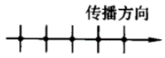
第 18 章　光的偏振

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（$0 \le \theta < 90°$）

$$\boxed{I = \frac{1}{2} I_0}$$

自然光

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

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

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

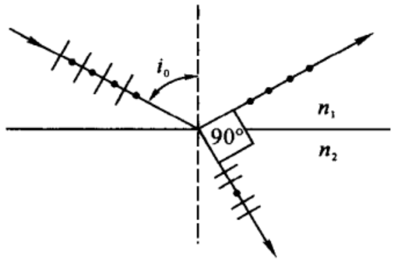
二　反射折射偏振

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

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

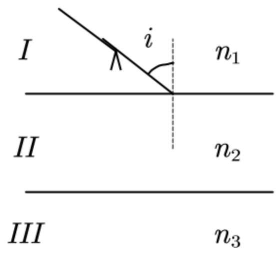
$$\boxed{i_0+r=90°}$$



· 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，$i_0=\arctan\dfrac{n_2}{n_1}=\arctan 1.43=55.03°$

n_2 中的入射角就是折射角 $r=90°-i_0$，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光矢量振动方向与光轴的位置关系有关

　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 $n_o>n_e$

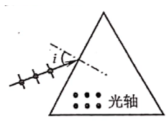
② 双折射现象的判断（仅限光轴平行或垂直于入射面）

· 将振动方向分解为垂直于入射面和位于入射面且垂直于入射光线两个分量

· 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

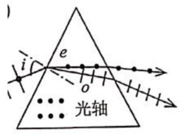
例 4 用方解石晶体（负晶体）切成一个截面为正三角形的棱镜，光轴方向如图。若自然光以入射角 i 入射并产生双折射，请定性画出 o 光和 e 光的光路及振动方向。



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<u>线偏振光正入射</u>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：

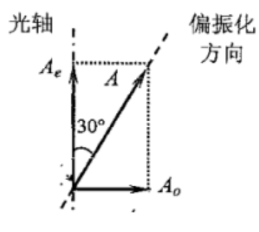
（1）出射光中 o 光和 e 光的相位差；

（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

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



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？

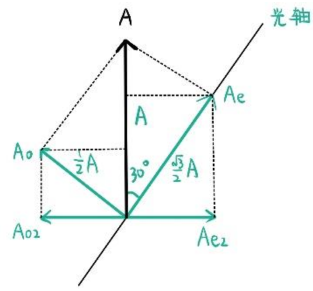
（方解石 o 光折射率 $n_o = 1.658$，e 光主折射率 $n_e = 1.486$）

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 $\dfrac{2\pi}{\lambda}|n_o - n_e|d = \dfrac{\pi}{2} + k\pi \rightarrow d_{\min} = \dfrac{\lambda}{4|n_o - n_e|}$