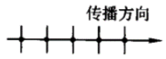
第 18 章　光的偏振

一　偏振片偏振

1. **光束的分类**

- **线偏振光**：空间各点的光矢量都沿同一个固定的方向振动
- **自然光**：两个振动方向互相垂直、相位差随机、等振幅的线偏振光组合



- **部分偏振光**：介于自然光和线偏振光之间，振动在各个方向上的振幅不同

2. **偏振片**

- **理想偏振片**：平行于指定方向的振动分量完全通过，垂直于指定方向的振动分量完全吸收

① **马吕斯定律**

- 思路：将光振动矢量 A 分解为平行于指定方向和垂直于指定方向的两个振动分量，保留前者

  光强 I 则与 A^2 成正比，在解题时，最好画一个振动矢量图，使思路更加清晰
- 参数：I_0 为入射光强，I 为透射光强，θ 为原振动方向与指定方向的夹角（$0\le\theta<90°$）

$$\boxed{I=\frac{1}{2}I_0}\qquad\qquad \boxed{I=I_0\cos^2\theta}$$

自然光　　　　线偏振光

② **常见情形**

- 多偏振片组成序列：对每一个偏振片 i 都使用马吕斯定律，构建起一个“递推公式”
- 自然光与偏振光混合：分别对自然光和偏振光进行处理，然后叠加

例 1　一束光强为 I_0 的自然光，相继通过三个偏振片 P_1、P_2、P_3 后，出射光的光强为 $I=I_0/8$。已知 P_1 和 P_3 的偏振化方向相互垂直，若以入射光线为轴，旋转 P_2，要使出射光的光强为 0，P_2 最少要转过的角度是__________。

解　设 P_1 与 P_2 方向夹角为 θ，则 P_2 和 P_3 方向夹角为 $90°-\theta$

因此出射光光强 $I=\frac{1}{2}I_0\cdot\cos^2\theta\cdot\cos^2(90°-\theta)=\frac{1}{8}I_0\sin^2 2\theta=\frac{1}{8}I_0$，解得 $\theta=45°$

因此想要使出射光光强为 0°，P_2 应与 P_1 呈 90°，因此最少需要转 45°

例 2　一束光强是自然光和线偏振光的混合光，让它垂直通过一偏振片。若以此入射光束为轴旋转偏振片，测得透射光强度最大值是最小值的 5 倍，那么入射光束中自然光与线偏振光的光强比值为__________。

解　设自然光和线偏振光的光强分别为 I_0 与 I，则透射后光强分别为 $I_0/2$ 和 $I\cos^2\theta$

因此线偏振光的光强最大值为 I，最小值为 0，自然光透射后的光强恒为 $I_0/2$

由题意则有 $\frac{I_0/2+I}{I_0/2}=5$，解得 $\frac{I_0}{I}=\frac{1}{2}$

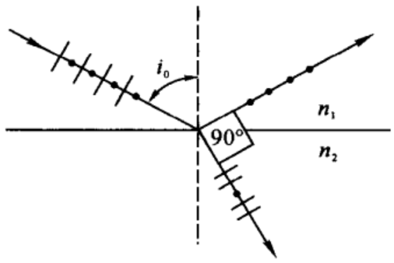
二　反射折射偏振

1. 布儒斯特定律

入射角 i_0 时，反射光成为振动方向垂直于入射面的线偏振光，折射光成为最大偏振化程度的部分偏振光

$$\boxed{\tan i_0=\frac{n_2}{n_1}}$$

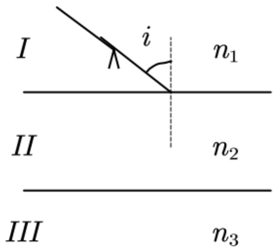
$$\boxed{i_0+r=90^\circ}$$



- i_0：入射角，又称布儒斯特角　　r：折射角

  n：介质折射率

例 3　如图三种透明介质Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ，其折射率分别为 $n_1=1.00$、$n_2=1.43$ 和 n_3，介质间界面相互平行，一束自然光由介质Ⅰ中入射，若两个交界面上的反射光都是偏振光，则入射角 $i=$________；折射率 $n_3=$____________。



解　由布儒斯特定律，$i_0=\arctan\dfrac{n_2}{n_1}=\arctan 1.43=55.03^\circ$

n_2 中的入射角就是折射角 $r=90^\circ-i_0$，又有 $\tan r=\dfrac{n_3}{n_2}$，于是有 $n_3=n_1=1.00$

三　双折射

1. 双折射中的基本概念

- 现象：光线入射到**各向异性晶体**时会分裂成偏振方向不同的两束光

  两束光线分为服从折射定律的**寻常光（o 光）**和不服从的**非寻常光（e 光）**
- **光轴**：一个特定的方向，光线只有沿此方向入射时才不发生双折射现象
- **主平面**：o 光光线与 e 光光线分别与光轴组成的平面

  当光轴与入射面平行时，o 光和 e 光主平面重合，且都在入射面内

2.双折射的原理

① 光线传播速度的差异性

- 光在各向异性晶体中的传播速度与<u>光矢量振动方向与光轴的位置关系</u>有关

  若振动方向与光轴垂直，传播速度为正常值，对应折射率为 n_o

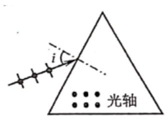
  若振动方向与光轴平行，传播速度达到最值，对应折射率为 n_e（**主折射率**）

  若介于两者之间，则折射率也介于 n_o 和 n_e 之间
- **正晶体**的 $n_e>n_o$，**负晶体**的 $n_o>n_e$

② 双折射现象的判断（仅限光轴平行或垂直于入射面）

- 将振动方向分解为<u>垂直于入射面</u>和<u>位于入射面且垂直于入射光线</u>两个分量
- 确定光轴方向，判断这两个分量哪个与光轴平行（e 光），哪个与光轴垂直（o 光）
- 再根据折射率和入射角确定两束光的光路

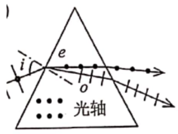
例 4 用方解石晶体（负晶体）切成一个截面为正三角形的棱镜，光轴方向如图。若自然光以入射角 i 入射并产生双折射，请定性画出 o 光和 e 光的光路及振动方向。



解 首先将自然光分解为垂直入射面(·)和入射面内(｜)两个分量

本题中光轴垂直于入射面，因此(·)为 e 光，(｜)为 o 光

由于是负晶体，$n_e < n_o$，因此 e 光折射角应大于 o 光，答案见右图



3. **波片**

· 厚度均匀(d)、两表面与晶体光轴平行的晶体片，要求线偏振光正入射表面，偏振方向与光轴夹角为 θ

① o 光、e 光分析

· 由于正入射，偏振方向与光轴都在晶体表面平面内

因此按光轴分解为正交的两个振动方向，就分别是 o 光和 e 光

② 相位差分析

· 由于正入射，两束光在波片中传播方向相同，但速度不同（折射率不同），导致光程差 δ 产生：

$$\text{光程差}\ \ \delta = |n_o - n_e| d \xrightarrow{\Delta\varphi = 2\pi/\lambda} \text{相位差}\ \ \boxed{\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}|n_o - n_e| d}$$

· 对于确定的 λ，要产生特定的相位差，波片厚度 d 就要取特定值

· 常见的波片有 1/4 波片（产生光程差 $\frac{\lambda}{4}$）、1/2 波片（产生光程差 $\frac{\lambda}{2}$），注意均是对特定波长的

例 5 假设有一线偏振光 $\lambda = 589.3\text{nm}$ 垂直入射到石英晶片上，晶片的光轴平行于表面，设入射光的偏振方向与光轴夹角为 30°。已知该石英片厚度为 $d = 4092.36\text{nm}$，两个折射率分别为 $n_e = 1.553$，$n_o = 1.541$。求：

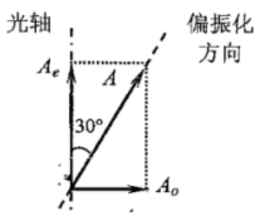
（1）出射光中 o 光和 e 光的相位差；

（2）出射光中的 o 光和 e 光的强度之比。

解 （1）由晶片公式：$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d = \frac{\pi}{6}$

（2）将入射光的偏振矢量按光轴方向分解，如图所示，因此有

$$\frac{I_o}{I_e} = \frac{A_o^2}{A_e^2} = \frac{A^2 \sin^2 30°}{A^2 \cos^2 30°} = \frac{1}{3}$$



例 6 在两偏振化方向相互正交的偏振片 P_1 和 P_2 之间放置一块方解石晶片，其光轴平行于晶体表面，且与偏振片 P_1 的偏振化方向的夹角为 30°。求：

（1）当一束强度为 I 的自然光垂直入射偏振片 P_1 时，从晶片透射出来的 o 光和 e 光的强度；

（2）如果入射光的波长为 400nm，则在偏振片 P_2 后无透射光出现，该晶片至少有多厚？

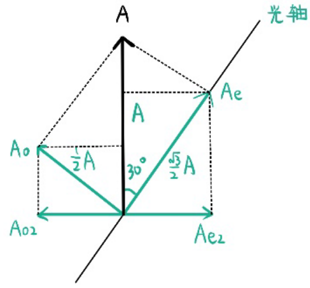
（方解石 o 光折射率 $n_o = 1.658$，e 光主折射率 $n_e = 1.486$）

解 （1）设透过 P_1 的入射光的振幅为 A，则其强度 $I' = \frac{1}{2}I$

将 A 按光轴方向分解，有 $A_o = A\sin\alpha$， $A_e = A\cos\alpha$

因此 $I_o = \dfrac{A_o^2}{A^2} I' = \dfrac{1}{2}\sin^2 30° I = \dfrac{1}{8} I$

$I_e = \dfrac{A_e^2}{A^2} I' = \dfrac{1}{2}\cos^2 30° I = \dfrac{3}{8} I$



（2）将 A_o 和 A_e 正交分解，能够透过 P_2 的是水平分量 A_{o2} 和 A_{e2}

因为无透射光，因此这两个分量应相互抵消，

而在进入晶片前这两个分量就是相互抵消的，因此经过晶片后它们不应产生额外的相位差

于是有 $\Delta\varphi = \dfrac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d = 2k\pi \rightarrow d = \dfrac{k\lambda}{n_o - n_e}$， $k = 1, 2, 3\cdots$

则最小厚度 $d_{\min} = \dfrac{\lambda}{n_o - n_e} = 2330\text{nm}$

4. **偏振光的合成**

· 偏振光通过晶体片后两方向的振动产生相位差，这两个振动可以合成为特殊偏振光 → 回顾第 5 章

例 7 一束波长为 λ 的线偏振光垂直穿过一个波片，入射线偏振光的光振动方向于波片光轴夹角为 45°，若波片为 1/2 波片，则出射的光为________偏振光；若要使出射光为圆偏振光，则 d 的最小厚度为________（已知折射率 n_o 和主折射率 n_e）

解 经过波片后的光矢量被分解为水平分量 A_e 和垂直分量 A_o，如图所示

1/2 波片产生的相位差为 π，按振动合成，合成的仍为线偏振光，只是振动方向发生变化而已

两个垂直的光振动要合成为圆偏振光，除了振幅相等外，还要满足相位差为 $\dfrac{\pi}{2}$

因此由波片方程 $\dfrac{2\pi}{\lambda}|n_o - n_e|d = \dfrac{\pi}{2} + k\pi \rightarrow d_{\min} = \dfrac{\lambda}{4|n_o - n_e|}$