_1$ ) đặt song song với nhau. Hệ vân nhiễu xạ có các vân sáng cực đại cách nhau khoảng  $l_M$  (hình 11.8b):

$$l_M = \frac{g_1 g_2}{g_1 - g_2} \quad (11.2)$$



**Hình 11.4.** Hai dạng vân nhiễu xạ của phương pháp More:

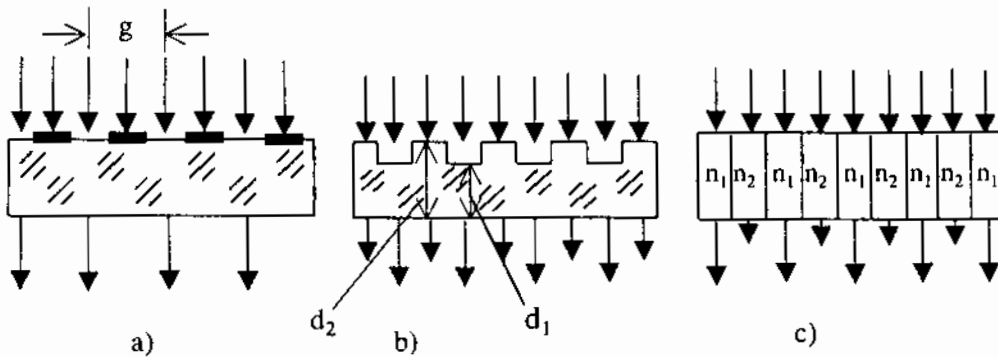
- a- hai cách tử  $g_2 = g_1$  chéo nhau;
- b- hai cách tử  $g_2 \neq g_1$  song song với nhau.

## 11.2. CÁCH TỬ NHIỄU XẠ

Hai loại cách tử nhiễu xạ được dùng rộng rãi trong kỹ thuật là cách tử truyền qua và cách tử phản xạ.

• Cách tử nhiễu xạ truyền qua (cách tử truyền qua). Chùm sáng truyền qua cách tử, nhận được chùm sáng nhiễu xạ (hình 11.5a). Để được cách tử ta khắc hoặc chụp ảnh lên bề mặt tấm thủy tinh phẳng một dãy các vạch đều đặn và song song với nhau. Khoảng cách giữa các vạch là  $g$ . Nơi có vạch, ánh sáng không truyền qua. Chỗ không có vạch là các khe hẹp và ánh sáng được truyền qua tạo chùm nhiễu xạ sau cách tử. Loại cách tử nhiễu xạ này là cách tử nhiễu xạ biên độ. Một dạng khác của cách tử truyền qua là tạo hai chùm cho qua có

độ lệch quang lộ do bề dày  $d_1$  và  $d_2$  khác nhau trong thủy tinh (hình 11.5b) hoặc do chiết suất  $n_1$  và  $n_2$  không giống nhau (hình 11.5c) nên pha của chúng khác nhau. Loại cách tử này là cách tử nhiễu xạ pha.



**Hình 11.5.** a- Cách tử nhiễu xạ truyền qua;  
 b- cách tử nhiễu xạ truyền qua khác bề dày  $d$ ;  
 c- cách tử nhiễu xạ truyền qua khác chiết suất  $n$ .

• Cách tử phản xạ. Cách tử nhiễu xạ phản xạ tạo chùm nhiễu xạ sau khi phản xạ trên mặt cách tử (hình 11.6a). Để được cách tử ta mạ lên bề mặt tấm thủy tinh phẳng lớp phản xạ mỏng vật liệu kim loại (lớp phản xạ là nhôm được dùng cho ánh sáng trong miền nhìn thấy và khi dùng cho miền hồng ngoại và tử ngoại thì lớp phản xạ là vàng). Dùng dao nhọn diaman bóc bỏ vật liệu phản xạ, tạo dãy vạch đều đặn và song song với nhau để lại dãy vạch phản xạ. Khoảng cách giữa các vạch liên tiếp là  $g$ . Khi chùm sáng phản xạ trên cách tử, hiện tượng nhiễu xạ diễn ra tổng hợp nhiễu xạ của từng vạch phản xạ. Kết quả là hình ảnh nhiễu xạ là các vạch sáng hẹp đều nhau và rõ nét trên khoảng tối rộng (hình 11.3). Loại cách tử nhiễu xạ này được gọi là cách tử nhiễu xạ biên độ. Hình nhiễu xạ qua cách tử phản xạ cũng giống ảnh giao thoa cùng độ nghiêng. Một dạng khác của cách tử phản xạ nhiễu xạ pha. Hai chùm phản xạ khác nhau về pha do có độ lệch quang lộ (hình 11.6b).

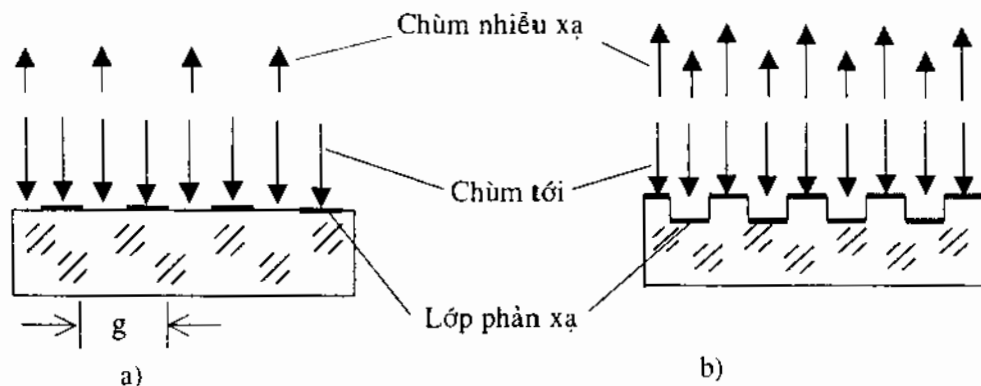
Vị trí của các vệt sáng cực đại được xác định theo:

$$\sin\beta = \pm k\lambda/g \quad (k = 0 ; \pm 1 ; \pm 2 ; \pm 3 \dots) \quad (11.3)$$

Khi chùm tới với góc tới  $\epsilon \neq 0$  đến mặt cách tử, thì vị trí các vân cực đại cho cả hai loại cách tử truyền qua (hình 11.7a) và cách tử phản xạ (hình 11.7b) được tính theo:

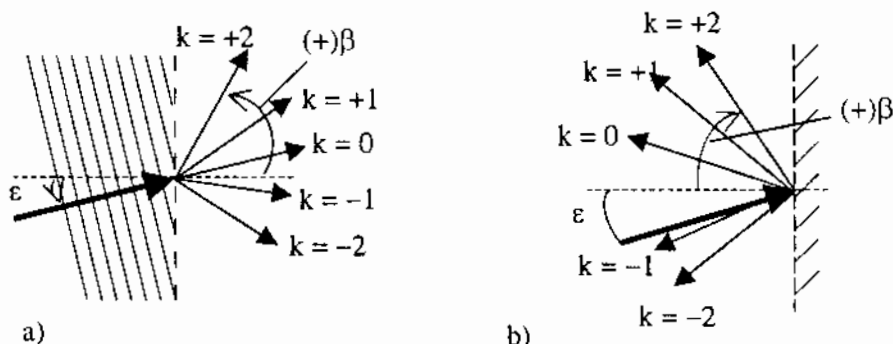
$$\sin\beta = \pm (k\lambda/g + \sin\epsilon) \quad (11.4)$$

Dấu “+” cho cách tử truyền qua, dấu “-” cho cách tử phản xạ:



**Hình 11.6.** a- Cách tử nhiễu xạ phản xạ;

b- cách tử nhiễu xạ có hai chùm nhiễu xạ khác nhau về quang lộ.



**Hình 11.7.** Chùm tới nghiêng với pháp tuyến  $\epsilon \neq 0$ :

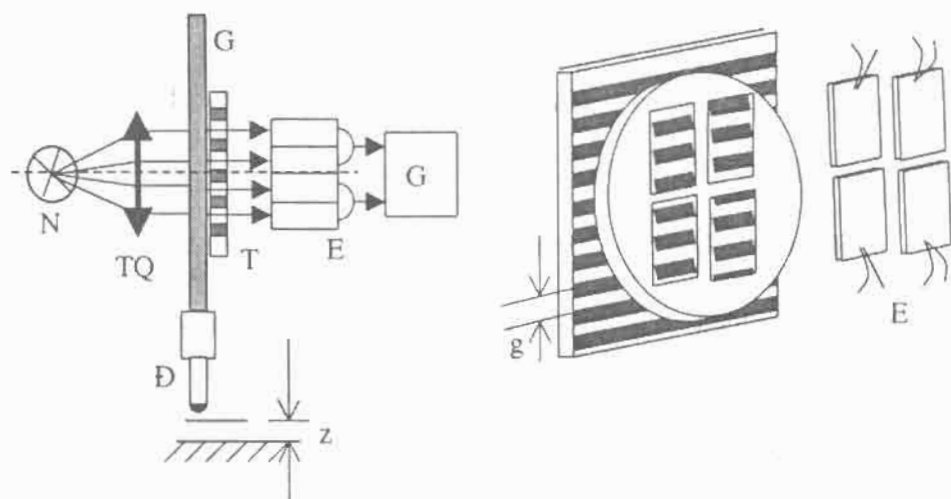
a- cách tử truyền qua; b- cách tử phản xạ.

### 11.3. ỨNG DỤNG CỦA CÁCH TỬ NHIỄU XẠ

Các lưới nhiễu xạ được sử dụng rất rộng trong nhiều phạm vi kỹ thuật khác nhau chế tạo các thiết bị: quang phổ, đo lường chính xác, giao thoa ảnh nổi...

- Ứng dụng cách tử nhiễu xạ do chuyển dịch. Cách tử nhiễu xạ cũng được sử dụng rộng rãi để đo các dịch chuyển nhỏ  $z$  (hình 11.8) như thay đổi kích thước do biến dạng nhiệt, do áp lực hoặc đo lường kích thước chi tiết... Hãy xét một mô hình tiêu biểu sau: Cách tử nhiễu xạ  $G$  có mắt lưới  $g$  được gắn cố định với đầu đo  $\mathcal{D}$ . Do chuyển dịch độ dài mà đầu đo  $\mathcal{D}$  cùng với cách tử  $G$  chuyển

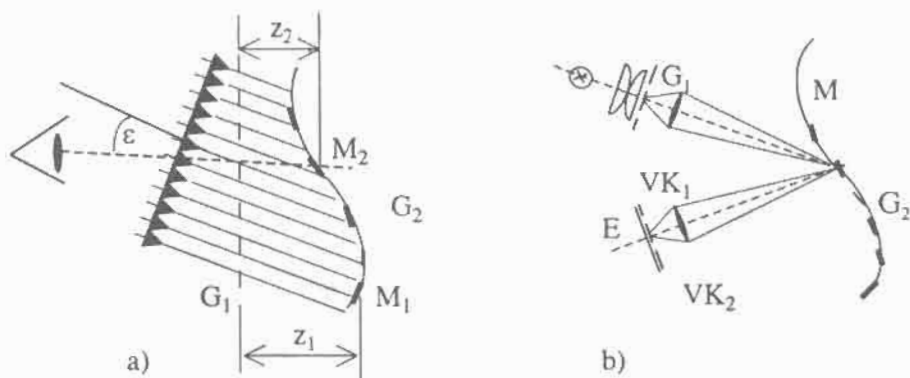
dịch vuông góc với chùm sáng của hệ chiếu sáng N. Sau cách tử ta có chùm nhiễu xạ. Các vân nhiễu xạ dịch chuyển trên bề mặt cảm quang E. Độ dịch chuyển các vạch này được chuyển đổi sang tín hiệu điện. Bộ xử lý tín hiệu  $G_1$  cho kết quả độ dịch chuyển  $z$  của đối tượng đo. Để tăng khả năng đọc số, ta ghép sát với cách tử  $G$  bốn cách tử thành phần T sao cho mắt lưới của chúng lệch đi với nhau một giá trị  $g/4$ . Nghĩa là giá trị đọc số nhỏ đi bốn lần. Thiết kế theo mô hình này, với  $g = 20 \mu\text{m}$  có thể xác định được độ dịch chuyển  $1 \mu\text{m}$ .



**Hình 11.8.** Sử dụng cách tử ở thiết bị đo chuyển dịch độ dài.

• Ứng dụng cách tử nhiễu xạ More. Cách tử More được ứng dụng xác định các trạng thái bề mặt vật thể rắn. Trạng thái này là cố định như độ nhám, độ sóng và các khuyết tật khác, hoặc là do thay đổi tức thời trên bề mặt đo. Hình 11.9 mô phỏng phương pháp tạo ảnh nhiễu xạ More. Cách tử  $G_1$  đặt liền sát với bề mặt quan sát M. Mặt M được rọi bởi chùm sáng song song nghiêng góc  $\epsilon$ . Trên bề mặt M, hình thành cách tử thứ cấp  $G_2$  (do  $G_1$  tạo nên). Hai cách tử  $G_1$  và  $G_2$  hình thành hệ vân More. Mắt nhìn theo hướng trực diện với bề mặt, quan sát được hình dạng và kính thước các vân More, chúng phản ánh trung thực trạng thái bề mặt. Dịch chuyển cách tử  $G_1$  ra xa hoặc gần với bề mặt M sẽ được các vị trí hai  $G_1$  và  $G_2$  “chống khí” với nhau cho các vân sáng cực đại More. Lúc đó khoảng cách hai lưới  $z = k \cdot g / t \cdot \epsilon$  ( $k = 0, 1; 2; \dots$  là bậc các vân nhiễu xạ). Giả sử tạo được hai vị trí  $z_1$  và  $z_2$  như thế. Từ đó xác định được độ chênh lệch giữa hai phần tử bề mặt  $M_1$  và  $M_2$  là  $\Delta z$ :  $\Delta z = g / t \cdot \epsilon$ . Hình 11.9 mô tả nguyên lý chụp ảnh ứng dụng cách tử More. Cách tử  $G_1$  được hệ quang  $VK_1$  tạo ảnh lên bề

mặt M. Ở đây hình thành cách tử thứ cấp  $G_2$  có biên dạng bề mặt giống với mặt M. Vật kính  $VK_2$  chụp ảnh hệ vân More trên bề mặt M lên mặt cảm quang E.



Hình 11.9. Ứng dụng cách tử More xác định trạng thái bề mặt.

- Ứng dụng nhiễu xạ để xác định cấu trúc mạng tinh thể vật liệu. Nguyên tử của các tinh thể rắn được sắp xếp đều đặn và là những nút mạng tinh thể. Mặt chứa các nút của mạng gọi là mặt phẳng nguyên tử. Mỗi nút là một phần tử phản xạ và mặt phẳng nguyên tử được coi là một lưới cách tử phản xạ. Khi chiếu chùm song song (chùm Røngen) với bước sóng xấp xỉ với khoảng cách các nguyên tử thì chùm phản xạ (phản xạ theo định luật phản xạ ánh sáng) là chùm nhiễu xạ. Qua hiển vi nhiễu xạ ta nhận được hình ảnh giao thoa trên tiêu diện thứ hai của vật kính. Khoảng cách (và hình dạng) giữa các vân dao thoa phụ thuộc vào khoảng cách  $d$  (và thay đổi của  $d$ ) giữa các mặt phẳng nguyên tử. Đo và xử lý các tín hiệu do vân tạo thành, ta phân tích được cấu trúc của mạng tinh thể vật liệu rắn.

- Cách tử nhiễu xạ còn được sử dụng trong kỹ thuật quang phổ. Nhờ hiện tượng nhiễu xạ có thể xác định độ dài bước sóng ánh sáng do quang phổ vạch từ các vật liệu bức xạ. Khi xác định được góc  $\beta$ , khoảng cách  $g$  của cách tử và số bậc  $k$ , áp dụng công thức (11.3) hay (11.4) tìm được độ dài bước sóng ánh sáng. Khi dùng chùm sáng trắng qua cách tử. Hệ vân của chùm nhiễu xạ chồng chập lên nhau, song chúng có cùng vị trí vạch sáng cực đại bậc "0". Do vậy tại đây vạch sáng là ánh sáng trắng. Kế tiếp là hình ảnh tán xạ ánh sáng, trước tiên là ánh sáng màu tím và xa hơn cả là ánh sáng màu đỏ thẫm. Thiết bị quang phổ đã sử dụng đặc tính này tạo dải phổ liên tục từ ánh sáng trắng.

## Chương XII

# PHÂN CỰC ÁNH SÁNG

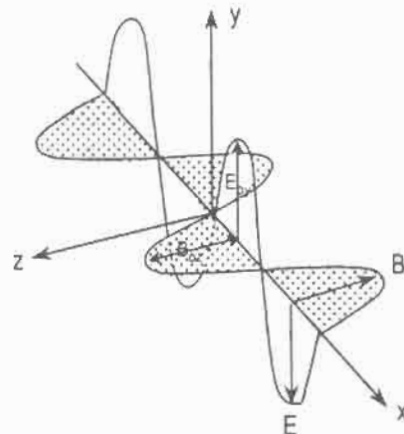
### 12.1. MỘT SỐ KHÁI NIỆM VÀ ĐỊNH NGHĨA VỀ PHÂN CỰC ÁNH SÁNG

Phân cực là một đặc tính quan trọng của ánh sáng. Các kết quả nghiên cứu về phân cực ánh sáng đã và đang được ứng dụng đa dạng và phong phú, đặc biệt trong lĩnh vực đo lường chính xác. Do ánh sáng là sóng điện từ được lan truyền theo sóng ngang nên do tương tác của môi trường xảy ra phân cực ánh sáng, khi đó các thành phần của vectơ điện trường theo hai chiều vuông góc với nhau và vuông góc với phương truyền sóng không đều nhau hoặc không giống nhau. Khi nghiên cứu sự không đều nhau này đã phân biệt được một số dạng đặc biệt của phân cực ánh sáng: Phân cực phẳng, phân cực elip và phân cực tròn. Hãy phân biệt một số khái niệm như sau:

- **Đoàn sáng:** Đoàn sáng là một sóng điện từ bức xạ từ nguồn sáng theo phương truyền ánh sáng. Các vectơ điện trường của mỗi đoàn sáng nằm trên một mặt dao động cố định. Các vectơ từ trường nằm trên mặt cũng chứa tia sáng và vuông góc với mặt dao động (hình 12.1).

- **Ánh sáng tự nhiên:** Ánh sáng tự nhiên từ các nguồn sáng (mặt trời, đèn điện, sợi đốt...) là ánh sáng chưa phân cực, gồm tổ hợp hỗn tạp vô số nhiều đoàn sáng không liên quan tới nhau. Do vậy các vectơ điện trường dao động không quy luật theo tất cả mọi phương vuông góc với tia sáng (hình 12.2a).

- **Ánh sáng phân cực:** Với những điều kiện nhất định (ánh sáng tự nhiên truyền qua các bản phân cực, qua tinh thể đặc biệt,



**Hình 12.1.** Sự lan truyền của đoàn sáng:

B- vectơ cường độ từ trường;  
E- vectơ cường độ điện trường;  
x- chiều truyền đoàn sáng.

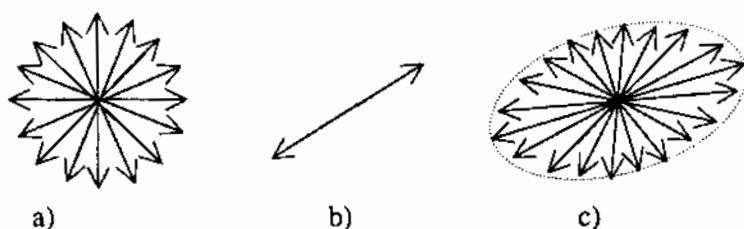


phản xạ trên mặt ngăn cách hai môi trường) các vectơ cường độ điện trường dao động theo các phương khác nhau thì có độ lớn không giống nhau.

- Ánh sáng phân cực phẳng và phân cực một phần: Khi chùm sáng mà các vectơ điện trường chỉ dao động trên một mặt nhất định (hình 12.2b) là chùm phân cực phẳng. Các chùm tia do nguồn laser có góc tới Brewster là các chùm sáng phân cực phẳng. Ánh sáng có các vectơ điện trường dao động theo mọi phương vuông góc với tia sáng, nhưng về độ lớn không giống nhau được gọi phân cực một phần. Phân cực một phần có đầu các vectơ điện trường dao động theo hình elip, nên còn được gọi là phân cực elip (hình 12.2c).

- Kính phân cực: Kính phân cực được sử dụng tạo các chùm sáng phân cực toàn phần từ các chùm chưa phân cực. Chúng là các tấm phân cực hoặc lăng kính phân cực.

- Kính phân tích: Kính phân tích được sử dụng xác định trạng thái phân cực của các chùm sáng phân cực. Chúng cũng là các tấm phân cực hoặc lăng kính phân cực.



**Hình 12.2.** a- Ánh sáng chưa phân cực;  
b- ánh sáng phân cực phẳng;  
c- ánh sáng phân cực elip.

## 12.2. QUỹ ĐẠO VECTƠ CƯỜNG ĐỘ ĐIỆN TRƯỜNG CỦA CHÙM SÁNG PHÂN CỰC

### 12.2.1. Quỹ đạo vectơ cường độ điện trường

Có thể quan sát được quỹ đạo vectơ cường độ điện trường của chùm sáng phân cực trên màn hình dao động kí. Hai thành phần của vectơ cường độ điện trường được phân tích theo hai thành phần  $E_x$  và  $E_y$  với biên độ dao động của chúng là  $r_x$  và  $r_y$ . Với tần số dao động cho cả hai thành phần đều bằng  $\nu$  và tốc độ vòng là  $\omega = 2\pi\nu$  và độ lệch pha của hai thành phần  $\Delta\varphi$  thì  $E_x$  và  $E_y$  được xác định theo:

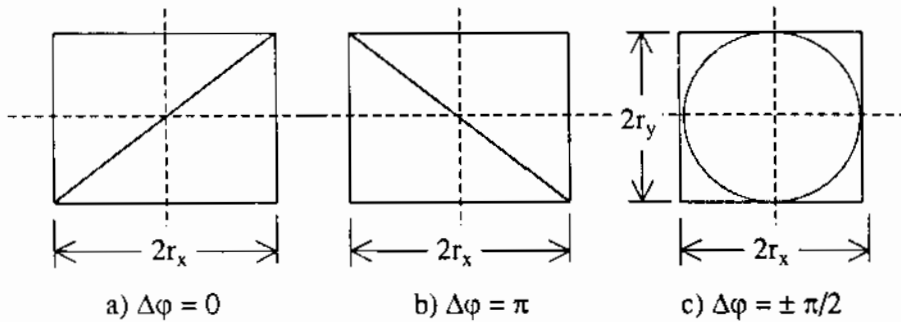
$$E_x = r_x \cdot \sin \omega t; E_y = r_y \cdot \sin (\omega t + \Delta \varphi) \quad (12.1)$$

Sau khi biến đổi theo các công thức toán học ta tìm được phương trình quan hệ hai vectơ thành phần như sau:

$$\frac{E_x^2}{r_x^2} + \frac{E_y^2}{r_y^2} - 2 \frac{E_x E_y}{r_x r_y} \cos \Delta \varphi = \sin^2 \Delta \varphi \quad (12.2)$$

Phương trình (12.2) là phương trình elip được bao bởi hình chữ nhật có hai cạnh là  $2r_x$  và  $2r_y$ . Hình elip với các bán trục  $a$  và  $b$  tiếp xúc với hình chữ nhật tại bốn điểm (hình 12.4). Chừng nào các thành phần  $E_x$  và  $E_y \neq 0$  thì các trục elip nằm nghiêng với các chiều  $r_x$  và  $r_y$ . Hãy chú ý một số trường hợp sau đây:

- 1-  $\Delta \varphi = 0$  thì  $\sin \Delta \varphi = 0$  và  $\cos \Delta \varphi = 1$ , phương trình (12.2) được chuyển thành  $E_y = E_x (r_y / r_x)$ . Đây là phương trình đường thẳng có độ nghiêng là  $(r_y / r_x)$  (hình 12.3a). Tương tự như vậy khi  $\Delta \varphi = \pi$  thì  $\sin \Delta \varphi = 0$  và  $\cos \Delta \varphi = -1$  thì  $E_y = -E_x (r_y / r_x)$ . Đây là phương trình đường thẳng có độ nghiêng âm là  $(-r_y / r_x)$  (hình 12.3b). Cả hai trường hợp này xảy ra phân cực phẳng. Tổng quát là khi  $\Delta \varphi = k\pi$  ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) thì có chùm phân cực phẳng.
- 2-  $\Delta \varphi = \pi/2$  và  $r_y = r_x = r$  thì  $\sin \Delta \varphi = 1$  và  $\cos \Delta \varphi = 0$ ; phương trình (12.2) được chuyển thành  $E_y^2 + E_x^2 = r^2$ . Đây là phương trình đường tròn với bán kính là  $r$  (hình 12.3c). Tương tự như vậy, kết quả trên cũng đúng với  $\Delta \varphi = -\pi/2$ . Tổng quát là khi  $\Delta \varphi = (2k+1) \cdot \pi/2$ ; ( $k = 0, 1, 2, 3, \dots$ ) thì có chùm phân cực tròn.
- 3- Ngoài hai trường hợp trên thì quỹ đạo đầu vectơ cường độ điện trường đều là hình elip và nghĩa là đều xảy ra phân cực bán phần elip.



**Hình 12.3.** Quỹ đạo vector cường độ điện trường:  
a, b- của chùm sáng phân cực phẳng; c- phân cực tròn.

### 12.2.2. Hình dạng và vị trí phân cực elip

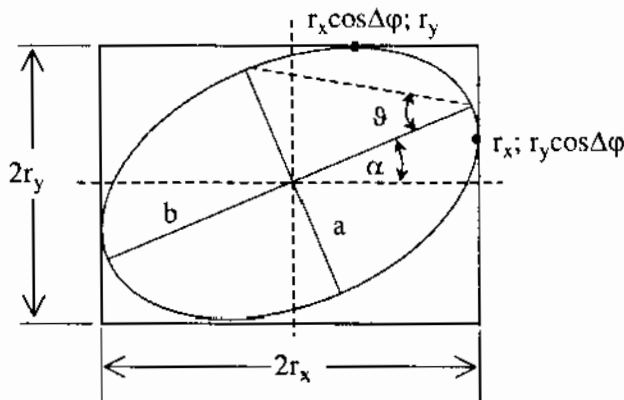
Quỹ đạo dao động cường độ điện trường của phân cực elip còn được xét về hình dạng, vị trí của nó so với hai phương  $r_x$  và  $r_y$  cũng như chiều quay của đầu mút vectơ điện trường:

- Hình dạng elip được xác định thông qua hai góc: góc hình dạng  $\vartheta$  và góc nghiêng elip  $\alpha$  (hình 12.4).

$$\operatorname{tg}2\alpha = \frac{2(r_y / r_x)}{1 - (r_y / r_x)^2} \cos \Delta\varphi \quad (12.3)$$

$$\operatorname{tg}2\vartheta = \frac{2(r_y / r_x)}{1 + (r_y / r_x)^2} \sin \Delta\varphi \quad (12.4)$$

- Thông qua giá trị của độ lệch pha  $\Delta\varphi$  giữa hai thành phần  $r_x$ ,  $r_y$  còn xác định được chiều quay của đầu mút vectơ điện trường. Khi  $0 < \Delta\varphi < \pi$  thì đầu mút vectơ điện trường quay theo chiều quay kim đồng hồ. Khi  $\pi < \Delta\varphi < 2\pi$  thì đầu mút vectơ quay ngược chiều quay kim đồng hồ.



Hình 12.4. Quỹ đạo phân cực elip.

## 12.3. PHƯƠNG PHÁP TẠO CHÙM SÁNG PHÂN CỰC

### 12.3.1. Phân cực ánh sáng do phản xạ

Tại mặt ngăn cách hai môi trường chiết suất  $n_0$  và  $n_1$  chùm tới được chia thành hai chùm phản xạ và khúc xạ. Tại vị trí bất kỳ nào của tia tới, vectơ điện trường  $E_T$  cũng có thể phân tích theo hai thành phần  $E_T^\perp$  (vuông góc với mặt phẳng tới) và  $E_T^\parallel$  (song song với mặt phẳng tới). Tương tự tại vị trí bất kỳ nào của tia phản xạ, vectơ điện trường  $E_p$  cũng phân tích theo hai thành phần  $E_p^\perp$

(vuông góc với mặt phẳng tới) và  $E_p''$  (song song với mặt phẳng tới). Hai thành phần biên độ chùm phản xạ Fresnel được xác định theo:

$$r_{\perp}^{\perp} = \frac{E_p^{\perp}}{E_T^{\perp}} = \frac{n_0 \cos \epsilon_0 - n_1 \cos \epsilon_1}{n_0 \cos \epsilon_0 + n_1 \cos \epsilon_1} \quad (12.5)$$

$$r_{\parallel}^{\parallel} = \frac{E_p^{\parallel}}{E_T^{\parallel}} = \frac{n_0 \cos \epsilon_1 - n_1 \cos \epsilon_0}{n_0 \cos \epsilon_0 + n_1 \cos \epsilon_1} \quad (12.6)$$

Trong đó  $\epsilon_0$  là góc tới và  $0 < \epsilon_0 < 90^\circ$ ;  $\epsilon_1$  là góc khúc xạ.

Theo công thức trên hai biên độ theo hai hướng “ $\perp$ ” và “ $\parallel$ ” khác nhau. Kết quả là chùm phản xạ là chùm phân cực một phần, các vectơ điện trường có dao động cực đại vuông góc với mặt phẳng tới. Tương tự, chùm khúc xạ cũng là chùm phân cực một phần, các vectơ điện trường có dao động cực đại nằm trong mặt phẳng tới. Tóm lại hai chùm phản xạ và khúc xạ đều là chùm phân cực một phần.

Khi góc tới  $\epsilon_0$  bằng một giá trị nhất định nào đó ( $\epsilon_0 = \epsilon_p$ ) để cho  $\text{tg} \epsilon_p = \text{tg} \epsilon_0 = n_1/n_0$  thì theo (12.6)  $r_{\parallel}^{\parallel} = 0$ , dẫn đến các vectơ điện trường của chùm phản xạ chỉ dao động vuông góc với mặt phẳng tới. Lúc này chùm phản xạ là chùm phân cực phẳng và vuông góc với chùm khúc xạ, góc  $\epsilon_p = \text{artg}(n_1/n_0)$  được gọi là góc Brewster. Cũng như vậy, khi góc tới bằng góc Brewster thì chùm khúc xạ là chùm phân cực một phần mạnh nhất, các vectơ điện trường song song với mặt phẳng tới dao động mạnh hơn rất nhiều so với các vectơ điện trường dao động vuông góc với mặt phẳng tới.

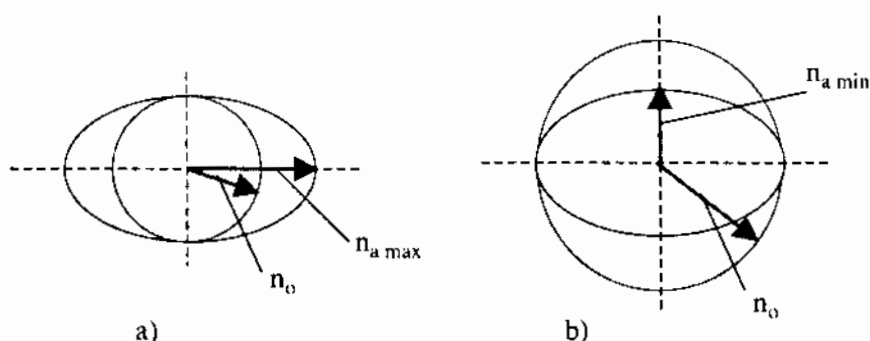
### 12.3.2. Phân cực ánh sáng do lưỡng chiết

Khi rọi ánh sáng tự nhiên qua một số tinh thể đặc biệt, sẽ xuất hiện hai tia khúc xạ. Tia thứ nhất tuân theo định luật khúc xạ ánh sáng, gọi là tia thường, kí hiệu là tia “o”. Tia thứ hai khúc xạ không tuân theo định luật khúc xạ ánh sáng, gọi là tia bất thường, kí hiệu là tia “a”. Hai tia thường và bất thường khi qua khối tinh thể đều là hai chùm phân cực phẳng.

Vận tốc truyền ánh sáng của hai tia này khác nhau bởi với tia thường chiết suất là  $n_o$  khác với chiết suất  $n_a$  của tia bất thường. Do vật liệu hai chiết suất khác nhau nên được gọi là tính lưỡng chiết của tinh thể vật liệu. Những tinh thể có  $n_a > n_o$ , hoặc  $n_a - n_o > 0$  được gọi tinh thể lưỡng chiết dương. Ví dụ tinh thể thạch anh thuộc tinh thể lưỡng chiết dương. Tinh thể này có  $n_{a \text{ max}} = 1,555$  và  $n_o = 1,546$  và  $n_a - n_o = + 0,009$ .

Những tinh thể có  $n_a < n_o$  hay  $n_a - n_o < 0$ , được gọi tinh thể lưỡng chiết âm. Ví dụ tinh thể  $\text{CaCO}_3$  thuộc tinh thể lưỡng chiết âm. Tinh thể này có  $n_{a \text{ min}} = 1,488$  và  $n_o = 1,662$  và  $n_a - n_o = -0,174$ .

Mô phỏng bằng hình vẽ sự phân bố chiết suất của tinh thể theo hai tia thường và bất thường là hai hình cầu (cho tia thường) và hình khối elip tròn xoay (cho tia bất thường). Tâm của chúng trùng nhau thể hiện tại một điểm bất kỳ nào đó trong tinh thể. Đối với tia thường, do chiết suất theo mọi phương giống nhau nên mô phỏng chiết suất là bề mặt cầu. Đối với tia bất thường, do chiết suất theo mọi phương khác theo quy luật mặt elip nên mô phỏng chiết suất là mặt elip tròn xoay (hình 12.5). Hình 12.5a mô phỏng chiết suất của tinh thể lưỡng chiết dương. Hình 12.5b mô phỏng chiết suất của tinh thể lưỡng chiết âm.

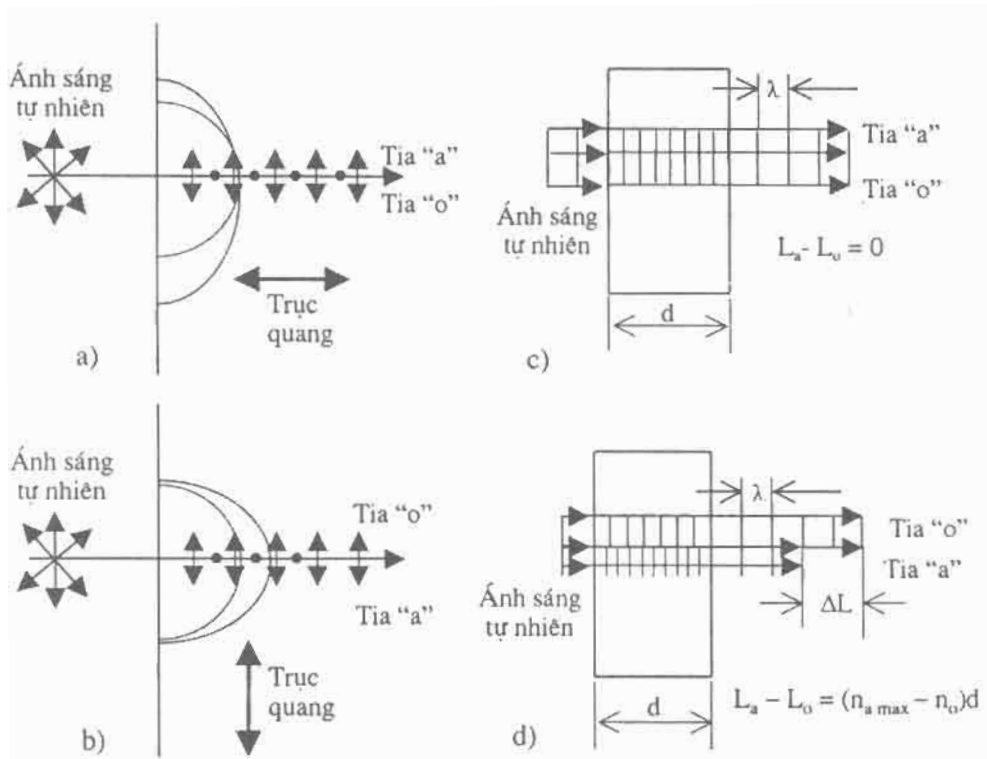


**Hình 12.5.** a- Tinh thể lưỡng chiết dương;  
b- tinh thể lưỡng chiết âm.

Mỗi tinh thể có một phương đặc biệt gọi là phương quang học, một đường tiêu biểu cho phương này gọi là trục quang. Ví dụ: Tinh thể  $\text{CaCO}_3$  có hình dáng tiêu biểu là khối thoi với hai đỉnh đối xứng. Mỗi đỉnh này lập bởi góc tù khoảng  $102^\circ$  của ba mặt phẳng, đường thẳng qua hai đỉnh này là trục quang của tinh thể băng lan. Hãy xét một số trường hợp khi chùm sáng tự nhiên truyền vuông góc với các mặt tinh thể lưỡng chiết:

1. Chùm sáng tự nhiên vào tinh thể theo phương quang học (song song với trục quang) thì không xuất hiện hai tia thường và bất thường. Vận tốc của cả hai tia giống nhau trong tinh thể. Ra khỏi tinh thể giữa hai tia không có độ lệch pha (hình 12.6a).

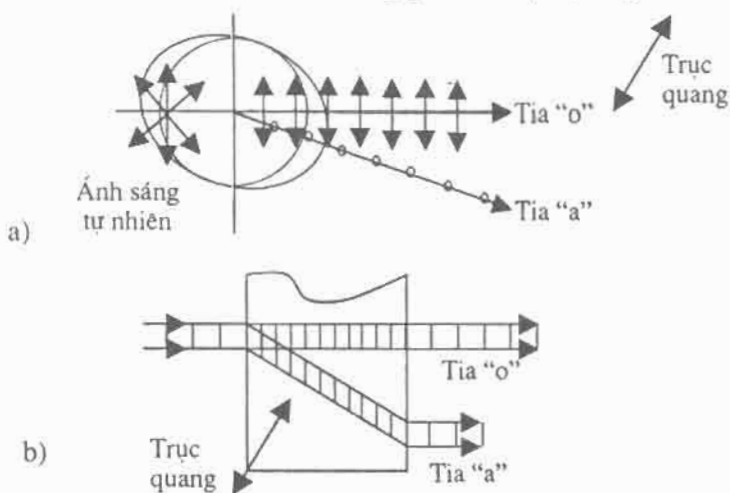
2. Chùm sáng tự nhiên vào tinh thể theo phương vuông góc với trục quang



**Hình 12.6.** Chùm tới vào tinh thể lưỡng chiết:

a- chùm tới song song với trục quang;

b- chùm tới vuông góc với trục quang.



**Hình 12.7a.** a- Chùm tới vào tinh thể lưỡng chiết theo chiều nghiêng với trục quang;

b- chùm tới qua tấm tinh thể lưỡng chiết theo chiều nghiêng với trục quang.

thì trong tinh thể, vận tốc của hai tia khác nhau. Ra khỏi tinh thể hai tia cùng chung một hướng nhưng giữa hai tia có độ lệch quang lộ  $\Delta L = L_a - L_o$  (hình 12.6a) và độ lệch pha  $\Delta\phi$  được xác định theo:

$$\Delta\phi = (2\pi \Delta L)/\lambda = (2\pi/\lambda) (n_{a_{\max}} - n_o)d \quad (12.7)$$

Trong đó  $d$  là bề dày tấm tinh thể;  $L_a$  và  $L_o$  là quang lộ của hai tia thường và bất thường trong tinh thể.

3. Chùm sáng tự nhiên vào tinh thể theo phương nghiêng với trục quang thì tia thường không bị lệch hướng, tia bất thường lệch đi một góc. Do vậy sau mặt tiếp giáp giữa không khí và tinh thể lệch một góc (hình 12.7a) và qua khối tâm tinh thể lưỡng chiết hai tia lệch song song với nhau (hình 12.7b).

## 12.4. MỘT SỐ LINH KIỆN PHÂN CỰC ÁNH SÁNG

### 12.4.1. Tấm phân cực

- Phin phân cực ánh sáng: Phin phân cực ánh sáng được sử dụng tạo chùm sáng phân cực từ các chùm chưa phân cực như chùm ánh sáng tự nhiên. Các vectơ cường độ điện trường của tia thường sau phin phân cực không giống nhau. Đối với tia thường thì vectơ cường độ điện trường là rất lớn so với các vectơ điện trường của tia bất thường.

Một tấm mỏng đơn tinh thể tuamalin bề dày khoảng 1mm có trục quang song song với mặt tấm đã hấp thụ hầu hết các vectơ cường độ điện trường của tia bất thường. Nghĩa là chùm sáng tự nhiên qua phin phân cực chỉ còn lại chùm tia thường.

Những năm trở lại đây, người ta chế tạo các phin phân cực từ một màng mỏng gồm nhiều tinh thể nhỏ lên mặt tấm mỏng chất dẻo xenlulô. Trục quang của các tinh thể này sắp xếp giống nhau cùng một hướng và song song với mặt tấm xenlulô. (Ví dụ một loại tinh thể nhỏ như vậy là hợp chất silium sulfat có chiều dài  $1 \mu\text{m}$ , bề dày  $0,05 \mu\text{m} \div 0,1 \mu\text{m}$ , để tạo thành màng có bề dày  $25 \mu\text{m} \div 100 \mu\text{m}$ ). Khi chùm sáng tự nhiên qua phin phân cực thì hai tia thường và bất thường bị hấp thụ không giống nhau. Trong khi sự hấp thụ tia thường bị hấp thụ giống nhau theo mọi hướng còn tia bất thường sự hấp thụ này lại thay đổi. Do sự sắp xếp trục quang của các tinh thể vuông góc với phương truyền ánh sáng nên tia bất thường bị hấp thụ nhiều nhất so với tia thường. Kết quả là, các vectơ cường độ điện trường của tia thường được truyền qua nhiều nhất và hệ số cho qua là  $\tau_p$  là lớn nhất. Ở các mặt phẳng khác, các vectơ cường độ điện trường yếu

hơn rất nhiều. Các vectơ cường độ điện trường của tia bất thường sau tấm phân cực là yếu nhất và hệ số truyền qua  $\tau_a$  là nhỏ nhất. Phin phân cực ánh sáng là tấm phân cực có đặc điểm  $\tau_p \gg \tau_a$ . Như vậy phin phân cực tạo các chùm phân cực không hoàn toàn.

Mỗi phin phân cực được xác định bởi các chỉ tiêu sau.

Hệ số truyền qua:

$$\tau = \frac{\tau_p + \tau_a}{2} \approx \frac{\tau_p}{2} \quad (12.8)$$

Hệ số phân cực:

$$P = \frac{\tau_p - \tau_a}{\tau_p + \tau_a} \quad (12.9)$$

Trong kỹ thuật, thường sử dụng hai phin phân cực giống nhau ghép nối tiếp nối đuôi nhau. Phin thứ nhất là tấm phân cực, phin tiếp sau gọi là tấm phân tích. Khi tấm phân cực và tấm phân tích có cùng mật dao động thì chùm phân cực có cường độ sáng lớn nhất hệ số truyền qua là cực đại:

$$\tau_0 = \frac{\tau_p^2 + \tau_a^2}{2} \approx \frac{\tau_p^2}{2} \quad (12.10)$$

Khi tấm phân cực có mật dao động vuông góc với mật dao động của tấm phân tích thì chùm phân cực có cường độ sáng nhỏ nhất và hệ số truyền qua là cực tiểu:

$$\tau_{90} = \tau_p \cdot \tau_a \quad (12.11)$$

Tỷ số giữa hệ số truyền qua cực đại  $\tau_0$  và hệ số truyền qua cực tiểu  $\tau_{90}$  được gọi là hệ số phân tích:

$$P_a = \tau_0 / \tau_{90} \quad (12.12)$$

Khi tấm phân cực và tấm phân tích có các mật dao động lệch nhau góc  $\theta$  thì chùm phân cực có hệ số truyền qua được xác định theo:

$$\tau_0 = \tau_{90} + (\tau_0 - \tau_{90}) \cdot \cos^2 \theta \approx \tau_0 \cdot \cos^2 \theta \quad (12.13)$$

Hãy so sánh đặc tính hai tấm phân cực như sau:

*Tấm thứ nhất*

Có các chỉ tiêu:  $\tau_p = 0,56$  ;  $\tau_a = 2,7 \cdot 10^{-6}$

*Tấm thứ hai*

Có các chỉ tiêu:  $\tau_p = 0,84$  ;  $\tau_a = 6 \cdot 10^{-3}$



Hệ số truyền qua  $\tau$  và hệ số phản cực  $P$  của mỗi tấm được xác định:

Tấm thứ nhất :  $\tau \approx 0,28$  ;  $P = 0,999999$

Tấm thứ hai :  $\tau \approx 0,42$  ;  $P = 0,98582$

Khi ghép hai tấm phân cực cùng loại với nhau, ta được các chỉ tiêu:

Hai tấm loại thứ nhất:  $\tau_0 = 0,1568$  ;  $\tau_{90} = 1,5 \cdot 10^{-6}$

Hai tấm loại thứ hai:  $\tau_0 = 0,3528$  ;  $\tau_{90} = 5 \cdot 10^{-3}$

Hệ số phân tích hai tấm loại thứ nhất:  $P_a = 105000$

Hệ số phân tích hai tấm loại thứ hai:  $P_a = 70,6$

- Tấm phân cực một phần tư bước sóng

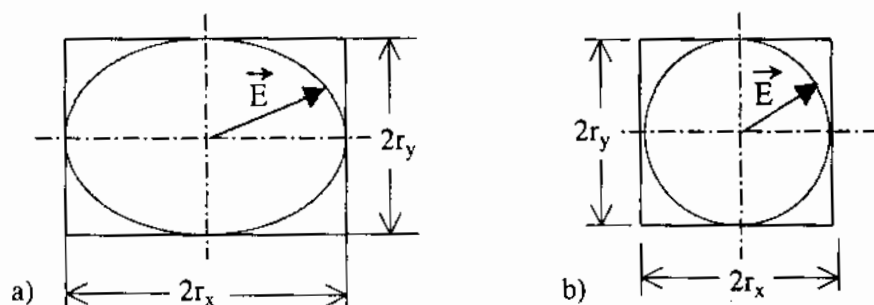
Các tinh thể được chế tạo thành các tấm mỏng có bề dày  $d = 0,1 \div 0,5$  mm sao cho trục quang tinh thể song song với mặt tấm (hình 12.6b). Khi hiệu quang lộ của hai tia thường và bất thường thoả mãn:

$$\Delta L = (n_{a \max} - n_o)d = (2k + 1) \lambda/4 \quad (12.14)$$

thì đó độ lệch pha  $\Delta\varphi = (2k + 1) \pi/2$ . Phương trình (12.2) còn lại:

$$\frac{E_x^2}{r_x^2} + \frac{E_y^2}{r_y^2} = 1 \quad (12.15)$$

Trường hợp này, vectơ cường độ điện trường chuyển động theo quỹ đạo elip có hai bán trục  $a$  và  $b$  trùng với hướng của các biên độ dao động  $r_x$  và  $r_y$  (hình 12.7a). Bản có bề dày thoả mãn (12.14) được gọi bản một phần tư bước sóng.



**Hình 12.7b.** Quỹ đạo của vectơ cường độ điện trường chùm phân cực qua bản một phần tư bước sóng.

Đặc biệt khi  $\alpha = 45^\circ$  thì  $r_x = r_y = r$ , quỹ đạo chuyển động của vectơ cường độ điện trường hình tròn bán kính  $r$  (hình 12.7b).

- Tấm phân cực một nửa bước sóng

Khi hiệu quang lộ của hai tia thường và bất thường thoả mãn:

$$\Delta L = (n_{a \max} - n_0)d = (2k + 1) \lambda / 2 \quad (12.16)$$

thì đó độ lệch pha  $\Delta\varphi = (2k + 1) \pi$ .

Phương trình (12.2) còn lại:

$$\frac{E_x^2}{r_x} + \frac{E_y^2}{r_y} = 0 \quad (12.17)$$

Đó là phương trình đường thẳng nằm trong góc phần tư thứ hai và thứ tư của hệ toạ độ  $E_x$  và  $E_y$ . Đường thẳng hợp với trục quang góc  $\alpha$  (hình 12.8a). Như vậy khi trước bản vectơ cường độ điện trường của chùm phân cực phẳng dao động trên đường thẳng ở góc phần tư thứ nhất và thứ tư thì qua bản đường thẳng dao động các vectơ điện trường quay đi góc  $2\alpha$ . Bản có bề dày thoả mãn (12.16) được gọi bản một nửa bước sóng.

• Tấm phân cực một bước sóng

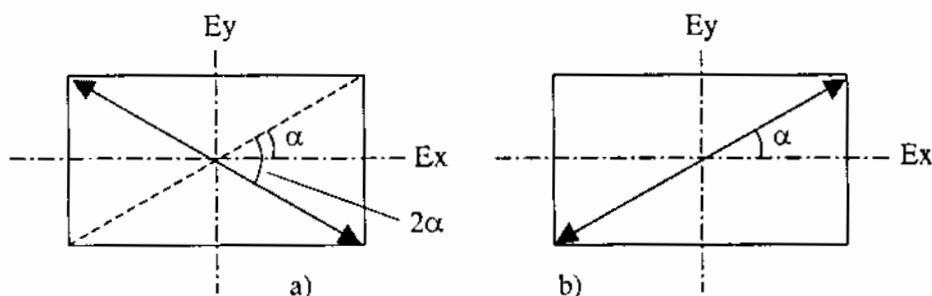
Khi hiệu quang lộ của hai tia thường và bất thường thoả mãn:

$$\Delta L = (n_{a \max} - n_0)d = k\lambda \quad (12.18)$$

thì đó độ lệch pha  $\Delta\varphi = 2k\pi$ . Phương trình (12.2) còn lại:

$$\frac{E_x^2}{r_x} + \frac{E_y^2}{r_y} = 0$$

Đó là phương trình đường thẳng nằm trong góc phần tư thứ nhất và thứ tư của hệ toạ độ  $E_x$  và  $E_y$ . Đường thẳng hợp với trục quang góc  $\alpha$  (hình 12.8b). Khi trước bản vectơ cường độ điện trường của chùm phân cực phẳng dao động trên đường thẳng ở góc phần tư thứ nhất và thứ tư, thì qua bản đường thẳng dao động các vectơ điện trường cũng nằm ở hai góc phần tư thứ nhất và thứ tư. Bản có bề dày thoả mãn (12.8) được gọi bản một bước sóng.



**Hình 12.8.** Chiều chuyển động của vectơ điện trường của tia phân cực:  
 a- qua tấm nửa bước sóng; b- qua tấm một bước sóng.

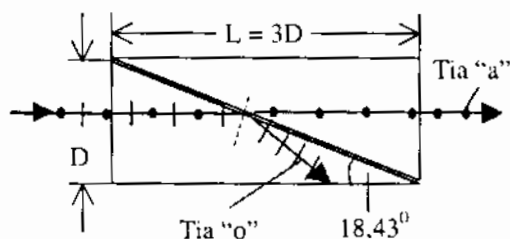
Trong kỹ thuật các tấm phân cực một phần tư, một nửa hoặc một bước sóng có bề dày  $d \approx 1 \text{ mm}$ . Khi chế tạo bề dày  $d$  phải thoả mãn (12.14), (12.16) hoặc (12.8). Ví dụ: Cần tìm bề dày  $d$  của tấm phân cực một phần tư bước sóng  $\lambda = 550 \text{ nm}$  từ thủy tinh thạch anh với  $n_a - n_o = +0,00917$ . Với  $d \approx 1 \text{ mm}$  thì  $\Delta L \approx 9170 \text{ nm}$  và hệ số  $k = 32$ . Điền tiếp vào (12.14) tìm được bề dày tấm phân cực  $d = 0,9746 \text{ mm}$ .

- Tấm phân cực có màng mỏng quang học. Trên bề mặt tấm phân cực bằng thủy tinh quang học được mạ màng quang học một hoặc nhiều lớp. Chùm tự nhiên có góc tới bằng góc phân cực thì hai chùm phản xạ và khúc xạ đều là chùm phân cực phẳng. Mặt dao động các vectơ cường độ điện trường chùm phản xạ vuông góc với mặt phẳng tới. Mặt dao động các vectơ cường độ điện trường chùm khúc xạ trùng với mặt phẳng tới. Bề dày quang học của mỗi lớp bằng  $\lambda/4$ . Vật liệu không hấp thụ ánh sáng được sử dụng làm vật liệu màng. Màng nhiều lớp gồm các lớp chiết suất lớn xen kẽ các lớp có chiết suất nhỏ.

### 12.4.2. Lăng kính phân cực

Lăng kính phân cực là các lăng kính tạo chùm sáng phân cực. Qua lăng kính phân cực chùm sáng tự nhiên thành các chùm phân cực. Các lăng kính phân cực được chế tạo từ các tinh thể lưỡng chiết tự nhiên như: Tinh thể băng lan ( $\text{CaCO}_3$ ), tinh thể thạch anh ( $\text{SiO}_2$ ); và nhân tạo ADP và KDP. Hiện nay, một số lăng kính phân cực được sử dụng rộng rãi như sau:

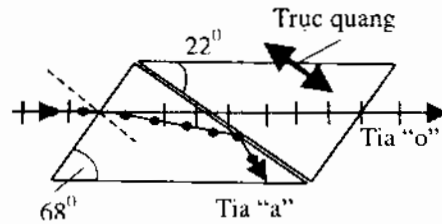
- Lăng kính Tomson. Lăng kính Tomson được chế tạo từ tinh thể băng lan, một loại tinh thể lưỡng chiết âm ( $n_a - n_o < 0$ ). Lăng kính Tomson gồm hai lăng kính tam giác vuông được dán hai mặt huyền lại với nhau bằng nhựa dán canada chiết suất  $n_d = 1,54$ . Hình 12.9 thể hiện các kích thước của lăng kính Tomson, ở đây trục quang của lăng kính vuông góc với mặt trang giấy. Chùm sáng tự nhiên truyền thẳng vào lăng kính, cả hai tia thường và bất thường không bị lệch hướng do chùm tới vuông góc với mặt ngăn cách (xem phần 12.3.2 hình 12.6b, d). Tại mặt dán lớp nhựa Canada chùm sáng tách thành hai tia: Tia thường (khi  $\lambda = 546,1 \text{ nm}$  thì  $n_o = 1,662 > n_d$ ) phản xạ hoàn toàn với góc tới ( $\epsilon_i = 71,57^\circ$ ) lớn hơn góc giới hạn



**Hình 12.9.** Lăng kính Tomson (tinh thể lưỡng chiết âm).

( $\epsilon_g = 67,91^\circ$ ) trở lại lăng kính thứ nhất rồi khúc xạ qua cạnh bên mà ra ngoài. Tia bất thường (có  $n_a = 1,488 > n_d$ ) đi thẳng qua toàn bộ lăng kính Tomson. Tia bất thường là tia phân cực toàn phần. Mặt dao động các vectơ cường độ điện trường vuông góc với mặt trang sách.

**Lăng kính Nikon:** Lăng kính Nikon được chế tạo từ tinh thể thạch anh, một tinh thể lưỡng chiết dương ( $n_a - n_o > 0$ ). Lăng kính gồm hai lăng kính thành phần tam giác vuông, hai mặt chứa cạnh lớn góc vuông dán lại với nhau bằng nhựa dán Canada. Các thông số hai lăng kính và sự truyền hai tia phân cực qua Nikon được thể



**Hình 12.10.** Lăng kính Nikon (tinh thể lưỡng chiết dương).

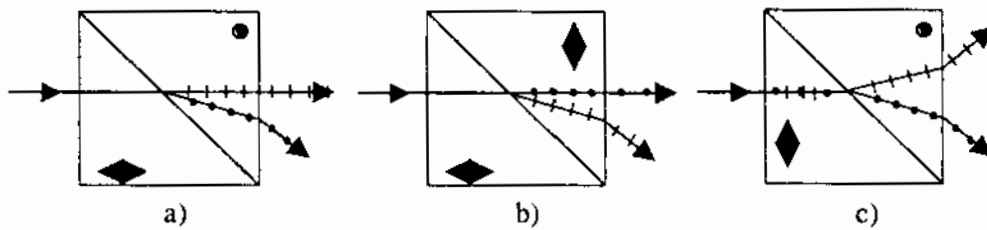
hiện ở hình 12.10. Trục quang của lăng kính nằm trong mặt trang sách. Do góc tới của chùm ánh sáng tự nhiên vào lăng kính  $\epsilon_0 \neq 0$  và nghiêng so với trục quang lăng kính, nên hai tia thường và bất thường khúc xạ theo hai hướng khác nhau. Tia thường có chiết suất  $n_o$  nhỏ hơn nên góc khúc xạ nhỏ hơn, tia bất thường có chiết suất  $n_a$  lớn hơn nên góc khúc xạ lớn hơn. Tại lớp dán, tia bất thường phản xạ toàn phần ( $n_a = 1,56 > n_d = 1,54$  và góc tới lớn hơn góc giới hạn) trở lại lăng kính thứ nhất rồi khúc xạ qua mặt bên ra ngoài. Tia thường (có  $n_o = 1,54 \approx n_d$ ) đi thẳng qua toàn bộ lăng kính Nikon. Tia thường là tia phân cực toàn phần. Mặt dao động các vectơ cường độ điện trường nằm trên mặt trang sách.

Như vậy qua lăng kính Tomson tia phân cực toàn phần là tia bất thường, ngược lại qua lăng kính Nikon tinh thể thạch anh tia phân cực toàn phần là tia thường.

- **Lăng kính Rochon** (hình 12.11a). Lăng kính Rochon gồm tổ hợp hai lăng kính nửa khối lập phương dán lại với nhau. Hai trục quang của hai lăng kính thành phần vuông góc với nhau. Trục quang lăng kính thứ nhất song song với chùm tới, trục quang lăng kính thứ hai vuông góc với chùm tới. Khi chùm sáng tự nhiên vào lăng kính thứ nhất (do góc tới  $\epsilon = 0$ ) nên cả hai tia thường và bất thường đều truyền thẳng không bị lệch hướng. Qua lớp dán, tia thường truyền thẳng, tia bất thường lệch hướng. Qua lăng kính Rochon, hai tia lệch hướng nhau. Tia thường có mặt dao động của các vectơ cường độ điện trường song song với trục quang của lăng kính thứ hai, trong khi đó tia bất thường có mặt dao động của các vectơ điện trường vuông góc với trục quang của lăng kính thứ hai.

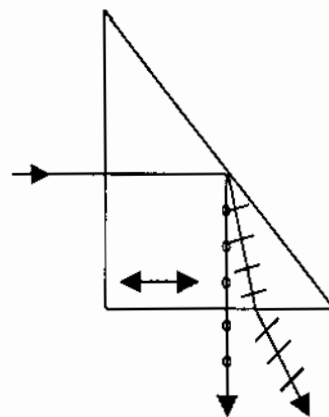
- Lăng kính Senamon (hình 12.11b). Lăng kính Senamon gồm tổ hợp hai lăng kính nửa khối lập phương dán lại với nhau. Hai trục quang của hai lăng kính thành phần vuông góc với nhau cùng nằm trên một mặt phẳng. Trục quang lăng kính thứ nhất song song với chùm tới. Trục quang lăng kính thứ hai vuông góc với chùm tới. Tương tự như lăng kính Rochon, hai tia lệch hướng nhau khi ra khỏi lăng kính. Ở đây, tia thường có mặt dao động của các vectơ cường độ điện trường vuông góc với trục quang của lăng kính thứ hai, còn tia bất thường có mặt dao động của các vectơ điện trường song song với trục quang của lăng kính phần thứ hai.

- Lăng kính Wolaston (hình 12.11c). Cách hợp thành của hai lăng kính thành phần giống lăng kính Rochon nhưng trục quang của lăng kính thành phần thứ nhất vuông góc với chùm tới. Chùm sáng tự nhiên qua lăng kính Wolaston cho hai tia thường và bất thường lệch hướng nhau và cùng lệch về hai phía so với hướng chùm tới.



**Hình 12.11.** a- Lăng kính Rochon; b- lăng kính Senamon; c- lăng kính Wolaston.

- Lăng kính phân cực Dove. Lăng kính phân cực Dove từ tinh thể lưỡng chiết là một lăng kính tam giác vuông cân phản xạ một lần (hình 12.12). Trục quang song song với chùm tới. Qua mặt ngăn cách hai tia thường và bất thường cùng hướng và cùng vận tốc. Tại mặt phản xạ, tia thường (tuân theo định luật phản xạ) phản xạ ra khỏi lăng kính với góc lệch so với tia tới góc  $90^0$ . Tia thường có mặt dao động của các vectơ cường độ điện trường vuông góc với trục quang của lăng kính (đồng thời



**Hình 12.12.**  
Lăng kính phân cực Dove.

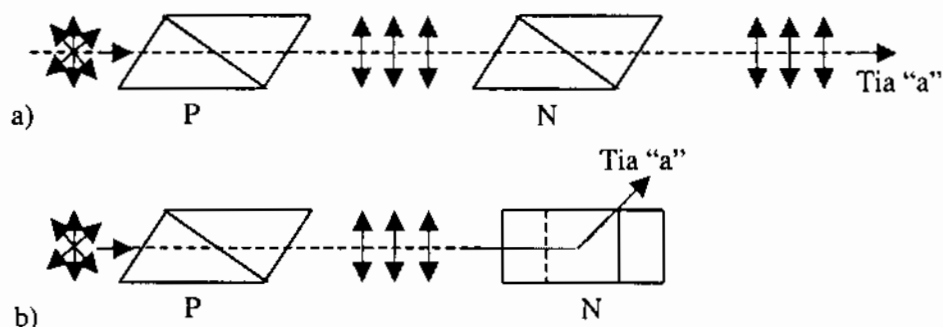
cũng vuông góc với mặt trang sách). Tia bất thường (không tuân theo định luật phản xạ) phản xạ ra khỏi lăng kính với góc lệch khác với tia thường. Tia bất thường có mặt dao động của các vectơ điện trường cùng với mặt phẳng chứa trục quang (nằm trên mặt trang sách).

## 12.5. NHỮNG ỨNG DỤNG PHÂN CỰC ÁNH SÁNG

Ánh sáng phân cực được ứng dụng rộng rãi và có hiệu quả ở nhiều phạm vi khác nhau: Chế tạo các van và các bộ chuyển tần và chuyển pha quang điện tử, chế tạo các trang thiết bị quan sát hình ảnh vật thể, chế tạo các thiết bị đo lường chính xác...

Khối trọng tâm của các ứng dụng phân cực ánh sáng là cặp kính phân cực (polarisator) và kính phân tích (kính analisator). *Kính phân cực* là các tấm phân cực hoặc lăng kính phân cực. Kính phân cực tạo chùm phân cực phẳng; khi chùm tới là chùm sáng tự nhiên. Kính phân cực là các lăng kính phân cực hoặc các tấm phân cực một phần tư bước sóng. *Kính phân tích* là các tấm phân cực hoặc lăng kính phân cực được sử dụng để xác định trạng thái và biên độ dao động điện trường của chùm phân cực thông qua các tham số: độ lệch pha  $\Delta\phi$  và  $r_a$ ,  $r_o$  hoặc cặp  $\psi$  và  $\alpha$ . Kính phân tích là các lăng kính phân cực hoặc các tấm phân cực một phần tư bước sóng.

Hình 12.13 là một hệ ghép của kính phân cực (P) và kính phân tích (N) từ hai lăng kính Nicol.



**Hình 12.13.** Cặp kính phân cực P và kính phân tích N:

a- hai trục quang của P và N trùng nhau;

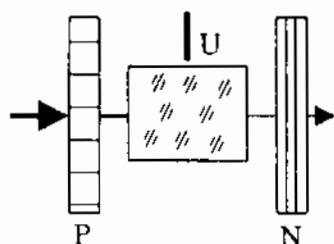
b- hai trục quang của P và N vuông góc nhau.

Khi ghép kính phân cực và kính phân tích vị trí giống nhau (hình 12.13a), từ chùm sáng tự nhiên qua kính phân cực P được chùm phân cực toàn phần. Qua kính phân tích trạng thái phân cực không đổi so với sau kính phân cực. Quay kính phân tích góc  $\alpha = 90^0$  (hình 12.13b) tia bất thường bị phản xạ trên mặt Nikon mà không qua kính phân tích. Điều đó cho thấy cường độ sáng phân cực ở vị trí (hình 12.13a) sau hai kính là lớn nhất  $I_{Max}$  và ở vị trí (hình 12.13b) bằng 0. Khi góc quay  $\alpha$  của kính N tăng dần lên từ 0 đến  $90^0$  thì cường độ sáng qua hệ giảm dần và được xác định theo:

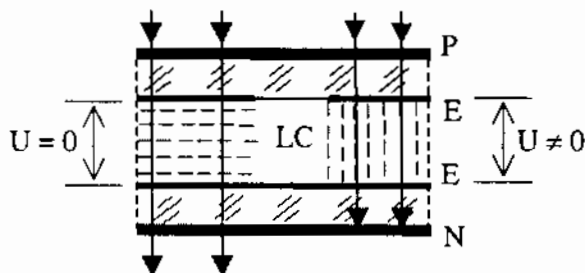
$$I_{\alpha} = I_{Max} \cos^2 \alpha$$

• Cảm biến quang điện tử

Các vật liệu đẳng hướng và không đẳng hướng (thùng dùng hiện nay là các tinh thể rắn và tinh thể lỏng) được kẹp bởi hai kính phân cực P và kính phân tích N một phần tư bước sóng. Mặt dao động của hai kính chéo nhau góc  $\alpha = 90^0$ . Dưới tác dụng một điện áp hoặc một từ trường biến thiên (hình 12.15). Khi chưa có điện áp hoặc từ trường biến thiên, chùm phân cực không qua được tấm N. Khi có điện áp hoặc từ trường biến thiên, vật liệu ở A chuyển thành vật liệu lưỡng chiết bất thường  $n_a$  thay đổi (nếu là vật liệu bất đẳng hướng). Kết quả là, sau tấm N xuất hiện chùm sáng phân cực elip. Trạng thái phân cực và độ lớn biên độ dao động vectơ điện trường sau tấm N phụ thuộc vào độ lớn và tần số biến thiên của điện áp hoặc từ trường tác dụng. Tùy thuộc vào kích thước và vật liệu vật A, vào độ lớn điện áp (một vài  $\mu V$  đến hàng chục kV) và tần số biến đổi tới hàng Gz, mà cảm biến quang điện tử được chế tạo theo nhiều loại khác nhau (các tế bào tinh thể lỏng - hình 12.15) như: các van quang điện, các bộ điều tần điều biên, các bộ chuyển đổi từ biên độ sang tần số hoặc ngược lại, thuận tiện trong thông tin kỹ thuật số hiện đại.



Hình 12.14. Van quang điện.

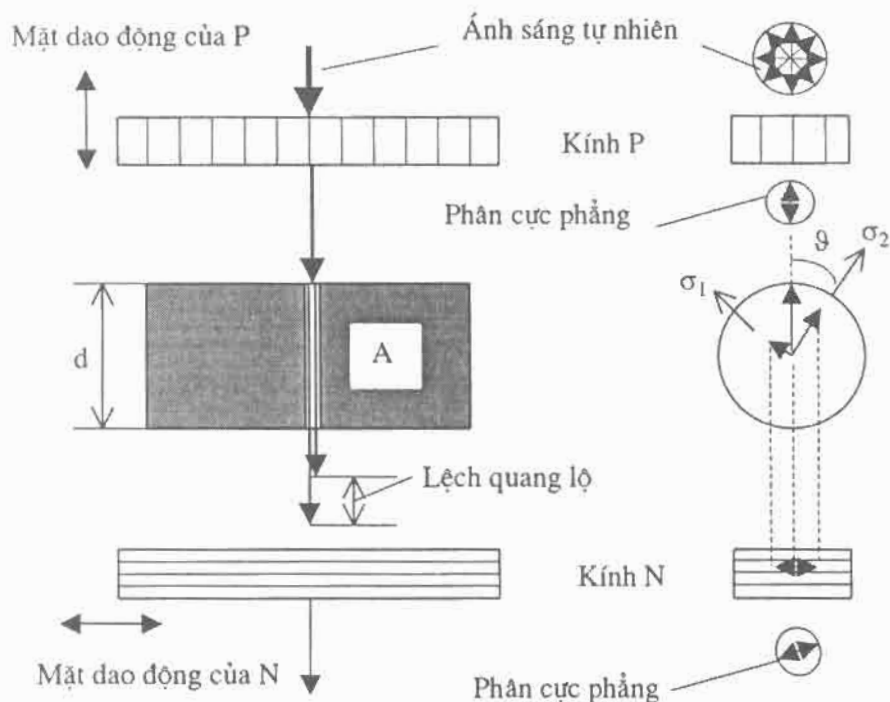


Hình 12.15. Phân cực ánh sáng qua tinh thể lỏng do thay đổi điện áp.

- Các thiết bị đo lường quang điện theo nguyên lý phân cực ánh sáng.

- Xác định ứng suất của những vật liệu vô định hình đồng tính và đẳng hướng khi có tác dụng ngoại lực. Vật liệu thử được kẹp giữa hai kính phân cực và phân tích (hình 12.13, hình 12.16). Các thiết bị đo thường dùng hai tấm phân cực một phần tư bước sóng ánh sáng vàng  $\lambda = 589,3 \text{ nm}$ .

Do vị trí của hai kính phân cực và phân tích khi chưa có áp lực, thì sau kính N không có chùm sáng phân cực cho qua, dẫn đến trên thị trường quan sát tối đen.



**Hình 12.16.** Một ứng dụng của quang đàn hồi.

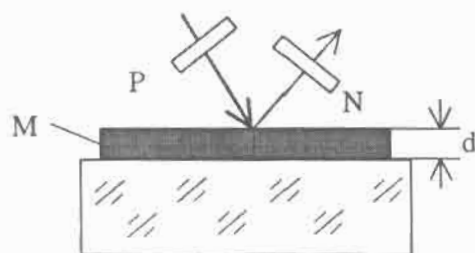
Dưới tác dụng ngoại lực  $F$  xuất hiện ứng suất trong (tại điểm nào đó) theo hai chiều  $\sigma_1$  và  $\sigma_2$  vuông góc với nhau, dẫn đến vật liệu có tính lưỡng chiết với hai chiết suất  $n_a$  và  $n_0$ ; do vậy một phần chùm sáng được truyền qua kính N. Hệ số truyền qua được xác định theo:  $d$  là bề dày của vật liệu thử.

$$\tau = \tau_{\text{Max}} \sin^2 2\vartheta . \sin^2 \frac{C(\sigma_2 - \sigma_1)d.\pi}{\lambda}$$



Trong đó  $\vartheta$  là góc lập bởi hướng áp lực và mặt phân cực;  $C$  là hệ số quang đàn hồi của vật liệu;  $\tau_{Max}$ : hệ số truyền qua khi chưa có ngoại lực và hai kính phân cực, kính phân tích có cùng mật dao động. Nếu vật liệu không đồng tính thì tại các điểm khác nhau, hiệu số ( $\sigma_2 - \sigma_1$ ) khác nhau và hệ số truyền qua  $\tau$  không giống nhau. Như vậy trường quan sát sau kính  $N$  xuất hiện các đường sáng tối đậm nhạt khác nhau thể hiện mức không đồng nhất của vật liệu. Ta cũng dùng phương pháp quang đàn hồi này để xác định khuyết tật (rỗ, bọt khí, ...) trong các vật liệu đồng tính và đẳng hướng.

- Xác định bề dày, chiết suất của các lớp màng  $M$  trên bề mặt vật liệu (màng mỏng quang học trên các linh kiện quang, màng dầu, màng bảo vệ... trên bề mặt chi tiết cơ khí...). Chùm phân cực phẳng sau kính phân cực  $P$  được phản xạ trên bề mặt chi tiết  $A$  (hình 12.17). Nhờ kính phân tích  $N$  ta xác định được trạng thái phân cực và độ lớn biên độ dao động vectơ điện trường của chùm phản xạ mặt trên và mặt dưới giao thoa với nhau. Các thông số này phụ thuộc vào bề dày và chiết suất của màng mỏng.



Hình 12.17. Xác định bề dày của màng mỏng.

- Xác định nồng độ hoặc chiết suất của các chất lỏng (nồng độ đường trong nước, chiết suất của các dầu thảo mộc...). Do đặc tính quang hoạt mà chúng thay đổi các thông số như trạng thái phân cực và biên độ dao động vectơ điện trường của chùm sau kính  $N$ . Các thông số này phụ thuộc vào nồng độ và chiết suất của chất lỏng. Đường kẻ được chế tạo theo nguyên lý phân cực này.

- Phân cực ánh sáng cũng được sử dụng trong tạo hình ảnh quang học. Kỹ thuật ảnh nổi, kính hiển vi phân cực là những ứng dụng thành công trong lĩnh vực này.

## Chương XIII

# MÀNG MỎNG QUANG HỌC

### 13.1. CƠ SỞ LÝ THUYẾT MÀNG MỎNG QUANG HỌC

#### 13.1.1. Màng mỏng quang học là gì

Màng mỏng quang học (MMQH) là màng gồm một hay nhiều lớp vật liệu mạ trên bề mặt chi tiết quang có bề dày quang so với bước sóng ánh sáng và có tính chất quang nhất định.

Vật liệu MMQH rất phong phú và đa dạng: là kim loại nguyên chất: Ag, Al, Au, Cu, Cr, Ge...; là các oxyt điện môi:  $TiO_2$ , TiO, SiO,  $SiO_2$ , CaO, MgO,  $Al_2O_3$ ... hoặc là các muối:  $MgF_2$ ,  $Na_3AlF_6$ ,  $ThF_4$ , ZnS... Các màng kim loại có hệ số hấp thụ lớn, dẫn điện dẫn nhiệt cao. Các màng điện môi có hệ số hấp thụ ánh sáng thấp.

Bề dày quang học là thông số quang quan trọng của MMQH, được xác định bởi tích giữa quãng đường hình học  $d$  (bề dày thực của màng) và chiết suất vật liệu tạo màng  $n$  (hình 13.1):

$$L = n \cdot d \quad (13.1)$$

Bề dày quang học được xác định theo bước sóng ánh sáng:

$$n \cdot d = \frac{\lambda_0}{8}, \frac{\lambda_0}{4}, \frac{\lambda_0}{2}, \frac{3\lambda_0}{4}, \lambda_0, \dots$$

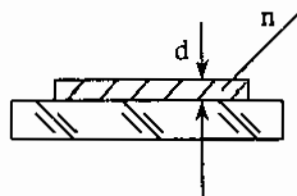
ở đây  $\lambda_0$  là bước sóng tính bề dày màng.

Bề mặt chi tiết quang được mạ MMQH có thể là mặt phẳng, mặt cầu, mặt elip, mặt parabol, mặt hyperbol, mặt trụ và mặt xuyên... Độ nhám bề mặt các chi tiết quang mạ MMQH tính theo  $R_a = 0,01 \div 0,04 \mu m$ .

#### 13.1.2. Phân loại màng mỏng quang học

Màng quang học được chia theo nhiều loại khác nhau:

- Chia theo số lớp của màng: một lớp hay nhiều lớp.



Hình 13.1. Bề dày màng.

- Chia theo tính chất của màng: màng phản xạ, màng giảm phản xạ, kính lọc các loại.
- Phân theo màng đồng tính hay không đồng tính.
- Phân theo màng hấp thụ hay không hấp thụ.
- Màng phân cực
- v.v...

### 13.1.3. Xác định tính chất màng mỏng quang học

Các tính chất cơ bản của MMQH gồm hệ số phản xạ R, hệ số truyền qua T và hệ số hấp thụ H.

Giả sử màng có hai mặt ngăn cách A và B. Tại mặt A sóng ánh sáng có cường độ điện trường  $E_A$  và cường độ từ trường là  $H_A$ . Sau khi qua màng với hệ số pha  $\delta_1$ , đặc tính vật liệu màng là  $\eta_1$ , cường độ điện trường  $E_B$  và cường độ từ trường là  $H_B$ . Theo [2] thì phương trình truyền sóng điện từ Maxwell sẽ là:

$$k.E_A = k.E_B.\cos\delta_1 + \frac{1}{\eta_1} \cdot H_B.i.\sin\delta_1 \quad (13.2)$$

$$H_A = \eta_1.k.E_B.\sin\delta_1 + H_B.\cos\delta_1 \quad (13.3)$$

Trong đó:  $k$ - vectơ đơn vị theo hướng truyền sóng:

$$\delta_1 = \frac{2\pi.N_1.d_1.\cos\varphi_1}{\lambda}$$

$\eta_1 = N_1.\cos\varphi_1$  khi biên độ theo chiều vuông góc với mặt phẳng tới.

$\eta_1 = N_1 / \cos\varphi_1$  khi biên độ theo chiều song song với mặt phẳng tới.

Từ (13.2) và (13.3) lập phương trình ma trận như sau:

$$\begin{bmatrix} k.E_A \\ H_A \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\delta_1 & (i.\sin\delta_1 / \eta_1) \\ i.\eta_1.\sin\delta_1 & \cos\delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k.E_B \\ H_B \end{bmatrix} \quad (13.4)$$

Khi ký hiệu Y là chiết suất tương đương của màng:

$$Y = \frac{H_A}{k.E_A} \quad (13.5)$$

thì biên độ phản xạ:

$$r = \frac{\eta_0 - Y}{\eta_0 + Y} \quad (13.6)$$

và hệ số phản xạ của màng:

$$R = \left[ \frac{\eta_o - Y}{\eta_o + Y} \right] \cdot \left[ \frac{\eta_o - Y}{\eta_o + Y} \right]^* \quad (13.7)$$

Từ (9.4) chuyển đổi thành:

$$(k.E_A) \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & (i \cdot \sin \delta_1) / \eta_1 \\ i \cdot \eta_1 \cdot \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} (k.E_B)$$

$$Y = \frac{\eta_2 \cdot \cos \delta_1 + i \cdot \eta_1 \cdot \sin \delta_1}{\cos \delta_1 + (\eta_2 / \eta_1) \cdot \sin \delta_1}$$

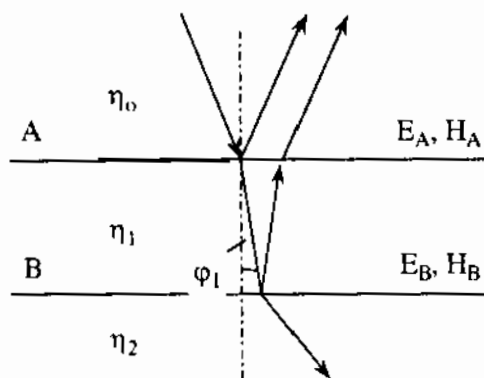
Hãy đặt chiết suất tương đương Y theo:

$$Y = \left( \frac{C}{B} \right) \quad (13.8)$$

Thì:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \delta_1 & (i \cdot \sin \delta_1 / \eta_1) \\ i \cdot \eta_1 \cdot \sin \delta_1 & \cos \delta_1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_2 \end{bmatrix} \quad (13.9)$$

Quan hệ (13.9) là ma trận đặc trưng cho màng một lớp.



**Hình 13.2.** Quan hệ các cường độ điện trường và từ trường ở hai mặt ngăn cách A và B của màng một lớp.

Ma trận đặc trưng của hệ màng k lớp:

$$\begin{bmatrix} B \\ C \end{bmatrix} = \left\{ \prod_{j=1}^{j=k} \begin{bmatrix} \cos \delta_j & (i \cdot \sin \delta_j) / \eta_j \\ i \cdot \eta_j \cdot \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \right\} \begin{bmatrix} 1 \\ \eta_{k+1} \end{bmatrix} \quad (13.10)$$

Trong đó:

$$\delta_j = \frac{2\pi \cdot N_j \cdot d_j \cdot \cos \varphi_j}{\lambda}$$

$\eta_j = N_j \cdot \cos \varphi_j$  khi xét biên độ theo chiều vuông góc với mặt phẳng tới.

$\eta_j = N_j / \cos \varphi_j$  khi xét biên độ theo chiều song song với mặt phẳng tới.

$\eta_{k+1}$ : chiết suất tương đương của đế.

Để tính góc khúc xạ  $\varphi_j$  cần sử dụng định luật khúc xạ ánh sáng:

$$N_o \cdot \sin \varphi_o = N_j \cdot \sin \varphi_j$$

Như vậy để xác định được các tính chất quang màng nhiều lớp phải tính ma trận đặc trưng (13.10), xác định chiết suất tương đương Y (13.8), tìm biên độ phản xạ r (13.6) và hệ số phản xạ R (13.7).

Tương tự cũng xác định hệ số truyền qua T và hệ số hấp thụ H của màng:

$$T = \frac{\eta_{k+1} \cdot (1 - R)}{\text{phần thực (B.C}^*)} \quad (13.11)$$

$$H = 1 - R - T = \left[ 1 - \frac{\eta_{k+1}}{\text{phần thực (B.C}^*)} \right] \quad (13.12)$$

## 13.2. MỘT SỐ LINH KIỆN MÀNG MỎNG QUANG HỌC

### 13.2.1. Màng giảm phản xạ điện môi

Màng giảm phản xạ (MGPX) (còn gọi là màng thấu quang) là MMQH thông dụng nhất. Chúng là những màng điện môi thường là một, hai, ba lớp mạ trên bề mặt các chi tiết quang.

Khi bề mặt chi tiết quang bằng thủy tinh chưa mạ màng có hệ số phản xạ:

$$R = \left[ \frac{n_o - n_1}{n_o + n_1} \right]^2 \quad (13.13)$$

Thủy tinh quang học có chiết suất  $n = 1,5 \div 2$ , nên hệ số phản xạ trên bề mặt chúng từ 4% ÷ 11%.

Hệ số truyền qua  $T = 1 - R = 94\% \div 89\%$  của mỗi mặt.

Hệ số truyền qua của hệ k mặt  $T = (1 - R_1) \cdot (1 - R_2) \dots (1 - R_k)$ .

Giả sử mỗi mặt có hệ số phản xạ giống nhau thì:

$$T = (1 - R)^k$$

Hãy làm phép toán đơn giản cho thủy tinh  $n = 1,576$  khi chưa mạ và có mạ MGPX một lớp (liệt kê theo bảng 9.1) sẽ có những nhận xét thật thú vị về vai trò của MGPX:

- Tăng lượng quang thông qua hệ quang so với khi chưa mạ MGPX.
- Giảm phản xạ nhiễu để tăng chất lượng tạo ảnh của hệ quang.

**Bảng 13.1.** So sánh các bề mặt chi tiết quang chưa mạ và có mạ màng giảm phản xạ

Số mặt	1	2	10	20	30
Khi R = 5% thì T = %	95	90,2	59,8	36,8	21,5
Khi R = 5% thì phản xạ nhiễu $R_N = %$	0	0,3	5,8	13	17
Khi mạ MGPX: R = 1% thì HS truyền qua T = %	99	98	90,4	81	73
Khi mạ MGPX: R = 1% thì phản xạ nhiễu $R_N = %$	0	0,2	0,5	1,7	3

#### • Màng giảm phản xạ một lớp

Màng giảm phản xạ một lớp có bề dày quang:  $n_1 \cdot d_1 = \lambda_0 / 4, 3\lambda_0 / 4 \dots$  Chiết suất  $n_1$  của màng nhỏ hơn chiết suất chi tiết quang. Vật liệu của màng là các chất điện môi chiết suất thấp, không hấp thụ ánh sáng có độ bền bám tốt và có khả năng chống xâm thực của môi trường xung quanh. Những vật liệu thường dùng là  $MgF_2, Na_3AlF_6, CaF_2, SiO, LiF_2, ThF_4 \dots$

Những ưu điểm đáng quý của MGPX một lớp là dễ chế tạo, dễ khống chế bề dày khi chế tạo màng vì màng luôn luôn có hệ số phản xạ thấp hơn so với chưa có màng. Chiết suất của thủy tinh làm chi tiết quang càng lớn thì sau khi mạ màng, hệ số phản xạ giảm càng nhiều.

#### • Màng hai lớp giảm phản xạ

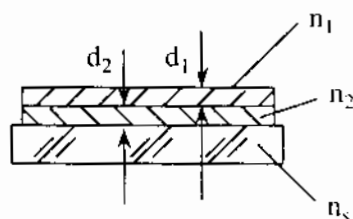
Màng hai lớp giảm phản xạ được cấu trúc theo (hình 13.3). Chiết suất lớp ngoài  $n_1 < n_3$  ( $n_1$  - chiết suất lớp thứ nhất;  $n_3$  - chiết suất chi tiết quang). Lớp trong  $n_2 > n_3$  và  $n_2 > n_1$  ( $n_2$  - chiết suất lớp thứ hai).

Bề dày quang:  $n_1 \cdot d_1 = \lambda_0 / 4$  và  $n_2 \cdot d_2 = \lambda_0 / 2$  hoặc  $n_1 \cdot d_1 = \lambda_0 / 4$  và  $n_2 \cdot d_2 = \lambda_0 / 4$ .

Vật liệu cho hai lớp màng: Lớp ngoài là các chất điện môi chiết suất thấp, không hấp thụ ánh sáng và có khả năng chống xâm thực của môi trường xung quanh:  $MgF_2$ ,  $Na_3AlF_6$ ,  $CaF_2$ ,  $SiO_2$ ,  $LiF$ ,  $ThF_4$ ... Lớp trong cũng là các chất điện môi chiết suất cao, không hấp thụ ánh sáng có độ bền bám tốt với đế thủy tinh quang học:  $ZnS$ ,  $TiO_2$ ,  $Sb_2O_3$ ,  $CeO_2$ ,  $ThO_2$ ,  $ZrO_2$ ,  $CeF_2$ ,  $PbTe$ ... hoặc vật liệu hỗn hợp.

Những ưu điểm của MGPX hai lớp:

- Hệ số phản xạ nhỏ hơn so với màng một lớp.
- Miền bước sóng ánh sáng có hệ số phản xạ thấp rộng hơn.
- Sử dụng tốt không những với vật liệu đế có chiết suất lớn mà cả chiết suất nhỏ.



Hình 13.3. Màng hai lớp.

#### • Màng ba lớp giảm phản xạ

So với màng hai lớp và một lớp thì hệ số phản xạ  $R$  rất nhỏ ( $< 0,10\% + 0,01\%$ ) trong suốt dải rộng bước sóng ánh sáng. Màng giảm phản xạ ba lớp được cấu trúc theo:

Chiết suất: Lớp ngoài cùng chiết suất nhỏ nhất. Lớp thứ hai có chiết suất lớn nhất. Lớp thứ ba sát đế có chiết suất lớn hơn chiết suất TTQH.

Bề dày màng được ký hiệu theo: Air | L H H L | Glas

Vật liệu thường dùng cho lớp ngoài cùng cũng giống như lớp ngoài của màng hai lớp và một lớp.

Vật liệu thường dùng của lớp thứ hai:  $Sb_2O_3$ ,  $Nd_2O_3$ ,  $ZnS$ ...

Vật liệu của lớp thứ ba:  $CeF_3$ ,  $NdF_3$ ,  $CdF_3$ ,  $PbF_2$ ...

Bề dày quang học của màng:  $n_1 \cdot d_1 = \lambda_0 / 4$ ,  $n_2 \cdot d_2 = \lambda_0 / 2$ ,  $n_3 \cdot d_3 = \lambda_0 / 4$ .

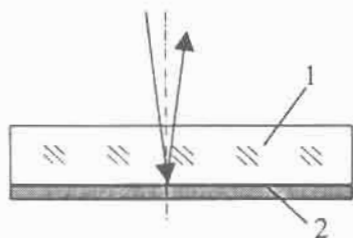
#### • Màng giảm phản xạ cho miền hồng ngoại

Các bề mặt cảm quang hồng ngoại làm bằng vật liệu chiết suất cao, nên phần lớn chùm tới bị phản xạ trên bề mặt. Silic (Si:  $n = 3,8$ ) và germanium (Ge:  $n = 4$ ) là những vật liệu thường dùng nhất trong miền hồng ngoại.

Hệ số phản xạ quá lớn nên hệ số truyền qua T quá nhỏ. Bởi vậy các bề mặt silic và germanium phải được mạ màng giảm phản xạ. Các chi tiết bằng Si và Ge có chiết suất lớn nên cần mạ màng một lớp là đủ. Vật liệu màng là SiO. Bề dày quang của màng  $nd = \lambda_0 / 4$  ( $\lambda_0 = 1,7 \mu\text{m}$ ).

### 13.2.2. Màng phản xạ kim loại

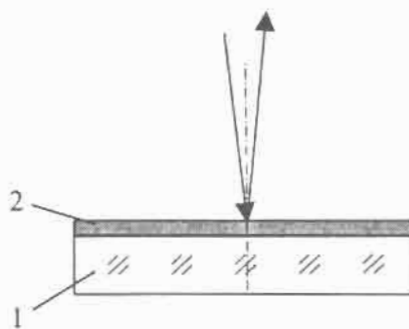
Bề mặt chi tiết quang được mạ màng kim loại được gọi là gương phản xạ kim loại. Gương phản xạ có hệ số phản xạ cao. Gương phản xạ là gương phẳng, gương cầu, gương parabol, gương elip, gương hình tròn, gương hình vành khăn, gương nhiều cạnh... Vật liệu lớp mạ là Al, Ag, Au... Cần phân biệt: gương phản xạ mặt trước (hình 13.5) và gương phản xạ mặt dưới (hình 13.4).



1- đế gương; 2- lớp phản xạ kim loại.

**Hình 13.4.**

Gương phản xạ mặt dưới.



**Hình 13.5.**

Gương phản xạ mặt trước.

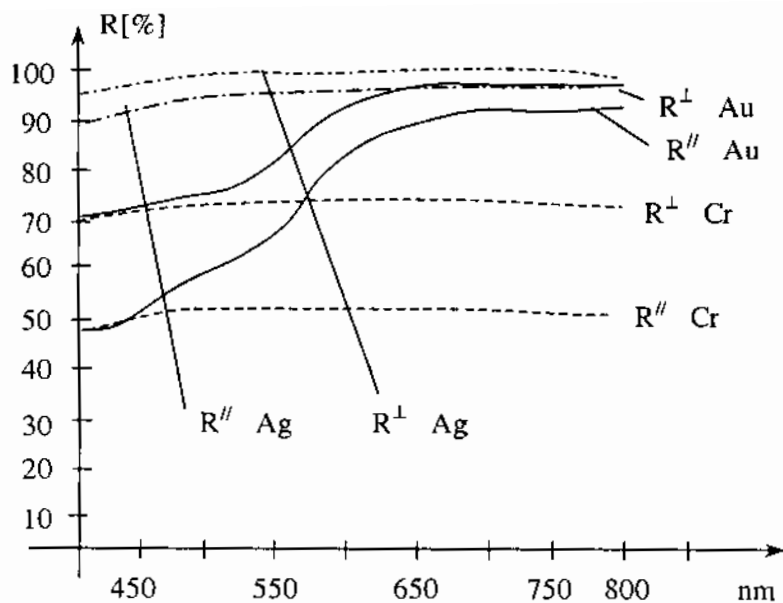
Hệ số phản xạ màng kim loại phản xạ mặt trước được xác định theo:

$$R = \left[ \frac{1 - (n - i.k)}{1 + (n - i.k)} \right]^2 \quad (13.14)$$

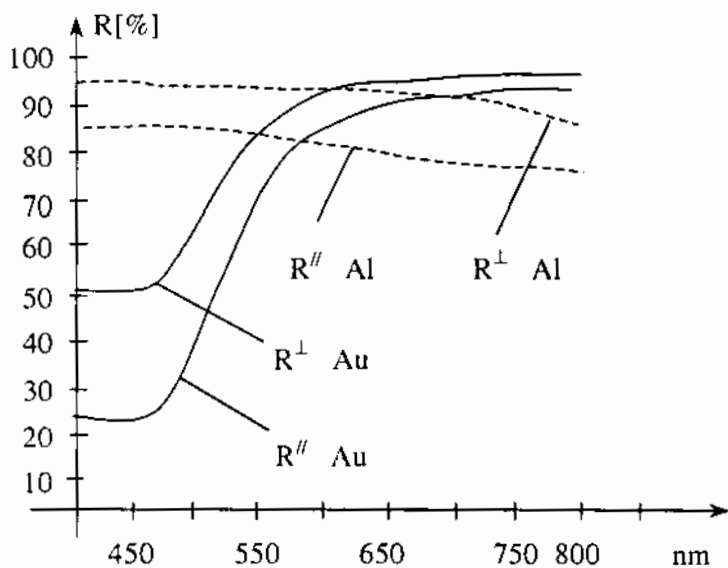
k là hệ số hấp thụ của lớp kim loại phản xạ.

Hình 13.6a và hình 13.6b mô tả các đường đặc tuyến hệ số phản xạ và bước sóng ánh sáng của các gương phản xạ kim loại thông dụng.





**Hình 13.6a.** Hệ số phản xạ theo chiều // và  $\perp$  với mặt phẳng tới của các kim loại Ag, Cu và Cr.



**Hình 13.6b.** Hệ số phản xạ theo chiều // và  $\perp$  với mặt phẳng tới của các kim loại Au và Al.

### 13.2.3. Gương có hệ số phản xạ cao

Nhiều dụng cụ quang học cần có gương với hệ số phản xạ cao và hệ số hấp thụ thấp. Gương loại này phải được mạ màng nhiều lớp (số lớp  $2p+1$ ). Mỗi lớp có bề dày quang  $nd = \lambda_0 / 4$ . Các lớp chiết suất thấp  $n_L$  xen kẽ các lớp chiết suất cao  $n_H$ . Lớp thứ nhất tiếp giáp với môi trường có chiết suất cao. Lớp thứ  $2p+1$  nằm sát để chiết suất  $n_S$ . Ký hiệu của loại màng này: Air | H L H...H L H | glas. Chiết suất tương đương của màng:

$$Y = \left[ \frac{n_H}{n_L} \right]^{2p} \cdot \frac{n_H^2}{n_S} \quad (13.15)$$

Biên độ chùm phản xạ:

$$r = \frac{n_0 - Y}{n_0 + Y}$$

Hệ số phản xạ của gương:

$$R = r \cdot r^* = \left\{ \frac{1 - \left[ \frac{n_H}{n_L} \right]^{2p} \cdot \frac{n_H^2}{n_S}}{1 + \left[ \frac{n_H}{n_L} \right]^{2p} \cdot \frac{n_H^2}{n_S}} \right\}^2 \quad (13.16)$$

Ngoài ưu điểm về hệ số phản xạ cao, các gương này còn có độ bán rộng lớn. Tùy thuộc vào vật liệu các lớp có thể chọn được độ bán rộng của hệ số phản xạ  $2\Delta g$ :

$$\Delta g = \frac{2}{\pi} \cdot \sin^{-1} \left[ \frac{n_H - n_L}{n_H + n_L} \right] \quad (13.17)$$

### 13.2.4. Gương lạnh

Gương lạnh được sử dụng nhờ hệ số phản xạ cao chùm sáng trong miền nhìn thấy ( $\lambda = 400 \div 800$  nm), không phản xạ các tia hồng ngoại ( $\lambda > 800$  nm) và tử ngoại ( $\lambda < 400$  nm). Các tia hồng ngoại và tử ngoại gây hiện tượng sinh hoá và nhiệt ảnh hưởng xấu tới vật thể và phim ảnh được tạo ảnh trong các hệ quang.

Gương lạnh gồm hai hệ màng phản xạ cao trong miền ánh sáng nhìn thấy. Hai hệ màng mạ trên hai mặt hoặc cùng một mặt để thủy tinh.

• Hai hệ màng mạ trên hai mặt của đế

Bước sóng trung tâm của hai hệ:  $\lambda_{01}$  và  $\lambda_{02}$ .

Hệ thứ nhất: Bước sóng trung tâm  $\lambda_{01}$ : Air | H L H...H L H | glas

Hệ thứ hai: Bước sóng trung tâm  $\lambda_{02}$ : Air | H L H...H L H | glas

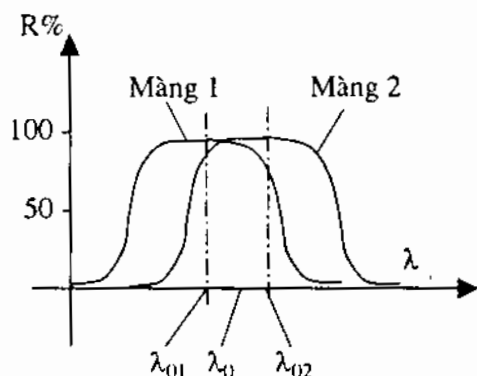
Hệ thứ nhất chủ yếu không phản xạ phần tử ngoại, hồng ngoại và một phần ánh sáng gần hồng ngoại. Hệ thứ hai chủ yếu không phản xạ phần tử ngoại, hồng ngoại và một phần ánh sáng gần tử ngoại (hình 13.7).

• Hai hệ màng mạ trên cùng một mặt đế

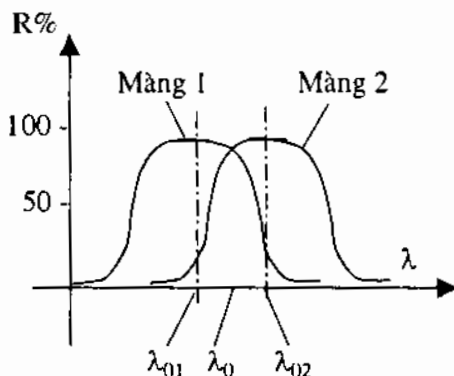
Hai hệ màng mạ trên cùng một mặt đế cũng tạo được gương cho miền ánh sáng nhìn thấy, nhưng vẫn còn phản xạ ở hai miền hồng ngoại và tử ngoại tuy rất nhỏ. Ngoài ra đường đặc tuyến R bị lõm (giảm đi) ở giữa hai bước sóng trung tâm (hình 13.8).

Để hạn chế nhược điểm thứ nhất cần mạ thêm lớp chuyển tiếp giữa hai hệ màng với bề dày quang bằng trung bình cộng hai bề dày của hai lớp tiếp giáp hai hệ màng. Hạn chế nhược điểm thứ hai bằng cách thay đổi bề dày quang các lớp chiết suất cao của cả hai hệ từ  $nd = \lambda_0/4$  thành  $nd = \lambda_0/8$ . Như vậy hai hệ màng kết hợp thành một hệ cho gương lạnh mạ một mặt có dạng:

$$\text{Air} \left[ \left[ \frac{H_1}{2} L_1 \frac{H_1}{2} \right]^5 \right. \left. 1,2L \left[ \frac{H_2}{2} L_2 \frac{H_2}{2} \right]^5 \right] \text{glass}$$



Hình 13.7. Gương lạnh có hai hệ màng mạ hai mặt của đế.

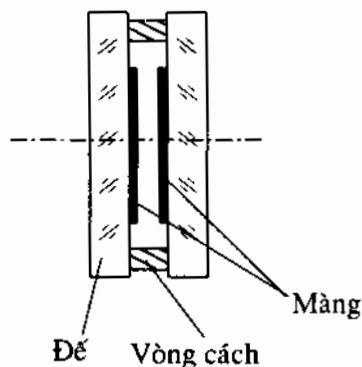


Hình 13.8. Gương lạnh có hai hệ màng mạ một mặt của đế.

### 13.2.5. Màng bán thấu

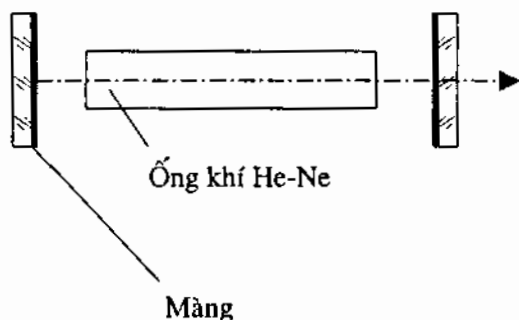
Khi cả hai phần phản xạ và khúc xạ ánh sáng trên bề mặt màng đều được sử dụng thì màng được gọi là màng bán thấu. Có nhiều loại màng bán thấu khác nhau:

\* Màng bán thấu kim loại có phần phản xạ rất cao trong khi phần truyền qua lại rất thấp. Kính Fabri- Ferrot (màng bạc) và gương bán thấu Laser He-Ne (màng Au) thuộc loại màng bán thấu kim loại. Hệ số phản xạ  $R = 92 \div 96\%$  và hệ số truyền qua  $T = 4 \div 8\%$



Hình 13.9.

Bản bán thấu Fabri - Ferrot.



Hình 13.10.

Hệ gương bán thấu của laser He-Ne.

\* Bán thấu bằng chất điện môi.

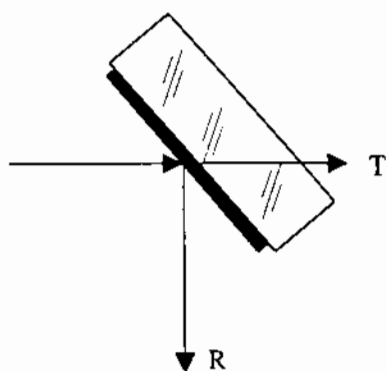
Màng bán thấu điện môi trên bề mặt phẳng thủy tinh thường chia chùm sáng thành hai phần giống nhau về năng lượng. Màng một lớp được thiết kế theo: Bề dày quang  $nd = \lambda_0/4$  hoặc  $3\lambda_0/4$ . Màng bán thấu một lớp chỉ đạt được độ bán rộng hẹp. Hệ số phản xạ giảm nhanh so với bước sóng  $\lambda_0$ . Để được dải bán rộng lớn cần mạ màng nhiều lớp điện môi chiết suất lớn và nhỏ xen kẽ nhau.

Hệ số phản xạ màng bán thấu còn phụ thuộc vào góc tới  $\varphi_0$  của chùm sáng. Các màng bán thấu thông dụng nhất được dùng ở hai trường hợp:

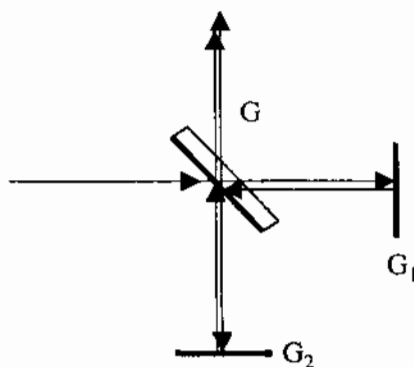
- Góc tới  $\varphi_0 = 0$  - (Các tấm Fabri- Ferrot- hình 13.9 và các bộ cộng hưởng laser 13.10).

- Góc tới  $\varphi_0 = 45^\circ$ . Màng bán thấu đã phân đôi chùm sáng thành 50% truyền qua và 50% phản xạ (hình 13.11a). Màng được sử dụng trong các máy giao thoa Maikenson (hình 13.11b).

Màng bán thấu trên để phẳng tạo các ảnh nhiễu (do phản xạ ở màng và ở mặt kia của tấm phẳng). Các ảnh nhiễu không cùng độ lớn và vị trí tạo ảnh nên hình ảnh qua hệ quang bị nhiễu, phẩm chất ảnh kém.

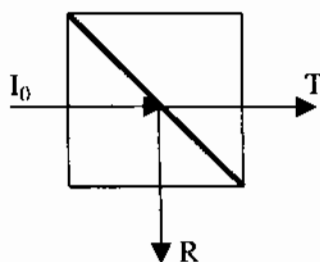


Hình 13.11a. Màng bán thấu - 50%R và 50%T.



Hình 13.11b. Giao thoa kế Maikenson.

Trong các thiết bị quang, màng bán thấu được mạ trên bề mặt cạnh huyền của lăng kính tam giác vuông phản xạ một lần. Một lăng kính tương tự (không mạ màng) dán với mặt có màng bằng keo dán có cùng chiết suất với thủy tinh lăng kính (hình 13.12). Cách ghép này tạo được khối lập phương bán thấu. Nhờ vậy ảnh các chùm sáng không còn ảnh nhiễu sau màng, phẩm chất ảnh tốt hơn.



Hình 13.12. Khối lập phương bán thấu - 50%  $I_0$  truyền qua và 50%  $I_0$  phản xạ.

### 13.2.6. Màng bán thấu phân cực

Hiện tượng phân cực phẳng diễn ra khi góc tới bằng góc Brewster ( $\varphi_0 = \varphi_B$ ) và lúc đó hai chùm truyền qua và phản xạ vuông góc với nhau.

Ở phần phản xạ, vectơ cường độ điện trường  $E^\perp$  là cực đại và hệ số phản xạ  $R^\perp = 1$ . Vectơ cường độ điện trường  $E^\parallel = 0$  và  $R^\parallel = 0$ .

Ở phần truyền qua, vectơ cường độ điện trường  $E^\parallel$  là cực đại.

Cả hai phần phản xạ và truyền qua đều được sử dụng hữu ích trong các thiết bị quang học chính xác.

Các tấm phẳng mạ màng phân cực hai lớp chiết suất cao hơn và thấp hơn chiết suất thủy tinh. Sát tấm phẳng là lớp có chiết suất cao, kế tiếp là lớp chiết suất thấp, bề dày quang mỗi lớp  $n_1 d_1 = n_2 d_2 = \lambda_t/4$  thì góc Brewster.

$$\sin\varphi_B = \frac{n_1^2 \cdot n_2^2}{n_3^2 (n_1^2 + n_2^2)} \quad (13.18)$$

### 13.2.7. Kính lọc ánh sáng

Kính lọc sử dụng làm giảm hoặc tách một phần phổ chùm sáng. Gương lạnh, các tấm Fabry- Ferot, các gương laser thuộc kính lọc ánh sáng. Ta phân biệt kính lọc trung tính, kính lọc phổ rộng, kính lọc phổ hẹp (kính lọc đơn sắc), kính lọc cạnh... Kính lọc ánh sáng gồm một hệ màng mạ trên đế thủy tinh quang học. Hãy xét hai loại kính lọc thường dùng: kính lọc cạnh và kính lọc đơn sắc.

#### a. Kính lọc cạnh

Chùm sáng qua kính lọc cạnh, hệ số truyền qua của phổ ánh sáng thay đổi đột ngột tại bước sóng  $\lambda_c$ . Ta cũng phân biệt kính lọc cạnh tần số cao và kính lọc cạnh tần số thấp:

- Kính lọc cạnh tần số cao. Kính lọc tần số cao cho qua tốt ánh sáng có bước sóng nhỏ hơn  $\lambda_c$  (T cực đại) và không cho qua ánh sáng có bước sóng lớn hơn  $\lambda_c$  (T = 0).

Kính lọc cạnh điện môi tần số cao có ký hiệu:

$$\left[ \frac{H}{2} \quad H \quad \frac{H}{2} \right]^k \quad (13.19)$$

Các lớp chiết suất thấp (L) xen kẽ các lớp chiết suất cao (H). Lớp ngoài cùng và lớp sát đế có chiết suất thấp và bề dày quang  $\lambda_0/8$ .

• Kính lọc cạnh tần số thấp: Kính lọc tần số thấp cho qua tất ánh sáng có bước sóng lớn hơn  $\lambda_c$  (T cực đại) và không cho qua ánh sáng có bước sóng nhỏ hơn  $\lambda_c$  (T = 0).

Kính lọc cạnh điện môi tần số thấp có ký hiệu:

$$\left[ \frac{H}{2} \quad L \quad \frac{H}{2} \right]^k \quad (13.20)$$

Các lớp chiết suất thấp (L) xen kẽ các lớp chiết suất cao (H). Lớp ngoài cùng và lớp sát đế có chiết suất cao và bề dày quang  $\lambda_0/8$ .

Thông tin cấp quang đã sử dụng các kính lọc cạnh để lọc các tín hiệu tải trong các bước sóng khác nhau.

### b. Kính lọc đơn sắc

Phần ánh sáng truyền qua kính lọc (hoặc phản xạ) chỉ gồm một loại bước sóng ánh sáng  $\lambda \pm \Delta\lambda$  (trong đó độ bán rộng  $\Delta\lambda$  rất hẹp so với  $\lambda$ ).

Dạng đơn giản nhất của kính lọc truyền qua phổ đơn sắc là hệ màng ba lớp, trong đó lớp trong suốt điện môi nằm giữa hai lớp kim loại bán thấu cùng bề dày. Khi chọn bề dày các lớp thích hợp thì kính lọc chỉ cho qua một phổ nhất định. Bề dày quang lớp điện môi là n.d được xác định từ độ nhảy pha tạo nên bởi chùm sáng phản xạ trên bề mặt kim loại và lớp điện môi.

Khi chùm tới vuông góc với màng thì chùm phản xạ qua lớp điện môi:

$$2nd = k \cdot \lambda \quad (13.21)$$

Bước sóng phổ truyền qua là:

$$\lambda = 2nd/k \quad (k \text{ là số tự nhiên}).$$

Nửa bán rộng của phổ truyền qua:

$$\Delta\lambda = \frac{(1-R)}{\pi k \sqrt{R}} \lambda \quad (13.22)$$

R - hệ số phản xạ của lớp kim loại.

Bề dày quang của lớp điện môi tăng lên, thì khoảng cách giữa các phổ truyền qua hẹp lại đồng thời nửa bán rộng cũng giảm theo.

Kính được mạ hệ màng bằng các lớp điện môi được ký hiệu:

$$\text{Glas} \mid (HL)^k (LH)^k \mid \text{air.} \quad (13.23)$$

Các lớp có chiết suất cao(H) xen lẫn các lớp chiết suất thấp (L).

Kính lọc càng nhiều lớp thì hệ số truyền qua càng lớn song khoảng cách giữa các phổ truyền qua càng nhỏ.

## Chương XIV

# QUANG SỢI

### 14.1. CẤU TẠO VÀ CÁC TÍNH CHẤT CỦA SỢI QUANG

Chi tiết quang có nhiều lần phản xạ toàn phần chùm sáng trên bề mặt ngăn cách với môi trường xung quanh gọi là thanh dẫn quang. Thanh dẫn quang có hai lớp: lớp vỏ chiết suất  $n_2$  và lớp lõi chiết suất  $n_1$ . Thanh dẫn quang đơn giản nhất là thanh hình trụ bằng thuỷ tinh, có hai mặt trước và sau là mặt phẳng nơi chùm sáng đi vào và đi ra khỏi thanh, mặt trụ là mặt phản xạ toàn phần (hình 14.1a). Thanh dẫn quang có mặt trước lớn hơn (hoặc nhỏ hơn) mặt sau ( $D_T >$  hoặc  $< D_S$ ) gọi là thanh dẫn quang hình côn (hình 14.1b). Thanh dẫn quang hình côn có chiều dài không lớn và chỉ được dùng dẫn sáng.

Thanh dẫn quang có chiều dài lớn hơn nhiều so với đường kính thì dễ dàng uốn cong (hình 14.1c). Một thanh dẫn quang với đường kính lớn truyền năng lượng chùm sáng từ mặt trước ra mặt sau có hệ số mất mát rất nhỏ, nhưng nó không truyền trực tiếp được hình ảnh. Nghĩa là ảnh ở mặt trước có các tiểu tiết rõ ràng, đậm nhạt khác nhau, nhưng ở mặt sau tất cả chỉ là một hình sáng đều đặn, chẳng có hình ảnh nào cả.

Thanh dẫn quang có đường kính rất nhỏ gọi là sợi quang. Các sợi quang hợp lại thành bó được gọi là cáp quang. Cáp quang có nhiều ưu điểm: Dễ cuộn tròn uốn cong, truyền năng lượng trực tiếp chùm sáng với hệ số mất mát nhỏ, truyền ảnh trực tiếp từ mặt trước sang mặt sau nếu các sợi được sắp xếp thứ tự tương thích giống nhau, truyền tín hiệu thông tin liên lạc hiện đại...

#### 14.1.1. Cấu tạo của sợi quang

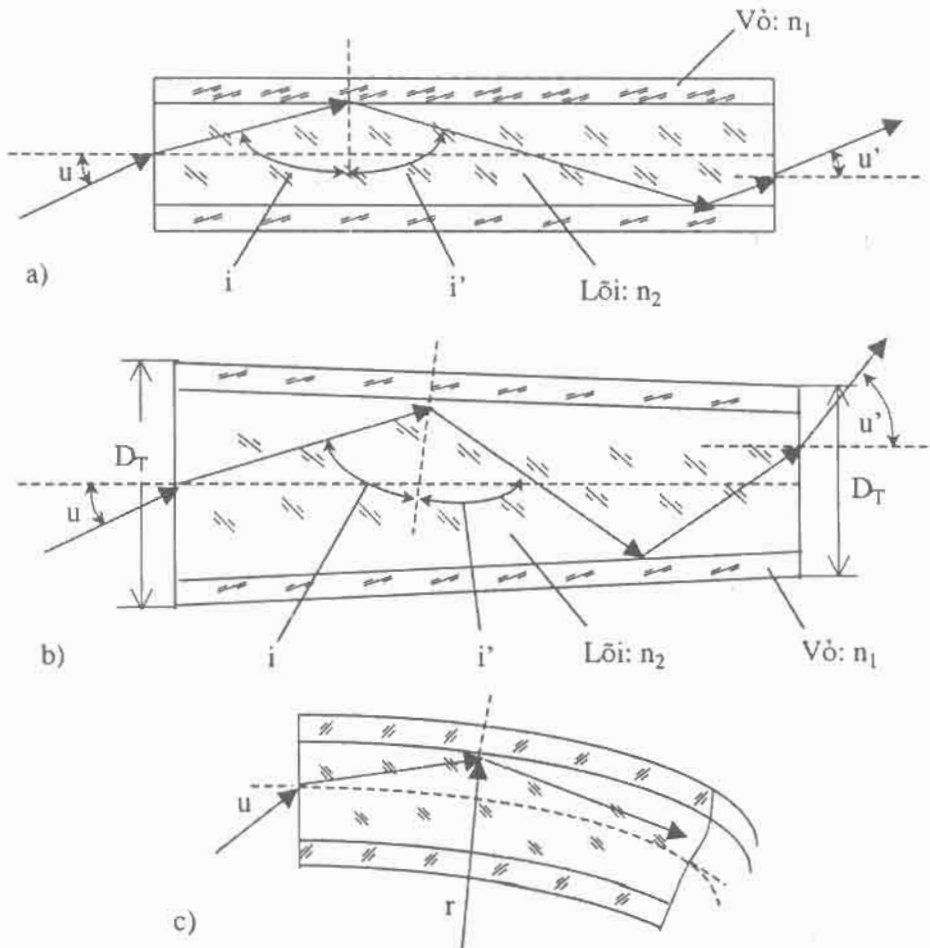
Sợi quang có hai lớp: Lớp lõi chiết quang  $n_1$ , đường kính  $d_1$ . Lớp vỏ chiết suất  $n_2$ , đường kính ngoài là  $D$ . Hai mặt trước và sau nói chung là mặt phẳng và vuông góc với trục sợi. Chùm sáng vào sợi quang qua mặt trước rồi phản xạ toàn phần nhiều lần trên bề mặt trụ giới hạn lõi và vỏ để tới mặt sau.

Hai điều kiện để có phản xạ toàn phần:

- Chiết suất lõi lớn hơn chiết suất vỏ:  $n_1 > n_2$ ;



- Tại các điểm tới trên mặt trụ, các tia sáng có góc tới lớn hơn hoặc bằng góc giới hạn:  $i_t \geq i_g$  (hình 14.1a).



**Hình 14.1.** a- Thanh dẫn quang hình trụ;  
 b- thanh dẫn quang hình côn; c- thanh dẫn quang bị uốn cong.

### 14.1.2. Khẩu độ số

Ngoài hai điều kiện trên, để có phản xạ toàn phần các tia sáng gặp mặt trước với góc tới  $u$ , phải nhỏ hơn góc giới hạn  $u$ ;  $n_0 \sin u = A$  được gọi là khẩu độ số mặt trước. Góc  $u$  được dẫn tìm từ điều kiện phản xạ toàn phần trên bề mặt trụ phản xạ. Nó phụ thuộc vào chiết suất lõi và vỏ vào kích thước và hình dáng của sợi (hình 14.1).

- Khi sợi quang hình trụ (hình 14.1a), khẩu độ số tại mặt trước và mặt sau giống nhau ( $\sin u = \sin u'$ ) và được xác định theo:

$$\sin u = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (14.1)$$

- Khẩu độ số của sợi quang dạng hình côn (hình 14.1b), khẩu độ số mặt trước khác nhau. Khi  $D_1 > D_2$  thì  $\sin u < \sin u'$ .

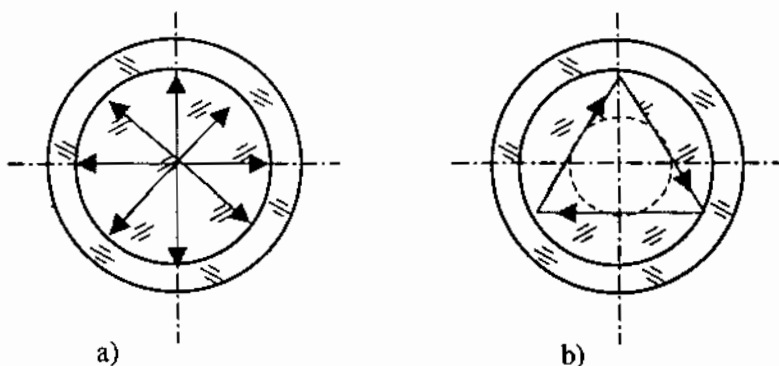
- Sợi quang hình trụ và bị uốn cong bán kính  $r$  (hình 14.1c), thì khẩu độ số được xác định theo:

$$\sin u = \sqrt{n_1^2 - n_2^2 \left(1 + \frac{d}{2r}\right)^2} \quad (14.2)$$

$d$  - đường kính lõi sợi quang;

$r \rightarrow \infty$  quan hệ (14.2) trở về quan hệ (14.1).

Các quan hệ (14.2) và quan hệ (14.1) là khẩu độ số xác định cho tia sáng nằm trên mặt chứa trục quang. Các tia sáng phản xạ trong sợi quang đều qua trục trụ (hình 14.2a). Các tia sáng không nằm trên mặt chứa trục quang thì khẩu độ số lớn hơn một chút so với khi tính theo quan hệ (14.1). Các tia sáng phản xạ trong sợi quang không qua trục trụ (hình 14.2a), chúng có xu hướng tiếp xúc với một mặt trụ có trục trụ trùng với trục sợi quang.



**Hình 14.2.** Phản xạ tia sáng trong sợi quang.

### 14.1.3. Hệ số cho qua ánh sáng của sợi quang

Hệ số cho qua phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau làm suy giảm quang năng ra khỏi mặt sau so với quang năng vào mặt trước. Có thể liệt kê các yếu tố đó như sau:

- Sự hấp thụ của thủy tinh lõi và vỏ.

- Do khuyết tật bụi bẩn và trạng thái bề mặt giữa lõi và vỏ.

- Kích thước sợi quang. Sợi quang càng dài hệ số hấp thụ càng lớn. Vỏ càng dày hệ số hấp thụ càng nhiều. Bề dày tốt nhất của vỏ từ 0,5  $\mu\text{m}$  đến 2  $\mu\text{m}$ . Mạ lớp phản xạ ngoài lõi (thay vỏ) không phải là biện pháp tốt để tăng hệ số cho qua của sợi quang vì hệ số phản xạ của các lớp này không bao giờ đạt được 100%. Khi mà ứng với 1 m chiều dài sợi quang có tới  $10^3 \div 10^4$  lần phản xạ thì lớp phản xạ này làm giảm hệ số truyền qua của sợi quang một cách đáng kể.

- Do khuyết tật bụi bẩn và trạng thái bề mặt của mặt trước và mặt sau sợi quang.

- Do lệch quỹ đạo quang học của các tia khác nhau truyền trong hệ quang. Hãy xét hai tia: tia truyền dọc theo trục sợi và tia tới với góc  $u$  (góc khẩu độ số sinu). Đây là hai tia có quang lộ ngắn nhất  $L_{\text{Min}}$  và dài nhất  $L_{\text{Max}}$  và thời gian truyền của hai tia đó cũng ngắn nhất  $t_{\text{Min}}$  và dài nhất  $t_{\text{Max}}$ . Do vậy dẫn đến độ lệch tín hiệu  $\Delta t$ :

$$\Delta t = t_{\text{Min}} - t_{\text{Max}} = \frac{(L_{\text{Max}} - L_{\text{Min}}) n_1}{c} \quad (14.3)$$

#### 14.1.4. Sự suy giảm năng lượng trong sợi quang

Cũng từ một số nguyên nhân kể trên, sự mất mát năng lượng do truyền qua  $\tau$  tính bằng dB/km và được xác định theo:

$$\tau_{\text{dB}} = 10 \log (P_2 / P_1)$$

Với  $P_1$  là công suất ở đầu vào và  $P_2$  công suất sau 1 km của tuyến truyền. Khoảng những năm 1970 sự tiêu hao công suất là 10 dB/km. Những năm sau 2000 sự mất mát đó còn lại 0,005 dB/km. Nhờ có tổn hao nhỏ như vậy mà các tín hiệu có đường truyền dài hàng trăm km.

#### 14.1.5. Các loại sợi quang

Hai loại sợi quang thông dụng:

- Sợi quang dẫn sáng. Khi vật liệu lõi và vỏ là thủy tinh quang học thì kích thước sợi nhỏ: lõi từ 5  $\mu\text{m}$  đến 10  $\mu\text{m}$ ; vỏ từ 0,5 đến 2  $\mu\text{m}$ . Sợi được sử dụng với ánh sáng có bước sóng  $\lambda = 400 \text{ nm}$  đến 2000 nm. Để sử dụng trong miền tử ngoại, sợi quang có lõi là thủy tinh thạch anh và vỏ là thủy tinh hữu cơ. Sợi quang có lõi bằng thủy tinh hữu cơ có kích thước lớn hơn (đến 250  $\mu\text{m}$ ), giá thành rẻ, dễ chế tạo, đặc biệt dễ chế tạo các mặt trước và sau sợi so với sợi bằng thủy tinh quang học. Khả năng truyền qua có giá trị cực đại ứng với một số bước sóng ánh sáng ( $\lambda = 900 \text{ nm}$  và 1000 nm) thích ứng khi sử dụng với diot

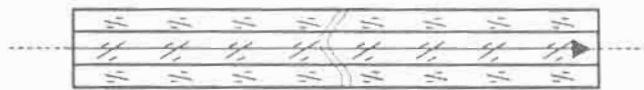
laser GaAs. Tuy vậy tuổi thọ của sợi bằng thủy tinh hữu cơ thấp, hệ số truyền qua giảm dần theo thời gian sử dụng.

- Sợi quang truyền dẫn thông tin. Vật liệu lõi và vỏ có thể là thủy tinh quang học hoặc thủy tinh hữu cơ. Kích thước lõi nhỏ nhất 5  $\mu\text{m}$  (lõi). Kích thước vỏ lớn nhất là 250  $\mu\text{m}$ .

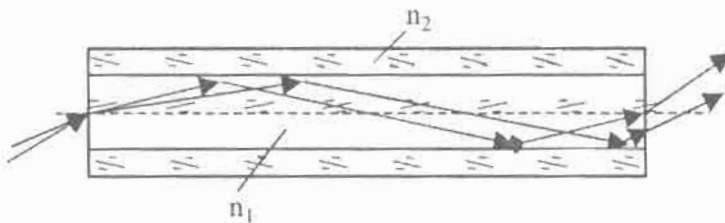
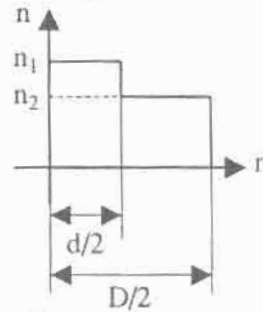
- Sợi đơn mode có lõi nhỏ và chiết suất bậc (hình 14.3a), chiết suất của lõi và vỏ không đổi theo chiều vuông góc với trục. Ánh sáng truyền dọc theo trục sợi. Sợi đơn mode sử dụng với bước sóng  $\lambda \geq \lambda_G$ . Quan hệ giữa kích thước lõi và bước sóng  $\lambda_G$  của sợi đơn mode được xác định theo:

$$\lambda_G = r \frac{2\pi}{2,405} \sqrt{n_1^2 - n_2^2} \quad (14.4)$$

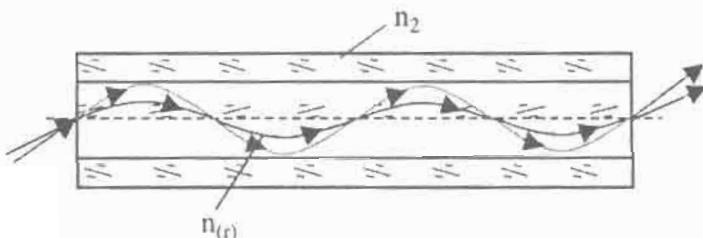
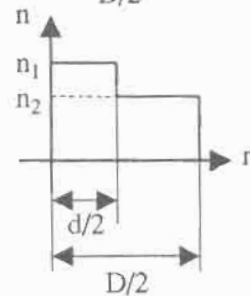
Giả sử sợi quang có  $n_1 = 1,463$ ;  $n_2 = 1,457$ ;  $r = 2\mu\text{m}$  thì sợi quang này chỉ là sợi đơn mode khi bước sóng sử dụng  $\lambda$  phải lớn hơn  $\lambda_G = 0,69 \mu\text{m}$ .



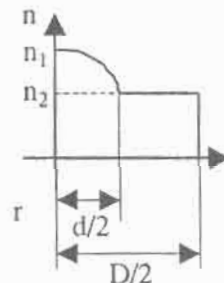
Hình 14.3a. Sợi quang đơn mode chiết suất bậc.



Hình 14.3b. Sợi đa mode chiết suất bậc.



Hình 14.3c. Sợi đa mode chiết suất biến đổi.



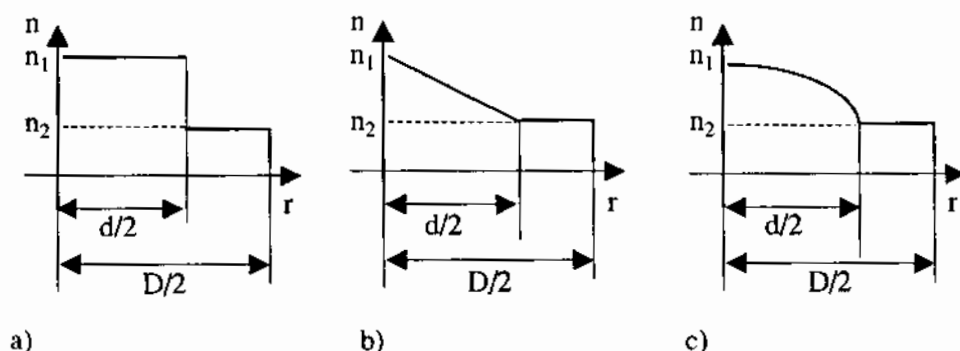
- Sợi đa mode có chiết suất bậc giống như sợi đơn mode nhưng kích thước vỏ và lõi lớn hơn (hình 14.3b). Do kích thước lõi lớn hơn so với bước sóng  $\lambda$  nên sợi truyền được nhiều mode. Số mode được truyền càng nhiều thì kích thước lõi càng lớn so với bước sóng  $\lambda$ .

- Sợi quang có chiết suất biến đổi (hình 14.3c). Chiết suất vỏ không đổi, trong khi lõi chiết suất  $n_r$  biến đổi giảm dần từ tâm lõi ( $n_r = n_1$ ) ra vỏ lõi ( $n_r = n_2$ ):

$$n_{r(\alpha)}^2 = n_1^2 [ 1 - 2\Delta(r/d)^\alpha ] \quad (14.5)$$

Ở đây  $\Delta = (n_1^2 - n_2^2) / 2n_1^2$ .

Hình 14.4 mô tả các trường hợp chiết suất biến đổi của lõi sợi quang có  $\alpha = 0; 1$  và  $2$ .



Hình 14.4. a- Khi  $\alpha = 0$ ; b- khi  $\alpha = 1$ ; c- khi  $\alpha = 2$ .

Các mode riêng rẽ (ứng với các góc tới ở mặt trước khác nhau thì có quãng đường hình học  $l$  khác nhau (truyền theo các dạng hình sin biên độ khác nhau) nhưng quang lộ  $L$  lại giống nhau (tích quãng đường hình học  $l$  và chiết suất  $n_r$  được gọi là quang lộ:  $L = n_r \cdot l$ ).

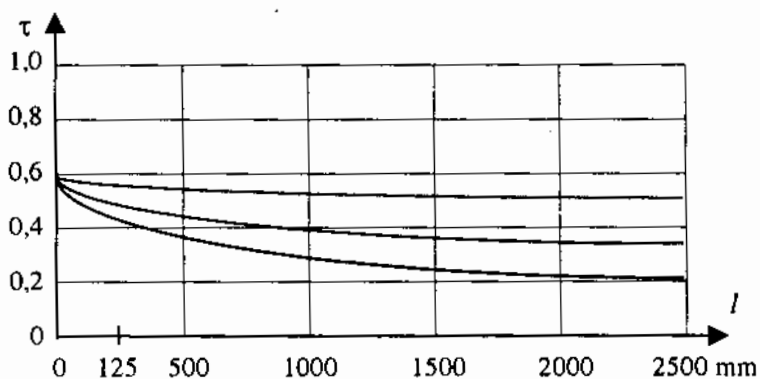
Truyền từ môi trường vào sợi quang, chùm laser có bán rộng của dải  $\Delta\lambda$  nên sau khi qua bề mặt trước bị tán sắc ánh sáng. Do vậy độ lệch thời gian  $\Delta t$  giữa hai tia ( $\lambda + \Delta\lambda$ ) và ( $\lambda - \Delta\lambda$ ) vào khoảng ns đến ps.

## 14.2. CÁC LOẠI CÁP QUANG

Nhiều sợi quang bện lại với nhau cáp quang. Tùy thuộc phạm vi sử dụng mà số lượng sợi trong một cáp có khác nhau. Nói chung cáp quang dẫn hình ảnh có số sợi nhiều nhất (tới  $10^5$  đến  $10^8$  sợi trên  $1 \text{ cm}^2$ ) rồi đến cáp dẫn sáng, cuối cùng là cáp quang thông tin.

### 14.2.1. Cáp quang dẫn sáng

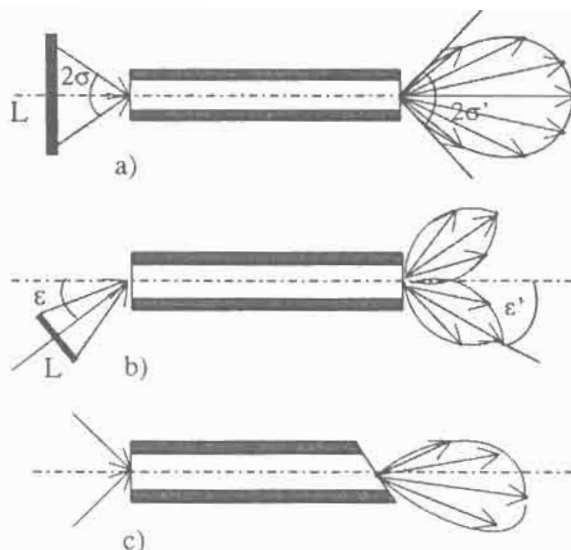
Cáp quang dẫn sáng gồm nhiều sợi quang tạo thành, khoảng  $10^3 \div 10^6$  sợi/cm<sup>2</sup>. Mặt trước và mặt sau cáp là mặt phẳng có độ nhám rất thấp để tăng hệ số truyền qua vào cáp. Hệ số truyền qua cáp quang không cao do nhiều yếu tố sau: Các sợi không sắp liền khít với nhau nên ở mặt trước có các khe hở. Quang năng bị tiêu tán khi ánh sáng vào các khe hở và vỏ sợi. Các tia này không được truyền qua cáp để đến mặt sau. Hệ số truyền qua  $\tau$  giảm nhiều theo chiều dài cáp, bởi vậy cáp dẫn sáng có chiều dài không lớn. Hiếm thấy cáp dẫn sáng có chiều dài quá 10 m. Quan hệ hệ số truyền qua  $\tau$  với chiều dài cáp ứng với các loại bước sóng ánh sáng của một loại cáp dẫn sáng thông dụng được mô tả ở đồ thị hình 14.5.



Hình 14.5. Đồ thị hệ số truyền qua phụ thuộc vào chiều dài cáp.

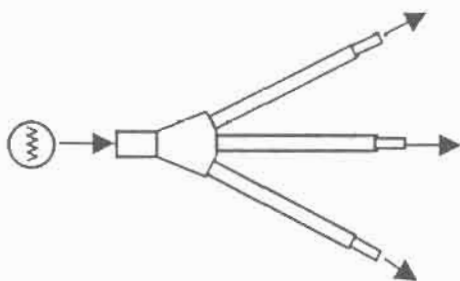
Cáp dẫn sáng dùng để chiếu sáng, ánh sáng từ nguồn rọi lên mặt trước của cáp. Cáp truyền ánh sáng sang mặt sau rồi qua cáp để chiếu sáng vật. Sự phân bố cường độ sáng ở mặt sau giảm dần khi góc khúc xạ  $\epsilon'$  tăng lên đối với nguồn thẳng chiếu sáng trong miền  $2\sigma$  tại mặt trước (hình 14.6a).

Hình 14.6b mô tả sự phân bố cường độ sáng theo các hướng ở mặt sau, khi mà mặt trước được chiếu sáng bởi nguồn đều L (nguồn Lambert) không vuông góc với trục trụ và góc chiếu sáng  $\sigma$  vẫn còn nhỏ hơn góc khẩu độ  $\sigma \leq u$ . Khác với hai trường hợp ở hình 14.6a và 14.6b, hình 14.6c mô phỏng sự phân bố cường độ sáng ở mặt sau khi nó không vuông góc với trục cáp dẫn sáng.



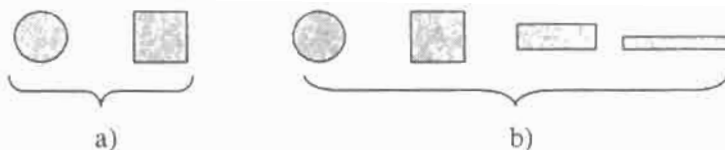
**Hình 14.6.** a- Phân bố cường độ sáng ở mặt sau khi chùm tới chiếu thẳng với góc tới  $\epsilon = 0$ ; b- phân bố cường độ sáng ở mặt sau khi chiếu nghiêng; c- phân bố cường độ sáng ở mặt sau khi chùm tới chiếu thẳng và mặt sau nằm nghiêng so với trục cáp dẫn sáng.

Số mặt trước và số mặt sau của cáp dẫn sáng cũng khác nhau: Cáp chỉ có một mặt trước và một mặt sau (hình 14.6). Cũng có cáp một mặt trước và nhiều mặt sau (hình 14.7). Cáp loại này dùng để dẫn chùm sáng từ một nguồn tới nhiều nơi cần được chiếu sáng khác nhau. Khi  $\alpha = 0$



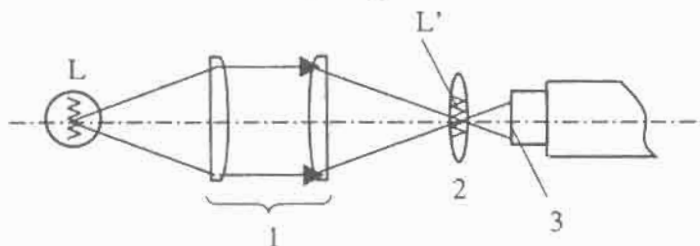
**Hình 14.7.** Cáp dẫn sáng có một mặt trước và ba mặt sau.

Hình dạng và kích thước các mặt trước và mặt sau cũng rất khác nhau: Mặt trước có thể là hình tròn, hình vuông (hình 14.8a), mặt sau có thể hình tròn, hình vuông, hình chữ nhật, hình chữ nhật mảnh chiếu sáng (hình 14.8b) phù hợp với hình dạng được chiếu sáng.



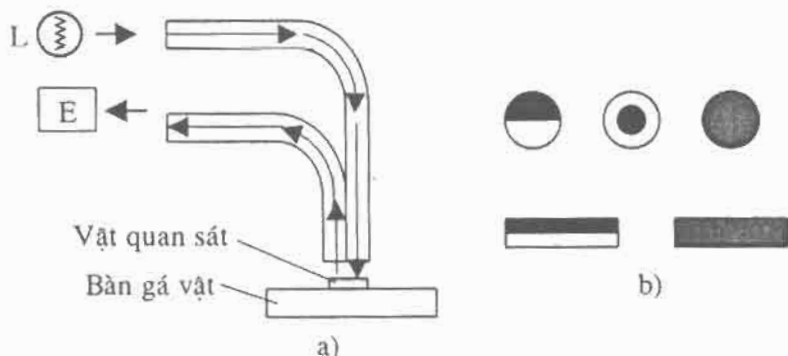
**Hình 14.8.** a- Hình dạng mặt trước; b- hình dạng mặt sau của cáp dẫn sáng.

Để chiếu đều mặt trước và tạo khoảng cách xa từ nguồn sáng tới mặt trước, cáp quang được lắp thêm một hệ chiếu sáng trong đó hai thấu kính tụ quang tạo ảnh thật của nguồn và một thấu kính hội tụ trùng với ảnh của nguồn sáng (hình 14.9).



**Hình 14.9.** Ghép hệ chiếu sáng với cáp dẫn sáng: L- nguồn sáng; 1- tụ quang; 2- thấu kính hội tụ; L'- ảnh nguồn sáng; 3- mặt trước cáp quang.

Cáp quang dẫn sáng còn được ghép liền với cáp quang dẫn ảnh. Mặt sau của cáp dẫn sáng hợp liền với mặt trước của cáp quang dẫn ảnh (hình 14.10a). Nhờ cáp dẫn sáng mà vật được rọi sáng tạo điều kiện mặt trước cáp dẫn ảnh nhận ảnh để truyền về mặt sau cáp. Tùy phụ thuộc vào phạm vi sử dụng mà mặt sau cáp dẫn sáng và mặt trước cáp dẫn quang được ghép phân đôi, ghép lồng nhau hoặc ghép pha trộn với nhau (hình 14.10b).



**Hình 14.10.** a- Ghép cáp dẫn sáng với cáp dẫn ảnh; b- các dạng ghép mặt sau cáp dẫn sáng với mặt trước cáp dẫn ảnh.

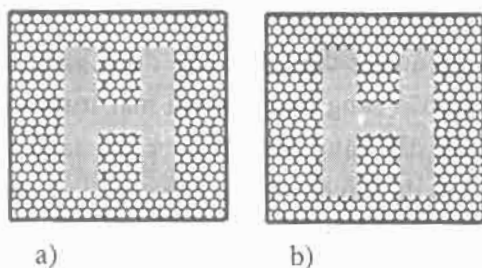


### 14.2.2. Cáp dẫn hình

Hình ảnh được truyền trực tiếp từ mặt trước cáp sang mặt sau cáp với tỉ lệ tạo ảnh là một. Mặt trước và mặt sau cáp là các mặt phẳng hình vuông, kích thước từ  $4 \times 4 \text{ mm}^2$  đến  $20 \times 20 \text{ mm}^2$ . Các mặt được mài và đánh bóng để có độ nhám rất thấp. Các cáp dẫn ảnh (hình 14.11) mô tả truyền ảnh H do hệ quang tạo lên ở bề mặt trước M được truyền sang mặt sau M'. Mỗi sợi quang đơn lẻ truyền một phần tử ảnh đúng bằng tiết diện mặt trước của nó. Các sợi quang của cáp phải được sắp xếp tương thích với nhau sao cho vị trí mỗi sợi ở mặt trước cáp phải hoàn toàn giống vị trí của sợi đó ở mặt sau cáp.

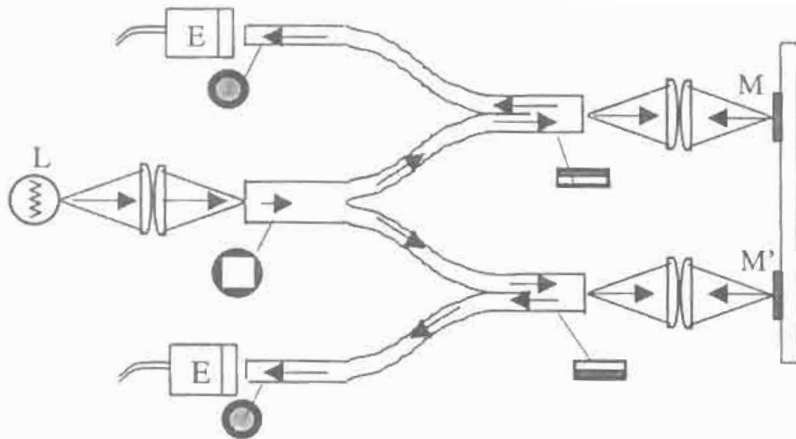
Thông thường ở biên ảnh của mặt sau cáp cường độ sáng bị giảm dần đi (hình 14.11b) mà không rõ nét như ảnh thực ở mặt trước cáp (hình 14.11a). Có thể giải thích hiện tượng này như sau: Tiết diện mặt trước của sợi quang nào được phủ đầy phần tử ảnh thì ở mặt sau nó phần tử ảnh đó có độ sáng tương thích. Tiết diện mặt trước nào không được phủ hết (phần tử ảnh nhỏ hơn) thì ở mặt sau nó phần tử ảnh đó có độ sáng yếu hơn. Do vậy hình ảnh ở mặt sau cáp nhòe đi không rõ nét như vật ở mặt trước.

**Hình 14.11.** Hình ảnh ở hai mặt trước và mặt sau của cáp dẫn hình.



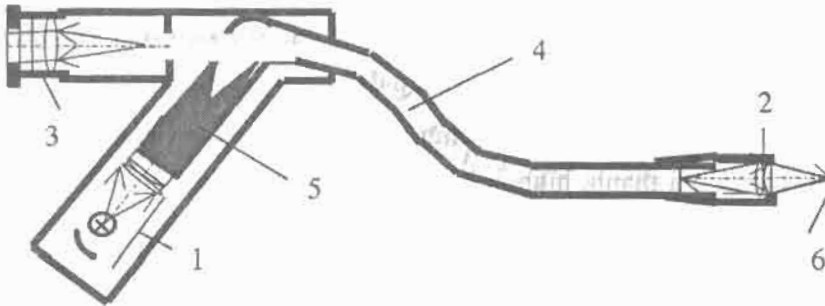
Chất lượng ảnh sáng mặt sau cáp tốt hay chưa tốt phụ thuộc trực tiếp vào: Số sợi của cáp trên một đơn vị diện tích tiết diện mặt trước. Số sợi càng nhiều (sợi càng nhỏ và các sợi càng nằm sát nhau) thì khả năng phân giải của cáp càng lớn, ảnh tạo nên có chất lượng càng cao. Khả năng phân giải giới hạn của cáp quang thông thường là 15 vạch/mm. Khả năng phân giải giới hạn của cáp quang từ 50 đến 70 vạch/mm, tương ứng với khả năng phân giải của phim ảnh có chất lượng tốt nhất.

Cáp quang dẫn ảnh được ứng dụng rất rộng rãi và có tính kỹ thuật cao. Thiết bị đo hai kênh (hình 14.12) sử dụng các cáp dẫn sáng và dẫn ảnh. Nguồn sáng L được hai cáp dẫn sáng để rọi sáng hai đối tượng đo M và M'. Hai đối tượng đo này được hai cáp dẫn ảnh truyền lên hai cảm quang  $E_1$  và  $E_2$ .



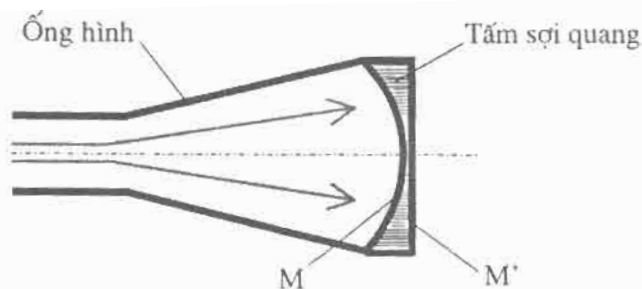
**Hình 14.12.** Thiết bị đo hai kênh sử dụng các cáp dẫn sáng và dẫn ảnh.

Ngành y đã áp dụng kỹ thuật cáp quang dẫn hình rất hữu hiệu. Thiết bị Endoskop (hình 14.13), thiết bị nội soi... là các thiết bị hiện đại có cáp quang dẫn hình.



**Hình 14.13.** Thiết bị nội soi:  
 1- hệ chiếu sáng; 2- vật kính; 3- thị kính;  
 4- cáp dẫn hình; 5- cáp dẫn sáng; 6- vật quan sát.

Một ứng dụng khác của cáp quang dẫn hình là tạo mặt ảnh phẳng của các ống hình (hình 14.14). Tấm sợi quang có mặt trước M là mặt cong và mặt sau A' là mặt phẳng. Hình ảnh do hệ quang tạo nên có quang sai cong mặt ảnh hiện rõ nét trên mặt M. Tấm sợi quang truyền trực tiếp hình ảnh từ M sang mặt ảnh phẳng M'.



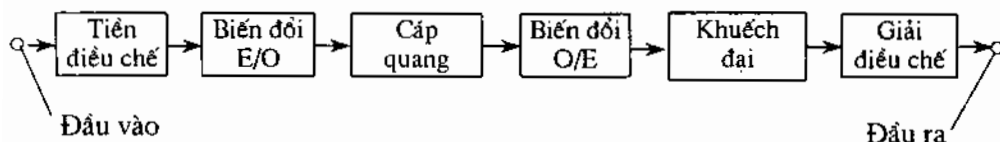
Hình 14.14. Mặt ảnh phẳng ống hình.

### 14.2.3. Cáp thông tin

Cáp quang thông tin gồm các sợi quang đơn mode hoặc đa mode có chiết suất bậc hay chiết suất biến đổi. Sợi quang đơn mode có kích thước nhỏ  $d = 5 \div 10 \mu\text{m}$  và  $D = 125 \div 250 \mu\text{m}$ . Sợi quang đơn mode có chiết suất bậc còn sợi đa mode có cả hai loại: chiết suất bậc hoặc chiết suất thay đổi. Thông tin quang không sử dụng các sợi quang đơn lẻ mà ghép chúng lại với nhau thành từng bó gọi là cáp. Khi số lượng sợi nhiều, các sợi được bó theo các bó nhỏ để dễ phân biệt và sử dụng. Ngoài các sợi quang, cáp quang còn có các sợi kim loại gia cường đảm bảo độ bền cho cáp khi vận chuyển và lắp đặt.

Hình 14.15 mô tả nguyên lý chung một hệ thống tin cáp quang. Các tín hiệu đầu vào là âm thanh, hình ảnh, kí tự, màu sắc... Các tín hiệu này được bộ tiền điều chế chuyển thành các tín hiệu số hoặc các tín hiệu tương tự dưới tín hiệu điện. Bộ chuyển đổi E/O chuyển các tín hiệu điện thành các tín hiệu quang. Cáp quang truyền các tín hiệu quang được tải theo bước sóng laser từ mặt đầu sang mặt sau của cáp. Bộ chuyển đổi O/E chuyển các tín hiệu quang thành tín hiệu điện. Qua bộ khuếch đại các tín hiệu điện vừa được sửa chữa vừa được khuếch đại lên. Bộ điều chế giải mã tín hiệu điện dưới dạng số hoặc tương tự thành các tín hiệu âm thanh, hình ảnh, kí tự, màu sắc...

Tín hiệu qua cáp quang thường bị méo và suy giảm. Hiện tượng này càng xấu đi khi chiều dài của cáp quang càng tăng lên. Nguyên nhân chủ yếu do hệ số hấp thụ của vật liệu sợi quang, thời gian truyền tín hiệu của các tia với các góc tới khác nhau là không giống nhau...



**Hình 14.15.** Hệ thống thông tin cáp quang.

Bởi vậy, sau những khoảng cách nhất định, phải có các trạm lặp trung gian. Các trạm lặp này nhận tín hiệu quang chuyển thành tín hiệu điện. Sau khi sửa chữa tín hiệu điện và bổ sung năng lượng, các tín hiệu lại được chuyển về tín hiệu quang rồi được truyền tiếp theo đường cáp quang. Ngày nay, nhiều hệ thống cáp quang đã sử dụng bộ lặp thuận tuý sửa trực tiếp tín hiệu quang mà không thông qua chuyển đổi từ quang sang điện rồi lại trở về tín hiệu quang nữa.

#### • Các loại hệ truyền tin cáp quang

Hệ cáp quang nội hạt được sử dụng cho một cụm dân cư quận huyện. số sợi quang trong cáp thường là 4000 sợi, đủ cho 2000 máy thuê bao. Hệ cáp quang nội hạt không cần trạm lặp.

Cáp quang trung kế sử dụng giữa các tổng đài. Các loại cáp quang này được dùng truyền tín hiệu tương tự. Lượng thông tin truyền qua vào khoảng 32; 34; 45 MB/s. Tùy thuộc vào các hãng sản xuất mà cáp quang trung kế được sử dụng với số lượng sợi trong cáp khác nhau: 144sợi (Mỹ); 70 sợi (Pháp); 24 sợi (Nhật).

Cáp quang đường dài. Cáp loại này cần có trạm lặp, các trạm lặp phải cách xa nhau tới 100km; phải truyền được băng truyền rộng; phải có dung lượng truyền lớn (tới GB/s); kích thước nhỏ gọn và giá thành lắp đặt thấp; phải chống tốt các loại: xuyên âm; thấm nước; chống sét. Cáp được dùng với bước sóng laser  $\lambda = 1300 \text{ nm}$  và  $1550 \text{ nm}$ . Mỗi cáp thường gồm từ 6 đến 12 sợi.

Cáp đường biển cần được bảo vệ tốt đặc biệt chống ăn mòn của muối và nước biển, chịu áp suất cao (tới 80 MPa trong vòng 25 năm) và có khoảng cách giữa các trạm lặp dài vì cáp được đặt sâu dưới đáy biển. Cáp cũng được dùng với bước sóng laser  $\lambda = 1300 \text{ nm}$  và  $1550 \text{ nm}$ .

### 14.3. PHƯƠNG PHÁP CHẾ TẠO SỢI QUANG

#### Những yêu cầu kĩ thuật sợi quang

Sợi quang được chế tạo với những yêu cầu khắt khe như sau:

- Đường kính vỏ và lõi của sợi rất nhỏ. Các sợi quang truyền ảnh trực tiếp có  $d < 5 \mu\text{m}$ . Sợi đơn mode dẫn tín hiệu có  $d = 5 \div 10 \mu\text{m}$  và  $D = 50 \div 120 \mu\text{m}$ .

- Dung sai đường kính và độ tròn rất nhỏ: Sợi đơn mode  $d = 10 \mu\text{m} \pm 1,3 \mu\text{m}$ ;  $D = 125 \mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$ . Sợi đa mode với lõi  $d = 50 \mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$ ; độ tròn  $< 2,5 \mu\text{m}$  và với vỏ  $D = 125 \mu\text{m} \pm 3 \mu\text{m}$  độ tròn  $< 3 \mu\text{m}$ .

- Đồng đều cao về chiết suất  $n_1$ ;  $n_2$  hoặc  $n_1 = f(r)$ .

- Độ tinh khiết cao của vật liệu vỏ và lõi cũng như bề mặt tiếp xúc giữa vỏ và lõi không bẩn bụi và độ nhám thấp.

Để chế tạo sợi quang, ngày nay thường thực hiện một số công đoạn sau: chế tạo phôi, kéo sợi quang, bọc lớp bảo vệ và bọc cáp quang.

### 14.3.1. Phương pháp chế tạo phôi

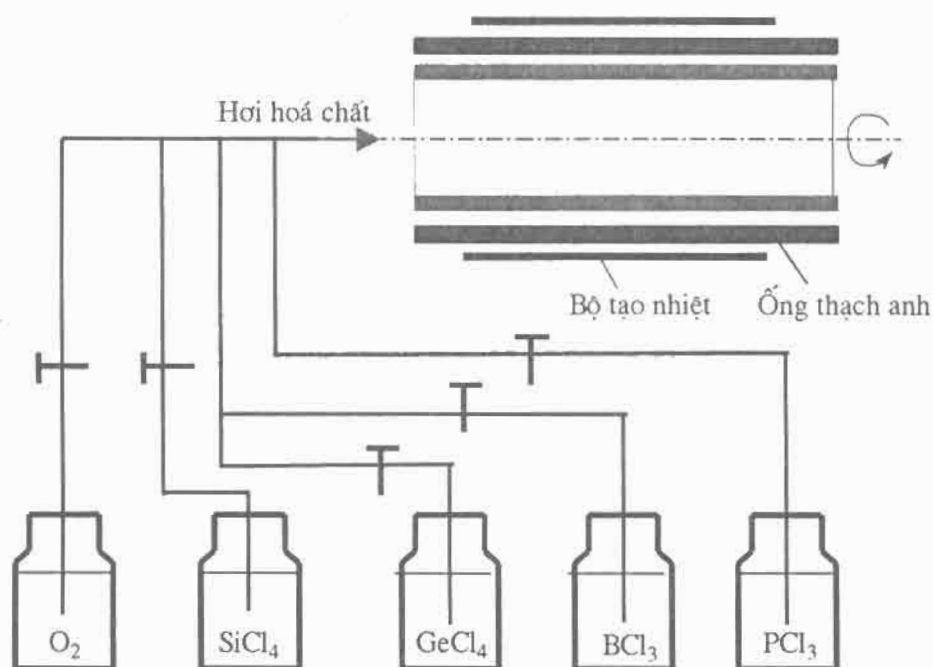
Có nhiều phương pháp chế tạo phôi cho vỏ và lõi sợi quang: Phương pháp lồng hai ống phôi của lõi và vỏ vào với nhau; lồng trực đặc cho phôi lõi vào ống phôi cho vỏ; phương pháp đọng hơi hoá chất... Ngày nay phương pháp đọng hơi hoá chất được dùng ưu việt hơn cả.

#### • Phương pháp đọng hơi hoá chất CVD (Chemical Vapour Deposition)

Một ống thủy tinh thạch anh (hình 14.16) đường kính trong  $D_T$  quay tròn quang trục ống và được cung cấp nhiệt bằng bộ cộng hưởng từ. Nhiệt độ trong ống lên tới  $1500^{\circ}\text{C} \div 1600^{\circ}\text{C}$ . Nguyên liệu làm vỏ sợi được hoá hơi và bơm vào ống. Do tác dụng nhiệt, các thành phần phôi liệu thực hiện các phản ứng hoá học với nhau. Oxyt silic hình thành ngưng đọng liên tục bám vào thành trong ống thạch anh. Quá trình đọng hơi dừng lại đến khi một ống thứ hai lồng trong ống thạch anh có kích thước đạt yêu cầu: Đường kính ngoài  $D_T$  và đường kính trong  $d_T$ . Như vậy ta đã tạo được phôi của vỏ sợi quang. Tiếp tục bơm hơi nguyên liệu làm lõi sợi vào ống. Cũng do tác dụng nhiệt, các thành phần phôi liệu thực hiện các phản ứng hoá học với nhau. Các thành phần vật liệu lõi:  $\text{SiO}_2$ ;  $\text{GeO}_2$ ;  $\text{P}_2\text{O}_5$  ... bám vào thành trong ống. Khi thay đổi tỷ lệ thành phần phôi liệu cho lõi ta sẽ được lõi có chiết suất cố định (Stepped Index-  $n = \text{const}$ ) hoặc chiết suất thay đổi (Graded Index -  $n = f(r)$ ). Quá trình tạo phôi lõi kết thúc khi ống thứ ba có kích thước đạt yêu cầu: Đường kính ngoài  $D_T$ ; đường kính trong  $d_T$  và đường kính trong cùng  $d_i$ . Một ống kép ba lớp đã hình thành: ống thứ nhất bằng thủy tinh thạch anh, ống thứ hai làm vỏ và ống trong cùng làm lõi. Cung cấp nhiệt tiếp cho ống ba lớp trong khi ống vẫn quay tròn liên tục song tốc độ chậm

hơn. Ống giữa và trong cùng mềm ra co dần lại tách khỏi bề mặt trong ống thứ nhất. Các kích thước  $D_T$ ;  $d_T$  và  $d_i$  nhỏ dần lại đến khi nào  $d_i = 0$  thì dừng lại. Một thanh trụ của phôi sợi quang đã hình thành. Phôi liệu chính dùng chế tạo vỏ và lõi là  $\text{SiCl}_4$ ,  $\text{GeCl}_4$ ,  $\text{PCl}_3$ ,  $\text{BBr}_3$ ...

Các phản ứng hoá học xảy ra trong quá trình tạo phôi:

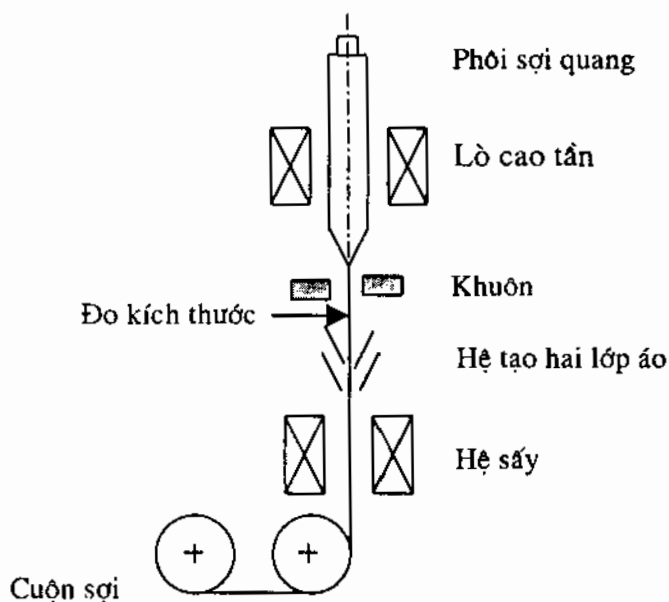


Hình 14.16. Sơ đồ nguyên lý tạo phôi dạng hơi hoá chất CVD.

### 14.3.2. Phương pháp kéo tạo sợi quang

Phôi được nung mềm nhờ nhiệt từ lò cao tần (hình 14.17). Sợi được kéo từ phôi mềm qua lỗ khuôn để được đường kính ngoài của vỏ. Thông qua hệ kiểm tra hiệu chỉnh tốc độ kéo và nhiệt độ của phôi để đạt được kích thước mong muốn. Kế tiếp sợi được phủ lớp áo bảo vệ. Tùy từng loại sợi quang mà sợi được

phủ một hay hai lớp áo khác nhau. Bộ phận sấy khô đảm bảo cho lớp áo bền vững. Sợi được cuộn lại để chuyển sang khâu bện cáp.



**Hình 14.17.** Sơ đồ nguyên lý kéo sợi quang.

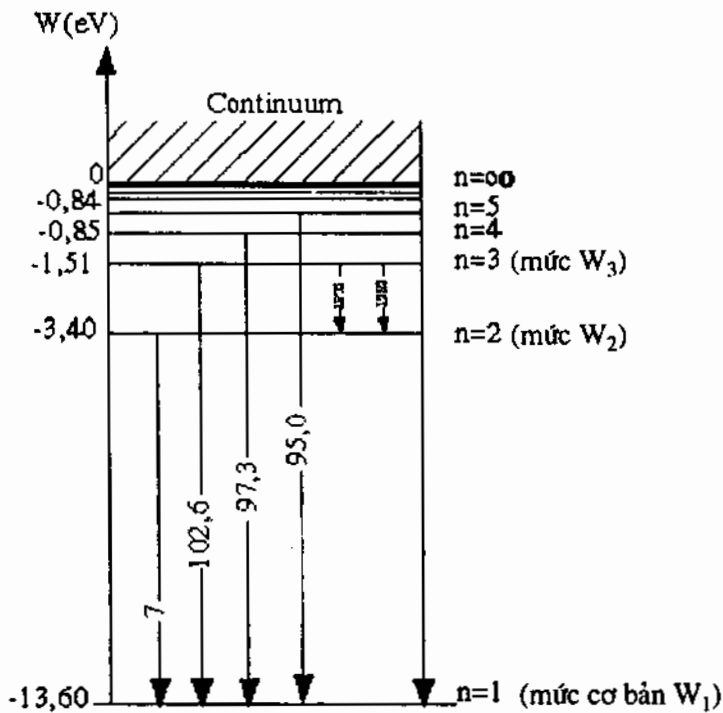
## Chương XV

# LASER VÀ ỨNG DỤNG

### 15.1. MỘT SỐ KHÁI NIỆM

#### 15.1.1. Sự hấp thụ và bức xạ tự động

Môi trường vật chất được cấu tạo bởi một hệ thống nguyên tử và phân tử xác định. Ở trạng thái bình thường, các nguyên tử và phân tử có một mức năng lượng cơ bản nhất định  $W_1$ . Các nguyên phân tử lại có thể chuyển dịch tới các mức năng lượng cao hơn  $W_2, W_3, W_4...$  khi chúng được tiếp nhận thêm năng lượng. Hình 15.1 mô phỏng mức năng lượng cơ bản và các mức năng lượng kích thích của nguyên tử hydro có một điện tử.



Hình 15.1. Các mức năng lượng của hydro.



Để tới mức năng lượng  $W_2$  từ mức năng lượng cơ bản  $W_1$ , nguyên tử hấp thụ một năng lượng kích thích :  $\Delta W = W_2 - W_1$ .

Khi năng lượng kích thích bởi quang năng thì mỗi nguyên tử ở mức  $W_1$  chuyển dịch lên  $W_2$  đã hấp thụ năng lượng của một photon ánh sáng (hình 15.2b):

$$\Delta W = W_2 - W_1 = h.f = hc/\lambda \quad (15.1)$$

Trong đó: h- hằng số Plăng,  $h = 6,6252 \cdot 10^{-34} \text{ Ws}^2$ ;

c- vận tốc truyền của photon trong không gian;

$$c = 2,99792 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1};$$

f- tần số dao động của photon;

$\lambda$ - bước sóng ánh sáng.

Sự chuyển dịch từ trạng thái  $W_1$  lên  $W_2$  gọi là **quá trình hấp thụ**.

Giả sử một nguyên tử hấp thụ một photon bước sóng  $\lambda = 633 \text{ nm}$  chuyển dịch từ mức cơ bản lên mức kích thích  $W_2$ . Năng lượng mà nguyên tử này đã hấp thụ được xác định theo:

$$\Delta W = \frac{h.c}{\lambda} = \frac{6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 300 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}}{633 \cdot 10^{-9} \text{ m}} = 314 \cdot 10^{-21} \text{ J}$$

$$\text{Hay: } \Delta W = \frac{314 \cdot 10^{-21} \text{ J}}{160 \cdot 10^{-21} \text{ J eV}^{-1}} = 1,96 \text{ eV}$$

$$(1 \text{ eV} = 160 \cdot 10^{-21} \text{ J})$$

Các nguyên tử lưu lại ở trạng thái kích thích không lâu (không quá 10 ns), chúng tự động trở về các mức năng lượng cơ bản  $W_1$ . Mỗi nguyên tử chuyển dịch như vậy đã giải thoát năng lượng một photon ánh sáng (hình 15.2a).

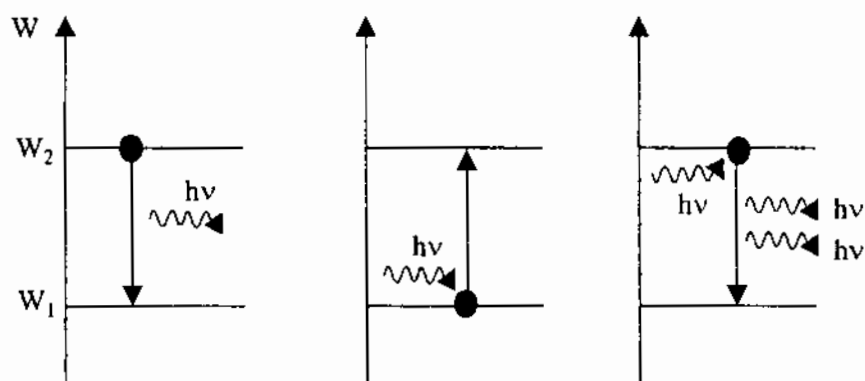
Sự chuyển dịch từ trạng thái  $W_2$  xuống  $W_1$  của các nguyên tử bức xạ photon theo cơ chế này được gọi là hiệu ứng **bức xạ tự động**.

Thí dụ, qua bức xạ tự động, nguyên tử hydro chuyển dịch từ trạng thái kích thích  $W_2$  về trạng thái cơ bản  $W_1$  bức xạ một photon ánh sáng có bước sóng  $\lambda$  được xác định theo:

Nguyên tử ở trạng thái cơ bản có năng lượng là  $W_1 = -13,6 \text{ eV}$ , ở trạng thái kích thích đầu tiên có năng lượng là  $W_2 = -3,40 \text{ eV}$ . Năng lượng chuyển dịch nguyên tử từ  $W_2$  về  $W_1$  sẽ là 10,2 eV.

Bước sóng của photon được bức xạ là:

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\Delta W} = \frac{633 \cdot 10^{-36} \text{ Js} \cdot 300 \cdot 10^6 \text{ ms}^{-1}}{10,2 \text{ eV} \cdot 160 \cdot 10^{-21} \text{ JeV}^{-1}} = 121 \text{ nm}$$



**Hình 15.2.** a- Bức xạ tự động; b- quá trình hấp thụ; c- bức xạ cưỡng bức.

### 15.1.2. Bức xạ cưỡng bức

Tại mức năng lượng kích thích  $W_2$ , các nguyên tử cũng hấp thụ photon có năng lượng bằng  $\Delta W = W_2 - W_1$ . Khi chuyển dịch về mức năng lượng cơ bản  $W_1$ , chúng bức xạ ngoài các photon hấp thụ từ mức  $W_1$  (bức xạ tự phát) còn bức xạ photon đã hấp thụ tại mức kích thích  $W_2$ . Các photon bức xạ theo cơ chế này có cùng tần số và cùng pha. Sự chuyển dịch từ trạng thái  $W_2$  xuống  $W_1$  của các nguyên tử bức xạ photon theo cơ chế này được gọi là hiệu ứng **bức xạ cưỡng bức**. Cùng vật chất, số lượng photon bức xạ cưỡng bức lớn hơn rất nhiều số lượng photon bức xạ tự phát. Cơ chế bức xạ laser (viết tắt bởi cụm từ tiếng Anh: **L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) là cơ chế bức xạ cưỡng bức các photon ánh sáng.

### 15.1.3. Điều kiện cần để bức xạ laser

Bức xạ laser hình thành nhờ sự chuyển dời cưỡng bức giữa các mức năng lượng xác định gọi là các mức laser của các tâm hoạt chất. Các hoạt chất có thể là ion, nguyên tử và phân tử. Vật chất khác nhau có các mức laser khác nhau nghĩa là các tâm hoạt chất khác nhau.

Vật chất ở dạng khí, dạng lỏng và rắn đều có số rất lớn tâm hoạt chất. Khi được kích thích bởi quang năng, hai quá trình: hấp thụ và bức xạ cưỡng bức xảy ra mạnh yếu khác nhau. Nếu số tâm hoạt chất ở mức laser trên nhiều hơn số tâm hoạt chất ở mức laser dưới [(độ tích lũy tâm hoạt chất  $n_2 > n_1$  (số tâm hoạt chất/m<sup>3</sup>))] thì

quá trình bức xạ tự phát vượt qua quá trình hấp thụ. Ngược lại, nếu số tâm hoạt chất ở mức laser dưới nhiều hơn số tâm hoạt chất ở mức laser trên (độ tích lũy tâm hoạt chất  $n_2 < n_1$ ) thì quá trình hấp thụ vượt qua quá trình bức xạ cưỡng bức.

Đại lượng  $N = n_2 - n_1(k_2/k_1)$  được gọi là độ đảo mật độ tích lũy của các mức laser. Ở đây  $k_2$  và  $k_1$  trọng số mật độ thống kê ở các mức laser trên và dưới. Chỉ khi nào  $N > 0$  thì môi trường hoạt chất mới có nghịch đảo độ tích lũy và mới diễn ra bức xạ laser. Nói cách khác sự nghịch đảo độ tích lũy là điều kiện cần thiết để có bức xạ laser.

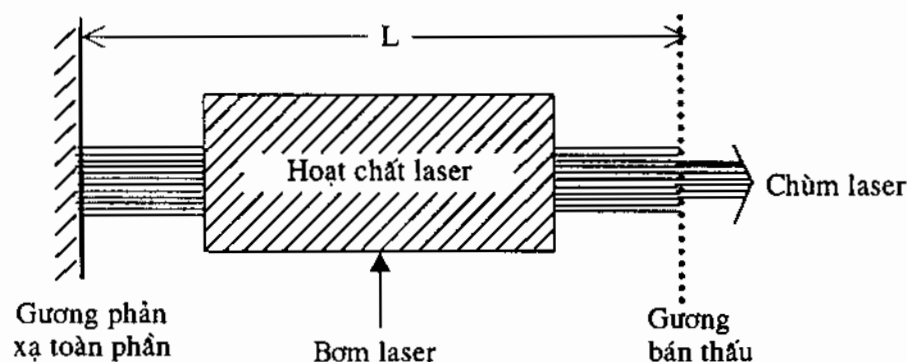
Để có sự nghịch đảo độ tích lũy trong môi trường hoạt chất, ta phải kích thích môi trường hoạt chất bằng các loại “bơm laser” khác nhau. Chúng cung cấp năng lượng dưới dạng quang năng, chùm nguyên tử, chùm điện tử hoặc là các phản ứng hoá học...

#### 15.1.4. Nguyên lý cấu tạo một hệ laser

Hình 7.3 mô tả nguyên tắc chung cấu tạo một hệ laser gồm ba phần chính: Môi trường hoạt chất (hoạt chất laser), buồng cộng hưởng và bơm laser.

##### a. Môi trường hoạt chất

Môi trường chất khí (để có laser khí), chất lỏng (để có laser chất lỏng), chất rắn (để có laser rắn), chất bán dẫn (để có laser bán dẫn). Các môi trường hoạt chất khác nhau sẽ có các mức laser trên và mức laser dưới khác nhau cũng như độ khác biệt giữa các mức năng lượng laser bởi vậy mà tạo ra được các loại bước sóng laser, công suất laser khác nhau.



Hình 15.3. Cấu tạo chung một hệ laser.

## b. Bộ cộng hưởng laser

Có hai tác dụng chính để khuếch đại bức xạ laser. Một là tăng khoảng hành trình các photon, làm tăng thêm gấp nhiều lần hấp thụ và bức xạ cưỡng bức. Hai là nhốt lại nhiều photon đã được bức xạ, từ đó càng nhiều photon tham gia tiếp tục hai quá trình hấp thụ và bức xạ cưỡng bức. Do vậy, khi ra khỏi bộ cộng hưởng số lượng photon bức xạ tăng lên gấp bội, tạo chùm laser có công suất lớn (hình 15.3 và hình 15.4).

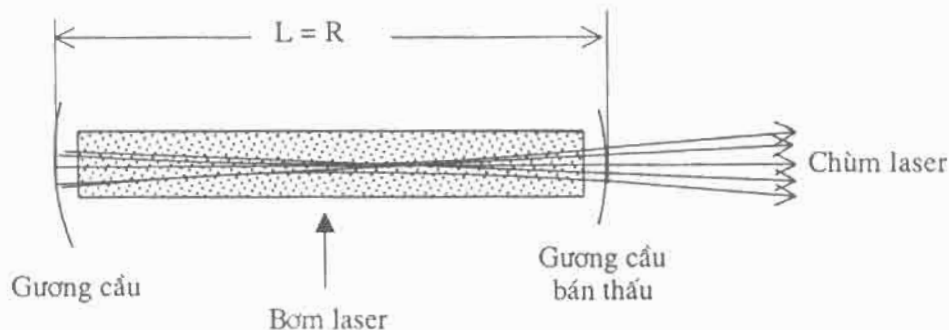
Nguyên tắc cấu tạo chung của bộ cộng hưởng gồm hệ gương phẳng hoặc hệ gương cầu trong đó có một gương bán thấu.

Bộ cộng hưởng là hệ gương phẳng có khoảng cách hai gương là  $L$  được xác định thoả mãn với bước sóng laser bức xạ sao cho:

$$L = \frac{m\lambda}{2n} \quad (15.2)$$

Trong đó:  $m$  là số tự nhiên;  $\lambda$  là bước sóng laser;  $n$  chiết suất môi trường hoạt chất.

Bộ cộng hưởng gồm hai gương cầu lõm bán kính cong  $R$  giống nhau (một phản xạ hoàn toàn và một là gương bán thấu). Chúng được ghép lại sao cho khoảng cách hai đỉnh gương  $L$  bằng bán kính gương cầu  $R$ . Tiêu điểm hai gương trùng nhau và nằm giữa hai gương (hình 15.4).



**Hình 15.4.** Bộ cộng hưởng gồm hai gương cầu lõm.

Công suất laser bức xạ phụ thuộc vào nhiều yếu tố khác nhau trong đó có chiều dài bộ cộng hưởng  $L$  - khoảng hành trình các photon bức xạ. Khoảng hành trình càng dài thì khả năng sản sinh bức xạ cưỡng bức càng lớn. Nhờ hệ số phản xạ cao của hai gương, chùm laser hành trình qua lại nhiều lần trong bộ cộng hưởng để lượng photon bức xạ cưỡng bức tăng lên gấp bội (hình 15.4).

### c. Bơm laser

Bơm có nhiệm vụ cung cấp năng lượng cho hoạt chất laser và gọi là bơm hay bơm laser.

Cơ chế khác nhau của các loại bơm:

- Bơm quang học: Năng lượng cung cấp là quang năng với chùm sáng có tần số dao động giống tần số dao động của photon mà các tâm hoạt chất laser hấp thụ để chuyển lên mức laser trên. Ánh sáng dùng làm bơm quang có thể là kết hợp hay không kết hợp. Nguồn sáng tạo chùm không kết hợp có thể là: đèn flash, đèn hồ quang... Nguồn sáng tạo chùm kết hợp là các loại laser khác được coi là bộ biến đổi hoặc khuếch đại tần số.

- Bơm điện tử: Năng lượng cung cấp để các tâm hoạt chất chuyển dịch lên mức năng lượng laser trên nhờ va chạm không đàn hồi giữa các tâm hoạt chất với các điện tử tự do có năng lượng lớn từ bơm cung cấp.

- Bơm kích hoạt bởi các nguyên tử và phân tử: Các tâm hoạt chất chuyển dịch lên mức laser trên nhờ va chạm không đàn hồi giữa chúng với các nguyên phân tử cùng chứa trong môi trường laser. Như vậy, môi trường hoạt chất có hai thành phần: Các tâm hoạt chất bức xạ laser (kí hiệu là A) và các nguyên phân tử kích hoạt chuyển tiếp (kí hiệu là B). Nguyên phân tử kích hoạt chuyển tiếp không trực tiếp bức xạ laser mà truyền năng lượng cho các tâm hạt chất A để thực hiện sự đảo mật độ tích lũy.

Các laser khí He-Ne và CO<sub>2</sub> được kích hoạt theo loại này. Phân tử He nhận năng lượng rồi kích hoạt phân tử Ne lên mức năng lượng laser trên. Môi trường laser CO<sub>2</sub> gồm các phân tử CO<sub>2</sub> và các phân tử N<sub>2</sub>. Các phân tử N<sub>2</sub> nhận năng lượng rồi kích hoạt phân tử Ne để thực hiện sự đảo mật độ tích lũy.

- Bơm hoá: Các tâm hoạt chất chuyển dịch lên mức laser trên nhờ năng lượng sinh ra do các phản ứng hoá học đặc biệt và tương thích.

- Bơm nhiệt: Các tâm hoạt chất chuyển dịch lên mức laser trên nhờ tạo nhiệt độ cao môi trường laser.

- Bơm tái hợp: Các tâm hoạt chất chuyển dịch lên mức laser trên nhờ năng lượng sinh ra thông qua sự kết hợp các điện tử và ion trong môi trường plasma đặc biệt.

#### 15.1.5. Mode dọc và mode ngang

- Mode dọc

Mỗi hệ cộng hưởng với khoảng cách L có một dao động đặc trưng. Một

kiểu dao động như vậy có thể coi như tạo ra các sóng đứng theo chuỗi kéo dài liên tục (các mode dọc - hình 15.5). Chỉ dao động nào có bước sóng bằng bội số nửa bước sóng đặc trưng của bộ cộng hưởng mới tồn tại, các kiểu dao động khác bị triệt tiêu.

Theo quan hệ (7.5) mỗi bộ cộng hưởng có chiều dài  $L$  xác định sẽ định được nhiều tần số dao động  $\nu_m$  (cũng như nhiều bước sóng) khác nhau:

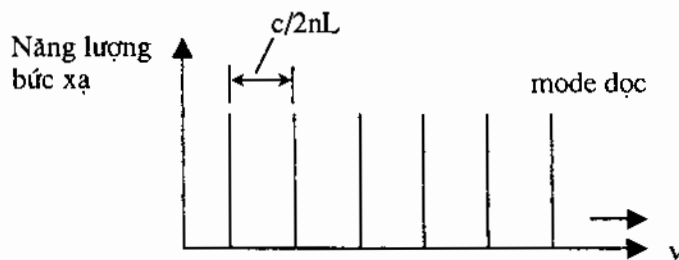
$$\nu_m = \frac{m \cdot c}{2n \cdot L} \quad (15.3)$$

trong đó  $m$  được gọi là số mode của bộ cộng hưởng.

Khoảng cách giữa các mode  $\Delta \nu_m$ :

$$\Delta \nu_m = \frac{c}{2n \cdot L} \quad (15.4)$$

Chiều dài  $L$  của các bộ cộng hưởng laser khí thường từ hàng trăm mm trở lên. Bởi vậy số mode dọc là rất lớn, cũng phải hàng triệu mode.



Hình 15.5. Phân bố mode dọc của bộ cộng hưởng.

#### • Mode ngang

Chiều dài của bộ cộng hưởng quyết định số mode dọc thì bề rộng tạo ra các mode ngang. Một số tia laser bức xạ lệch khỏi trục quang sinh ra biên dạng mặt cắt chùm laser thành các miền sáng tối khác nhau. Người ta gọi chúng là mode ngang kí hiệu  $TEM_{xy}$  ( $TEM_{xy}$ : **T**ransverse **E**lectromagnetic **M**ode). Chỉ số  $x$ : số vệt sáng và chỉ số  $y$ : số vệt sáng theo hai chiều  $x$  và  $y$  trên mặt cắt ngang chùm laser. Hình 7.7 mô phỏng các mode ngang do bộ cộng hưởng tạo thành. Đo lường chính xác cần có mode ngang  $TEM_{00}$ . Mode này có chùm tia cùng pha dao động thống nhất và năng lượng phân bố trên bề mặt cắt chùm tia giảm dần từ trục quang ra biên tuân theo hàm phân bố Gauss. Số lượng mode ngang phụ thuộc vào kết cấu và khả năng tinh chỉnh của bộ cộng hưởng. Nhờ cơ cấu tinh chỉnh chính xác, người ta có thể chỉnh bộ cộng hưởng đặt được mode  $TEM_{00}$ .



Hình 15.6. Một số ví dụ về các mode ngang.

### 15.1.6. Độ rộng phổ

Hoạt chất laser quyết định laser được bức xạ với tần số dao động là bao nhiêu. Tần số này phụ thuộc vào hai mức năng lượng laser trên  $W_2$  và dưới  $W_1$ . Thực tế chùm laser không chỉ dao động với tần số cố định  $\nu$  ( $h\nu = W_2 - W_1$ ) này mà các photon khác nhau của chùm laser dao động với các tần số khác nhau nằm trong giải tần  $\Delta\nu$  có tần số  $\nu$  là trung tâm. Nguyên nhân sinh ra  $\Delta\nu$  là do thời gian lưu trú các photon ở mức laser trên không giống nhau, do hiệu ứng Dopple, do va chạm các tâm hoạt chất...  $\Delta\nu$  càng hẹp (độ rộng phổ bức xạ càng nhỏ) chùm laser càng đơn sắc.

### 15.1.7. Laser ba mức và bốn mức năng lượng

- Thực tế không tồn tại bức xạ laser hai mức năng lượng, trong đó mức laser dưới trùng với mức năng lượng cơ bản của tâm hoạt chất laser. Từ công thức của Boltzmann và Einstein chứng minh rằng các bơm laser không thể thực hiện được sự đảo mật độ tích lũy để tạo  $N > 0$ . Do vậy các laser chỉ tồn tại khi các tâm hoạt chất phải có ba hay bốn mức năng lượng khi được các bơm cung cấp năng lượng (trong đó có một mức cơ bản  $W_0$ , mức laser trên  $W_1$ , mức laser dưới  $W_2$  và mức trung gian mức laser trên  $W_3$ ).

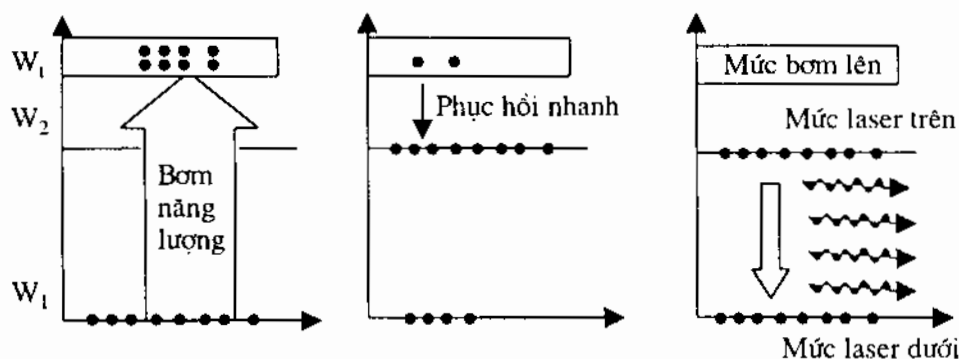
- **Laser ba mức năng lượng** (hình 15.6).

Bơm quang học kích hoạt các tâm hoạt chất laser chuyển dịch lên mức năng lượng giải rộng  $W_3$ . Tâm hoạt chất nhanh chóng (vào khoảng  $10^{-8}$  s) chuyển dịch (phục hồi nhanh) xuống mức laser trên mà không có bức xạ photon. Các tâm hoạt chất lưu trú lại ở mức laser trên lâu hơn (khoảng  $10^{-3}$  s) dẫn đến mật độ tâm kích thích tăng lên gấp bội so với tâm hoạt chất ở mức laser dưới. Do vậy độ đảo mật độ tích lũy  $N > 0$  và bức xạ cường độ chùm laser mới xảy ra. Các loại laser ruby, laser nitơ, laser excimer, laser hơi đồng... là laser có ba mức năng lượng.

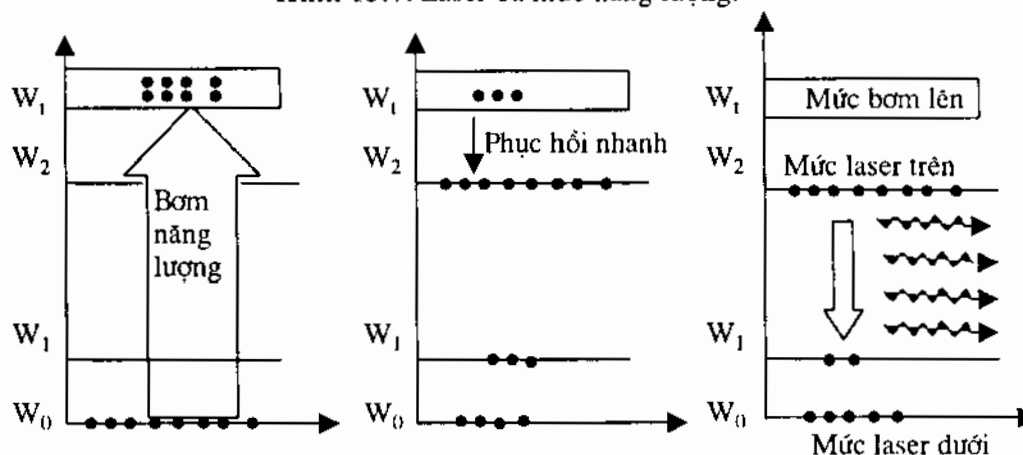
- **Laser bốn mức năng lượng** (hình 15.7).

Ở laser bốn mức năng lượng thì mức laser dưới nằm trên mà không trùng

với mức cơ bản ( $W_1 > W_0$ ). Tương tự như laser ba mức năng lượng, bơm quang học kích hoạt các tâm hoạt chất laser chuyển dịch lên mức năng lượng  $W_1$  với  $h\nu = W_1 - W_0$ . Nhờ có chênh lệch năng lượng  $W_1 - W_0$  mà các tâm hoạt chất ở mức laser dưới nhanh chóng trở về mức cơ bản  $W_0$ . Do vậy mật độ tâm hoạt chất ở mức laser dưới giảm đi nhiều so với laser ba mức năng lượng. Các loại laser khí He-Ne, laser CO<sub>2</sub>, laser argon, laser rắn Nd-YAG, laser Ti-Saphir... là laser bốn mức năng lượng.



Hình 15.7. Laser ba mức năng lượng.



Hình 15.8. Laser bốn mức năng lượng.

## 15.2. CÁC LOẠI LASER THÔNG DỤNG

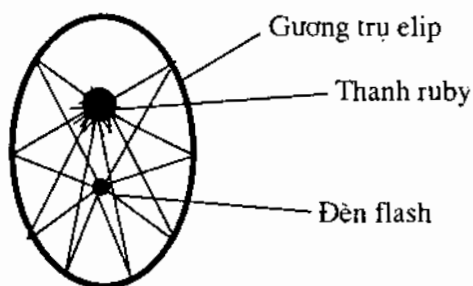
### 15.2.1. Laser rắn

- Laser ruby

Ruby là tinh thể Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> chứa thêm khoảng 0,05% ( $1,6 \cdot 10^{19}$  ion/cm<sup>3</sup>) các ion Cr<sup>+3</sup>. Oxit nhôm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> là chất nền hấp thụ năng lượng của bơm quang. Các ion



$\text{Cr}^{+3}$  là các tâm hoạt chất laser. Chất nền  $\text{Al}_2\text{O}_3$  chuyển năng lượng cho các ion  $\text{Cr}^{+3}$  chuyển dịch lên mức năng lượng  $W_1$ . Quá trình bức xạ laser diễn ra theo laser ba lớp năng lượng từ  $W_1$  tới mức laser trên  $W_2$  rồi thực hiện bức xạ cưỡng bức photon để xuống mức laser dưới ( $W_1 = W_0$ ). Đèn flash (đèn chớp) được sử dụng làm bơm quang. Thường thanh ruby và đèn flash được đặt dọc theo hai trục của gương trụ elip để ánh sáng từ đèn flash tập trung hoàn toàn vào thanh ruby (hình 15.9). Laser ruby bức xạ chùm tia bước sóng 694.3 nm dưới dạng xung và có công suất bức xạ lớn từ hàng trăm W đến một vài GW. Laser ruby được sử dụng hữu hiệu gia công vật liệu và cắt gọt tạo hình bề mặt chi tiết cơ khí chính xác.



Hình 15.9. Vị trí của đèn flash và thanh ruby trong gương trụ elip.

#### • Laser rắn Nd-YAG

Môi trường laser gồm chất nền  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$  pha lẫn với các tâm hoạt chất laser  $\text{Nd}^{+3}$ . Laser Nd-YAG hoạt động theo cơ chế bốn mức năng lượng. Bơm quang học (đèn Krypton) cung cấp năng lượng cho chất nền  $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}$ . Được truyền năng lượng từ chất nền, các Ion  $\text{Nd}^{+3}$  chuyển dời lên mức năng lượng dải rộng  $W_1$ . Các ion  $\text{Nd}^{+3}$  nhanh chóng quay về mức laser trên. Chúng lưu trú lâu ở đây (một vài ms) để thực hiện độ đảo mật độ tích lũy. Kế tiếp là quá trình bức xạ laser từ  $W_2$  xuống  $W_1$ . Cuối cùng, các ion  $\text{Nd}^{+3}$  tiếp tục chuyển nhanh về mức cơ bản  $W_0$ . Laser Nd-YAG có công suất lớn tới 10 MW làm việc chế độ xung và bức xạ chùm tia bước sóng 1064 nm. Chúng được sử dụng hữu hiệu gia công vật liệu và cắt gọt tạo hình bề mặt chi tiết cơ khí chính xác.

#### • Laser Ti-Saphir

Ở laser Ti-Saphir thì oxit nhôm  $\text{Al}_2\text{O}_3$  là chất nền, các ion  $\text{Ti}^{+4}$  là các tâm hoạt chất laser. Laser Ti-Saphir hoạt động theo sơ đồ bốn mức năng lượng.

nguỡng phát thấp, hoạt động theo chế độ xung hoặc liên tục. Miền phổ của laser Ti-Saphir liên tục và rộng từ  $600 \div 1000$  nm. Người ta dùng các loại laser có phổ bức xạ nằm trong phổ hấp thụ của hoạt chất laser Ti-Saphir làm bơm: như laser màu (giải tần 310 đến 1000 nm), hoặc nhân đôi giải tần của các laser Nd-YAG ( $\lambda = 532$  nm) và Laser Argon ( $\lambda = 488$  nm và  $\lambda = 532$  nm).

### 15.2.2. Laser khí

#### • Laser He-Ne

Môi trường laser là hỗn hợp khí heli và neon tỉ lệ 10/1. Hoạt chất laser là neon. Môi trường laser chứa trong bình thạch anh với áp suất thấp khoảng 1 mmHg. Bơm quang của laser He-Ne là hiện tượng phóng điện giữa hai điện cực qua môi trường laser có cường độ từ 3 đến 10 mA và điện áp  $1,5 \div 10$  kV. Bơm đã truyền năng lượng cho các phân tử heli đưa chúng lên trạng thái kích thích. Laser He-Ne hoạt động theo sơ đồ bốn mức năng lượng. Sự đảo mật độ tích lũy laser xảy ra do chuyển dịch tâm hoạt chất neon lên mức laser trên nhờ quá trình chuyển năng lượng cộng hưởng khi va chạm không đàn hồi với các phân tử heli ở trạng thái kích thích. Sự đảo mật độ tích lũy của các tâm hoạt chất neon lớn do tốc độ tích lũy ở mức trên  $W_2$  cao hơn nhiều tốc độ tích lũy ở mức dưới  $W_1$ , mặt khác do có mức cơ bản  $W_0$  thấp hơn mức laser dưới  $W_1$  nên các tâm Ne ở mức  $W_1$  phục hồi nhanh về mức cơ bản  $W_0$ . Laser He-Ne bức xạ ba loại phổ liên tục:  $\lambda = 1150$  nm,  $\lambda = 632,8$  nm và  $\lambda = 543$  nm. Trong đó phổ  $\lambda = 632,8$  nm là quan trọng hơn cả. Laser He-Ne có các phổ bức xạ hẹp (nhỏ hơn nm) nên coi chung bức xạ chùm tia đơn sắc thuần túy. Laser He-Ne vừa có công suất lớn vừa có độ bức xạ hẹp lại có tuổi thọ cao nên được sử dụng rộng rãi trong đo lường chính xác, trong ảnh lập thể, trong các thiết bị y tế và xử lý ảnh...

#### • Laser nitơ

Laser nitơ làm việc theo ba mức năng lượng, trong đó mức laser dưới không trùng với mức cơ bản nên các ion nitơ phục hồi nhanh để trở về mức cơ bản. Tâm hoạt chất nitơ chuyển dịch lên mức laser trên nhờ hiện tượng phóng điện giữa hai điện cực bố trí ngang theo hoặc dọc theo bình đựng nitơ. Laser nitơ có công suất lớn, tuổi thọ cao và bức xạ chùm phổ rộng ở miền tử ngoại  $\lambda = 337,3$  nm nên thường được sử dụng làm nguồn bơm cho các laser màu.

#### • Laser CO<sub>2</sub>

Laser CO<sub>2</sub> làm việc theo ba mức năng lượng. Môi trường laser là các phân tử CO<sub>2</sub> và N<sub>2</sub>, trong đó tâm hoạt chất là CO<sub>2</sub>. Sự đảo mật độ tích lũy laser xảy ra do dao động toàn phần các tâm hoạt chất CO<sub>2</sub> để chúng chuyển dịch lên mức

laser trên nhờ quá trình chuyển năng lượng cộng hưởng khi va chạm với các phân tử neon ở trạng thái kích thích. Do các tâm hoạt chất dao động toàn phần và nhiều hướng khác nhau mà từ mức laser trên chúng bức xạ một phổ rộng hồng ngoại. Bước sóng chính của laser CO<sub>2</sub>:  $\lambda = 10600$  nm. Laser CO<sub>2</sub> chủ yếu làm việc với chế độ liên tục, công suất lớn tới 10 kW và hiệu suất bức xạ khá cao tới 40%. Công suất laser CO<sub>2</sub> phụ thuộc vào kích thước buồng cộng hưởng. Chiều dài của buồng có thể 2 ÷ 3 m và lớn hơn. Hai cực của hệ phóng điện trong khí kém làm bơm được đặt theo chiều ngang hoặc theo chiều dọc trục bộ cộng hưởng. Do laser CO<sub>2</sub> làm việc theo chế độ liên tục, công suất lớn và hiệu suất cao nên được sử dụng rất thích hợp gia công cắt gọt vật liệu kể cả sắt thép và kim loại cứng.

- **Laser argon**

Laser argon làm việc theo bốn mức năng lượng, trong đó mức laser dưới không trùng với mức cơ bản. Mức laser trên gồm một giải mức năng lượng nằm liền kề nhau. Tâm hoạt chất là các ion argon. Nguyên tử argon trước tiên bị ion hoá do hiện tượng phóng điện giữa hai cực qua môi trường laser rồi được kích thích do va đập nhiều lần để chuyển lên giải mức laser trên. Laser argon có giải mức năng lượng trên, nên bức xạ nhiều phổ nằm suốt từ tử ngoại đến hồng ngoại. Các bước sóng chủ yếu là:  $\lambda = 351,1$  nm;  $\lambda = 363,8$  nm;  $\lambda = 457,9$  nm;  $\lambda = 476,5$  nm;  $\lambda = 488$  nm;  $\lambda = 514,5$  nm;  $\lambda = 528,7$  nm;  $\lambda = 1092,3$  nm. Trong đó mạnh nhất là:  $\lambda = 488$  nm và  $\lambda = 514,5$  nm. Để lựa lọc các bước sóng cần sử dụng nghĩa là chọn các mode của laser cần phải ghép thêm bộ lọc phổ thích hợp.

### 15.2.3. Laser bán dẫn

- **Nguyên lý hình thành laser bán dẫn**

Bề mặt hai vật liệu laser p và n tiếp xúc trực tiếp với nhau. Một số lỗ hổng từ p chuyển dịch sang n. Nói cách khác một số điện tử ở n khuếch tán sang p tạo nên hiệu điện thế giữa p và n. Khi hiệu điện thế U đủ lớn không cho khuếch tán tiếp các điện tử từ n sang p nữa, một vùng cấm được hình thành. Vùng cấm ngăn không cho sự khuếch tán tiếp các điện tích cơ bản qua miền tiếp giáp p-n.

Khi có dòng điện kích thích (khác với laser rắn và khí được kích hoạt bằng chùm ánh sáng) bằng một điện áp phân cực thuận  $U_C$  vào lớp p-n (cực dương nối với bán dẫn p và cực âm nối với bán dẫn n, ngược chiều và lớn hơn nhiều so với U) làm cho các điện tử chuyển dịch từ dải hoá  $E_h$  qua vùng cấm  $E_c$  để lên dải dẫn  $E_d$  rồi được lưu ở đó (ta nói các điện tử đã được chích vào bán dẫn p và

tương tự như vậy các lỗ hổng đã được chích vào bán dẫn n). Bây giờ có nhiều lỗ hổng ở dải hoá  $E_h$  và nhiều điện tử ở dải dẫn  $E_d$  sinh ra nghịch đảo mật độ tích lũy trong tiếp giáp p-n. Khi các điện tử trở về mức năng lượng giải hoá để tái hợp với lỗ hổng bức xạ photon ánh sáng cả hai loại bức xạ thụ động và bức xạ cưỡng bức. Các photon bức xạ cùng bước sóng  $\lambda = h.c/E_c$ . Số photon được chích vào bán dẫn phụ thuộc vào mức độ điện áp đặt lên bán dẫn p-n tức là cường độ dòng điện chạy qua tiếp giáp p-n. Do vậy số photon được bức xạ cũng phụ thuộc vào điện áp đó  $U_C$ .

• **Điot phát quang**

Việc chuyển đổi từ điện sang dòng photon ánh sáng thông qua lớp ngăn p-n chính là nguyên lí bức xạ photon của diot quang (LED). Do chất bán dẫn có cấu trúc mạng tinh thể nên các điện tử ở giải hoá ảnh hưởng lẫn nhau và do có chất kích hoạt khác trong mạng (tạp chất và hạt nhân) nên giải hoá có mức năng lượng  $E_h \pm \Delta E$ , bởi vậy chùm photon bức xạ không hoàn toàn một loại bước sóng mà nằm trong phổ rộng từ  $\lambda_a$  đến  $\lambda_b$ . LED bức xạ phổ liên tục nhưng không kết hợp và hàm phân bố công suất bức xạ  $P_\lambda$  theo quy luật hàm Gauss:

$$P_\lambda = P_{\lambda_0} \cdot e^{-\pi \left( \frac{\lambda_1 - \lambda_2}{\Delta\lambda} \right)^2}$$

Trong đó:  $P_{\lambda_0}$  là giá trị lớn nhất của hàm phân bố mật độ công suất;  $\lambda_0$  là bước sóng trung tâm phụ thuộc vào năng lượng giải cấm  $E_g = E_h - E_d$ ;  $\Delta\lambda$  là độ rộng phổ bức xạ của LED được xác định tại giá trị công suất P bằng 1/2 công suất cực đại  $P_{\lambda_0}$ :

$$P = P_{\lambda_0}/2.$$

Tùy thuộc vào vật liệu của LED mà công suất bức xạ khác nhau, bước sóng bức xạ  $\lambda_0$  khác nhau và chúng có độ rộng phổ  $\Delta\lambda$  khác nhau. Các LED bằng InGaAsP/InP bức xạ hồng ngoại trong thông tin cáp quang có độ rộng phổ trong khoảng từ 60 nm đến 100 nm.

Cần phân biệt hai loại diot quang (LED) được sử dụng hiện nay: diot phát quang phát xạ cạnh (ELED) và diot phát quang phát xạ mặt (SLED).

- Diot phát quang phát xạ cạnh (ELED) có cấu trúc dị thể kép bức xạ chùm sáng theo phương dọc với các lớp hoạt tính (hình 15.10). Lớp hoạt tính chiết suất lớn nhất được kẹp giữa hai lớp hạn chế quang chiết suất nhỏ hơn. Hai lớp hạn chế quang có chiết suất lại lớn hơn chiết suất lớp kế cận bên ngoài. Mặt khác mặt trên và mặt dưới của ELED được phủ lớp kim loại các tù phản xạ. Do

cấu trúc như vậy mà ELED không thể phát xạ theo phương vuông góc với bề mặt miền hoạt tính.

- Diot phát quang phát xạ mặt (SLED) có cấu trúc dị thể kẹp bức xạ chùm sáng theo phương vuông góc với các lớp hoạt tính. Hình 15.11 giới thiệu một cấu trúc của SLED ghép nối với đầu sợi quang.

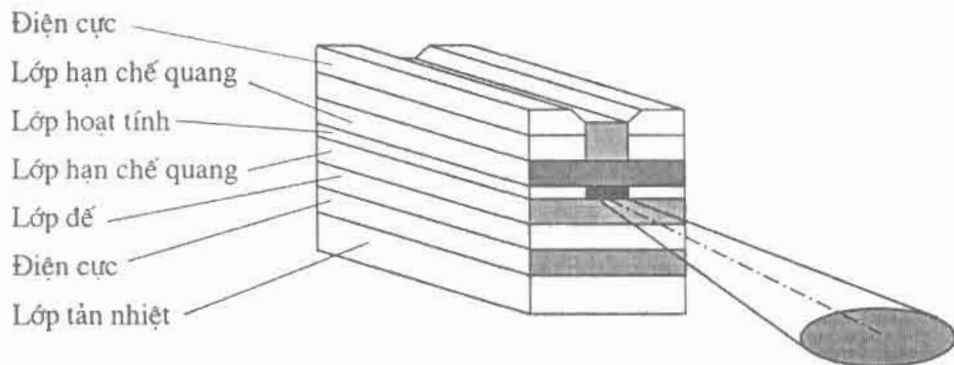
Cường độ phát của chùm bức xạ phân bố theo nguồn Lamber:

$$I_{\alpha} = I_0 \cdot \cos \alpha$$

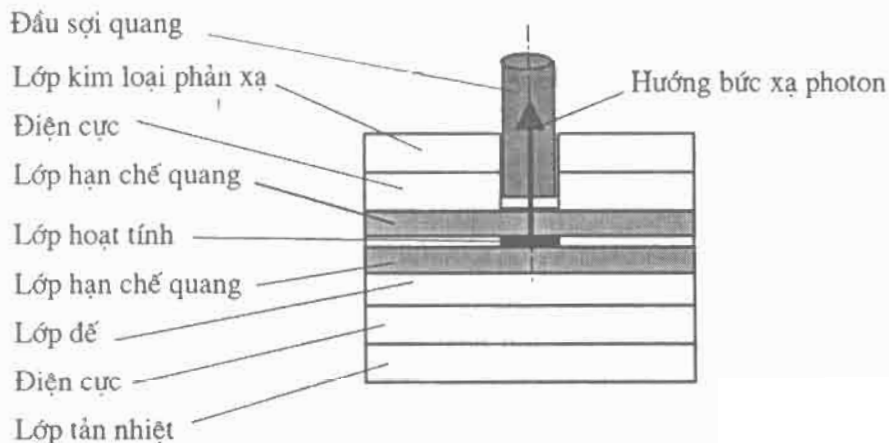
$I_0$  - cường độ bức xạ theo hướng vuông góc với bề mặt lớp hoạt tính;

$I_{\alpha}$  - cường độ bức xạ theo hướng lập với hướng vuông góc với bề mặt lớp hoạt tính góc  $\alpha$ .

Trên thực tế, do hạn chế chuyển dịch điện tử ở biên của lớp hoạt tính không hoàn hảo, nên cường độ phát xạ của SLED giảm dần theo góc hợp với hướng phát xạ và tia chính theo dạng phân bố hàm Gauss.



Hình 15.10. Cấu trúc một loại ELED.



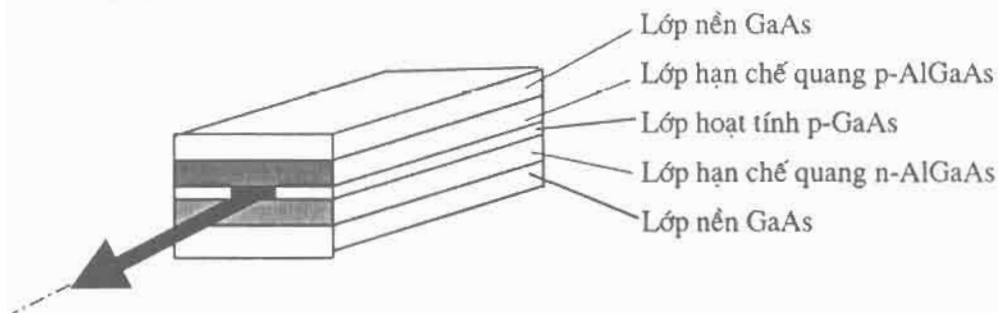
Hình 15.11. Cấu trúc một loại SLED.

### • Laser bán dẫn (LD)

Về nguyên lý thì LD cũng tương tự như LED song dòng qua diot vượt quá dòng ngưỡng  $i_{ng}$ , do đó hầu hết các điện tử được chuyển lên dải dẫn và lưu lại ở đó nhiều hơn. Mặt khác các phân tử mang điện chỉ tập trung ở miền hoạt tính rất hẹp loại bỏ đáng kể sự suy hao quang năng, sự tái hợp lỗ hổng và điện tử dẫn đến cả bức xạ thụ động và bức xạ cưỡng bức, số lượng photon bức xạ tăng lên gấp bội. Ngoài ra các photon lại được phản xạ qua lại nhiều lần trong buồng cộng hưởng theo mẫu Fabry-Perot sau đó mới ra ngoài. Cho nên, laser bán dẫn có nhiều ưu điểm so với LED: Công suất bức xạ lớn, chùm bức xạ là chùm kết hợp - đồng nhất về pha và tần số dao động, định hướng cao.

Hãy quan sát một loại laser phát xạ cạnh có nền là lớp GaAs, mô tả ở hình 15.12. Lớp hoạt tính p-GaAs có độ rộng giải cấm nhỏ hơn bị kẹp giữa hai lớp hạn chế quang p-AlGaAs và n-AlGaAs có độ rộng giải cấm lớn hơn, nên hai lớp hạn chế này tạo ra các ngưỡng điện thế để tập trung các điện tử và lỗ trống tái hợp ở miền hoạt tính p-GaAs, do vậy quá trình lượng tử hoá tăng lên và lại giảm được độ lớn dòng ngưỡng.

Laser bán dẫn (hình 15.12) có buồng cộng hưởng Fabry-Perot là hai mặt phẳng song song ngăn cách giữa lớp hạn chế quang p-AlGaAs và n-AlGaAs với lớp hoạt tính bằng p-GaAs. Do chiết suất lớp p-GaAs lớn hơn chiết suất hai lớp p-AlGaAs và n-AlGaAs nên hệ ba lớp này coi như một ống dẫn quang định hướng cho chùm laser bức xạ cạnh. Khoảng cách bộ cộng hưởng Fabry-Perot phụ thuộc vào chiết suất lớp hoạt chất và vào bước sóng laser bức xạ:  $L = m\lambda/2n$  ( $m$  là số tự nhiên).



Hình 15.12. Cấu trúc một loại laser bức xạ.

### 15.3. MỘT SỐ ỨNG DỤNG CỦA LASER

Laser được ứng dụng ở nhiều lĩnh vực khác nhau: Trong các ngành công nghiệp, trong các ngành kinh tế, y tế giáo dục, an ninh quốc phòng, thông tin và

giao thông vận tải... và nhiều mặt văn hoá xã hội khác nhau.

Thiết bị và dụng cụ ứng dụng laser tập trung theo các dạng:

- Các thiết bị nội soi, các thiết bị soi chụp, các thiết bị phẫu thuật;
- Các thiết bị quan sát định vị, cảnh giới, truy tìm và tiêu diệt mục tiêu;
- Các thiết bị văn phòng, sao chụp in ấn;
- Các thiết bị chiếu sáng, các thiết bị và công nghệ phim ảnh;
- Các thiết bị thu phát tín hiệu thông tin liên lạc;
- Các thiết bị gia công vật liệu: cắt, hàn, khoan, ram, tôi bề mặt;
- Các thiết bị đo lường kiểm tra kích thước, trạng thái bề mặt, các tính chất cơ lý hoá, các dụng cụ cân, đong, đo, đếm.

### **Các phương pháp gia công vật liệu bằng laser**

#### ***a. Hàn laser***

- Hàn laser là sử dụng chùm laser có mật độ năng lượng cao tập trung truyền nhiệt tại một miền hẹp làm nóng chảy vật liệu hàn và vật liệu của các chi tiết kề nhau để chúng hoà lẫn với nhau, khi nguội các chi tiết bám chặt với nhau.

- Hai quá trình chuyển năng lượng trong khi hàn: Hấp thụ chùm laser tại mối hàn và chuyển sang nhiệt năng rồi truyền nhiệt liên tục từ lớp nọ sang lớp kia đi sâu vào chi tiết. Bề dày mỗi lớp từ  $10^{-6}$  đến  $10^{-8}$  mm. Hấp thụ nhiệt và truyền nhiệt cho tới khi vật liệu chuyển pha sang dạng lỏng. Vận tốc tăng nhiệt có thể đạt tới khoảng  $10^{10}$  K/s với mật độ năng lượng khoảng  $p \leq 10^{16}$  W/cm<sup>2</sup>, trong khi hàn chỉ cần tới  $p \leq 10^6$  W/cm<sup>2</sup>. Do vậy hàn laser có thể hàn được các vật liệu với nhiệt độ nóng chảy rất cao. Quá trình hàn được thực hiện cả ở môi trường không khí bình thường, trong chân không và môi trường có các bước sóng khác đang làm việc.

- Vận tốc tăng nhiệt và gradien nhiệt  $T(x,y,z,t)$  tại vị trí hàn phụ thuộc vào các tính chất vật lý và quang học của vật liệu. Trong đó phải kể đến: hệ số hấp thụ  $a$  và hệ số phản xạ  $r$ , hệ số truyền nhiệt, nhiệt độ nóng chảy, nhiệt độ hoá hơi,... cũng như trạng thái bề mặt chi tiết.

- Vận tốc tăng nhiệt và gradien nhiệt  $T(x,y,z,t)$  tại vị trí hàn phụ thuộc đáng kể vào loại laser sử dụng để hàn và đặc tính của laser (laser xung hay laser liên tục, bước sóng laser  $\lambda$ , tần số xung  $f_1$ , công suất  $p$ , hiệu suất  $\eta$  cũng như độ lớn đầu hàn  $d_F$ ).

Độ lớn đầu hàn được tính theo:

$$d_F = 2,44\lambda \cdot k (m + 1) \text{ theo mm,}$$

Trong đó: k- hệ số mở;  $k = f/D$ ; (D- đường kính vật kính; f- tiêu cự vật kính);  
m - bậc chỉ số mode ngang laser.

- Các loại laser được sử dụng trong công nghệ hàn:

Hai loại laser rắn (laser hồng ngọc, laser Neodyn, laser YAG) và laser khí (laser CO<sub>2</sub>).

*Laser hồng ngọc:*  $\lambda = 0,69 \mu\text{m}$ ; thời gian mỗi xung  $t_i = 0,5 \div 10 \text{ ms}$ ; tần số  $f_T = 1 \div 5 \text{ Hz}$ ; công suất tối đa mỗi xung  $W_i \leq 100 \text{ W}$ ; đường kính của đầu hàn (tiết diện tập trung năng lượng)  $d_F \geq 10 \mu\text{m}$ .

*Laser Neodyn:*  $\lambda = 1,06 \mu\text{m}$ ; thời gian mỗi xung  $t_i = 0,1 \dots 2,5 \text{ ms}$ ; tần số  $f_T = 20 \text{ Hz}$ ; công suất tối đa mỗi xung  $W_i = 0,05 \div 100 \text{ W}$ ; đường kính của đầu hàn  $d_F \geq 20 \mu\text{m}$ . Công suất xung tối đa  $p_i = 1 \text{ kW}$ ; công cụ đại làm việc liên tục  $p_k = 25 \div 75 \text{ W}$ . Trong trường hợp đặc biệt khi  $t_i = 15 \text{ ns}$  thì đạt được  $p_i = 10^2 \text{ MW}$ .

*Laser CO<sub>2</sub>:*  $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$ ;  $p_k = 50 \text{ W} \div 20 \text{ kW}$ ;  $d_F = 0,025 \div 4 \text{ mm}$ .

- Dùng laser có thể hàn điểm, hàn nối và hàn ghép các tấm kim loại với nhau, các dây kim loại với nhau và giữa các tấm kim loại với dây kim loại. Bề dày các tấm kim loại được hàn ghép từ  $d = 0,01 \div 4 \text{ mm}$  cho laser rắn dạng liên tục và  $d = 0,1 \div 20 \text{ mm}$  cho laser CO<sub>2</sub> dạng liên tục. Khi dùng laser dạng xung thì bề dày  $d = 0,01 \div 1 \text{ mm}$  cho laser rắn và độ lớn đầu hàn  $d = 0,1 \div 1 \text{ mm}$ .

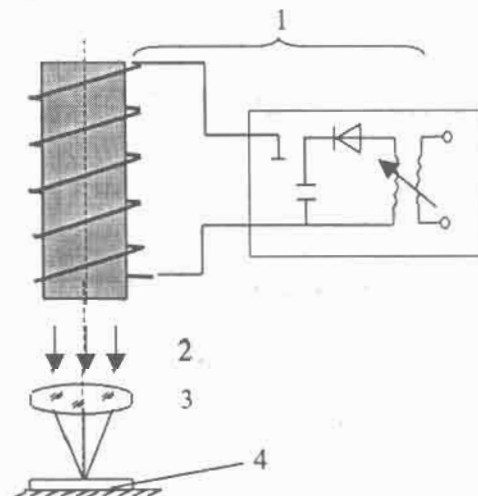
Hàn điểm thường dùng laser rắn. Ít khi dùng laser CO<sub>2</sub>.

Hình 15.13 trình bày sơ đồ nguyên lý thiết bị hàn laser rắn.

**Hình 15.13.** Nguyên lý hàn

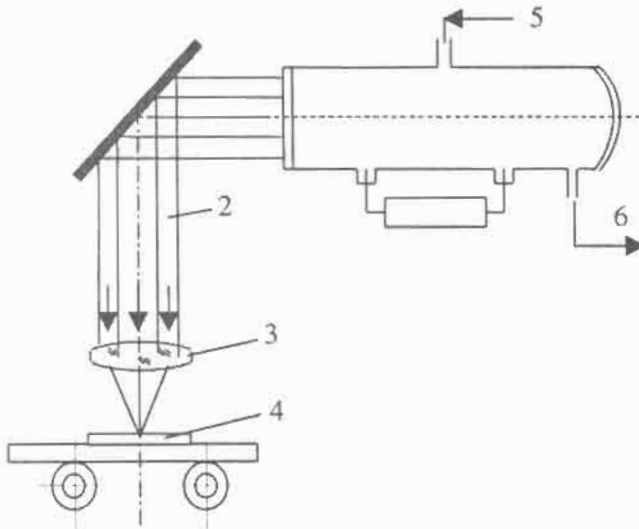
laser rắn:

- 1- nguồn laser rắn;
- 2- chùm tia laser;
- 3- vật kính;
- 4- chi tiết hàn.





Hàn nối và hàn ghép thường dùng dùng laser YAG và laser CO<sub>2</sub> ở dạng liên tục.  
 Hình 15.14 sơ đồ nguyên lý thiết bị hàn laser khí.



**Hình 15.14.** Nguyên lý hàn laser khí:

1- nguồn laser khí; 2- chòm tia laser; 3- vật kính; 4- chi tiết hàn; 5- nạp khí CO<sub>2</sub>; 6- hút khí tạo chân không.

	Co	Ge	Ag	Au	Ti	W	Si	Ni	Ta	Cu	Fe,St	Mo	Al
Al+HC				■		■		■					■
Mo+HC									■				■
Fe,St									■	■	■		
Cu+Hc							■	■	■	■			
Ta								■	■	■			
NI+HC		■	■	■		■		■					
Si+HC				■									
W						■							
Ti+HC					■								
Au	■			■	■								
Ag			■	■									
Ge		■											
Ce	■												

**Sơ đồ 15.1.** Các vật liệu hàn được với nhau bằng laser:



- Hàn laser được sử dụng hàn nhiều vật liệu khác nhau: Au, Ag, Al, Ni, Ti, Ta, Nb, kim loại Cr Ni, constantan, thuỷ tinh, chất hữu cơ... Hàn laser còn được sử dụng hàn các chi tiết từ các vật liệu khác nhau. Sơ đồ 15.1 liệt kê hai vật liệu khác nhau được hàn lại với nhau.

### ***b. Khoan cắt, phay bóc lớp vật liệu bằng laser***

- Nguyên lý chung gia công vật liệu bằng laser là sử dụng chùm laser có mật độ năng lượng cao dội lên bề mặt chi tiết gia công, do mật độ năng lượng lớn lại truyền tại phần tử hẹp bề mặt vật liệu, nên nhiệt độ tăng cao đột ngột làm nóng chảy rồi hoá hơi từng lớp từng lớp vật liệu cùng với áp suất lớn đẩy chúng khỏi chi tiết gia công. Nhiều vật liệu (giấy, gỗ, da...), chùm laser làm bốc bay ngay lập tức các phần tử của chúng mà không qua chuyển sang thể lỏng.

- Nếu chọn thích hợp đường kính chùm laser (hệ số mở k, và mode laser bậc  $m = 0$ ) thì mật độ năng lượng chùm laser tại điểm gia công từ  $10^8$  đến  $10^{14}$   $W/cm^2$ , trong khi ở hàn hơi:  $10^4$   $W/cm^2$ ; chùm plasma  $10^5$   $W/cm^2$  và chùm điện tử là  $10^8$   $W/cm^2$ .

- Gia công vật liệu diễn ra theo ba giai đoạn: Hấp thụ và thẩm thấu năng lượng photon laser qua bề mặt vật liệu (tối đa là  $0,1 \mu m$ ); tăng nhiệt độ tại vị trí gia công làm chuyển pha vật liệu sang trạng thái lỏng rồi trạng thái hơi và cuối cùng do sự chênh lệch nhiệt độ cao trong thời gian ngắn mà tạo áp suất lớn (tới  $10^8$  Pa) cùng với luồng khí công tác mà đẩy các phần tử vật liệu hoá hơi ra khỏi điểm gia công.

- Sự tăng nhiệt tại điểm gia công và sự truyền nhiệt theo  $T(x,y,z,t)$  phụ thuộc vào tính chất vật lý và quang học của vật liệu: hệ số hấp thụ, hệ số phản xạ, hệ số truyền nhiệt, nhiệt độ nóng chảy, nhiệt độ hoá hơi, trạng thái bề mặt chi tiết, thành phần và cấu trúc vật liệu... và đặc tính của laser được sử dụng gia công.

- Gia công vật liệu bằng laser được sử dụng cho nhiều loại vật liệu khác nhau. Có thể chia thành ba nhóm vật liệu:

- Nhóm kim loại và hợp kim: hệ số hấp thụ chùm laser thấp vào khoảng từ  $2 \div 6\%$ . Khi được phun vào nơi gia công bằng luồng khí công tác là oxy thì hiệu suất cắt gọt tăng lên do có thêm sự cháy của oxy với vật liệu gia công. Laser  $CO_2$  được sử dụng gia công loại vật liệu này là thích hợp nhất do chúng có bước sóng dài ( $\lambda = 10,6 \mu m$ ) dễ được vật liệu hấp thụ tốt.

- Nhóm vật liệu dễ cháy: Giấy, gỗ, vải sợi, chất polyme cứng, da, thủy tinh hữu cơ... có hệ số hấp thụ cao với chùm laser (tới 90%), cho nên gia công bằng laser cho loại vật liệu này là rất hữu hiệu. Do chúng dễ cháy nên khí công tác thổi vào điểm ra công phải là khí nitơ.

- Nhóm vật liệu cứng như đá, sành sứ, thủy tinh. Chúng cũng có hệ số hấp thụ cao với chùm laser nên được gia công bằng laser là rất tốt. Nitơ được sử dụng làm khí công tác.

• Các phương pháp được sử dụng gia công vật liệu: khoan, cưa cắt và phay bóc các lớp vật liệu. Chùm laser cũng được sử dụng để ram, tôi cục bề mặt vật liệu.

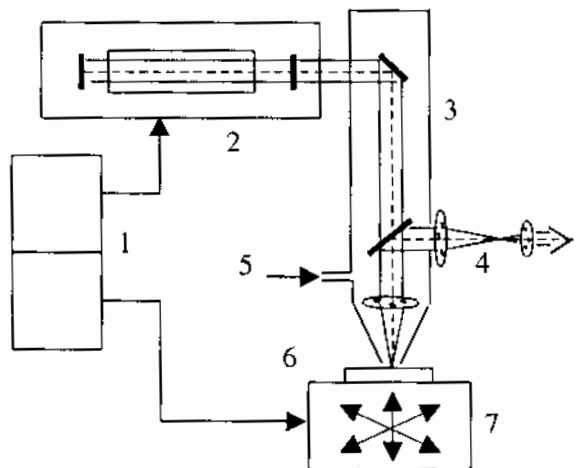
• Có tới gần 200 loại laser được sử dụng trong nhiều ngành công nghệ khác nhau. Bảng 15.1 liệt kê một số loại laser và các đặc tính của nó được sử dụng gia công vật liệu.

**Bảng 15.1.** Một số loại laser sử dụng gia công vật liệu

Loại laser	Dạng laser	$\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	$D_{\min}$ ( $\mu\text{m}$ )	Công suất (W)	Thời gian một xung $t_f$ (s)	Tần số (Hz)	Hiệu suất (%)
N <sub>2</sub> -laser	xung	0,337	1	tới $6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^{-5}$	$10^2$	$10^{-1}$
Ar-laser	xung	$0,46 \div 0,52$	2	tới $10^2$	$5 \cdot 10^{-5} \div 5 \cdot 10^{-6}$		$2 \cdot 10^{-2}$
Ar-laser	liên tục	$0,46 \div 0,52$	2	tới 10			$2 \cdot 10^{-2}$
Laser Rubin	xung	0,69	2	tới $10^5$	$5 \cdot 10^{-3} \div 10^{-4}$	đến $10^2$	1
Laser thủy tinh Nd	xung	1,06	5	tới $10^5$	$5 \cdot 10^{-3} \div 10^{-4}$	1	1
Laser YAG -Nd	xung	1,06	5	tới $10^7$	$10^{-7} \div 10^{-8}$	20	4
Laser YAG -Nd	liên tục	1,06	5	tới 200			4
Laser-CO <sub>2</sub>	liên tục	10,6	30	tới 1000			20
Laser-CO <sub>2</sub>	xung	10,6	30	tới 1000	10 đến $10^{-3}$		20
Laser CO <sub>2</sub> - TFA	xung	10,6	30	tới $10^9$	$10^{-9}$		20
Laser thủy tinh CO <sub>2</sub>	liên tục	10,6	100	tới $2 \cdot 10^4$			20

- Laser CO<sub>2</sub> được dùng nhiều để khoan, cưa cắt và phay bóc các lớp vật liệu. Đôi chỗ nó cũng được sử dụng để ram, tối cục bộ bề mặt vật liệu.

Hình 15.15 là sơ đồ nguyên lý một thiết bị laser CO<sub>2</sub> khí gia công vật liệu gồm có hệ cung cấp điện năng và điều khiển; nguồn chùm laser CO<sub>2</sub>; hệ quang; hệ quan sát để quan sát vị trí bề mặt đang gia công; hệ tạo áp suất khí công tác thời vào vị trí gia công và hàn gá chi tiết đo để dịch chuyển chi tiết gia công theo ba chiều.



**Hình 15.15.** Thiết bị gia công vật liệu bằng chùm laser CO<sub>2</sub>:

1- bộ cấp điện và điều khiển; 2- nguồn laser CO<sub>2</sub>; 3- hệ quang; 4- hệ quang quan sát; 5- van nạp khí làm việc; 6- chi tiết gia công; 7- bàn chi tiết gia công.

Độ lớn chùm laser tiếp xúc với bề mặt chi tiết gia công được tính theo:

$$d_F = 2,44\lambda (f/D) (m + 1) ; \text{ theo mm.}$$

Trong đó: D- đường kính vật kính; f- tiêu cự vật kính; m- bậc chỉ số mode ngang laser.

- **Một số thông số công nghệ**

Tùy thuộc và nhiều yếu tố: thiết bị, loại laser sử dụng, vật liệu được gia công... mà có các thông số công nghệ khác nhau. Bảng 15.2 liệt kê một số thông số công nghệ khi sử dụng laser CO<sub>2</sub> công suất 200 W cắt vật liệu tấm.

**Bảng 15.2. Một số thông số công nghệ khi sử dụng laser CO<sub>2</sub>  
công suất 200 W cắt vật liệu tấm**

Vật liệu gia công	Bề dày (mm)	Khí công tác	Vận tốc cắt (m/ph)	Vết cắt (mm)
Thép	1	Oxy	3	0,1
Thép tấm mạ kẽm	0,75	Oxy	3,5	0,1
Hợp kim Cr+Ni+Fe	1,0	Oxy	1,5	0,1
Hợp kim titan	2,0	Oxy	18	0,2
	10	Oxy	2,8	1,5
	40	Oxy	0,5	3,5
Thủy tinh hữu cơ	10	Nitơ	0,8	0,7
Vải bông	15	Nitơ	0,9	0,5
Gỗ tấm	18	Nitơ	0,2	0,7
Oxyt nhôm	1	Oxy	3	0,1
Thủy tinh thạch anh	1,9	Oxy	0,6	0,3

## PHỤ LỤC

### CÁC BẢNG TRA CỨU KHI THIẾT KẾ

**Bảng PL.1.** Quan hệ bề dày ở tâm d thấu kính phân kỳ  
với đường kính của thấu kính

Bề dày thấu kính d (mm)				
Đường kính TK D[mm]	Thấu kính D' > 0	Thấu kính D' < 0	TK- menis D' > 0	TK-menis D' < 0
Đến 10	2 ÷ 3	1 ÷ 2	2 ÷ 3,5	1 ÷ 2
Trên 10 ÷ 30	2,5 ÷ 8	1,5 ÷ 3	3 ÷ 9	1,5 ÷ 3,5
Trên 30 ÷ 50	6 ÷ 12	2 ÷ 5	7 ÷ 14	3 ÷ 6
Trên 50 ÷ 80	10 ÷ 20	4 ÷ 9	12 ÷ 20	5 ÷ 10
Trên 80 ÷ 120	18 ÷ 25	7 ÷ 10	18 ÷ 26	8 ÷ 12
Trên 120 ÷ 180	22 ÷ 30	9 ÷ 14	22 ÷ 32	10 ÷ 15
Trên 180 ÷ 260	28 ÷ 35	12 ÷ 20	28 ÷ 36	14 ÷ 22

**Bảng PL.2.** Độ lớn vết mép của thấu kính quang học

Đường kính Thấu kính D (mm)	Độ lớn m của mép vết (mm)		
	Để kẹp		Miết
	Đơn	Dính hai thấu kính	
đến 6	$0,1^{+0,1}$		$0,1^{+0,2}$
Từ 6 ÷ 10		$0,1^{+0,1}$	$0,3^{+0,2}$
10 ÷ 18	$0,2^{+0,2}$		$0,4^{+0,2}$
18 ÷ 30		$0,2^{+0,2}$	$0,5^{+0,3}$
30 ÷ 50	$0,3^{+0,3}$		$0,7^{+0,5}$
50 ÷ 80		$0,3^{+0,3}$	$1,0^{+0,5}$
80 ÷ 120	$0,5^{+0,5}$		$1,0^{+0,5}$
120 ÷ 180			$1,0^{+0,5}$
180 ÷ 260	$0,7^{+0,7}$		$1,0^{+0,5}$
260 ÷ 360	$1^{+0,8}$	$0,5^{+0,5}$	$1,0^{+0,5}$
360 ÷ 500	$1,2^{+1,0}$	$0,8^{+0,8}$	$1,0^{+0,5}$
500	$1,5^{+1,5}$	$1^{+1,5}$	$1,0^{+0,5}$

Tài liệu tham khảo [9].

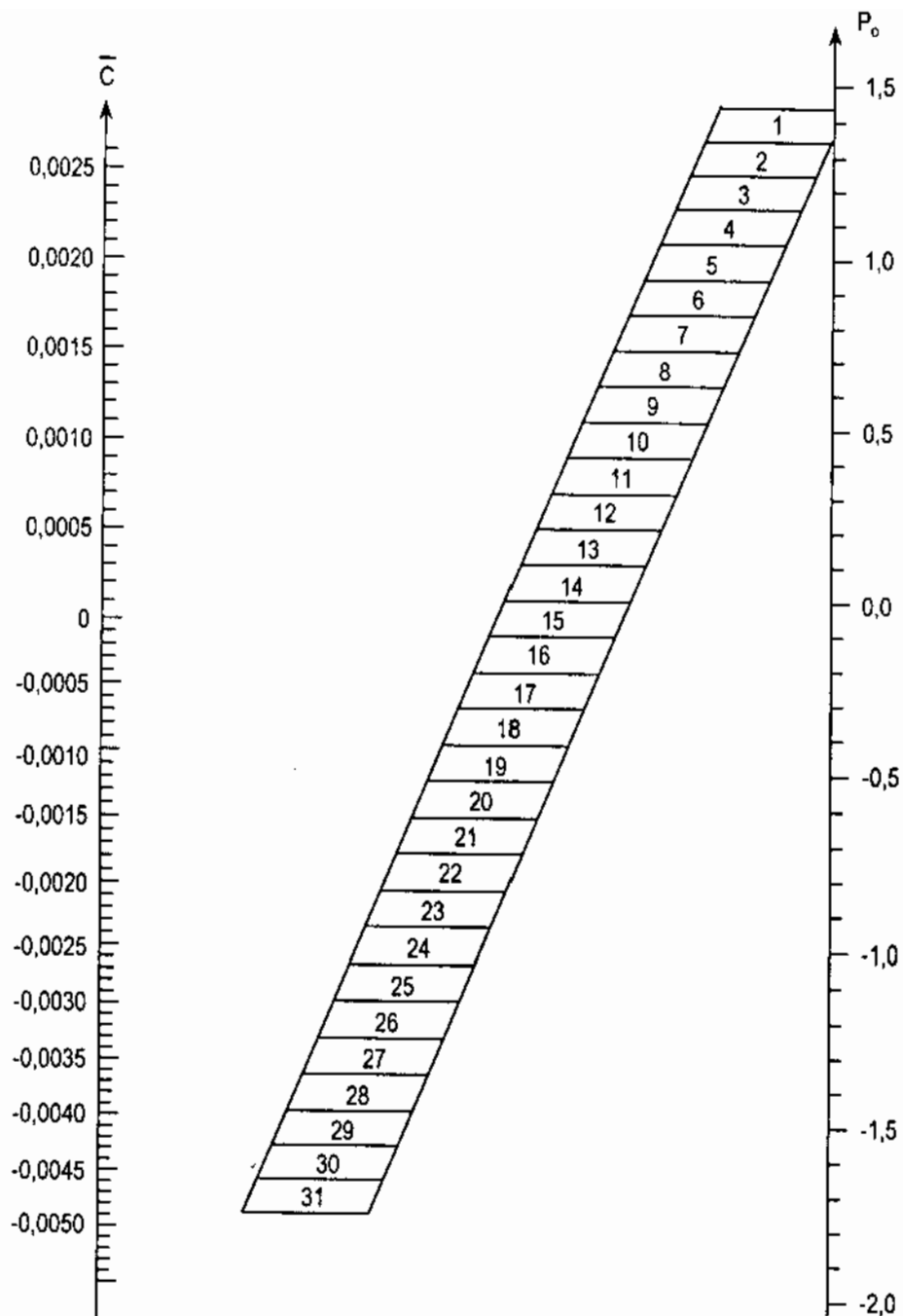
**Bảng PL.3.** Góc vết mép phụ thuộc vào tỷ số  $\frac{D}{R}$

Đường kính thấu kính Bán kính cong mặt cầu $= \frac{D}{R}$	Góc vết mép $\alpha$		
	Bề mặt lồi	Bề mặt lõm	Mặt phẳng
đến 0,6	$45^\circ$	$45^\circ$	$45^\circ$
từ 0,6 ÷ 1,5	$30^\circ$	$60^\circ$	
trên 1,5		$90^\circ$	

**Bảng PL.4. Một số viễn vật kính (Nga)**

STT	$r_1$	$r_2$	$r_3$	$d_1$	$d_2$	Thấu kính		$D_p$	$f'$
						TK1	TK2		
1	18,88	8,95	-203,2	0,8	2	F101	Bk108	5	36,06
2	62,88	-47,64	-144,9	4	2	K8	TF2	24	104,98
3	71,12	-45,29	-139,3	4	2	Ki08	TF101	24	111,71
4	62,23	-52,97	-255,9	3,5	2	K8	TF1	18	119,97
5	118,03	-46,13	-201,4	6	3	BK110	F104	23	150,5
6	196,79	-41,3	-98,63	2,8	1,6	K8	F1	12	154,3
7	139,09	-68,39	-177,8	4	2	TK2	TF3	15,7	164,99
8	103,72	-89,71	-434,5	2,5	1,5	K8	TF1	18	199,7
9	292,4	79,78	-161,8	2	3	F4	KF4	18	250
10	319,9	-66,22	-159,2	4,4	2,7	K8	F1	21	250,4
11	363,1	-74,82	-179,5	5	3,1	K8	F1	21	283
12	425,6	-87,9	-210,9	5,8	3,6	K8	F1	21	332
13	270,4	112,62	-542,9	3,6	5,8	F1	K8	25	426,67
14	368,1	-267,3	-816,6	4,4	3,9	K8	TF2	25	610,04
15	570,2	-363,1	-879,0	8	6	BK108	TF2	58	768
16	578,1	-415,0	-1786	20	15	K8	F1	150	998,3
17	247,2	142,56	$\infty$	9	11	TF1	K2	80	559,3





**Toán đồ PL.5.** Tra hệ số k của cặp vật liệu thủy tinh.

**Bảng PL.6a. Các cặp thủy tinh (kron trước)**

Số k	Các cặp thủy tinh
1	TK8F2, TK6F2, TK9F2
2	
3	TK16F13, TK8F13
4	TK16F4, TK9F4
5	TK8F4
6	
7	
8	TK23F1, TK23F2, TK23TF5, TK16TF1, K2TF5, TK2F1
9	TK23TF4, TK23TF3, TK16TF12, BK8TF5, TK23F4, K2TF4, TK16TF4
10	TK1TF5, TK16TF2, TK16TF3, K8TF4, BK8TF4, TK1TF4, TK23TF2, TK23TF1
11	TK9BF12, K2TF3, BK8TF3, TK8TF11, TK1TF3, BK4TF5, TK8TF5, TK9TF1
12	K8TF3, BK6TF5, TK2BF5, TK8TF4, K14TF5, TK1PF10, BK4TF4, TK2TF4, TK9TF4, TK8TF3, TK9TF5, TK8TF12
13	BK6TF4, TK8TF2, K14TF4, TK9TF3, BK8TF2, KF4TF5, BK10TF5, TK1TF2
14	TK9TF2, BK4TF3, TK2TF3, TK1TF1, BK10TF4, BK6TF3, K2TF2, KF4F4, BK8TF1
15	TK1F1, TK23BF12, BF7TF5, K8TF2, K14TF3, TK1F4, TK1F13, TK1F2
16	BK4TF4, BK10PF6, TK2TF3, BK10TF3, BK8F4, BK8F1, BK8F2, KF4TF3 K2TF1
17	K8TF1, TK2F1, TK2TF1, TK2F2, BK4TF2, BK6TF2, TK2F4, TK2F13, BF7TF3
18	BK8IF6, BK10TF2, K2F4
19	K14TF2, K8F4, K2F13, BK6TF1, BK4TF1, K8F13, K2F2, K8F2, BK10TF1, BK10F2, K2F1, BK6LF2, BK4 F13
20	K8F1, BF7TF2, KF4TF2, BK10 F1
21	BK10F4, BK2TF1, BK6F4, BK6F13, BK4F4, BK6F2, BK10F13, BF7F1, BF7TF2, BF7F2, BF7F13, BF7F1
22	BK4F2, BK4F1, TK1BF12, KF4TF1, BK8TF12, BK6F1
23	K14F4
24	K14F13, K14F2, K14F1
25	K2BF12, K8LF6, KF4F4, K2LF6, TK2BF12, K8BF12
26	KF4F13, BK6PF6, KF4F2, BK4LF2
27	BK4LF6, K8LF2
28	BK4BF12, BK6BF12, K2LF2
29	BK10BF12
30	
31	BF7BF12

**Bảng PL.6b. Các cặp thủy tinh (flin trước)**

Số k	Các cặp thủy tinh
1	F2TK8, F13TK9, F2TK16
2	F13TK16
3	F13TK8
4	F4TK9
5	F4TK16, F4TK8, TF5TK1
6	TF4K2, TF5BK8, TF5TK23
7	TF4TK23, TF5K8, TF4BK8, F1TK23, TF5TK16, F2TK23, TF1TK16, TF4TK16
8	TF4K8, TF3TK23, PF6TK2, TF4TK1, TF3TK16, F4TK23, BF12TK16, TF12TK16, TF3K2
9	TF5BK4, TF5BK6, TF4K14, TF5TK8, TF2TK23, TF3TK1, TF5K14, TF5TK2
10	TF4BK4, TF5TK2, TF5TK9, TF4TK8, TF5KF4, TF4TK2, TF4BK6, TF1TK16, TF1TK9, BF12TK9
11	TF3TK8, TF4TK2, TF5BK10, TF3BK8, TF2TK8, BF12TK8, TF1TK9, LF6TK1, TF2BK8
12	TF4KF4, TF3BK4, TF3BK6, TF4BK10, TF3K14, TF2TK1, TF2TK9, TF1BK8, TF2K2, TF3TK2
13	TF2K8, TF1TK1, TF3TK1
14	F2TK1, F13TK1, TF3KF4, TF1K2, TF2TK2, F4BK8, BF12TK23
15	F2BK8, TF1K8, B1TK1, F4TK1, TF2BK4, LF6BK8, TF1BK2, F13BF7, F1BK8, TF2BK6, F13BK8
16	F13TK2, F1TK2, F2TK2, F4TK2
17	TF2K14, TF2BK10, F4K8, F13K8, PF6BK8, TF1BK6, TF1BK4, F4K2, F13K2
18	TF1BK10, TF2BF7, TF2KF4, F1K8, F1K2, F2K8, F2K2
19	F4BK9, F13BK10, TF1BF7, F1BK10, F7BK10, TF1K4, LF2BK6
20	F4BK4, F13BK6, F1BF7, F13BF7, F2BK6, F4BF7, F2BF7, F1BK6, F2BK4
21	TF1KF4, F1BK4, BF12TK1, BF12BK8, F2BK10
22	F4K14, F13K4, F2K14
23	F1K14, F4KF4, BF12K2
24	BF12K8, LF6K8, LF6K2, F2KF4, F1KF4, F13KF4, BF12TK2
25	LF6BK8, F13BK4
26	LF2K8, LF2BK14, LF6BK4
27	BF12BK4, BF12BK6, LF2K2
28	BF12BK10, BF12K14
29	LF6K14
30	BF12BF7

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước

Loại TT	C	LF2			LF6		
		$n_D = 1,5480; v = 45,9$			$n_D = 1,5783; v = 41,7$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
K2 $n_D = 1,5004$ $v = 66,0$	-0,0050	-0,29	2,530	-5,97	0,35	2,150	-4,81
	-0,0025	-2,18	2,907	-7,17	-1,02	2,433	-5,71
	0,0	-4,84	3,284	-8,38	-2,93	2,716	-6,62
	0,0025	-8,14	3,661	-9,61	-5,46	2,999	-7,55
K14 $n_D = 1,5147$ $v = 60,6$	0,0050	-1,98	3,176	-7,81	-0,96	2,538	-5,90
	-0,0025	-4,77	3,649	-9,29	-2,87	2,872	-6,95
	0,0	-8,63	4,122	-10,78	-5,56	3,206	-8,01
	0,0025	-13,68	4,595	-12,28	-9,09	3,540	-9,09
K8 $n_D = 1,5163$ $v = 64,1$	-0,0050	-0,02	2,714	-6,40	0,31	2,265	-5,06
	-0,0025	-1,56	3,118	-7,65	-0,96	2,564	-5,99
	0,0	-3,68	3,522	-8,90	-2,71	2,862	-6,93
	0,0025	-6,51	3,926	-10,17	-5,00	3,160	-7,87
KF4 $n_D = 1,5181$ $v = 58,9$	-0,0050	-2,97	3,491	-8,67	-1,52	2,710	-6,37
	-0,0025	-6,33	4,011	-10,28	-3,85	3,067	-7,49
	0,0	-10,92	4,531	-11,90	-6,98	3,424	-8,62
	0,0025	-16,90	5,054	-13,54	-11,05	3,781	-9,76
BK4 $n_D = 1,5302$ $v = 60,5$	-0,0050	-0,09	3,193	-7,64	-0,16	2,547	-5,78
	-0,0025	-1,50	3,668	-9,05	-1,58	2,883	-6,80
	0,0	-3,46	4,144	-10,48	-3,52	3,218	-7,83
	0,0025	-5,99	4,620	-11,92	-6,04	3,553	-8,87
BK6 $n_D = 1,5399$ $v = 59,7$	-0,0050	0,84	3,333	-7,96	0,03	2,625	-5,96
	-0,0025	0,12	3,830	-9,41	-1,21	2,971	-6,99
	0,0	-0,88	4,326	-10,86	-2,88	3,317	-8,03
	0,0025	-2,16	4,822	-12,31	-5,04	3,663	-9,08
K8 $n_D = 1,5467$ $v = 62,8$	-0,0050	1,80	2,863	-6,47	0,96	2,356	-5,08
	-0,0025	1,73	3,290	-7,68	0,30	2,666	-5,98
	0,0	1,64	3,716	-8,89	-0,60	2,975	-6,89
	0,0025	1,53	4,142	-10,10	-1,77	3,286	-7,80

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	LF2 $n_D = 1,5480; \nu = 45,9$			LF6 $n_D = 1,5783; \nu = 41,7$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
TK1 $n_D = 1,5638$ $\nu = 60,8$	-0,0050	3,22	3,144	-7,05	1,27	2,519	-5,41
	-0,0025	4,33	3,613	-8,31	0,91	2,851	-6,34
	0,0	5,68	4,081	-9,56	0,42	3,183	-7,28
	0,0025	7,51	4,549	-10,81	-0,21	3,515	-8,22
BK10 $n_D = 1,5688$ $\nu = 56,0$	-0,0050				0,98	3,108	-6,99
	-0,0025				0,50	3,508	-8,13
	0,0				-0,14	3,916	-9,27
	0,0025				-0,95	4,324	-10,42
TK2 $n_D = 1,5724$ $\nu = 57,5$	-0,0050				1,41	2,880	-6,31
	-0,0025				1,18	3,260	-7,39
	0,0				0,88	3,630	-8,44
	0,0025				0,51	4,018	-9,49

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	F1 $n_D = 1,6128; \nu = 36,9$			F2 $n_D = 1,6164; \nu = 36,6$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
K2 $n_D = 1,5004$ $\nu = 66,0$	-0,0050	1,03	1,850	-3,88	1,06	1,834	-3,82
	-0,0025	0,19	2,059	-4,54	0,23	2,040	-4,47
	0,0	-0,97	2,268	-5,21	-0,90	2,245	-5,13
	0,0025	-2,48	2,477	-5,89	-2,38	2,450	-5,80
K14 $n_D = 1,5147$ $\nu = 60,6$	-0,0050	0,32	2,085	-4,52	0,38	2,063	-4,55
	-0,0025	-0,80	2,321	-5,26	-0,74	2,294	-5,17
	0,0	-2,33	2,257	-6,01	-2,23	2,525	-5,90
	0,0025	-4,33	2,793	-6,76	-4,16	2,756	-6,64
K8 $n_D = 1,5163$ $\nu = 64,1$	-0,0050	0,92	1,922	-4,02	0,96	1,904	-3,95
	-0,0025	0,11	2,140	-4,70	0,18	2,118	-4,95
	0,0	-1,00	2,357	-5,38	-0,89	2,331	-5,28
	0,0025	-2,44	2,574	-6,07	-2,28	2,544	-5,95

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	F1			F2		
		$n_D = 1,6128; v = 36,9$			$n_D = 1,6164; v = 36,6$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
KF4 $n_D = 1,5181$ $v = 58,9$	-0,0050	0,00	2,183	-4,79	0,04	2,158	-4,72
	-0,0025	-1,29	2,430	-5,56	-1,23	2,399	-5,48
	0,0	-3,03	2,677	-6,34	-2,92	2,641	-6,25
	0,0025	-5,26	2,924	-7,13	-5,10	2,883	-7,02
BK4 $n_D = 1,5302$ $v = 60,5$	-0,0050	0,58	2,091	-4,43	0,61	2,068	-4,36
	-0,0025	-0,33	2,327	-5,15	-0,29	2,299	-5,07
	0,0	-1,56	2,564	-5,88	-1,49	2,531	-5,78
	0,0025	-3,14	2,801	-6,61	-3,05	2,763	-6,50
BK6 $n_D = 1,5399$ $v = 59,7$	-0,0050	0,59	2,135	-4,52	0,63	2,111	-4,43
	-0,0025	-0,26	2,376	-5,25	-0,21	2,348	-5,14
	0,0	-1,40	2,618	-5,98	-1,32	2,584	-5,86
	0,0025	-2,87	2,860	-6,72	-2,75	2,820	-6,58
BK8 $n_D = 1,5467$ $v = 62,8$	-0,0050	1,10	1,978	-4,00	1,10	1,958	-3,94
	-0,0025	0,55	2,201	-4,66	0,55	2,178	-4,59
	0,0	-0,20	2,425	-5,32	-0,19	2,397	-5,24
	0,0025	-1,17	2,649	-5,99	-1,55	2,616	-5,89
TK1 $n_D = 1,5638$ $v = 60,8$	-0,0050	1,10	2,075	-4,18	1,10	2,052	-4,12
	-0,0025	0,64	2,309	-4,85	0,63	2,282	-4,78
	0,0	0,02	2,544	-5,53	0,00	2,512	-5,44
	0,0025	-0,79	2,799	-6,21	-0,81	2,742	-6,11
BK10 $n_D = 1,5688$ $v = 56,0$	-0,0050	0,58	2,391	-5,05	0,57	2,358	-4,96
	-0,0025	-0,13	2,662	-5,83	-0,15	2,623	-5,72
	0,0	-1,76	2,932	-6,61	-1,09	2,887	-6,48
	0,0025	-2,23	3,202	-7,39	-2,28	3,151	-7,25
TK2 $n_D = 1,5724$ $v = 57,5$	-0,0050	0,89	2,276	-4,70	0,88	2,248	-4,62
	-0,0025	0,36	2,534	-5,42	0,33	2,499	-5,33
	0,0	-0,34	2,791	-6,15	-0,38	2,751	-6,05
	0,0025	-1,23	3,048	-6,88	-1,30	3,003	-6,77

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	F1			F2		
		$n_D = 1,6128; \nu = 36,9$			$n_D = 1,6164; \nu = 36,6$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
BF7 $n_D = 1,5795$ $\nu = 53,9$	-0,0050	0,49	2,586	-5,55	0,47	2,546	-5,41
	-0,0025	-0,21	2,878	-6,37	-0,24	2,831	-6,22
	0,0	-1,12	3,171	-7,20	-1,16	3,116	-7,03
	0,0025	-2,26	3,464	-8,04	-2,32	3,401	-7,81
TK23 $n_D = 1,5891$ $\nu = 61,2$	-0,0050	1,44	2,054	-3,98	1,38	2,033	-3,93
	-0,0025	1,21	2,287	-4,62	1,16	2,260	-4,55
	0,0	0,94	2,519	-5,26	0,88	2,488	-5,18
	0,0025	0,60	2,751	-5,90	0,50	2,716	-5,81
BF25 $n_D = 1,6076$ $\nu = 46,1$	-0,0050	0,64	4,087	-9,33	0,12	3,965	-8,97
	-0,0025	0,15	4,549	-10,54	-0,60	4,409	-10,20
	0,0	-0,45	5,011	-11,79	-1,49	4,853	-11,40
	0,0025	-1,16	5,473	-13,02	-2,59	5,297	-12,60
TK16 $n_D = 1,6126$ $\nu = 58,3$	-0,0050	1,62	2,221	-4,31	1,56	2,195	-4,24
	-0,0025	1,62	1,473	-4,97	1,52	2,441	-4,89
	0,0	1,61	2,724	-5,63	1,47	2,687	-5,54
	0,0025	1,61	2,975	-6,29	1,41	2,933	-6,19
TK8 $n_D = 1,6140$ $\nu = 55,1$	-0,0050	1,65	2,469	-4,95	1,56	2,433	-4,86
	-0,0025	1,67	2,749	-5,68	1,52	2,706	-5,57
	0,0	1,69	3,028	-6,41	1,48	2,978	-6,29
	0,0025	1,72	3,307	-7,15	1,42	3,250	-7,01
TK9 $n_D = 1,6171$ $\nu = 54,0$	-0,0050	1,75	2,275	-5,21	1,63	2,536	-5,11
	-0,0025	1,82	2,867	-5,98	1,61	2,820	-5,85
	0,0	1,92	3,158	-6,73	1,65	3,104	-6,59
	0,0025	2,04	3,449	-7,49	1,67	3,388	-7,34

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	F13			F4		
		$n_D = 1,6199; v = 36,3$			$n_D = 1,6242; v = 35,9$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
K2 $n_D = 1,5004$ $v = 66,0$	-0,0050	1,08	1,819	-3,78	1,13	1,799	-3,72
	-0,0025	0,28	2,020	-4,41	0,35	1,996	-4,34
	0,0	-0,82	2,222	-5,05	-0,72	2,193	-4,97
	0,0025	-2,27	2,424	-5,70	-2,11	2,390	-5,61
K14 $n_D = 1,5147$ $v = 60,6$	-0,0050	0,42	2,041	-4,38	0,48	2,013	-4,30
	-0,0025	-0,67	2,268	-5,09	-0,56	2,233	-4,99
	0,0	-3,12	2,494	-5,81	-1,95	2,453	-5,69
	0,0025	-3,99	2,720	-6,53	-3,75	2,673	-6,39
K8 $n_D = 1,5163$ $v = 64,1$	-0,0050	0,98	1,887	-3,90	1,01	1,865	-3,84
	-0,0025	0,21	2,097	-4,55	0,26	2,069	-4,48
	0,0	-0,83	2,306	-5,20	-0,76	2,273	-5,12
	0,0025	-2,19	2,515	-5,86	-2,08	2,477	-5,78
KF4 $n_D = 1,5181$ $v = 58,9$	-0,0050	0,09	2,133	-4,64	0,17	2,101	-4,55
	-0,0025	-1,14	2,370	-5,39	-0,98	2,331	-5,25
	0,0	-2,78	2,606	-6,14	-2,53	2,561	-5,97
	0,0025	-4,89	2,842	-6,89	-4,56	2,791	-6,70
BK4 $n_D = 1,5302$ $v = 60,5$	-0,0050	0,64	2,046	-4,30	0,67	2,018	-4,22
	-0,0025	-0,24	2,273	-4,99	-0,17	2,238	-4,89
	0,0	-1,42	2,500	-5,69	-1,31	2,469	-5,57
	0,0025	-2,94	2,727	-6,39	-2,78	2,680	-6,25
BK6 $n_D = 1,5399$ $v = 59,7$	-0,0050	0,65	2,088	-4,36	0,66	2,058	-4,29
	-0,0025	-0,17	2,319	-5,06	-0,14	2,283	-4,97
	0,0	-1,27	2,551	-5,76	-1,21	2,508	-5,66
	0,0025	-2,68	2,783	-6,47	-2,59	2,733	-6,35
BK8 $n_D = 1,5467$ $v = 62,8$	-0,0050	1,10	1,940	-3,89	1,12	1,916	-3,82
	-0,0025	0,56	2,155	-4,52	0,58	2,125	-4,44
	0,0	-0,17	2,370	-5,16	-0,14	2,335	-5,06
	0,0025	-1,12	2,585	-5,80	-1,07	2,545	-5,69



**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	F13			F4		
		$n_D = 1,6199; \nu = 36,3$			$n_D = 1,6242; \nu = 35,9$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
TK1 $n_D = 1,5638$ $\nu = 60,8$	-0,0050	1,09	2,032	-4,06	1,09	2,004	-3,98
	-0,0025	0,62	2,257	-4,71	0,62	2,223	-4,64
	0,0	-0,01	2,482	-5,36	-0,01	2,442	-5,21
	0,0025	-0,82	2,707	-6,01	-0,82	2,661	-5,88
BK10 $n_D = 1,5688$ $\nu = 56,0$	-0,0050	0,56	2,327	-4,87	0,57	2,286	-4,76
	-0,0025	-0,16	2,585	-5,61	-0,15	2,536	-5,48
	0,0	-1,10	2,843	-6,36	-1,07	2,786	-6,20
	0,0025	-2,29	3,101	-7,12	-2,25	3,036	-6,93
TK2 $n_D = 1,5724$ $\nu = 57,5$	-0,0050	0,86	2,220	-4,54	0,86	2,184	-4,45
	-0,0025	0,31	2,466	-5,24	0,31	2,423	-5,13
	0,0	-0,41	2,712	-5,95	-0,41	2,662	-5,81
	0,0025	-1,33	2,958	-6,66	-1,34	2,901	-6,50
BF7 $n_D = 1,5795$ $\nu = 53,9$	-0,0050	0,44	2,507	-5,31	0,41	2,457	-5,20
	-0,0025	-0,28	2,785	-6,10	-0,32	2,725	-5,96
	0,0	-1,22	3,063	-6,89	-1,27	2,994	-6,73
	0,0025	-2,40	3,341	-7,68	-2,47	3,263	-7,51
TK23 $n_D = 1,5891$ $\nu = 61,2$	-0,0050	1,36	2,012	-3,87	1,34	1,985	-3,80
	-0,0025	1,13	2,235	-4,48	1,10	2,209	-4,39
	0,0	0,82	2,458	-5,10	0,78	2,419	-4,99
	0,0025	0,43	2,681	-5,72	0,36	2,636	-5,60
BF25 $n_D = 1,6076$ $\nu = 46,1$	-0,0050	-0,25	3,850	-8,72	-0,58	3,708	-8,31
	-0,0025	-1,16	4,277	-9,87	-1,65	4,114	-9,46
	0,0	-2,28	4,704	-11,03	-2,95	4,520	-10,57
	0,0025	-3,64	5,131	-12,19	-4,54	4,925	-11,68
TK16 $n_D = 1,6126$ $\nu = 58,3$	-0,0050	1,51	2,169	-4,17	1,46	2,136	-4,09
	-0,0025	1,41	2,410	-4,80	1,36	2,369	-4,70
	0,0	1,35	2,650	-5,44	1,23	2,603	-5,31
	0,0025	1,24	2,890	-6,08	1,07	2,837	-5,93

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	F13			F4		
		$n_D = 1,6199; \nu = 36,3$			$n_D = 1,6242; \nu = 35,9$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
TK8 $n_D = 1,6140$ $\nu = 55,1$	-0,0050	1,47	2,399	-4,78	1,39	2,355	-4,66
	-0,0025	1,39	2,665	-5,48	1,27	2,612	-5,34
	0,0	1,29	2,931	-6,18	1,11	2,870	-6,03
	0,0025	1,16	3,197	6,89	0,90	3,128	-6,72
TK9 $n_D = 1,6171$ $\nu = 54,0$	-0,0050	1,53	2,497	-5,01	1,43	2,448	-4,87
	-0,0025	1,49	2,774	-5,47	1,32	2,715	-5,58
	0,0	1,43	3,051	-6,47	1,19	2,983	-6,30
	0,0025	1,35	3,328	-7,20	1,03	3,251	-7,02

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	BF12			TF1		
		$n_D = 1,6259; \nu = 39,1$			$n_D = 1,6475; \nu = 33,9$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
K2 $n_D = 1,5004$ $\nu = 66,0$	-0,0050	0,43	1,974	-4,26	1,29	1,708	-3,43
	-0,0025	-0,88	2,214	-5,04	0,65	1,882	-3,98
	0,0	-2,70	2,454	-5,82	-0,22	2,056	-4,53
	0,0025	-5,10	2,694	-6,61	-1,37	2,230	-5,10
K14 $n_D = 1,5147$ $\nu = 60,6$	-0,0050	-0,79	2,268	-5,10	0,77	1,885	-3,90
	-0,0025	-2,69	2,543	-5,97	-0,08	2,078	-4,51
	0,0	-5,28	2,819	-6,86	-1,21	2,270	-5,11
	0,0025	-8,66	3,095	-7,77	-2,67	2,463	-5,72
K8 $n_D = 1,5163$ $\nu = 64,1$	-0,0050	0,26	2,063	-4,46	1,17	1,762	-3,53
	-0,0025	-1,04	2,313	-5,24	0,55	1,942	-4,09
	0,0	-2,82	2,564	-6,04	-0,30	2,122	-4,65
	0,0025	-5,16	2,815	-6,85	-1,41	2,302	-5,21
KF4 $n_D = 1,5181$ $\nu = 58,9$	-0,0050	1,39	2,393	-5,44	0,54	1,957	-4,09
	-0,0025	-3,60	2,684	-6,36	-0,40	2,156	-4,71
	0,0	-6,59	2,975	-7,30	-1,66	2,356	-5,34
	0,0025	-10,47	3,266	-8,25	-3,27	2,556	-5,98

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	BF12			TF1		
		$n_D = 1,6259; \nu = 39,1$			$n_D = 1,6475; \nu = 33,9$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
BK4 $n_D = 1,5302$ $\nu = 60,5$	-0,0050	-0,37	2,274	-4,99	0,88	1,889	-3,83
	-0,0025	-1,94	2,551	-5,85	0,17	2,081	-4,41
	0,0	-4,05	2,827	-6,72	-0,78	2,274	-5,01
	0,0025	-6,80	3,103	-7,59	-2,01	2,467	-5,61
BK6 $n_D = 1,5399$ $\nu = 59,7$	-0,0050	-0,39	2,331	-5,12	0,85	1,922	-3,89
	-0,0025	-1,90	2,615	-5,98	0,16	2,118	-4,48
	0,0	-3,92	2,898	-6,85	-0,75	2,314	-5,08
	0,0025	-6,54	3,181	-7,74	-1,92	2,510	-5,69
BK8 $n_D = 1,5467$ $\nu = 62,8$	-0,0050	0,54	2,132	-4,45	1,22	1,805	-3,49
	-0,0025	-0,41	2,391	-5,22	0,73	1,989	-4,04
	0,0	-1,70	2,650	-6,00	0,08	2,173	-4,59
	0,0025	-3,38	2,909	-6,79	-0,74	2,357	-5,11
TK1 $n_D = 1,5638$ $\nu = 60,8$	-0,0050	0,51	2,254	-4,70	1,14	1,877	-3,63
	-0,0025	-0,36	2,528	-5,50	0,70	2,068	-4,18
	0,0	-1,52	2,802	-6,30	0,11	2,260	-4,73
	0,0025	-3,04	3,076	-7,11	-0,65	2,452	-5,29
BK10 $n_D = 1,5688$ $\nu = 56,0$	-0,0050	-0,66	2,666	-5,86	0,67	2,104	-4,25
	-0,0025	-2,12	2,990	-6,80	0,02	2,319	-4,87
	0,0	-4,06	3,314	-7,75	-0,83	3,532	-5,50
	0,0025	-6,53	3,638	-8,72	-1,91	2,749	-6,13
TK2 $n_D = 1,5724$ $\nu = 57,5$	-0,0050	0,00	2,514	-5,39	0,90	2,023	-4,00
	-0,0025	-1,09	2,820	-6,27	0,38	2,230	-4,59
	0,0	-2,53	3,125	-7,16	-0,31	2,436	-5,18
	0,0025	-4,39	3,430	-8,05	-1,18	2,642	-5,78
BF7 $n_D = 1,5795$ $\nu = 53,9$	-0,0050	-1,13	2,930	-6,56	0,47	2,238	-4,59
	-0,0025	-2,76	3,286	-7,59	-0,23	2,467	-5,25
	0,0	-4,9	3,642	-8,63	-1,13	2,695	-5,91
	0,0025	-7,62	3,998	-9,67	-2,27	2,923	-6,57

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	BF12 $n_D = 1,6259; \nu = 39,1$			TF1 $n_D = 1,6475; \nu = 33,9$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
TK23 $n_D = 1,5891$ $\nu = 61,2$	-0,0050	1,04	2,228	-4,47	1,29	1,862	-3,47
	-0,0025	0,59	2,498	-5,22	1,02	2,052	-3,69
	0,0	-0,02	2,769	-5,97	0,65	2,242	-4,52
	0,0025	-0,80	3,040	-6,73	0,18	2,432	-5,06
BF25 $n_D = 1,6076$ $\nu = 46,1$	-0,0050	-6,99	5,298	-12,76	-1,13	3,137	-6,88
	-0,0025	-11,24	5,942	-14,51	-2,42	3,458	-7,76
	0,0	-16,55	6,586	-16,31	-4,0	3,779	-8,66
	0,0025	-23,10	7,229	-18,13	-5,94	4,099	-9,55
TK16 $n_D = 1,6126$ $\nu = 58,3$	-0,0050	1,28	2,442	-4,90	1,30	1,984	-3,72
	-0,0025	1,07	2,738	-5,69	1,10	2,187	-4,27
	0,0	0,79	3,036	-6,48	0,84	2,389	-4,82
	0,0025	0,43	3,333	-7,28	0,51	2,591	-5,37
TK8 $n_D = 1,6140$ $\nu = 55,1$	-0,0050	1,10	2,771	-5,77	1,14	2,158	-4,16
	-0,0025	0,80	3,107	-6,66	0,88	2,379	-4,75
	0,0	0,42	3,444	-7,56	0,54	2,599	-5,34
	0,0025	-0,07	3,781	-8,47	0,11	2,819	-5,94
TK9 $n_D = 1,6171$ $\nu = 54,0$	-0,0050	1,14	2,916	-6,13	1,11	2,32	-4,34
	-0,0025	0,88	3,270	-7,07	0,84	2,459	-4,95
	0,0	0,55	3,624	-8,01	0,49	2,687	-5,56
	0,0025	0,12	3,978	-8,95	0,06	2,915	-6,17

**Bảng PL7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	TF2			TF3		
		$n_D = 1,6725; \nu = 32,2$			$n_D = 1,7172 \nu = 29,5$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
K2 $n_D = 1,5004$ $\nu = 66,0$	-0,0050	1,42	1,639	-3,22	1,61	1,541	-2,91
	-0,0025	0,87	1,796	-3,71	1,19	1,675	-3,33
	0,0	0,12	1,953	-4,21	0,62	1,808	-3,75
	0,0025	-0,85	2,110	-4,71	-0,11	1,941	-4,47
K14 $n_D = 1,5147$ $\nu = 60,6$	-0,0050	0,97	1,790	-3,61	1,25	1,662	-3,22
	-0,0025	0,25	1,962	-4,15	0,72	1,805	-3,66
	0,0	-0,70	1,134	-4,69	0,01	1,949	-4,11
	0,0025	-1,93	2,306	-5,24	-0,90	2,093	-4,56
K8 $n_D = 1,5163$ $\nu = 64,1$	-0,0050	1,29	1,686	-3,30	1,49	1,580	-2,96
	-0,0025	0,75	1,847	-3,79	1,07	1,716	-3,38
	0,0	0,02	2,009	-4,29	0,51	1,853	-3,80
	0,0025	-0,93	2,171	-4,80	-0,22	1,990	-4,23
KF4 $n_D = 1,5181$ $\nu = 58,9$	-0,0050	0,78	1,851	-3,77	1,12	1,708	-3,33
	-0,0025	-0,01	2,028	-4,32	0,54	1,855	-3,79
	0,0	-1,07	2,206	-4,88	-0,24	2,003	-4,25
	0,0025	-2,45	2,384	-5,44	-1,23	2,151	-4,71
BK4 $n_D = 1,5302$ $\nu = 60,5$	-0,0050	1,03	1,794	-3,55	1,26	1,664	-3,16
	-0,0025	0,41	1,966	-4,07	0,79	1,808	-3,59
	0,0	-0,41	2,138	-4,60	0,17	1,952	-4,03
	0,0025	-1,46	2,310	-5,13	-0,63	2,096	-4,47
BK6 $n_D = 1,5399$ $\nu = 59,7$	-0,0050	0,99	1,821	-3,59	1,21	1,658	-3,18
	-0,0025	0,39	1,996	-4,12	0,74	1,831	-3,62
	0,0	-0,41	2,171	-4,65	0,13	1,977	-4,06
	0,0025	-1,42	2,346	-5,18	-0,64	2,123	-4,50
BK8 $n_D = 1,5467$ $\nu = 62,8$	-0,0050	1,27	1,722	-3,26	1,41	1,608	-2,92
	-0,0025	0,84	1,887	-3,74	1,06	1,747	-3,33
	0,0	0,26	2,052	-4,23	0,59	1,886	-3,74
	0,0025	-0,48	2,217	-4,73	0,00	2,025	-4,16

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	TF2			TF3		
		$n_D = 1,6725; \nu = 32,2$			$n_D = 1,7172 \nu = 29,5$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
TK1 $n_D = 1,5638$ $\nu = 60,8$	-0,0050	1,19	1,784	-3,36	1,30	1,656	-3,00
	-0,0025	0,78	1,955	-3,86	0,96	1,799	-3,41
	0,0	0,23	2,126	-4,35	0,52	1,942	-3,82
	0,0025	-0,47	2,297	-4,85	-0,06	2,085	-4,24
BK10 $n_D = 1,5688$ $\nu = 56,0$	-0,0050	0,77	1,974	-3,88	0,98	1,801	-3,39
	-0,0025	0,17	2,164	-4,43	0,50	1,957	-3,84
	0,0	-0,60	2,353	-4,98	-0,12	2,113	-4,29
	0,0025	-1,57	2,542	-5,54	-0,88	2,269	-4,75
TK2 $n_D = 1,5724$ $\nu = 57,5$	-0,0050	0,96	1,907	-3,68	1,11	1,751	-3,23
	-0,0025	0,47	2,090	-4,20	0,71	1,903	-3,67
	0,0	-0,17	2,273	-4,73	0,18	2,051	-4,10
	0,0025	-0,98	2,456	-5,26	-0,48	2,205	-4,54
BF7 $n_D = 1,5795$ $\nu = 53,9$	-0,0050	-0,56	2,084	-4,16	0,79	1,883	-3,59
	-0,0025	-0,08	2,084	-4,73	0,27	2,046	-4,06
	0,0	-0,92	2,484	-5,31	-0,39	2,209	-4,53
	0,0025	-1,97	2,684	-5,90	-1,22	2,372	-5,00
TK23 $n_D = 1,5891$ $\nu = 61,2$	-0,0050	1,28	1,770	-3,22	1,33	1,646	-2,88
	-0,0025	1,00	1,940	-3,69	1,07	1,789	-3,27
	0,0	0,63	2,110	-4,17	0,73	1,931	-3,67
	0,0025	0,15	2,280	-4,65	0,30	2,073	-4,07
BF25 $n_D = 1,6076$ $\nu = 46,1$	-0,0050	-1,17	2,783	-5,92	-0,47	2,367	-4,79
	-0,0025	-2,28	3,050	-6,67	-1,42	2,572	-5,38
	0,0	-2,78	3,316	-7,42	-2,58	2,777	-5,95
	0,0025	-5,64	3,584	-8,19	-4,00	2,982	-6,54
TK16 $n_D = 1,6126$ $\nu = 58,3$	-0,0050	1,22	1,874	-3,42	1,23	1,725	-3,01
	-0,0025	0,98	2,054	-3,90	0,99	1,875	-3,41
	0,0	0,67	2,234	-4,38	0,67	2,024	-3,82
	0,0025	0,22	2,414	-4,87	0,27	2,173	-4,23

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	TF2			TF3		
		$n_D = 1,6725; v = 32,2$			$n_D = 1,7172 v = 29,5$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
TK8 $n_D = 1,6140$ $v = 55,1$	-0,0050	1,05	2,019	-3,79	1,06	1,835	-3,30
	-0,0025	0,73	2,212	-4,31	0,75	1,993	-3,73
	0,0	0,32	2,406	-4,84	0,35	2,152	-4,17
	0,0025	0,19	2,600	-5,37	-0,15	2,311	-4,61
TK9 $n_D = 1,6171$ $v = 54,0$	-0,0050	0,99	2,078	-3,94	1,00	1,879	-3,41
	-0,0025	0,66	2,278	-4,48	0,67	2,041	-3,85
	0,0	0,23	2,477	-5,02	0,25	2,204	-4,29
	0,0025	-0,31	2,676	-5,56	-0,28	2,367	-4,74
TK21 $n_D = 1,6577$ $v = 51,2$	-0,0050	1,26	2,261	-4,22	1,01	2,011	-3,60
	-0,0025	1,15	2,478	-4,77	0,78	2,185	-4,05
	0,0	1,01	2,695	-5,33	0,49	2,359	-4,50
	0,0025	0,84	2,912	-5,88	4,13	2,533	-4,96

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	TF4			TF5		
		$n_D = 1,7398; v = 28,2$			$n_D = 1,7550 v = 27,5$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
K2 $n_D = 1,5004$ $v = 66,0$	-0,0050	1,69	1,500	-2,78	1,73	1,478	-2,7
	-0,0025	1,33	1,623	-3,16	1,40	1,596	-3,07
	0,0	0,84	1,746	-3,55	0,95	1,714	-3,44
	0,0025	0,22	1,869	-3,94	0,36	1,832	-3,82
K14 $n_D = 1,5147$ $v = 60,6$	-0,0050	1,39	1,606	-3,04	1,44	1,579	-2,96
	-0,0025	0,93	1,738	-3,45	1,02	1,705	-3,35
	0,0	0,32	1,870	-3,86	0,46	1,831	-3,74
	0,0025	-0,45	2,002	-4,27	-0,26	1,957	-4,13
K8 $n_D = 1,5163$ $v = 64,1$	-0,0050	1,57	1,534	-2,83	1,61	1,510	-2,75
	-0,0025	1,21	1,660	-3,21	1,28	1,631	-3,12
	0,0	0,72	1,786	-3,60	0,83	1,751	-3,49
	0,0025	0,10	1,912	-3,99	0,24	1,871	-3,86

**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	TF4			TF5		
		$n_D = 1,7398; \nu = 28,2$			$n_D = 1,7550 \nu = 27,5$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
KF4 $n_D = 1,5181$ $\nu = 58,9$	-0,0050	1,27	1,648	-3,15	1,33	1,618	-3,06
	-0,0025	0,76	1,784	-3,56	0,87	1,747	-3,46
	0,0	0,10	1,919	-3,98	0,26	1,876	-3,86
	0,0025	-0,73	2,054	-4,41	-0,51	2,005	-4,26
BK4 $n_D = 1,5302$ $\nu = 60,5$	-0,0050	1,37	1,609	-2,99	1,42	1,581	-2,90
	-0,0025	0,96	1,741	-3,39	1,04	1,707	-3,28
	0,0	0,42	1,873	-3,79	0,54	1,833	-3,66
	0,0025	-0,27	2,005	-4,19	-0,10	1,959	-4,05
BK6 $n_D = 1,5399$ $\nu = 59,7$	-0,0050	1,31	1,628	-3,01	1,36	1,599	-2,93
	-0,0025	0,91	1,761	-3,41	0,99	1,727	-3,31
	0,0	0,38	1,895	-3,81	0,50	1,854	-3,49
	0,0025	0,29	2,029	-4,22	-0,13	1,981	-4,07
BK8 $n_D = 1,5467$ $\nu = 62,8$	-0,0050	1,47	1,559	-2,78	1,50	1,534	-2,50
	-0,0025	1,16	1,687	-3,15	1,21	1,657	-3,06
	0,0	0,75	1,815	-3,53	0,83	1,779	-3,42
	0,0025	0,23	1,943	-3,91	0,35	1,901	-3,79
TK1 $n_D = 1,5638$ $\nu = 60,8$	-0,0050	1,37	1,602	-2,84	1,40	1,575	-2,76
	-0,0025	1,07	1,734	-3,22	1,12	1,700	-3,12
	0,0	0,67	1,865	-3,60	0,74	1,826	-3,48
	0,0025	0,16	1,996	-3,98	0,26	1,952	-3,85
BK10 $n_D = 1,5688$ $\nu = 56,0$	-0,0050	1,08	1,730	-3,19	1,13	1,695	-3,09
	-0,0025	0,67	1,872	-3,60	0,75	1,830	-3,48
	0,0	0,14	2,044	-4,01	0,25	1,965	-3,87
	0,0025	-0,53	2,156	-4,42	-0,37	2,100	-4,26
TK2 $n_D = 1,5724$ $\nu = 57,5$	-0,0050	1,19	1,685	-0,05	1,23	1,653	-2,95
	-0,0025	0,84	1,824	-0,44	0,90	1,785	-3,33
	0,0	0,38	1,962	-3,84	0,47	1,917	-3,71
	0,0025	-0,19	2,100	-4,24	-0,08	2,049	-4,09



**Bảng PL.7.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	TF4			TF5		
		$n_D = 1,7398; \nu = 28,2$			$n_D = 1,7550 \nu = 27,5$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
BF7 $n_D = 1,5795$ $\nu = 53,9$	-0,0050	0,92	1,801	-3,36	0,97	1,760	-3,24
	-0,0025	0,46	1,949	-3,78	0,56	1,901	-3,64
	0,0	-0,12	2,097	-4,21	0,02	2,041	-4,05
	0,0025	-0,83	2,245	-4,64	-0,66	2,181	-4,46
TK23 $n_D = 1,5891$ $\nu = 61,2$	-0,0050	1,37	1,593	-2,73	1,38	1,566	-2,65
	-0,0025	1,13	1,724	-3,09	1,16	1,691	-3,00
	0,0	0,82	1,855	-3,46	0,87	1,816	-3,35
	0,0025	0,43	1,986	-3,83	0,50	1,941	-3,70
BF25 $n_D = 1,6076$ $\nu = 46,1$	-0,0050	-0,17	2,212	-4,36	-0,02	2,138	-4,16
	-0,0025	-0,96	2,394	-4,88	-0,75	2,308	-4,65
	0,0	-1,94	2,575	-5,40	-1,65	2,478	-5,15
	0,0025	-3,13	2,757	-5,92	-2,75	2,649	-5,62
TK16 $n_D = 1,6126$ $\nu = 58,3$	-0,0050	1,26	1,664	-2,85	1,27	1,633	-2,76
	-0,0025	1,03	1,800	-3,22	1,05	1,763	-3,41
	0,0	0,74	1,937	-3,59	0,77	1,893	-3,47
	0,0025	0,37	2,074	-3,97	0,42	2,023	-3,83
TK8 $n_D = 1,6140$ $\nu = 55,1$	-0,0050	1,11	1,759	-3,10	1,13	1,722	-3,00
	-0,0025	0,82	1,904	-3,49	0,86	1,859	-3,37
	0,0	0,45	2,048	-3,88	0,51	1,996	-4,74
	0,0025	0,00	2,192	-4,28	0,07	2,433	-4,12
TK9 $n_D = 1,6171$ $\nu = 54,0$	-0,0050	1,05	1,789	-3,19	1,07	1,758	-3,09
	-0,0025	0,75	1,945	-3,59	0,78	1,898	-3,47
	0,0	0,36	2,093	-4,00	0,41	2,038	-4,74
	0,0025	-0,13	2,241	-4,40	-0,05	2,178	-4,12
TK21 $n_D = 1,6577$ $\nu = 51,2$	-0,0050	1,00	1,912	-3,35	1,00	1,863	-3,22
	-0,0025	0,77	2,069	-3,76	0,76	2,012	-3,61
	0,0	0,47	2,226	-4,16	0,47	2,160	-4,00
	0,0025	0,11	2,383	-4,58	0,10	2,308	-4,38

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước

Loại TT	C	TF2			TF6		
		$n_D = 1,5480; \nu = 45,9$			$n_D = 1,5783 \nu = 41,7$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
K2 $n_D = 1,5004$ $\nu = 66,0$	-0,0050	-0,07	2,530	6,39	0,57	2,150	5,22
	-0,0025	-1,86	2,907	7,58	-0,71	2,433	6,12
	0,0	-4,41	3,294	8,79	-2,50	2,716	7,13
	0,0025	-7,85	3,661	10,01	-4,89	2,999	7,95
K14 $n_D = 1,5147$ $\nu = 60,6$	-0,0050	-1,72	3,176	8,23	-0,60	2,538	6,32
	-0,0025	-4,41	3,649	9,70	-2,47	2,872	7,36
	0,0	-8,12	4,122	11,19	-5,04	3,206	8,42
	0,0025	-13,03	4,595	12,69	-8,31	3,540	9,50
K8 $n_D = 1,5163$ $\nu = 64,1$	-0,0050	0,15	2,724	6,83	-0,52	2,272	5,48
	-0,0025	-1,33	3,130	8,70	-0,68	2,571	6,41
	0,0	-3,36	3,536	9,32	-2,32	2,870	7,34
	0,0025	-6,09	3,942	10,59	-4,51	3,169	8,28
KF4 $n_D = 1,5181$ $\nu = 58,9$	-0,0050	-2,68	3,470	9,09	-1,21	2,699	6,78
	-0,0025	-5,90	3,987	10,69	-3,41	3,055	7,91
	0,0	-10,37	4,504	12,31	-6,40	3,410	9,04
	0,0025	-16,19	5,021	13,95	-10,30	3,765	10,17
BK4 $n_D = 1,5302$ $\nu = 60,5$	-0,0050	0,04	3,193	8,07	0,05	2,547	6,20
	-0,0025	-1,31	3,668	9,48	-1,29	2,883	7,22
	0,0	-3,22	4,144	10,91	-3,13	3,218	8,25
	0,0025	-5,66	4,620	12,34	-5,55	3,553	9,28
BK6 $n_D = 1,5399$ $\nu = 59,7$	-0,0050	0,91	3,352	8,39	0,21	2,636	6,38
	-0,0025	0,21	3,851	9,84	-0,97	2,983	7,41
	0,0	-0,76	4,350	11,29	-2,56	3,330	8,45
	0,0025	-2,00	4,849	12,74	-4,63	3,677	9,50
BK8 $n_D = 1,5467$ $\nu = 62,8$	-0,0050	1,80	2,863	6,91	1,06	2,356	5,51
	-0,0025	1,74	3,290	8,12	0,44	2,666	6,41
	0,0	1,60	3,716	9,33	-0,40	2,976	7,32
	0,0025	1,55	4,142	10,53	-1,51	3,286	8,23

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh kron đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	TF2			TF6		
		$n_D = 1,5480; \nu = 45,9$			$n_D = 1,5783; \nu = 41,7$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
TK1 $n_D = 1,5638$ $\nu = 60,8$	-0,0050	3,22	3,144	7,49	1,33	2,519	5,84
	-0,0025	4,19	3,613	8,75	0,99	2,851	6,78
	0,0	5,49	4,081	10,01	0,52	3,183	7,72
	0,0025	7,26	4,549	11,26	-0,08	3,515	8,66
BK10 $n_D = 1,5688$ $\nu = 56,0$	-0,0050				1,05	3,108	7,42
	-0,0025				0,59	3,508	8,56
	0,0				-0,03	3,916	9,71
	0,0025				-0,82	4,324	10,86
TK2 $n_D = 1,5724$ $\nu = 57,5$	-0,0050				1,44	2,880	6,77
	-0,0025				1,22	3,260	7,82
	0,0				0,94	3,639	8,88
	0,0025				0,58	4,018	9,93

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	F1			F2		
		$n_D = 1,6128; \nu = 36,9$			$n_D = 1,6164; \nu = 36,6$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
K2 $n_D = 1,5004$ $\nu = 66,0$	-0,0050	1,23	1,850	4,29	1,26	1,834	4,24
	-0,0025	0,47	2,059	4,95	0,52	2,040	4,89
	0,0	-0,59	2,268	5,62	-0,52	2,245	5,54
	0,0025	-2,00	2,477	6,29	-1,89	2,450	6,20
K14 $n_D = 1,5147$ $\nu = 60,6$	-0,0050	0,58	2,085	4,93	0,62	2,063	4,87
	-0,0025	-0,46	2,321	5,67	-0,39	2,294	5,59
	0,0	-1,89	2,557	6,42	-1,78	2,525	6,32
	0,0025	-3,75	2,793	7,17	-3,58	2,756	7,05

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	F1			F2		
		$n_D = 1,6128; \nu = 36,9$			$n_D = 1,6164; \nu = 36,6$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
K8 $n_D = 1,5163$ $\nu = 64,1$	-0,0050	1,13	1,922	4,44	1,15	1,904	4,37
	-0,0025	0,40	2,140	5,12	0,44	2,118	5,03
	0,0	-0,62	2,357	5,80	-0,54	2,331	5,69
	0,0025	-1,96	2,574	6,48	-1,83	2,544	6,36
KF4 $n_D = 1,5181$ $\nu = 58,9$	-0,0050	0,27	2,183	5,20	0,31	2,158	5,14
	-0,0025	-0,88	2,430	5,98	0,85	2,399	5,90
	0,0	-2,51	2,677	6,76	-2,43	2,611	6,66
	0,0025	-4,63	2,924	7,54	-4,48	2,883	7,42
BK4 $n_D = 1,5302$ $\nu = 60,5$	-0,0050	0,78	2,091	4,85	0,81	2,068	4,78
	-0,0025	-0,05	2,327	5,57	-0,01	2,299	5,49
	0,0	-1,19	2,564	6,29	-1,12	2,531	6,20
	0,0025	-2,68	2,801	7,02	-2,58	2,763	6,92
BK8 $n_D = 1,5467$ $\nu = 62,8$	-0,0050	1,23	1,978	4,42	1,23	1,958	4,37
	-0,0025	0,73	2,201	5,08	0,74	2,178	5,01
	0,0	0,04	2,425	5,74	0,06	2,397	5,66
	0,0025	-0,86	2,649	6,40	-0,84	2,616	6,31
TK1 $n_D = 1,5638$ $\nu = 60,8$	-0,0050	1,21	2,075	4,61	1,21	2,052	4,55
	-0,0025	0,79	2,309	5,28	0,78	2,282	5,21
	0,0	0,21	2,544	5,95	0,20	2,512	5,87
	0,0025	-0,54	2,779	6,63	-0,56	2,742	6,54
BK10 $n_D = 1,5688$ $\nu = 56,0$	-0,0050	0,72	2,391	5,48	0,72	2,359	5,39
	-0,0025	0,07	2,662	6,25	0,05	2,623	6,15
	0,0	-0,80	2,932	7,03	-0,82	2,887	6,91
	0,0025	-1,92	3,202	7,81	-1,95	3,151	7,68
TK2 $n_D = 1,5724$ $\nu = 57,5$	-0,0050	1,01	2,276	5,13	1,00	2,248	5,05
	-0,0025	0,52	2,534	5,86	0,50	2,499	5,76
	0,0	-0,80	2,791	6,59	-0,17	2,751	6,48
	0,0025	-1,92	3,048	7,33	-1,03	3,003	7,20

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	F1			F2		
		$n_D = 1,6128; \nu = 36,9$			$n_D = 1,6164; \nu = 36,6$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
BF7 $n_D = 1,5795$ $\nu = 53,9$	-0,0050	0,63	2,586	5,98	0,61	2,546	5,85
	-0,0025	-0,01	2,878	6,81	-0,05	2,831	6,65
	0,0	-0,89	3,171	7,64	-0,92	3,116	7,46
	0,0025	-1,99	3,464	8,48	-2,02	3,401	8,27
TK23 $n_D = 1,5891$ $\nu = 61,2$	-0,0050	1,46	2,054	4,44	1,43	2,033	4,37
	-0,0025	1,28	2,287	5,07	1,24	2,260	4,99
	0,0	1,03	2,519	5,70	0,97	2,488	5,62
	0,0025	0,71	2,751	6,33	0,63	2,716	6,25
BF25 $n_D = 1,6076$ $\nu = 46,1$	-0,0050	0,70	4,081	9,74	0,21	3,965	9,45
	-0,0025	0,23	4,549	10,98	-0,48	4,409	10,64
	0,0	-0,34	5,011	12,22	-1,34	4,853	11,84
	0,0025	-1,04	5,473	13,46	-2,40	5,297	13,04
TK16 $n_D = 1,6126$ $\nu = 58,3$	-0,0050	1,62	2,221	4,75	1,57	2,195	4,69
	-0,0025	1,62	2,473	5,40	1,54	2,441	5,34
	0,0	1,61	2,724	6,06	1,49	2,687	5,99
	0,0025	1,61	2,975	6,73	1,43	2,933	6,64
TK8 $n_D = 1,6140$ $\nu = 55,1$	-0,0050	1,64	2,469	5,40	1,56	2,433	5,30
	-0,0025	1,66	2,749	6,13	1,53	2,706	6,02
	0,0	1,69	3,028	6,86	1,49	2,978	6,74
	0,0025	1,71	3,307	7,60	1,44	3,250	7,46
TK9 $n_D = 1,6171$ $\nu = 54,0$	-0,0050	1,73	2,575	5,66	1,62	2,536	5,56
	-0,0025	1,80	2,867	6,41	1,64	2,820	6,30
	0,0	1,89	3,158	7,17	1,65	3,104	7,04
	0,0025	2,01	3,449	7,93	1,66	3,388	7,79

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	F13 $n_D = 1,6199; \nu = 36,3$			F4 $n_D = 1,6242; \nu = 35,9$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
K2 $n_D = 1,5004$ $\nu = 66,0$	-0,0050	1,28	1,819	4,19	1,32	1,799	4,13
	-0,0025	0,57	2,020	4,83	0,63	1,996	4,75
	0,0	-0,44	2,222	5,47	-0,34	2,193	5,38
	0,0025	-1,78	2,424	6,12	-1,60	2,390	6,01
K14 $n_D = 1,5147$ $\nu = 60,6$	-0,0050	0,67	2,041	4,80	0,73	2,013	4,71
	-0,0025	-0,32	2,268	5,51	-0,21	2,233	5,40
	0,0	-1,67	2,494	6,22	-1,50	2,453	6,09
	0,0025	-3,42	2,720	6,94	-3,18	2,673	6,79
K8 $n_D = 1,5163$ $\nu = 64,1$	-0,0050	1,18	1,887	4,32	1,20	1,865	4,26
	-0,0025	0,48	2,097	4,97	0,52	2,069	4,89
	0,0	-0,48	2,306	5,62	-0,41	2,273	5,53
	0,0025	-1,74	2,515	6,27	-1,63	2,477	6,17
KF4 $n_D = 1,5181$ $\nu = 58,9$	-0,0050	0,37	2,133	5,06	0,46	2,101	4,95
	-0,0025	0,77	2,370	5,80	-0,61	2,331	5,67
	0,0	-2,30	2,606	6,55	-2,05	2,561	6,39
	0,0025	-4,27	2,842	7,30	-3,95	2,791	7,12
BK4 $n_D = 1,5302$ $\nu = 60,5$	-0,0050	0,84	2,046	4,72	0,88	2,018	4,63
	-0,0025	0,04	2,273	5,41	0,11	2,238	5,30
	0,0	-1,05	2,500	6,10	-0,94	2,459	5,98
	0,0025	-2,47	2,727	6,80	-2,31	2,680	6,66
BK6 $n_D = 1,5399$ $\nu = 59,7$	-0,0050	0,84	2,088	4,79	0,86	2,058	4,72
	-0,0025	0,09	2,319	5,48	0,13	2,283	5,39
	0,0	-0,93	2,551	6,18	-0,87	2,508	8,07
	0,0025	-2,24	2,783	6,88	-2,16	2,733	6,70

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\Phi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	F13			F4		
		$n_D = 1,6199; \nu = 36,3$			$n_D = 1,6242; \nu = 35,9$		
		$P_0$	$\Phi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\Phi_k$	$Q_0$
BK8 $n_D = 1,5467$ $\nu = 62,8$	-0,0050	1,24	1,940	4,31	1,26	1,916	4,24
	-0,0025	0,75	2,155	4,94	0,78	2,125	4,86
	0,0	0,08	2,307	5,58	0,12	2,335	5,48
	0,0025	-0,80	2,585	6,22	-0,75	2,545	6,11
TK1 $n_D = 1,5638$ $\nu = 60,8$	-0,0050	1,21	2,032	4,49	1,21	2,004	4,41
	-0,0025	0,78	2,257	5,14	0,79	2,223	5,04
	0,0	0,20	2,482	5,79	0,21	2,442	5,67
	0,0025	-0,56	2,707	6,44	-0,54	2,661	6,31
BK10 $n_D = 1,5688$ $\nu = 56,0$	-0,0050	0,72	2,327	5,30	0,73	2,286	5,19
	-0,0025	0,05	2,585	6,04	0,08	2,536	5,90
	0,0	-0,83	2,843	6,79	-0,79	2,786	6,62
	0,0025	-1,95	3,101	7,54	-1,90	3,036	7,35
TK2 $n_D = 1,5724$ $\nu = 57,5$	-0,0050	0,99	2,220	4,98	0,99	2,184	4,88
	-0,0025	0,49	2,466	5,68	0,49	2,423	5,56
	0,0	-0,19	2,712	6,38	-0,18	2,662	6,24
	0,0025	-1,06	2,958	7,08	-1,05	2,901	6,93
BF7 $n_D = 1,5795$ $\nu = 53,9$	-0,0050	0,59	2,507	5,74	0,57	2,457	5,63
	-0,0025	-0,08	2,785	6,53	-0,11	2,725	6,39
	0,0	-0,96	3,063	7,32	-1,01	2,994	7,16
	0,0025	-2,08	3,341	8,11	-2,14	3,263	7,94
TK23 $n_D = 1,5891$ $\nu = 61,2$	-0,0050	1,42	2,012	4,31	1,40	1,985	4,24
	-0,0025	1,21	2,235	4,92	1,18	2,202	4,83
	0,0	0,93	2,458	5,53	0,89	2,419	5,43
	0,0025	0,57	2,681	6,15	0,51	2,636	6,03

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	F13			F4		
		$n_D = 1,6199; \nu = 36,3$			$n_D = 1,6242; \nu = 35,9$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
BF25 $n_D=1,6076$ $\nu=46,1$	-0,0050	-0,13	3,850	9,16	-0,43	3,708	8,78
	-0,0025	-1,00	4,277	10,31	-1,45	4,114	9,89
	0,0	-2,08	4,704	11,47	-2,71	4,520	11,00
	0,0025	-3,39	5,131	12,63	-4,24	4,925	12,11
TK16 $n_D=1,6126$ $\nu=58,3$	-0,0050	1,53	2,169	4,62	1,48	2,136	4,53
	-0,0025	1,47	2,410	5,25	1,39	2,369	5,15
	0,0	1,39	2,650	5,89	1,23	2,603	5,77
	0,0025	1,28	2,890	6,53	1,12	2,837	6,40
TK8 $n_D=1,6140$ $\nu=55,1$	-0,0050	1,49	2,399	5,22	1,42	2,355	5,11
	-0,0025	1,42	2,665	5,92	1,31	2,612	5,79
	0,0	1,32	2,931	6,63	1,16	2,870	6,47
	0,0025	1,20	3,197	7,34	0,96	3,128	7,16
TK9 $n_D=1,6171$ $\nu=54,0$	-0,0050	1,54	1,54	2,497	5,46	1,45	5,34
	-0,0025	1,50	1,50	2,774	6,18	1,35	6,04
	0,0	1,45	1,45	2,051	6,91	1,23	6,74
	0,0025	1,38	1,38	3,328	7,64	1,08	7,45



**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	BF12 $n_D = 1,6259; \nu = 39,1$			TF1 $n_D = 1,6475; \nu = 33,9$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
K2 $n_D = 1,5004$ $\nu = 66,0$	-0,0050	0,70	1,974	4,66	1,49	1,708	3,84
	-0,0025	-0,49	2,214	5,44	0,92	1,882	4,39
	0,0	-2,17	2,454	6,22	0,14	2,056	4,94
	0,0025	-4,41	2,694	7,01	-0,90	2,230	5,50
K14 $n_D = 1,5147$ $\nu = 60,6$	-0,0050	-0,43	2,268	5,51	1,01	1,885	4,32
	-0,0025	-2,19	2,543	6,38	0,25	2,078	4,92
	0,0	-4,62	2,819	7,27	-0,78	2,270	5,52
	0,0025	-7,08	3,095	8,17	-2,12	2,462	6,13
K8 $n_D = 1,5163$ $\nu = 64,1$	-0,0050	0,53	2,063	4,87	1,37	1,762	3,95
	-0,0025	-0,66	2,313	5,66	0,81	1,942	4,50
	0,0	-2,31	2,664	6,45	0,06	2,122	5,06
	0,0025	-4,51	2,815	7,25	-0,96	2,302	5,62
KF4 $n_D = 1,5181$ $\nu = 58,9$	-0,0050	-0,99	2,393	5,85	0,80	1,957	4,51
	-0,0025	-3,05	2,684	6,77	-0,05	2,156	5,13
	0,0	-5,86	2,975	7,70	-1,20	2,356	5,75
	0,0025	-9,53	3,266	8,65	-2,69	2,556	6,38
BK4 $n_D = 1,5302$ $\nu = 60,5$	-0,0050	-0,07	2,274	5,41	1,09	1,889	4,25
	-0,0025	-1,52	2,551	6,26	0,45	2,081	4,83
	0,0	-3,50	2,827	7,12	-0,41	2,274	5,42
	0,0025	-6,09	3,103	8,00	-1,54	2,467	6,02
BK6 $n_D = 1,5399$ $\nu = 59,7$	-0,0050	-0,10	2,331	5,54	1,05	1,922	4,31
	-0,0025	-1,50	2,615	6,40	0,43	2,118	4,90
	0,0	-3,40	2,898	7,27	-0,40	2,314	5,49
	0,0025	-5,88	3,181	8,15	-1,48	2,510	6,09

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	BF12			TF1		
		$n_D = 1,6259; \nu = 39,1$			$n_D = 1,6475; \nu = 33,9$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
BK8 $n_D = 1,5467$ $\nu = 62,8$	-0,0050	0,74	2,132	4,88	1,35	1,805	3,92
	-0,0025	-0,13	2,391	5,65	0,93	1,989	4,46
	0,0	-1,33	2,650	6,43	0,35	2,173	5,01
	0,0025	-2,90	2,909	7,21	-0,41	2,357	5,56
TK1 $n_D = 1,5638$ $\nu = 60,8$	-0,0050	0,69	2,254	5,13	1,27	1,877	4,05
	-0,0025	-0,11	2,528	5,92	0,88	2,068	4,60
	0,0	-1,20	2,802	6,72	0,35	2,260	5,15
	0,0025	-2,63	3,076	7,53	-0,35	2,452	5,71
BK10 $n_D = 1,5688$ $\nu = 56,0$	-0,0050	-0,41	2,666	6,28	0,85	2,104	4,68
	-0,0025	-1,78	2,990	7,23	0,26	2,319	5,29
	0,0	-3,61	3,314	8,18	-0,53	2,534	5,92
	0,0025	-5,96	3,638	9,14	-1,53	2,749	6,55
TK2 $n_D = 1,5724$ $\nu = 57,5$	-0,0050	0,21	2,514	5,82	1,05	2,023	4,43
	-0,0025	-0,81	2,820	6,70	0,58	2,230	5,02
	0,0	-2,17	3,125	7,58	-0,05	2,436	5,61
	0,0025	-3,93	3,430	8,47	-0,85	2,642	6,21
BF7 $n_D = 1,5795$ $\nu = 53,9$	-0,0050	-0,87	2,930	6,99	0,65	2,238	5,02
	-0,0025	-2,41	3,286	8,02	0,01	2,467	5,67
	0,0	-4,44	3,642	9,05	-0,82	2,695	6,33
	0,0025	-7,04	3,998	10,09	-1,88	2,923	6,99
TK23 $n_D = 1,5891$ $\nu = 61,2$	-0,0050	1,13	2,228	4,91	1,38	1,862	3,91
	-0,0025	0,72	2,498	5,66	1,14	2,052	4,43
	0,0	0,16	2,768	6,41	0,81	2,242	4,90
	0,0025	-0,58	3,040	7,17	0,38	2,432	5,49

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	BF12			TF1		
		$n_D = 1,6259; \nu = 39,1$			$n_D = 1,6475; \nu = 33,9$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
BF25 $n_D = 1,6076$ $\nu = 46,1$	-0,0050	-6,60	5,298	13,19	-0,89	3,137	7,29
	-0,0025	-10,72	5,942	14,95	-2,10	3,458	8,49
	0,0	-15,90	6,586	16,75	-3,61	3,779	9,08
	0,0025	-22,31	7,229	18,56	-5,45	4,099	9,98
TK16 $n_D = 1,6126$ $\nu = 58,3$	-0,0050	1,32	2,442	5,35	1,36	1,984	4,14
	-0,0025	1,12	2,739	6,14	1,18	2,187	4,68
	0,0	0,86	3,036	6,93	0,94	2,389	5,22
	0,0025	0,52	3,333	7,73	0,64	2,591	5,77
TK8 $n_D = 1,6140$ $\nu = 55,1$	-0,0050	1,16	2,771	6,21	1,22	2,158	4,60
	-0,0025	0,88	3,107	7,11	0,98	2,379	5,19
	0,0	0,51	3,444	8,01	0,67	2,599	5,78
	0,0025	0,04	3,781	8,91	0,27	2,819	6,38
TK9 $n_D = 1,6171$ $\nu = 54,0$	-0,0050	1,19	2,916	6,57	1,18	2,232	4,78
	-0,0025	0,94	3,270	7,51	0,94	2,459	5,39
	0,0	0,62	3,624	8,45	0,62	2,687	6,00
	0,0025	0,22	3,978	9,39	0,22	2,915	6,61

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	TF2 $n_D = 1,6725; \nu = 32,2$			TF3 $n_D = 1,7172; \nu = 29,5$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
K2 $n_D = 1,5004$ $\nu = 66,0$	-0,0050	1,62	1,639	3,63	1,80	4,511	3,32
	-0,0025	1,14	1,796	4,12	1,45	1,675	3,75
	0,0	0,48	1,953	4,61	0,97	1,808	4,15
	0,0025	0,39	2,110	5,11	0,33	1,911	4,75
K14 $n_D = 1,5147$ $\nu = 60,6$	-0,0050	1,21	1,790	4,03	1,49	1,662	3,63
	-0,0025	0,58	1,962	4,56	1,03	1,805	4,07
	0,0	0,28	2,134	5,09	0,41	1,949	4,54
	0,0025	-1,40	2,306	5,64	-0,39	2,093	4,95
K8 $n_D = 1,5163$ $\nu = 64,1$	-0,0050	1,49	1,686	3,71	1,68	1,580	3,38
	-0,0025	1,02	1,874	4,20	1,33	1,716	3,79
	0,0	0,37	2,009	4,70	0,85	1,853	4,21
	0,0025	0,49	2,171	5,21	0,21	1,990	4,64
KF4 $n_D = 1,5181$ $\nu = 58,9$	-0,0050	1,04	1,851	4,18	1,37	1,708	3,75
	-0,0025	0,33	2,028	4,73	0,87	1,855	4,29
	0,0	-0,62	2,206	5,28	0,19	2,003	4,65
	0,0025	-1,88	2,384	5,84	-0,69	2,151	5,11
BK4 $n_D = 1,5302$ $\nu = 60,5$	-0,0050	1,24	1,794	3,96	1,47	1,664	3,57
	-0,0025	0,70	1,966	4,48	1,07	1,808	4,00
	0,0	-0,03	2,138	5,01	0,53	1,952	4,44
	0,0025	-0,99	2,310	5,54	-0,18	2,096	4,88
BK6 $n_D = 1,5399$ $\nu = 59,7$	-0,0050	1,19	1,821	4,00	1,41	1,685	3,60
	-0,0025	0,66	1,996	4,53	1,02	1,831	4,03
	0,0	-0,05	2,171	5,06	0,49	1,977	4,47
	0,0025	-0,97	2,346	5,59	-0,20	2,123	4,94

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	TF2			TF3		
		$n_D = 1,6725; \nu = 32,2$			$n_D = 1,7172; \nu = 29,5$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
BK8 $n_D = 1,5467$ $\nu = 62,8$	-0,0050	1,43	1,722	3,68	1,57	1,608	3,34
	-0,0025	1,06	1,887	4,16	1,28	1,747	3,75
	0,0	0,55	2,052	4,65	0,88	1,886	4,16
	0,0025	0,12	2,217	5,44	0,36	2,025	4,57
TK1 $n_D = 1,5638$ $\nu = 60,8$	-0,0050	1,34	1,784	3,79	1,46	1,656	3,42
	-0,0025	0,98	1,955	4,28	1,18	1,799	3,83
	0,0	0,49	2,126	4,77	0,79	1,942	4,24
	0,0025	0,14	2,297	5,27	0,28	2,085	-4,66
BK10 $n_D = 1,5688$ $\nu = 56,0$	-0,0050	0,96	1,974	4,31	1,18	1,801	3,81
	-0,0025	0,43	2,164	4,86	0,77	1,957	4,26
	0,0	-0,27	2,353	5,41	0,23	2,113	4,71
	0,0025	-1,46	2,542	5,96	-0,46	2,269	5,17
TK2 $n_D = 1,5724$ $\nu = 57,5$	-0,0050	1,15	1,907	4,10	1,29	1,751	3,66
	-0,0025	0,69	2,090	4,62	0,94	1,903	4,09
	0,0	0,11	2,273	5,15	-0,48	2,054	4,52
	0,0025	-0,63	2,456	5,68	-0,10	2,205	4,96
BF7 $n_D = 1,5795$ $\nu = 53,9$	-0,0050	0,76	2,084	4,59	1,01	1,883	4,01
	-0,0025	0,48	2,284	5,16	0,55	2,048	4,48
	0,0	-0,58	2,484	5,73	-0,04	2,209	4,95
	0,0025	-1,54	2,684	6,31	-0,78	2,372	5,42
TK23 $n_D = 1,5891$ $\nu = 61,2$	-0,0050	1,39	1,770	3,65	1,45	1,646	3,31
	-0,0025	1,14	1,940	4,12	1,24	1,789	3,70
	0,0	0,81	2,110	4,59	0,95	1,931	4,10
	0,0025	0,38	2,280	5,07	0,57	2,073	4,50

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	TF2			TF3		
		$n_D = 1,6725; \nu = 32,2$			$n_D = 1,7172; \nu = 29,5$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
BF25 $n_D = 1,6076$ $\nu = 46,1$	-0,0050	-0,77	2,783	6,37	-0,15	2,376	5,23
	-0,0025	-1,89	3,049	7,10	-1,01	2,572	5,80
	0,0	-3,34	3,316	7,85	-2,06	2,777	6,38
	0,0025	-5,06	3,584	8,61	-3,39	2,982	6,96
TK16 $n_D = 1,6126$ $\nu = 58,3$	-0,0050	1,31	1,874	3,85	1,34	1,725	3,45
	-0,0025	1,10	2,054	4,33	1,14	1,875	3,85
	0,0	0,82	2,234	4,87	0,87	2,024	4,25
	0,0025	0,46	2,414	5,31	0,52	2,173	4,66
TK8 $n_D = 1,6140$ $\nu = 55,1$	-0,0050	1,16	2,019	4,23	1,20	1,835	3,74
	-0,0025	0,88	2,212	4,75	0,93	1,993	4,17
	0,0	0,51	2,400	5,28	0,58	2,152	4,60
	0,0025	0,03	2,600	5,81	0,14	2,311	5,03
TK9 $n_D = 1,6171$ $\nu = 54,0$	-0,0050	1,10	2,078	4,38	1,14	1,879	3,85
	-0,0025	0,80	2,278	4,92	0,86	2,041	4,29
	0,0	0,41	2,477	5,45	0,49	2,204	4,73
	0,0025	-0,08	2,676	5,99	0,01	2,367	5,17
TK21 $n_D = 1,6577$ $\nu = 51,2$	-0,0050	1,29	2,261	4,67	1,11	2,011	4,05
	-0,0025	1,19	2,478	5,22	0,94	2,185	4,49
	0,0	1,07	2,695	5,78	0,65	2,359	4,94
	0,0025	0,91	2,912	6,33	0,32	2,533	5,40

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	TF4 $n_D = 1,7396; \nu = 28,2$			TF5 $n_D = 1,7550; \nu = 27,5$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
K2 $n_D = 1,5004$ $\nu = 66,0$	-0,0050	1,88	1,500	3,19	1,92	1,478	3,12
	-0,0025	1,59	1,623	3,57	1,66	1,596	3,48
	0,0	1,18	1,746	3,95	1,28	1,714	3,85
	0,0025	0,63	1,869	4,33	0,78	1,832	4,22
K14 $n_D = 1,5147$ $\nu = 60,6$	-0,0050	1,61	1,606	3,46	1,66	1,579	3,37
	-0,0025	1,23	1,738	3,86	1,32	1,705	3,75
	0,0	0,71	1,870	4,26	0,84	1,831	4,14
	0,0025	0,03	2,002	4,67	0,22	1,957	4,53
K8 $n_D = 1,5163$ $\nu = 64,1$	-0,0050	1,76	1,534	3,24	1,80	1,510	3,17
	-0,0025	1,46	1,660	3,62	1,53	1,631	3,53
	0,0	1,05	1,786	4,00	1,16	1,751	3,90
	0,0025	0,52	1,912	4,39	0,66	1,871	4,27
KF4 $n_D = 1,5181$ $\nu = 58,9$	-0,0050	1,50	1,648	3,56	1,57	1,618	3,47
	-0,0025	1,08	1,784	3,97	1,19	1,747	3,86
	0,0	0,51	1,919	4,39	0,67	1,876	4,26
	0,0025	-0,22	2,054	4,81	0,00	2,005	4,66
BK4 $n_D = 1,5302$ $\nu = 60,5$	-0,0050	1,57	1,609	3,40	1,62	1,851	3,32
	-0,0025	1,24	1,741	3,80	1,31	1,707	3,69
	0,0	0,78	1,873	4,20	0,89	1,833	4,07
	0,0025	0,18	2,005	4,60	0,34	1,959	4,45
BK6 $n_D = 1,5399$ $\nu = 59,7$	-0,0050	1,51	1,628	3,43	1,56	1,599	3,35
	-0,0025	1,18	1,761	3,82	1,26	1,727	3,72
	0,0	0,73	1,895	4,22	0,84	1,854	4,10
	0,0025	0,14	2,029	4,63	0,30	1,981	4,48

**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	TF4 $n_D = 1,7398; \nu = 28,2$			TF5 $n_D = 1,7550; \nu = 27,5$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
BK8 $n_D = 1,5467$ $\nu = 62,8$	-0,0050	1,63	1,559	3,20	1,66	1,534	3,13
	-0,0025	1,38	1,687	3,57	1,43	1,657	3,48
	0,0	1,04	1,845	3,94	1,12	1,779	3,84
	0,0025	0,59	1,948	4,32	0,71	1,901	4,20
TK1 $n_D = 1,5638$ $\nu = 60,8$	-0,0050	1,53	1,602	3,27	1,56	1,575	3,19
	-0,0025	1,28	1,734	3,64	1,33	1,700	3,55
	0,0	0,94	1,865	4,02	1,02	1,826	3,94
	0,0025	0,51	1,996	4,40	0,61	1,952	4,27
BK10 $n_D = 1,5688$ $\nu = 56,0$	-0,0050	1,29	1,730	3,61	1,34	1,695	3,51
	-0,0025	0,94	1,872	4,02	1,02	1,830	3,89
	0,0	0,48	2,014	4,43	0,59	1,965	4,28
	0,0025	-0,11	2,156	4,84	0,04	2,100	4,67
TK2 $n_D = 1,5724$ $\nu = 57,5$	-0,0050	1,38	1,685	3,47	1,42	1,653	3,38
	-0,0025	1,08	1,824	3,86	1,14	1,785	3,75
	0,0	0,68	1,962	4,26	0,77	1,917	4,12
	0,0025	0,17	2,100	4,66	0,80	2,049	4,50
BF7 $n_D = 1,5795$ $\nu = 53,9$	-0,0050	1,13	1,801	3,78	1,20	1,760	3,67
	-0,0025	0,75	1,949	4,20	0,84	1,901	4,07
	0,0	0,24	2,079	4,62	0,37	2,041	4,47
	0,0025	-0,41	2,245	5,05	-0,22	2,181	4,87
TK23 $n_D = 1,5891$ $\nu = 61,2$	-0,0050	1,50	1,593	3,16	1,52	1,566	3,08
	-0,0025	1,30	1,724	3,52	1,34	1,691	3,42
	0,0	1,04	1,855	3,88	1,10	1,816	3,77
	0,0025	0,71	1,986	4,25	0,78	1,941	4,42



**Bảng PL.8.** Các giá trị  $P_0$ ,  $\varphi_k$  và  $Q_0$  của cặp thủy tinh flin đứng trước (tiếp)

Loại TT	C	TF4			TF5		
		$n_D = 1,7398; \nu = 28,2$			$n_D = 1,7550; \nu = 27,5$		
		$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$	$P_0$	$\varphi_k$	$Q_0$
BF25 $n_D = 1,6076$ $\nu = 46,1$	-0,0050	0,16	2,212	4,80	0,30	2,138	4,60
	-0,0025	-0,55	2,394	5,30	-0,35	2,308	5,07
	0,0	-1,44	2,575	5,81	-1,16	2,478	5,55
	0,0025	-2,53	2,757	6,33	-2,15	2,694	6,03
TK16 $n_D = 1,6126$ $\nu = 58,3$	-0,0050	1,38	1,664	3,28	1,40	1,633	3,20
	-0,0025	1,19	1,800	3,65	1,22	1,763	3,55
	0,0	0,94	1,937	4,02	0,98	1,893	3,90
	0,0025	0,62	2,074	4,39	0,08	2,023	4,25
TK8 $n_D = 1,6140$ $\nu = 55,1$	-0,0050	1,25	1,759	3,53	1,28	1,722	3,43
	-0,0025	1,01	1,904	3,92	1,05	1,859	3,80
	0,0	0,69	2,048	4,31	0,75	1,996	4,17
	0,0025	0,29	2,192	4,71	0,37	2,133	4,54
TK9 $n_D = 1,6171$ $\nu = 54,0$	-0,0050	1,20	1,798	3,63	1,23	1,750	3,52
	-0,0025	0,94	1,915	4,03	0,98	1,898	3,90
	0,0	0,60	2,093	4,43	0,66	2,038	4,28
	0,0025	0,18	2,241	4,83	0,26	2,178	4,66
TK21 $n_D = 1,6577$ $\nu = 51,2$	-0,0050	1,12	1,912	3,79	1,11	1,863	3,67
	-0,0025	0,92	2,069	4,20	0,93	2,012	4,05
	0,0	0,65	2,226	4,60	0,67	2,160	4,43
	0,0025	0,33	2,383	5,01	0,35	2,008	4,82

## TÀI LIỆU THAM KHẢO VÀ TRÍCH DẪN

- [1] H. Anders Dünne Schichten für die Optik.  
Verlagsgesellschaft, 1964.
- [2] H. Haferkorn Optik- 3. Auflage.  
Johann Ambrosius Barth Leipzig. Berlin.  
Heidenberg, 2003.
- [3] G. Schröder Technische Optik. 7. Auflage.  
Vogel- Buchverlag-Wurzburg, 1990.
- [4] M. Francon Moderne Anwendungen der physikalischen Optik  
John-Wiley & Sons, 1997.
- [5] I. A.Tuarugin Quang ứng dụng - tập II (Tiếng Nga).  
Nhà xuất bản Moscova, 1968.
- [6] Lương Duyên Bình Vật lý đại cương- Tập ba - Phần một.  
Nhà xuất bản Giáo dục, 2003.
- [7] Grünwald Fertigungsverfahren in der Geratetechnik.  
VEB- Verlag Technik Berlin, 1990.
- [8] Bergmann.Schaefer Optik.  
Nhà xuất bản Walter de Gruyter-Berlin. New York,  
1993.
- [9] Trần Đình Tường Màng mỏng quang học.  
Nhà xuất bản Khoa học và Kỹ thuật, 2004.
- [10] Trần Đình Tường Thiết kế hệ quang.  
Đặng Quốc Cường Trường Đại học Bách khoa Hà Nội, 2000.

# QUANG KỸ THUẬT

Tác giả: **TRẦN ĐỊNH TƯỜNG**  
**HOÀNG HỒNG HẢI**

*Chịu trách nhiệm xuất bản:* PGS. TS. **TÔ ĐĂNG HẢI**  
*Biên tập và sửa bài:* THS. **NGUYỄN HUY TIẾN**  
**HOÀNG GIANG**  
*Trình bày bìa:* **HƯƠNG LAN**

**NHÀ XUẤT BẢN KHOA HỌC VÀ KỸ THUẬT**

**70 Trần Hưng Đạo, Hà Nội**

---

In 800 cuốn, khổ 16 x 24cm, tại Xưởng in NXB Văn hoá Dân tộc  
Quyết định xuất bản số: 539-2006/CXB/45-45/KHKT ngày 10/8/2006  
In xong và nộp lưu chiểu Quý III năm 2006.

206297



***Giá: 49.000đ***