➢上次课内容回顾：

§ 3.4 光在晶体中的波面

（正、负）晶体中o光和e的波面特点：o光为球面，e光为椭球面

§ 3.5 光在晶体中的传播方向

（正、负）单轴晶体内o光和e的传播方向：惠更斯作图法

- ➢光轴垂直晶体表面并平行于入射面
- ➢光轴平行晶体表面并垂直于入射面　（此时e光遵从折射定律）
- ➢光轴平行晶体表面并平行于入射面

§ 3.6 偏振器件

尼科耳棱镜：获得一束振动方向固定的线偏振光。

沃拉斯顿棱镜：产生两束彼此分开的、振动相互垂直的线偏振光。

波片　相位差：$\Delta\varphi = \dfrac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)d$　¼波片　½波片　全波片

➢本次课内容提要：

§ 3.7 椭圆偏振光和圆偏振光（基本掌握）

3.7.1 圆和椭圆偏振光的描述 （了解）

3.7.2 自然光改造成椭圆偏振光或圆偏振光 （掌握）

§ 3.8 偏振态的实验检验（熟练掌握）

3.8.1 线偏振光的检验

3.8.2 自然光和圆偏振光的检验

3.8.3 部分偏振光和椭圆偏振光的检验

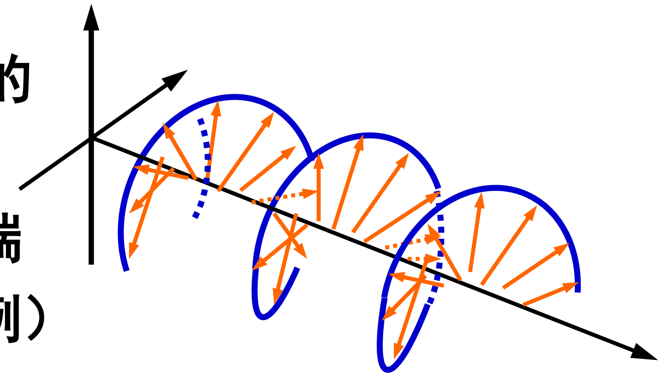
§ 3.9 偏振光的干涉（熟练掌握）

3.9.1 偏振光干涉典型的实验装置

3.9.2 线偏振光干涉的强度分布

§ 3.10 *旋光效应和磁光效应（了解）

§ 3.7 椭圆偏振光和圆偏振光



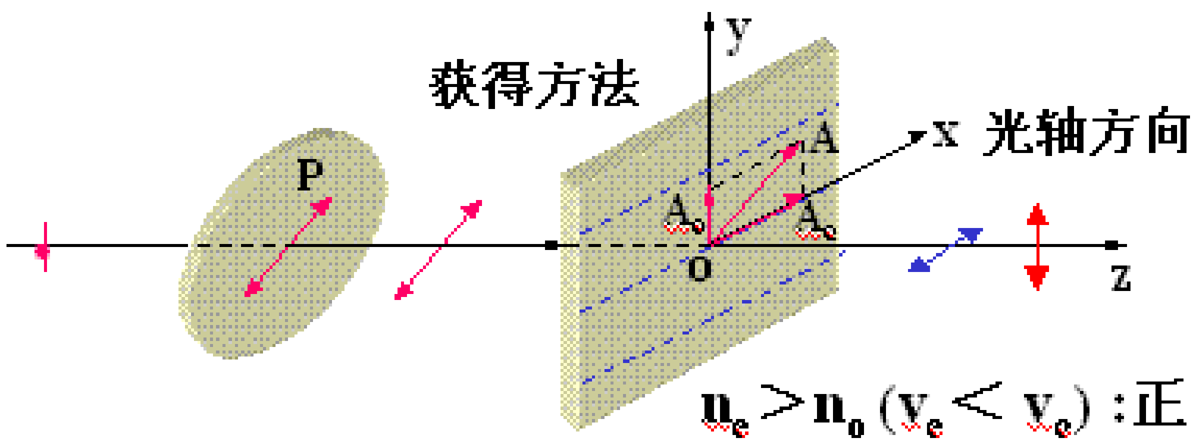
椭圆偏振光： 在光的传播方向上，电矢量的端点在波面内描绘出一个椭圆

圆偏振光： 在光的传播方向上，电矢量的端点在波面内描绘出一个圆（椭圆偏振光的特例）

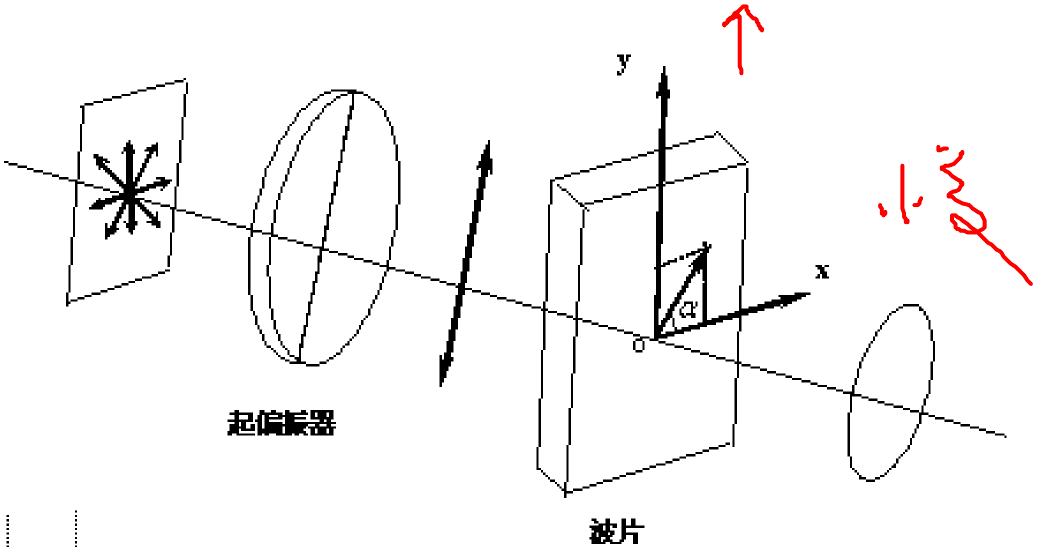
一、圆和椭圆偏振光的描述

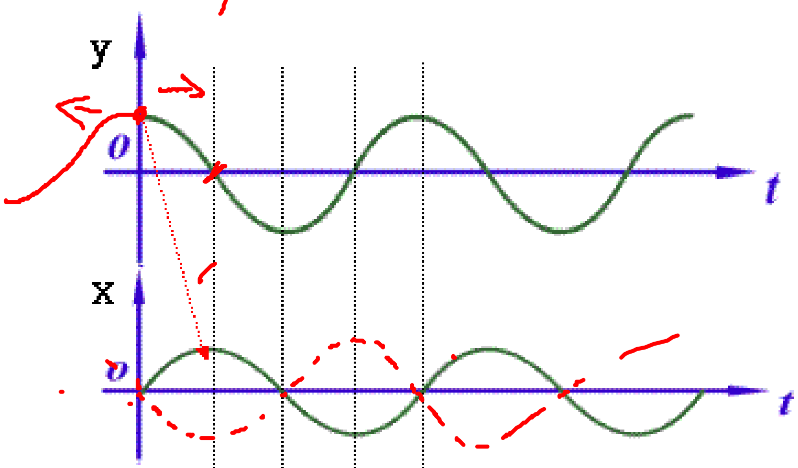
频率相同
位相差恒定
振动方向相互垂直

沿z方向传播的两线偏振光的叠加



$n_e > n_o$ ($v_e < v_o$) :正晶体





$$E_y = A_y \cos\omega t$$ 超前

$$E_x = A_x \cos(\omega t - \Delta\varphi)$$

$$\Delta\varphi = \pi / 2$$

顺时针

1/4 波片 y 为快轴

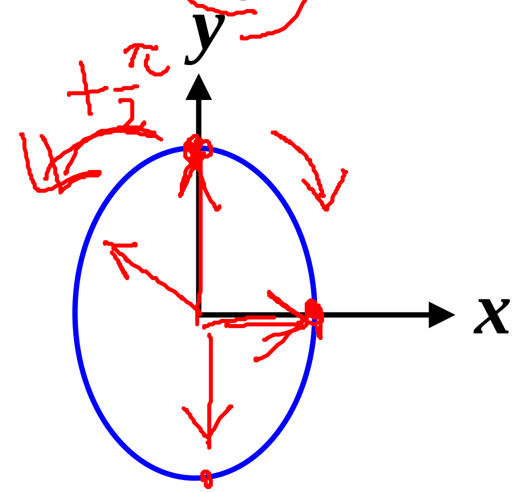
--右旋正椭圆偏振光

$$\Delta\varphi = -\pi / 2 (\text{or } 3\pi / 2)$$

逆时针

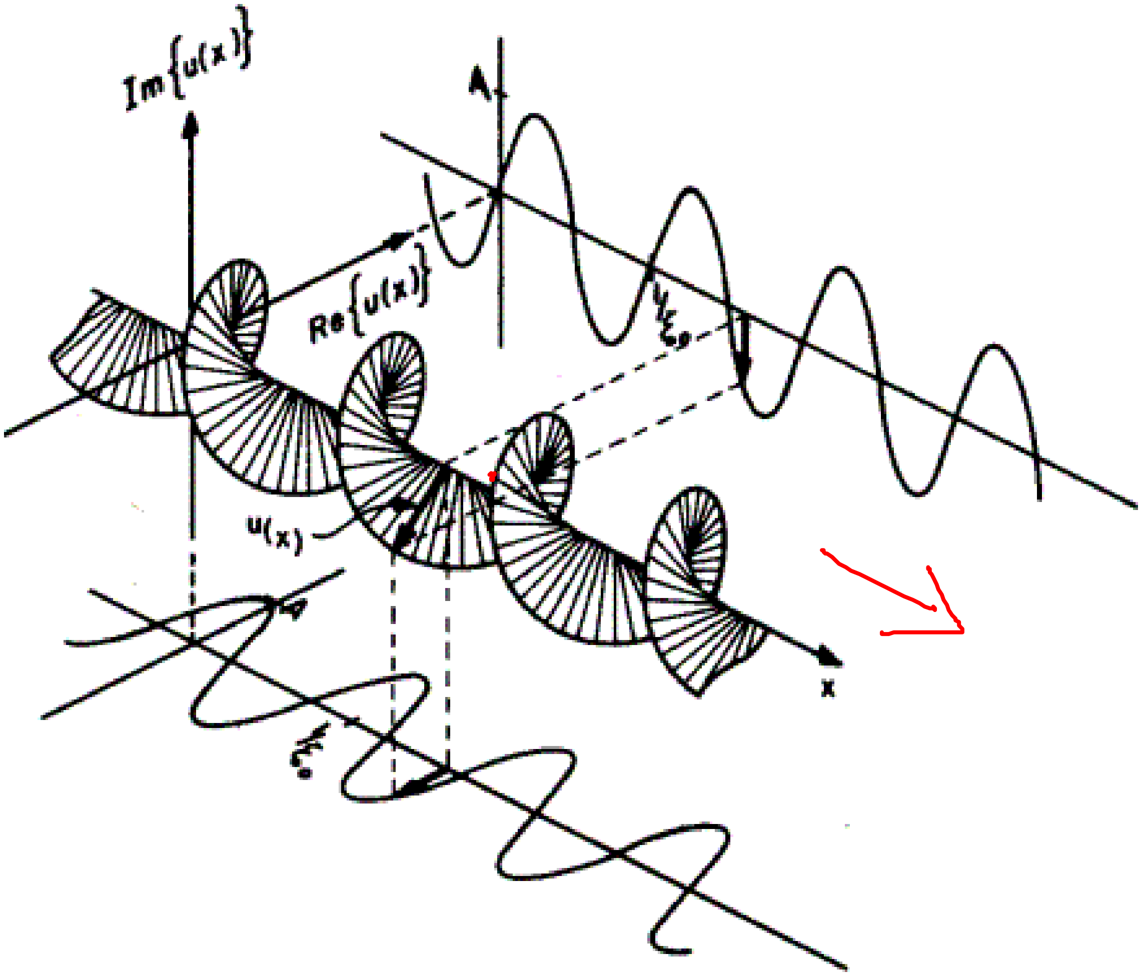
1/4 波片 x 为快轴

--左旋正椭圆偏振光

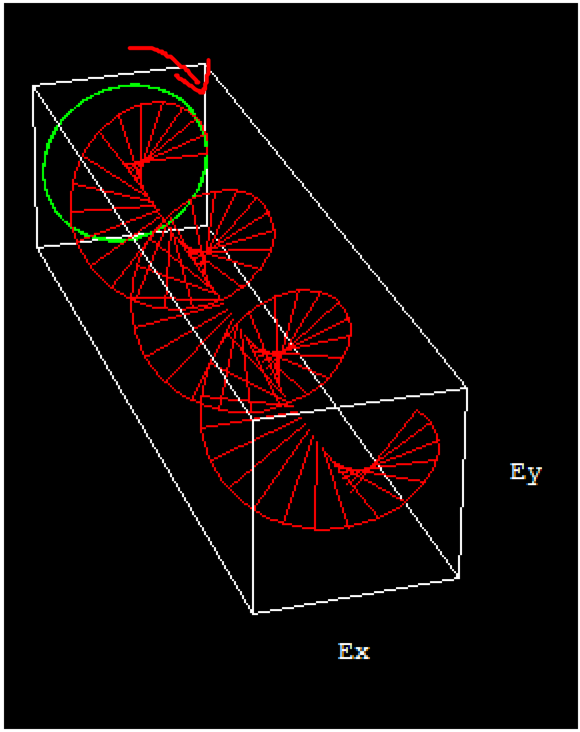


正椭圆偏振光

电矢量E作周期性的转动

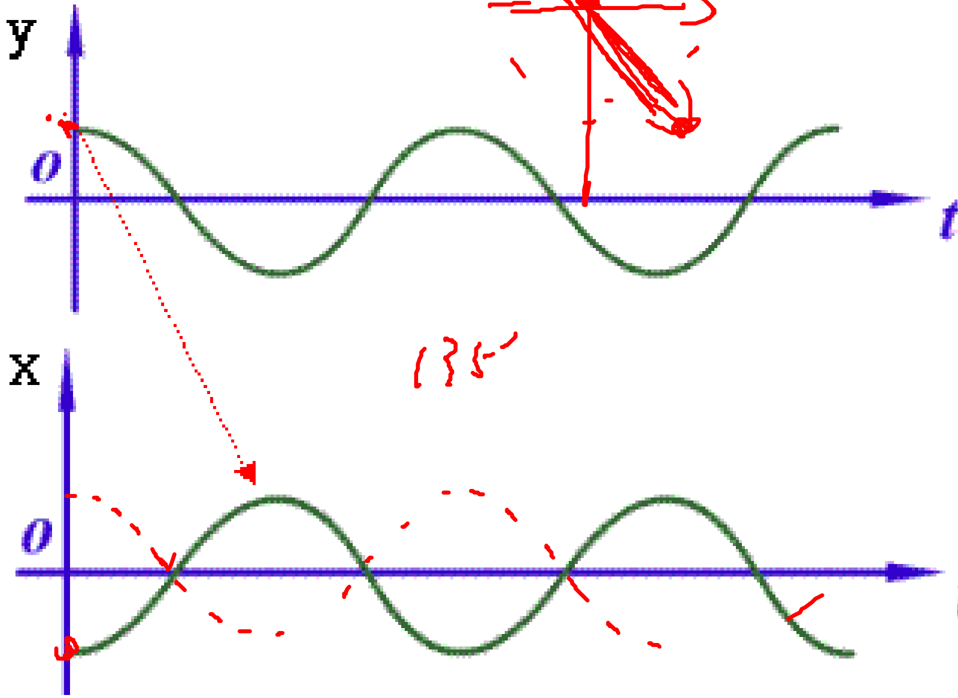


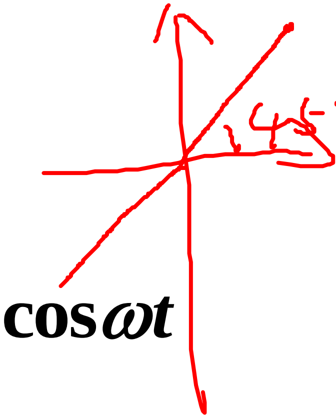
Three-dimensional depiction of $A\exp\{j2\pi\xi_0 x\}$.



顺时针

The tip of the electrical field vector



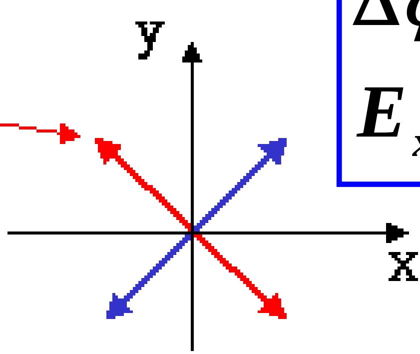


$$E_y = A_y \cos\omega t$$

$$E_x = A_x \cos(\omega t - \Delta\varphi)$$

$$\boxed{\begin{gathered}\Delta\varphi = \pi(\text{or } -\pi) \\ E_x = -E_y\end{gathered}}$$

——线偏振光



$$\boxed{\begin{gathered}\Delta\varphi = 0 \\ E_x = E_y\end{gathered}}$$

两线偏振光的波动方程为

$$E_x = A_x \cos(\omega t - kz) \qquad E_y = A_y \cos(\omega t - kz + \Delta\varphi)$$

消除时间t和z项，得关于E_x、E_y的方程（电矢量E的矢端轨迹方程）

$$\boxed{\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2 + \left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2 - \frac{2E_xE_y}{A_xA_y}\cos\Delta\varphi = \sin^2\Delta\varphi}$$

$\Delta\varphi = 0$

----椭圆的一般方程

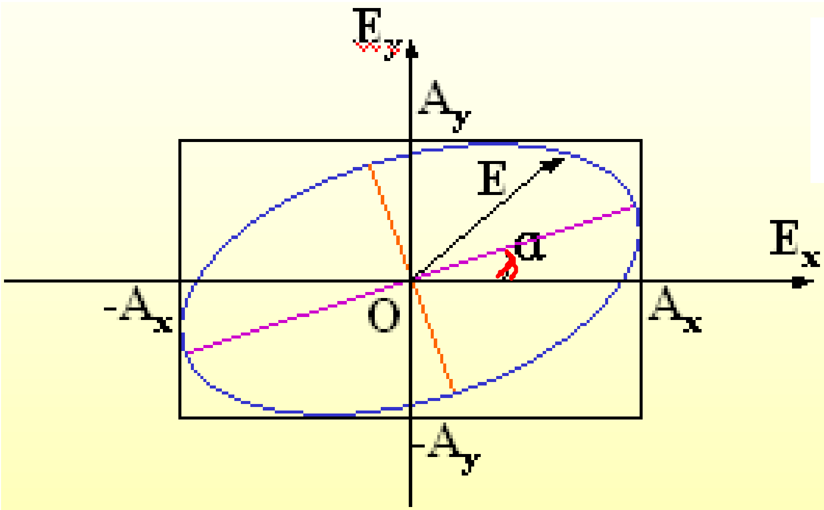
结论：电矢量E的矢端轨迹为椭圆---椭圆偏振光

合成波的波动方程为

$$\vec{E} = E_x\vec{i} + E_y\vec{j} = A_x\cos(\omega t - kz)\vec{i} + A_y\cos(\omega t - kz + \Delta\varphi)\vec{j}$$

电矢量E作周期性的转动，与E_x和E_y有相同的周期 ω

画出 $\boxed{(\frac{E_x}{A_x})^2+(\frac{E_y}{A_y})^2-\frac{2E_xE_y}{A_xA_y}\cos\Delta\varphi=\sin^2\Delta\varphi}$



椭圆与边长为$2A_x$、 $2A_y$的矩形内切

E_x在 $\pm A_x$ 之间变化

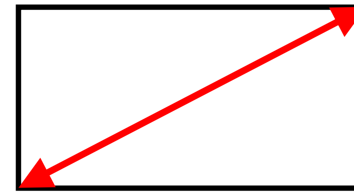
E_y在 $\pm A_y$ 之间变化

椭圆主轴（长轴）与 x 夹角 α

$$\tan 2\alpha=\frac{2A_xA_y}{A_x{}^2-A_y{}^2}\cos\Delta\varphi$$

讨论： 椭圆的形状与A_x、A_y和 $\Delta\varphi$ 有关，分析几种特殊情形

$$\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2+\left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2-\frac{2E_xE_y}{A_xA_y}\cos\Delta\varphi=\sin^2\Delta\varphi$$



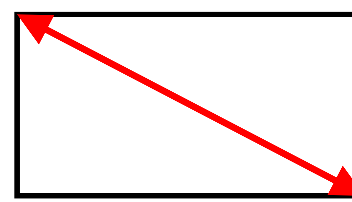
（1）$\Delta\varphi=0$ 或 $\pm 2\pi$ 的整数倍

$$\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2+\left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2-\frac{2E_xE_y}{A_xA_y}=0 \Rightarrow \left(\frac{E_x}{A_x}-\frac{E_y}{A_y}\right)^2=0 \Rightarrow E_y=\frac{A_y}{A_x}E_x$$

⟶ 直线方程（一、三象限的对角线）

（2）$\Delta\varphi=\pm\pi$ 的奇数倍　例如：$\Delta\varphi=\pi$

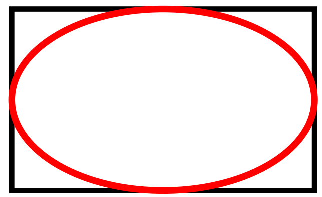
$$\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2+\left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2+\frac{2E_xE_y}{A_xA_y}=0 \Rightarrow E_y=-\frac{A_y}{A_x}E_x$$



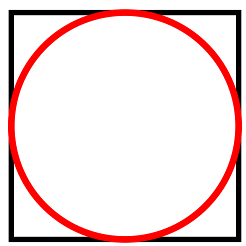
⟶ 直线方程（二、四象限的对角线）

（3）$\Delta\varphi=\pm\pi/2$及其奇数倍　例如：$\Delta\varphi=\pi/2$

$$\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2+\left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2=1$$ → 标准椭圆方程，主轴与坐标轴重合



若$A_x=A_y$，则电矢量E的矢端轨迹为圆----圆偏振光

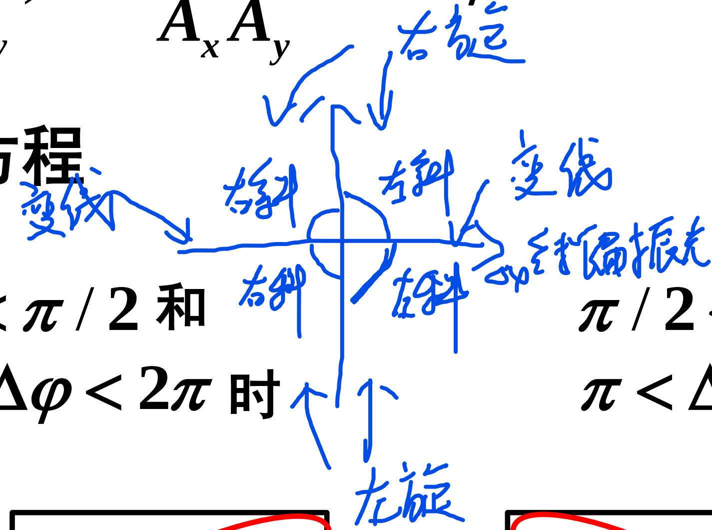


[例] 线偏振光正入射到1/4波片上，振动方向和光轴方向成 45°角，则o光和e光等振幅$A_x=A_y$, $\Delta\phi=\pi/2$，出射光为圆偏振光。

(4) $\Delta\varphi$ 为其它值

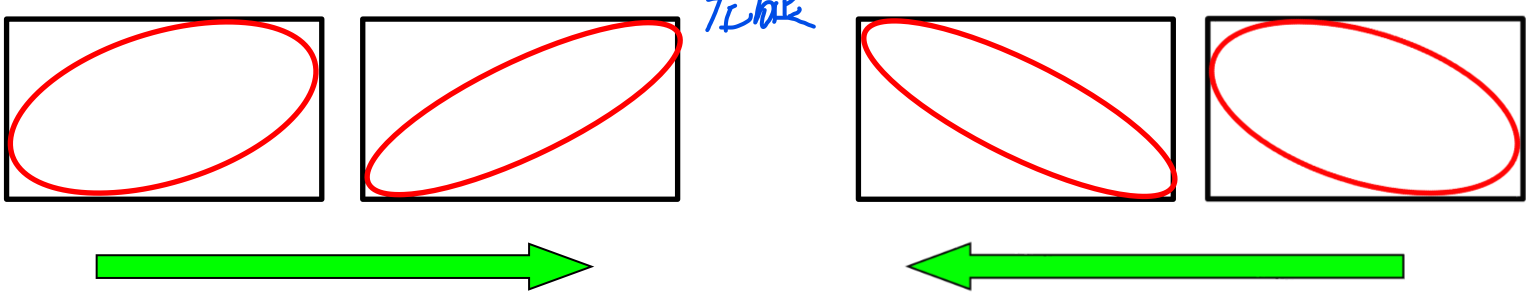
$$\left(\frac{E_x}{A_x}\right)^2+\left(\frac{E_y}{A_y}\right)^2-\frac{2E_xE_y}{A_xA_y}\cos\Delta\varphi=\sin^2\Delta\varphi$$

一般椭圆方程



$0<\Delta\varphi<\pi/2$ 和 $3\pi/2<\Delta\varphi<2\pi$ 时

$\pi/2<\Delta\varphi<\pi$ 和 $\pi<\Delta\varphi<3\pi/2$ 时



$\Delta\varphi\to 0$ 或 2π 椭圆变扁直到线

$\Delta\varphi\to\pi$ 时 椭圆变扁直到线

（5）椭圆偏振光的旋向

合矢量E的旋向不同，可分为两类偏振光

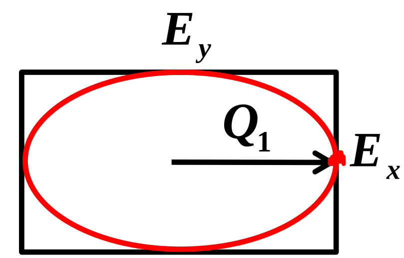
迎光传播方向观察：
- 合矢量顺时针旋转，**右旋偏振光**
- 合矢量逆时针旋转，**左旋偏振光**

由
$$\begin{cases} E_x = A_x \cos(\omega t - kz) \\ E_y = A_y \cos(\omega t - kz + \Delta\varphi) \end{cases}$$

判据
$$\begin{cases} \sin\Delta\varphi > 0 & \text{右旋偏振光} \\ \sin\Delta\varphi < 0 & \text{左旋偏振光} \\ \sin\Delta\varphi = 0 & \text{线偏振光} \end{cases}$$

[例] 若 $\Delta\varphi = \pi/2$，则 $\sin\Delta\varphi > 0$

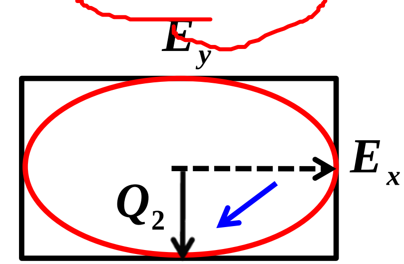
$$E_x = A_x \cos(\omega t - kz) \quad E_y = A_y \cos(\omega t - kz + \frac{\pi}{2})$$



设t=t$_0$ 时,$\omega t_0 - kz = 0$，则$E_x = A_x, E_y = 0$, 合矢量如图

当t=t$_0$+T/4时,$\omega t - kz = \omega t_0 + \omega T/4 - kz = \omega t_0 - kz + \pi/2$

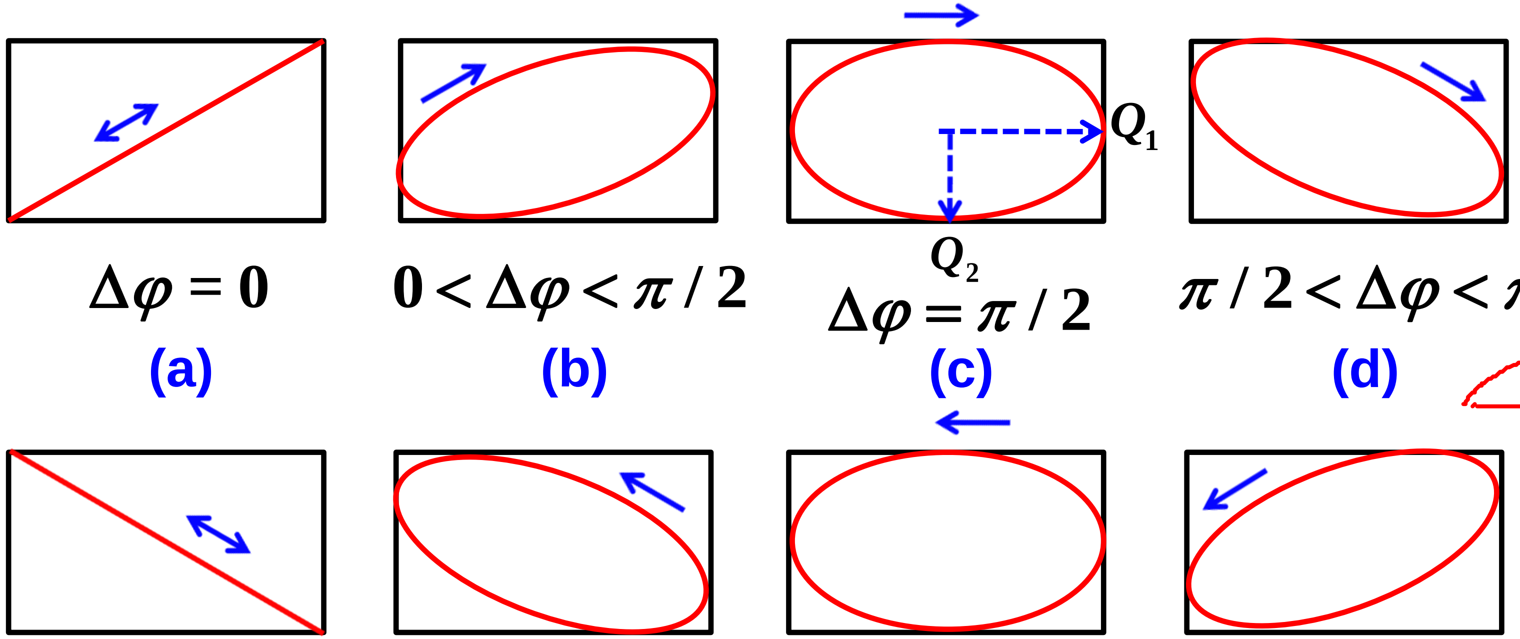
则$E_x = 0, E_y = -A_y$,合矢量如图



合矢量从Q$_1$—Q$_2$，顺时针旋转，为**右旋偏振光**

$\sin\Delta\varphi = 0$ 线偏振光

判据 $\begin{cases} \sin\Delta\varphi < 0 & \text{左旋偏振光} \\ \sin\Delta\varphi > 0 & \text{右旋偏振光} \end{cases}$



(a) $\Delta\varphi = 0$

(b) $0 < \Delta\varphi < \pi/2$

(c) $\Delta\varphi = \pi/2$

(d) $\pi/2 < \Delta\varphi < \pi$

(e) $\Delta\varphi = \pi$

(f) $\pi < \Delta\varphi < 3\pi/2$

(g) $\Delta\varphi = 3\pi/2$

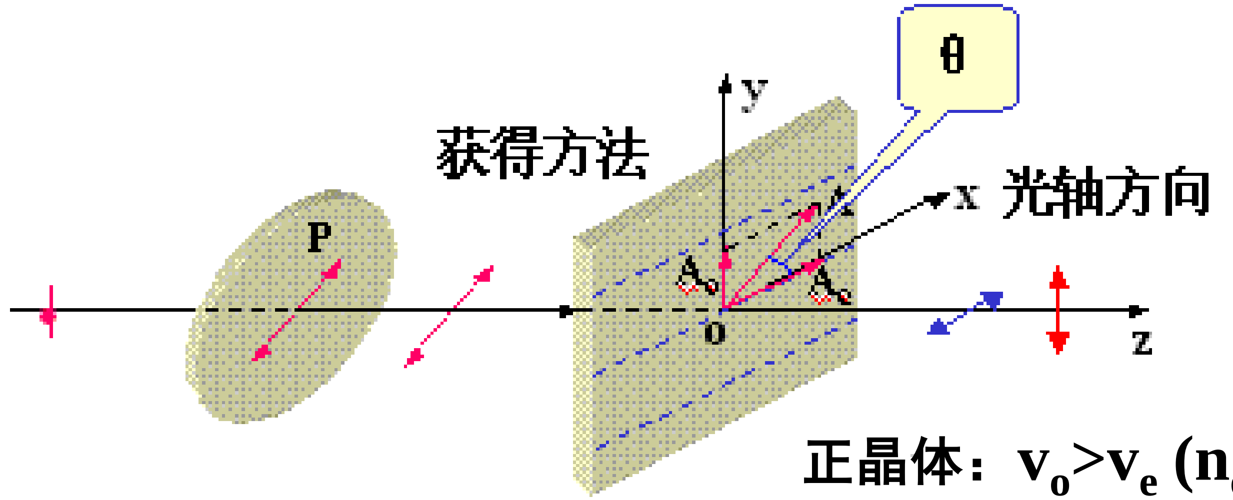
(h) $3\pi/2 < \Delta\varphi < 2\pi$

迎光传播方向观察：$\begin{cases} \text{合矢量顺时针旋转，右旋偏振光} \\ \text{合矢量逆时针旋转，左旋偏振光} \end{cases}$

二、自然光改造成椭圆偏振光或圆偏振光

1. 椭圆偏振器

用起偏器获得线偏振光，垂直入射到波片上获得椭圆偏振光

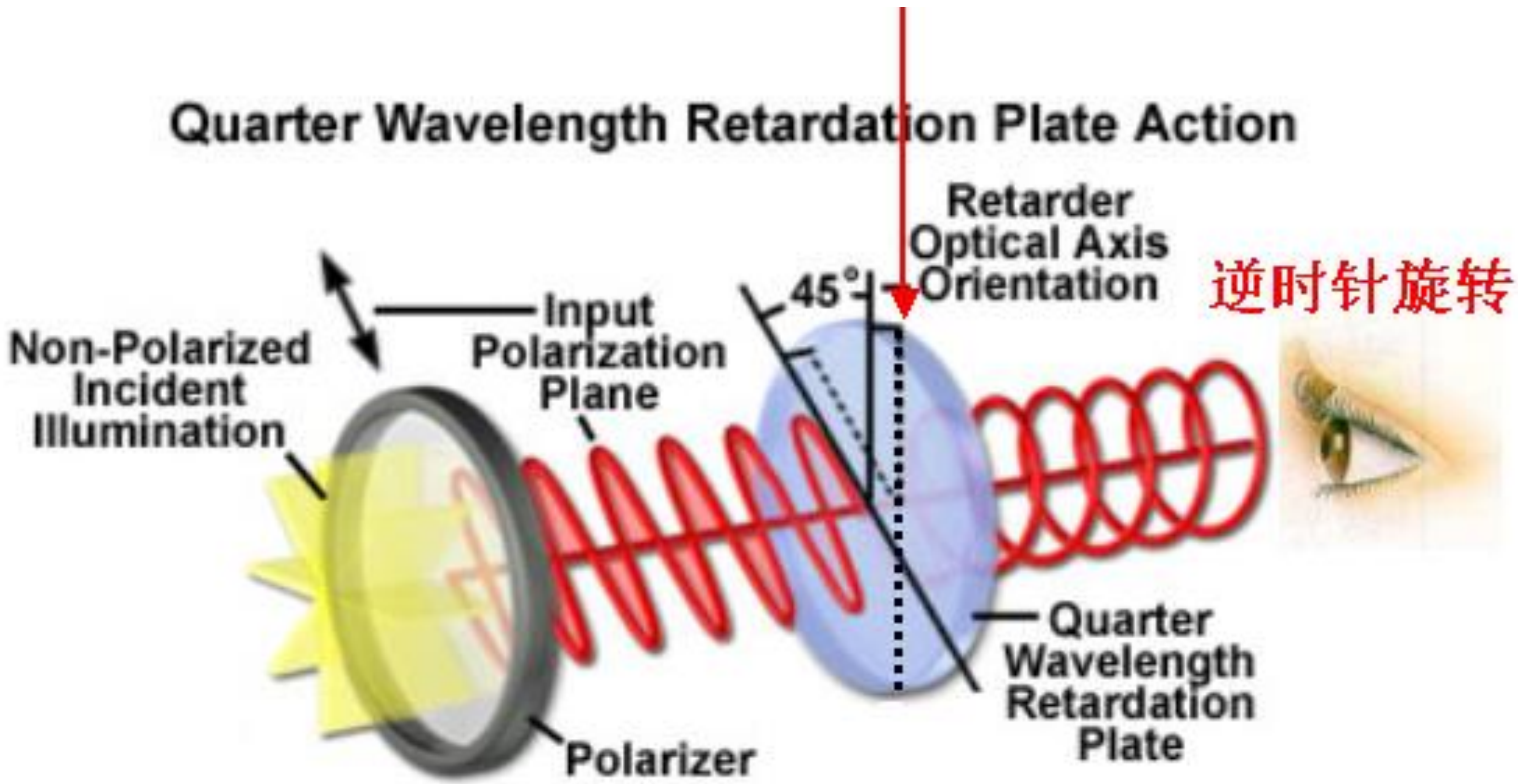


正晶体：$v_o>v_e$ $(n_o<n_e)$

v_e

2. 圆偏振器

用起偏器获得线偏振光，垂直入射到1/4波片且使入射线偏振光的振动方向与光轴成45°，获得圆偏振光



Quarter Wavelength Retardation Plate Action
Retarder Optical Axis Orientation
45°
逆时针旋转
Input Polarization Plane
Non-Polarized Incident Illumination
Quarter Wavelength Retardation Plate
Polarizer

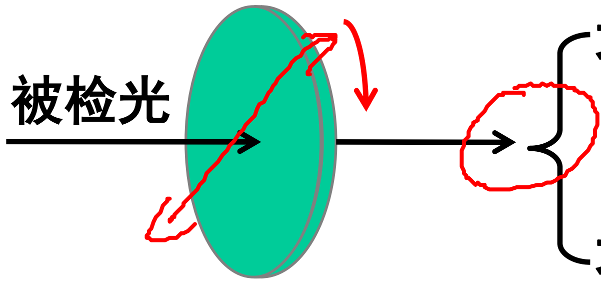
§ 3.8 偏振态的实验检验

一、平面偏振光的检验

5种可能：自然光、部分偏振光、线偏振光、圆偏振光、椭圆偏振光

仅用一个检偏器，可唯一确定线偏振光

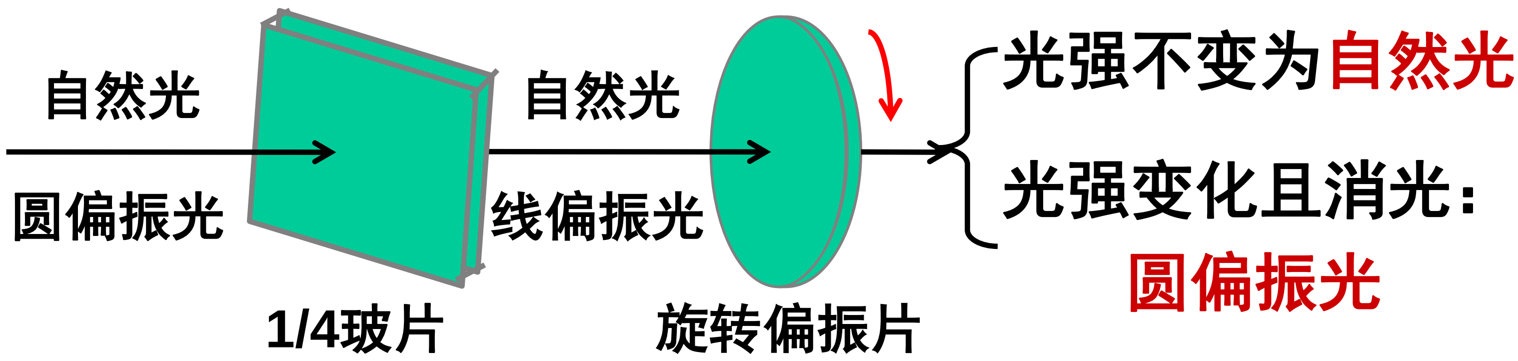
被检光



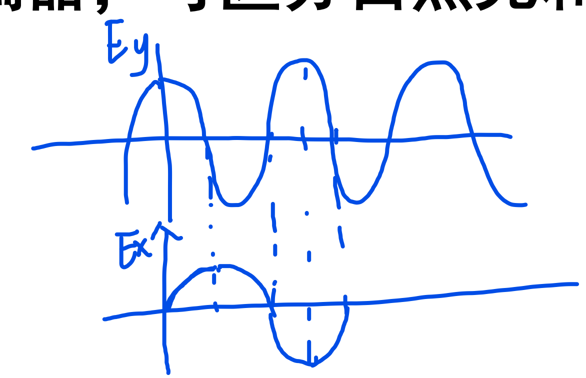
旋转偏振片

- 光强变化
  - 有消光：线偏振光
  - 无消光（待定）
    - 部分偏振光
    - 椭圆偏振光
- 光强不变（待定）
  - 自然光
  - 圆偏振光

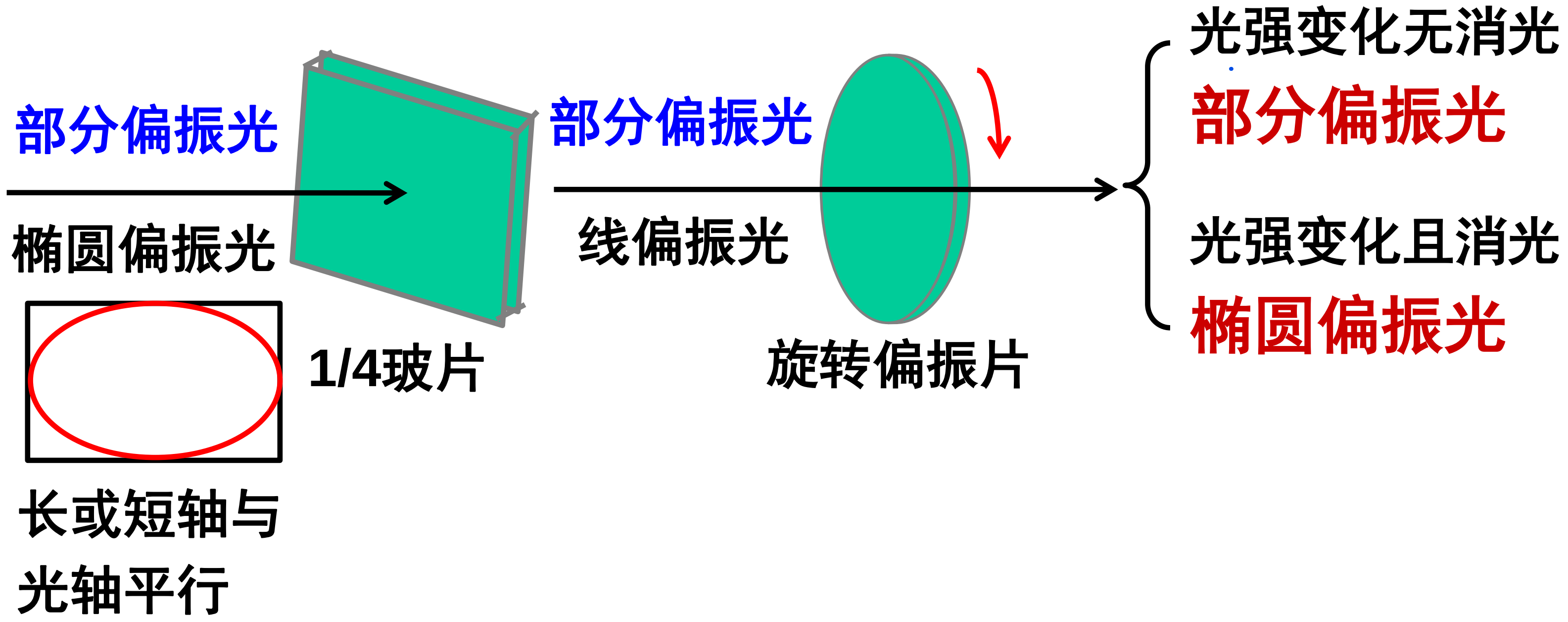
二、自然光和圆偏振光的检验



用1/4波片和检偏器，可区分自然光和圆偏振光



三、部分偏振光和椭圆（正椭圆）偏振光的检验

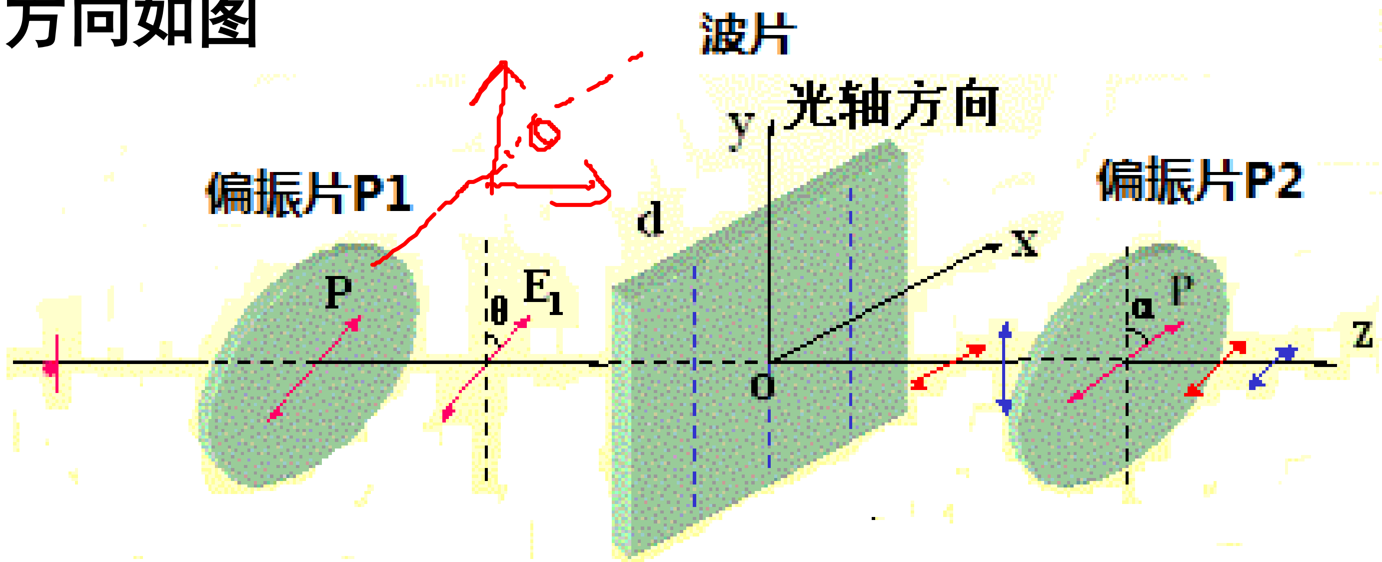


§3.9 偏振光（线偏振光）的干涉

条件：频率相同、振动方向相同、位相差恒定

一、偏振光干涉典型的实验装置

在两块共轴的偏振片P1和P2之间放一块厚度为d的波片，光轴方向如图



P1的作用：获得线偏振光

波片的作用：将入射的线偏振光分解成两束相互垂直的有固定位相差的线偏振光

P2的作用：把两束线偏振光引到同一方向上来

二、线偏振光干涉的强度分布

设P_1与y(波片光轴)的夹角为θ，P_2与y的夹角为α

- **由波片引起的位相差**

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

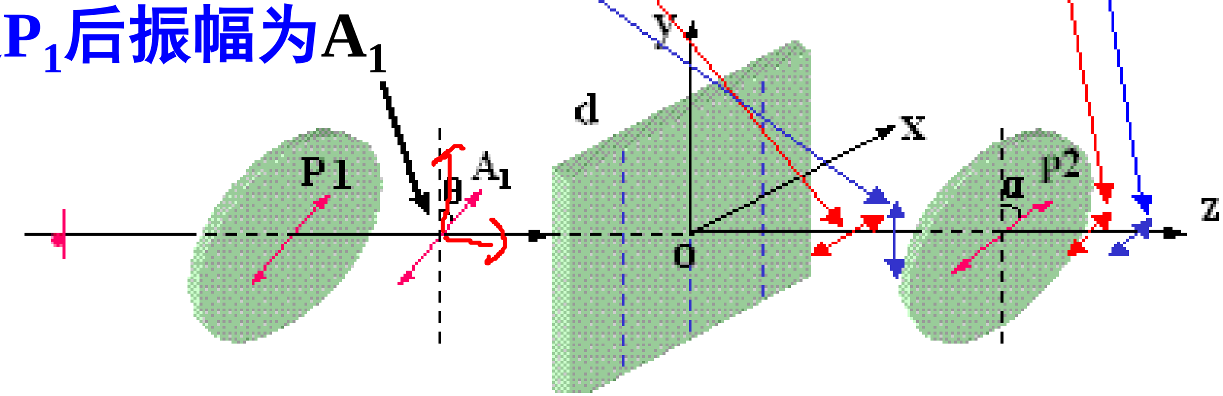
过P_2后振幅为

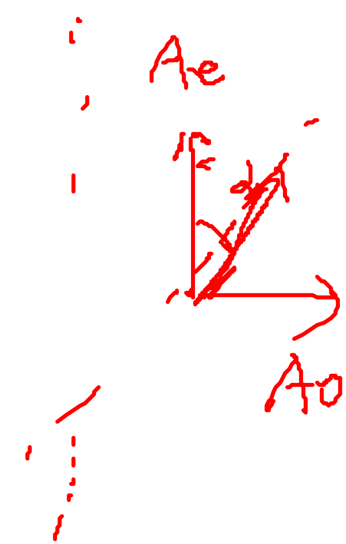
$$\begin{cases} A_{2o} = A_o \sin\alpha = A_1 \sin\alpha \sin\theta \\ A_{2e} = A_e \cos\alpha = A_1 \cos\alpha \cos\theta \end{cases}$$

过波片后分为

$$\begin{cases} A_o = A_1 \sin\theta \\ A_e = A_1 \cos\theta \end{cases}$$

过P_1后振幅为A_1





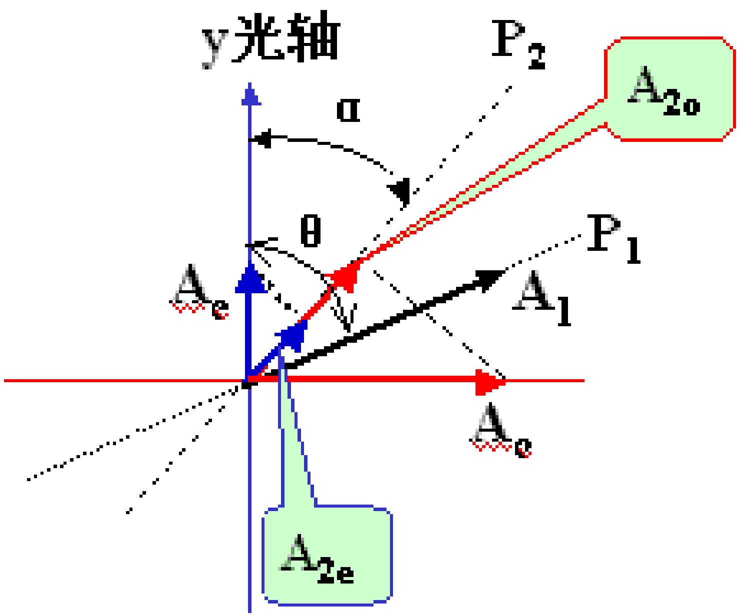
设两振动为相干的，位相差为 $\Delta\varphi'$, 合振动强度为

$$I = A^2 = A_{2o}^2 + A_{2e}^2 + 2A_{2o}A_{2e}\cos\Delta\varphi'$$

$$= A_1^2[\cos^2(\alpha-\theta) - \sin 2\theta \sin 2\alpha \sin^2\frac{\Delta\varphi'}{2}]$$

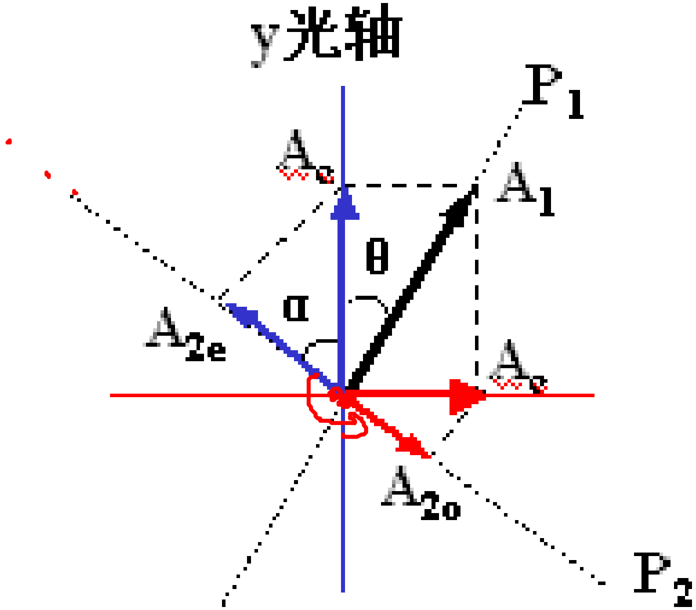
关于 $\Delta\varphi'$ 的讨论

<1> P_1和P_2在同一象限



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

P_1和P_2在相同的象限内，A_{2o}和A_{2e}方向相同，无附加光程差



关于$\Delta\varphi'$的讨论

〈2〉 P_1和P_2在不同象限

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

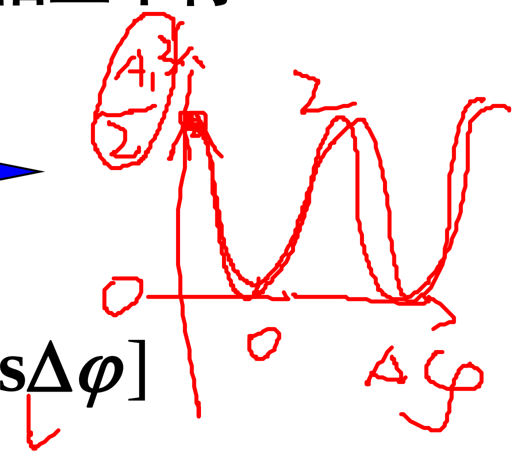
P_1和P_2在不同的象限内，A_{2o}和A_{2e}方向相反，附加光程差为π

关于光强 $I_{\square}$ 的讨论

◆ P_1和P_2的透振方向相互平行 $\alpha = \theta$

$$\boxed{I_{\square} = A_1^2[1 - \sin^2 2\theta \sin^2\frac{\Delta\varphi}{2}]} \xrightarrow{\theta = 45^\circ}$$

$$I_{\square} = A_1^2[1 - \sin^2\frac{\Delta\varphi}{2}] = \frac{A_1^2}{2}[1 + \cos\Delta\varphi]$$



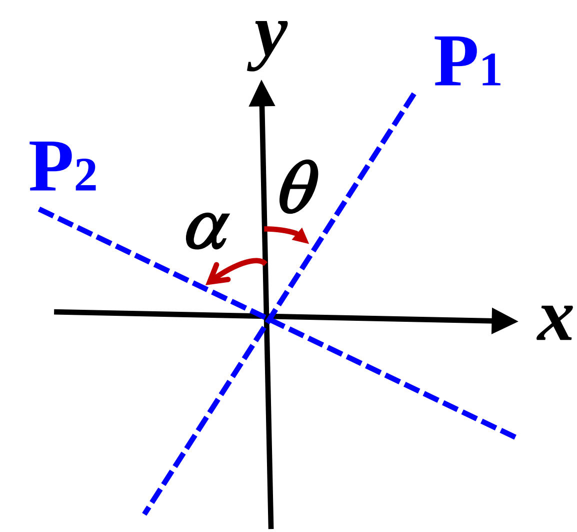
◆ P_1和P_2的透振方向相互垂直

$\theta-\alpha=\pi/2$　　注意：θ 取锐角，α 为负角

$$I_{\perp}=2A_1^2\cos^2\theta\sin^2\theta(1+\cos\Delta\varphi')=A_1^2\sin^2 2\theta\cos^2\frac{\Delta\varphi'}{2}$$

$$\Delta\varphi=\Delta\varphi'+\pi$$

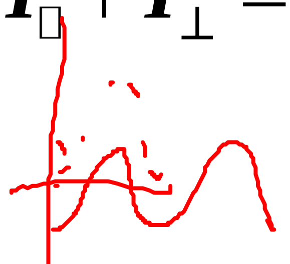
$$\boxed{I_{\perp}=A_1^2\sin^2 2\theta\sin^2\frac{\Delta\varphi}{2}]}$$

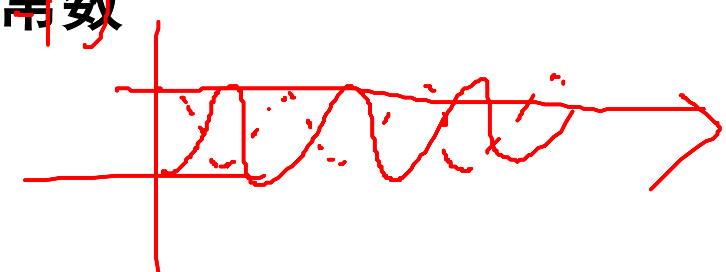


$\theta=45°$

$$I_{\perp}=\frac{A_1^2}{2}[1-\cos\Delta\varphi]$$

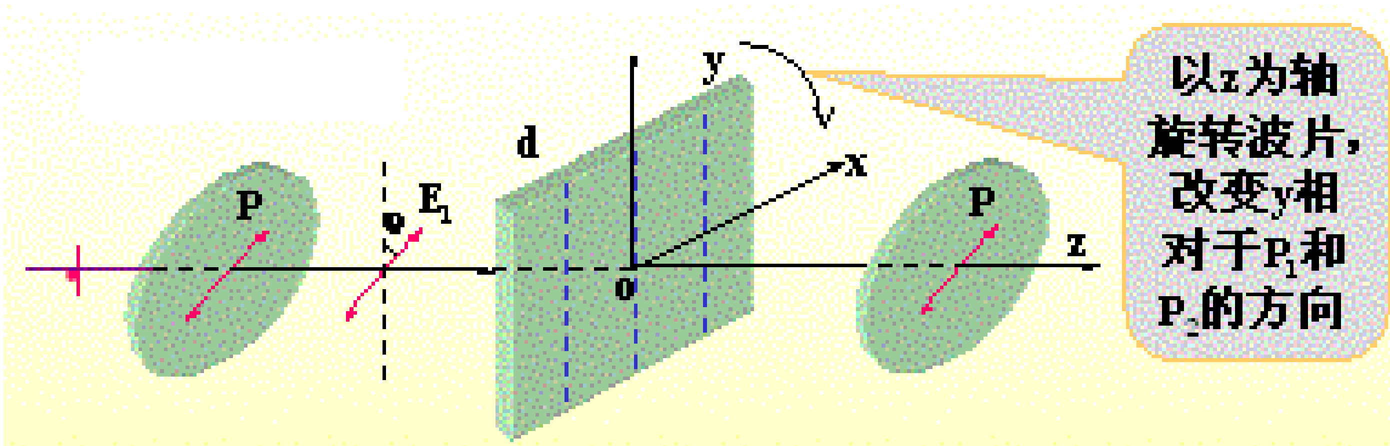
一般情况下 $I_{\parallel}+I_{\perp}=A_1^2=$常数





◆ P_1和P_2的透振方向相互平行 $$I_{\parallel}=A_1^2[1-\sin^2 2\theta\sin^2\frac{\Delta\varphi}{2}]$$

用单色光照明

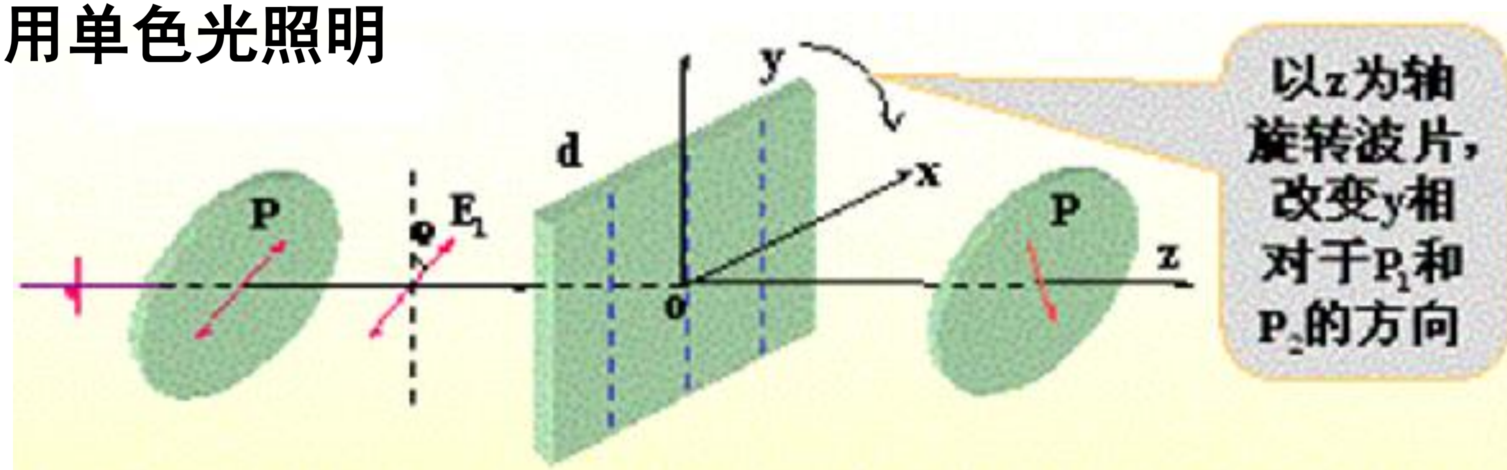


波片厚度d确定，$\Delta\varphi$ 恒定（n_o−n_e变化很小）

$$\text{极值条件}\begin{cases}\theta=0,\dfrac{\pi}{2},\pi,\dfrac{3\pi}{2} & I_{\parallel}\text{取极大值}\\[2ex] \theta=\dfrac{\pi}{4},\dfrac{3\pi}{4},\dfrac{5\pi}{4} & I_{\parallel}\text{取极小值}\end{cases}$$

◆ P_1和P_2的透振方向相互垂直 $\boxed{I_\perp = A_1^2 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\Delta\varphi}{2}]}$

用单色光照明



波片厚度d确定，$\Delta\varphi$ 恒定（n_o-n_e变化很小）

极值条件 $\begin{cases} \theta = 0, \frac{\pi}{2}, \pi, \frac{3\pi}{2} & I_\perp = 0 \text{ 取极小值} \\ \theta = \frac{\pi}{4}, \frac{3\pi}{4}, \frac{5\pi}{4} & I_\perp \text{ 取极大值} \end{cases}$

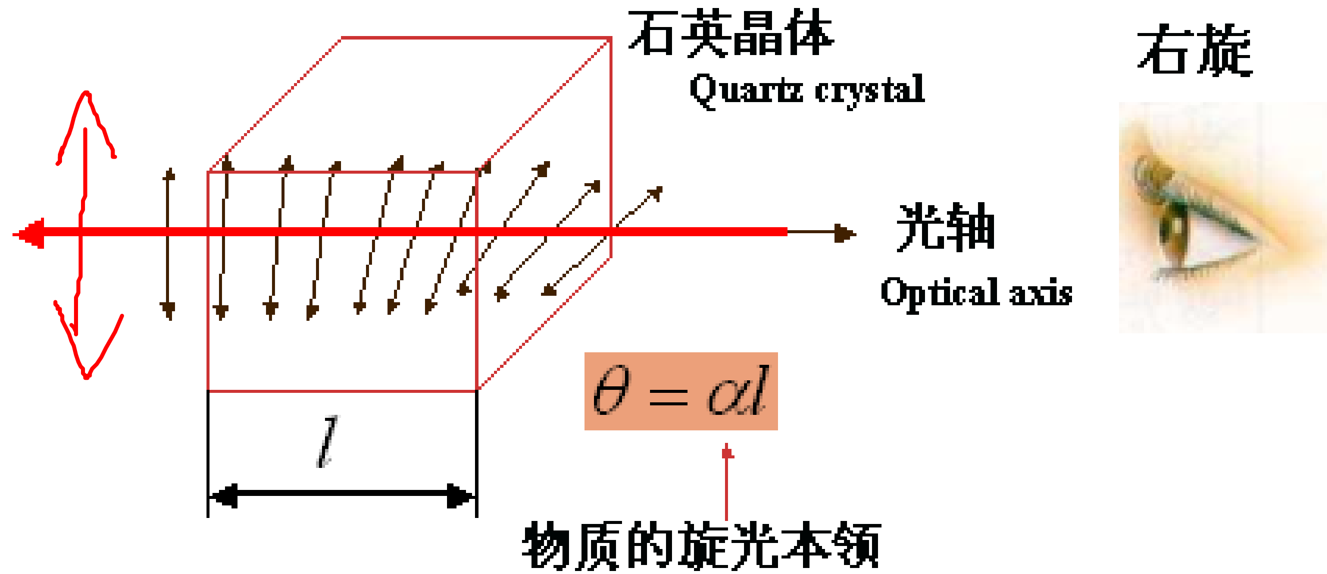
波片厚度d确定，用不同波长的光入射时，透射光的强弱随波长的不同而改变。

φ d · λ

§ *3.10 旋光效应 (P237 5.11)

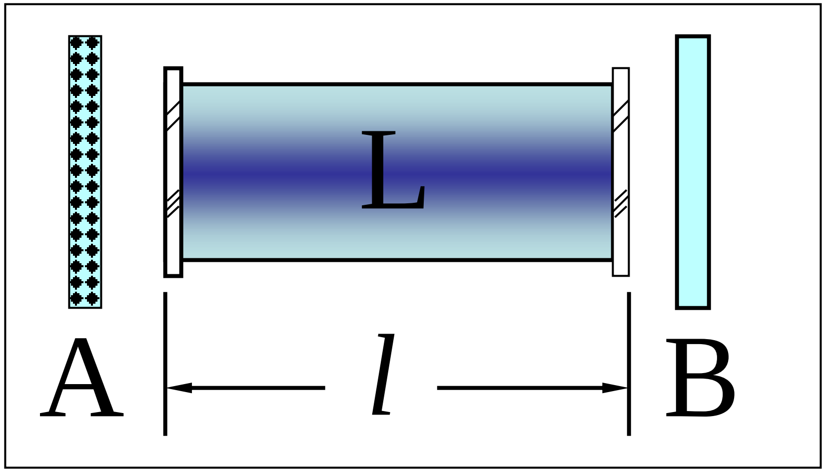
一、旋光现象

偏振光通过某些物质后，其振动面将以光的传播方向为轴线转过一定的角度.



◆ **旋光物质** 能产生旋光现象的物质.（如石英晶体、糖溶液、酒石酸溶液等）

◆ **旋光仪**　观察偏振光振动面旋转的仪器.



A：起偏器，

B：检偏器，

L：盛有液体旋光物质的管子.

设 $\Delta\psi$ 为偏振光通过旋光物质后振动面所转过的角度

◆ 对于旋光性物质的溶液 $\Delta\psi = \alpha l \rho$ （λ 一定）

ρ 为旋光物质的浓度　　l 为旋光物质的透光长度

α 为一与旋光物质有关的常量

◆ 对于固体旋光物质 $\Delta\psi = \alpha l$

α 为一与旋光物质及入射光的波长有关的有关的常量

◆ **磁致旋光效应** 外加磁感强度为B的磁场，使某些不具旋光性的物质产生旋光现象.

$$\Delta\psi = VlB$$

V 叫韦尔代常量

二、旋光物质的分类

1）**右旋物质** 面对着光源观察，使光振动面的旋转为顺时针的旋光物质.（如葡萄糖溶液）

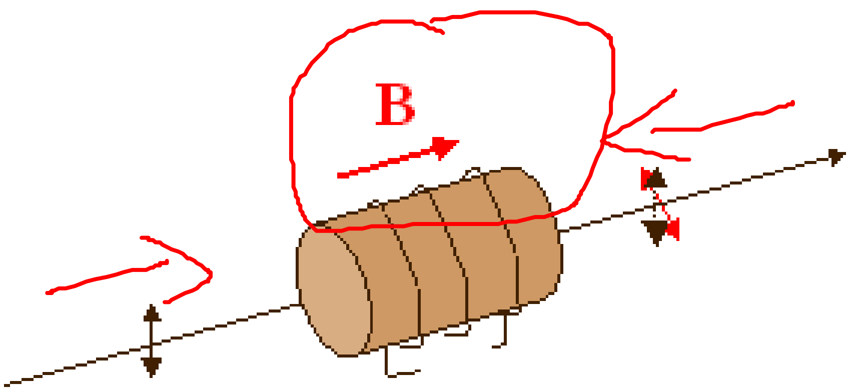
2）**左旋物质** 面对着光源观察，使光振动面的旋转为逆时针的旋光物质.（如蔗糖溶液）

三、磁致旋光效应

磁光效应：在强磁场的作用下，物质的光学性质发生变化。

磁致旋光效应（法拉第效应Faraday effect）：

在强磁场的作用下，本来不具有旋光效应的物质产生了旋光性质。

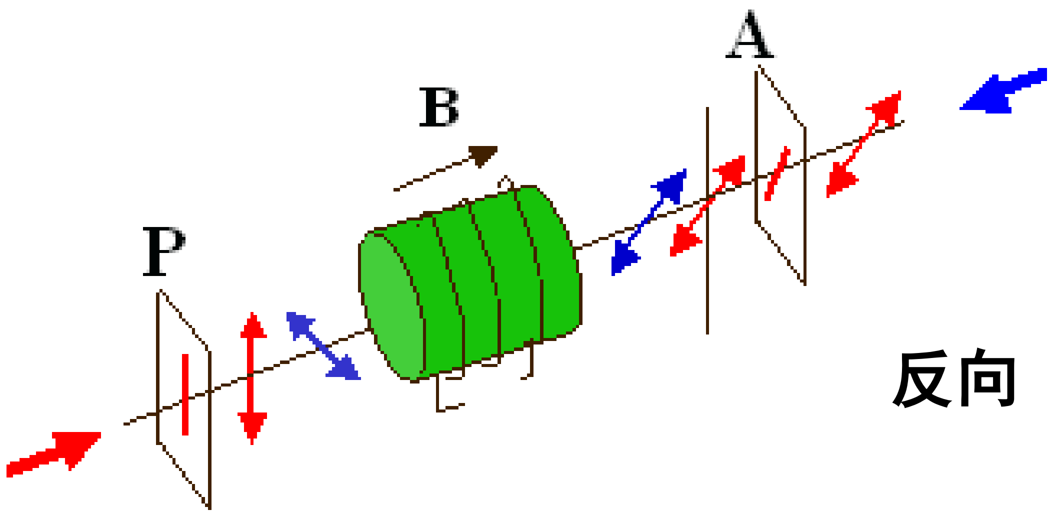


法拉第效应：转角 $\theta = VBl$

旋光方向与光传播方向无关，只与磁场方向有关。

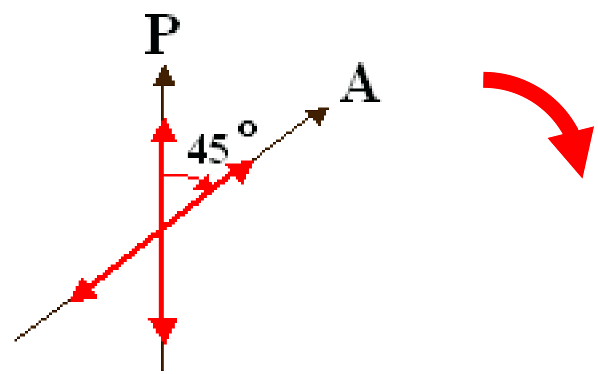
□ 磁光效应的应用（在光通信领域中的应用）

单通光闸

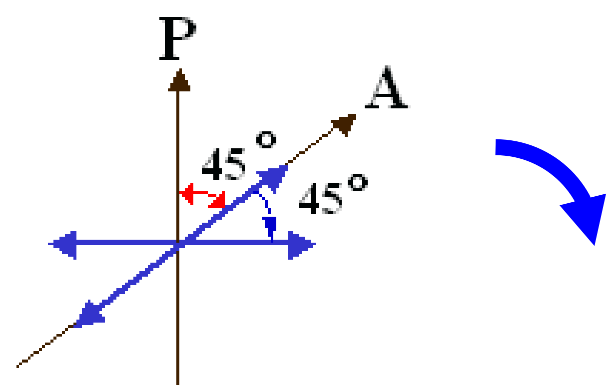


$$\theta = VBl = 45°$$

正向（Positive direction）通



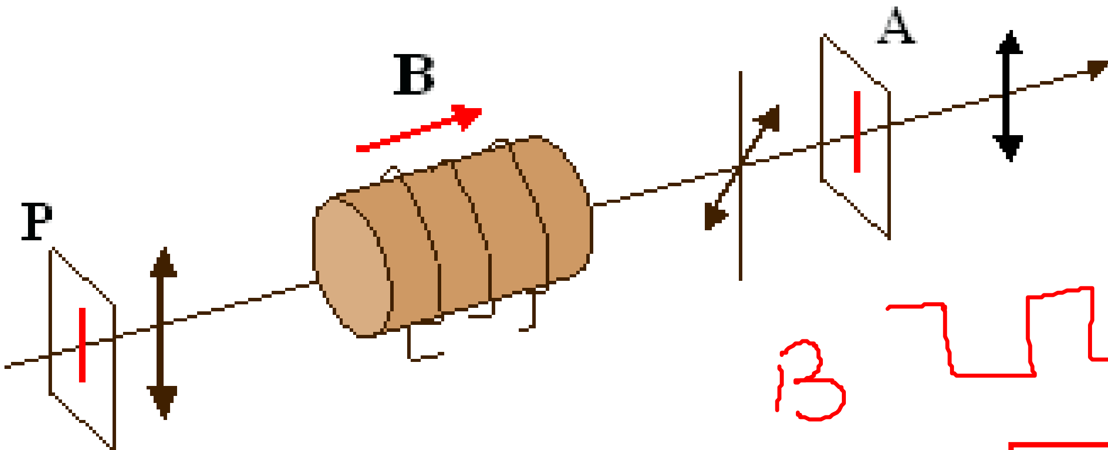
反向（Reverse direction）不通



磁光调制

◆系统组成

◆工作原理



B

$$\theta = VBl$$

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

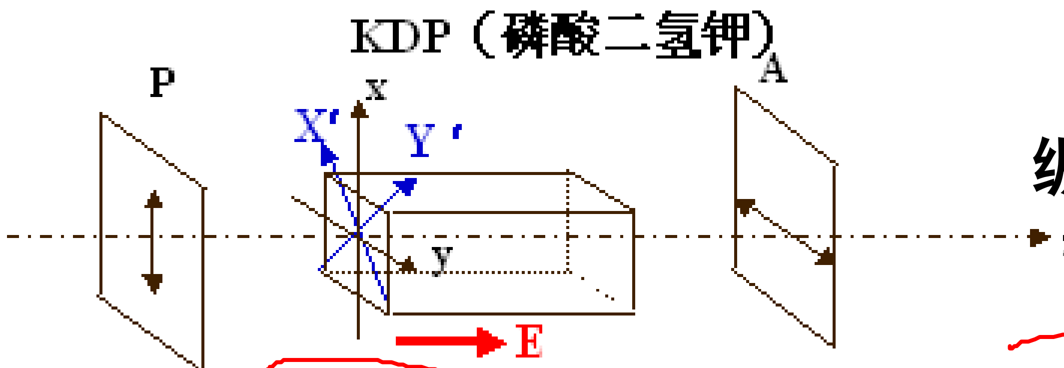
B

磁光传感

* 电光效应(Electro-optical Effect)

在外界强电场的作用下，某些本来是各向同性的介质会产生双折射现象，而本来具有双折射现象的晶体，其双折射性质也会发生变化。

1、泡克耳斯效应（Pockels effect）一阶电光效应



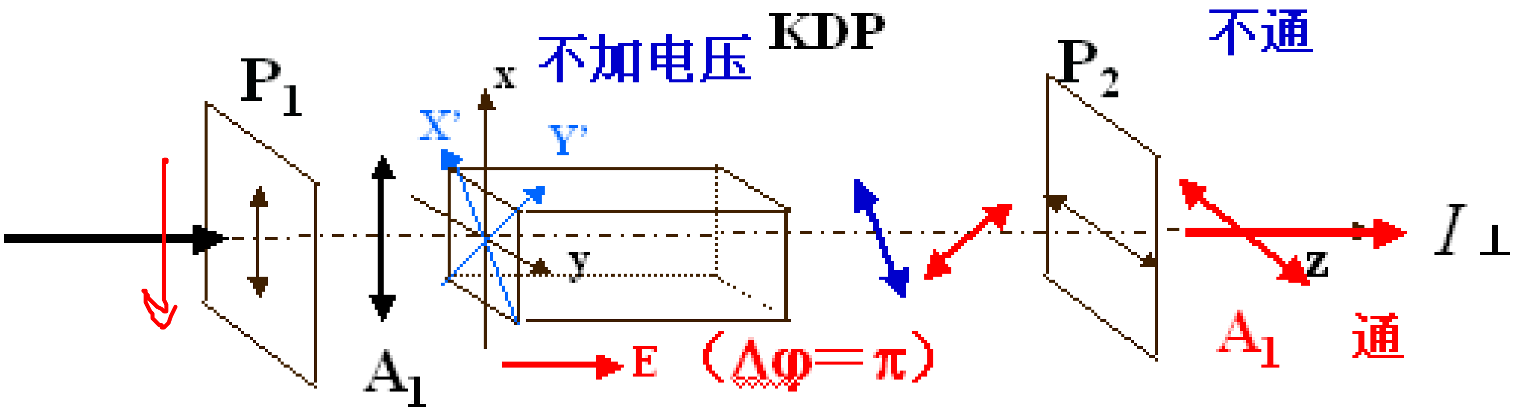
纵向电光效应

$$n' = n_o + \frac{1}{2}n_o^3\gamma E \qquad n'' = n_o - \frac{1}{2}n_o^3\gamma E$$

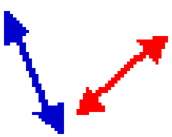
$\frac{2\pi d}{\lambda}$

感生折射率差：$n' - n'' = n_o^3\gamma E$

$k d \cdot \Delta n$



感生折射率差：$\boxed{n'-n''=n_o^3\gamma E}$

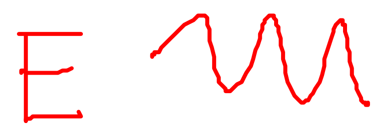


相位差：$\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}(n'-n'')l=\frac{2\pi}{\lambda}n_o^3\gamma El$

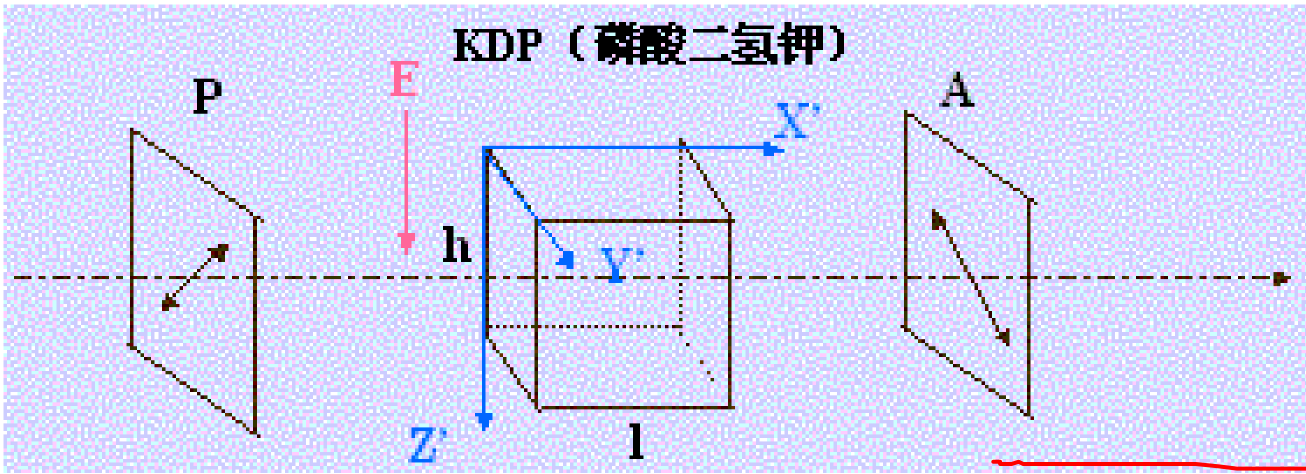
$$\boxed{I_\perp=A_1^2\sin^2 2\theta\sin^2\frac{\Delta\varphi}{2}]}$$

$\theta=45°$

出射光强：$\boxed{I_\perp=A_1^2\sin^2\frac{\Delta\varphi}{2}]}$



感生折射率差：$\boxed{n' - n'' = n_o^3 \gamma E}$



γ

实验装置二：横向电光效应

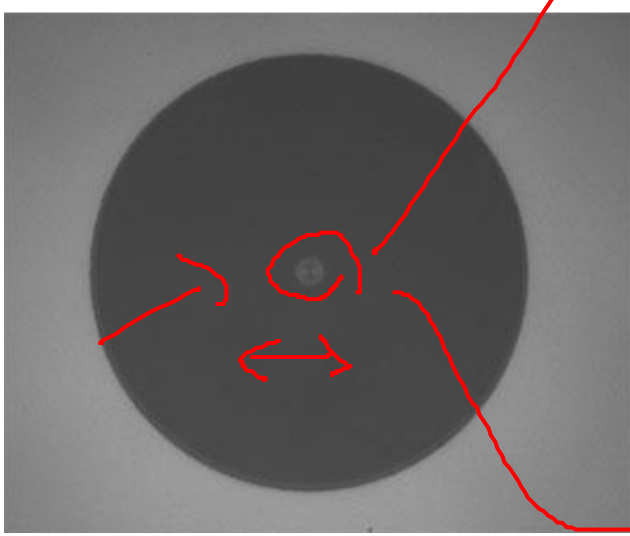
（垂直光的传播方向）

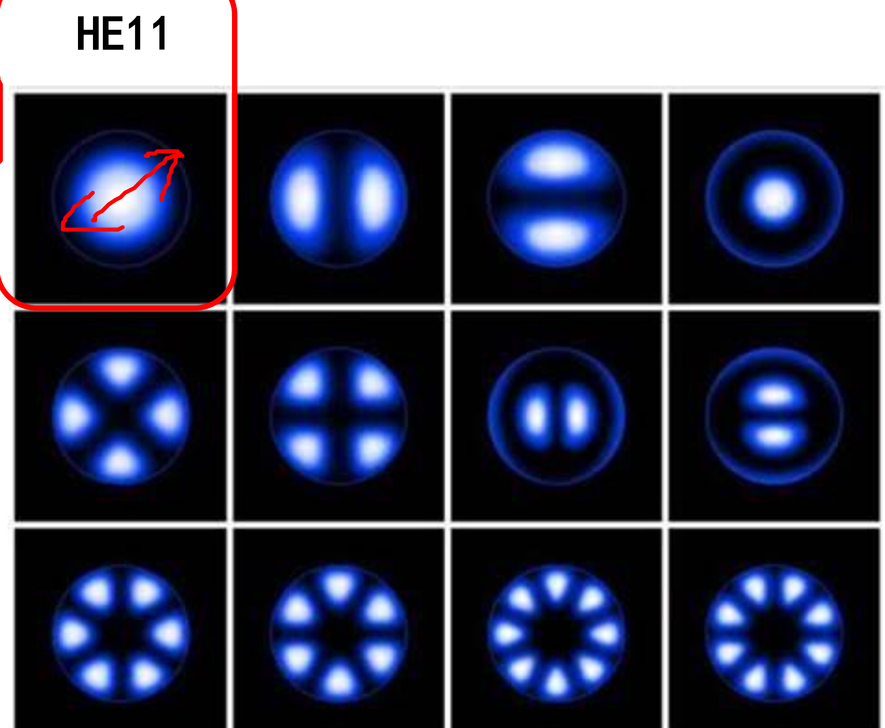
出射光强： $$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} = I_0 \sin^2\left(\frac{\pi}{\lambda} n_o^3 \gamma' \frac{l}{h} V \right)$$

γ'

2、克尔效应（Kerr effect）二阶电光效应 P233-234

单模光纤横截面



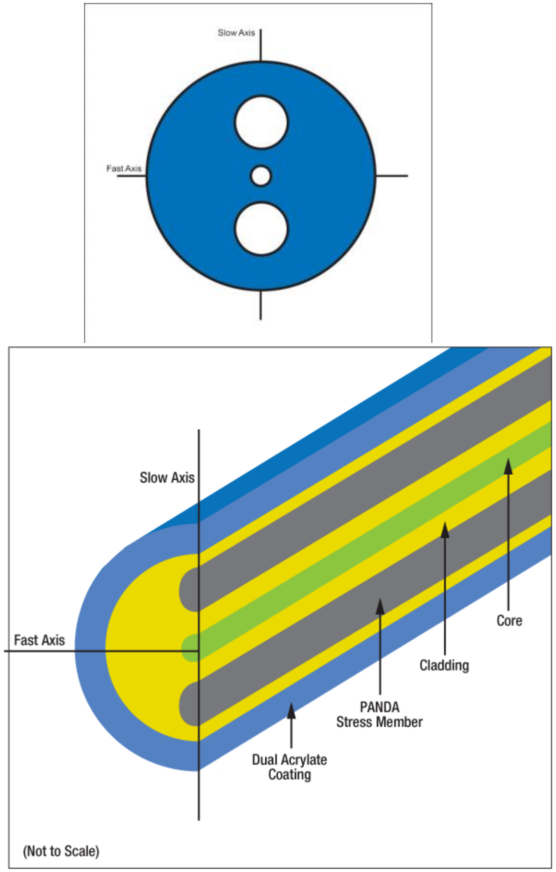


保偏光纤跳线，FC/APC接头

- Polarization-Maintaining Fiber with FC/APC Connectors on Both Ends
- Available in Wavelength Ranges between 350 - 2200 nm
- Custom Connector and Length Options Available

产生双折射现象的原因主要是无法满足折射率绝对圆对称的条件。
这通常是由光纤的截面不是理想的圆(几何双折射)或者光纤内部不平衡压力(应力双折射)造成的。这时，HE11模在不同的偏振方向将具有不同的传播速度。因此，HE11模的两种相互垂直的偏振模式将不再以同一速度传播。双折射现象在常规光纤中还不太明显，但是在保偏光纤(为了保持光线的偏振状态)中就很明显了。由于两种偏振具有不同的传播特性，偏振状态才得以保留。这样就有效地防止了两种偏振模式在传播过程中的能量耦合。
在制造保偏光纤的过程中我们故意使光纤呈现出不对称性。比如椭圆纤芯光纤(长轴和短轴上的等效折射率不同)和包含不对称压力产生部件的光纤。蝴蝶结领结形状的阴影区掺入了大量的杂质元素(如硼)。由于掺入元素的热膨胀系数和包层硅的热膨胀系数大不一样，将在纤芯上产生一个非对称的压力。
这样使得单模光纤的两个垂直偏振状态之间无法耦合，从而产生了应力双折射。

保偏色散补偿光纤，熊猫型，1510 - 1620 nm



特性

•1550 nm下色散-100 ± 10 ps/(nm•km)

•1550 nm下色散斜率-0.34 ps/(nm^2•km)

•色散和色散斜率匹配标准的1550 nm PM光纤

•经过优化适合慢轴光传播

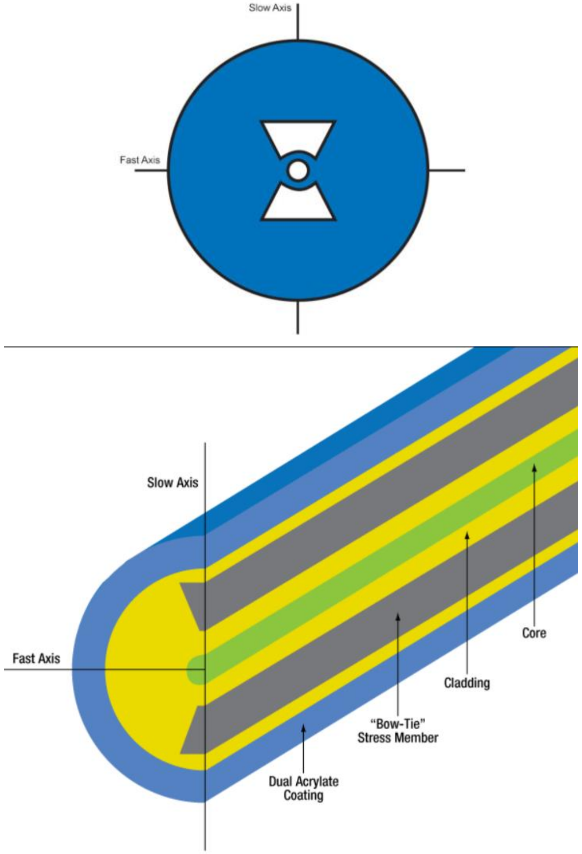
应用

•脉冲展宽或脉冲压缩光纤

•光学计时分配系统

•通信

保偏光纤，领结型，980 - 1550 nm



特性

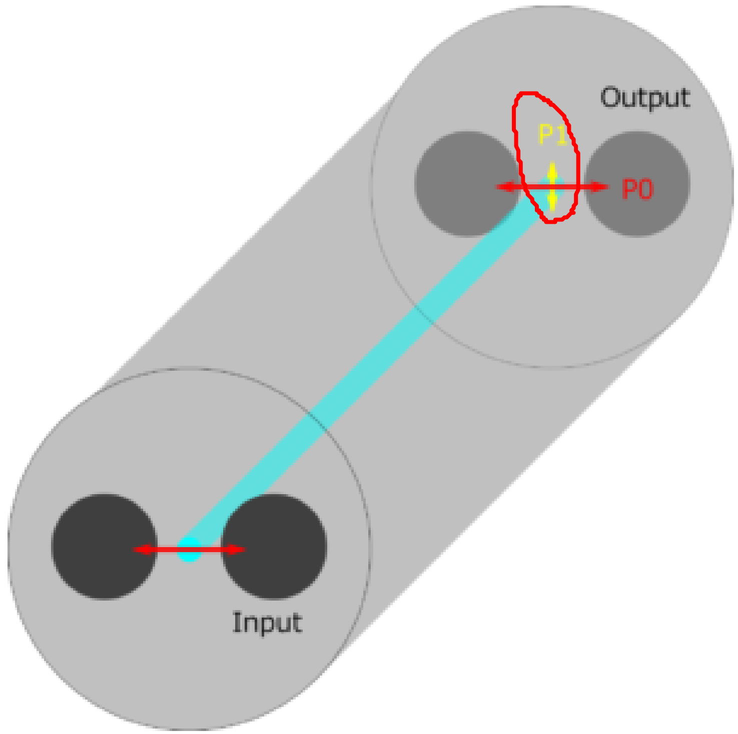
•波长范围从980至1500 nm

•领结式应力

应用

- 常用于传感器应用。
- EDFA激光器的偏振复用和激光尾纤。

串扰与消光比



消光比

Extinction ratio:

~ 20 dB

$\frac{1}{100}$ 1%

Schematic of polarization crosstalk measurement.

保偏光纤偏振合束/分束器

光纤偏振光束合束器(PBC)或偏振光束分束器(PBS)用于将两束正交偏振光耦合入一根光纤中，或将一根光纤中含有的正交线偏振光分别耦合到两个保偏光纤中，且偏振方向平行于保偏光纤的慢轴。双纤端(Port1 和 Port2)为保偏光纤； 单纤端(Port 3) 为普通单模光纤,也可为保偏光纤

特性

高消光比

低插入损耗

高稳定性

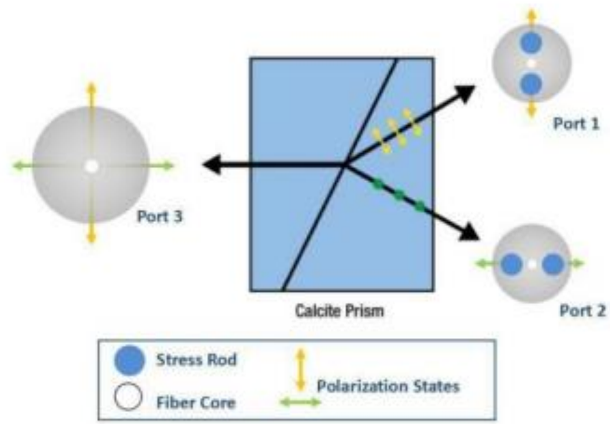
应用

偏振复用/解复用器

高功率 EDFA

光纤传感

光传输



方解石

➢第3章 小结：

§ 3.1 自然光与偏振光（了解）
§ 3.2 线偏振光与部分偏振光（了解）
§ 3.3 光通过单轴晶体时的双折射现象（掌握）
§ 3.4 光在晶体中的波面（掌握）
§ 3.5 光在晶体中的传播方向（掌握）
§ 3.6 偏振器件（掌握）
§ 3.7 椭圆偏振光和圆偏振光（掌握）
§ 3.8 偏振态的实验检验（掌握）
§ 3.9 偏振光的干涉（掌握）
§ 3.10旋光效应和磁光效应（了解）

第3章作业(P267)

5-13, 5-15, 5-16, 5-17, 5-18, 5-25, 5-26, 5-27