

5.2 晶体光学器件

- 利用晶体的双折射特性可以制成光学器件
 - 1、光在晶体中分开为o光和e光，它们都是平面偏振光
可以制成偏振棱镜，以获得平面偏振光
 - 2、晶体中o光和e光的折射率不同，它们的波面是分开的
可以制成相位延迟波晶片，使两列正交分量之间有一定的相位差

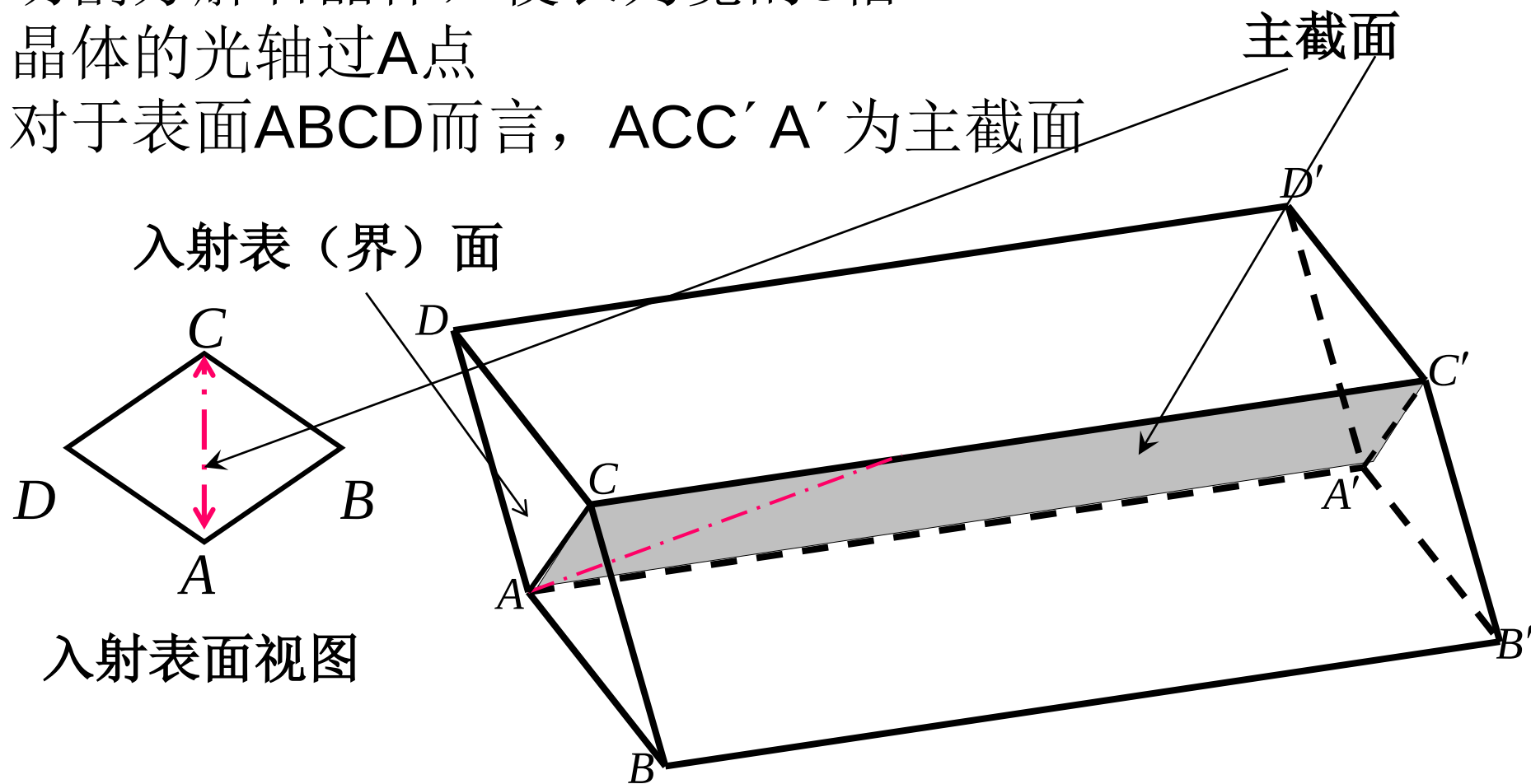
5.2.1 偏振棱镜

1. 尼科耳(Nicol)棱镜

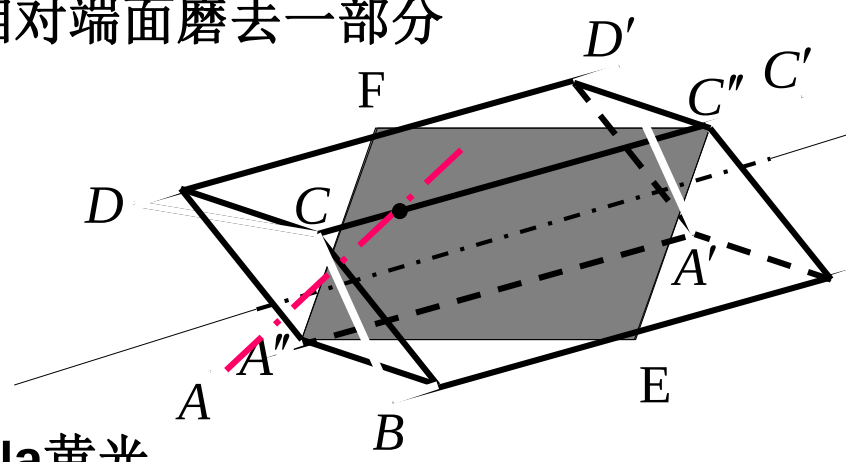
切割方解石晶体，使长为宽的3倍

晶体的光轴过A点

对于表面ABCD而言， $ACC'A'$ 为主截面



先将两相对端面磨去一部分



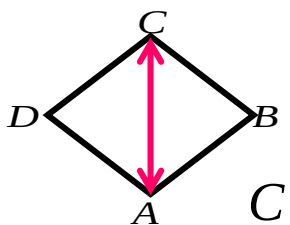
用与主截面垂直的面A''EC''F将晶体剖开为相等的两部分

再用加拿大树胶粘合

对于Na黄光

$$n_e = 1.48641 < n = 1.55 < n_o = 1.65836$$

o光以76°入射加拿大树胶，发生全反射。

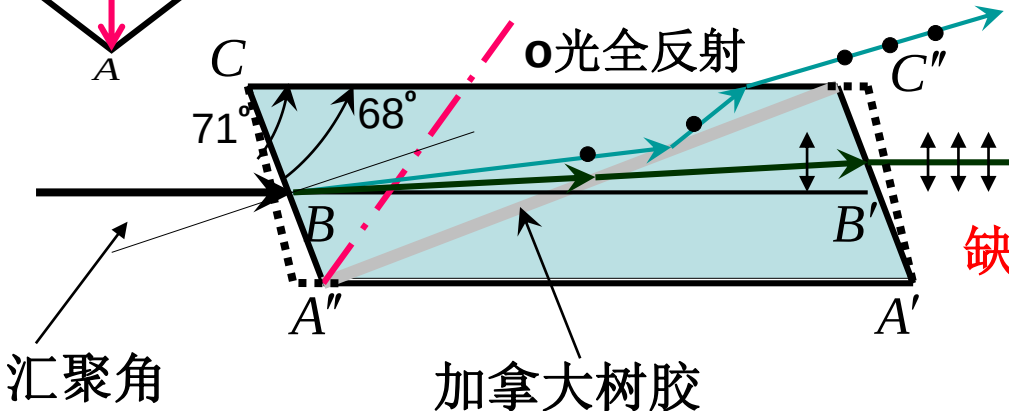


方解石

加拿大树胶

方解石

o光发生全反射，
e光透射出晶体，
其偏振方向平行端面。

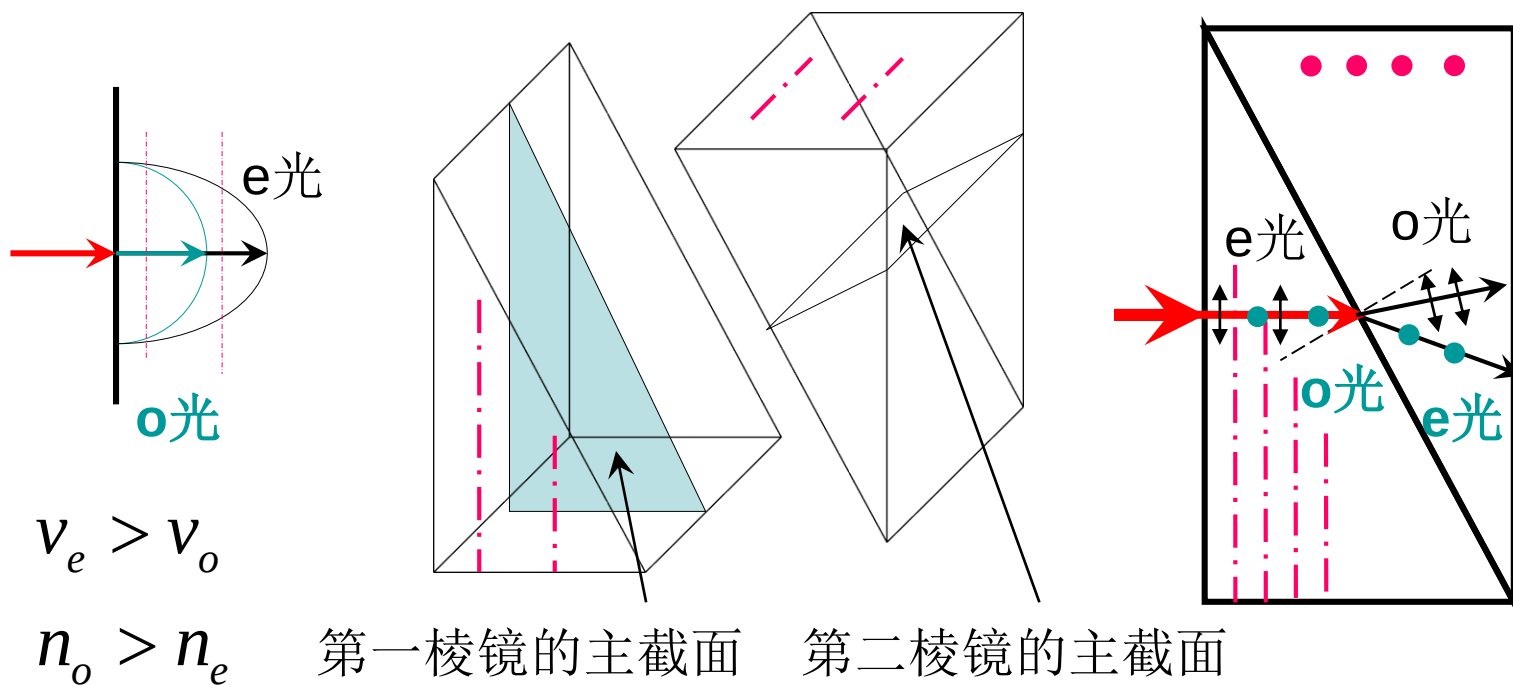


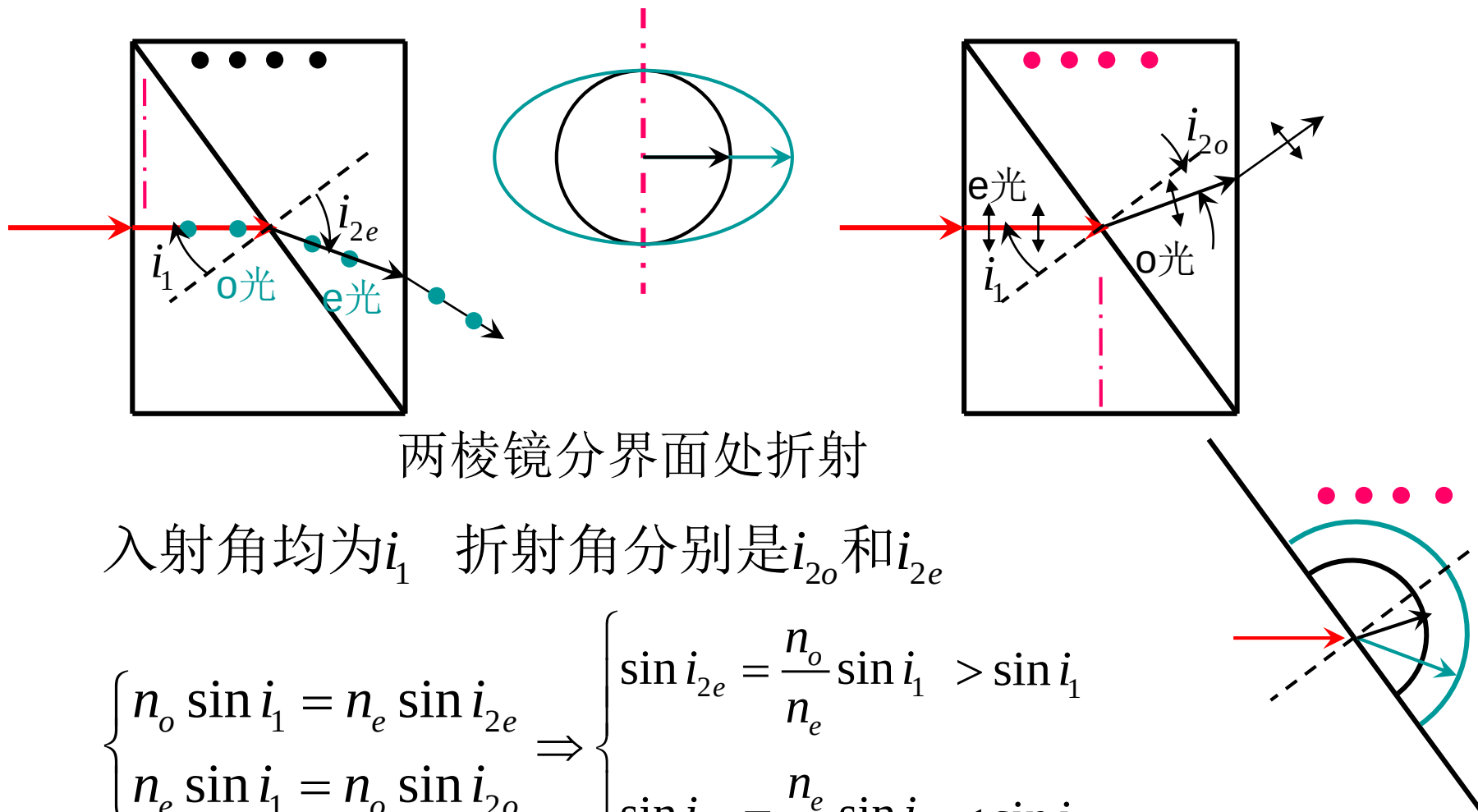
e光透过

- 缺点：
1. 加拿大树胶吸收紫外光，不适用于紫外波段。
 2. 入射光的汇聚角不能太大，否则，o光不发生全反射。

2. 渥拉斯顿(Wallaston)棱镜

- 由两块冰洲石的直角三棱镜粘合而成
- 两棱镜的光轴相互垂直
- 第一镜中o光进入第二镜时，变为e光；第一镜中e光进入第二镜时，变为o光





两棱镜分界面处折射

入射角均为 i_1 折射角分别是 i_{2o} 和 i_{2e}

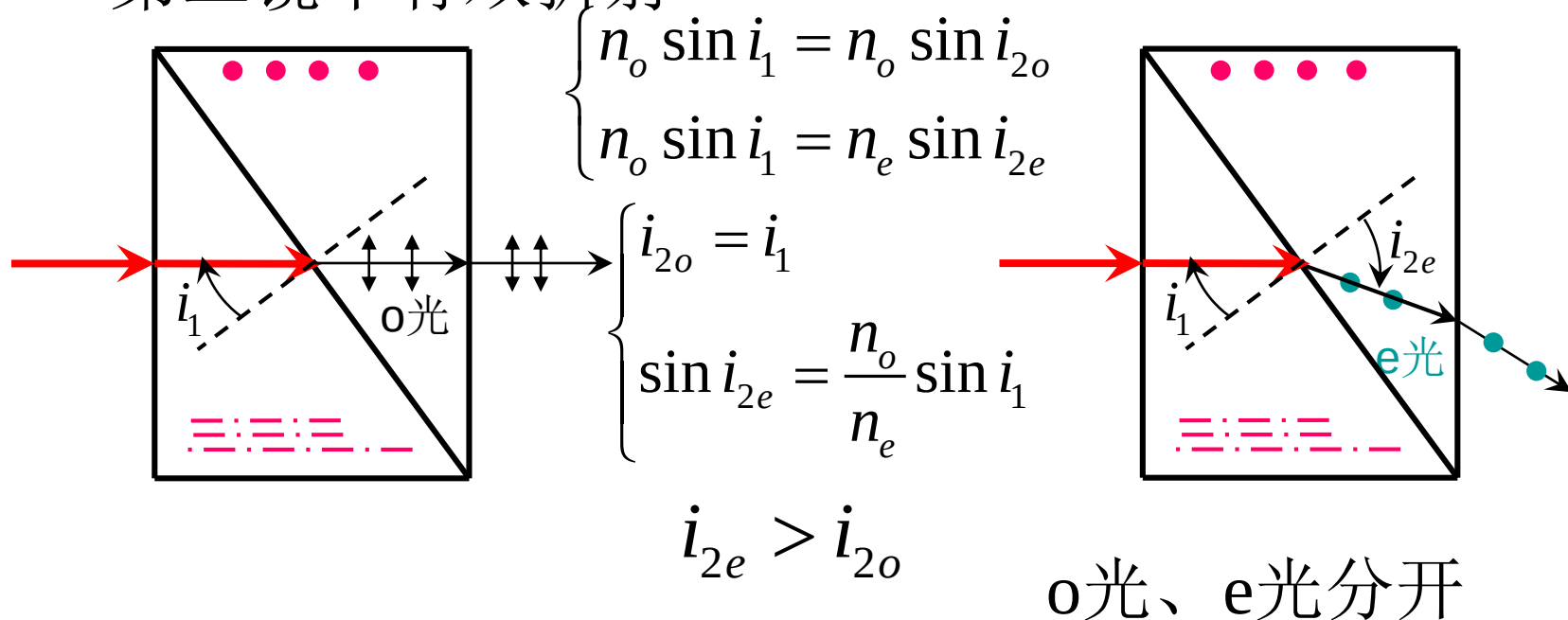
$$\begin{cases} n_o \sin i_1 = n_e \sin i_{2e} \\ n_e \sin i_1 = n_o \sin i_{2o} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \sin i_{2e} = \frac{n_o}{n_e} \sin i_1 > \sin i_1 \\ \sin i_{2o} = \frac{n_e}{n_o} \sin i_1 < \sin i_1 \end{cases}$$

方解石是负晶体 $n_o > n_e$ $i_{2o} < i_1 < i_{2e}$ o光、e光分开

两列平面偏振光出射角度不同，在空间分开。

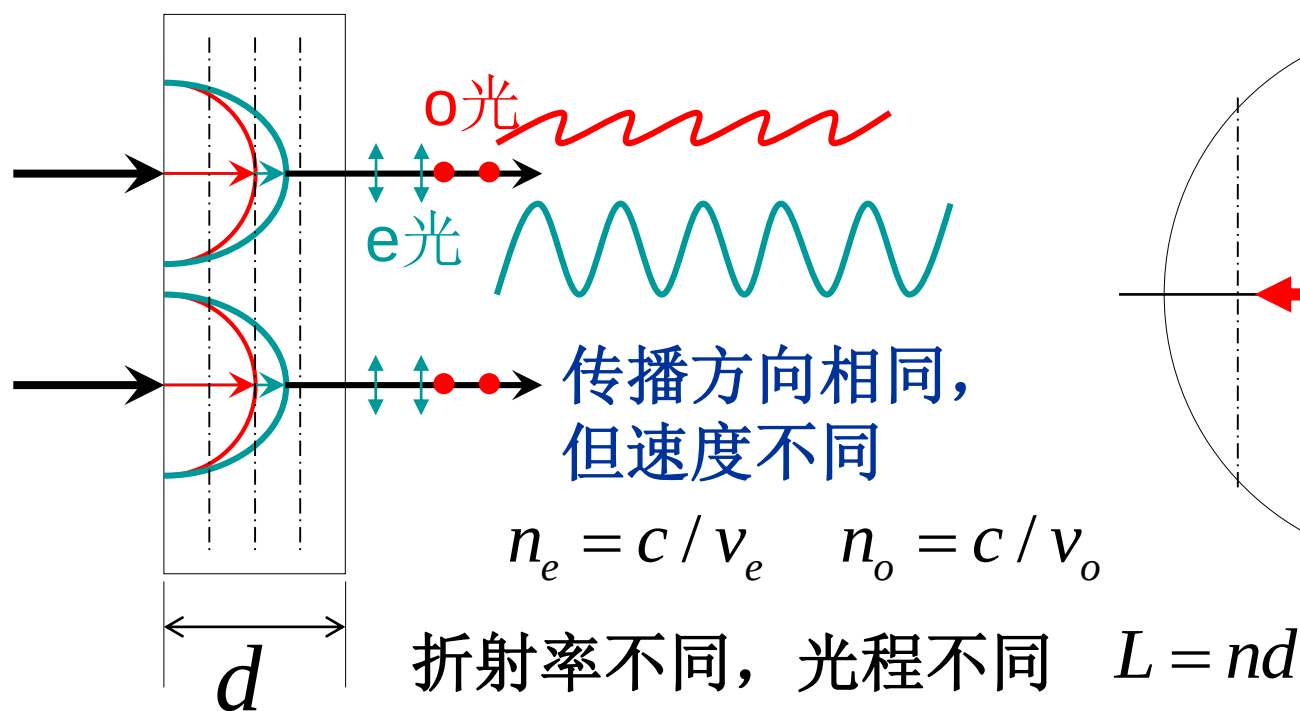
3. 洛匈(Rochon)棱镜

- 由两块冰洲石的直角三棱镜粘合而成
- 两棱镜的光轴相互垂直
- 入射光沿着第一棱镜的光轴方向
- 第一镜中无双折射现象，o光和e光重合；
第二镜中有双折射

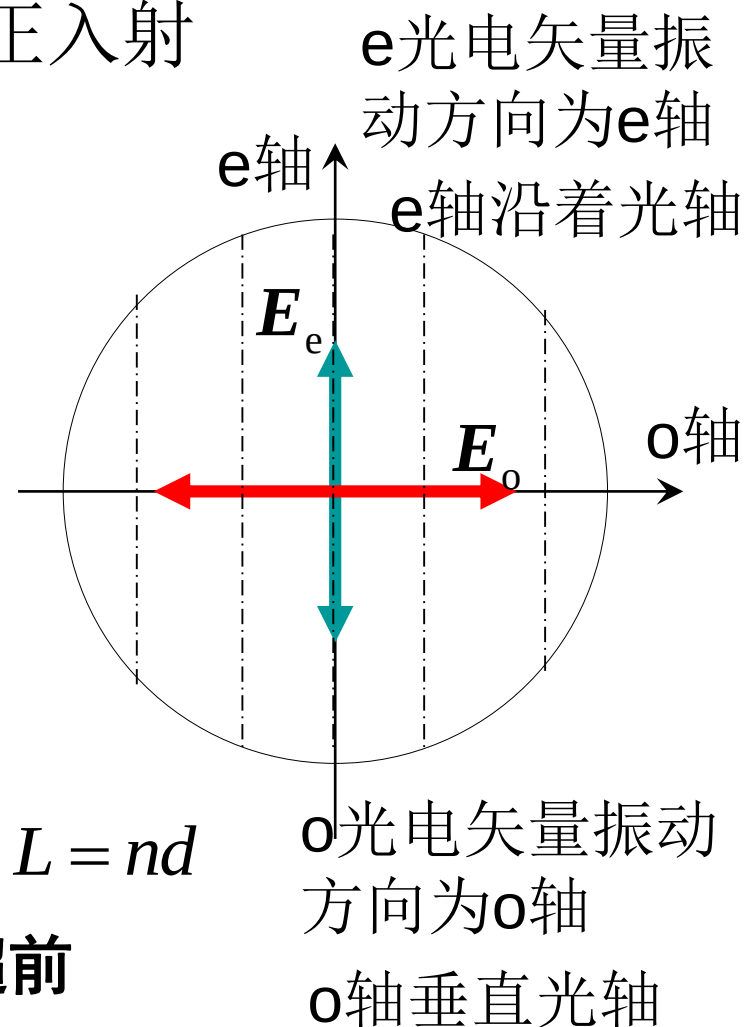


5.2.2 波晶片（位相延迟片，晶体相移器）

- 波晶片是从单轴晶体（方解石、石英）中切下的平行平板
- 光轴与入射表面平行，平行光正入射



o光的位相比**e光**的位相滞后或超前



• 两光在波晶片中的光程

$$L_o = n_o d$$

$$L_e = n_e d$$

从波片出射时的光程差 $\delta = L_e - L_o = (n_e - n_o)d$

位相差 $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d$ e光相对于o光的相位延迟

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{负晶体} & (n_e < n_o) \quad \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d < 0 \quad \text{e光超前} \\ \text{正晶体} & (n_e > n_o) \quad \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d > 0 \quad \text{o光超前} \end{array} \right.$$

$\Delta\varphi$ 与 $\left\{ \begin{array}{l} \lambda \\ (n_e - n_o) \\ d \end{array} \right.$ 相关

对于一定的 λ
 $(n_e - n_o)$

可适当选择d而得到固定的位相延迟，制作位相延迟片。

$$\left\{ \begin{array}{lll} \delta = \pm \frac{\lambda}{4} + m\lambda & \Delta\varphi = 2m\pi \pm \frac{\pi}{2} & \frac{1}{4} \text{波片} \quad \frac{\lambda}{4} \text{片} \\ \delta = \pm \frac{\lambda}{2} + m\lambda & \Delta\varphi = 2m\pi \pm \pi & \frac{1}{2} \text{波片} \quad \frac{\lambda}{2} \text{片} \\ \delta = \pm \lambda + m\lambda & \Delta\varphi = 2m\pi & \text{全波片} \end{array} \right. \quad m \text{取整数}$$

每种波片都是针对某一特定波长的光

补偿器（可变位相延迟片）

补偿器：能获得任意光程（位相）差的波晶片。

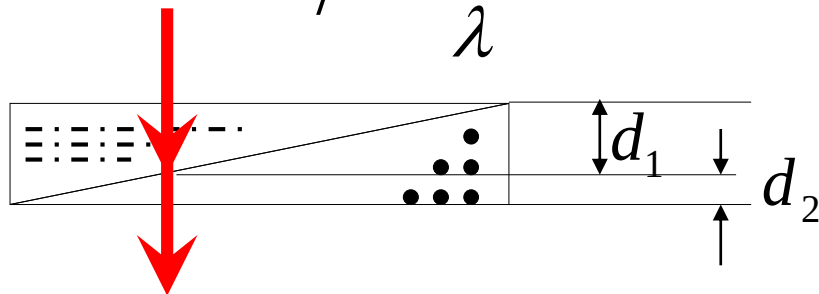
巴比涅(Babinet)补偿器

- 类似于Wallaston棱镜，但顶角要小得多，出射光不分开
- 光在两棱镜中经过的厚度不同

光程 $L_1 = n_o d_1 + n_e d_2, L_2 = n_e d_1 + n_o d_2$

光程差 $\Delta = (n_o d_1 + n_e d_2) - (n_e d_1 + n_o d_2) = (n_o - n_e)(d_1 - d_2)$

位相差 $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta$



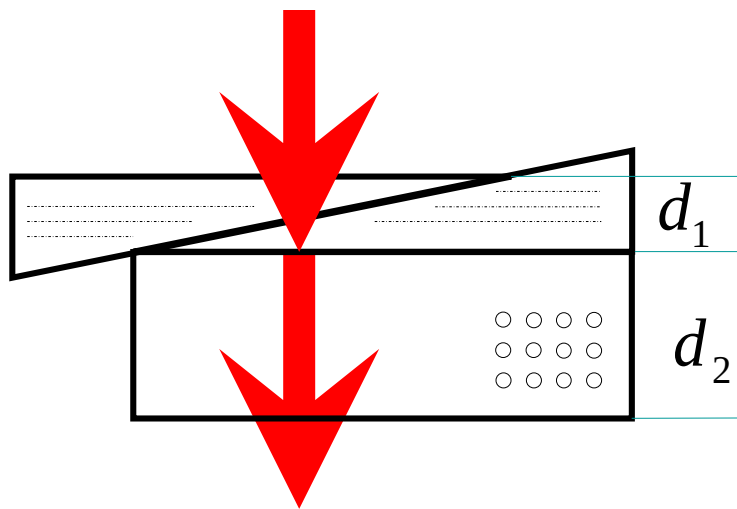
厚度差不同，光程差不同

横向平移补偿器，可以使出射光两分量之间有不同的相位差

缺陷：光束不能太宽，不同的位置有不同的位相差。

索列尔(Soleil)补偿器

- 两直角三棱镜的光轴平行，可以沿斜面滑动
- 增加一块与三棱镜光轴垂直的晶片
- 可以克服Babinet补偿器的缺陷
- 光的方向不变



光程差 $\Delta = (n_o - n_e)(d_1 - d_2)$
 d_1 可调

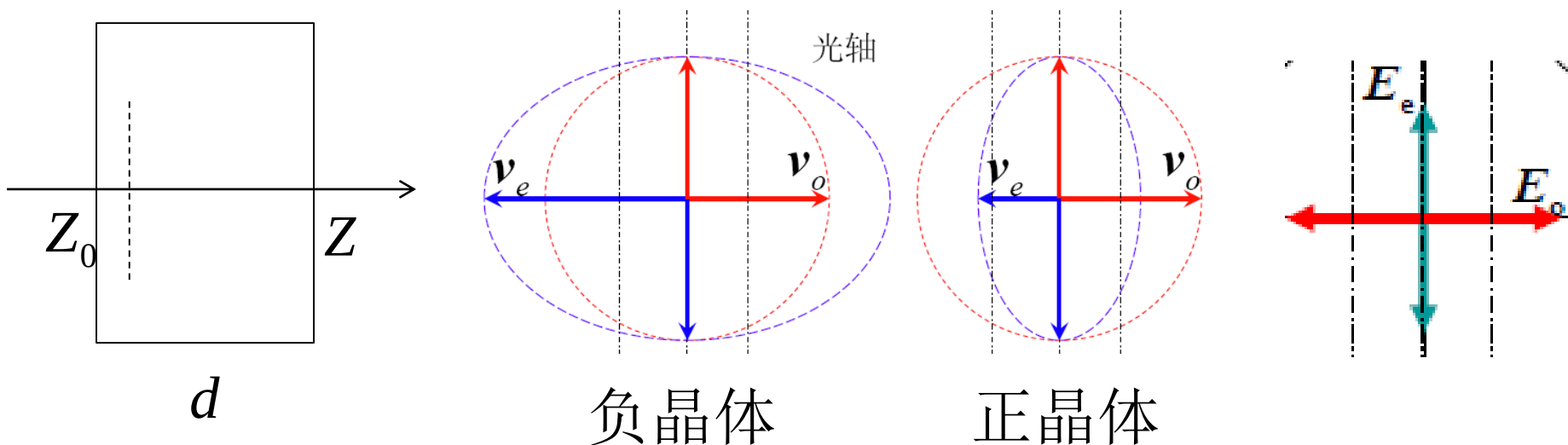
相位差
$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (n_o - n_e)(d_1 - d_2)$$

连续可调

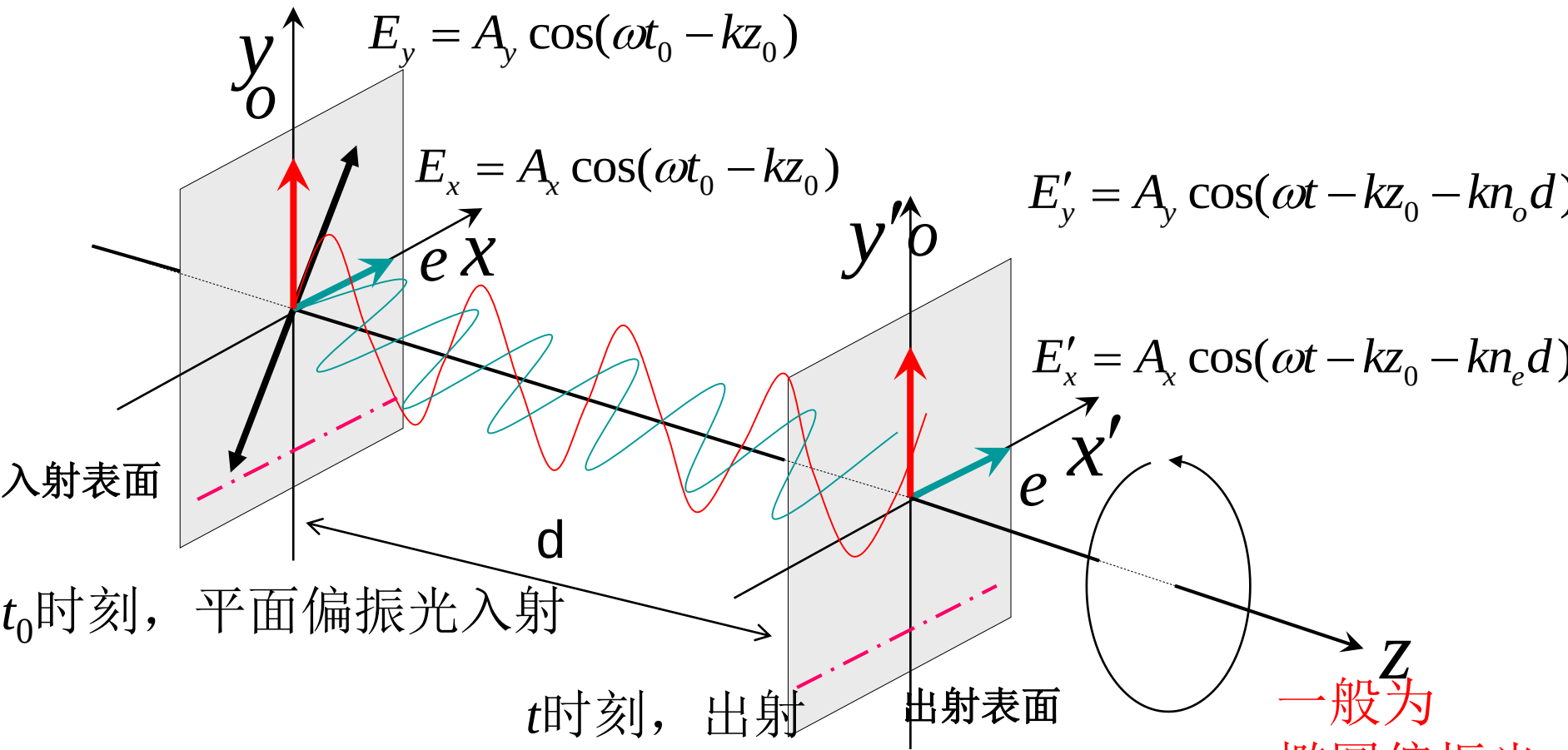
5.3 圆偏振光及椭圆偏振光的获得及检验

5.3.1 偏振光在波（晶）片中的传播

- 利用波片的位相延迟作用，使得从其中出射的两列振动相互垂直的光波之间有一定的位相差（振幅不变）
- 偏振光在波晶片传播，出射光偏振态会改变
- 合成光的偏振态取决于它们之间的位相差



比较入射光与出射光



出射表面的位相比入射表面滞后 knd ， $k = \frac{2\pi}{\lambda}$

o光比e光滞后

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

$$\begin{cases} E'_x = A_x \cos(\omega t - kz_0) \\ E'_y = A_y \cos(\omega t - kz_0 - \Delta\varphi) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} E'_x = A_x \cos \omega t \\ E'_y = A_y \cos(\omega t - \Delta\varphi) \end{cases}$$

偏振光经过波晶片后偏振态的改变过程:

1. 在入射晶体表面分解成o光和e光
(或分解成快光和慢光)。

2. 在波晶片产生附加位相差:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d \quad \text{慢光比快光位相延迟}$$

若为1/4波片, 则 $\Delta\varphi = \frac{\pi}{2}$

3. 重新合成: 出射时振幅不变, 但两光的位相差

$$\Delta\varphi_{\text{出}} = \Delta\varphi_{\lambda} + \Delta\varphi \quad \Delta\varphi_{\lambda} \text{ 入射点两正交分量间的位相差}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta\varphi_{\lambda} = \varphi_o - \varphi_e \\ \Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} |n_o - n_e| d \end{array} \right.$$

速度快的光, 折射率小, 位相超前
速度慢的光, 折射率大, 位相滞后

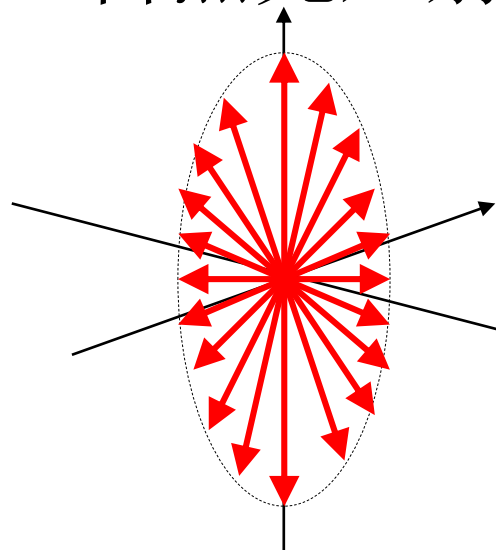
5.3.2 经过波晶片后光的偏振态的改变

1. 自然光经过波晶片

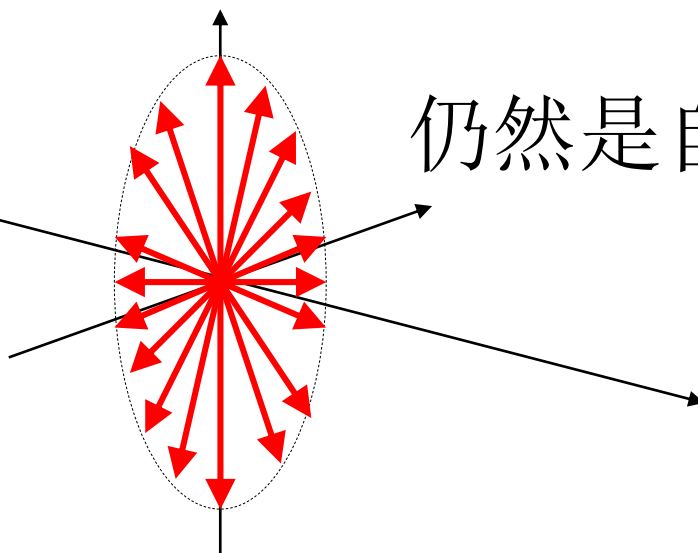
- 自然光可正交分解
- 每一个分量都含有相位随机的多列波
- 在晶体表面分为振动正交的o光、e光，位相差随机
- 经过波片后，每一个分量仍然是相位随机的多列波
- 所以，合成后仍是自然光
- 不考虑波片的吸收，光强不变。

自然光经波晶片

自然光入射



仍然是自然光

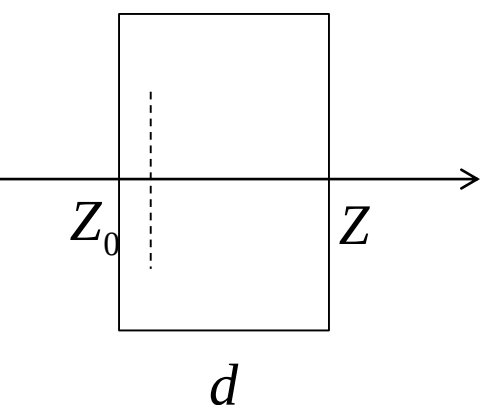


2. 平面偏振光经波晶片

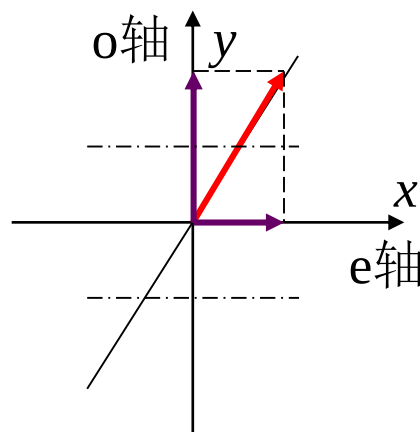
- 在波片入射表面分解为正交的e光、o光, $\Delta\varphi_\lambda = 0, \pi$
(迎着光传播的方向)

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + 0) \end{cases}$$

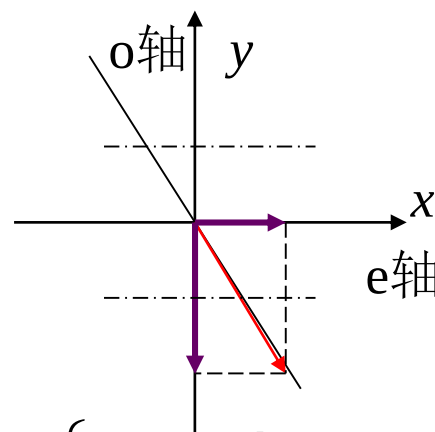
$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \pi) \end{cases}$$



x轴 → e轴
y轴 → o轴



$$\begin{cases} E_e = A_e \cos \omega t \\ E_o = A_o \cos(\omega t + 0) \end{cases}$$



$$\begin{cases} E_e = A_e \cos \omega t \\ E_o = A_o \cos(\omega t + \pi) \end{cases}$$

出射后，产生额外位相差 $\Delta\varphi_{\text{出}}$

1) 经过1/4波片（迎着光传播的方向）
产生 $\pi/2$ 的额外位相差

$$\text{I,III象限} \quad \begin{cases} E_e = A_e \cos \omega t \\ E_o = A_o \cos \omega t \end{cases}$$

$$\begin{array}{l} \text{1/4波片} \\ \longrightarrow \end{array} \quad \begin{cases} E'_e = A_e \cos \omega t \\ E'_o = A_o \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \\ E'_o = A_o \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$

正晶体，o光超前 $\pi/2$
右旋正椭圆偏振光
负晶体，o光滞后 $\pi/2$
左旋正椭圆偏振光

II,IV象限
$$\begin{cases} E_e = A_e \cos \omega t \\ E_o = A_o \cos(\omega t + \pi) \end{cases}$$

1/4波片
$$\longrightarrow \begin{cases} E'_e = A_e \cos \omega t \\ E'_o = A_o \cos(\omega t + \pi + \frac{\pi}{2}) = A_o \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad \text{正晶体}$$

左旋正椭圆偏振光

也可以获得圆偏振光

如果入射光的电矢量与光轴间的夹角为 45°

2) 经过1/2波片

产生 π 的额外位相差

$$\text{I,III象限} \quad \begin{cases} E_e = A_e \cos \omega t \\ E_o = A_o \cos \omega t \end{cases}$$

$$\begin{array}{l} \text{1/2波片} \\ \longrightarrow \end{array} \quad \begin{cases} E'_e = A_e \cos \omega t \\ E'_o = A_o \cos(\omega t - \pi) \end{cases} \quad \text{负晶体} \quad \text{线偏光} \quad \text{II,IV象限}$$

$$\text{II,IV象限} \xrightarrow{\text{1/2波片}} \text{I,III象限}$$

线偏光经过1/2波片后，线偏光电矢量振动方向翻转

3.圆偏振光经过波晶片

经过1/4波片

入射光位相差 $\pm\pi/2$ ，波晶片引入位相差 $\pm\pi/2$

右旋

$$\begin{cases} E_e = A_0 \cos \omega t \\ E_o = A_0 \cos(\omega t + \pi / 2) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} E'_e = A_0 \cos \omega t \\ E'_o = A_0 \cos(\omega t + \pi) \end{cases}$$

正晶体，II,IV象限线偏光

左旋

$$\begin{cases} E_e = A_0 \cos \omega t \\ E_o = A_0 \cos(\omega t - \pi / 2) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} E'_e = A_0 \cos \omega t \\ E'_o = A_0 \cos \omega t \end{cases}$$

正晶体，I,III象限线偏光

变为平面偏振光，电矢量与光轴成 45° 角

4. 椭圆偏振光经过波片

经过1/4波片

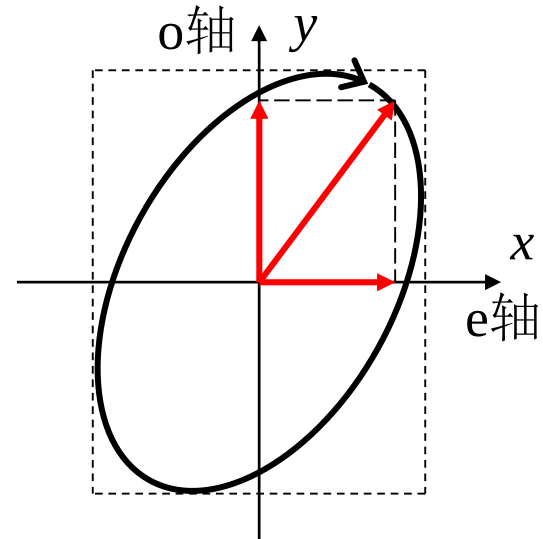
- 入射光，正交分量间有任意的固定位相差
- 经过波片，产生额外的 $\pm\pi/2$ 位相差，出射光为
- 相位差仍是固定的任意值，
一般仍是椭圆偏光

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \varphi_0) \end{cases}$$
$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \varphi_0 \pm \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$

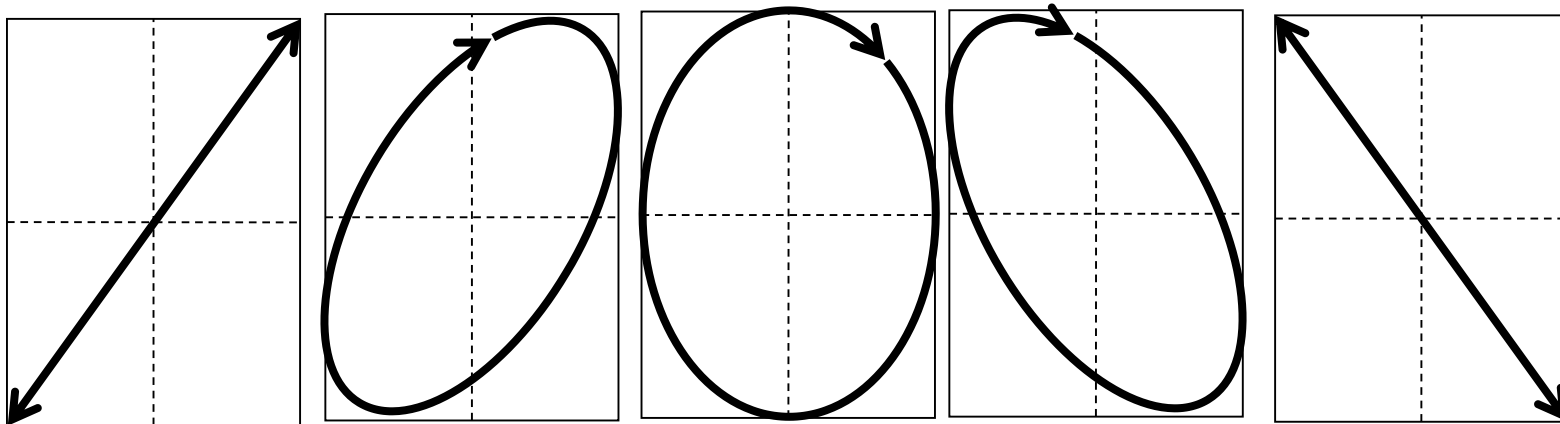
$$\begin{cases} E_e = A_e \cos \omega t \\ E_o = A_o \cos(\omega t + \varphi_0) \end{cases}$$

1/4波片 $\longrightarrow$

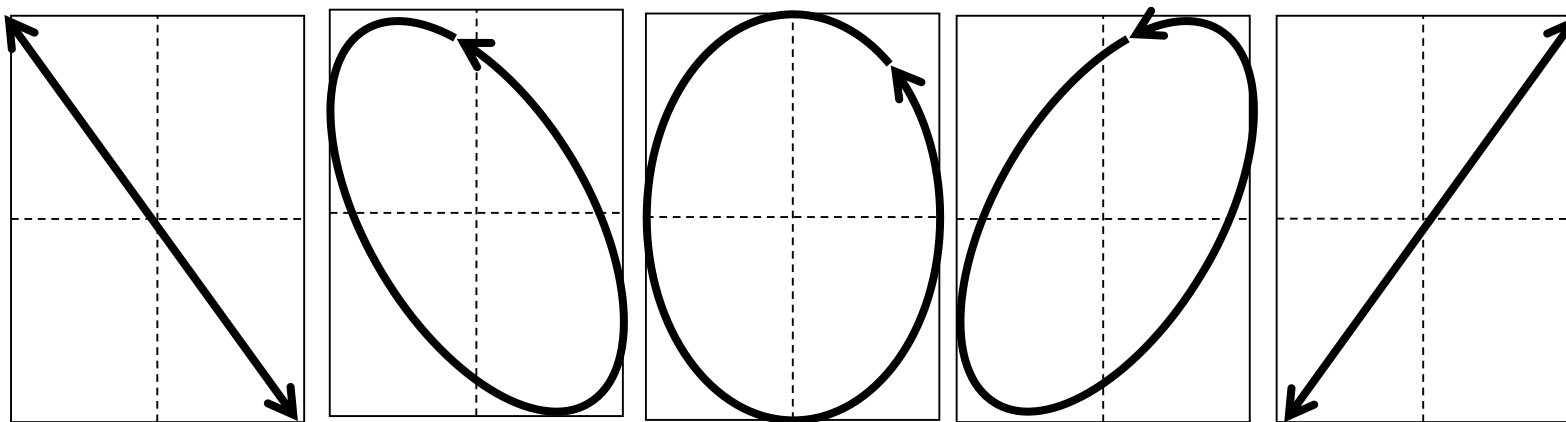
$$\begin{cases} E'_e = A_e \cos \omega t \\ E'_o = A_o \cos(\omega t + \varphi_0 \pm \frac{\pi}{2}) \end{cases}$$



$$\Delta\varphi = 0 \quad \Delta\varphi \in (0, \frac{\pi}{2}) \quad \Delta\varphi = \frac{\pi}{2} \quad \Delta\varphi \in (\frac{\pi}{2}, \pi) \quad \Delta\varphi = \pi$$



$$\Delta\varphi = \pi \quad \Delta\varphi \in (\pi, \frac{3\pi}{2}) \quad \Delta\varphi = \frac{3\pi}{2} \quad \Delta\varphi \in (\frac{3\pi}{2}, 2\pi) \quad \Delta\varphi = 2\pi$$



正椭圆偏振光

- 入射光两分量间的位相差是 $\pm \pi/2$

$$\begin{cases} E_e = A_e \cos \omega t \\ E_o = A_o \cos(\omega t \pm \pi / 2) \end{cases}$$

1/4波片 $\longrightarrow$
$$\begin{cases} E'_e = A_e \cos \omega t \\ E'_o = A_o \cos(\omega t \pm \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2}) = A_o \cos(\omega t + 0(\pi)) \end{cases}$$

负晶体

线偏光

5.3.3光的偏振态的检定

偏振态	偏振片，透振方向 绕光传播方向旋转	先通过1/4波片，再通过偏振片
自然光	光强不变	光强不变（检定）
圆偏振光	光强不变	光强改变，出现消光 （检定）
平面偏振光	光强改变，在某一 角度消光（检定）	
部分偏振光	光强改变，但不消 光	光强改变，但不消光 （检定）
椭圆偏振光	光强改变，但不消 光	转动1/4波片和偏振片，出现 消光（检定）

第五章 小结

光是电磁波，横波，
振动方向相对于传播方向具有不对称性，即偏振性。

光的 五种 偏振 态	自然光	$\begin{cases} E_x = A_0 \cos \omega t \\ E_y = A_0 \cos(\omega t + \text{随机位相}) \end{cases}$
	线偏光	$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + 0(\pi)) \end{cases}$
	部分偏振光	$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \text{随机位相}) \end{cases}$
	圆偏正光	$\begin{cases} E_x = A_0 \cos \omega t \\ E_y = A_0 \cos(\omega t \pm \frac{\pi}{2}) \end{cases}$
	椭圆偏振光	$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \Delta\varphi) \end{cases}$

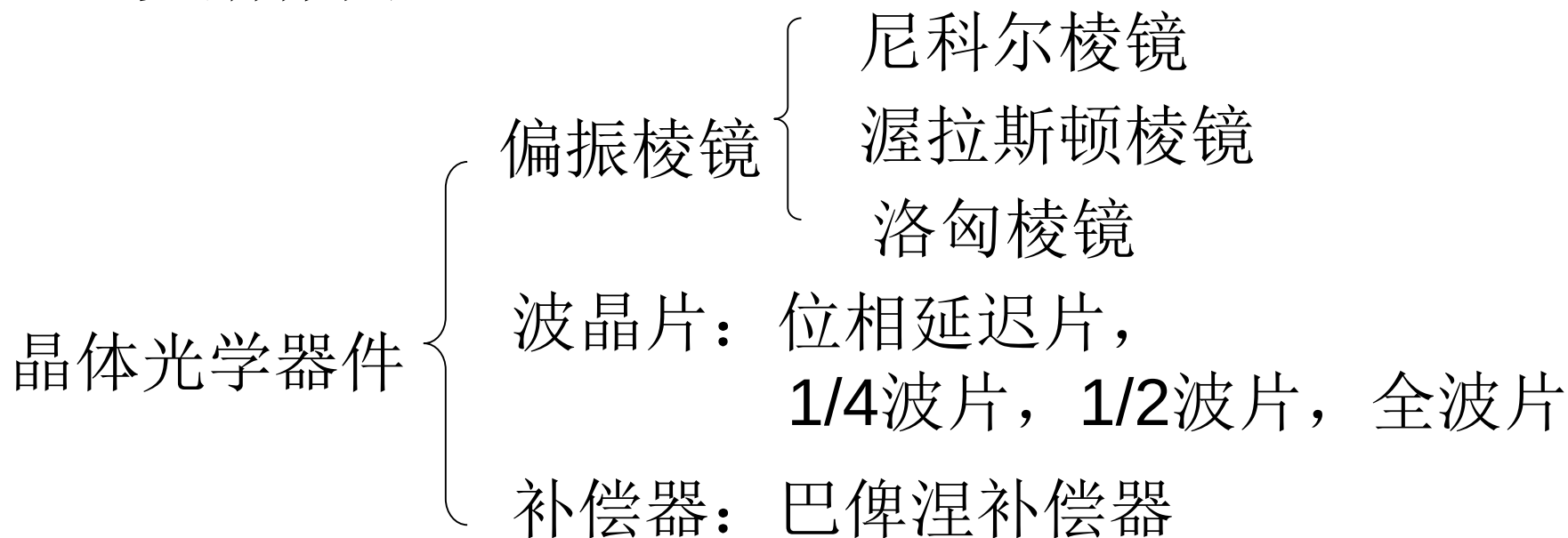
线偏光的获得 { 偏振片
反射和折射—布儒斯特定律
偏振棱镜

光的双折射 { o光:遵从折射定律, 振动垂直主平面。
e光:不遵从折射定律, 振动平行主平面。

{ 沿光轴方向传播, o光e光同方向、同速度。
垂直光轴方向传播, o光e光同方向、不同速度。

{ 正晶体 $v_o > v_e, n_o < n_e$
负晶体 $v_o < v_e, n_o > n_e$

惠更斯作图法



偏振光入射**1/4波片， 1/2波片**后，偏振态的改变

五种偏振光的检定