

第二十二章

光的偏振

能够真实观察到电磁波的特性

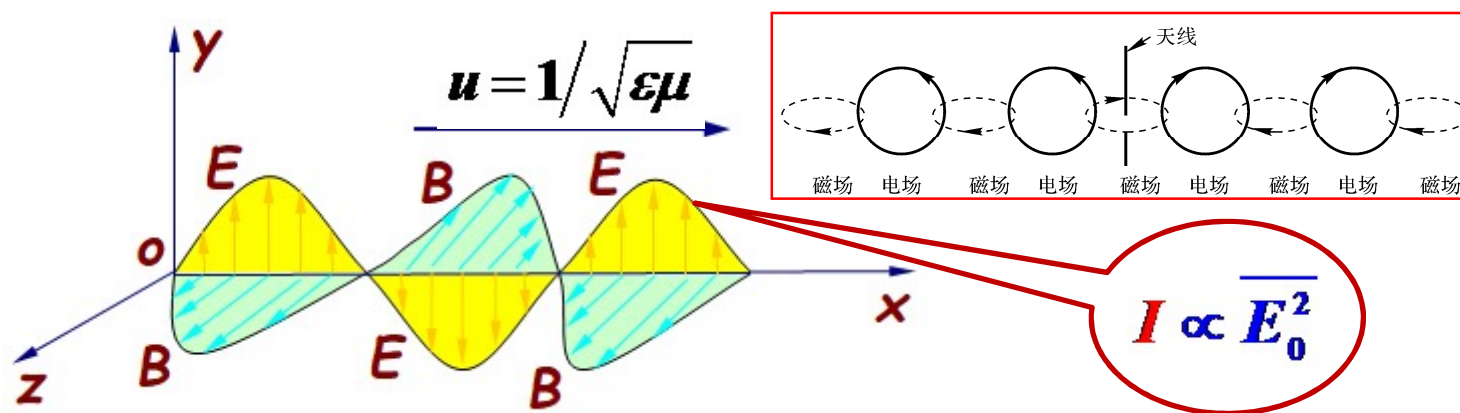
——电磁波是横波的实验证据

§ 22-1 光的五种偏振状态

1. 光的偏振现象

$$\vec{B} = \mu_0 \varepsilon_0 \vec{v} \times \vec{E}$$

- 1) 电场、磁场与传播方向垂直——横波特性的
- 2) 电场、磁场在各自平面内振动——偏振特性

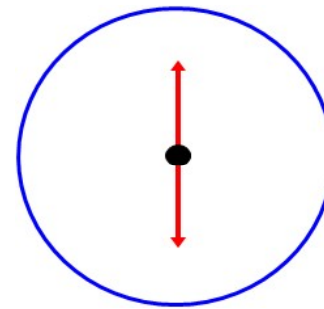
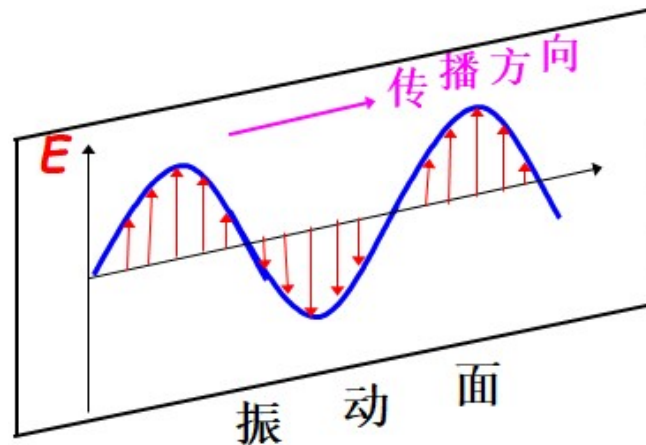


光波(电磁波)均采用电场强度矢量E的传播来代表，并称为光振动矢量，简称光矢量。

2. 光的偏振状态

1). 线偏振光

电磁波中光矢量(E)始终沿某一方向振动。



面对光的传播方向看

横波与纵波的一个重要区别：

---光的横波特性和光具有偏振性的根源

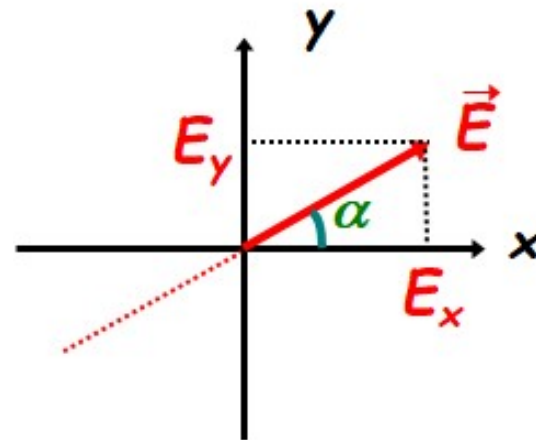
线偏振光可沿任意相互垂直的两个方向分解。

$$E_x = E \cos \alpha$$

$$E_y = E \sin \alpha$$

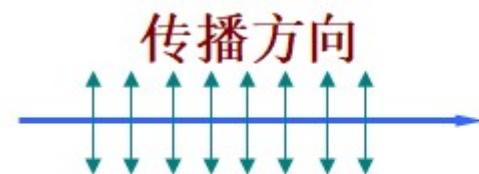
$$\Rightarrow I_x = I \cos^2 \alpha$$

$$I_y = I \sin^2 \alpha$$



垂直于黑板面传播的光

线偏振光的表示法:



振动方向在纸面内

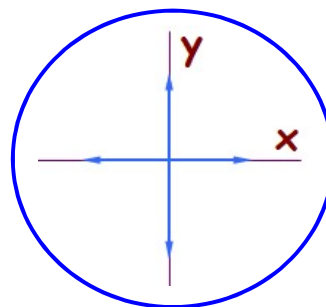
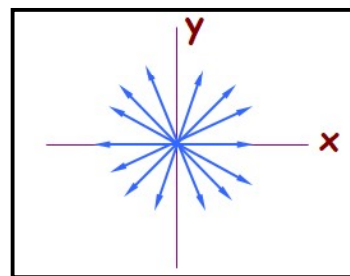


振动方向垂直纸面

2). 自然光(非偏振光)

振动面在空间各个方向高速随机变化的光。

一束自然光可以分解为两束振动方向相互垂直的、等幅的、不相干的线偏振光。



$$\bar{E}_x = \bar{E}_y$$

$$I_x = I_y$$

$$I = I_x + I_y$$

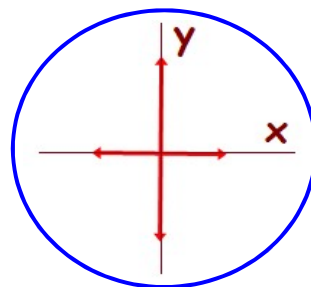
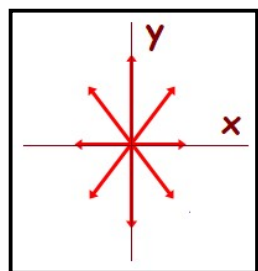
自然光的表示法:



3). 部分偏振光

介于自然光和线偏振光之间的一种偏振光。

一束部分偏振光可分解为两束振动方向相互垂直的、不等幅的、不相干的线偏振光。



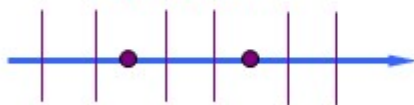
$$I_x < I_y$$

$$I = I_x + I_y$$

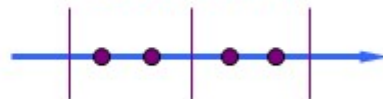
$$I = I_x + I_y$$

部分偏振光的表示法:

传播方向

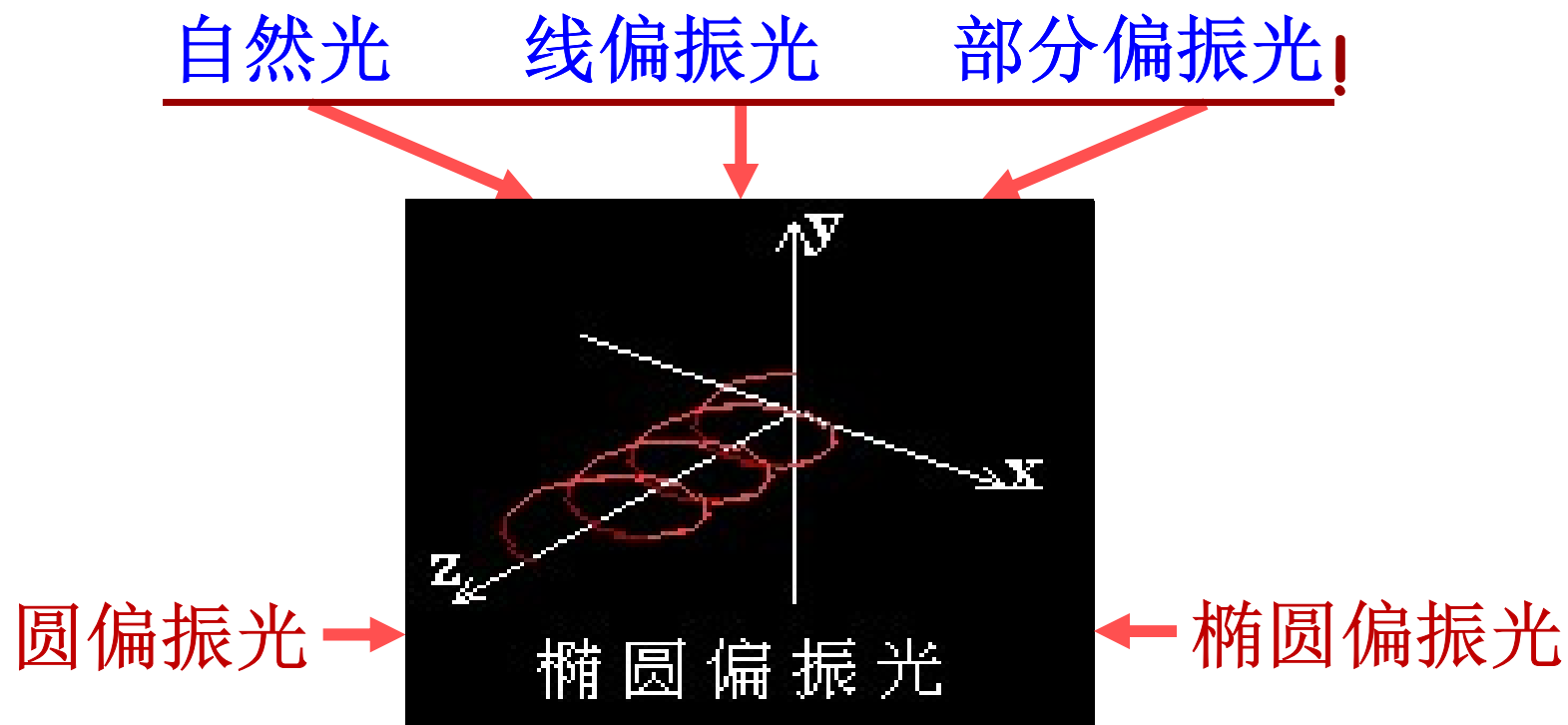


传播方向



➤ 光偏振状态的总结

按照光的偏振状态不同，总共可分为五大类：

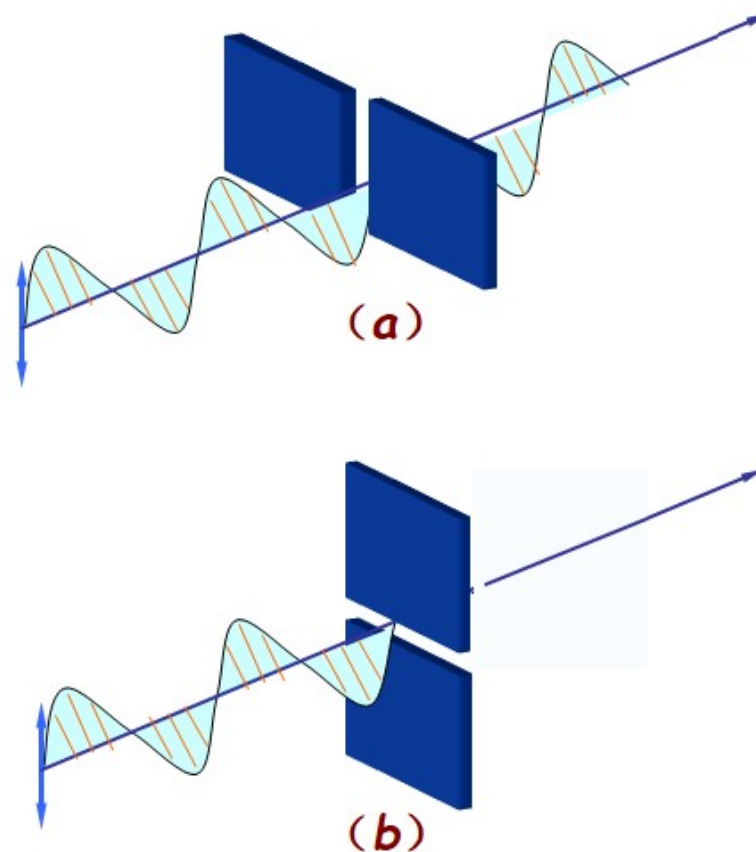


在垂直于光传播方向的平面内，光矢量按一定频率旋转(左旋/右旋)

§ 22-2 偏振光的产生和检验

1. 偏振片的起偏和检偏

当机械横波通过一狭缝时，如果狭缝的方向与机械横波的振动方向相同，则此横波可通过该狭缝；如果狭缝的方向与机械横波的振动方向相垂直，则此横波就不能通过该狭缝。



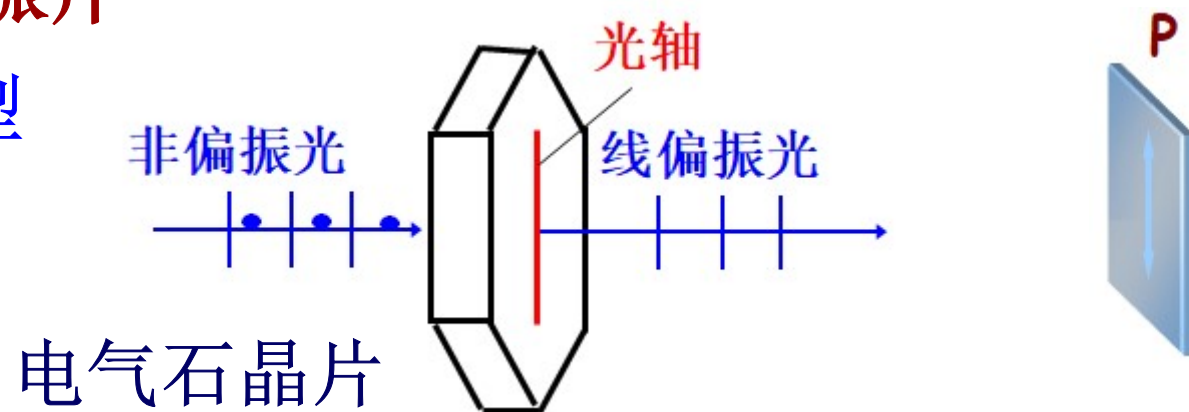
与机械波相仿，对于光波我们也可找到类似的“狭缝”，使自然光通过此狭缝后变为线偏振光，此“狭缝”称为起偏器。

用做起偏器的是一种称为“二向色性”的物质(光学各向异性)，如1mm厚的电气石薄片就几乎可以将某一振动方向的光全部吸收。

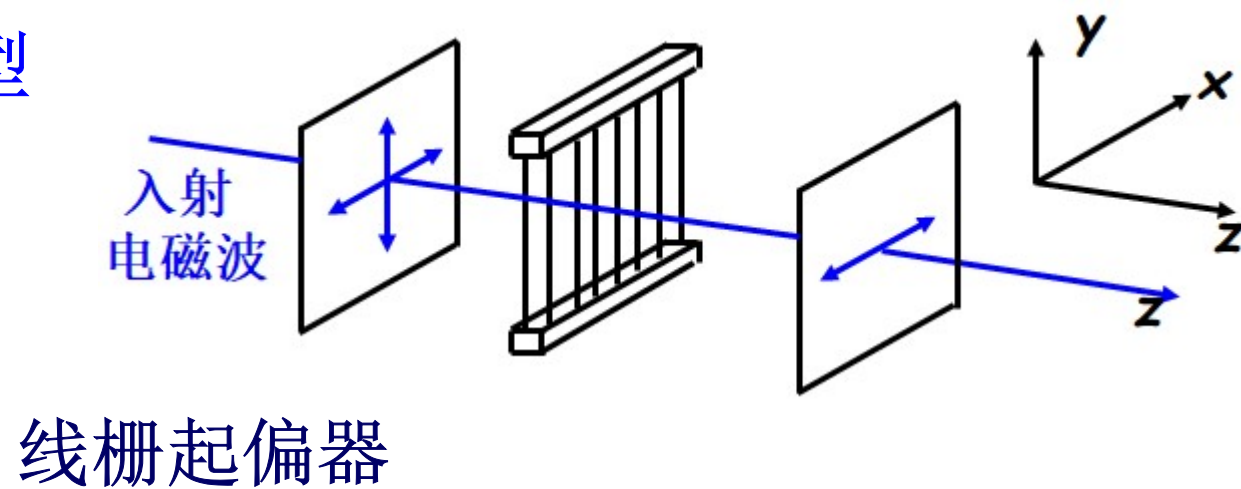
利用“二向色性”物质所制成的薄片称为偏振片，其中能够让光通过的特定方向称为偏振化方向。

1). 偏振片

微晶型

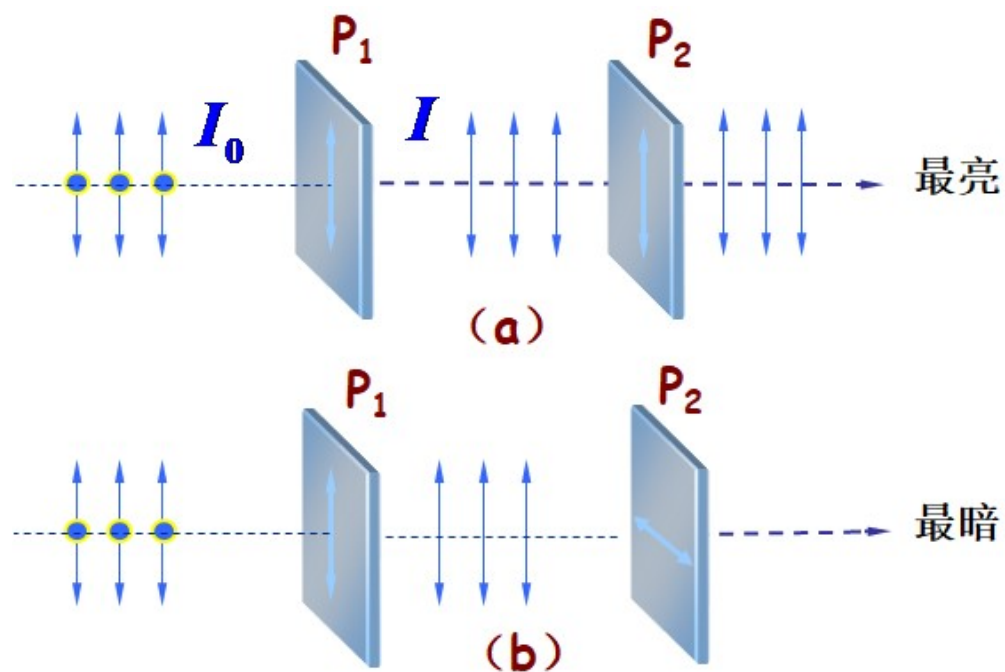


分子型

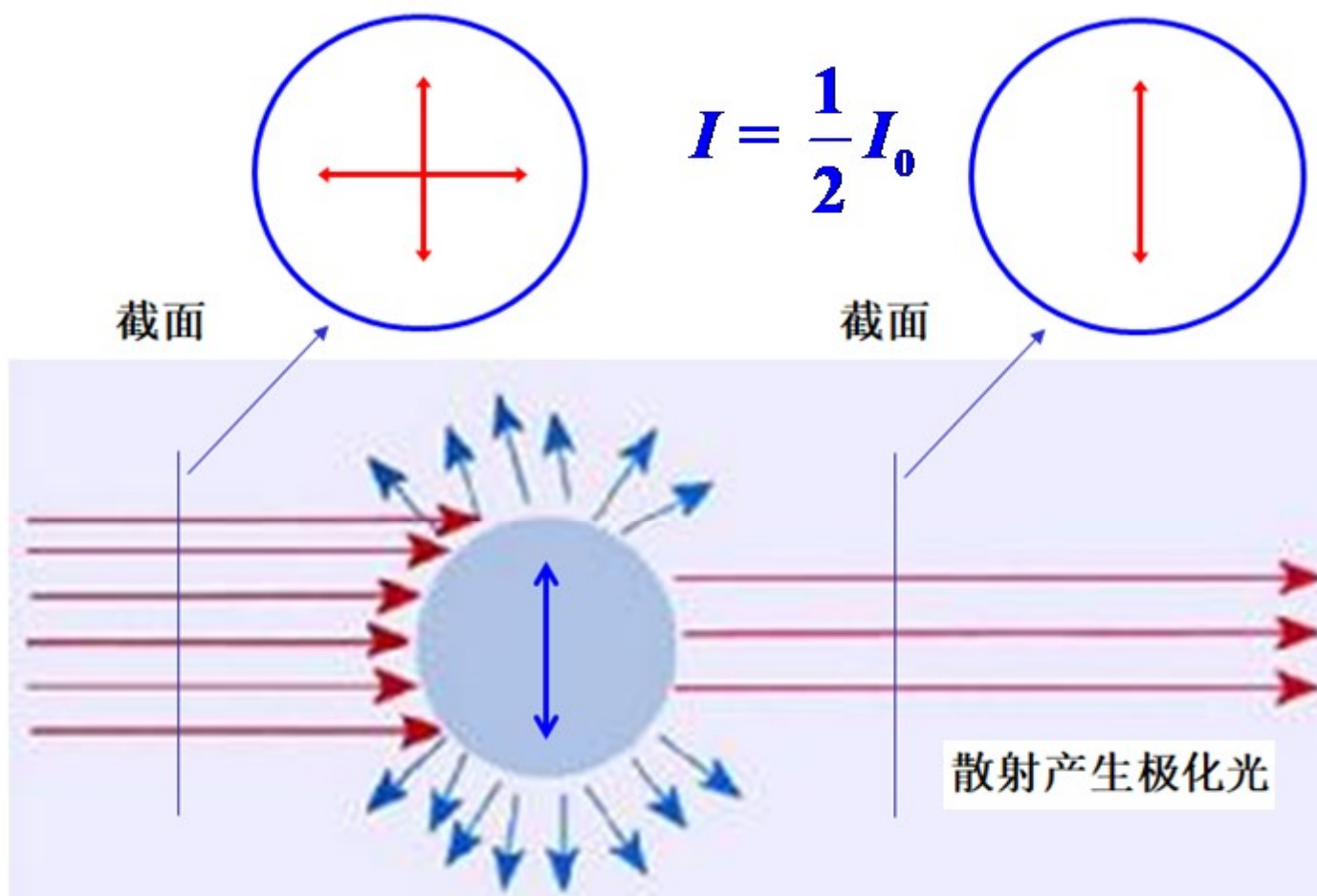


2). 偏振片的起偏与检偏

偏振光获得后，检查光线是否为偏振光时，也可用偏振片：当偏振片的偏振化方向与偏振光的振动方向垂直时，偏振光就不能通过偏振片

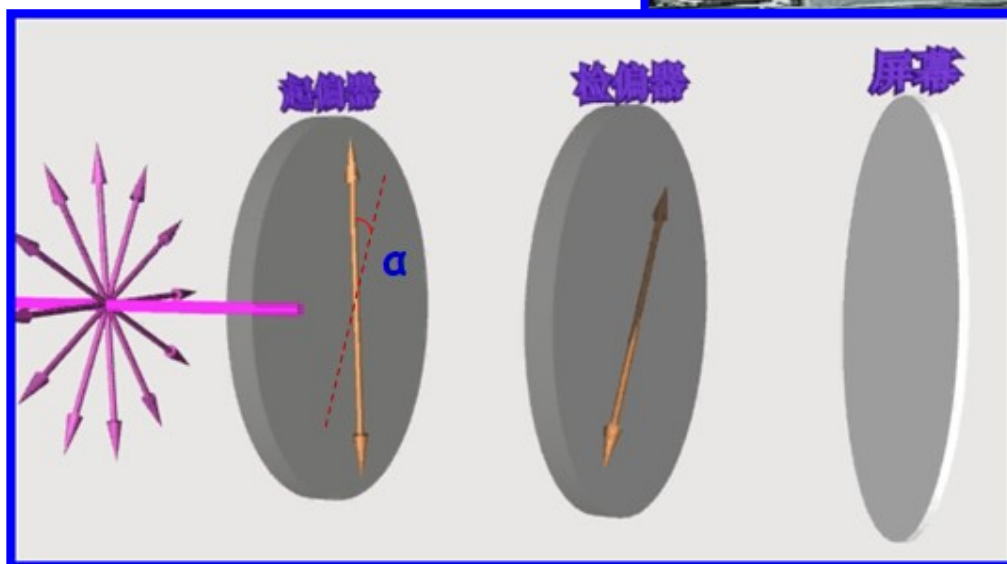
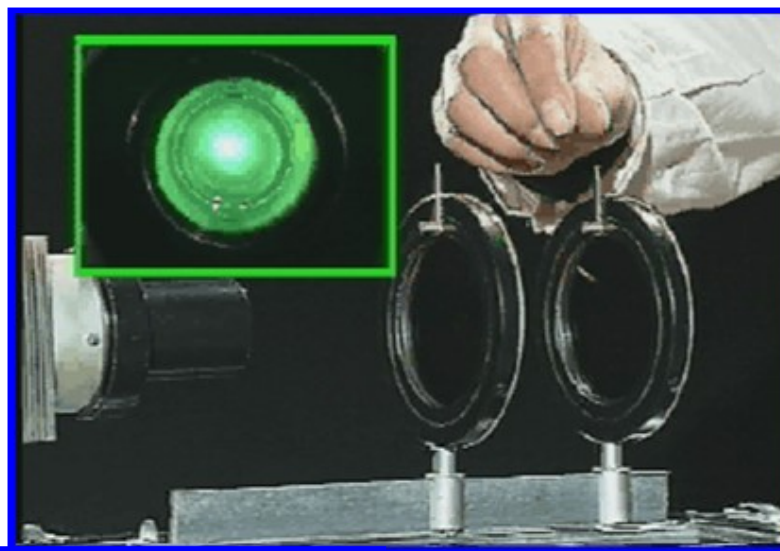


$$I = \frac{1}{2} I_0$$



- 起偏方式：反射、折射、透射，**散射和双折射**

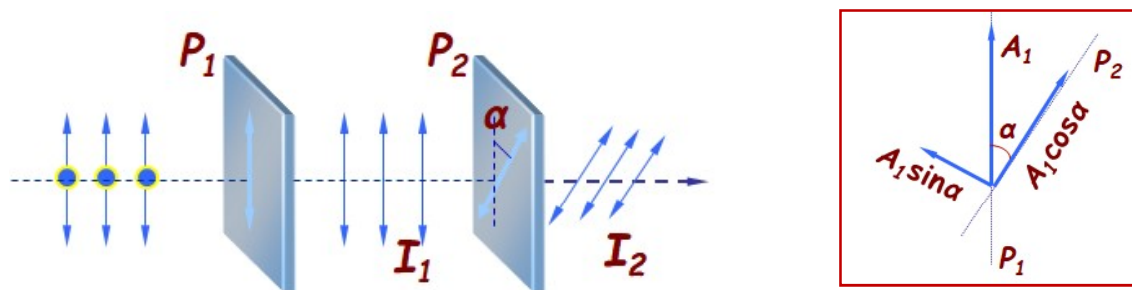
➤起偏与检偏实验



$$I(I_0) = ?$$

3). 马吕斯定律

设起偏器和检偏器的偏振化方向成 α 角，入射到检偏器的光强为 I_1 ，透射光强为 I_2 ，则



$$I_0 \propto E_0^2 \propto A_1^2, \quad I \propto E^2 = E_0^2 \cos^2 \alpha = A_1^2 \cos^2 \alpha$$

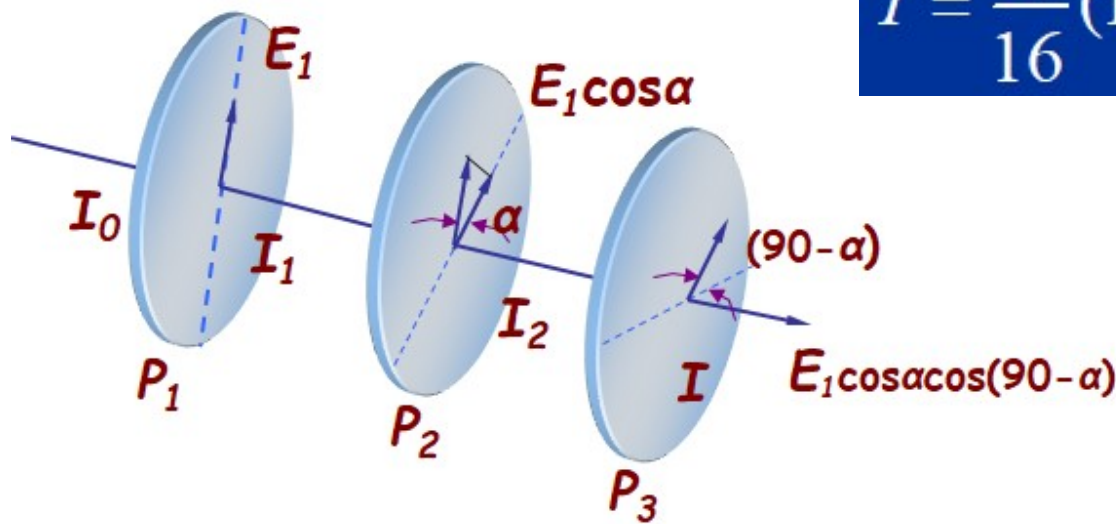
$$I = I_0 \cos^2 \alpha \quad \text{——马吕斯定律(1809)}$$

$$\alpha = 0, \quad I = I_{\max} = I_0; \quad \alpha = \frac{\pi}{2}, \quad I = 0 \quad \text{——消光}$$

课堂练习题22-1:

两正交偏振片之间，有一偏振片以角速度 ω 旋转。证明自然光通过这一系统后，出射光的强弱变化频率被调制为旋转频率的四倍。已知 I_0 是自然光强度， I 是最后的出射光强度。证明：

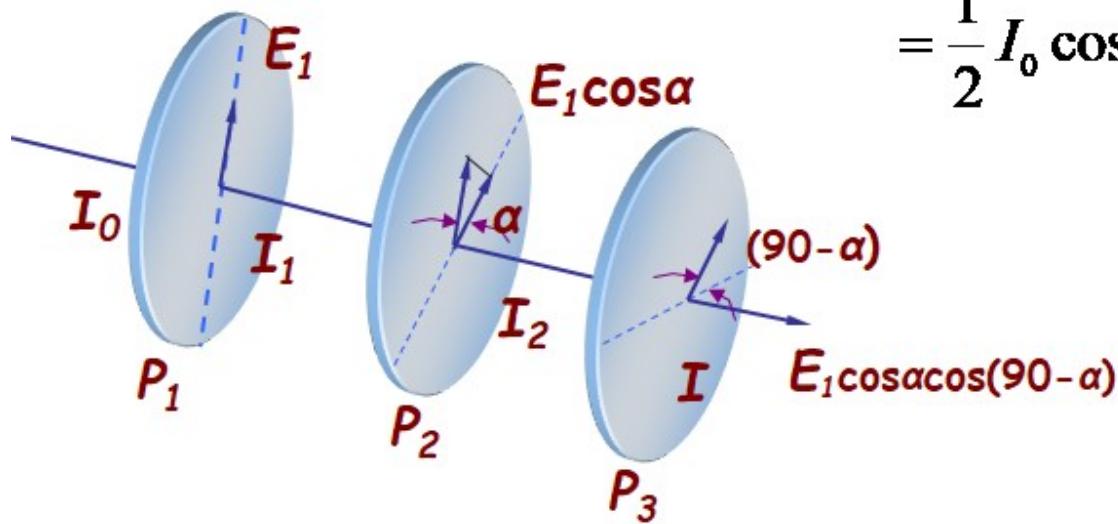
$$I = \frac{I_0}{16}(1 - \cos 4\omega t)$$



解：当自然光通过 P_1 时， $I_1 = \frac{1}{2} I_0$

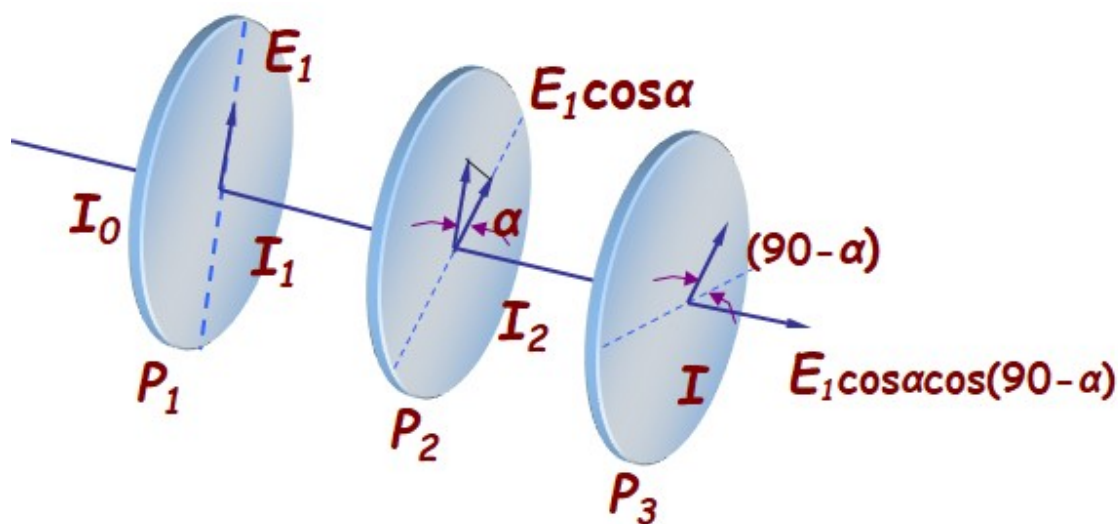
设 t 时刻， P_2 转过的角度 $\alpha = \omega t$ ，当线偏振光 I_1 透过 P_2 时， $I_2 = I_1 \cos^2 \alpha = \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha$

当线偏振光 I_2 再透过 P_3 时 $I = I_2 \cos^2(90 - \alpha)$
 $= \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha \cos^2(90 - \alpha)$



$$\begin{aligned}
 I &= \frac{1}{2} I_0 \cos^2 \alpha \sin^2 \alpha = \frac{1}{8} I_0 \sin^2 2\alpha \\
 &= \frac{1}{16} I_0 (1 - \cos 4\alpha) \\
 &= \frac{1}{16} I_0 (1 - \cos 4\omega t)
 \end{aligned}$$

---证毕！



课堂练习题22-2:

用两偏振片平行放置作为起偏器和检偏器。在它们的偏振化方向成 30° 角时，观测某一非偏振光源；又在成 60° 角时，观察同一位置处的另一非偏振光源。当发现两次所得的强度相等时，求照到起偏器上的两光源的光强之比。

解： 设 I_1 、 I_2 分别为两光源照到起偏器上的光强。

透过起偏器后，光的强度分别为 $I_1/2$ 和 $I_2/2$ 。

根据马吕斯定律，透过检偏器后光的强度分别为：
 $I'_1 = \frac{1}{2} I_1 \cos^2 30^\circ \quad I'_2 = \frac{1}{2} I_2 \cos^2 60^\circ$

但按题意 $I'_1 = I'_2$ ，得：

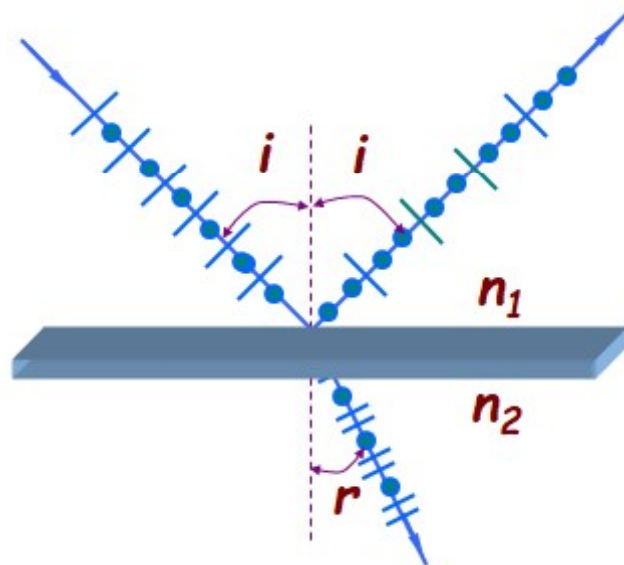
$$I_1 \cos^2 30^\circ = I_2 \cos^2 60^\circ$$

所以
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\cos^2 60^\circ}{\cos^2 30^\circ} = \frac{\frac{1}{4}}{\frac{3}{4}} = \frac{1}{3}$$

2. 光在反射和折射时的偏振现象

1). 反射光和折射光的偏振(实验现象)

自然光在两种介质 n_1 、 n_2 的交界面上发生反射和折射时，反射光和折射光都将成为**部分偏振光**。**反射光中垂直入射面的光矢量加强**，**折射光中平行入射面的光矢量加强**。



---为什么反射光会偏振？

2). 布儒斯特定律(1812)

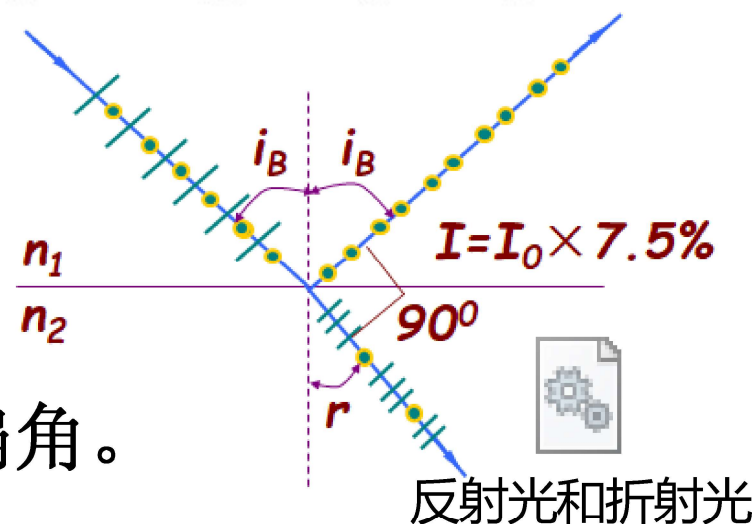
当光线以 i_B 入射，并且满足： $i_B + r = 90^\circ$ 时
实验发现，反射光线是完全偏振光，而折射光线仍是部分偏振光。

$$n_1 \sin i_B = n_2 \sin r = n_2 \sin(90^\circ - i_B) = n_2 \cos i_B$$

即：
$$\tan i_B = \frac{n_2}{n_1} = n_{21}$$

此式称为布儒斯特定律

i_B 称为布儒斯特角或起偏角。

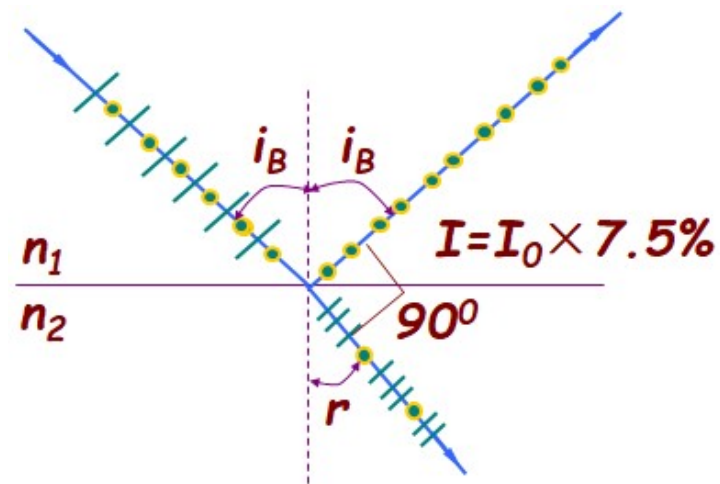


若介质是空气与玻璃组合的情形，两者的折射率分别为 $n_1=1.0$ 、 $n_2=1.50$ ，则：

$$\left. \begin{array}{l} \text{空气} \rightarrow \text{玻璃} \quad i_0 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{1.50}{1.00} = 56^\circ 18' \\ \text{玻璃} \rightarrow \text{空气} \quad i_0 = \operatorname{tg}^{-1} \frac{1.00}{1.50} = 33^\circ 42' \end{array} \right\} \text{互余}$$

思考：

如果入射光是线性偏振光，则反射光是怎样的？其强度又如何变化？

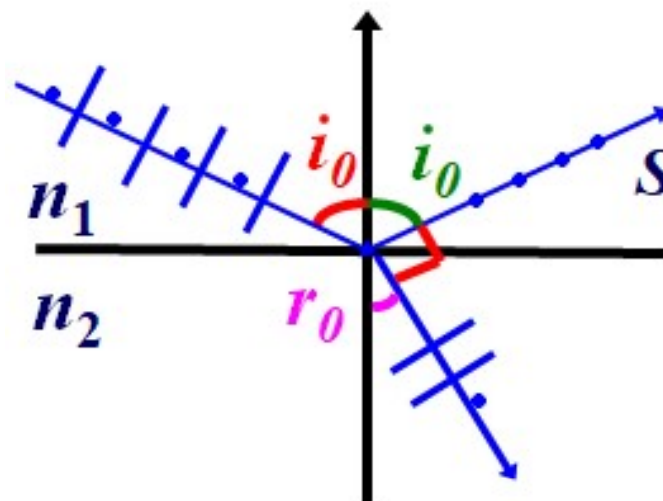


➤布儒斯特定律的应用

①**检偏**：让待检光以布儒斯特角 i_B 入射到界面上，以入射光为轴来旋转光线(保持 $i = i_B$ 不变)

观察反射光的光强变化情况:

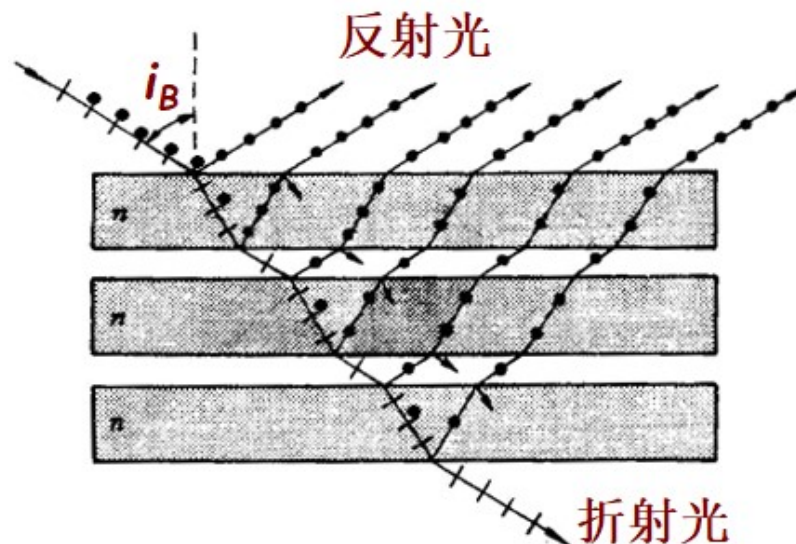
- a) 反射光光强不变，入射光是自然光；
- b) 反射光光强变且有消光，入射光是线偏振光；
- c) 反射光光强变但无消光，入射光是部分偏振光。



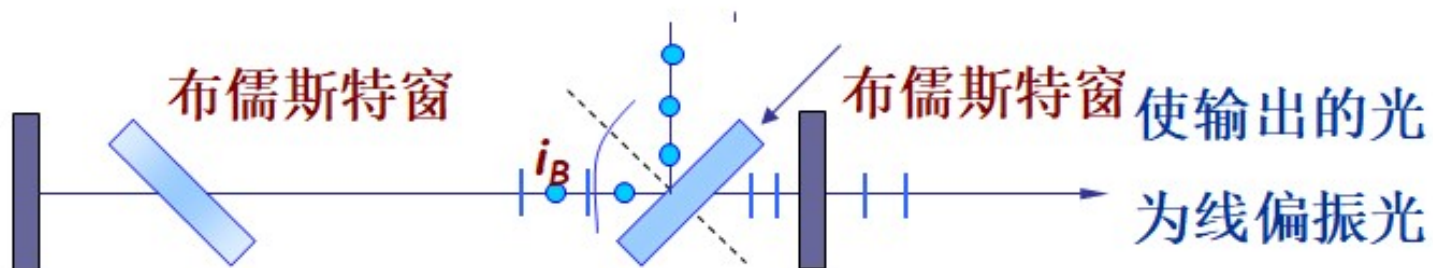
➤布儒斯特定律的应用

②玻璃堆效应：

增强反射光的强度
和提高折射光的偏
振化程度。



激光器中的布儒斯特窗



3. 光的双折射现象

一束光线经某些晶体折射后，分裂成沿不同方向折射的两束光线，这种现象称为双折射。

1). 寻常光和异常光

光线进入某些晶体后，分成两束折射光线，其中一束遵守折射定律，

---称为寻常光(o 光)，

另一束不遵守折射定律，

---称为非常光(e 光)。



方解石的双折射现象

➤ 寻常光(o光):

遵从折射定律

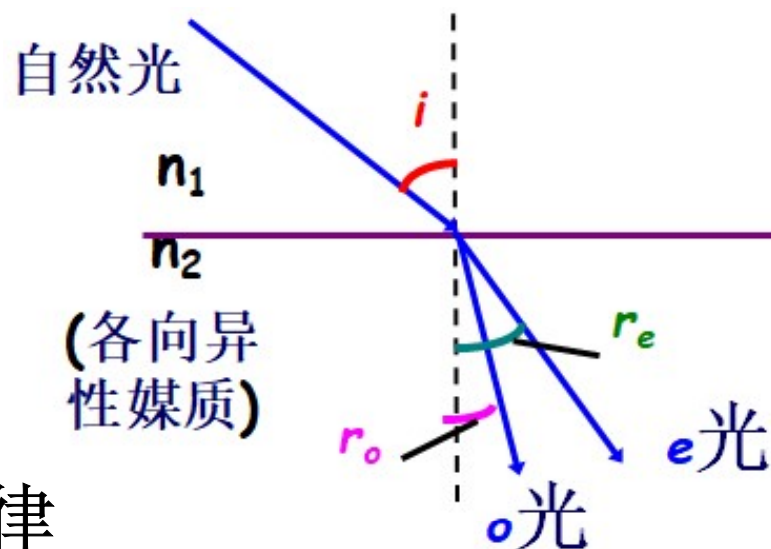
$$n_1 \sin i = n_2 \sin r_o$$

➤ 非常光(e光):

一般不遵从折射定律

$$\frac{\sin i}{\sin r_e} \neq \text{const} \quad \text{e光折射线也不确定在入射面内}$$

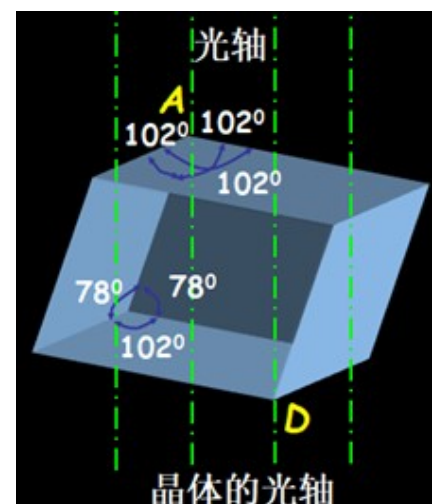
- 实验表明：双折射现象中的两束折射光线都是线偏振光，又称为寻常光线和异常光线。



2). 晶体的光轴与主平面

晶体中存在一个方向，光沿该方向传播时，不产生双折射现象，称该方向为晶体的**光轴**。

A和**D**是方解石晶体中的两个顶点，其棱边之间的夹角为 102° ，过**A**或**D**画一条直线，与晶体各邻边都等角，此直线就是光轴，与光轴平行的直线都是**光轴**。

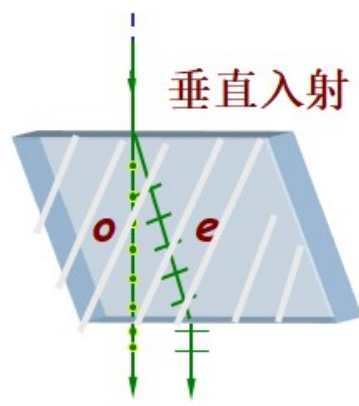
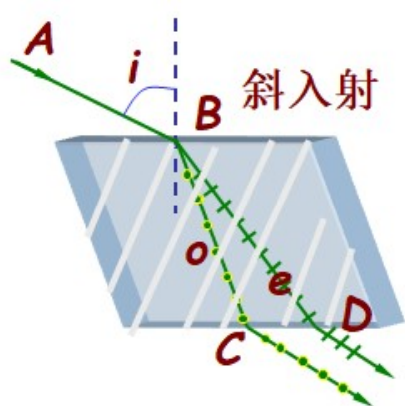


单轴晶体：只有一条光轴的晶体；

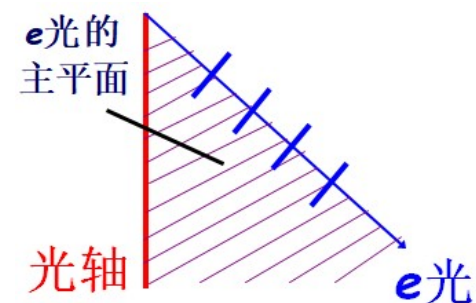
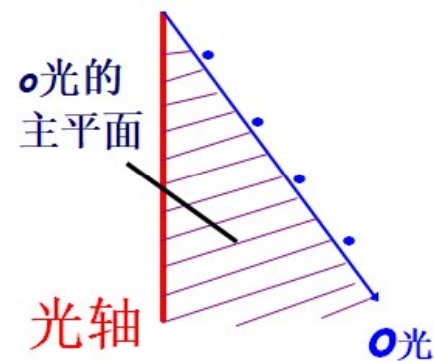
双轴晶体：存在两条光轴的晶体。

2). 晶体的光轴与主平面

光线与光轴组成的平面称为**主平面**。**o**光的振动垂直于主平面，**e**光的振动平行于主平面。



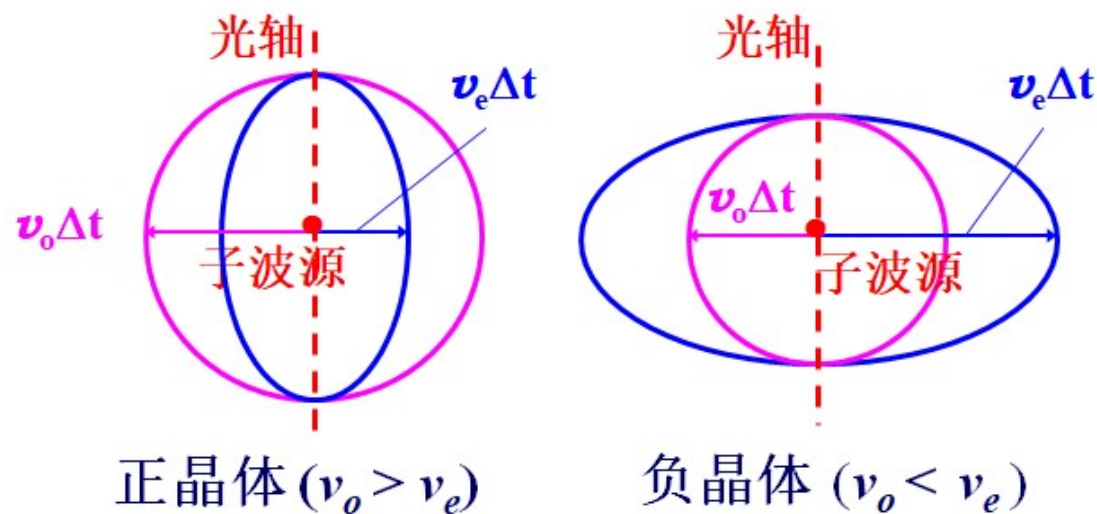
寻常光和异常光



只有当光轴位于入射面内时，**o**光和**e**光的主平面才会重合。

3). 单轴晶体中双折射现象的解释

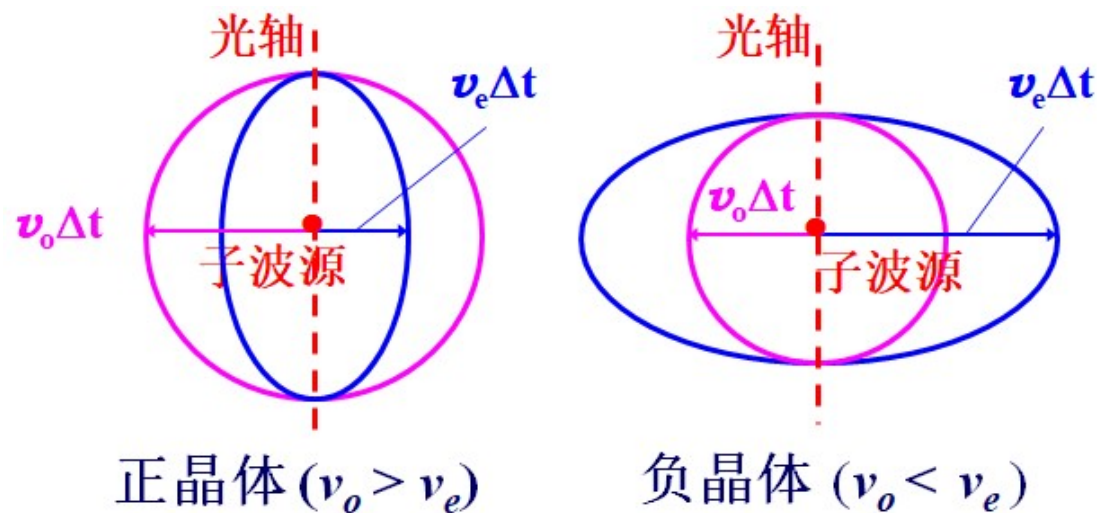
寻常光线在晶体中传播速度相同，所以波阵面为球面；非常光线在晶体中传播速度不同，垂直于光轴的速率最大(或最小)，波阵面为旋转椭球面。两光束在沿光轴传播时，速度相同。



➤ 晶体的主折射率

两光束垂直于光轴传播时，若 $v_o > v_e$ ，称为正晶体(石英)；若 $v_o < v_e$ ，称为负晶体(方解石)。

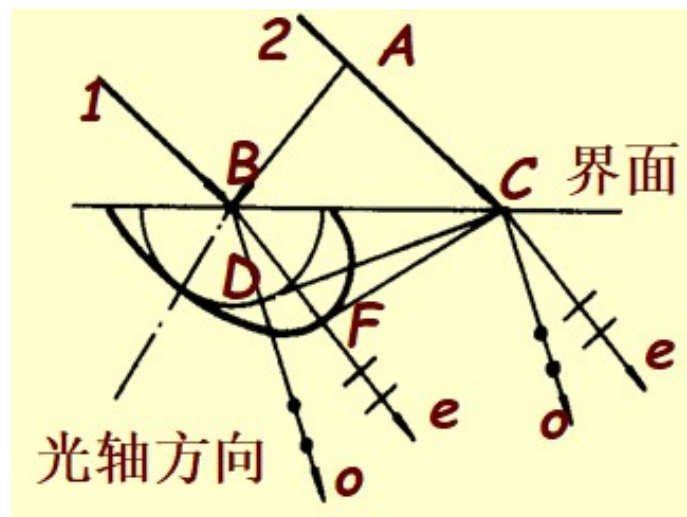
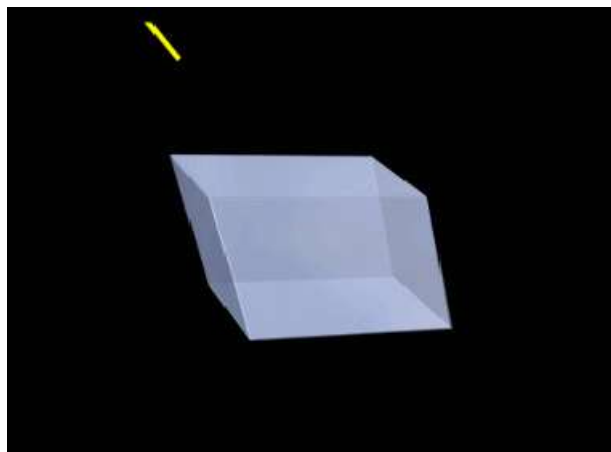
通常将 $n_e = c/v_e$ 称为 **e光主折射率**， $n_o = c/v_o$ 称为 **o光主折射率**。正晶体/负晶体： $n_e > n_o / n_e < n_o$ 。



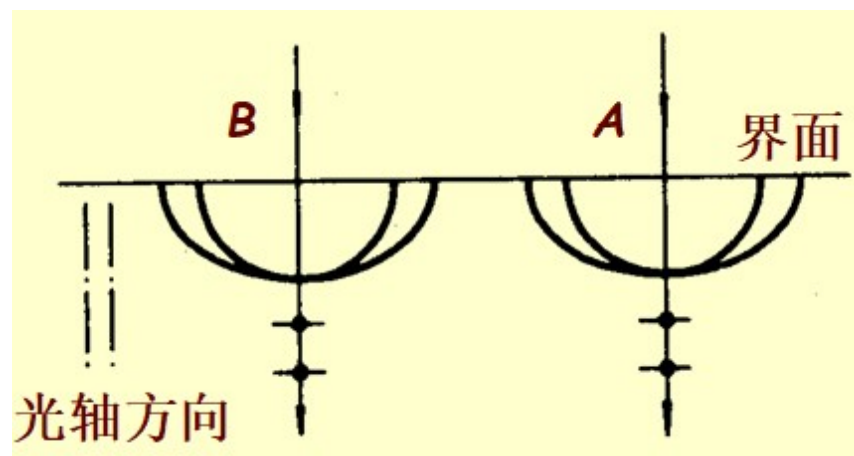
4). 晶体中o光和e光的传播

根据惠更斯原理，对于单轴晶体的几种特殊情况，应用作图法可确定o光和e光的传播方向。

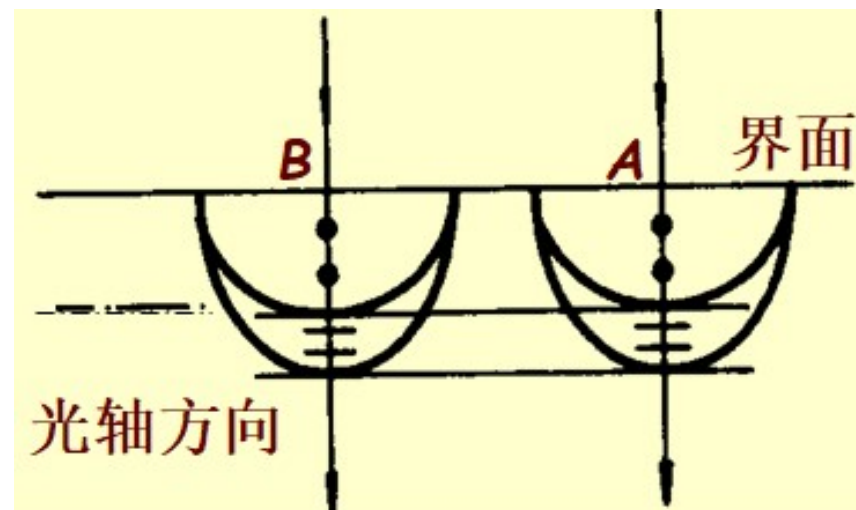
①平行光斜入射晶体表面(光轴在入射面内且与晶面斜交)



②平行光正入射
晶体表面(光轴在
入射面内且垂直
于界面)



③平行光正入射
晶体表面 (光轴
在入射面内但平
行于界面)



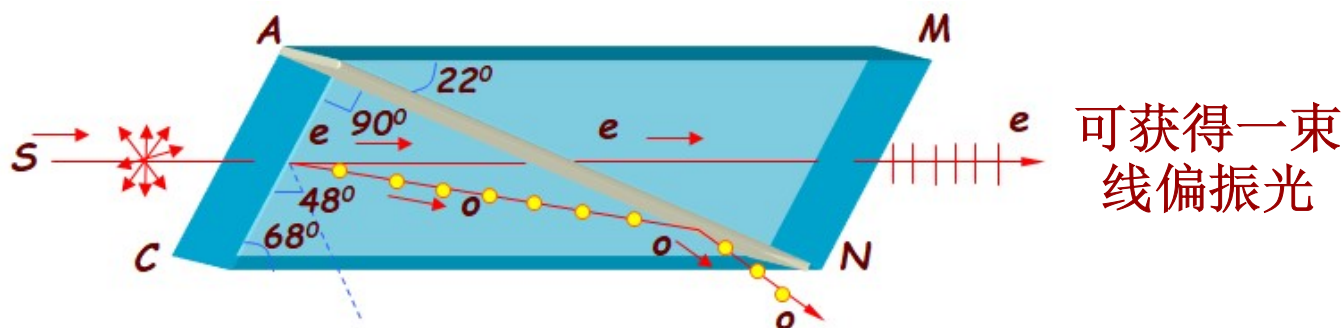
4. 晶体光学器件

1). 尼科耳棱镜



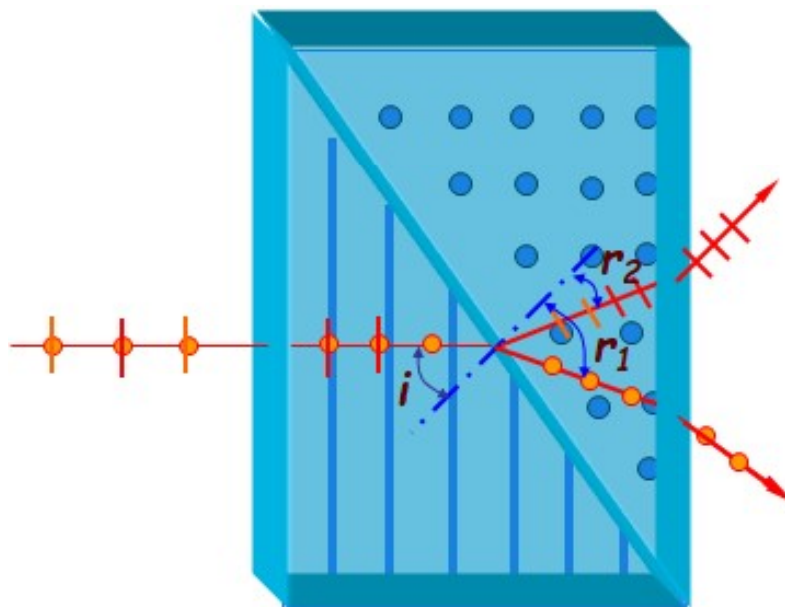
尼科尔 棱

尼科耳棱镜是由两块方解石晶体经特殊切割后再用加拿大树胶粘合而成，树胶 $n=1.55$ ，方解石的 o 光 $n_o=1.658$ ， e 光 $n_e=1.486$ 。对树胶 o 光以 76° 入射，已满足全反射条件(光密到光疏) $\sin 69.2^\circ = n/n_o = 1.55/1.658$ 。



2). 渥拉斯顿棱镜

两光轴相互垂直的方解石直角棱镜组成，其作用是将 \mathbf{o} 光和 \mathbf{e} 光分开。



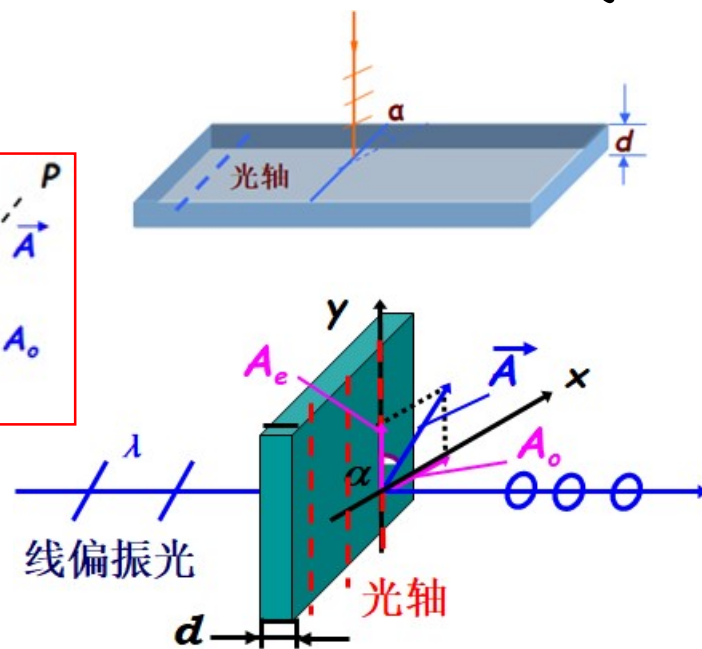
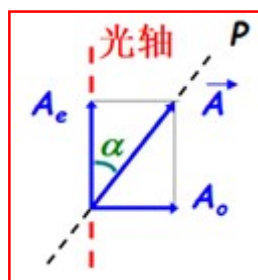
3).波晶片(相位延迟片)

波晶片是双折射晶体制成的厚度均匀的晶体薄片，晶体光轴与薄片平面平行。**o**光和**e**光垂直通过厚度为**d**的波晶片时，由于折射率不同(波速不同)，将产生光程差：

$$\delta = |n_o - n_e| d$$

相应的位相差为：

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d$$



适当选取 **d** ，可制成不同规格的波晶片：

①四分之一波片

o 光和 **e** 光通过该波片能产生 **$\lambda/4$** 的光程差。

$$|n_o - n_e| \cdot d = \frac{\lambda}{4} \rightarrow d_{1/4} = \frac{\lambda}{4|n_o - n_e|}$$

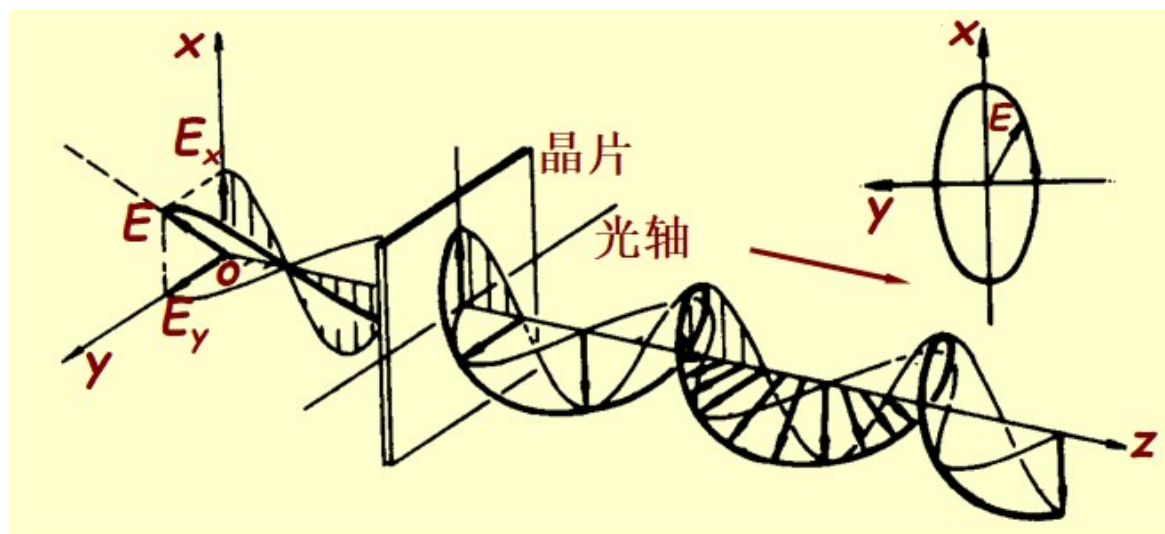
②二分之一波片

o 光和 **e** 光通过该波片能产生 **$\lambda/2$** 的光程差。

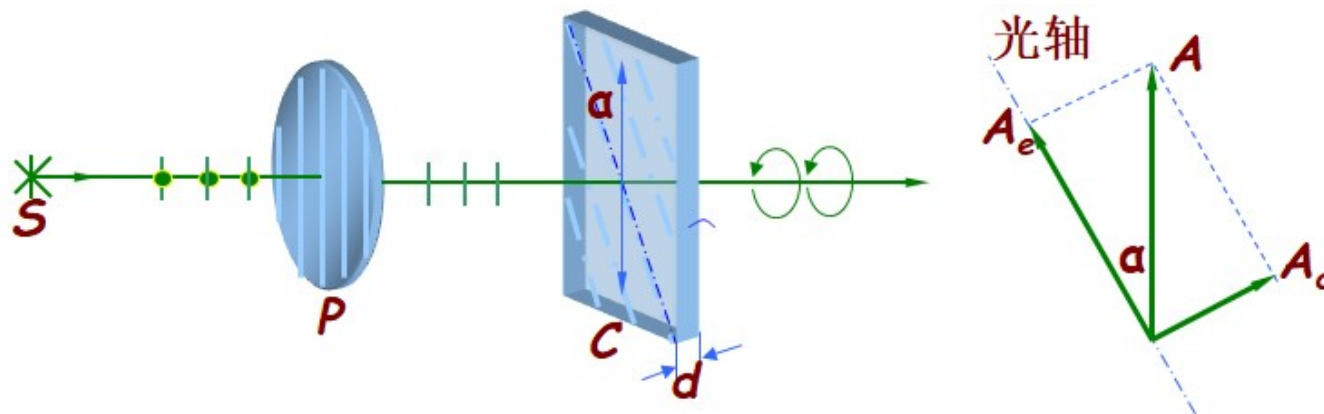
$$|n_o - n_e| \cdot d = \frac{\lambda}{2} \rightarrow d_{1/2} = \frac{\lambda}{2|n_o - n_e|}$$

5.椭圆偏振光的获得

一线偏振光垂直入射波晶片，出射的 o 光和 e 光将成为两束沿同一方向传播的、振动方向垂直的、有恒定位相差的偏振光。两光的合振动矢量，其端点轨迹一般为椭圆，称椭圆偏振光。



获得椭圆偏振光的装置：



偏振片**P**产生的线偏振光进入波晶片后产生两个相互垂直的偏振光，其振幅为 **$A_o = A \sin \alpha$** 、 **$A_e = A \cos \alpha$** ，穿过**d**后，两者的位相差：

$$\Delta \varphi = \varphi_o - \varphi_e = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e) d$$

上式中，若晶片为负晶片，则 $n_o > n_e$ 。适当选取晶片厚度，可得：

① $\Delta\varphi = k\pi$ ——产生线偏振光

② $\Delta\varphi =$ 任意角度 ——产生椭圆偏振光

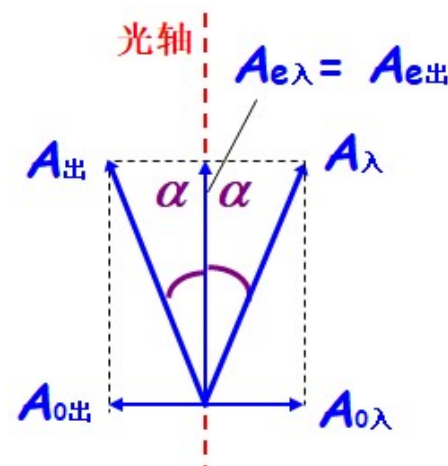
①例如，当 $k = 1$ 时， $\Delta\varphi = \pi$ ，可得光程差

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d = \pi \quad \delta = (n_o - n_e)d = \frac{\lambda}{2}$$

---二分之一波片产生的是线偏振光

此时，若入射的线偏振光与光轴的夹角为 α

则出射光的振动方向与入射光的振动方向之间的夹角是 2α 。

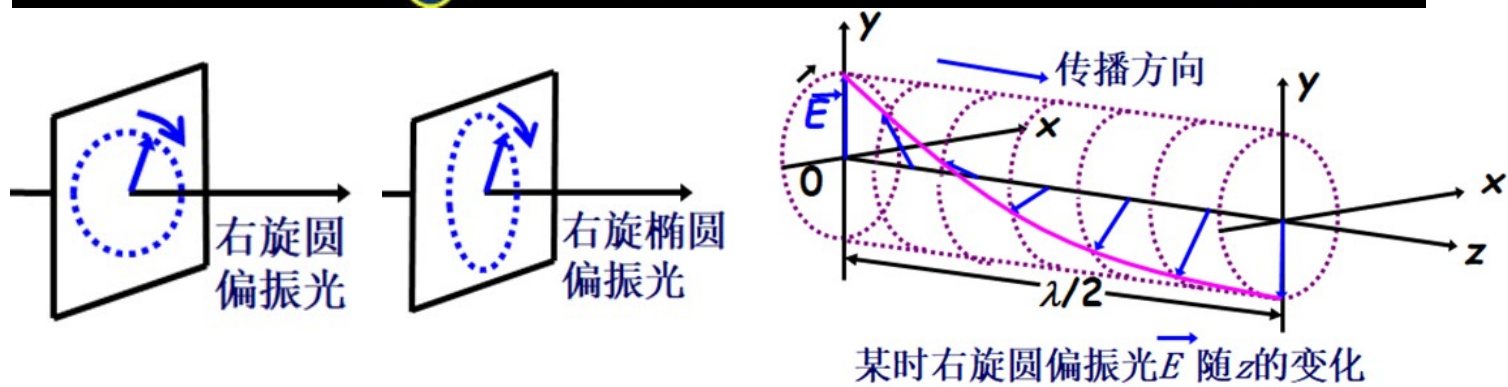
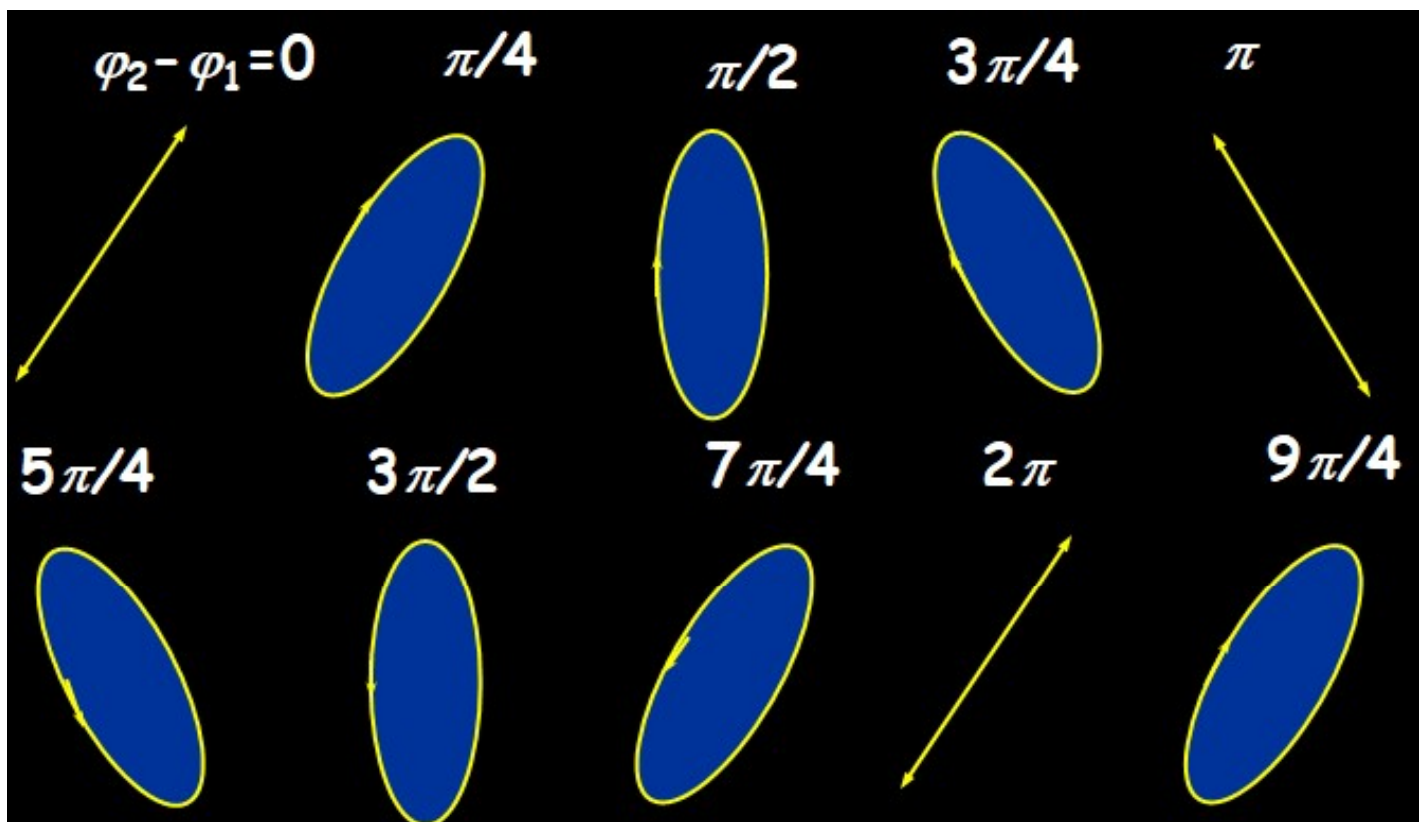


②当 $\alpha=45^\circ$ ，则有 $A_e=A_o$ 。

此时，如果 $\Delta\varphi=\pi/2$ 、 $3\pi/2$ ，则为圆偏振光。

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d = \frac{\pi}{2} \quad \delta = (n_o - n_e)d = \frac{\lambda}{4}$$

---四分之一波片可产生圆偏振光

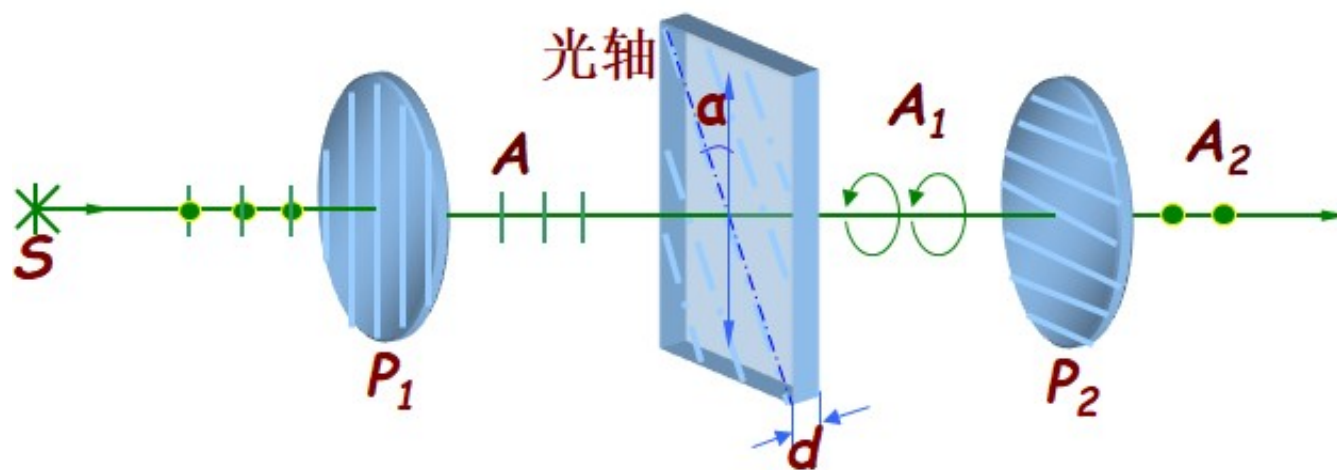


§ 22-3 偏振光的干涉及其应用*

1. 偏振光的干涉

1). 两偏振片的偏振化方向正交

在两正交的偏振片之间放一波晶片，透过该系统后两偏振光的振幅矢量为 A_{2e} 、 A_{2o} ，则：



$$A_{e2} = A_{e1} \cos \beta$$

$$A_{o2} = A_{o1} \sin \beta$$

由于 $P_1 \perp P_2$

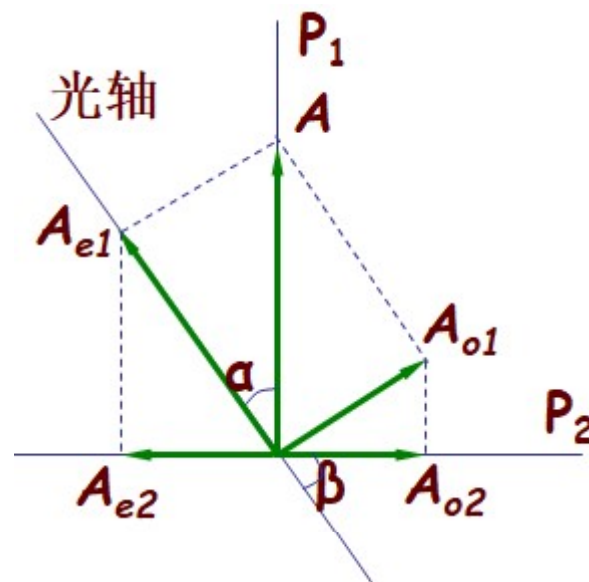
$$\cos \beta = \sin \alpha \quad \sin \beta = \cos \alpha$$

代入上式，得：

$$A_{e2} = A_{e1} \cos \beta = A \cos \alpha \cos \beta = A \sin \alpha \cos \alpha$$

$$A_{o2} = A_{o1} \sin \beta = A \sin \alpha \sin \beta = A \sin \alpha \cos \alpha$$

$$A_{e2} = A_{o2}$$



经上述系统后，出射的两个线偏振光的振幅大小相等、方向相反，这相当于有 π 的附加位相差，因此，总位相差为：

$$\Delta\varphi_{\perp} = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d + \pi$$

$$\Delta\varphi_{\perp} = 2k\pi \quad k = 1, 2, 3 \dots \text{相长干涉}$$

$$\Delta\varphi_{\perp} = (2k + 1)\pi \quad k = 1, 2, 3 \dots \text{相消干涉}$$

2). 两偏振片的偏振化方向平行

若两偏振片 P_1 、 P_2 平行，则：

$$A_{e2} = A_{e1} \cos \alpha = A \cos^2 \alpha$$

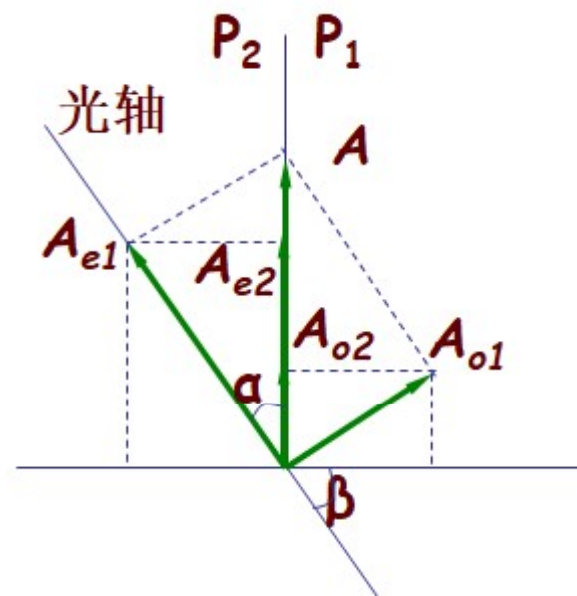
$$A_{o2} = A_{o1} \sin \alpha = A \sin^2 \alpha$$

两束光的相位差：

$$\Delta\varphi_{//} = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d$$

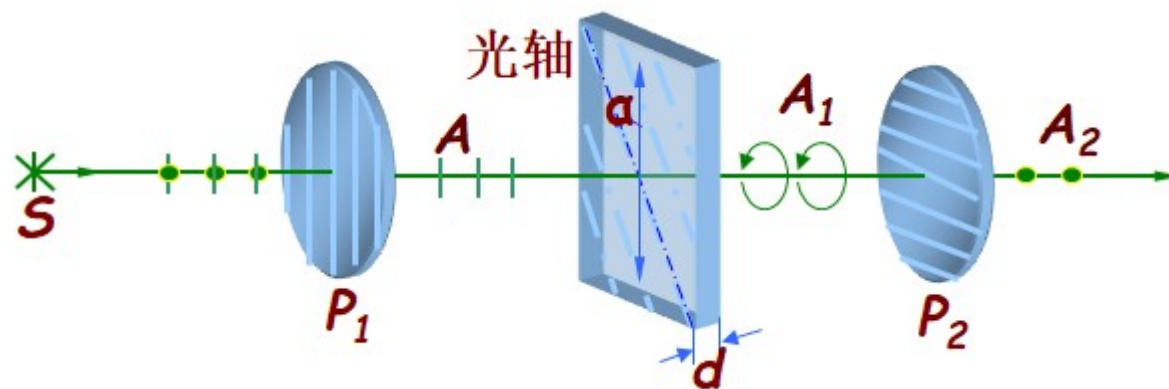
$$\Delta\varphi_{//} = 2k\pi \quad k = 1, 2, 3 \dots \text{相长干涉}$$

$$\Delta\varphi_{//} = (2k + 1)\pi \quad k = 1, 2, 3 \dots \text{相消干涉}$$



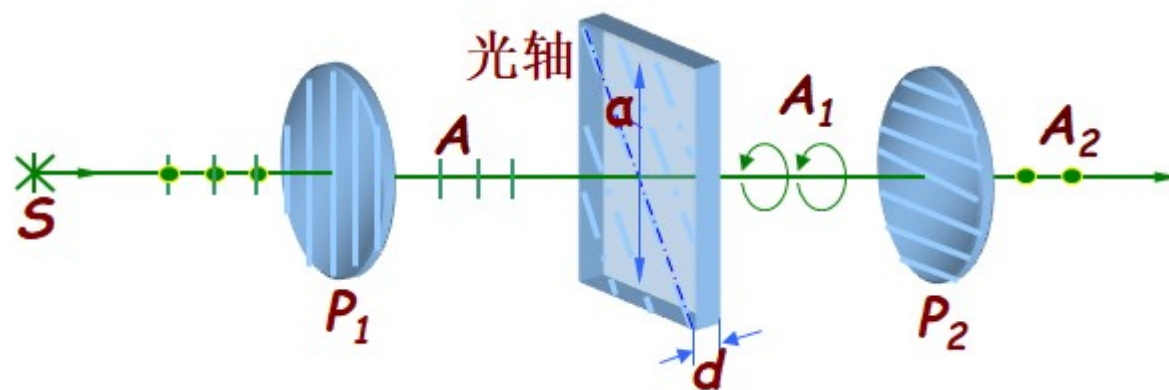
3). 显色偏振

若两束相干偏振光的相位差是随波晶片厚度 d 变化的。如果用单色自然光垂直入射上述实验装置，当晶片厚度均匀时，屏上将呈现一片强度分布均匀的亮光，没有干涉条纹。旋转系统中的波晶片，即改变 α 角，强度发生变化。



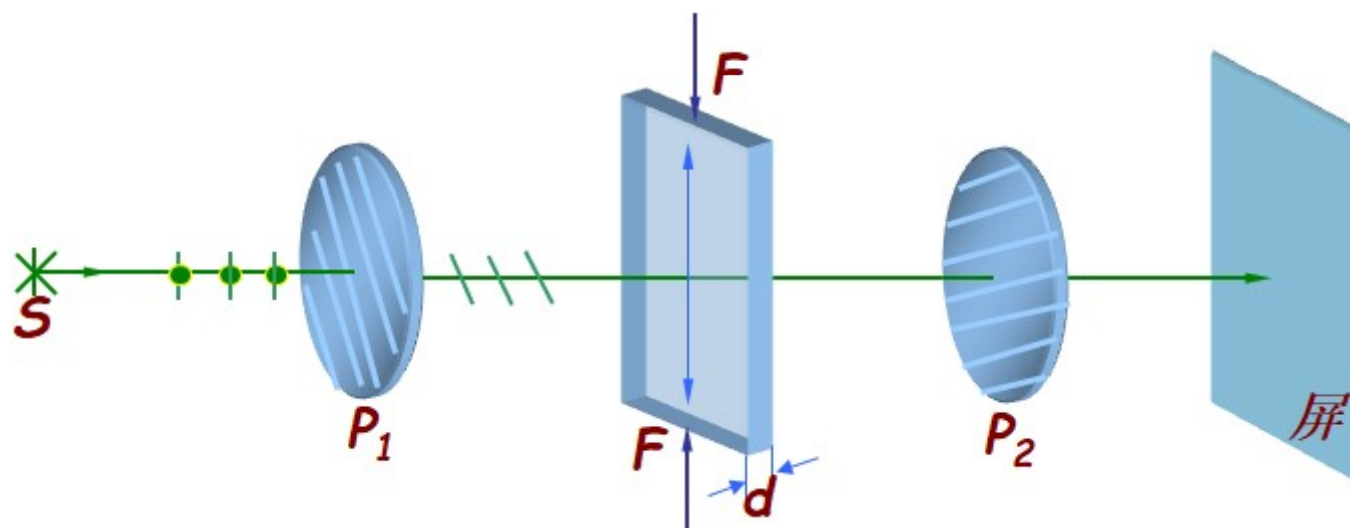
3). 显色偏振

如果波晶片的厚度不均匀，各处干涉情况将不同，屏上将呈现干涉条纹。若用白光照射，一些波长的光满足相长干涉条件，另一些满足相消干涉条件，因此屏上出现对应的色彩，这种现象称为显色偏振。



2. 光弹效应

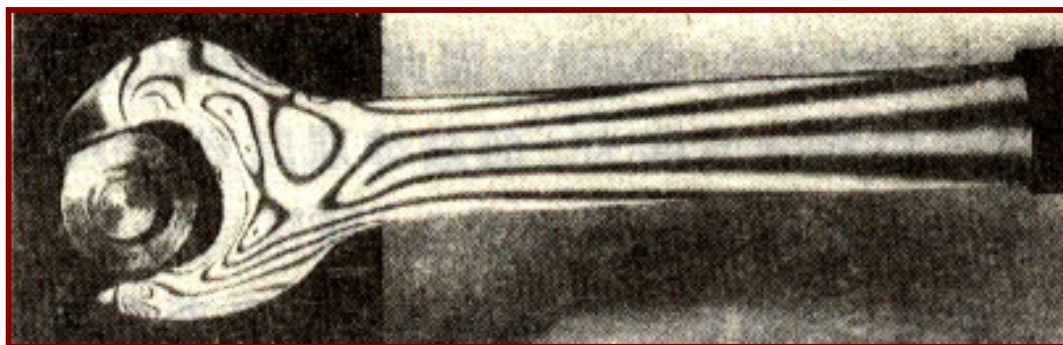
一些非晶体物质(如塑料)在机械应力作用下会变成光学各向异性物质，出现双折射现象，此现象称为——光弹性效应。



非晶体的受力方向相当于光轴方向，在一定的应力范围内，有：

$$n_e - n_o = kp \quad p = F / S$$

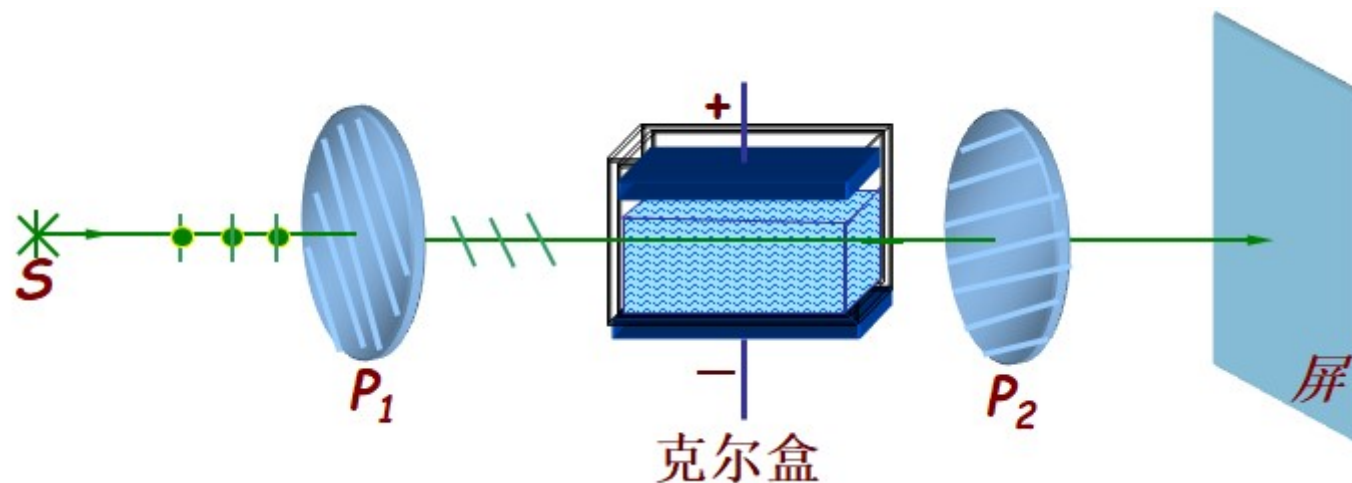
用光弹性材料制成与工件形状相同的模型，将其置于正交偏振片之间：



光测弹性干涉图样

3. 电光效应

1875年克尔(J. Kerr)发现, 一些非晶体或液体在强电场作用下, 显示出双折射现象。在下图的装置中, 不加电场, 光不能透过 P_2 , 而一加电场, P_2 处就有光透出。



o光e光的折射率之差与所加电场的关系:

$$n_e - n_o = kE^2$$

k为克尔系数，与液体种类和波长有关，若电极板长度为***l***，则

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} |n_e - n_o| l = \frac{2\pi}{\lambda} kE^2 l$$

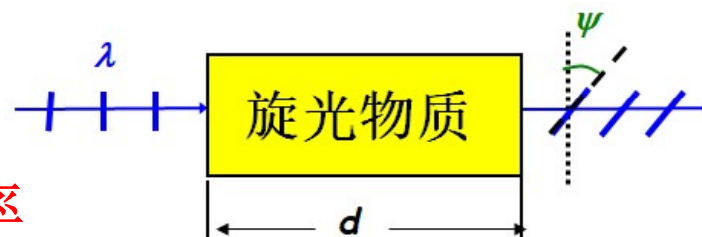
克尔效应惯性极小，反应时间只需**10⁻⁹**秒，因而常被用做电光开关，如产生脉冲激光。

4. 旋光效应

线偏振光通过一些透明物质后，振动面将以光的传播方向为轴旋转一定的角度，这种现象称为旋光现象，这种物质称为旋光物质。

旋转的角度：

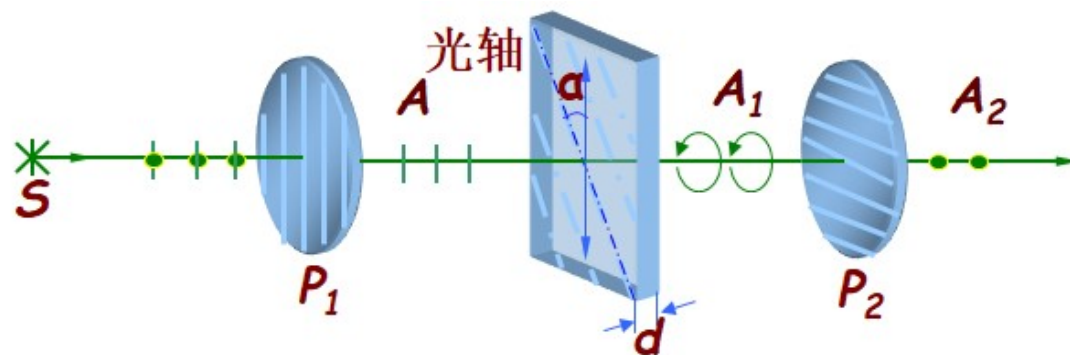
$$\psi = \alpha \cdot d \quad \alpha: \text{旋光率}$$



1mm厚的石英产生的旋光角度对红光、钠黄光和紫光分别为**15°**、**21.7°**、**51°**。若旋光物质为溶液，旋光角度还与浓度有关(如糖溶液)。

课堂练习题22-3:

在 P_1 与 P_2 相互正交的偏振光干涉实验中，当入射于 P_2 的偏振光已是圆偏振光时，在视场处的振幅矢量的量值如何？如果 P_1 与 P_2 不相互正交，则又如何？



解：由题意可知，入射于偏振片 P_2 的偏振光已是圆偏振光，所以：

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d = \frac{\pi}{2}, \quad \text{or} \quad k\pi + \frac{\pi}{2}$$

并且： $\alpha = \frac{\pi}{4}$, $A_{o1} = A_{e1} = A \cos \frac{\pi}{4}$

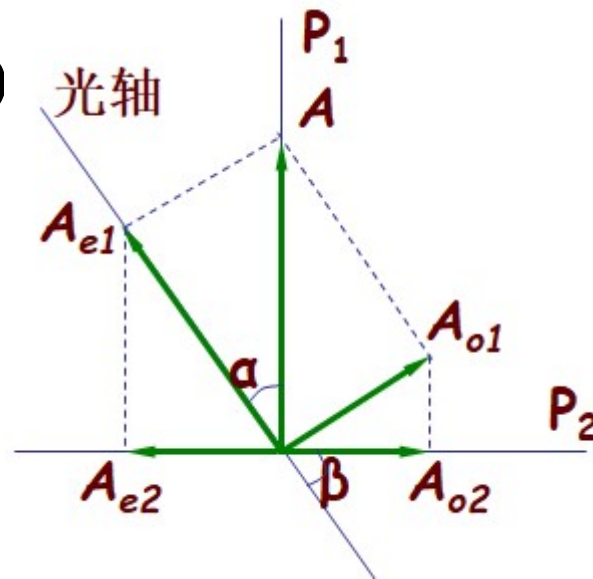
如果 \mathbf{P}_1 与 \mathbf{P}_2 相互正交，则视场处的振幅矢量：

$$A_2 = \sqrt{A_{e2}^2 + A_{o2}^2 + 2A_{e2}A_{o2} \cos(\Delta\varphi + \pi)}$$

$$(A_{e2} = A_{o2} = A \sin \alpha \cos \alpha)$$

$$A_2 = A \sin \alpha \cos \alpha \sqrt{2}$$

$$A_2 = \frac{\sqrt{2}}{2} A$$

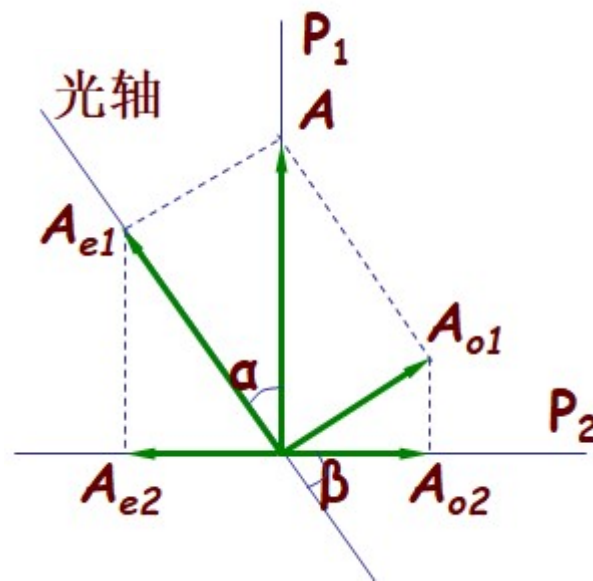


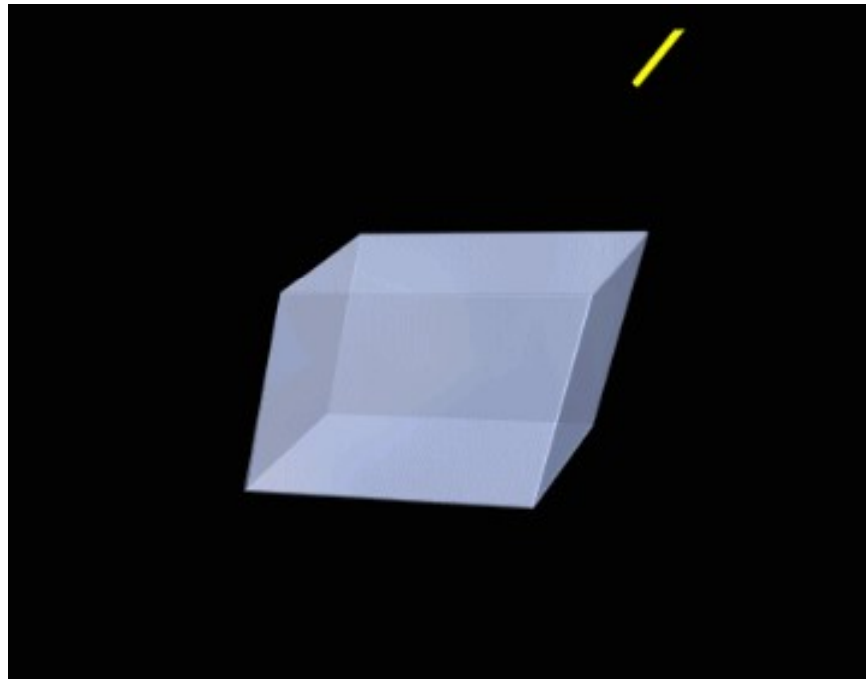
如果 \mathbf{P}_1 与 \mathbf{P}_2 不相正交， \mathbf{P}_2 和波晶片的光轴成 β 角，则视场处的振幅矢量：

$$A_{e2} = A_{e1} \cos \beta = A \cos \frac{\pi}{4} \cos \beta \quad A_{o2} = A_{o1} \sin \beta = A \sin \frac{\pi}{4} \sin \beta$$

$$\begin{aligned} A_2 &= \sqrt{A_{e2}^2 + A_{o2}^2 + 2A_{e2}A_{o2} \cos(\Delta\varphi + \pi)} \\ &= \sqrt{A^2 \cos^2 \frac{\pi}{4}} = \frac{\sqrt{2}}{2} A \end{aligned}$$

表明，圆偏振光入射偏振片，偏振片 \mathbf{P}_2 旋转时，透射光的光强不会变化。





第十二次作业 光的偏振

P405-406

22-2

22-3

22-5

22-7

22-10