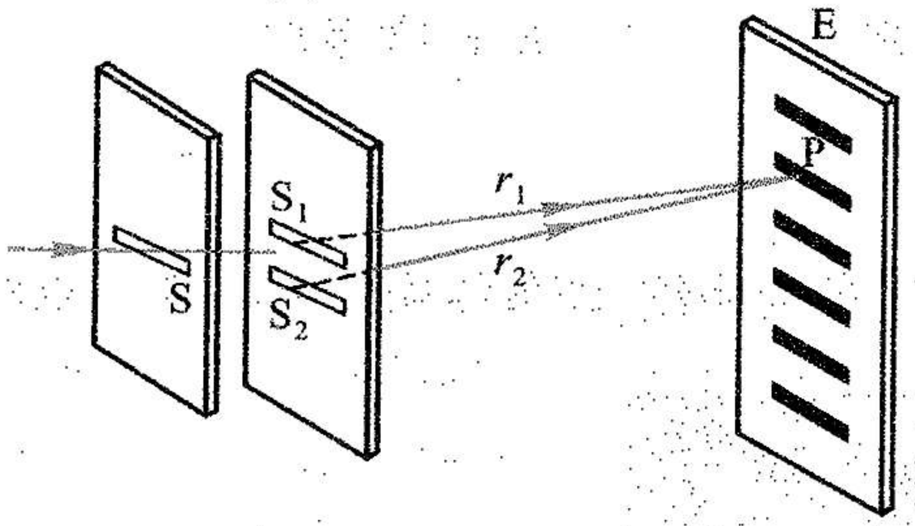
第11章光的干涉

11.2.1 杨氏双缝干涉实验

11.2.1 杨氏双缝干涉

1801年，托马斯 · 杨最早利用双缝实验从单一光源形成两束相干光，从而获得干涉现象，实验结果为光的“波动说”提供了重要的依据。在杨氏双缝实验中是采用分波阵面法产生相干光的。

在双缝的前方放置观察屏，可在屏幕上观察到明暗相间、对称的干涉条纹，这些条纹都与狭缝平行，条纹间的距离相等。

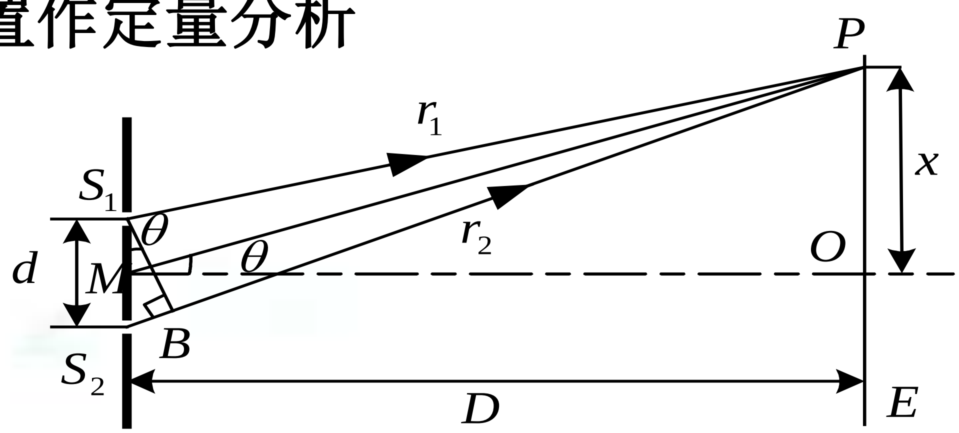


实验装置 (a)

(b)

11.2.1 杨氏双缝干涉

现在对双缝干涉条纹的位置作定量分析



光程差

$$\boxed{\delta = r_2 - r_1 \approx d\sin\theta \approx d\tan\theta = d\frac{x}{D}}$$

$$\delta = d\frac{x}{D}$$

$$I = 2I_0(1+\cos\Delta\varphi) = 4I_0\cos^2\frac{\Delta\varphi}{2} = 4I_0\cos^2\frac{\pi}{\lambda}\delta = 4I_0\cos^2\frac{\pi}{\lambda}d\frac{x}{D}$$

$$\delta = r_2 - r_1 = \begin{cases} \pm k\lambda, & k = 0,1,2\cdots \text{干涉加强} \\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2}, & k = 0,1,2\cdots \text{干涉减弱} \end{cases}$$

$$x = \begin{cases} \pm k\dfrac{D}{d}\lambda & \text{明纹} \quad k = 0,1,2,\cdots \\ \pm(2k+1)\dfrac{D}{d}\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗纹} \quad k = 0,1,2,\cdots \end{cases}$$

11.2.1 杨氏双缝干涉

其中 ***k*** 称为干涉级，***k*=0** 对应 **O** 级，称为中央明纹中心或零级明纹中心，$k=1,2,\cdots$依次为一级明纹、二级明纹…，各级明纹关于中央明纹对称。若波程差 δ 等于半波长奇数倍的各点，强度最小。波程差为其它值的各点，光强介于明与暗之间。

干涉条纹是等距分布 $\Delta x = x_{k+1} - x_k = \dfrac{D}{d}\lambda$

白光是由不同颜色的光组成，屏幕中央将出现白色明条纹，其他各级明条纹因不同颜色光的波长不同其明条纹间距不等而彼此错开，出现彩色条纹。

11.2.1 杨氏双缝干涉

双缝干涉条纹特点：

1．屏上明暗条纹的位置，是对称分布于屏幕中心 ***O*** 点两侧且平行于狭缝的直条纹，明暗条纹交替排列。

2. 两相邻明纹和相邻暗纹的间距相等，与干涉级 ***k*** 无关。

由式 $\Delta x = x_{k+1} - x_k = \dfrac{D\lambda}{d}$ 可以看出，若 ***D*** 和 ***d*** 的值一定，相邻条纹间的距离 **Δ*x*** 与入射光的波长 λ 成正比，波长越小，条纹间距越小，因此用白光照射双缝时，则中央明纹（白色）的两侧将出现各级彩色明条纹（内紫外红）。此外，还可由 **Δ*x*** 的精确测量而推算出单色光的波长 λ 。

11.2.1 杨氏双缝干涉

例11-1　用单色光照射相距0.4*mm*的双缝，缝屏间距为1*m*. (1)从第1级明纹到同侧第5级明纹的距离为6*mm*，求此单色光的波长；(2)若入射的单色光波长为4000Å的紫光，求相邻两明纹间的距离；(3)上述两种波长的光同时照射时，求两种波长的明条纹第1次重合在屏幕上的位置，以及这两种波长的光从双缝到该位置的光程差.

解 (1)由双缝干涉明纹条件 $x = \pm k\dfrac{D}{d}\lambda$ ，可得

$$\Delta x_{1-5} = x_5 - x_1 = \frac{D}{d}(k_5 - k_1)\lambda$$

11.2.1 杨氏双缝干涉

$$\lambda = \frac{d}{D}\frac{\Delta x_{1-5}}{(k_5 - k_1)} = \frac{4\times10^{-4}\times6\times10^{-3}}{1\times(5-1)} = 6.0\times10^{-7}m(\text{橙色})$$

(2)当 $\lambda = 4000\,\mathring{A}$ 时，相邻两明纹间距为

$$\Delta x = \frac{D}{d}\lambda = \frac{1\times4\times10^{-7}}{4\times10^{-4}} = 1\times10^{-3} = 1.0mm$$

(3)设两种波长的光的明条纹重合处离中央明纹的距离为*x*，则有

$$x = k_1\frac{D}{d}\lambda_1 = k_2\frac{D}{d}\lambda_2 \qquad \frac{k_1}{k_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1} = \frac{4000}{6000} = \frac{2}{3}$$

11.2.1 杨氏双缝干涉

由此可见，波长为 $4000\,\mathring{A}$ 的紫光的第3级明条纹与波长为 $6000\,\mathring{A}$ 的橙光的第2级明条纹第1次重合.重合的位置为

$$x = k_1 \frac{D}{d}\lambda_1 = \frac{2\times1\times6\times10^{-7}}{4\times10^{-4}} = 3\times10^{-3}m = 3mm$$

双缝到重合处的光程差为

$$\delta = k_1\lambda_1 = k_2\lambda_2 = 1.2\times10^{-6}m$$

例11-2 用白光作双缝干涉实验时，能观察到几级清晰可辨的彩色光谱？

解 用白光照射时，除中央明条纹为白光外，两侧形成内紫外红的对称彩色光谱

当k级红色明纹位置$x_{k红}$大于$k+1$级紫色明纹位置$x_{(k+1)紫}$时，光谱就发生重叠

由式 $x = \pm k\dfrac{D\lambda}{d} \quad (k = 0, 1, 2 \ldots)$ 得 $x_{k红} = k\dfrac{D}{d}\lambda_{红}$

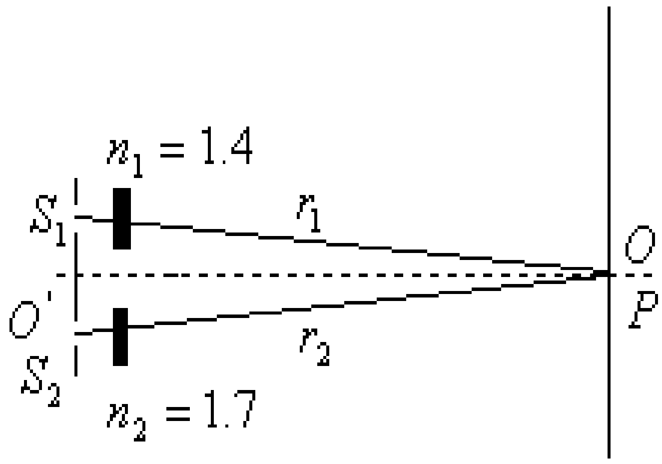
11.2.1 杨氏双缝干涉

由 $x_{k_{红}}=x_{(k+1)_{紫}}$ 的临界情况可得 $k\lambda_{红}=(k+1)\lambda_{紫}$

将 $\lambda_{红}$=7600Å， $\lambda_{紫}$=4000Å 代入得 ***k***=1.1 ，由于 ***k*** 只能取整数，所以应取 ***k***=1。

结果表明：在中央白色明纹两侧，只有第一级彩色光谱是清晰可见的。

例 11-3 一双缝装置的一个缝为一折射率为 1.40 的玻片遮盖，另一缝为一折射率为 1.70 玻片遮盖，设两玻片厚度均为 l。在玻片插入后，屏上原来的中央明纹处，变为第 5 级明纹位置。已知入射光的波长 $\lambda = 480\text{nm}$，求 l 的值。

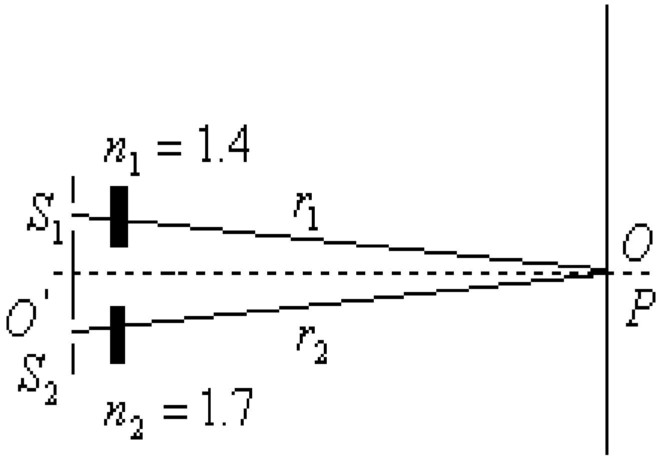


11.2.1 杨氏双缝干涉

解 两束光到达点 *O* 的光程是：

$$L_1 = 1.0\times(r_1 - l) + n_1 l,$$

$$L_2 = 1.0\times(r_2 - l) + n_2 l$$



光程差为

$$\delta = L_2 - L_1 = (n_2 - n_1)l + (r_2 - r_1)$$

由题意有 $r_1 = r_2$， $\delta = L_2 - L_1 = 5\lambda$

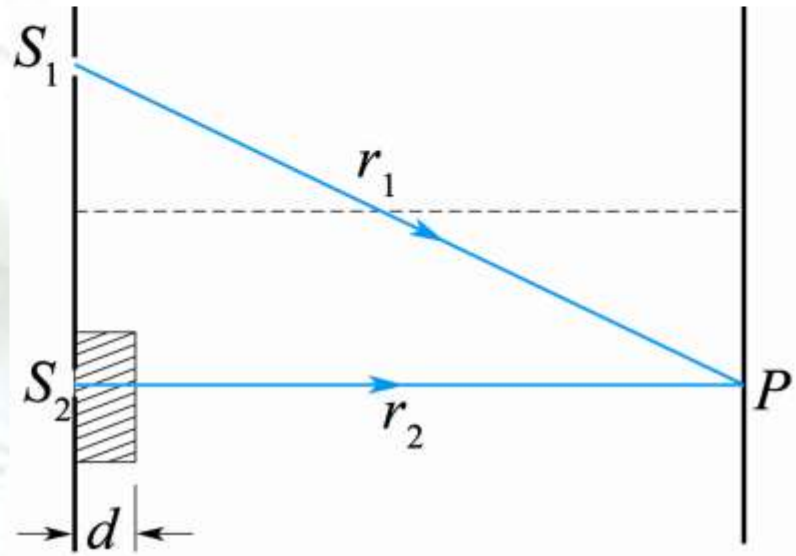
可得： $(n_2 - n_1)l = 5\lambda$

$$l = \frac{5}{n_2 - n_1}\lambda = \frac{5\times 480}{1.7 - 1.4} = 8000\text{nm} = 8.0\mu\text{m}$$

例11-4 在杨氏双缝干涉实验中，入射光的波长为λ，S_2现在缝上放置一片厚度为***d***，折射率为***n***的透明介质，试问原来的零级明纹将如何移动？如果观测到零级明纹移到了原来的***k***级明纹处，求该透明介质的厚度***d***.

解　如图所示，有透明介质时，从 S_1 和 S_2 到观测点P的光程差为

$$\delta = r_1 - (r_2 - d + nd)$$



11.2.1 杨氏双缝干涉

零级明纹相应的 $\delta=0$ ，其位置应满足

$$r_1-r_2=(n-1)d$$

原来没有介质时**k**级明纹的位置满足

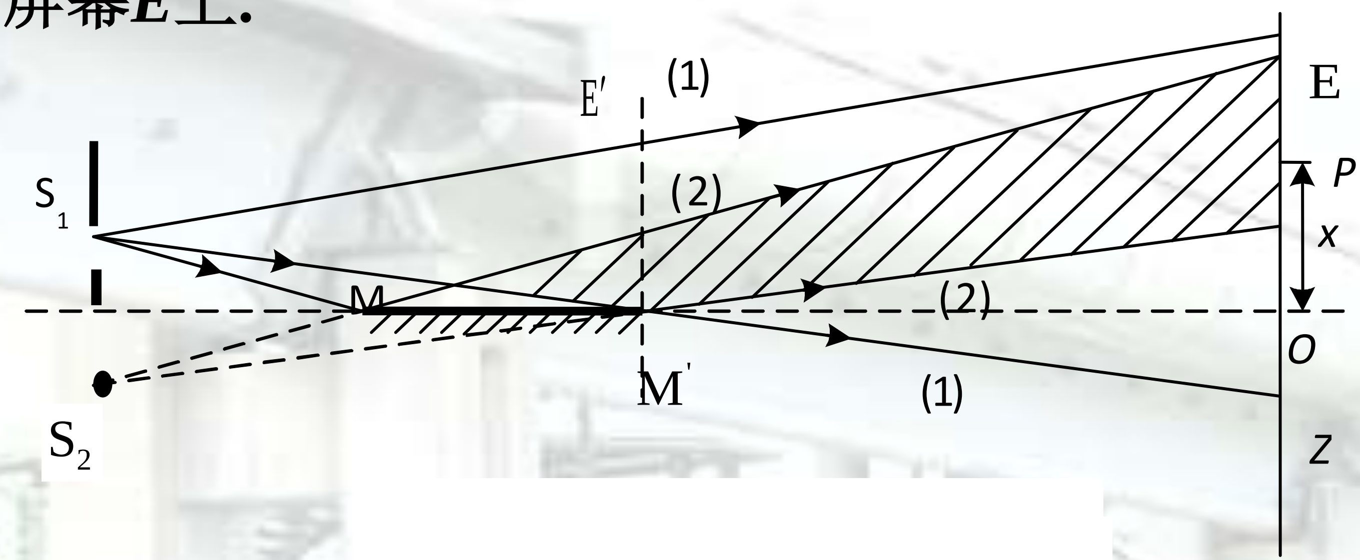
$$r_1-r_2=k\lambda \qquad k=0,\pm1,\pm2,\cdots$$

$$\therefore\ d=\frac{k\lambda}{n-1}$$

其中**k**为整数.上式也可理解为：插入透明介质使屏幕上的干涉条纹移动了 $|k|=(n-1)d/\lambda$ 条。这也提供了一种测量透明介质折射率的方法.

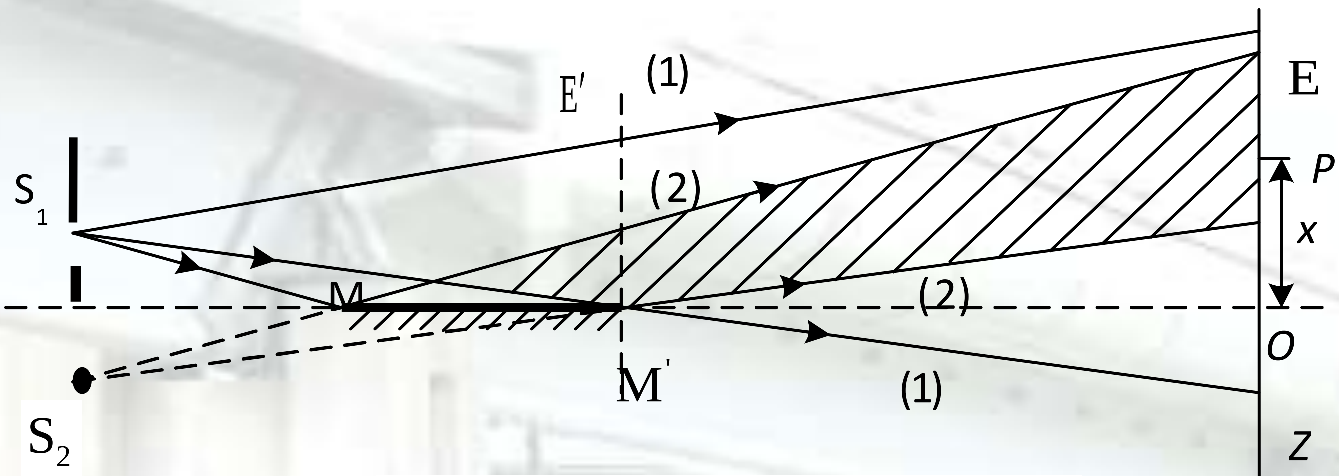
劳埃德镜

劳埃德镜的装置如图，它是一块下表面镀银的反射镜.从狭缝S_1发出的光，一部分（以(1)表示的光）直接射向屏E，另一部分以近90°的入射角掠射到镜面上，然后反射（以(2)表示的光）到屏幕E上.

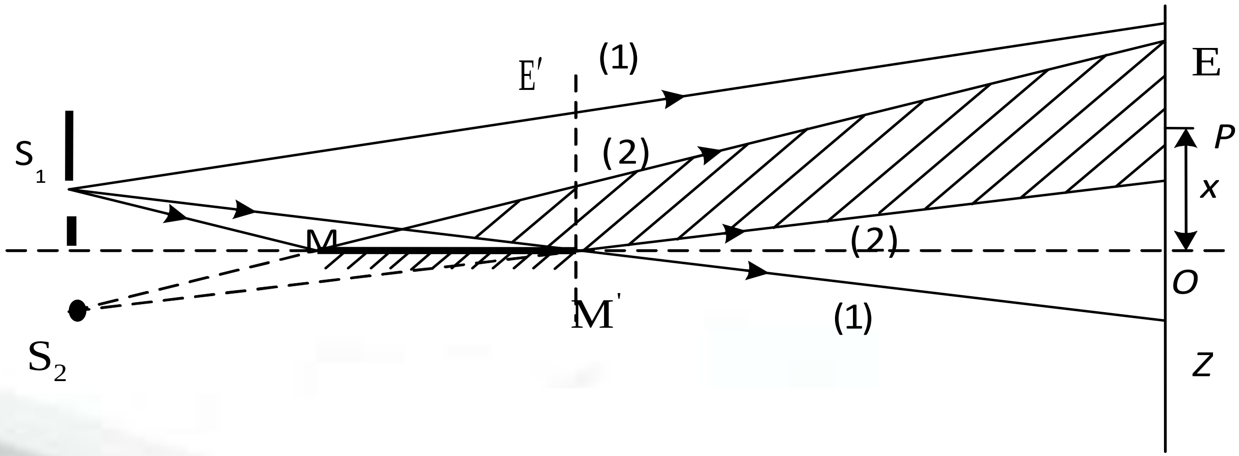


11.2.2　其它分波阵面干涉装置

若把屏幕移近到和镜面边缘M'相接触，即在$E'M'$位置，在屏与镜M'交点处似应出现明纹（因为从S_1、S_2发出的光到达交点M'时，波程相等），但实验上观测到的却是暗纹，这表明直接射到屏上的光与由镜面反射的光在M'处位相相反，即位相差为π。



11.2.2　其它分波阵面干涉装置



半波损失，实际上是入射光在界面的相位与反射光在界面的相位有π的相位差，折合成光程差，就好像反射波少走（或多走）了半个波长，即π的相位差折算成光程差为$\lambda/2$。

发生半波损失的条件：

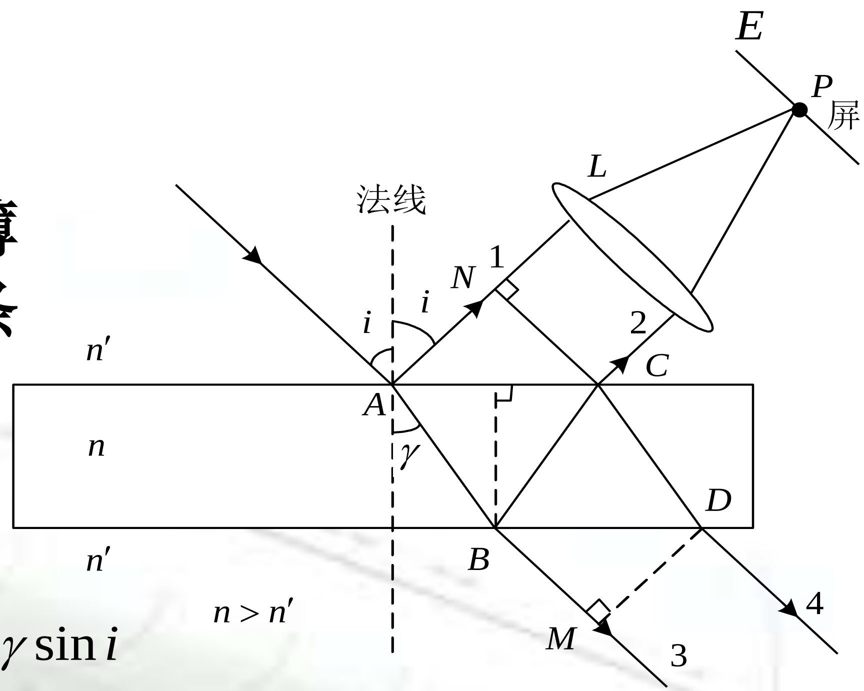
- ✓ 由光疏媒质入射，光密媒质反射；
- ✓ 正入射或掠入射。

11.3.1 等倾干涉

所谓薄膜干涉，指扩展光源投射到透明薄膜上，其反射光或透射光的干涉。

11.3.1 等倾干涉

光线入射在厚度*e*均匀的薄膜上产生的干涉现象，其干涉条纹称等倾干涉条纹。



1 光程差的计算

$$\delta = n(AB+BC) - n'AN - \frac{\lambda}{2}$$

$$AB = BC = e/\cos\gamma,\quad AN = AC\sin i = 2e\tan\gamma\sin i$$

$$n'\sin i = n\sin\gamma$$

薄膜干涉

$$\delta = 2n\frac{e}{\cos\gamma} - 2n'e\tan\gamma\sin i - \frac{\lambda}{2} = 2n\frac{e}{\cos\gamma}\left(1-\sin^2\gamma\right) - \frac{\lambda}{2}$$

$$= 2ne\cos\gamma - \frac{\lambda}{2} = 2e\sqrt{n^2 - n'^2\sin^2 i} - \frac{\lambda}{2}$$

2 干涉条纹分析

$$I = 4I_0\cos^2\frac{\pi}{\lambda}\delta$$

$$\delta = 2e\sqrt{n^2 - n'^2\sin^2 i} - \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda \quad (k=0,1,2,\cdots) & \text{（明纹）} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} \quad (k=0,1,2,\cdots) & \text{（暗纹）} \end{cases}$$

当其他参量一定时，光程差取决于入射角i。入射角i相同的光经薄膜两表面反射形成的反射光在相遇点有相同的光程差，即凡入射角相同的光均会形成同一级干涉条纹，称为等倾干涉。其特点是：

① 干涉图像是一些明暗相同的同心圆环

② 薄膜厚度e一定时，干涉级数越高（k越大），相当于i越小，P点越靠近屏中央

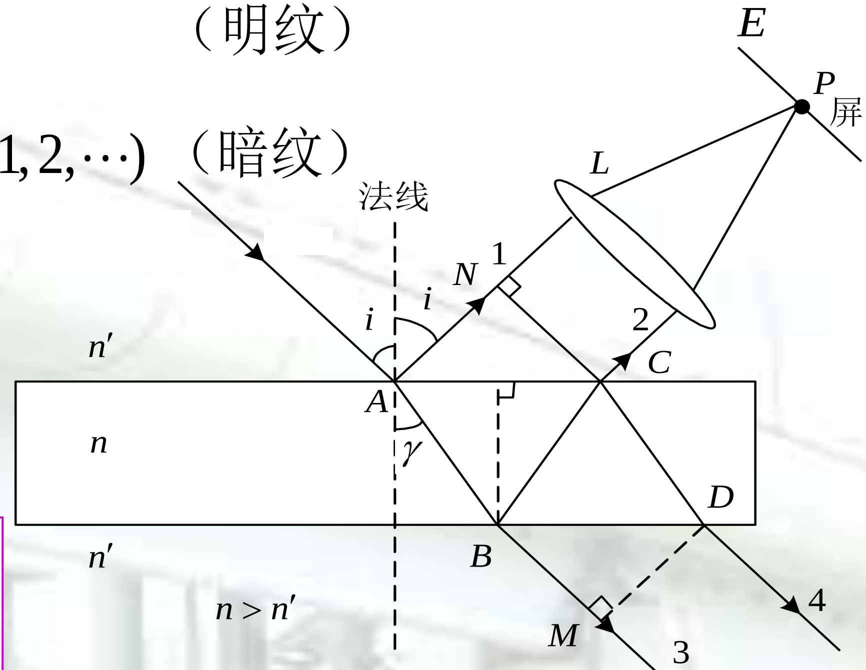
③ 条纹间距中央大，边缘小，即内疏外密

④ 等倾干涉条纹定域于无限远处（若有汇聚透镜，则成像在焦平面上）

11.3.1 等倾干涉

对于透射光而言，也有干涉现象。对图情形，光线3是直接透射而来的，光线4是在B点和C点经两次反射再折射出来，而两次反射都是由光密介质入射到光疏介质反射的，所以不存在反射时的附加光程差，因此，这两束透射光的光程差是

$$\delta = 2e\sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 i} = \begin{cases} k\lambda \quad (k = 0,1,2,\cdots) & \text{（明纹）} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} \quad (k = 0,1,2,\cdots) & \text{（暗纹）} \end{cases}$$



注意： 透射光和反射光干涉具有互补性，符合能量守恒定律.

薄膜的干涉

11.3.1 等倾干涉

例 11-5　为了增加照相机镜片的透射光强度，往往在镜片上(n_3=1.52)镀一层MgF_2薄膜(n_2=1.38)，使对人眼和照相底片最敏感的的光反射最小，试求MgF_2的最小厚度。