

第七章 光在晶体中的传播

第二节 偏振光的获得与检验

7.2 偏振光的获得与检验

7.2.1 偏振光回顾

7.2.2 椭圆偏振光的获得

7.2.3 椭圆偏振光的检验

7.2.1 偏振光回顾

正交振动平面偏振光(线偏振光)的合成

假设：两同向传播的线偏振光波，频率为 ω ，相位差为 δ ，振动方向分别沿x和y方向，振幅分别为 A_x 和 A_y ，瞬时光矢量分别为

$$E_x = A_x \cos \omega t, \quad E_y = A_y \cos(\omega t + \delta)$$

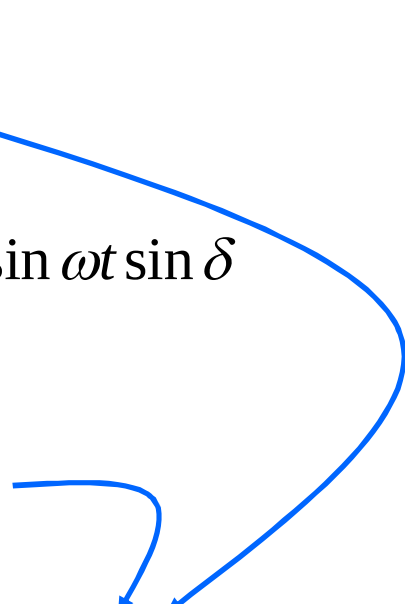
其归一化形式为

$$\begin{cases} \frac{E_x}{A_x} = \cos \omega t \\ \frac{E_y}{A_y} = \cos(\omega t + \delta) = \cos \omega t \cos \delta - \sin \omega t \sin \delta \end{cases}$$

两式相减得到

$$\frac{E_y}{A_y} - \frac{E_x}{A_x} \cos \delta = -\sin \omega t \sin \delta$$

消除 ωt ，得到合成光矢量末端的轨迹方程

$$\frac{E_x^2}{A_x^2} + \frac{E_y^2}{A_y^2} - 2 \frac{E_x E_y}{A_x A_y} \cos \delta = \sin^2 \delta$$


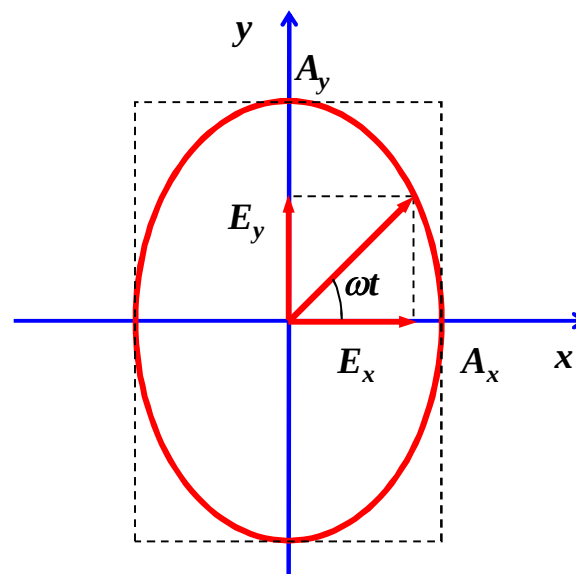
7.2.1 偏振光回顾

正交振动平面偏振光的合成

意义：合光矢量末端的轨迹为一个椭圆，该椭圆与以 $E_x = \pm A_x$ 和 $E_y = \pm A_y$ 为界的矩形框内切，其旋转方向及长短轴的方位与两叠加光波的相位差 δ 有关。

$$\frac{E_x^2}{A_x^2} + \frac{E_y^2}{A_y^2} - 2 \frac{E_x E_y}{A_x A_y} \cos \delta = \sin^2 \delta$$

椭圆偏振光产生于两同频率、相位差恒定且振动方向正交的线偏振光的叠加，线偏振光和圆偏振光都可看做椭圆偏振光的特例。

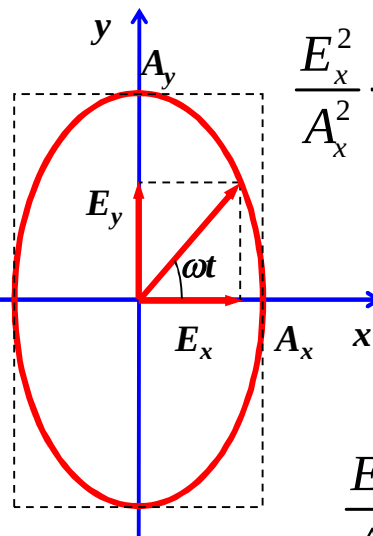


正交振动的合成

7.2.1 偏振光回顾

椭圆方程的演化

特殊情况



$$\frac{E_x^2}{A_x^2} + \frac{E_y^2}{A_y^2} - 2 \frac{E_x E_y}{A_x A_y} \cos \delta = \sin^2 \delta$$

蜕变为直线
合振动为**线偏振**

$$\delta = j\pi$$

$$\delta = \pm (2j+1)\pi/2$$

合振动变为
正椭圆偏振光

$$\frac{E_x^2}{A_x^2} + \frac{E_y^2}{A_y^2} = 1$$

$$\delta = \pm 2j\pi$$

(j=0, 1, 2, ...)

两光波同相

$$\frac{E_x}{E_y} = \frac{A_x}{A_y}$$

$$A = \sqrt{A_x^2 + A_y^2}$$

$$\tan \theta = \frac{E_y}{E_x} = \pm \frac{A_y}{A_x}$$

$$\delta = \pm (2j+1)\pi$$

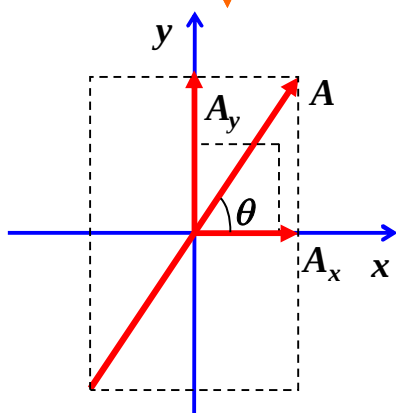
(j=0, 1, 2, ...)

两光波反相

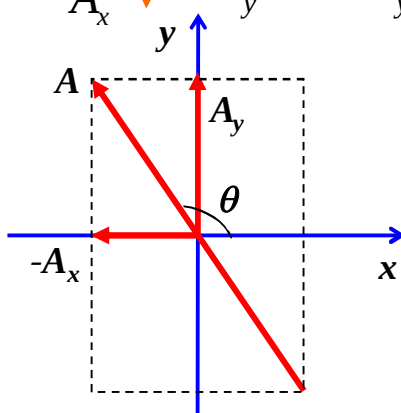
$$\frac{E_x}{E_y} = -\frac{A_x}{A_y}$$

$$A_x = A_y$$

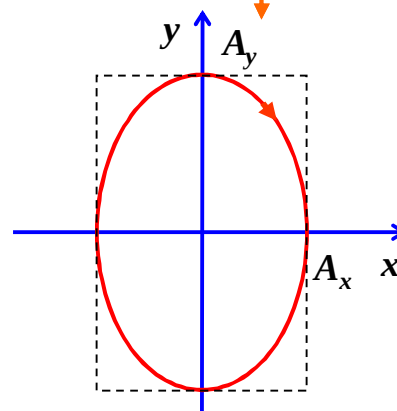
圆偏振



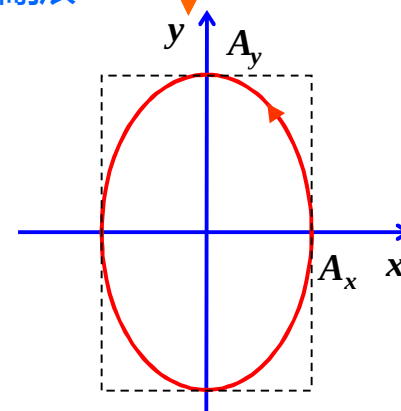
I、III象限线偏光



II、IV象限线偏光



$\pi/2$
右旋正椭圆偏振



$3\pi/2, (-\pi/2)$
左旋正椭圆偏振

7.2.1 偏振光回顾

椭圆方程的演化 (续)

$$E_x = A_x \cos \omega t, \quad E_y = A_y \cos(\omega t + \delta)$$

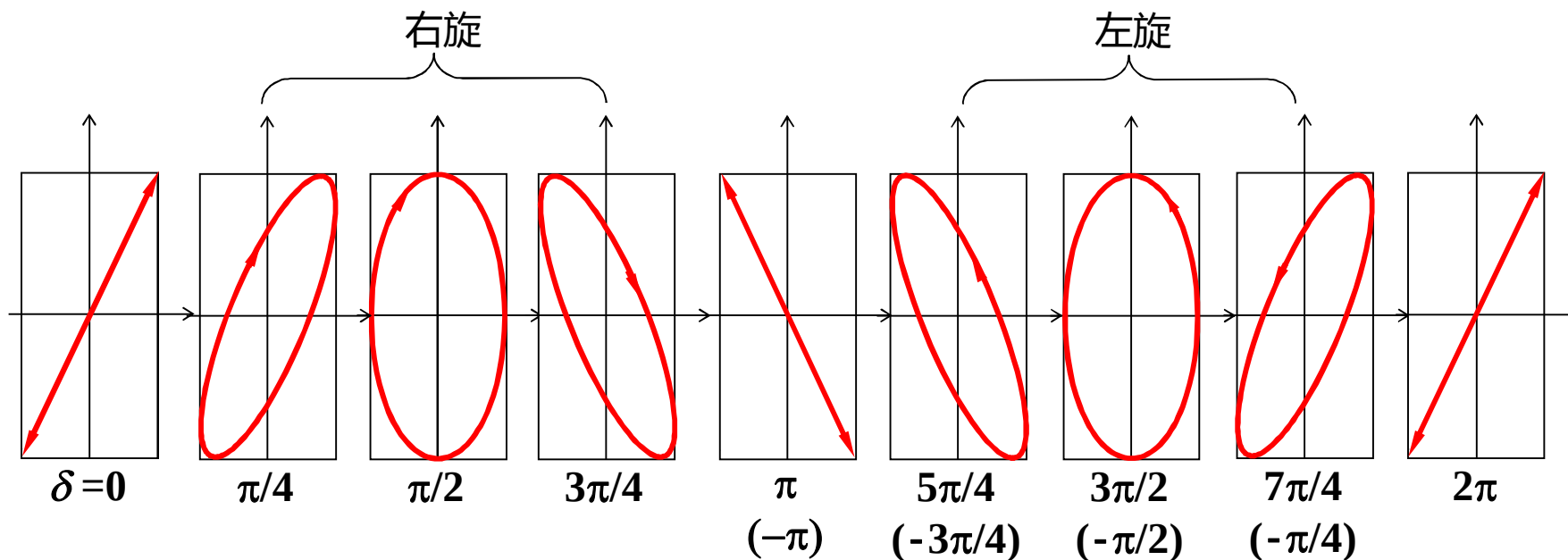
一般情况 ($\delta \neq \pm 2j\pi, \pm(2j+1)\pi, \pm(2j+1)\pi/2$)

$0 < \delta < \pi/2$, 右旋椭圆, 且向1~3象限倾斜;

$\pi/2 < \delta < \pi$, 右旋椭圆, 且向2~4象限倾斜;

$\pi < \delta < 3\pi/2$ (或 $-\pi < \delta < -\pi/2$), 左旋椭圆, 且向2~4象限倾斜;

$3\pi/2 < \delta < 2\pi$ (或 $-\pi/2 < \delta < 0$), 左旋椭圆, 且向1~3象限倾斜。



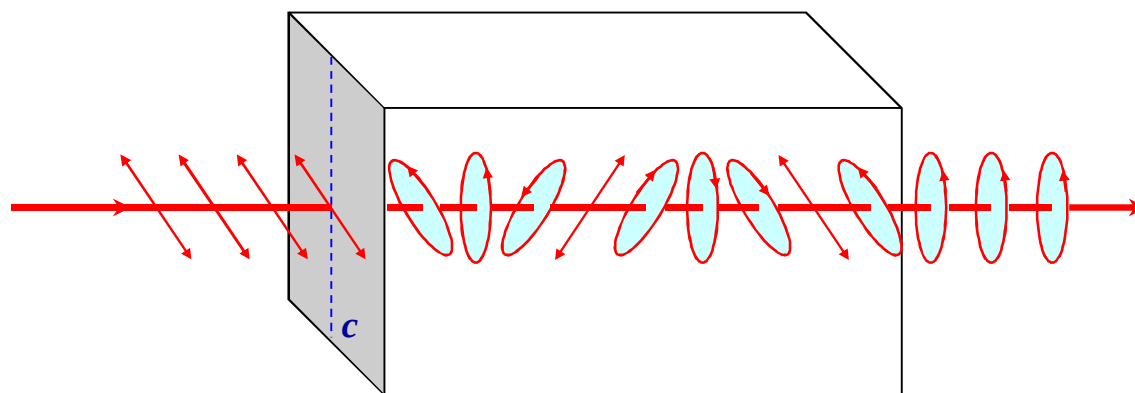
两正交平面偏振光的合成

7.2.2 椭圆偏振光的获得

椭圆偏振光的获得

思路：设法获得两列具有同频率、相位差恒定但振动方向正交的相干线偏振光波。

途径：垂直进入光轴平行于表面的单轴晶体中的线偏振光，被分解为振动方向正交的o光和e光两个分量。两分量因传播速度不同而产生相位差，进而合成为椭圆偏振光，并且椭圆的形状及旋向随着传播距离不断变化，最终透射光的偏振态与晶片的o光和e光的折射率，以及晶体的厚度 d 有关。



单轴晶片两正交平面偏振光的合成

7.2.2 椭圆偏振光的获得

(1) 自然光经过波片

- (a) 自然光可以正交分解。
- (b) 每一个分量都含有相位随机的多列平面波。
- (c) 每列平面波在晶体中分为相互正交的o光、e光。
- (d) 经过波片后，每一个分量仍然是相位随机的多列波。
- (e) 所以，正交分量合成后，仍是自然光。
- (f) 如果不考虑波片的吸收，可以认为光强不变。

7.2.2 椭圆偏振光的获得

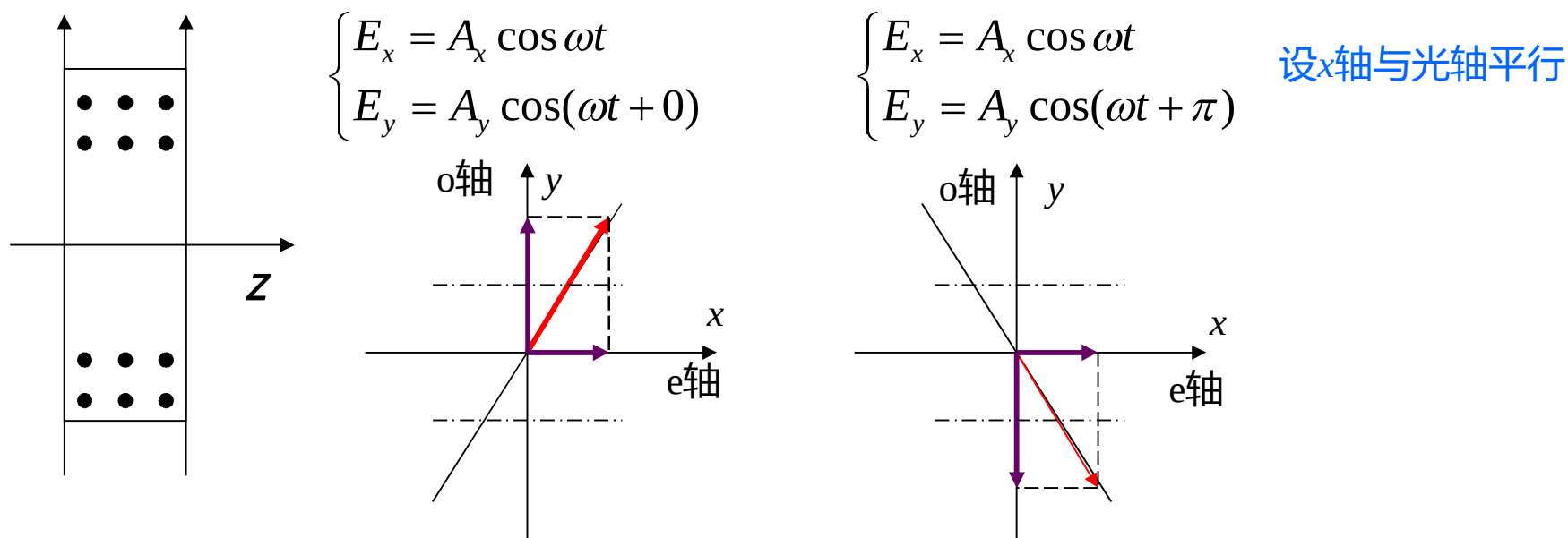
(2) 平面偏振光经过波片

(a) 在波片中分为正交的e光、o光。

(b) 根据入射平面波所处象限不同，分解后两分量之间的相位差

$\delta_0=0$ (I,III象限) 或 π (II,IV象限)。

(c) 经过波片出射的正交分量产生额外的相位差 δ 。



7.2.2 椭圆偏振光的获得

(2) 平面偏振光经过波片 (续)

① $d=0$: $\delta=0$, 合成光波仍为偏振面与入射光重合的线偏振光。

② $d = \frac{\lambda}{4|n_o - n_e|}$ (最小厚度的 $\lambda/4$ 片): $\delta = \pm \pi/2$ ($n_o > n_e$ 取正号, $n_o < n_e$ 取负号), 合成光波为正椭圆偏振光。其旋转方向不仅与 n_o 与 n_e 之间的关系有关, 还与输入偏振光的初始状态有关。

例：同样在y轴是快轴的情况下，初始相位差为0和 π 情况下的出射光场偏振状态。

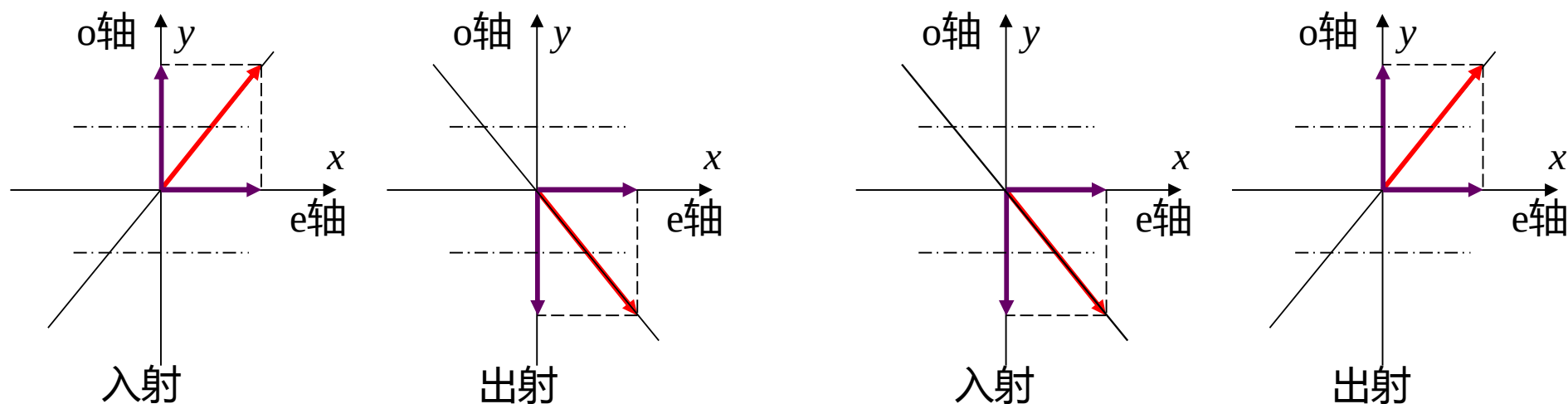
$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + 0) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{右旋椭圆} \\ \text{偏振光} \end{array}$$

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \pi) \end{cases} \longrightarrow \begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{左旋椭圆} \\ \text{偏振光} \end{array}$$

7.2.2 椭圆偏振光的获得

(2) 平面偏振光经过波片 (续)

③ $d = \frac{\lambda}{2|n_o - n_e|}$ (最小厚度的 $\lambda/2$ 片) : $\delta = \pm \pi$, 合成光波为偏振面与入射光以光轴为对称的线偏振光。



7.2.2 椭圆偏振光的获得

(2) 平面偏振光经过波片 (续)

④ $d = \frac{3\lambda}{4|n_o - n_e|}$ (三倍于最小厚度的 $\lambda/4$ 片) : $\delta = \pm 3\pi/2$, 合成光波为左旋 ($n_o > n_e$) 或右旋 ($n_o < n_e$) 正椭圆偏振光 (输入同相条件下)。

⑤ $d = \frac{\lambda}{|n_o - n_e|}$ (1 λ 片) : $d = \pm 2\pi$, 合成光波仍为偏振面与入射光重合的线偏振光。

总结

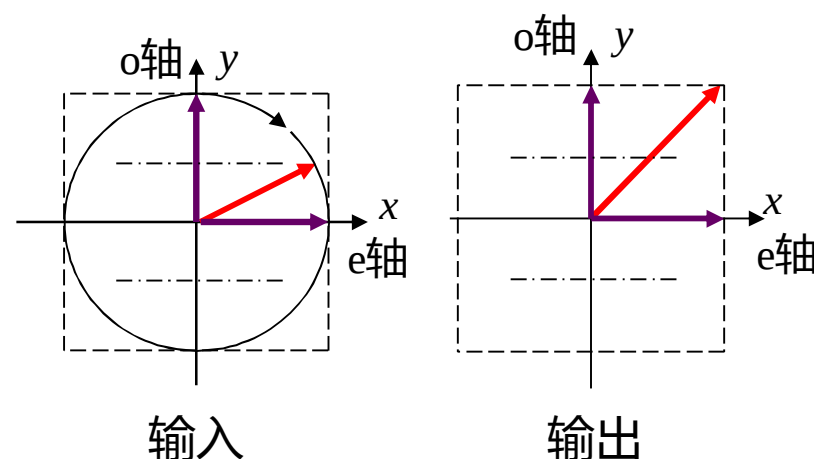
- ① 线偏振光通过全波片后仍为线偏振光, 且偏振面方位不变。
- ② 线偏振光通过 $\lambda/2$ 片后仍为线偏振光, 但偏振面绕晶片光轴旋转一定角度 ($\theta=45^\circ$ 时, 透射光的偏振面与入射光的偏振面正交)。
- ③ 线偏振光通过 $\lambda/4$ 片后变为正椭圆偏振光, 椭圆的长短轴大小取决于入射光偏振面与波片光轴的夹角大小 ($\theta=45^\circ$ 时为圆偏振光), 旋向取决于入射光偏振面所处的象限和波片的正负。

7.2.2 椭圆偏振光的获得

(3) 圆偏振光经过波片

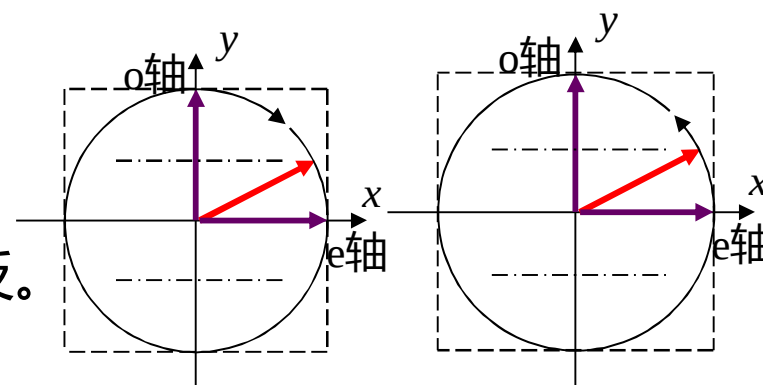
(a) 经过1/4波片

- 入射光的两正交分量间相位差是 $\pm\pi/2$ 。
- 经过1/4波片，产生 $\pm\pi/2$ 的额外相位差。
- 出射光，正交分量间相位差是 $0, \pi$ 。
- 变为平面偏振光，电矢量与光轴成 45° 角。



(b) 经过1/2波片

- 经过1/2波片，产生 $\pm\pi$ 的额外相位差。
- 还是圆偏振光，但是由于反相，旋转方向相反。

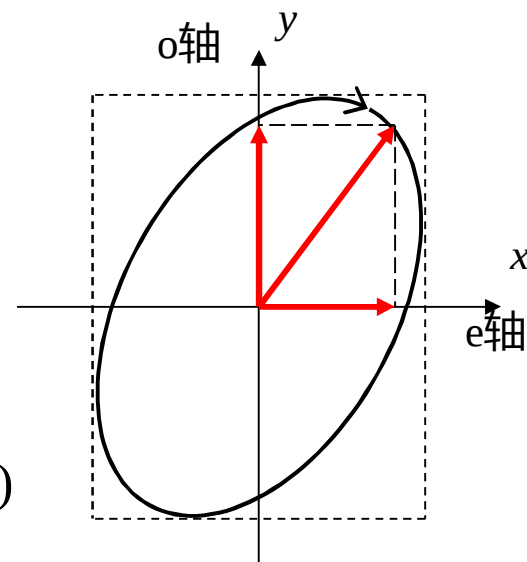


7.2.2 椭圆偏振光的获得

(4) 椭圆偏振光经过波片

- 入射光，正交分量间有任意的固定相位差
- 经过波片，产生额外的相位差，出射光为
- 相位差仍是固定的任意值，仍是椭圆偏光

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \delta_0) \end{cases} \quad \begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \delta_0 + \delta) \end{cases}$$



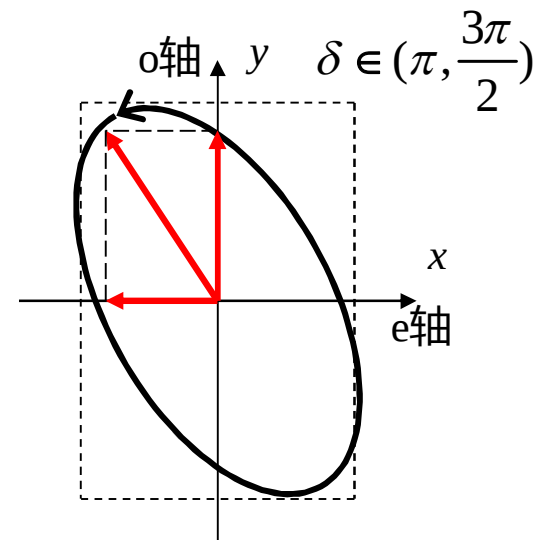
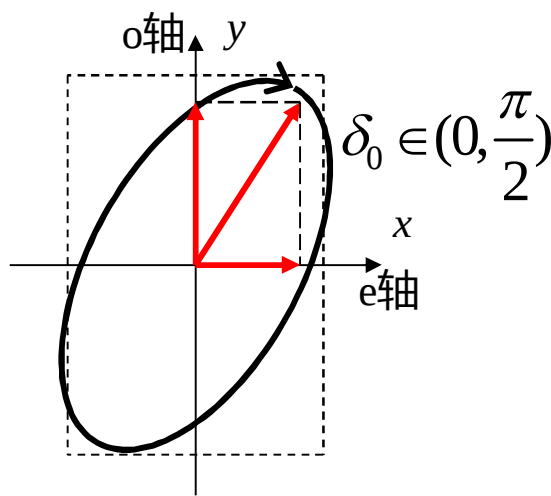
(a) 经过1/2波片

产生 $\pm\pi$ 的额外相位差，导致旋转方向相反。

$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \delta_0) \end{cases}$$



$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \delta_0 \pm \pi) \end{cases}$$



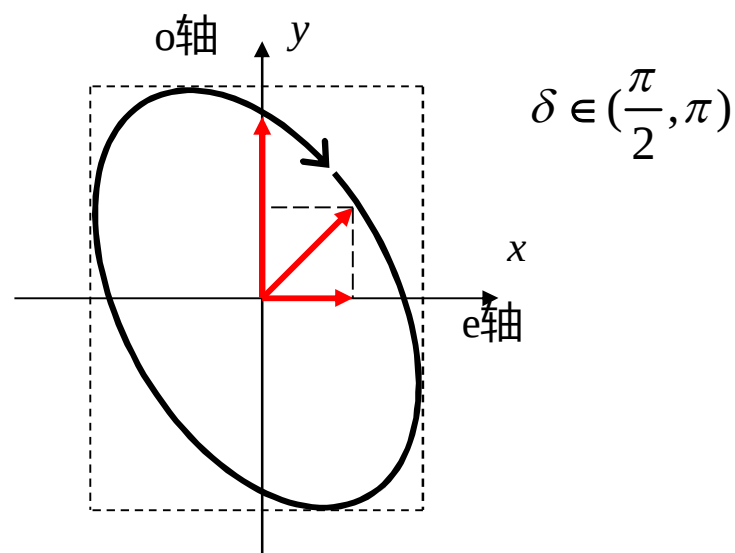
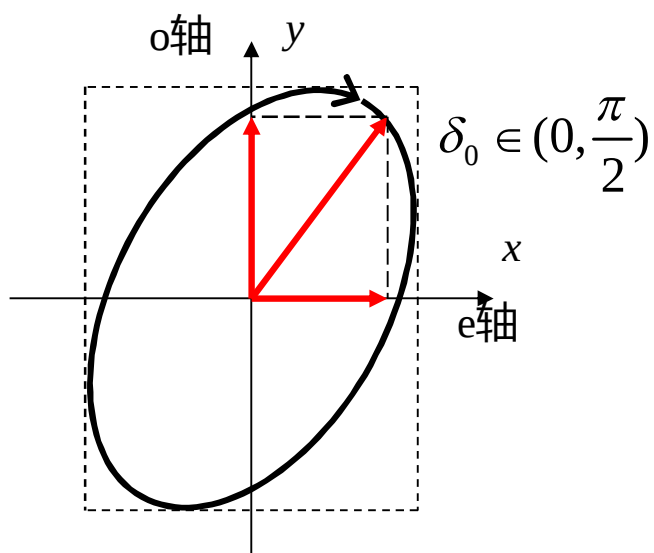
7.2.2 椭圆偏振光的获得

(4) 椭圆偏振光经过波片

(b) 经过1/4波片

产生 $\pm\pi/2$ 的额外相位差，需要根据入射分量间的相位差作具体分析

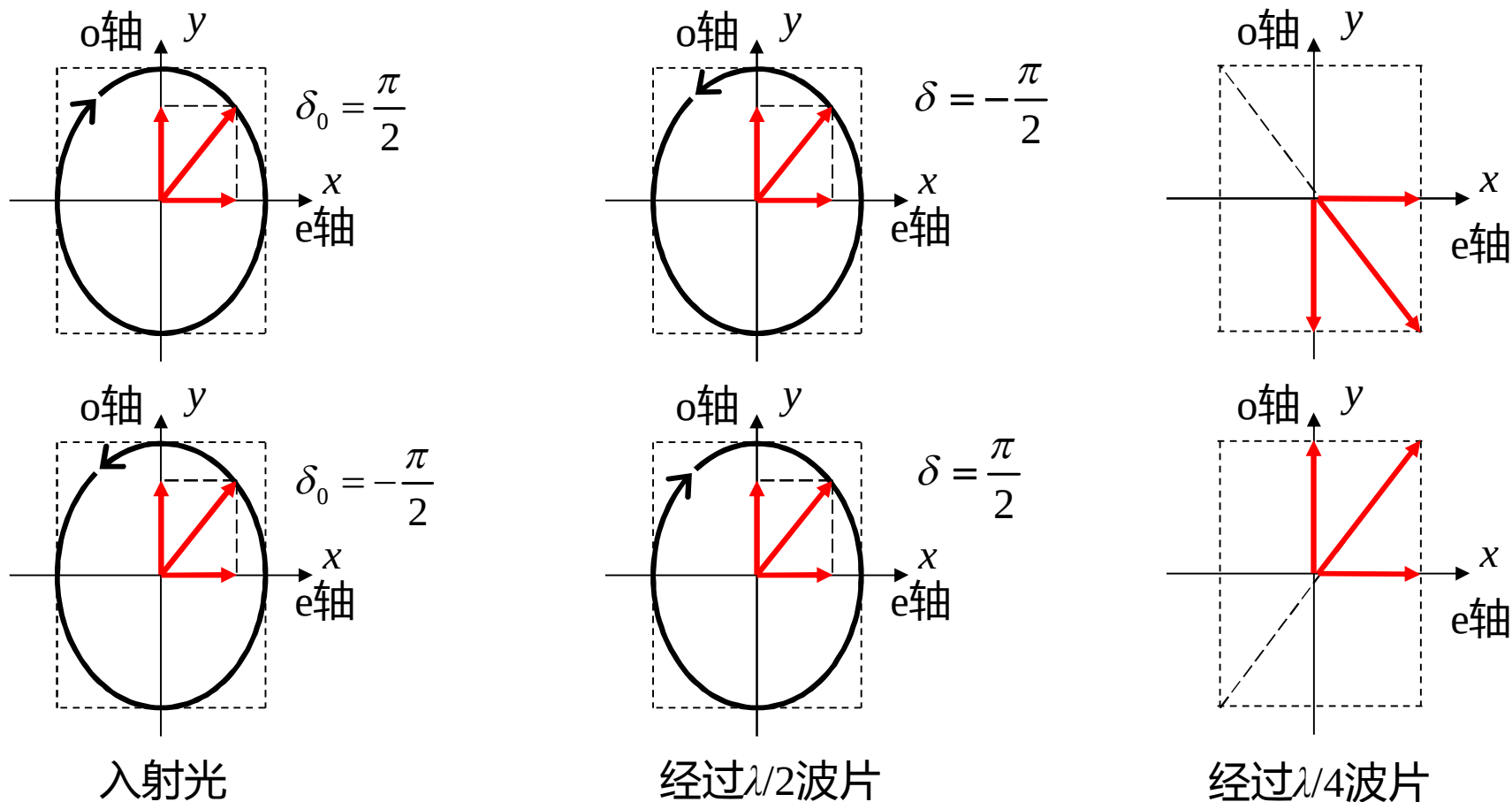
$$\begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \delta_0) \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} E_x = A_x \cos \omega t \\ E_y = A_y \cos(\omega t + \delta_0 \pm \pi/2) \end{cases}$$



7.2.2 椭圆偏振光的获得

(4) 椭圆偏振光经过波片

(c) 正椭圆偏振光经过 $1/2$ 和 $1/4$ 波片

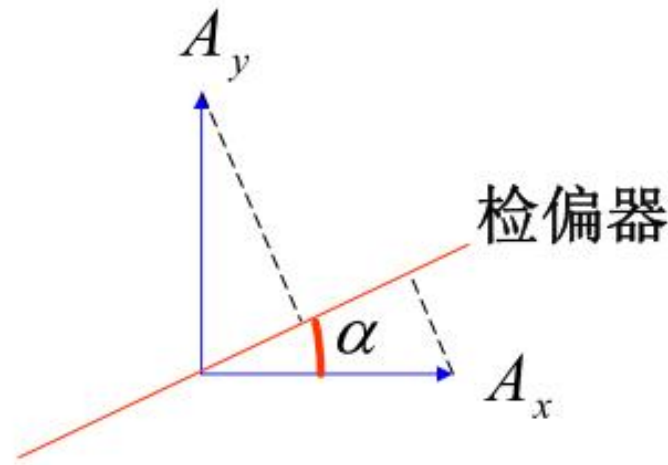


结论

圆偏振光和正椭圆偏振光与线偏振光之间，可以通过 $1/4$ 波片相互转化。

7.2.2 椭圆偏振光的获得

(5) 圆偏振光和椭圆偏振光经过检偏器之后的强度变化



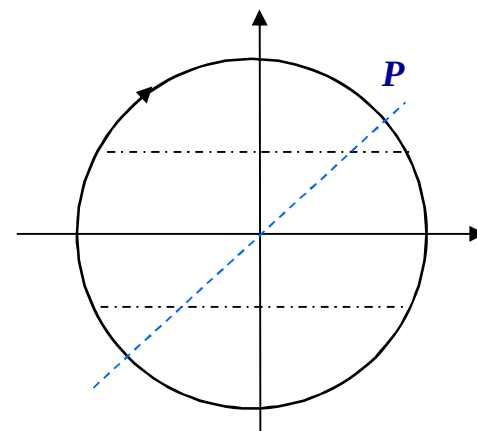
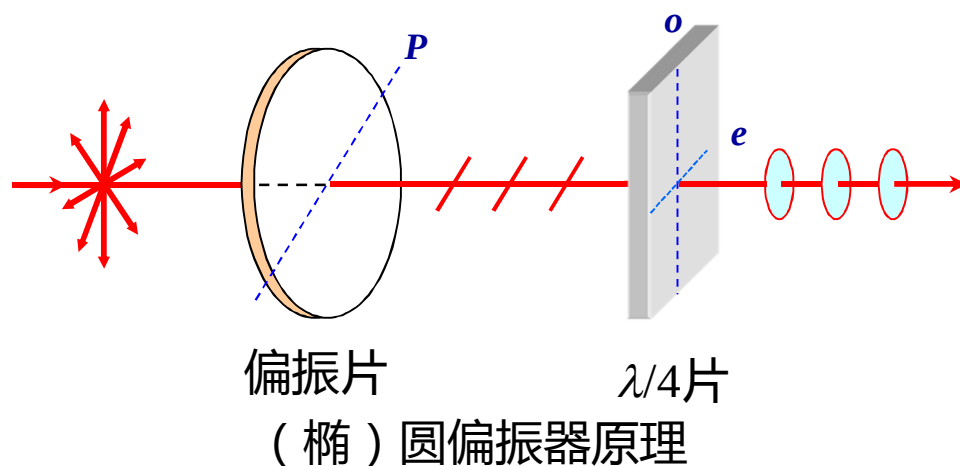
$$\begin{aligned} E &= A_x \cos \alpha e^{i\omega t} + A_y \sin \alpha e^{i(\omega t + \delta)} \\ &= (A_x \cos \alpha + A_y \sin \alpha e^{i\delta}) e^{i\omega t} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} I &= E \cdot E^* \\ &= A_x^2 \cos^2 \alpha + A_y^2 \sin^2 \alpha + A_x A_y \sin 2\alpha \cos \delta \end{aligned}$$

7.2.2 椭圆偏振光的获得

椭圆偏振光的获得（续）

从自然光获取椭圆偏振光的装置



当偏振片的透振方向和波片光轴成 45° 角时，输出圆偏振光。

两个条件：

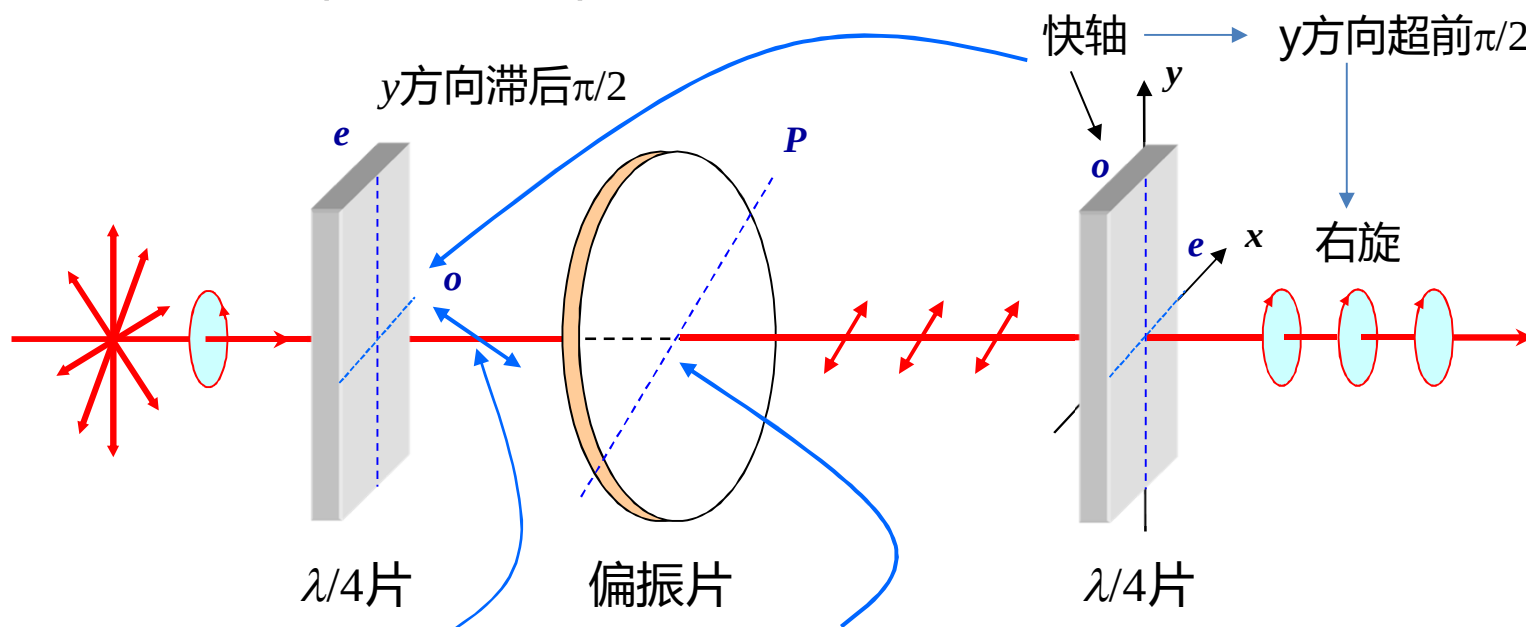
1. E_o 和 E_e 的相位差 $\delta = \delta_0 + \Delta = \pm \pi/2$ 。
2. E_o 和 E_e 的振幅 $A_e = A_o$ 。

缺陷：无法区分自然光里的左旋和右旋正交偏振态。

7.2.2 椭圆偏振光的获得

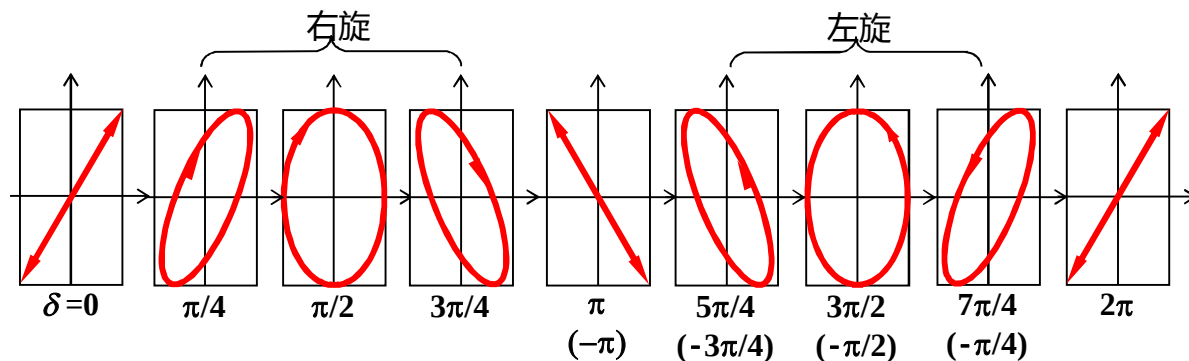
椭圆偏振光的获得（续）

例：设计起偏器，要求能够产生右旋圆偏振光分量，且能阻拦自然光中的左旋分量（正交分量）



II、IV象限线偏振光

透振方向在I、III象限



7.2.3 椭圆偏振光的检验

偏振光的检验途径

原则：能够产生偏振光的器件同时也就能够检验偏振光。

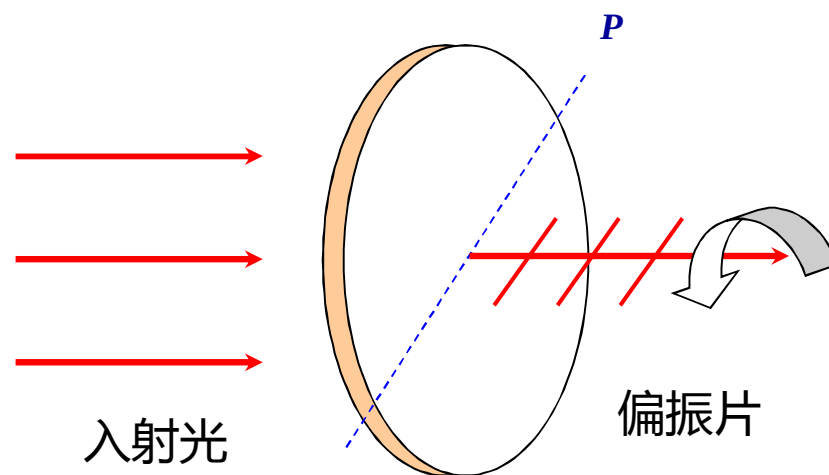
线偏光和圆偏光看做椭圆偏振光的特例。

(1) 线偏振光的检测

方法：在光路中插入起偏器，由于起偏器可以产生线偏振光，因此也可以对其进行检验。

判据：绕轴旋转偏振片 P 。有消光时，入射光为平面偏振光；无消光时，入射光为自然光或圆偏振光；部分消光时，入射光为椭圆偏振光或部分偏振光。

缺点：无法区分自然光与圆偏振光、部分偏振光与椭圆偏振光。



线偏振光的检验原理

7.2.3 椭圆偏振光的检验

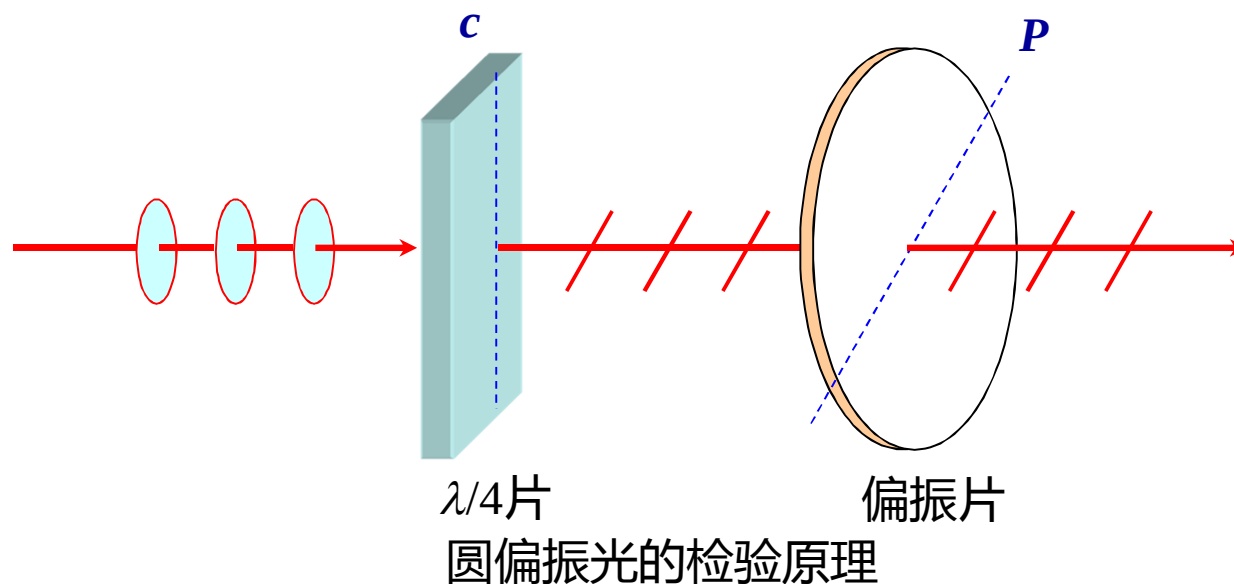
偏振光的检验途径(续)

(2) 圆偏振光的检测

方法：在光路中插入一倒置圆偏振器，让光束依次穿过 $\lambda/4$ 片和检偏器。自然光通过任何厚度的波片后仍然是自然光。圆偏振光通过一个 $\lambda/4$ 片后变为平面偏振光。

判据：旋转检偏器。若出现消光，表明入射光为圆偏振光；若无消光，则表明入射光为自然光。

。



7.2.3 椭圆偏振光的检验

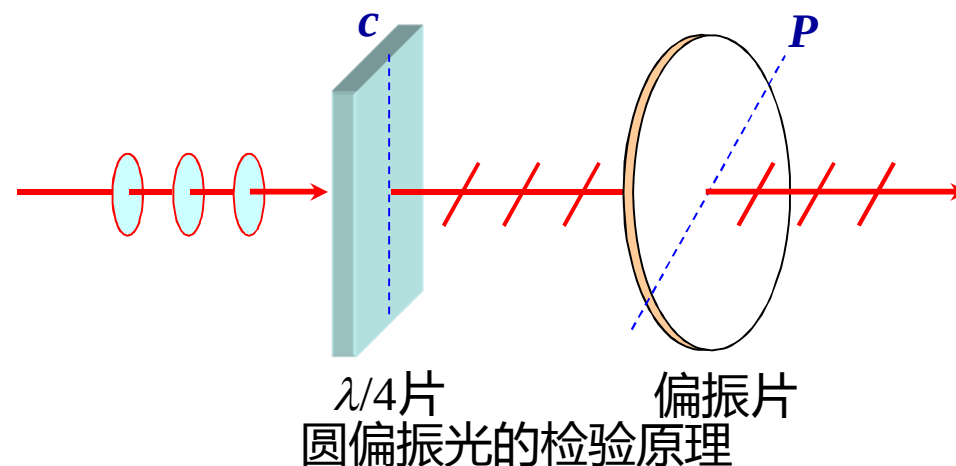
偏振光的检验途径(续)

(3) 椭圆偏振光的检测

方法：装置与检测圆偏振光相同。椭圆偏振光通过 $\lambda/4$ 片后，若波片光轴与椭圆的长轴或短轴重合，则透射光变为平面偏振光；若不重合，则仍为椭圆偏振光。部分偏振光通过任何厚度的波片后则仍然是部分偏振光。

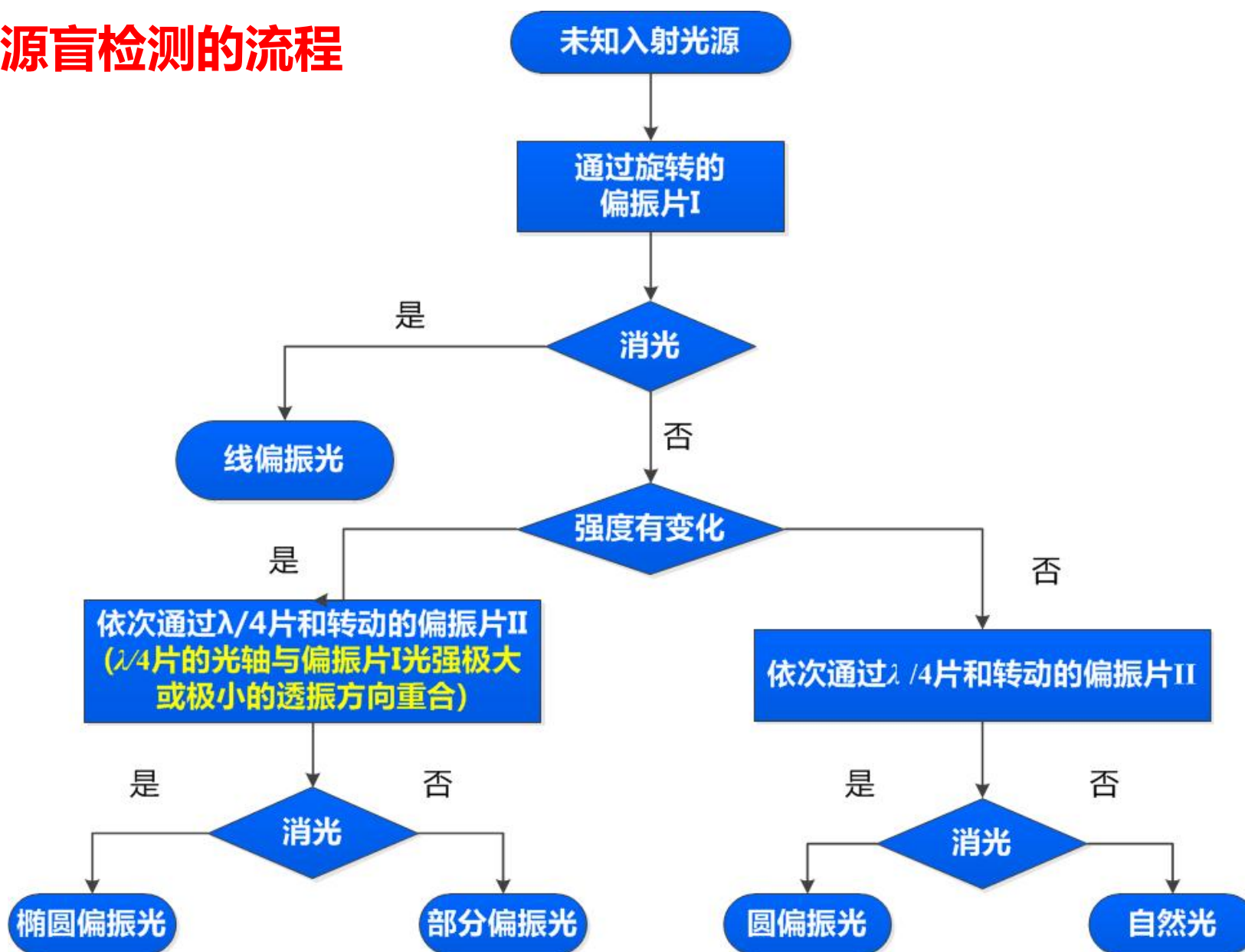
判据：旋转检偏器，使透射光强达到最大或最小，然后旋转 $\lambda/4$ 片。旋转检偏器。若出现消光，表明入射光为圆偏振光；若无消光，则表明入射光为自然光。

说明：椭圆偏振光或圆偏振光通过 $\lambda/4$ 片后变为平面偏振光，其振动方向与原来的椭圆或圆偏振光的旋向及晶片相位延迟的正负有关，视左旋或右旋或相位延迟正负不同，而取不同方向。



7.2.3 椭圆偏振光的检验

光源盲检测的流程

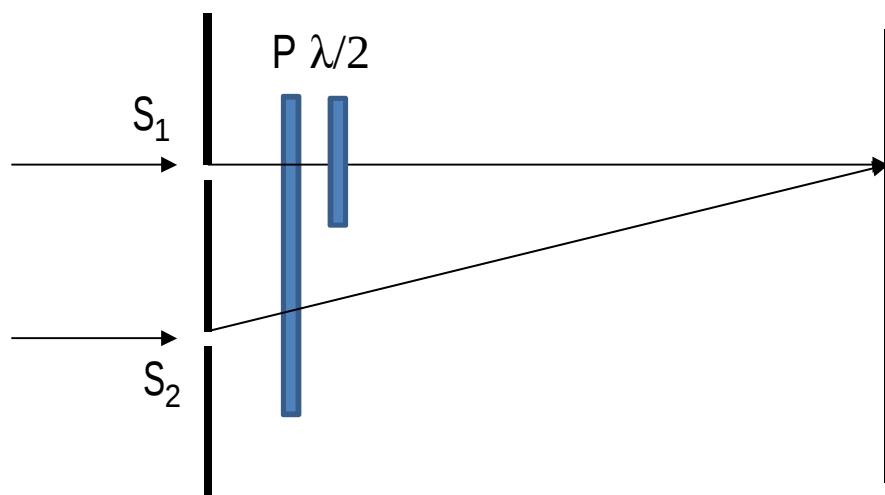


课堂练习

如果采用平行的自然单色光进行杨氏双缝干涉实验（满足傍轴条件和远场条件），在屏幕上得到一组干涉条纹，试求：

问：

- （1）如果在双缝之后放置一个偏振片P，条纹将如何变化？
- （2）在（1）的条件下，偏振片的透振方向与图所在的纸面成怎样的角度才能得到最暗（可见度最高）的条纹？
- （3）如果在P后再放置一个 $\lambda/2$ 波片，仅仅遮挡住S1出射的光线，且其光轴与P的透振方向成 45° 角，则屏幕上的干涉条纹将出现怎样的变化？



本节重点

1. 圆偏振光和椭圆偏振光的获得（理解）。
2. 五种偏振态的检测方法（理解）。

作业

P201-1, 2, 3