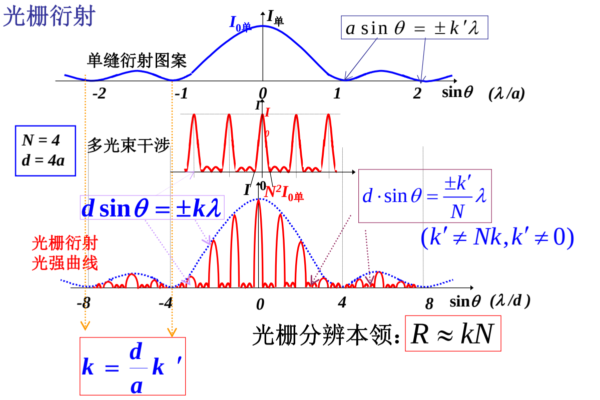
光栅衍射



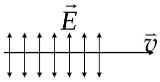
第24章 光的偏振

§24.1 光的偏振状态

光波：特定频率范围内的电磁波。

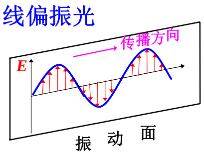
光矢量：电磁波的电场强度 $\vec{E}$矢量。

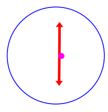
偏振性：作为横波，光矢量振动方向与光传播方向垂直。



偏振态：在垂直光传播方向的平面内光矢量有不同的振动状态。

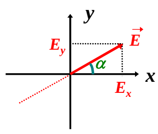
一、线偏振光





面对光的传播方向看

线偏振光可沿两个相互垂直的方向分解



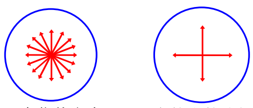
$$\boxed{\vec{E} = E_x\vec{i} + E_y\vec{j}}$$

$$E_x = E\cos\alpha$$
$$E_y = E\sin\alpha$$

线偏振光的表示法：

光振动垂直板面　　光振动平行板面

二、自然光

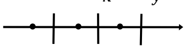


没有优势方向　　自然光的分解

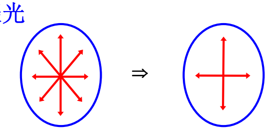
一束自然光可分解为两束振动方向相互垂直的、等幅的、不相干的线偏振光

$$\overline{E}_x = \overline{E}_y \qquad I = I_x + I_y$$

自然光的表示法：



三、部分偏振光



部分偏振光　　部分偏振光的分解

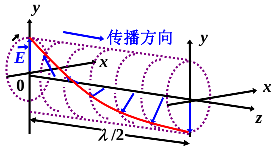
部分偏振光可分解为两束振动方向相互垂直的、不等幅的、不相干的线偏振光

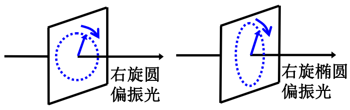
部分偏振光的表示法：

平行板面的光振动较强　　垂直板面的光振动较强

四、圆偏振光、椭圆偏振光

某时刻右旋圆偏振光$\vec{E}$随z的变化





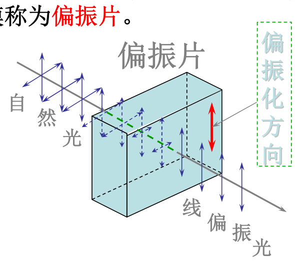
可以看成是两个相互垂直而有一定相差的线偏振光的合成

§ 24.2 线偏振光的获得与检验

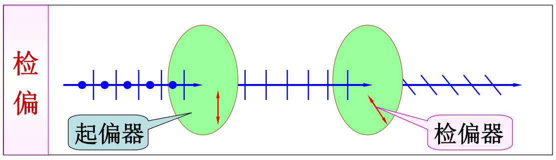
有些薄膜材料能吸收某一方向的光振动，而只让与这个方向垂直的光振动通过，这个垂直方向称为偏振化方向。这些薄膜称为偏振片。

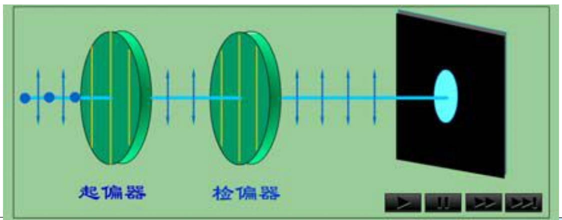
自然光通过偏振片后变为线偏振光，称为起偏

偏振片又可用来检验光线的偏振化程度，称为检偏



偏振片的用途：“起偏”和“检偏”

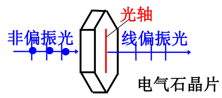


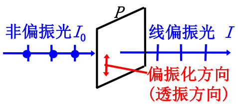


一、起偏

- 起偏：从自然光获得偏振光
- 起偏器：　起偏的光学器件
- 起偏的原理：利用某种光学的不对称性
- 偏振片

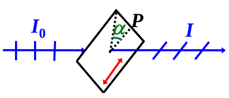
微晶型

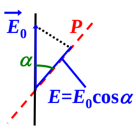




$$I=\frac{1}{2}I_0$$

二、马吕斯定律





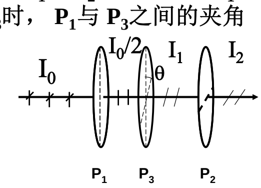
$I_0 \propto E_0^2$，$I \propto E^2 = E_0^2\cos^2\alpha$

$I = I_0\cos^2\alpha$ ——马吕斯定律

$\alpha=0$，$I=I_{\max}=I_0$　　$\alpha=\dfrac{\pi}{2}$，$I=0$ ——消光

此定律只适用于没有光吸收的理想偏振片

例1、光强为I_0的自然光先后通过两平行放置、偏振方向相互垂直的偏振片P_1、P_2后出射，当P_1 P_2间放入第三块偏振片P_3时，P_1与P_3之间的夹角如图所示，求出射光强。



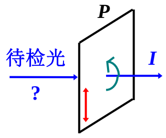
解：　马吕斯定律：

$$I=I_0\cos^2\alpha$$

$$I_1=\frac{I_0}{2}\cos^2\theta$$

$$I_2=I_1\cos^2(\frac{\pi}{2}-\theta)=\frac{1}{2}I_0\cos^2\theta\sin^2\theta=\frac{1}{8}I_0\sin^2 2\theta$$

三、检偏　用偏振器件分析、检验光的偏振态



- I不变→？是什么光　可能是自然光 或圆偏振光
- I变，有消光→？是什么光　肯定是线偏振光
- I变，无消光→？是什么光　可能是部分偏振光 或椭圆偏振光

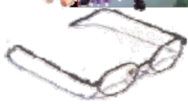
四、偏振片的应用

3. 液晶屏幕

2.太阳镜

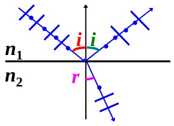
1. 汽车车窗和车灯与水平方向成 45° 角，而且向同一方向倾斜的偏振片

4. 立体电影

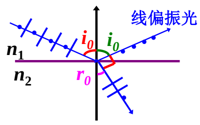


§ 24.3　反射和折射时光的偏振

一、反射和折射时光的偏振



自然光反射和折射后产生部分偏振光



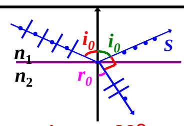
起偏振角

$i = i_0$ 时，反射光只有垂直分量

i_0 — 布儒斯特角或 起偏振角 $i_0 + r_0 = 90^\circ$

由 $n_1 \sin i_0 = n_2 \sin r_0 = n_2 \cos i_0$

有 $\boxed{\mathrm{tg}\, i_0 = \dfrac{n_2}{n_1} = n_{21}}$ —布儒斯特定律



$i_0 + r_0 = 90^\circ$

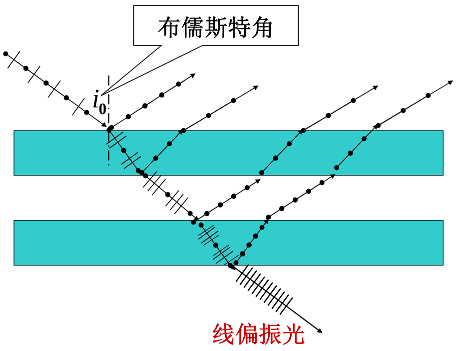
若 n_1 =1.00 (空气)，n_2 =1.50 (玻璃)，则：

空气→玻璃

$$i_0 = \mathrm{tg}^{-1}\frac{1.50}{1.00} = 56°18'$$

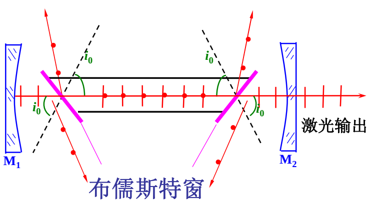
$$\frac{I'}{I_{总}} \approx 7\%$$

二、玻璃片堆



应用举例

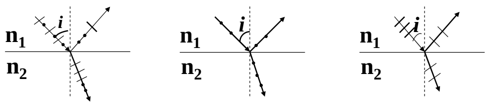
激光器谐振腔



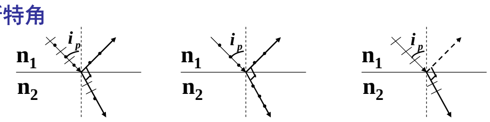
外腔式激光器谐振腔

例2、画出下列反射光和透射光的偏振化方向

任意角



布儒斯特角



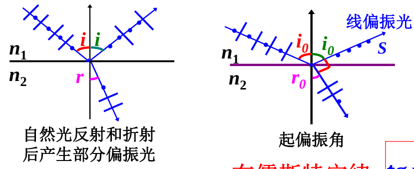
上节课主要内容

一、布拉格公式 $2d\cdot\sin\Phi = k\lambda \quad (k = 1,2,\cdots)$

二、线偏振光的获得与检验

马吕斯定律 $\boxed{I = I_0\cos^2\alpha}$

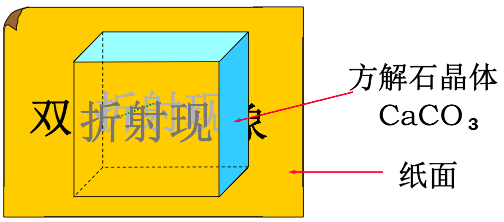
三、反射和折射时光的偏振



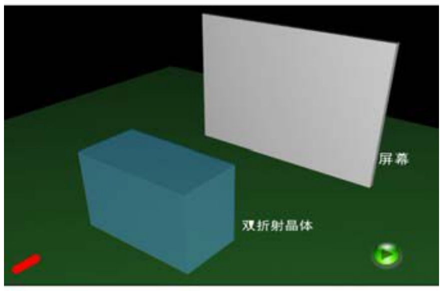
布儒斯特定律 $\boxed{\mathrm{tg}\, i_0 = \dfrac{n_2}{n_1} = n_{21}}$

§24.5 双折射现象

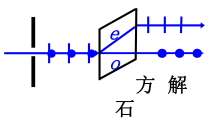
双折射的现象

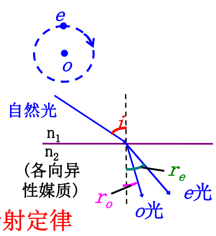


光通过双折射晶体



一、寻常光和非寻常光





*o*光（寻常光）：遵从折射定律

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

*e*光（非寻常光）：一般不遵从折射定律

$$\frac{\sin i}{\sin r_e} \neq const$$

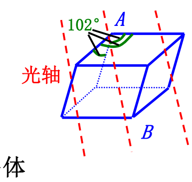
折射率和入射光线的方向有关

也可写成 $n_1 \sin i = n' \sin r_e$ *e*光折射线不一定在入射面内

二、晶体的光轴　主平面

当光在晶体内沿某个特殊方向传播时不发生双折射，该方向称为晶体的光轴。

例如，方解石晶体(冰洲石)



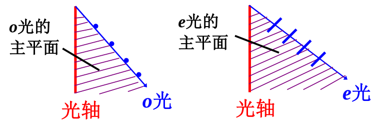
- 光轴是一特殊的方向，凡平行于此方向的直线均为光轴

单轴晶体：只有一个光轴的晶体

双轴晶体：有两个光轴的晶体

主平面

主平面：晶体中光的传播方向与晶体光轴构成的平面



o光振动方向与其主平面垂直，
e光振动方向在其主平面内

主截面：晶体表面的法线与晶体光轴构成的平面

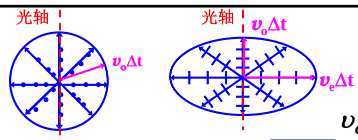
三、晶体的主折射率，正晶体、负晶体

寻常光线在晶体中各个方向上的折射率以及传播速度都相同

非常光线在晶体内各个方向上的折射率不等，因而非常光线在晶体内的传播速度随方向的不同而改变

---

o光: $n_o = \dfrac{c}{\upsilon_o}$

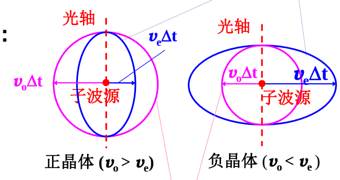


e光: $\upsilon_o \to n_o$，$\upsilon_e \to n_e = \dfrac{c}{\upsilon_e}$

n_o，n_e称为晶体的主折射率

e波面

正晶体：$n_e > n_o$ $(\upsilon_e < \upsilon_o)$



负晶体：$n_e < n_o$ $(\upsilon_e > \upsilon_o)$

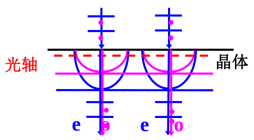
O波面

v_e, n_e垂直光轴方向

四、单轴晶体中光传播的惠更斯作图法($\upsilon_e > \upsilon_o$)

以负晶体为例：

1. 光轴平行晶体表面，自然光垂直入射



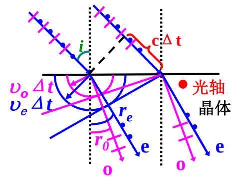
o，*e*在方向上虽没分开，但速度上是分开的

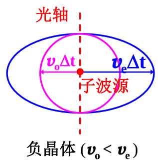
---

2. 光轴平行晶体表面，且垂直入射面，自然光斜入射

$$\frac{\sin i}{\sin r_o} = \frac{c}{\upsilon_o} = n_o$$

$$\frac{\sin i}{\sin r_e} = \frac{c}{\upsilon_e} = n_e$$

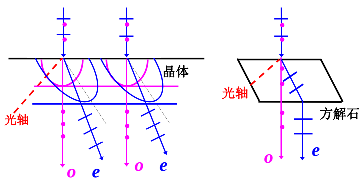




负晶体：$n_e < n_o$ $(\upsilon_e > \upsilon_o)$

---

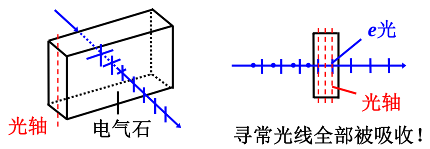
3. 光轴与晶体表面斜交，自然光垂直入射



此时*e*光的波面不再与其波射线垂直了

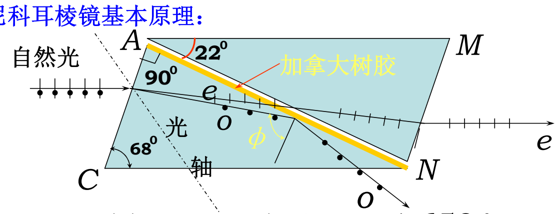
五、晶体的二向色性和偏振片

某些晶体对o光和e光的吸收有很大差异，这叫晶体的二向色性



可产生线偏振光

尼科耳棱镜基本原理：



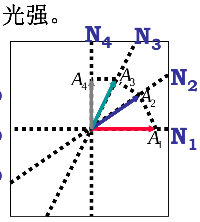
$n_{加}=1.55$　$n_e=1.516$　$n_o=1.6584$

$n_{加}<n_o$ 且 $\phi=77^\circ>$临界角，o 光发生全反射

因为 $n_{加}>n_e$ 所以 e 光不会发生全反射

—— 利用双折射现象，将一束自然光分成寻常光和非常光，再利用全反射原理把寻常光反射到棱镜侧壁上，只让非常光通过，从而获得一束振动方向固定的线偏振光

例：自然光通过四块偏振化方向彼此成30^0角的偏振片，入射光强为I_0，求：透过光的光强。



解：通过N_1的光强减半，$I_1=I_0/2$

通过N_2的光振幅为：$A_2=A_1\cos 30^0$

通过N_3的光振幅为：$A_3=A_2\cos 30^0$

通过N_4的光振幅为：$A_4=A_3\cos 30^0$

$A_4=A_1\cos^3 30^0$

光强为：$I=I_1\cos^6 30^0=(I_0/2)\cos^6 30^0=0.21I_0$

习题课　　　　干涉内容

一、光的相干条件

二、光程差与位相差的关系 $\Delta\varphi=\dfrac{2\pi}{\lambda}\delta$ 半波损失

三、杨氏双缝干涉 $\Delta x=\dfrac{D}{d}\lambda$;　$I=I_1+I_2+2\sqrt{I_1I_2}\cos\Delta\varphi$

四、两相干光干涉的一般条件

$\delta=\pm k\lambda$ 干涉相长　$\delta=\pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2}$ 干涉相消

五、薄膜干涉

$\delta_{等厚}=2ne+\left(\dfrac{\lambda}{2}\right)$　$\delta_{等倾}=2e\sqrt{n_2^2-n_1^2\sin^2 i}+(\dfrac{\lambda}{2})=\delta(i)$

- 迈克尔逊干涉仪

衍射、偏振内容

一、单缝衍射　$a\sin\phi=\pm k\lambda$　$k=1,2,3,\cdots$

二、光学仪器的分辨本领　$R\equiv\dfrac{1}{\delta\theta}=\dfrac{D}{1.22\lambda}$

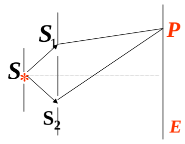
三、光栅方程、分辨本领

$d\sin\phi=\pm k_1\lambda$;　$R=\dfrac{\lambda}{\delta\lambda}=kN$

缺级条件 $k_1=\dfrac{d}{a}k_2$

四、马吕斯定律、布儒斯特定律、双折射

例1、　如图所示，在双缝干涉实验中$SS_1=SS_2$，S发出λ的光照射双缝。通过空气 后在屏幕 E 上形成干涉条纹。已知 P 点为第三级明条纹，则S_1、S_2 到 P 点的光程差为________；若将整个装置放在某种透明液体中，P点为第四级明条纹，则该液体的折射率为 n=________?

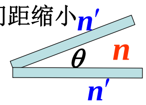


解：(1)　$\delta=\overline{S_1S_2}\cdot\sin\theta=3\lambda$

(2)　$\delta=n\cdot\overline{S_1S_2}\cdot\sin\theta=4\lambda$

$\therefore\ n=\dfrac{4\lambda}{S_1S_2\sin\theta}=\dfrac{4\lambda}{3\lambda}=\dfrac{4}{3}$

例2、 两块折射率为1.60的标准平面玻璃之间形成一个空气劈尖，用波长λ=6000Å的单色光垂直入射，产生等厚干涉条纹。假如要求在劈尖内充满*n*=1.40的液体时相邻明纹间距比是空气时的间距缩小ΔL=0.5mm，那么劈尖角 θ是多少？



解：空气劈尖：$L_1=\dfrac{\lambda}{2n\theta}=\dfrac{\lambda}{2\theta}$

液体劈尖：$L_2=\dfrac{\lambda}{2n\theta}$

$\therefore\ \Delta L=L_2-L_1=\dfrac{\lambda}{2\theta}\left(1-\dfrac{1}{n}\right)$

$\theta=\dfrac{\lambda}{2(L_2-L_1)}\left(1-\dfrac{1}{n}\right)$

$=\dfrac{600\times10^{-6}}{2\times0.5}\left(1-\dfrac{1}{1.40}\right)$

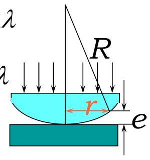
$=1.71\times10^{-4}rad$

例3、在牛顿环装置的平凸 透镜和平板玻璃间充以某种透明液体，观 察第10个明环的直径由充液前的 14.8cm变成充液后的 12.7cm，求这种液体的折射率 n.

解：(1)充液前（空气层）

$$r_k = \sqrt{(k-\frac{1}{2})R\lambda}$$

$$r_k^2 = (k-\frac{1}{2})R\lambda$$



(2) 充液后(液体牛顿环)

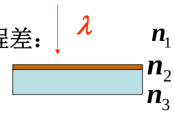
$$r_k' = \sqrt{(k-\frac{1}{2})R\lambda_n}$$

$$r_k'^2 = (k-\frac{1}{2})R\lambda / n$$

$$n = \left(\frac{r_k}{r_k'}\right)^2 = \left(\frac{14.8}{12.7}\right)^2 = 1.36$$

例4、一平面单色光波垂直 照射在厚度均匀的覆盖 在玻璃上的薄油膜上。油的折 射率为1.30，玻璃的折射率为 1.50。若单色光的波长可由光 源连续可调，可观察到 5000 $\overset{\circ}{A}$和7000 $\overset{\circ}{A}$这两个波长的单色光在 反射中消失，试求油膜 层的厚度。 **解：** $\because n_1 < n_2 < n_3$

$\therefore$ 垂直入射油膜上下表面 的反射光光程差：



$$\delta = 2n_2 e \ \underline{\text{令}} (2k+1)\frac{\lambda}{2}:$$

则 $2n_2 e = (2k_1+1)\frac{\lambda_1}{2} = (2k_2+1)\frac{\lambda_2}{2}$ $\quad \therefore \quad e = 673nm$

$$\frac{2k_1+1}{2k_2+1} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{7}{5}$$

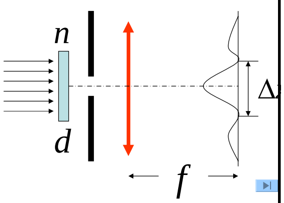
e最小：$K_1 = 3 \quad K_2 = 2$

例5、一单缝宽 $a = 1.0\times10^{-4}m$, 光学薄膜厚为 $d = 0.2\mu m$, 折射率为 $n = 1.5$, 波长为 $\lambda_1 = 4000\overset{0}{A}$ 和 $\lambda_2 = 6000\overset{0}{A}$ 的复色光垂直照射薄膜，单缝后透镜焦距 $f = 0.5m$

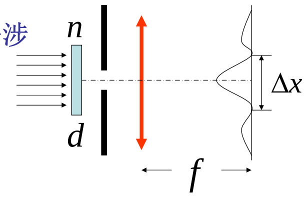
求：

1)透射薄膜而射入单缝的波长

2) 屏上观察到的中心明纹宽度 $\Delta x = ?$



解： **1)**从薄膜反射光干涉相消的条件：



$$2nd + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

$$2nd = k\lambda$$

$$k = 1 \qquad \lambda = 2nd = 2\times1.5\times0.2\times10^3 = 6000\overset{0}{A}$$

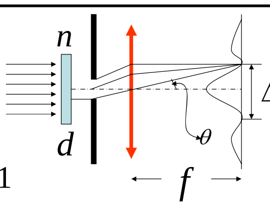
薄膜对于此波长的光起到增透的作用，入射狭缝的主要是此波长的光

4000$\overset{0}{A}$ 自己判断

2)由衍射极小的条件

$$a\sin\theta = k\lambda$$

$$\sin\theta = k\frac{\lambda}{a} \approx \tan\theta$$



第一级衍射极小 $k = 1$

在接收屏上的位置

$$\frac{\Delta x}{2} = f\tan\theta = \frac{f\lambda}{a} \qquad \Delta x = \frac{2f\lambda}{a} = 6mm$$

例6、单色光波长 $\lambda = 6328\overset{0}{A}$垂直入射光栅，观察到第一级明纹出现在 $\phi = \sin^{-1}0.266$ 的位置，第二级缺级，求：（1）光栅上相邻两缝的间距

（2）屏上实际呈现条纹的全部级数

解：据光栅方程 $\quad d\sin\phi = k\lambda$

光栅上相邻两缝的间距：

$$d = \frac{\lambda}{\sin\phi} = \frac{6328\times10^{-10}}{0.266} = 2.38\times10^{-6}m$$

由 $k=\dfrac{d\sin\theta}{\lambda}$

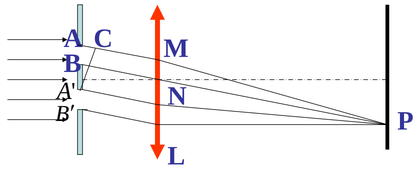
$$k_{\max}=\frac{d}{\lambda}=\frac{2.38\times10^{-6}}{6328\times10^{-10}}=3.76$$

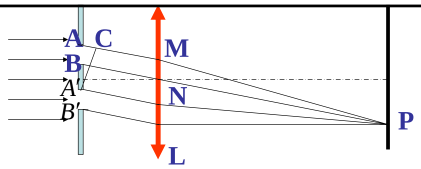
取 $k_{\max}=\dfrac{d}{\lambda}=\dfrac{2.38\times10^{-6}}{6328\times10^{-10}}=3$

由于 ±2 级缺级，实际呈现条纹的全部级数为

$$0,\quad \pm1,\quad \pm3$$

例7、用波长为 λ 的单色光垂直照射双缝上，如图所示，已知 $\overline{AB}=\overline{BA'}=\overline{A'B'}$。光线 AM 和 $A'N$ 平行，$\overline{AC}$ 表示这两条光线的光程差。试用半波带方法判断：$\overline{AC}=\lambda$ 时，屏幕上P点将出现明纹还是暗纹?若将 BA' 部分取掉，AB' 形成单缝，P点将出现明纹还是暗纹？





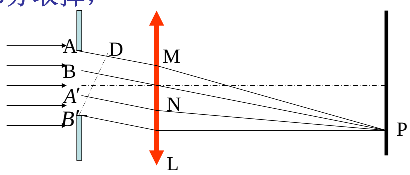
解：两缝相应位置上的光线的光程差均为 λ

按照干涉的原理，P点应为明纹。

同时应有 $2\,\overline{AB}\,\sin\,\phi=\lambda$

$$\overline{AB}\,\sin\,\phi=\frac{\lambda}{2}$$

若将 BA' 部分取掉，

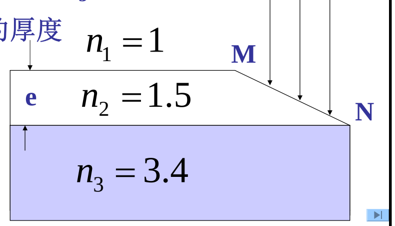


$$\overline{AD}=\overline{AB'}\sin\phi=3\overline{AB}\sin\phi=\frac{3}{2}\lambda$$

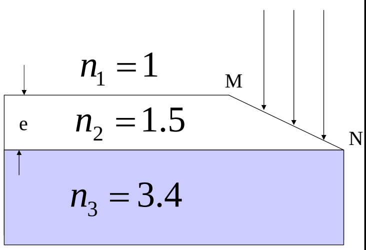
即：缝可分为3个半波带，P点应为明纹。

例8、要测定硅片上二氧化硅薄膜的厚度，将薄膜的一端做成劈尖形，用波长为 $\lambda=5461\overset{0}{A}$ 的绿光从空气照射硅片，观察反射光第7条暗纹在与平行膜的交线M处，二氧化硅的折射率为n_2=1.5, 硅的折射率为n_3=3.4

求:二氧化硅薄膜的厚度



解:从上下两个表面反射的光都有半波损失,于是干涉相消的条件:



$$2n_2e=(2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

若 $k=6$

(第7条暗纹)

$$e=(2\times6+1)\frac{\lambda}{4n_2}=1.18\times10^{-6}m$$