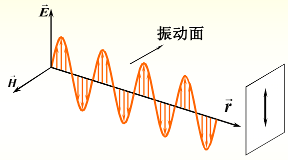
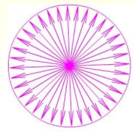
# 第19章 光的偏振

单个分子一次发光的波列。

大量分子同时发光时的情形。




线偏振光




自 然 光

为研究光的横波性，需把不同振动面的光分出来。

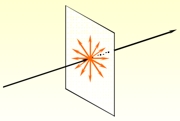
**光的偏振**

- *1*、光的偏振状态
- 线偏振光的获得
  - *2*、马 吕 斯 定 律
  - *3*、布儒斯特定律
  - *4*、双 折 射
- 波 片
  - 椭圆偏振光的获得
  - *5*、偏振态的检验
  - *6*、偏振光的干涉

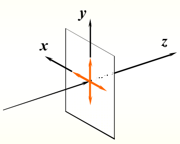
## *§ 19.1* 自然光和偏振光

### *1*、自然光：

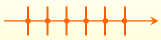
每一分子（原子）发光是随机的、无规律的。①振动面取各方向的几率相等，②各波列间无固定的相位关系。



自然光等效看作两个相互垂直的光振动。①两个光振动具有相等的振幅（强度），②两个光振动无固定相位关系。



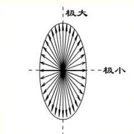

“ | ”：平行振动分量（*p* 分量）

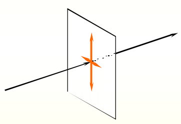


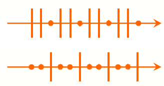
“ • ”：垂直振动分量（*S* 分量）

### *2*、部分偏振光：

光矢量在某一方向的振动强于垂直于该方向的振动。

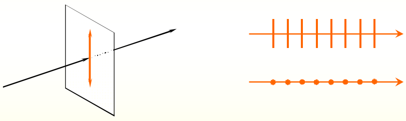




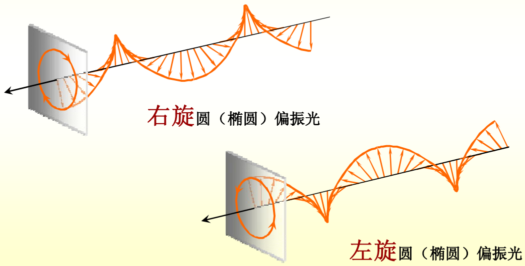
## 3、线偏振光（平面偏振光、完全偏振光）：

光矢量的振动方向始终在一个平面内。

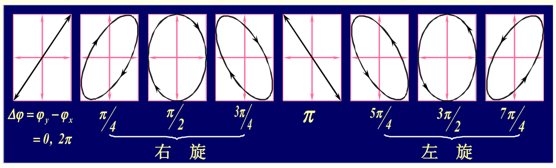


## 4、圆偏振光和椭圆偏振光：

若光矢量 $E$ 随时间匀速旋转，其端点在垂直于传播方向的平面上的轨迹为圆，则称为圆偏振光；如果轨迹为椭圆，则称为椭圆偏振光。



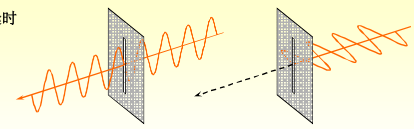

圆（椭圆）偏振光可看成两个同频率、振动方向相互垂直、有固定相位差的线偏振光的合成。



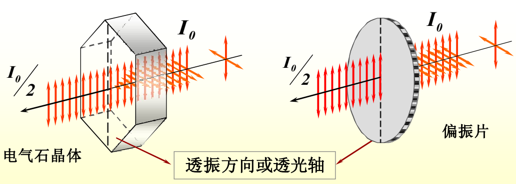

圆偏振和自然光、椭圆偏振光和部分偏振光的区别在于：圆偏振光和椭圆偏振光相互垂直的两线偏振光是相位相关的。

# § 19.2 偏振片、马吕斯定律

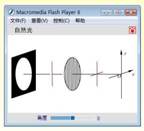
例：绳波通过窄缝时的情形。



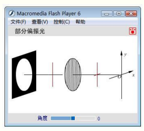
某些物质对不同方向的光振动有不同的吸收率（称为二向色性），可用来制成偏振片把自然光变为线偏振光。



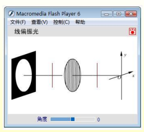

自然光通过偏振片：



部分偏振光通过偏振片：

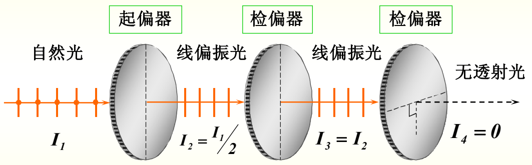


线偏振光通过偏振片：



## 偏振片的应用：

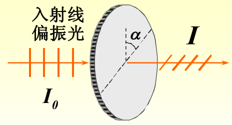
将自然光变为线偏振光称为起偏。自然光通过起偏器后，透射的线偏振光光强为入射光强的一半。



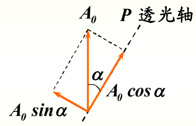

偏振片用于判断入射光偏振状态时称为检偏。线偏振光通过检偏器后，透射的线偏振光光强由马吕斯定律计算。

## 马吕斯定律：

透射线偏振光光强 $I$ 和入射线偏振光光强 $I_0$ 之比为：



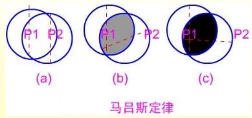

$$\frac{I}{I_0} = \frac{(A_0 \cos\alpha)^2}{A_0^2} = \cos^2\alpha$$




所以： $\boxed{I = I_0 \cos^2\alpha}$

当 $\alpha = 0, \pi$ 时， $I = I_0$

当 $\alpha = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}$ 时， $I = 0$

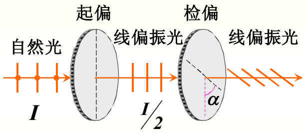



---

**例19-2：** 起偏器、检偏器的透光轴夹角 $\alpha_1=30°$ 时观测一束单色自然光，$\alpha_2=60°$ 时观测另一束自然光，得两次透射光光强相等。求两束单色自然光的光强之比。

解：

设入射自然光光强分别为：$I_1$、$I_2$，通过检偏器后的光强分别为 $I'_1$、$I'_2$ 则：




$$I_1' = \frac{I_1}{2}\cos^2\alpha_1 \qquad I_2' = \frac{I_2}{2}\cos^2\alpha_2$$

$$\therefore \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{\cos^2\alpha_2}{\cos^2\alpha_1} = \frac{\cos^2 60^\circ}{\cos^2 30^\circ} = \frac{1}{3}$$

---

**习题19-8：** 一光束由线偏振光和自然光组合而成，当它通过一偏振片时，透射光的强度随偏振片的取向可以变化5倍，求入射光束中这两个成分的相对强度。

解： 入射总光强为：$I = I_{线} + I_{自}$

通过检偏器后的最小光强为： $I_{min} = \frac{1}{2} I_{自}$

通过检偏器后的最大光强为： $I_{max} = \frac{1}{2} I_{自} + I_{线}$

由题意： $\frac{I_{min}}{I_{max}} = \frac{\frac{1}{2}I_{自}}{\frac{1}{2}I_{自} + I_{线}} = \frac{1}{5}$ 解得： $I_{线} = 2I_{自}$

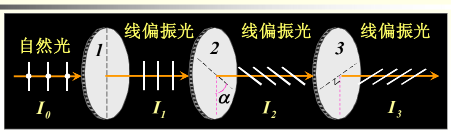
$$\therefore \quad I_{线} = \frac{2}{3}I, \quad I_{自} = \frac{1}{3}I$$

---

**习题19-13：** 透光轴相互垂直的两偏振片之间插入另一块偏振片，求当透射光强为入射自然光光强的⅛时，插入的一块偏振片与第一块偏振片透光轴之间的夹角。

解：

设 1、2 两偏振片透光轴夹角为 $\alpha$，则：




$$I_1 = \frac{1}{2} I_0 \qquad I_2 = I_1 \cos^2\alpha = \frac{I_0}{2}\cos^2\alpha$$

$$I_3 = I_2 \cos^2\left(\frac{\pi}{2} - \alpha\right) = \frac{I_0}{2}\cos^2\alpha \cdot \sin^2\alpha = \frac{1}{8} I_0 \sin^2 2\alpha$$

当 $\alpha = 45^\circ$ 时： $I_3 = \frac{1}{8} I_0$

可见：利用偏振片的组合可以改变线偏振光的偏振化方向。

---

**习题19-12：** 使用若干个偏振片，使一束线偏振光的振动面转过 $90°$。为了使总的光强损失小于 $5\%$，问至少需要多少块偏振片？

$$\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \ldots$$

$$\ln(1-x) = -x - \frac{x^2}{2} - \frac{x^3}{3} - \ldots$$

解： 设共需要 $n$ 块偏振片，则：

$$I_1 = I_0 \cos^2\frac{\pi}{2n}, \quad I_2 = I_1 \cos^2\frac{\pi}{2n} = I_0 \cos^4\frac{\pi}{2n}, \ldots, \quad I_n = I_0 \cos^{2n}\frac{\pi}{2n},$$

由题意： $\frac{I_n}{I_0} = \cos^{2n}\frac{\pi}{2n} \ge 0.95$ 两边取对数： $2n \ln\cos\frac{\pi}{2n} \ge \ln 0.95$

$$\because \quad 2n\ln\cos\frac{\pi}{2n} = 2n\ln\left[1 - \frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2n}\right)^2\right] = 2n\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\pi}{2n}\right)^2\right] = -\frac{1}{n}\left(\frac{\pi}{2}\right)^2$$

$-\frac{1}{n}\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \ge \ln 0.95$ 解得： $n \ge 48$

## § 19.3 反射光和折射光的偏振、布儒斯特定律

平行振动（$p$分量）：振动方向在入射面内；

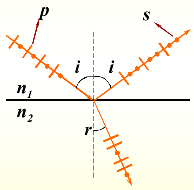
垂直振动（$s$分量）：振动方向垂直于入射面；

实验表明：

(1) 一般情况下，反射光、折射光均为部分偏振光；

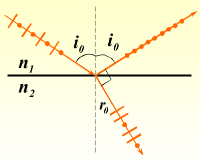
(2) 反射光中垂直振动多于平行振动，而折射光中平行振动多于垂直振动；

(3) 入射角$i$变化时，反射光、折射光的偏振化程度也随之变化。




**布儒斯特定律**（1812年）：

当入射角为某一定值$i_0$时，反射光为完全偏振光（只有$s$分量），而折射光仍为部分偏振光。此时，反射光线和折射光线的夹角为90°。




$\boxed{i_0 + r_0 = 90^\circ}$　　$i_0$称为**起偏振角**或**布儒斯特角**

由斯乃尔定律：$n_1 \sin i_0 = n_2 \sin r_0 = n_2 \sin(90^\circ - i_0) = n_2 \cos i_0$

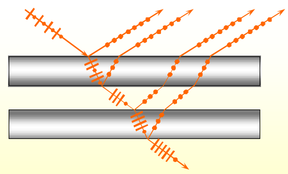
所以：$\boxed{\tan i_0 = \frac{n_2}{n_1}}$　　称为**布儒斯特定律**

例：$n_1$=1.0（空气），$n_2$=1.52（玻璃），则 $i_0 = \arctan 1.52/1.0 = 56.66^\circ$

由光的可逆性原理：光从介质2射向介质1时起偏振角为 $90^\circ - 56.66^\circ = 33.34^\circ$

当入射角为布儒斯特角时，反射光虽为线偏振光，但强度较弱；折射光虽强，但只是部分偏振光。

若使用玻璃片堆：
- (1) 可加强反射线偏振光的强度；
- (2) 可提高透射光的偏振化程度。

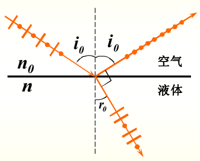


**习题19-16：** 一束光由空气入射到折射率$n$=1.40的液体上，反射光是完全偏振光，问此光束的折射角为多少？

解：　由布儒斯特定律：

$$\tan i_0 = 1.40$$

求得：$i_0 = 54.46^o$




当入射角为布儒斯特角时：

$$i_0 + r_0 = 90^o$$

$$\therefore\ r_0 = 90^o - i_0 = 90^o - 54.46^o = 35.54^o$$

## § 19.4 光 的 双 折 射

## 1、双折射现象：

一束光进入各向同性的介质（如液体、塑料、玻璃等无定形物体和立方系结晶体）时，只产生一束折射光。

但一束光进入各向异性晶体（如云母、石英等）时，可产生两束折射光，称为双折射现象。

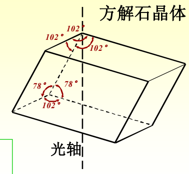
*o*光（寻常光）： 折射光在入射面内，服从折射定律；

*e*光（非常光）： 折射光一般不在入射面内，不服从折射定律。

即 $\sin i / \sin r$ 不是常数，因而光速也不是常数。

检偏结果：*o*光、*e*光都是线偏振光。

## 关于双折射晶体的几个基本概念：




➢ 光轴（方向）：

光沿该方向传播时不发生双折射。

| 单轴晶体 | 双轴晶体 |
|---|---|
| （方解石、石英、红宝石） | （云母、硫磺、蓝宝石） |

➢ 晶体的主截面：

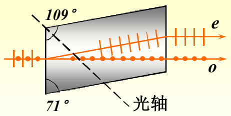
由任一光轴与晶体解理面法线决定的平面；

➢ 光线的主平面：

晶体内任一光线与光轴决定的平面。

*o*光振动方向垂直于其主平面，

*e*光振动方向在其主平面内。




一般，*o*光、*e*光主平面不重合。

方解石（$C_aCO_3$）的主截面

但当入射面为主截面时，*o*光、*e*光的主平面也都在主截面内，此时*o*光、*e*光的振动方向互相垂直。

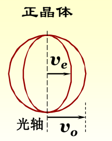
## 2、单轴晶体中的波面：

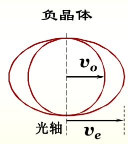
*o*光的波面（*o*波面）为球面；

*e*光的波面（*e*波面）为旋转椭球面。

在光轴方向：两波面相切；

垂直于光轴方向：两波光速相差最大。



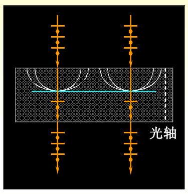

*o*光的折射率： $n_o = \dfrac{c}{v_o} =$ 常数

*e*光主折射率： $n_e = \dfrac{c}{v_e}$  $v_e$为*e*光垂直于光轴的波速。

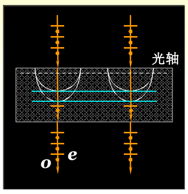
正晶体：$v_o > v_e$，$n_o < n_e$（如石英、冰等）

负晶体：$v_o < v_e$，$n_o > n_e$（如方解石、电气石等）

## 3、用惠更斯作图法描述光在晶体中的传播：

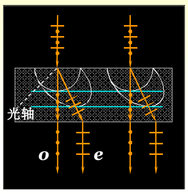



光沿光轴方向垂直入射，无双折射现象。

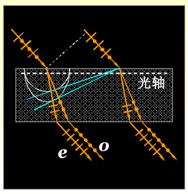



光垂直于光轴方向入射。*o*光、*e*光重合但波速不同，折射率不同、有相位差。有双折射现象。

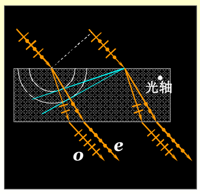
（波片按此情况制作）




光垂直入射，但光轴不与晶体表面垂直或平行。*o*光、*e*光分开且*o*光、*e*光振动方向相互垂直。有双折射现象。




光斜入射，光轴与晶体表面平行。*o*光、*e*光分开，但*e*光传播方向与*e*波面不垂直。有双折射现象。




光斜入射，光轴与晶体表面平行。*o*光、*e*光分开，*e*光传播方向与*e*波面垂直。有双折射现象。此时*e*光折射角由*e*光主折射率决定：

$$n_e = \sin i / \sin r_e$$

**习题 19-24：** 自然光以 $i=45°$ 角斜射于方解石波片上，波片厚度 $t=1.0\ cm$，晶体的光轴垂直于图面。问：⑴两条折射光线中，哪一条是 $o$光，哪一条是 $e$ 光？⑵两条光线的偏振态如何？⑶求两条出射光线间的垂直距离。

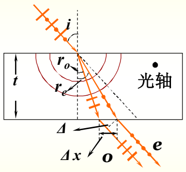
解： ⑴、⑵ 如图所示。

⑶ $o$光和$e$光的折射角为：

$$r_o=\arcsin(\frac{\sin i}{n_o})=25.24^o$$

$$r_e=\arcsin(\frac{\sin i}{n_e})=28.41^o$$

$$\therefore\ \Delta x=t\ (\tan r_e-\tan r_o)=0.07cm$$




$n_o$=1.658, $n_e$=1.486

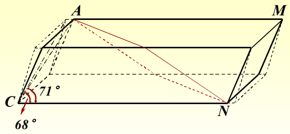
所以两出射光线间的垂直距离为：

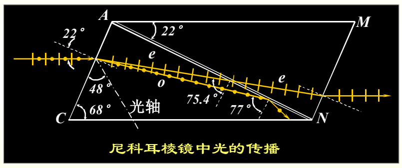
$$\Delta=\Delta x\cos i=0.049cm=0.49mm$$

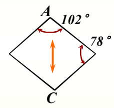
## 4、偏振棱镜:

⑴ 尼科耳棱镜：

尼科耳棱镜由两块经特殊加工的方解石棱镜用特种树胶粘合而成。



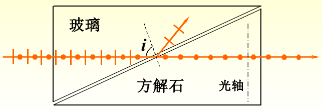

树胶折射率：$n$=1.55
o光折射率：$n_o$=1.658
e光折射率：$n_e$=1.486

o光入射到树胶层的入射角大于全反射角（69.2°），被涂黑的CN层吸收；而e光折射率小于树胶，不发生全反射，经MN面出射而得到偏振化程度高的完全偏振光。

⑵ 格兰—汤姆逊棱镜：

由一块高折射率玻璃棱镜和一块方解石棱镜胶合而成。

玻璃折射率： $n$=1.655
胶合剂折射率：$n$=1.655
方解石折射率： $n_o$=1.658
$n_e$=1.486




入射自然光到达胶合剂—方解石分界面时，其垂直分量（$s$分量）在方解石中为 $o$ 光。∵ $n\approx n_0$，∴ $s$ 分量可以进入方解石，出射后成为线偏振光。

而自然光中平行分量（$p$分量）在方解石中为 $e$ 光。∵ $n>n_e$，∴当入射角大于全反射临界角时，$e$光全反射，不能进入方解石。

格兰—汤姆逊棱镜对水平线上下 10° 以内的入射光适用。

⑶ 渥拉斯顿棱镜：

由两块等腰直角方解石棱镜胶合而成。可获得两束分得很开的线偏振光。

棱镜 1 的光轴平行于 $AB$ 面；棱镜 2 的光轴垂直于图面。

棱镜 1 中的 e 光进入棱镜 2 后成为 o光。

$$n_e\sin 45^o=n_o\sin r_0$$

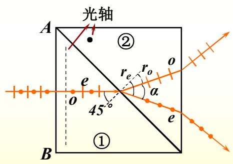
$$r_0=\arcsin(\frac{n_e}{n_o}\sin 45^o)=39.32^o$$

棱镜 1 中的 o光进入棱镜 2 后成为 e光。

$$n_o\sin 45^o=n_e\sin r_e$$

$$r_e=\arcsin(\frac{n_o}{n_e}\sin 45^o)=52.07^o$$

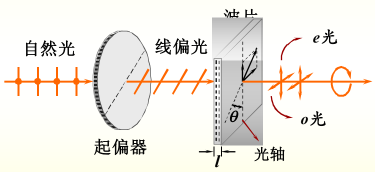
$$\therefore\ \alpha=r_e-r_o=12.75^o$$

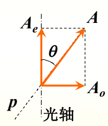



# §19.5 波片、偏振态的检验

**波片：** 由单轴晶体（方解石）制成的光轴平行于晶体表面的薄片。

**作用：** ⑴ 使 $o$ 光和 $e$ 光之间产生一定的相位差，从而产生圆偏振光和椭圆偏振光；⑵ 用于检验光的偏振状态。




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

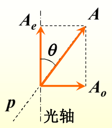
o 光、e 光的光程差：$\Delta L=(n_o-n_e)\ l$

o 光、e 光的相位差：$\Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}(n_o-n_e)\ l$

## 1、 四分之一波片（λ/4波片）:

$$\Delta L=(n_o-n_e)\,l=\frac{\lambda}{4} \quad 或 \quad \Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}(n_o-n_e)\,l=\frac{\pi}{2}$$

最小厚度: $l=\dfrac{\lambda}{4(n_o-n_e)}$

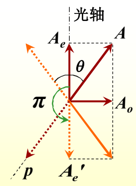



| $\Delta\varphi=\varphi_e-\varphi_o$ | $\theta$ | 透射光的偏振状态 |
|---|---|---|
| $\pi/2$ | 0 | 只有e光——线偏振光 |
| | $\pi/2$ | 只有o光——线偏振光 |
| | $\pi/4$ | 圆偏振光（左旋） |
| | 其他 | 椭圆偏振光（左旋） |

## 2、 二分之一波片（λ/2波片）:

$$\Delta L=(n_o-n_e)\,l=\frac{\lambda}{2} \quad 或 \quad \Delta\varphi=\frac{2\pi}{\lambda}(n_o-n_e)\,l=\pi$$

最小厚度: $l=\dfrac{\lambda}{2(n_o-n_e)}$




入射线偏振光刚进入波片时，成为相位相同的o光和e光。

o光和e光刚从波片中出射时，设$A_0$不动，$A_e$反相（相位变化π）。此时出射光仍为线偏振光，但振动方向从一、二象限转到二、四象限。振动面转过$2\theta$角。

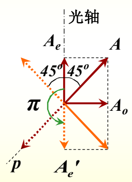
**习题19-29:** 假设石英晶体的$n_o$、$n_e$与波长无关，某石英晶体波片对波长$\lambda_1=800\,nm$（真空中）的光是λ/4波片。若一波长为$\lambda_2=400\,nm$（真空中）的线偏振光入射到该晶片上且振动方向与光轴成45°角，问透射光的偏振状态如何？

解: 波片对$\lambda_1$的光是λ/4波片，即:

$$(n_e-n_o)\,d=\frac{\lambda_1}{4}$$

根据题意该波片对$\lambda_2$的光是λ/2波片，即:

$$(n_e-n_o)\,d=\frac{\lambda_2}{2}$$




所以透射光仍为线偏振光，但振动面转过π/2 角（90°角）。

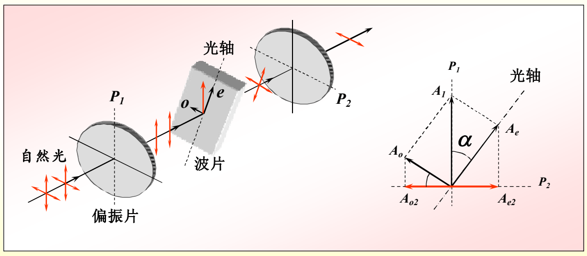
## 3、 偏振光的检验:

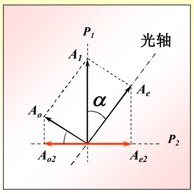
单用偏振片无法区分自然光和圆偏振光；部分偏振光和椭圆偏振光。但使入射光先通过λ/4波片，再用偏振片检验，则可加以区分。

| 入射光 | 四分之一波片光轴位置 | 出射光 |
|---|---|---|
| 线偏振光 | 振动面与λ/4波片光轴一致或垂直 | 线偏振光（e光或o光） |
| | 振动面与λ/4波片光轴成π/4角 | 圆偏振光 |
| | 其他位置 | 椭圆偏振光 |
| 圆偏振光 | 任何位置 | 线偏振光 |
| 椭圆偏振光 | 长轴与λ/4波片光轴一致或垂直 | 线偏振光 |
| | 其他位置 | 椭圆偏振光 |
| 部分偏振光 | 任何位置 | 部分偏振光 |
| 自然光 | 任何位置 | 自然光 |

# § 19.6 偏振光的干涉

线偏振光通过波片后产生的o光和e光相互垂直，因此不会发生干涉。但波片后再放一块偏振片，则出射光成为两束同频率、同振动方向、相位差恒定的相干线偏振光。






设波片等厚，两偏振片透振方向垂直。

经过偏振片$P_2$后，两束光的振幅：

$$A_{e2} = A_e \sin\alpha = A_1 \cos\alpha \cdot \sin\alpha$$
$$A_{o2} = A_o \cos\alpha = A_1 \sin\alpha \cdot \cos\alpha$$

$A_{o2}$、$A_{e2}$相等，与角$\alpha$无关。

相位差：$\Delta\varphi = \dfrac{2\pi}{\lambda}(n_o - n_e)\cdot l + \pi$

由$P_2$引起的附加光程差

由波片产生

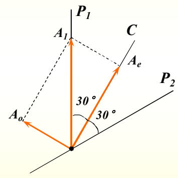
$$\begin{cases} \Delta\varphi = 2k\pi & \text{时：干涉加强，视场明亮；} \\ \Delta\varphi = (2k+1)\pi & \text{时：干涉相消，视场变暗。} \end{cases}$$

波片不等厚时，有干涉条纹产生。

若以白光入射，视场随波片厚度不同而出现不同色彩，称为色偏振。

**习题19-34：** 两偏振片透光轴夹角为$60°$，中间插一块水晶$\lambda/4$波片，其光轴平分上述角度。入射光是光强为$I_0$的自然光。⑴通过$\lambda/4$波片后光的偏振状态如何？⑵求通过第二块偏振片后的光强。

解：⑴ 设通过$P_1$后线偏振光的光强为$I_1$，则通过$\lambda/4$波片后：

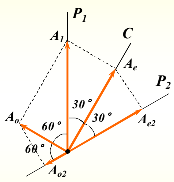



$$A_o = A_1 \sin 30^o$$
$$A_e = A_1 \cos 30^o$$

$A_o \neq A_e$，$o$光$e$光相位差为$\pi/2$ → 椭圆偏振光

**习题19-34：** 两偏振片透光轴夹角为$60°$，中间插一块水晶$\lambda/4$波片，其光轴平分上述角度。入射光是光强为$I_0$的自然光。⑴通过$\lambda/4$波片后光的偏振状态如何？⑵求通过第二块偏振片后的光强。

⑵ 通过$P_2$后两相干偏振光的振幅和相位差为：




$$\begin{cases} A_{o2} = A_1 \sin 30^o \cos 60^o = \dfrac{1}{4}A_1 \\ A_{e2} = A_1 \cos 30^o \cos 30^o = \dfrac{3}{4}A_1 \\ \Delta\varphi = \dfrac{\pi}{2} + \pi = \dfrac{3}{2}\pi \end{cases}$$

$$\Rightarrow \begin{cases} A_2 = \sqrt{A_{o2}^2 + A_{e2}^2} = \dfrac{\sqrt{10}}{4}A_1 \\ I_2 = A_2^2 = \dfrac{10}{16}I_1 = \dfrac{5}{16}I_0 \end{cases}$$