NHIỄU XẠ VÀ PHÂN CỰC

TÁC GIẢ

Michael Smith: Đại học công nghệ Cape Peninsula

THẨM ĐỊNH

Dr B. Ralph Chou: Giáo sư danh dự, Trường khúc xạ nhãn khoa và khoa học thị giác, Đại học Waterloo

Dr Vincent Nourrit: Đại học Manchester

NỘI DUNG CỦA CHƯƠNG

NHIỄU XẠ ..... **Error! Bookmark not defined.**

PHÂN CỰC 2

PHÂN CỰC DO HẤP THỤ CHỌN LỌC 4

PHÂN CỰC DO PHẢN XẠ 5

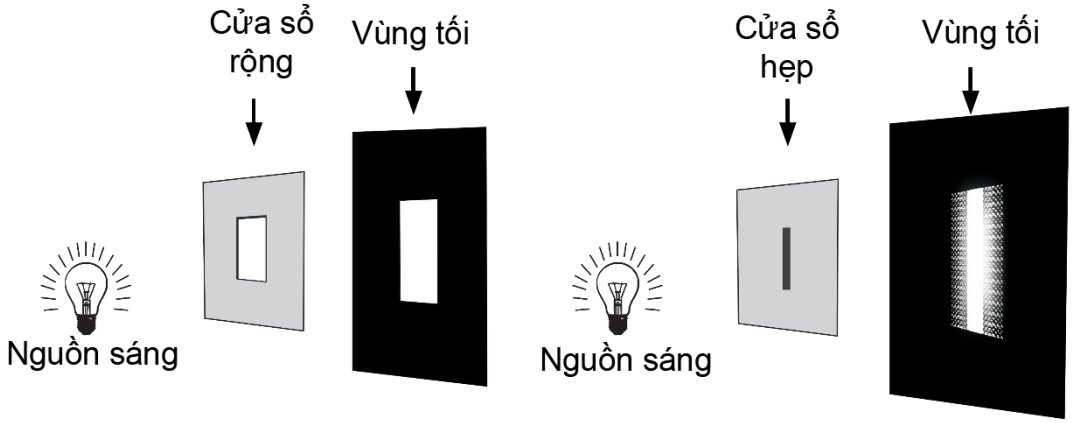
PHÂN CỰC DO KHÚC XẠ KÉP 7

PHÂN CỰC DO TÁN XẠ 9

NHIỄU XẠ (DIFFRACTION)

Hãy nhớ lại thí nghiệm 2 khe của Young. Nếu ánh sáng thực sự đi theo các đường thẳng sau khi qua các khe thì các sóng sẽ không chồng chéo và sẽ không thấy vân giao thoa nào. Nói một cách khác, ánh sáng lệch khỏi đường đi thẳng và đi vào vùng mà lẽ ra là bóng tối. Sự lệch của ánh sáng khỏi đường đi ban đầu ở trong cùng một môi trường đó được gọi là **nhiễu xạ**. Nó cũng có thể được gọi là sự lệch hướng của ánh sáng ở quanh các rìa của một vật cản.

Khi ánh sáng đi qua một lỗ rộng so với bước sóng ánh sáng, nó tạo ra một vùng tối, như ở bên trái của hình 10.1. nhưng nếu chiếu ánh sáng qua một khe hẹp thì chúng ta thấy là ánh sáng nhiễu xạ. Ranh giới rõ giữa vùng sáng và vùng tối biến mất, và ánh sáng trải rộng như một hình quạt để tạo ra một vùng sáng chuyển dần sang tối mà không có bờ rõ nét. Điều này có thể thấy ở hình dưới bên phải.



Hình 10.1: *Hình mô tả nguyên lí nhiễu xạ*

Nhiễu xạ không giới hạn bởi các khe hẹp hoặc ở các lỗ nói chung mà có thể thấy cho tất cả các vùng tối. Khi xem xét kĩ, ngay cả vùng tối rõ nét nhất cũng hơi mờ ở cạnh.

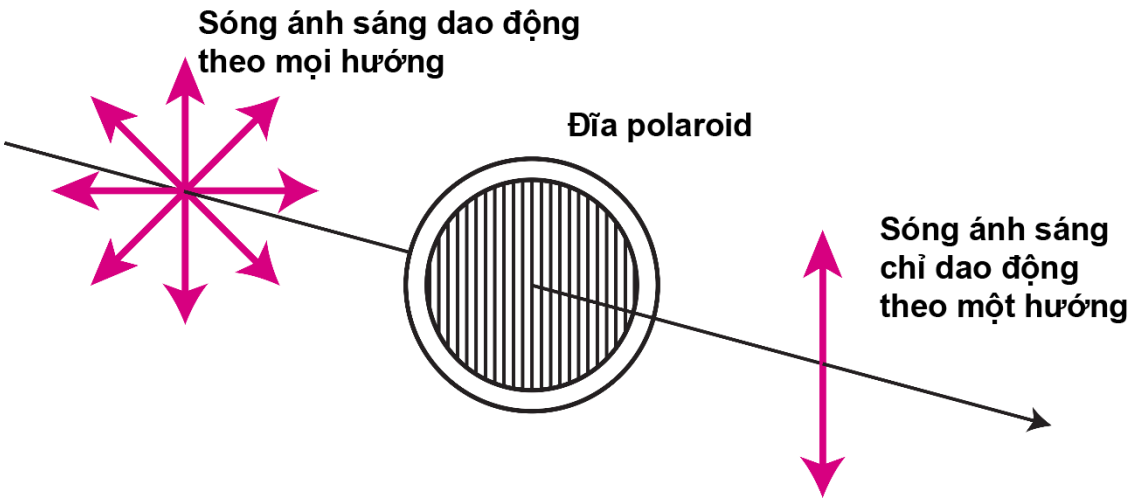
Trong những điều kiện bình thường, chúng ta ít khi chú ý đến sự nhiễu xạ ánh sáng. Các nguồn sáng như đèn sợi đốt hoặc mặt trời không phải là các nguồn điểm đơn sắc, và các hình nhiễu xạ do các phần khác nhau của nguồn sáng và do các bước sóng khác nhau thường chồng lên nhau và che lấp nhau.

Nhiễu xạ sẽ trở thành một vấn đề khi chúng ta muốn nhìn các vật rất nhỏ với kính hiển vi. Nếu kích thước của vật gần bằng bước sóng ánh sáng thì ảnh của vật sẽ bị mờ do nhiễu xạ. Nếu vật nhỏ hơn bước sóng ánh sáng thì không thấy được cấu trúc nào của ảnh do nhiễu xạ. Không có độ phóng đại hoặc sự hoàn hảo nào của thiết kế kính hiển vi có thể vượt qua được giới hạn nhiễu xạ cơ bản này. Một trong những mục tiêu của thiết kế quang học là đạt được độ phân giải càng gần giới hạn nhiễu xạ lí thuyết càng tốt. Điều này đúng với không chỉ cho các dụng cụ lâm sàng mà còn cả với kính điều chỉnh.

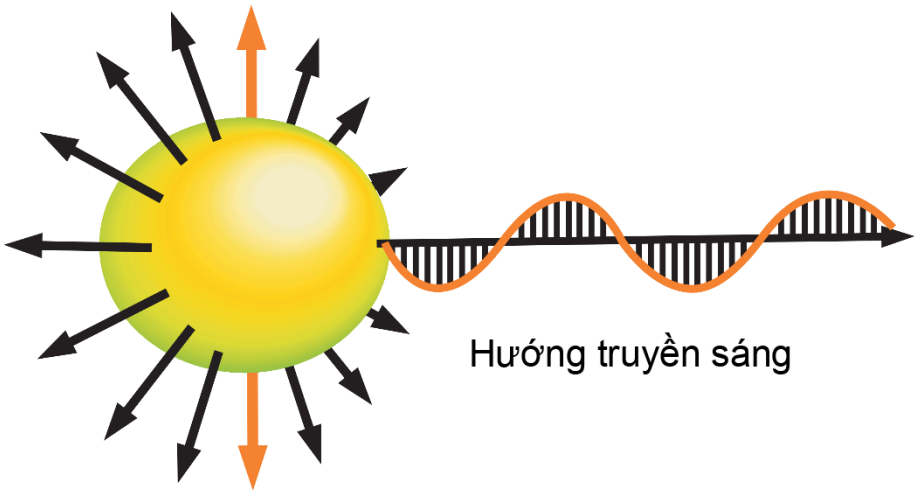
Các vật lớn khi nhìn với ánh sáng nhìn thấy thì có thể thấy rõ ràng. Tình trạng tương tự xảy ra với các vật rất nhỏ nếu các bước sóng dùng để nhìn vật trở nên rất nhỏ. Điều này có thể thực hiện được bằng cách sử dụng một chùm electron thay vì một chùm sáng.

PHÂN CỰC (POLARISATION)

Một chùm sáng bình thường gồm có một số lượng lớn các sóng được phát ra bởi các nguyên tử hoặc các phân tử của nguồn sáng. Mỗi nguyên tử sinh ra một sóng có hướng **E** (vectơ điện trường) riêng tương ứng với hướng dao động của nguyên tử. Tuy nhiên, do các dao động có thể ở mọi hướng nên sóng điện từ tổng hợp là sự chồng chập của các sóng sinh ra bởi các nguồn nguyên tử riêng lẻ. Kết quả là một sóng ánh sáng *không phân cực*. Hướng phân cực của sóng điện từ được định rõ là hướng dao động **E**.



TRÁI: Sóng ánh sáng thể theo mọi hướng E, PHẢI: Sóng ánh sáng chỉ có MỘT hướng E



Hình 10.2: *Sự phân cực*

Chú ý rằng các vectơ điện trường có thể ở mọi hướng và đều nằm ở một mặt phẳng vuông góc với hướng lan truyền. **Ở bất kì điểm đã định nào đã cho và ở một thời điểm nào đó, chỉ có một điện trường tổng hợp**, nó có thể được phân tách ra thành một thành phần dọc và một thành phần ngang. Không nên nhầm lẫn khi nghĩ rằng hình vẽ cho thấy rằng vectơ điện trường có một số hướng ở một thời gian cụ thể. Một sóng được gọi là phân cực thẳng (linearly polarised) nếu **E** *luôn luôn* dao động cùng hướng ở một điểm cụ thể. Một sóng như vậy được gọi là *phân cực phẳng (plane-polarised), hoặc* đơn giản là *phân cực.*

Hiện tượng phân cực cung cấp bằng chứng chắc chắn về bản chất ngang của các sóng điện từ. Tất cả các sóng đều có giao thoa và nhiễu xạ nhưng chỉ các sóng ngang có thể phân cực.

Có thể thu được một chùm phân cực thẳng từ một chùm không phân cực bằng cách loại bỏ tất cả các thành phần ngoại trừ các thành phần mà các vectơ điện trường của chúng dao động ở một mặt phẳng đơn. Bây giờ chúng ta hãy bàn về một số phương pháp vật lí để tạo ra ánh sáng phân cực từ ánh sáng không phân cực.

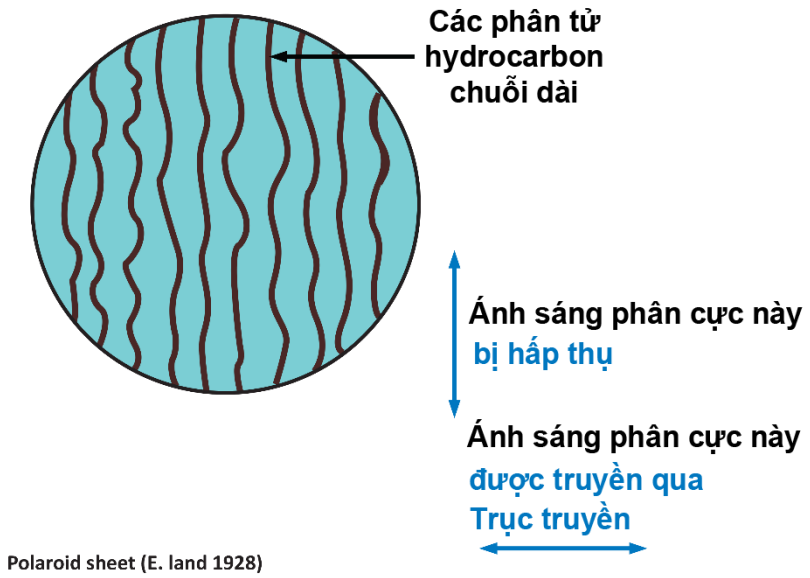
PHÂN CỰC DO HẤP THỤ CHỌN LỌC

Phương pháp thông dụng nhất để tạo ra ánh sáng phân cực là dùng một vật liệu truyền các sóng mà các vectơ điện trường của chúng dao động trong một mặt phẳng song song với một hướng nhất định và hấp thụ các sóng mà các vectơ điện trường của chúng dao động theo các hướng khác. Bất kì chất nào có đặc tính truyền ánh sáng có vectơ điện trường chỉ dao động theo một hướng thì được gọi là một chất *lưỡng sắc* (dichroic). Thí dụ các chất này là tuamalin và quinin iodosulfat.

Tuamalin có ưu điểm là sinh ra ánh sáng phân cực màu. Vào năm 1932, E. H. Land đã chế tạo phiên bản *polaroid* đầu tiên bằng cách gắn một lớp mỏng quinin iodosulfat vào trong một tấm plastic và kéo giãn plastic. Một phiên bản cải tiến sau đó được chế tạo vào năm 1938 sử dụng các phân tử polyme chuỗi dài của polyvinyl alcohol làm phân cực ánh sáng qua sự hấp thụ chọn lọc bởi các phân tử có hướng. Các tấm được kéo giãn trong khi sản xuất để cho các phân tử chuỗi dài thẳng hàng. Sau đó, một tấm được nhúng vào một dung dịch chứa iôt, các phân tử trở thành dẫn điện.

Tuy nhiên, sự dẫn điện xảy ra chủ yếu dọc theo các chuỗi hydrocarbon bởi vì các electron hóa trị của các phân tử chỉ có thể di chuyển dễ dàng dọc theo các chuỗi (nhắc lại rằng electron hóa trị là các electron 'tự do" có thể di chuyển dễ dàng qua dây dẫn). Kết quả là các phân tử dễ dàng *hấp thụ* ánh sáng có vectơ điện trường song song với chiều dài của chúng và *truyền* ánh sáng có vectơ điện trường vuông góc với chiều dài của chúng.

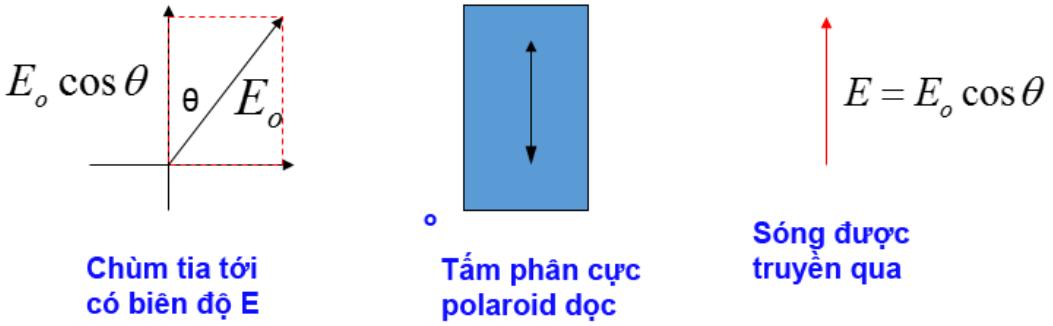
Người ta thường gọi hướng vuông góc với các chuỗi phân tử là *trục truyền* (transmission axis). Ở một *kính phân cực* lí tưởng, toàn bộ ánh sáng có **E** song song với trục truyền đều được truyền qua, và toàn bộ ánh sáng có **E** vuông góc với trục truyền đều bị hấp thụ.



Hình 10.3: *Tấm polaroid*

Tại sao chúng ta chỉ xem xét 2 hướng này của vectơ điện trường? Bởi vì tất cả các vectơ E đều có thể biểu diễn bằng 2 vectơ vuông góc với nhau, do bất kì vectơ E nào cũng có thể được phân tích thành các thành phần này.

Trong hình, một chùm sáng không phân cực đi tới tấm phân cực đầu tiên, được gọi là kính phân cực, trong đó trục truyền được biểu thị bằng các đường thẳng trên **kính phân cực**. Ánh sáng đi qua tấm này bị phân cực dọc như trong hình vẽ, trong đó **biên độ** của vectơ điện trường được truyền là $\mathbf{E_0}$. Một tấm phân cực thứ hai, gọi là **kính phân tích**, chặn chùm sáng này với trục truyền của nó nghiêng một góc θ đối với trục kính phân cực. Thành phần $\mathbf{E_0}$ vuông góc với trục kính phân tích được hấp thụ hoàn toàn, và thành phần $\mathbf{E_0}$ song song với trục kính phân tích là $\mathbf{E_0}\cos\theta$.



Định luật Malus cho cường độ ánh sáng truyền qua:

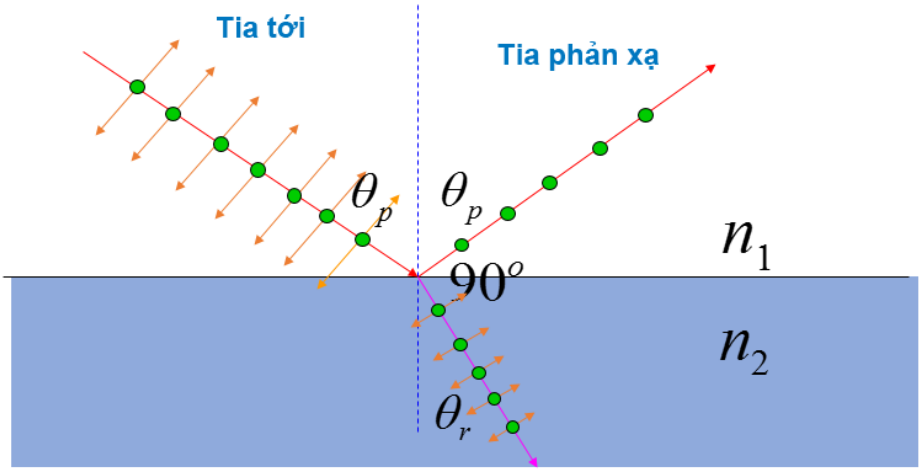
$$I = I_0 \cos^2\theta$$

Từ biểu thức này, chú ý rằng cường độ truyền qua đạt tối đa khi các trục truyền song song ($\theta = 0°$ hoặc $180°$). Ngoài ra, cường độ truyền qua sẽ bằng 0 (hấp thụ hoàn toàn bởi kính phân tích) khi các trục truyền vuông góc với nhau. Khi ánh sáng không phân cực có cường độ I_0 được truyền qua một kính phân cực đơn lí tưởng, ánh sáng phân cực thẳng được truyền qua có cường độ $0.5\ I_0$. Kết quả này có được từ định luật Malus bởi vì giá trị trung bình của $\cos^2\theta$ là 0.5.

PHÂN CỰC DO PHẢN XẠ

Khi một chùm sáng không phân cực bị phản xạ từ một bề mặt thì ánh sáng phản xạ bị phân cực hoàn toàn, phân cực một phần, hoặc không phân cực, tùy thuộc vào góc tới. Nếu góc tới là 0 hoặc 90° (góc vuông hoặc góc lướt qua) thì chùm tia khúc xạ không phân cực. Tuy nhiên, với các góc tới trung gian thì ánh sáng phản xạ phân cực ở một mức độ nhất định. Với một góc tới đặc biệt, ánh sáng phản xạ bị phân cực hoàn toàn. Chúng ta hãy xem xét góc đó.

Giả sử một chùm sáng không phân cực đi tới một bề mặt (xem hình 10.4). Chùm sáng này có thể được mô tả bằng 2 phần tử điện trường, phần tử thứ nhất song song với bề mặt (các chấm), phần tử thứ hai vuông góc với phần tử thứ nhất và với hướng lan truyền (các mũi tên). Có thể thấy rằng phần tử song song với bề mặt thì phản xạ mạnh hơn các phần tử khác, dẫn đến một chùm sáng phân cực một phần. Hơn nữa, tia khúc xạ cũng phân cực một phần.



Hình 10.4: *Sự phân cực do phản xạ*

Bây giờ giả sử góc tới được thay đổi đến khi góc giữa chùm sáng phản xạ và chùm sáng khúc xạ là 90°. Ở góc tới cụ thể này, chùm sáng phản xạ bị phân cực hoàn toàn với vectơ điện trường của nó song song với bề mặt, trong khi chùm sáng khúc xạ bị phân cực một phần. Góc tới mà tại đó xảy ra sự phân cực được gọi là góc phân cực, θ_p.

Áp dụng định luật Snell vào tình huống trên, chúng ta có được:

$$n_1 \sin\theta_p = n_2 \sin\theta_r$$

Tuy nhiên, chú ý các biểu thức sau: (i) $\theta_p + \theta_r = 90°$

(ii) $\sin(90° - \theta_p) = \cos\theta_p$

(iii) $\sin\theta/\cos\theta = \tan\theta$

Do đó, $n_1 \sin\theta_p = n_2 \sin(90° - \theta_p) = n_2 \cos\theta_p$

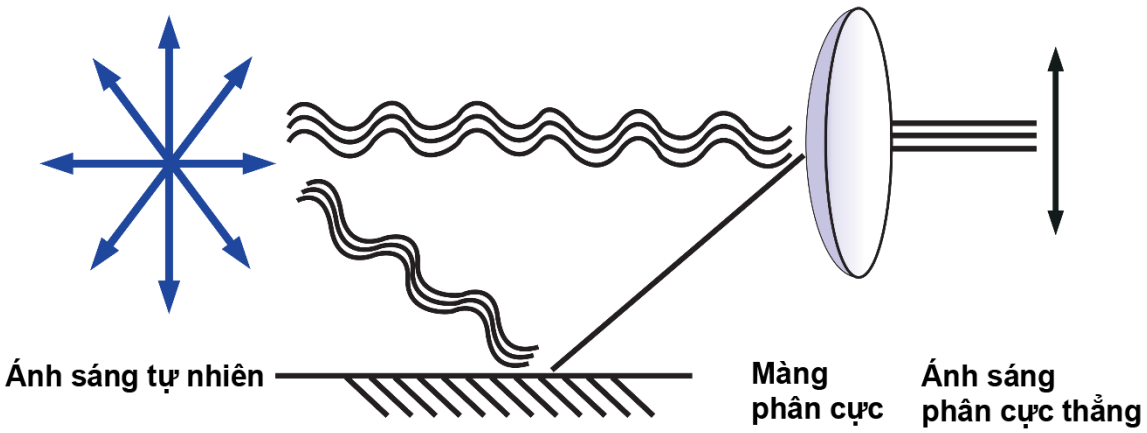
và $\tan\theta_p = n_2/n_1$

Nếu ánh sáng tới ở trong không khí, n_1 sẽ bằng 1. Nếu chỉ dùng **n** để miêu tả chiết suất của môi trường từ đó ánh sáng bị phản xạ, chúng ta có được biểu thức dưới đây liên hệ góc phân cực với chiết suất của chất phản xạ:

$$\mathbf{n = \tan\theta_p}$$

Biểu thức này được gọi là **định luật Brewster**, và góc phân cực θ_p đôi khi được gọi là góc Brewster, theo tên người tìm ra nó, ngài David Brewster (1781-1868). Vì n thay đổi theo bước sóng đối với một chất đã cho nên góc Brewster cũng là một hàm của bước sóng.

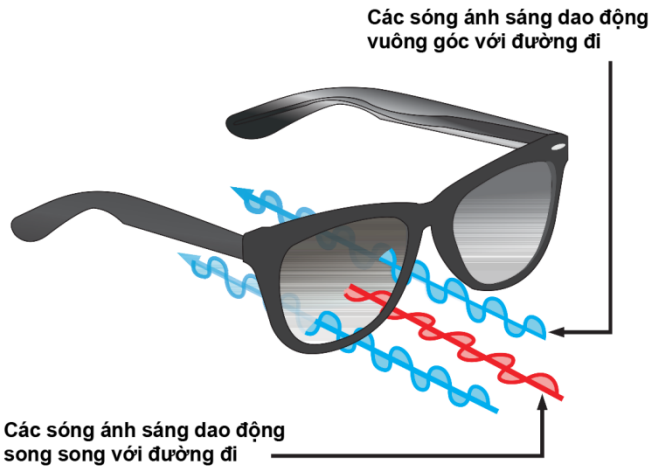
Phân cực do phản xạ là một hiện tượng thông thường. Ánh sáng mặt trời phản xạ từ nước, thủy tinh, và tuyết bị phân cực một phần. Nếu bề mặt nằm ngang thì vectơ điện trường của ánh sáng phản xạ sẽ có một thành phần ngang mức độ mạnh. Kính râm được làm bằng vật liệu phân cực sẽ giảm độ chói của ánh sáng phản xạ. Các trục truyền của kính nằm ở hướng dọc để hấp thụ thành phần ngang mức độ mạnh của ánh sáng phản xạ.



Hình 10.5: *Chống ánh sáng chói bằng kính lọc phân cực*

1. Ánh sáng phần lớn bị phân cực ngang.

2. Do đó, cần một trục truyền dọc để giảm ánh sáng chói.



Hình 10.6: *Kính phân cực*

Trong những năm gần đây, bảng hiển thị của các dụng cụ và các bảng điều khiển ở xe ô tô đều sử dụng màn hình tinh thể lỏng (liquid crystal displays = LCD). LCD phát ánh sáng phân cực thẳng (thí dụ, kiểm tra màn hình đồng hồ điện tử của bạn) và có thể trở nên khó nhìn rõ bởi kính râm phân cực trong một số điều kiện nhìn. Do đó, các trục truyền của một số mắt kính râm có thể được đặt ở các kinh tuyến chéo để có thể giảm các nguồn sáng chói ở hướng ngang trong khi vẫn cho phép nhìn rõ các màn hình LCD của ô tô. Vào năm 2012, người ta đã đưa ra một vật liệu mắt kính plastic đổi màu, nó trở thành một kính phân cực thẳng khi được hoạt hóa bởi ánh sáng.

PHÂN CỰC DO KHÚC XẠ KÉP

Khi ánh sáng đi qua một vật liệu không có tinh thể (amorphous material) như thủy tinh thì nó đi với tốc độ bằng nhau ở tất cả các hướng. Tức là, thủy tinh có một chiết suất đơn. Tuy nhiên, ở một số vật liệu có tinh thể, như canxit và thạch anh thì tốc độ ánh sáng không như nhau ở mọi hướng. Các vật liệu này được đặc trưng bởi 2 chiết suất. Do đó, chúng thường được gọi là vật liệu khúc xạ kép hoặc vật liệu lưỡng chiết (birefringent).

Ở một tinh thể như NaCl, các ion Na^+ và Cl^- luân phiên có tính đối xứng dẫn đến các lực liên kết bằng nhau ở tất cả các hướng. Các tinh thể lưỡng chiết không có tính đối xứng này và các nguyên tử có lực hút mạnh hơn ở một số hướng nhất định.

Bảng chiết suất của một số vật liệu lưỡng chiết (bước sóng chuẩn là 589.3 nm).

TINH THỂ	n_o	n_e
Tuamalin	1.669	1.638
Canxit	1.6584	1.4864
Thạch anh	1.5443	1.5534
Natri nitrat	1.5854	1.3369
Nước đá	1.309	1.313
Rutin (TiO_2)	2.616	2.903

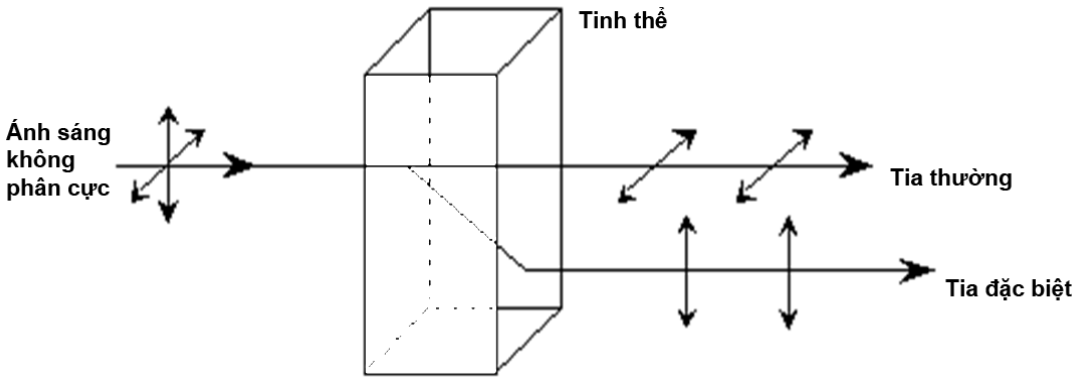
Bảng 10.1: *Chiết suất của một số vật liệu lưỡng chiết.*

Khi một chùm sáng không phân cực đi vào một tinh thể canxit, chùm sáng tách ra thành 2 tia phân cực phẳng đi với tốc độ khác nhau, tương ứng với 2 góc khúc xạ khác nhau, như ở hình 10.7. 2 tia bị phân cực theo 2 hướng vuông góc với nhau, như được biểu thị bằng các chấm và các mũi tên. Một tia, được gọi là tia thường (O), có chiết suất, n_0, tức là bằng nhau ở tất cả các hướng, nghĩa là nếu có thể đặt một nguồn sáng điểm ở trong tinh thể thì các tia thường sẽ tỏa ra từ nguồn sáng như các hình cầu.

Tia phân cực phẳng thứ hai, được gọi là tia đặc biệt (E), đi với các tốc độ khác nhau ở các hướng khác nhau, do đó có chiết suất (n_e) thay đổi theo hướng lan truyền. Có một hướng, được gọi là **quang trục**, mà theo hướng này tia thường và tia đặc biệt có tốc độ bằng nhau, tương ứng với hướng mà các chiết suất bằng nhau.

Đối với các hướng mà có chênh lệch tốc độ của 2 tia, sự chênh lệch là tối đa ở hướng vuông góc với quang trục. Thí dụ, ở canxit n_o = 1.6584 và n_e thay đổi từ 1.6584 theo quang trục tới 1.4864 ở hướng vuông góc với quang trục.

Nếu đặt một tấm canxit lên một tờ giấy, sau đó nhìn qua tinh thể vào bất kì chữ nào trên giấy thì sẽ thấy 2 ảnh của chữ viết. 2 ảnh này tương ứng với một ảnh được tạo thành bởi tia thường và ảnh thứ hai được tạo thành bởi tia đặc biệt. Nếu 2 ảnh được nhìn qua một tấm kính phân cực quay thì chúng sẽ luân phiên xuất hiện và biến mất bởi vì **tia thường và tia đặc biệt bị phân cực phẳng theo các hướng vuông góc với nhau.**



Hình 10.7: Vật liệu lưỡng chiết

Hiện tượng này được áp dụng để phát hiện ứng suất ở các vật liệu bằng kính phân cực chéo. **Tính quang đàn hồi** (photoelasticity) được mô tả lần đầu tiên bởi nhà vật lí người Xcốt-len David Brewster. Khi một vật có ứng suất thì các lực giữa các nguyên tử và các phân tử không còn đồng đều. Điều này gây ra tính lưỡng chiết. Do đó một tia sáng đi qua một vật có các vùng bị ứng suất sẽ gặp phải 2 chiết suất. Các vật liệu quang đàn hồi chỉ thể hiện tính lưỡng chiết khi gây ra (hoặc khi có) ứng suất và độ lớn của các chiết suất ở mỗi điểm của vật liệu tỉ lệ thuận với trạng thái ứng suất tại điểm đó. Khi một tia sáng phân cực phẳng đi qua một vật liệu quang đàn hồi, nó được phân tách thành 2 hướng ứng suất chính và mỗi thành phần này có chiết suất khác nhau.

Chênh lệch chiết suất dẫn đến sự trễ pha tương đối giữa 2 sóng thành phần bởi vì chúng di chuyển với tốc độ khác nhau ở trong vật liệu. 2 sóng sau đó được hợp lại ở một kính phân cực. Giao thoa ánh sáng xảy ra ở kính phân cực và chúng ta có một hình vân (fringe pattern), nó phụ thuộc vào sự trễ pha tương đối. Do đó khi nghiên cứu hình vân, người ta có thể xác định trạng thái ứng suất ở các điểm khác nhau của vật liệu.

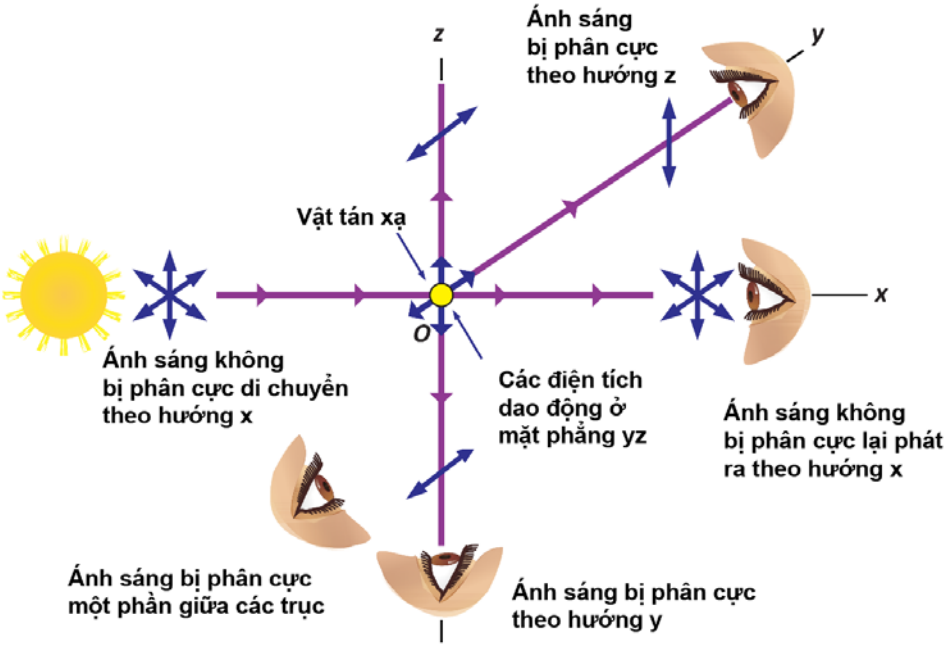
Tính lưỡng sắc của sắc tố lutein ở hoàng điểm được coi là nguyên nhân của hiện tượng nội nhãn có tên là chổi Haidinger. Các phân tử lutein được sắp xếp song song với các sợi thần kinh hướng tỏa tròn từ trung tâm hoàng điểm để cho ánh sáng phân cực thẳng song song với trục của phân tử bị hấp thụ. Khi nhìn qua một kính phân cực thẳng ở một nền trắng trơn, có thể thấy một hình nơ nhỏ màu vàng nhạt (3 đến 5°) có tâm là điểm định thị; một số người cũng thấy một hình nơ màu lam hoặc màu cánh sen nhạt hơn vuông góc (90°) với chổi màu vàng. Hiệu ứng này có thể dễ thấy hơn nếu kính phân cực thẳng được quay quanh trục nhìn. Chổi Haidinger có thể dùng để tập cho mắt định thị bằng vùng trung tâm hoàng điểm thay vì định thị ngoại tâm.

PHÂN CỰC DO TÁN XẠ

Khi ánh sáng đi qua một môi trường trong suốt (bao gồm một hỗn hợp khí như là không khí) một số electron ở vật liệu hấp thụ năng lượng từ điện trường dao động. Lúc này chúng dao động cùng tần số với ánh sáng. Các electron sau đó đóng vai trò như những ăng ten tí hon phát lại năng lượng này như là ánh sáng đi trong môi trường. Quá trình này được gọi là **sự tán xạ**. Ăng ten không phát ra năng lượng theo hướng dao động của điện tích. Tức là, nếu một electron dao động theo hướng dọc thì nó sẽ không phát ra năng lượng đó theo hướng dọc.

Cơ chế tán xạ này làm cho cửa mái kính (skylight) bị phân cực một phần. Hình dưới đây cho thấy một chùm sáng không phân cực đi qua một chất khí. Năng lượng được hấp thụ bởi các electron làm cho các electron dao động theo hướng *z* có thể được tỏa ra theo hướng x dương hoặc âm hoặc theo hướng y dương hoặc âm nhưng **không** theo hướng nào của trục *z*. Tương tự, năng lượng được hấp thụ làm cho các electron dao động theo hướng x có thể bị tán xạ ở mặt phẳng yz nhưng không vuông góc với mặt phẳng đó. Do đó, ánh sáng tán xạ sẽ tăng ở ánh sáng bị phân cực trong một mặt phẳng và giảm ở ánh sáng bị phân cực trong mặt phẳng vuông góc. Những người quan sát tốt có thể tự rèn luyện để sử dụng hiện tượng chổi Haidinger phát hiện hướng phân cực của cửa mái kính. Điều này đã được báo cáo bởi các nhà nghiên cứu trong thời kì đầu như Minnaert.

Đáng chú ý là trong phân cực do phản xạ, chúng ta có một góc 90° tương tự giữa tia phản xạ (bị phân cực) và tia khúc xạ.



Hình 10.8: *Sự phân cực do tán xạ*

Sự tán xạ ánh sáng bởi khí quyển của trái đất phụ thuộc vào λ. Đối với các hạt nhỏ hơn nhiều so với bước sóng ánh sáng (như các phân tử không khí), các hạt sẽ cản trở các bước sóng dài ít hơn so với các bước sóng ngắn. Trong thực tế, sự tán xạ giảm bằng $1/\lambda^4$. Do đó, ánh sáng màu đỏ và màu cam bị tán xạ ít hơn nhiều so với màu lam và màu tím, điều này giải thích tại sao bầu trời có màu lam. Vào lúc mặt trời lặn, các tia mặt trời đi qua một độ dài tối đa của khí quyển. Phần lớn màu lam bị mất đi do tán xạ. Ánh sáng tới bề mặt trái đất và phản xạ ở mây và sương mù do đó không có màu lam, đây là lí do tại sao khi mặt trời lặn thì có màu hơi đỏ.

Sự phụ thuộc của tán xạ vào $1/\lambda^4$ chỉ đúng nếu các vật tán xạ nhỏ hơn nhiều so với bước sóng ánh sáng. Điều này đúng đối với các phân tử oxi và nitơ có đường kính khoảng 0.2 nm. Tuy nhiên, mây chứa các giọt nước hoặc các tinh thể kích thước lớn hơn nhiều so với λ; chúng gây tán xạ tất cả các tần số của ánh sáng gần như đồng đều. Do đó mây có màu trắng (hoặc màu xám, nếu bị che bóng).