§ 12-5 薄膜干涉

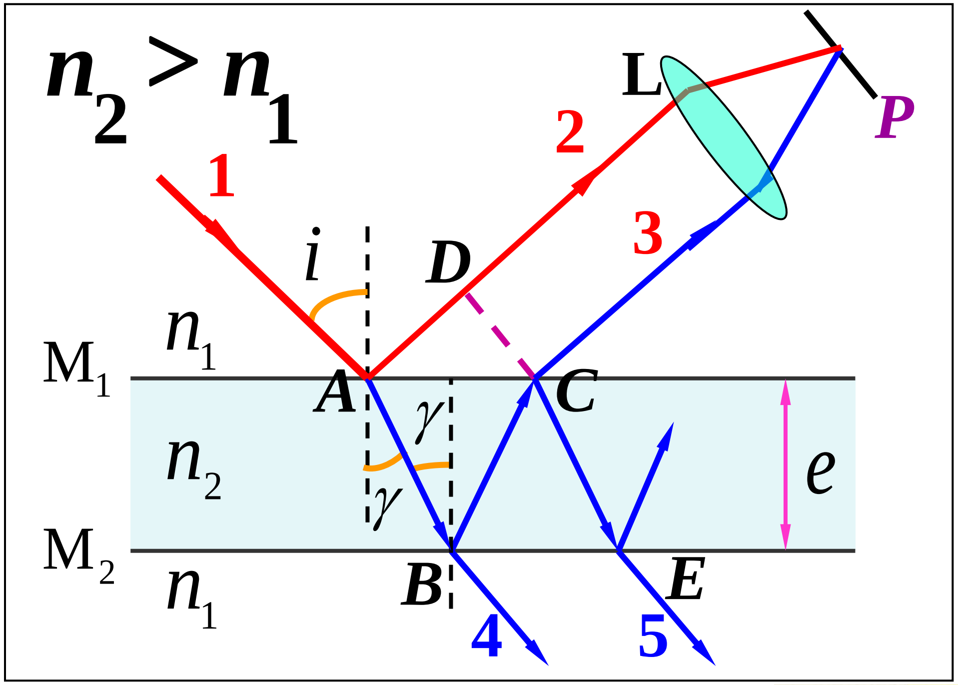
$$\Delta_{反} = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \lambda/2$$

薄膜干涉可分成等倾干涉和等厚干涉两类。

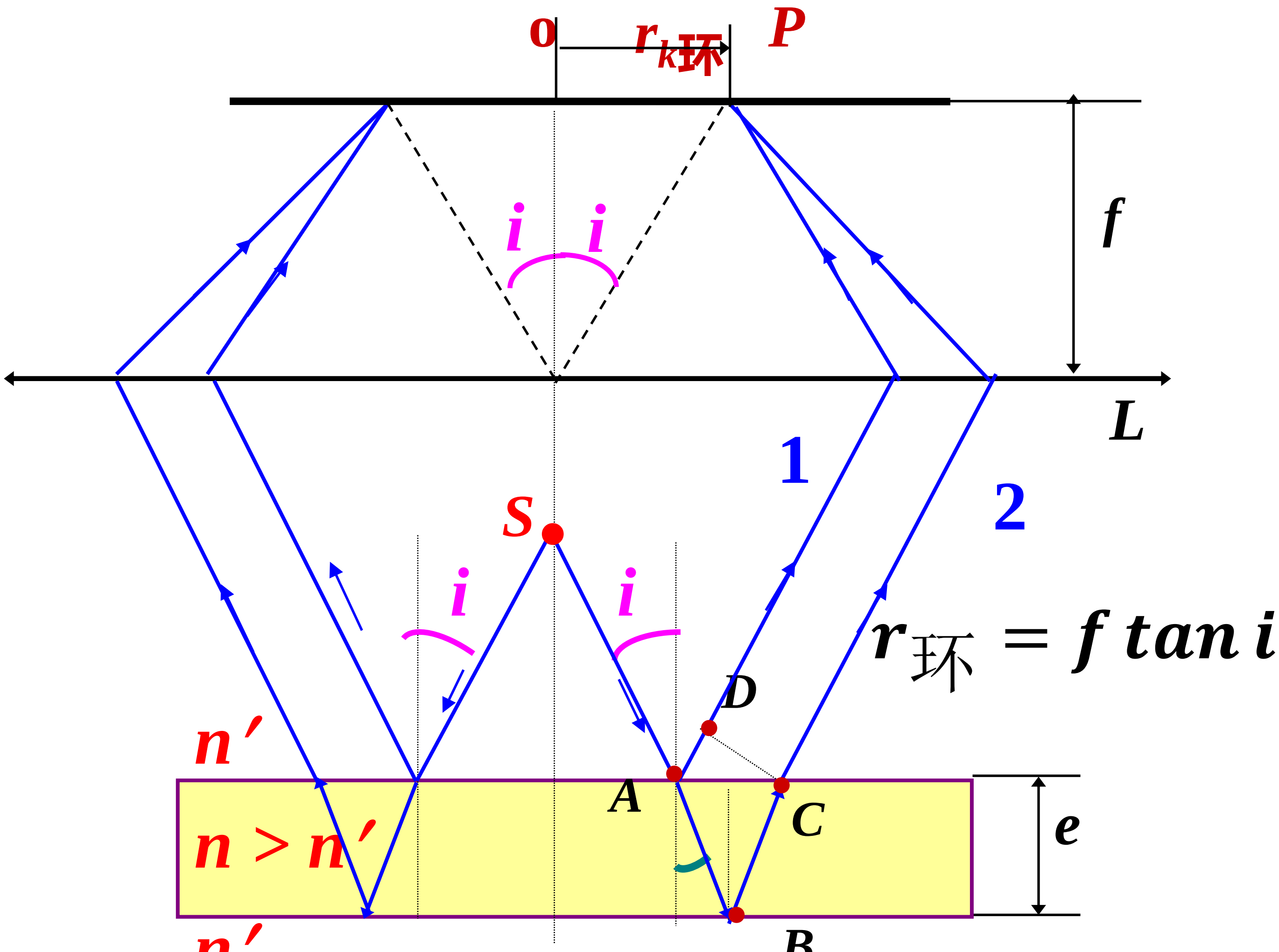
一 等倾干涉条纹

➢ 反射光的光程差 $\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \dfrac{\lambda}{2}$

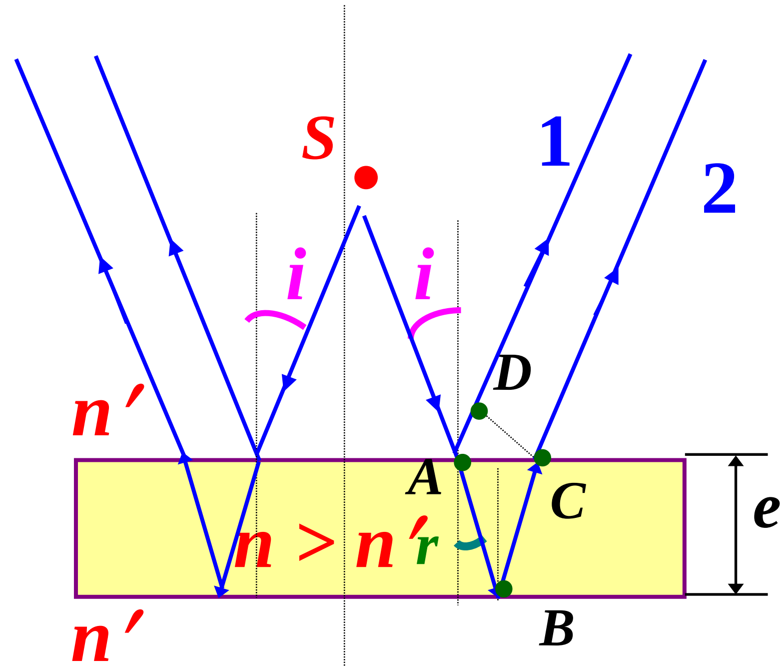
$$= \begin{cases} k\lambda \quad (k = 1,2,\cdots) & \text{加 强} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} \quad (k = 0,1,2,\cdots) & \text{减 弱} \end{cases}$$



点光源照明时的干涉条纹分析



光束1、2的光程差为:



$$\delta = 2e\sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}$$

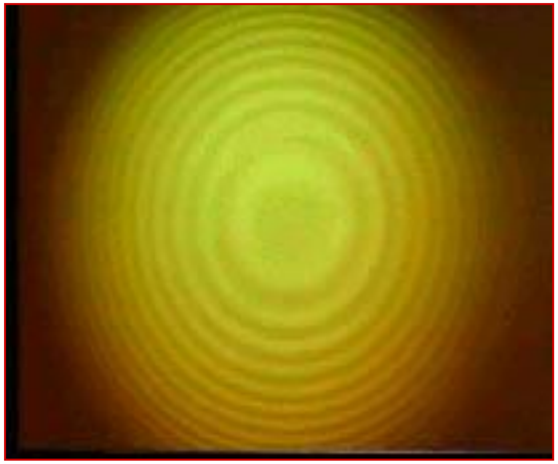
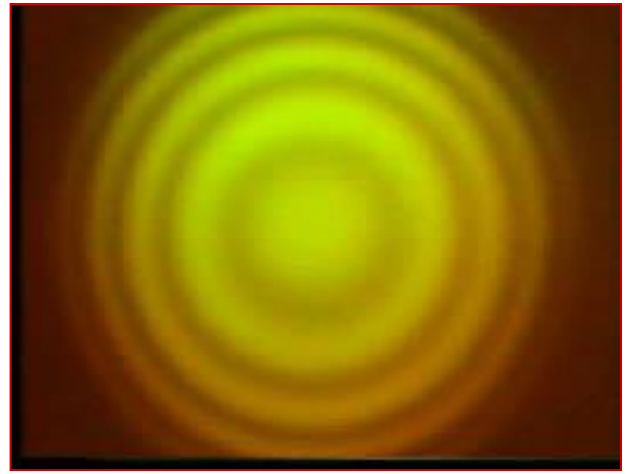
$$= \delta(i) = \begin{cases} k\lambda & (k = 1, 2, \cdots) \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & (k = 0, 1, 2, \cdots) \end{cases}$$

加强 明纹

减弱 暗纹

倾角 i 相同的光线对应同一条干涉条纹---等倾干涉条纹。

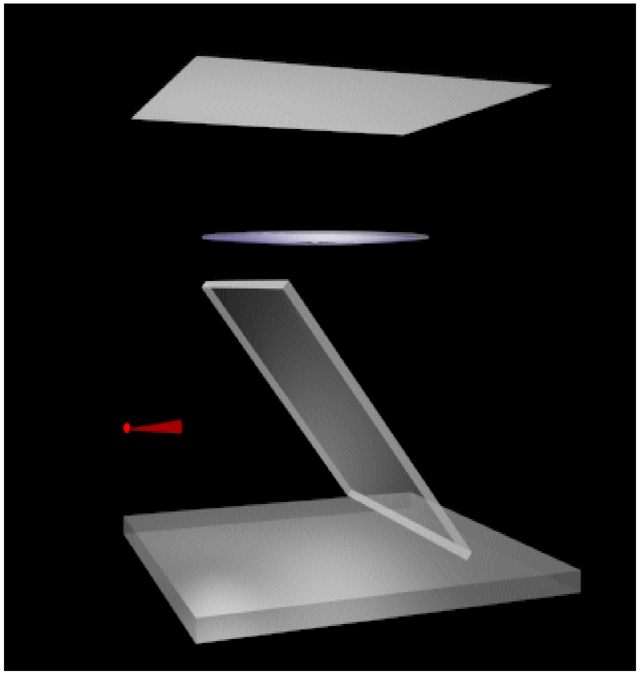
等倾干涉条纹条纹特点：$\delta = 2e\sqrt{n^2 - n'^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}$

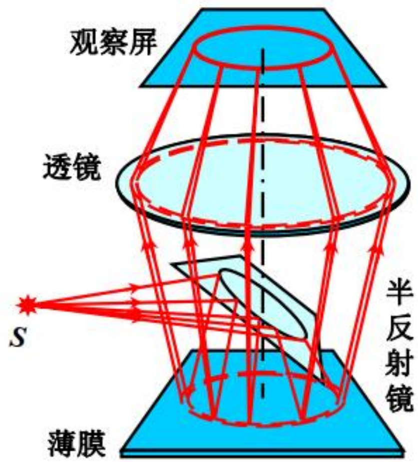
 

- 形状：一系列同心圆环 $\boldsymbol{r_{环} = f \tan i}$
- 条纹间隔分布：内疏外密
- 条纹级次分布：e一定时，$k\uparrow \rightarrow \delta\uparrow \rightarrow i\downarrow \rightarrow r_k\downarrow$
- 膜厚变化时，条纹的移动：k一定，$e\uparrow \rightarrow i\uparrow \rightarrow r_k\uparrow$

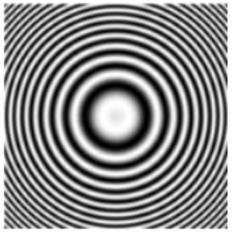
  条纹由中央冒出
- 波长对条纹的影响：k, e一定，$\lambda\uparrow \rightarrow i\downarrow \rightarrow r_k\downarrow$

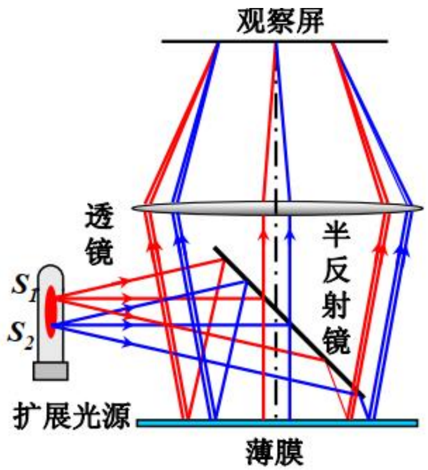
➢ 单色点（扩展）光源照明时的干涉条纹分析





(a) 单色点光源照明


(b) 等倾干涉图样



(c) 单色扩展光源照明

入射角度越大，条纹圆环半径越大

强度相加、干涉条纹明亮

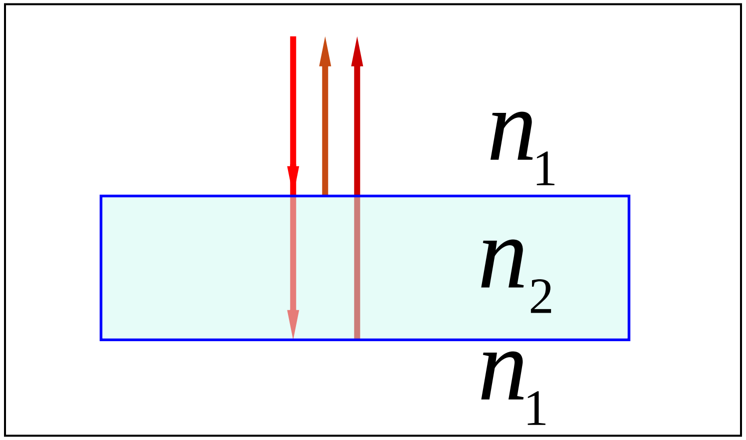
◆ 当光线垂直入射时 $i = 0^\circ$

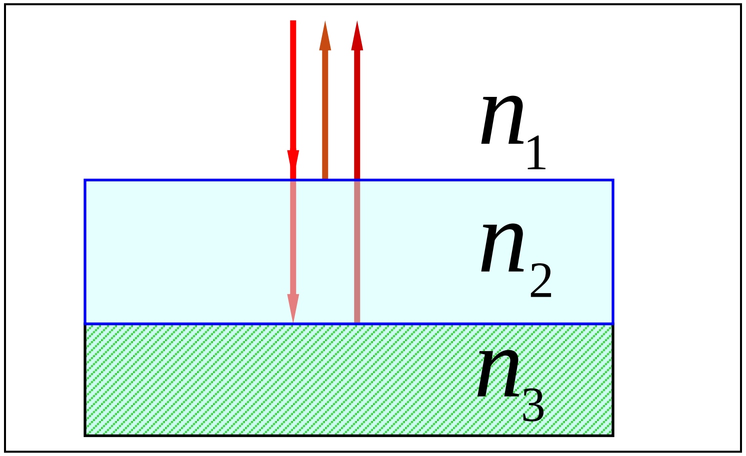
当 $n_2 > n_1$ 时

$$\Delta_r = 2dn_2 + \frac{\lambda}{2}$$

当 $n_3 > n_2 > n_1$ 时

$$\Delta_r = 2dn_2$$





例 一油轮漏出的油(折射率 $n_1=1.20$)污染了某海域, 在海水($n_2=1.30$)表面形成一层薄薄的油污.

(1) 如果太阳正位于海域上空,一直升飞机的驾驶员从机上向下观察,他所正对的油层厚度为460nm,则他将观察到油层呈什么颜色?

(2) 如果一潜水员潜入该区域水下,又将看到油层呈什么颜色?

解 **(1)** $\Delta_{\mathrm{r}}=2dn_1=k\lambda$ $\quad \lambda=\dfrac{2n_1d}{k}, \quad k=1,2,\cdots$

$$k=1, \qquad \lambda=2n_1d=1104\mathrm{nm}$$

$$k=2, \qquad \lambda=n_1d=552\mathrm{nm}$$ 绿色

$$k=3, \qquad \lambda=\frac{2}{3}n_1d=368\mathrm{nm}$$

(2) 透射光的光程差 $\Delta_{\mathrm{t}} = 2dn_1 + \lambda / 2$

$$k = 1, \qquad \lambda = \frac{2n_1 d}{1 - 1/2} = 2208\mathrm{nm}$$

紫红色

$$k = 2, \qquad \lambda = \frac{2n_1 d}{2 - 1/2} = 736\mathrm{nm}$$ 红光

$$k = 3, \qquad \lambda = \frac{2n_1 d}{3 - 1/2} = 441.6\mathrm{nm}$$ 紫光

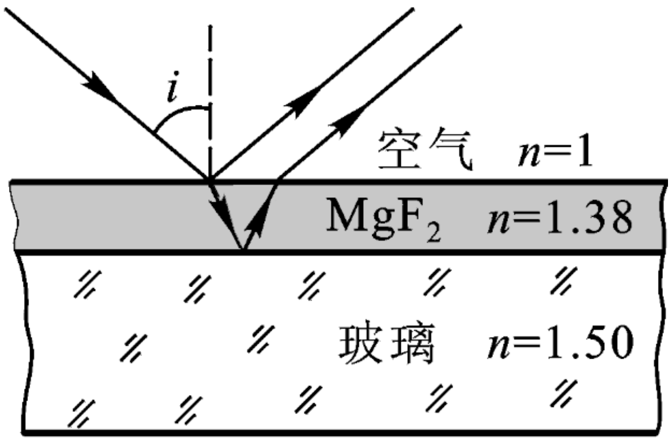
$$k = 4, \qquad \lambda = \frac{2n_1 d}{4 - 1/2} = 315.4\mathrm{nm}$$

增透膜和高反射膜

利用薄膜干涉使反射光减小，可以提高光学器件的透光率，这样的薄膜-----增透膜。

利用薄膜干涉使反射光减小，这样的薄膜称为增透膜。

以垂直入射考虑，上下表面反射都有相位突变π



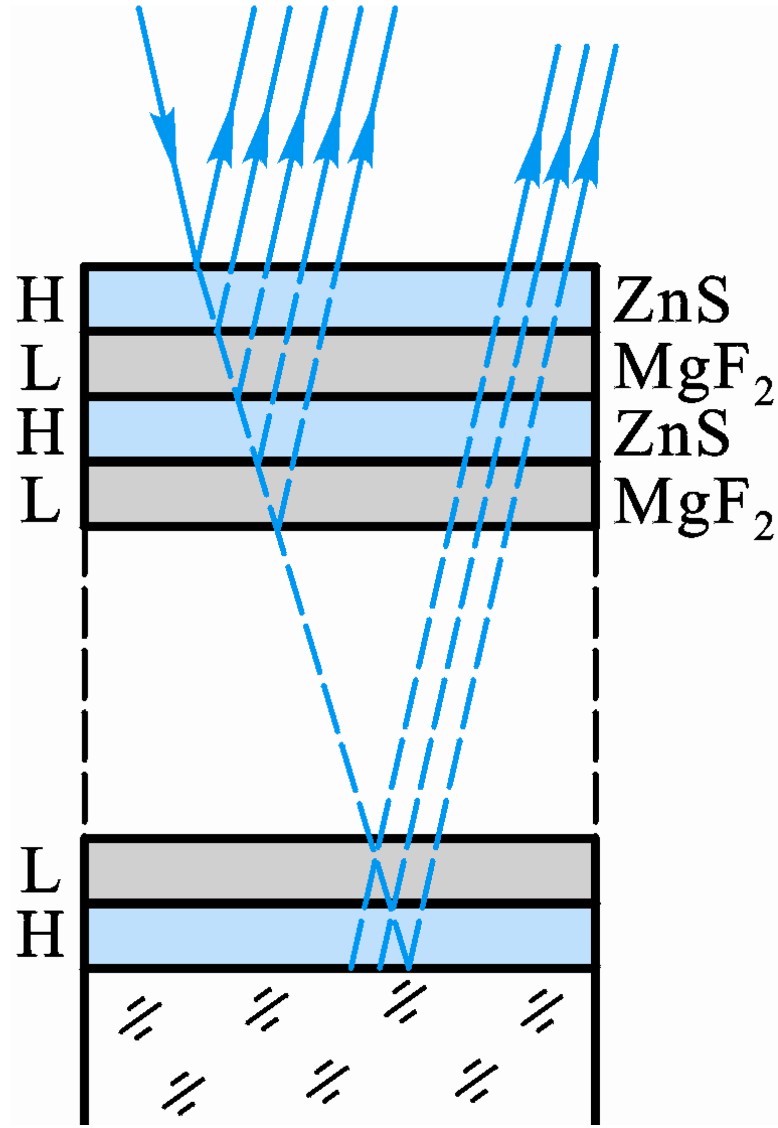
$$2nd = (k + \frac{1}{2})\lambda \quad k = 0,1,2,\cdots$$

增透膜的最小厚度：

$$d = \frac{\lambda}{4n}$$

高反射膜(HLHLH···)

反射镜表面交替镀上光学厚度均为$\lambda/4$的高折射率ZnS膜和低折射率的MgF_2膜，形成多层高反射膜。



例：在玻璃表面镀上一层MgF_2薄膜，使波长为λ =5500 Å的绿光全部通过。求：膜的厚度。

解 使反射绿光干涉相消

由反射光干涉相消条件

$$\delta = 2 n_2 e = (2k+1)\lambda/2$$

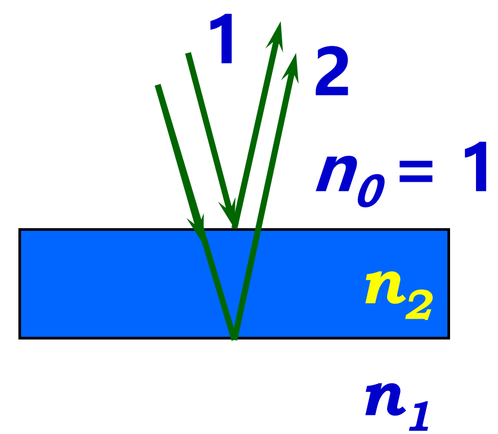
$$e = \frac{(2k+1)\lambda}{4n_2}$$

取k=0 $$e = \frac{\lambda}{4n_2} = \frac{5500}{4\times1.38}$$

$$= 996(\text{Å})$$

$n_0 = 1$

MgF_2	$n_2 = 1.38$
玻璃	$n_1 = 1.50$



薄膜干涉—等厚条纹

二　等厚干涉条纹

当一束平行光入射到厚度不均匀的透明介质薄膜上，两反射光线的光程差：

$$\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta'$$

当i保持不变时，光程差仅与膜的厚度有关，厚度相同的地方光程差相同，从而对应同一条干涉条纹---等厚干涉条纹。

实际应用中，通常使光线 垂直入射膜面，即，光程差公式简化为：

$$\delta = 2n_2 e + \delta' \quad (i = \gamma = 0)$$

$$\boldsymbol{\delta = 2n_2 e + \delta' = \begin{cases} k\lambda & k = 1,2,3 \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2 \end{cases}}$$

明纹

暗纹

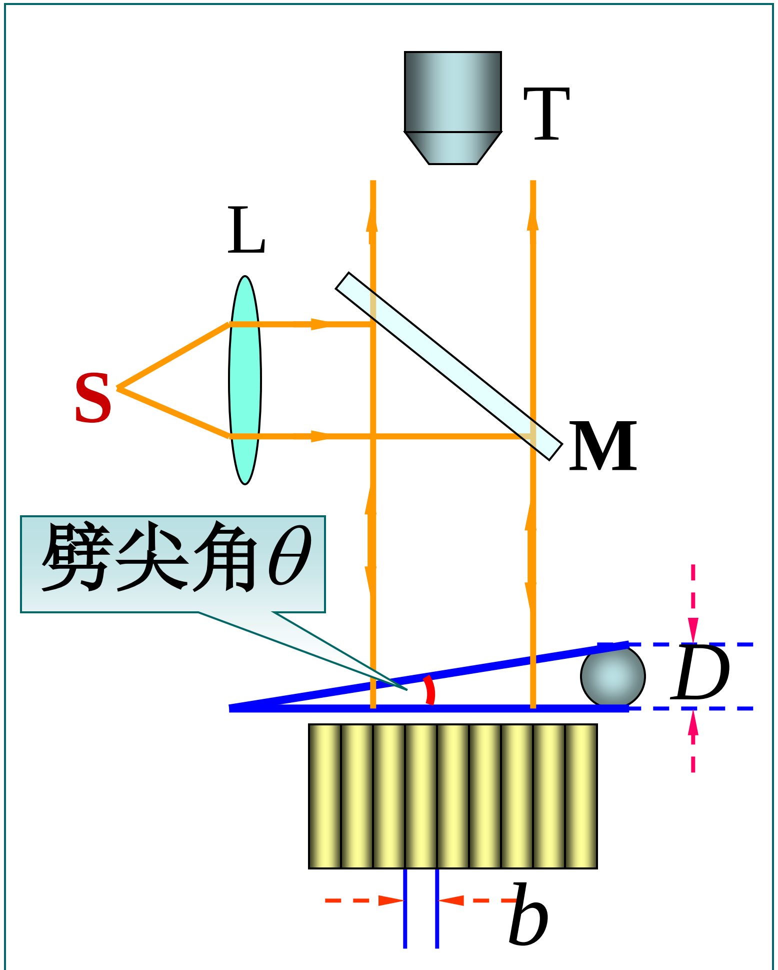
δ'：为因为半波损失而生产的附加光程差。

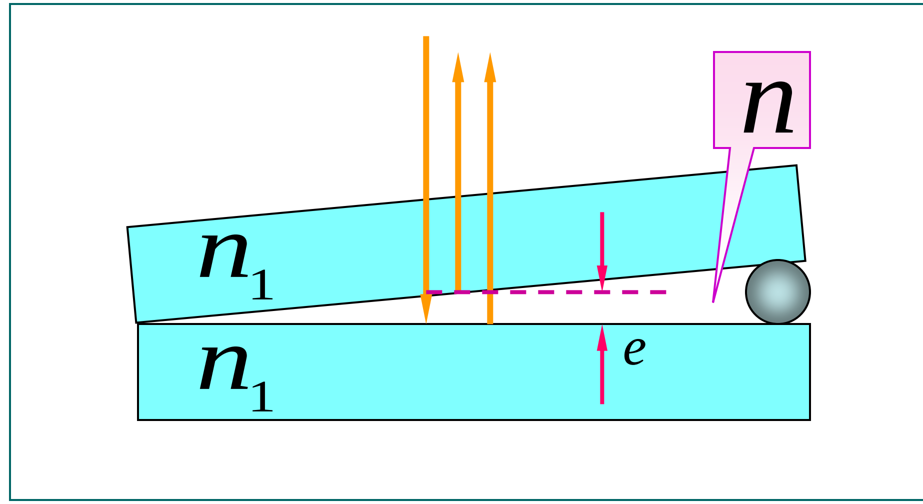
$$\delta' = \begin{cases} 0 \\ \dfrac{\lambda}{2} \end{cases}$$

薄膜上、下表面反射光都存在或都不存在半波损失

反射光之一存在半波损失

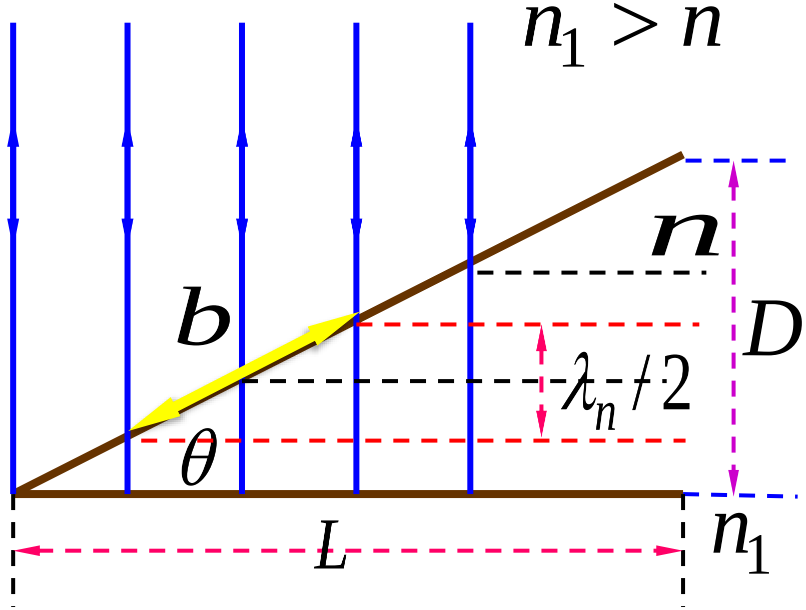
一　劈尖





$$\Delta = 2ne + \boxed{\frac{\lambda}{2}} \Leftarrow \boxed{\because n < n_1}$$

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



劈尖干涉

讨论

1）劈尖　$e=0$

$$\Delta=\frac{\lambda}{2}\text{为暗纹.}$$

$$e=\begin{cases}(k-\frac{1}{2})\frac{\lambda}{2n} & \text{（明纹）}\\ k\lambda/2n & \text{（暗纹）}\end{cases}$$

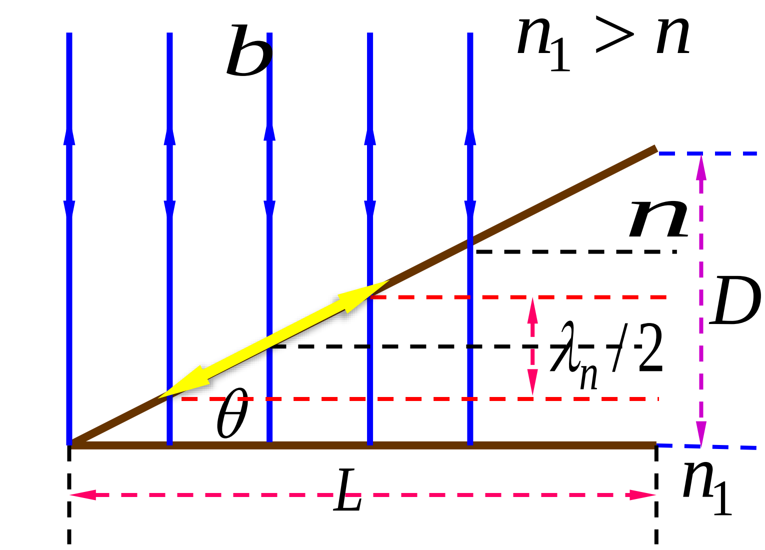
2）相邻明纹（暗纹）间的厚度差

$$e_{k+1} - e_k = \frac{\lambda}{2n}$$

3）条纹间距（明纹或暗纹）

$$b \sin\theta = \frac{\lambda}{2n}$$

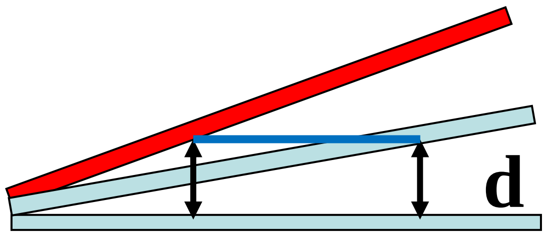
$$b = \frac{\lambda}{2n \sin\theta}$$

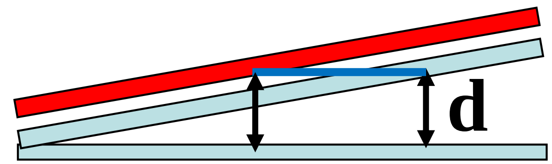


劈尖干涉

4）干涉条纹的移动

$$b = \frac{\lambda}{2n\sin\theta}$$

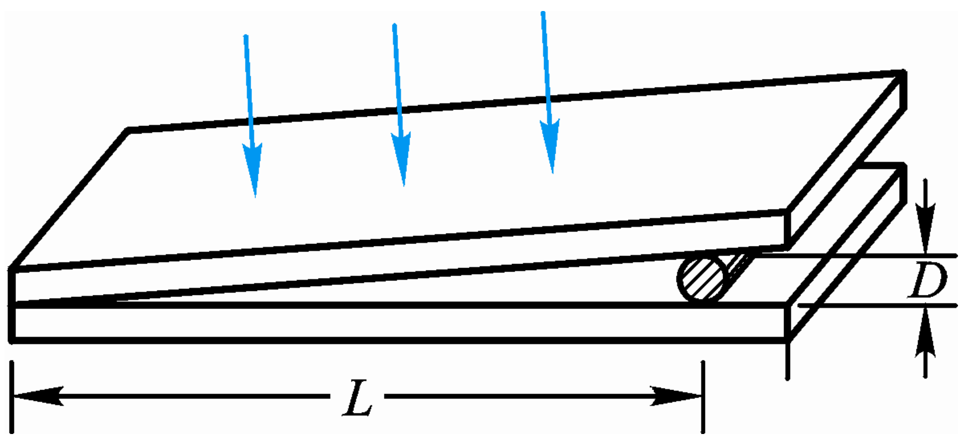




θ 增大，间距变小，条纹向劈尖棱边移动

向上移动上玻璃片，条纹间距不变，条纹向棱边移动

例12-9 为了测量金属细丝的直径，把金属丝夹在两块平玻璃之间，形成劈尖，如图所示，如用单色光垂直照射，就得到等厚干涉条纹。测出干涉条纹的间距，就可以算出金属丝的直径。某次的测量结果为：单色光的波长λ =589.3 nm金属丝与劈间顶点间的距离L=28.880 mm，30条明纹间得距离为4.295 mm,求金属丝的直径D？



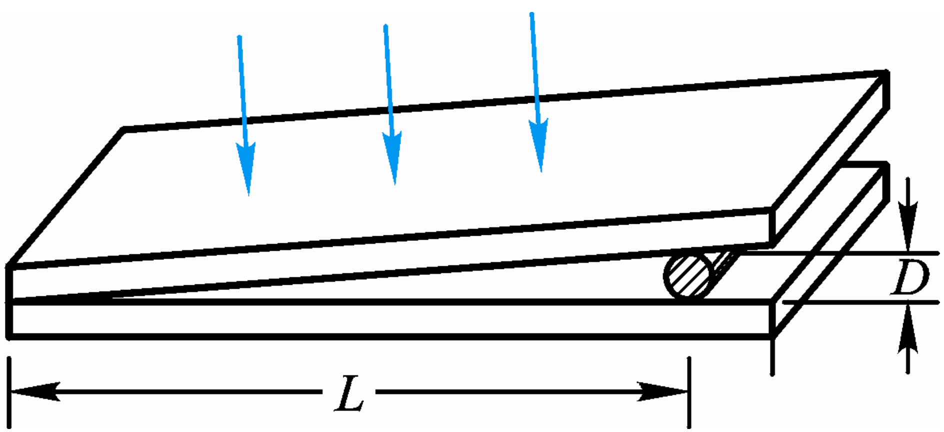
解： 相邻两条明纹间的间距

$$d=\frac{4.295}{29}\ \text{mm}$$

$$d\sin\theta=\frac{\lambda}{2} \qquad \sin\theta\approx\frac{D}{L}$$

$$\Longrightarrow \quad D=\frac{L}{d}\frac{\lambda}{2}$$

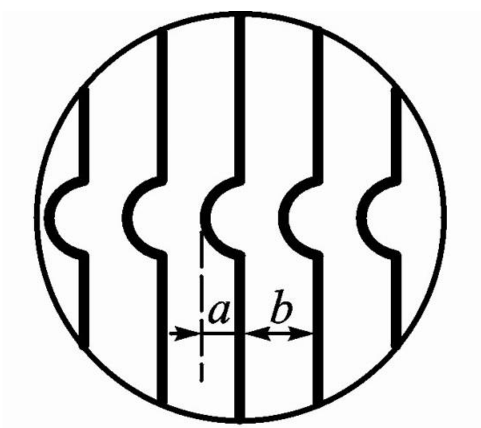
$$D=0.05746\ \text{mm}$$

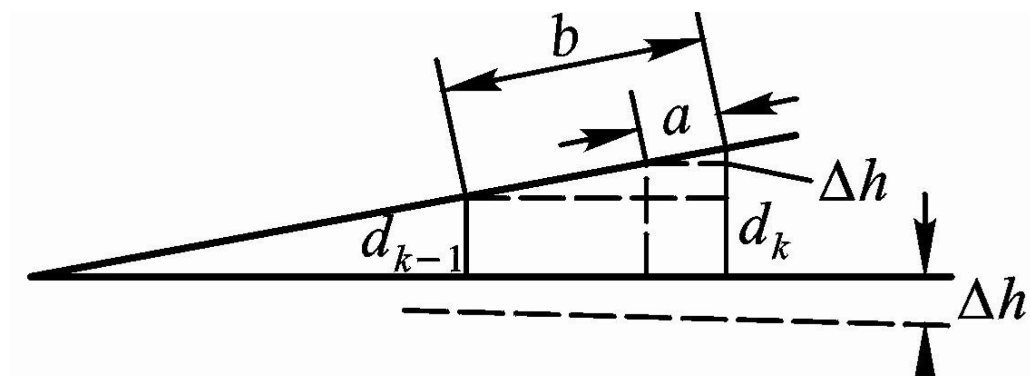


返回 退出

例12-10 利用空气劈尖的等厚干涉条纹可以检测工 件表面存在的极小的加工纹路， 在经过精密加工的工件表面上放一光学平面玻璃，使其间形成空气劈形膜，用单色光照射玻璃表面，并在显微镜下观察到干涉条纹，如图所示。试根据干涉条纹的弯曲方向，判断工件表面是凹的还是凸的；并证明凹凸深度可用下式求得

$$\Delta h = \frac{a}{b}\frac{\lambda}{2}$$

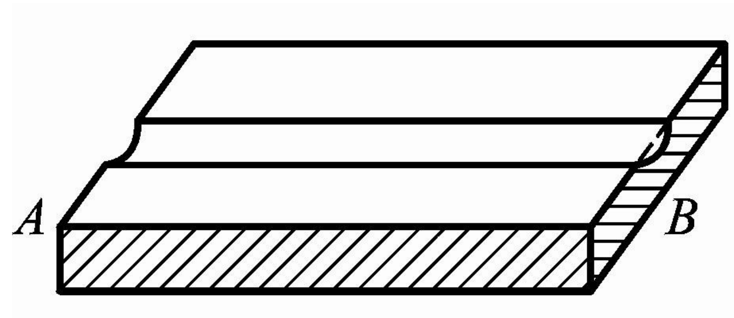




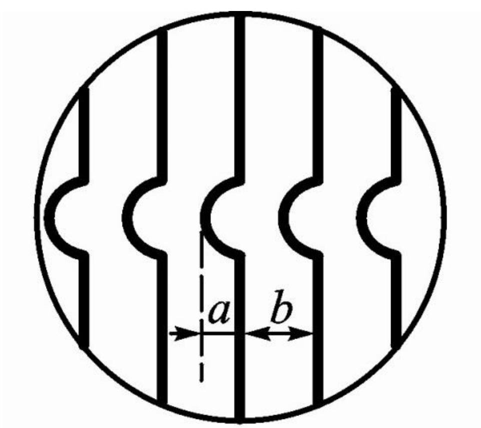
解： 观察到的干涉条纹弯向空气膜的左端，可判断工件表面是下凹的，如图所示。

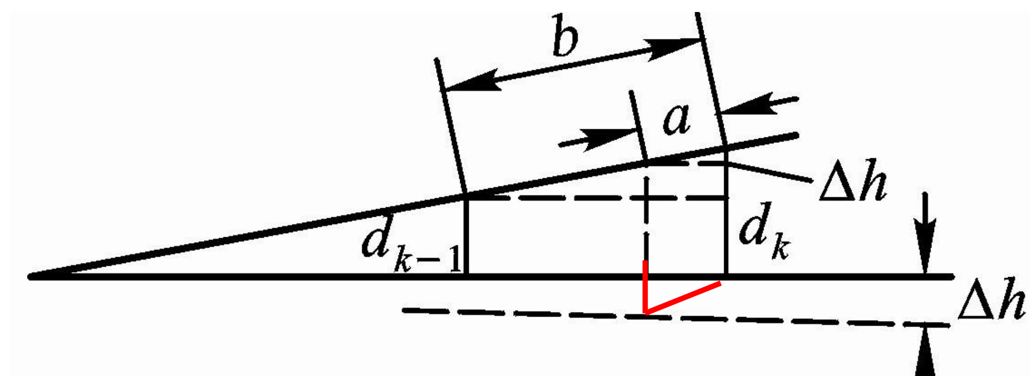
由图中相似直角三角形：

$$\frac{a}{b}=\frac{\Delta h}{(d_k-d_{k-1})}=\frac{\Delta h}{\frac{\lambda}{2}}$$



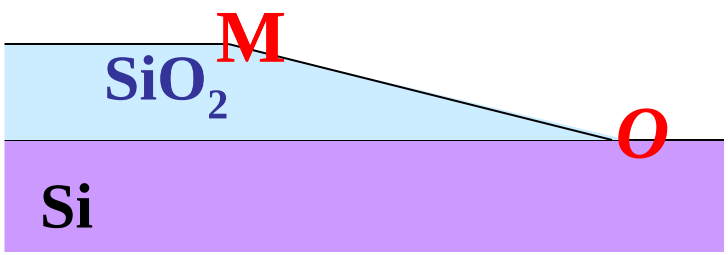
$$\Rightarrow \quad \Delta h=\frac{a}{b}\frac{\lambda}{2}$$





例： 在半导体元件生产中，为了测定硅片上SiO_2薄膜的厚度，将该膜的一端腐蚀成劈尖状，已知SiO_2的折射率n =1.46，用波长λ =5893埃的平行钠光垂直照射后，观察到劈尖上出现9条暗纹，且第9条在劈尖斜坡上端点M处，Si的折射率为3.42。试求SiO_2薄膜的厚度。

解：由暗纹条件



$$\delta = 2ne$$
$$= (2k+1)\lambda/2 \quad (k=0,1,2\ldots)$$

知,第9条暗纹对应于k=8,代入上式得

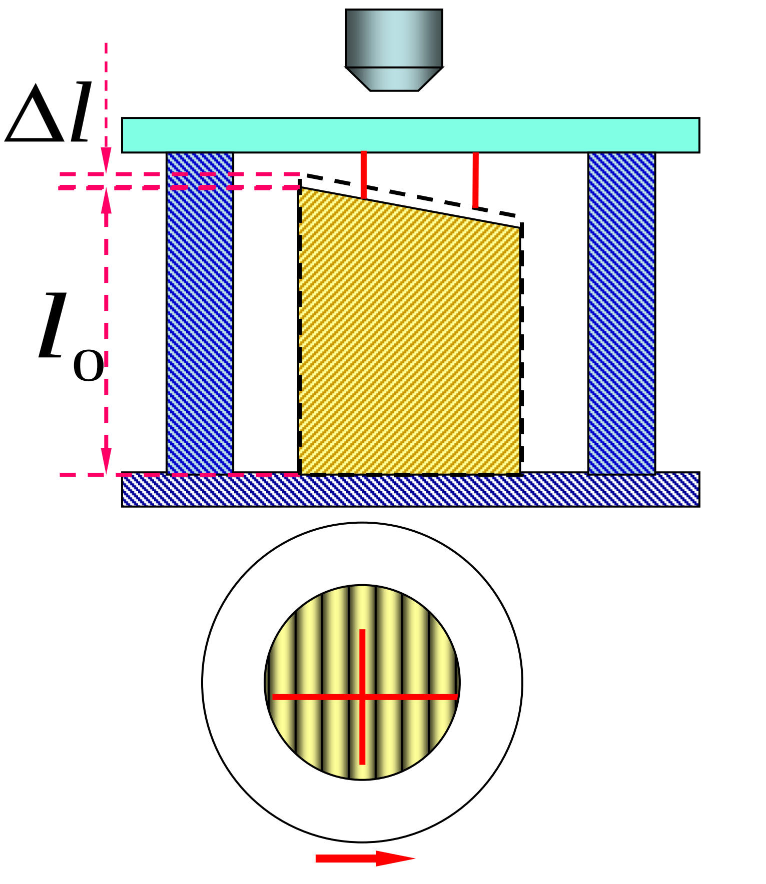
$$e = (2k+1)\lambda/4n \quad = 1.72(\mu m)$$

所以SiO_2薄膜的厚度为1.72 μm。

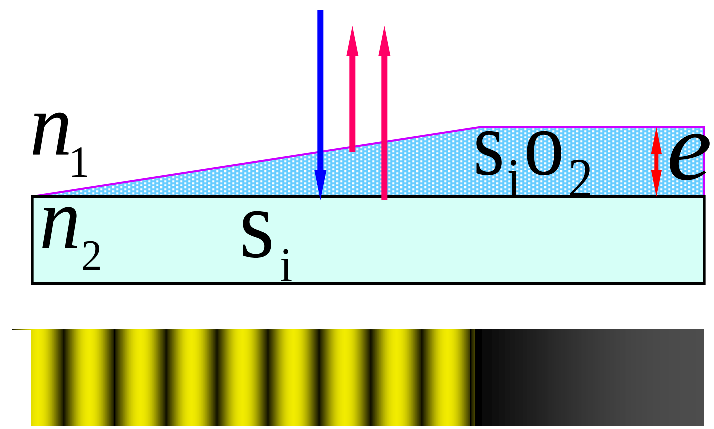
返回 退出

劈尖干涉的应用

1）干涉膨胀仪

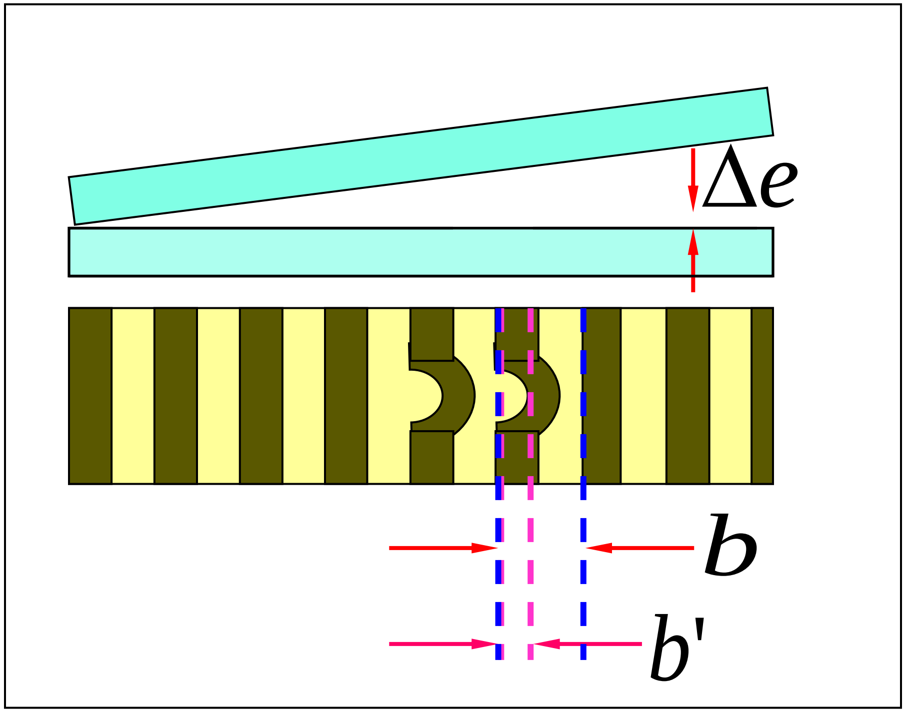


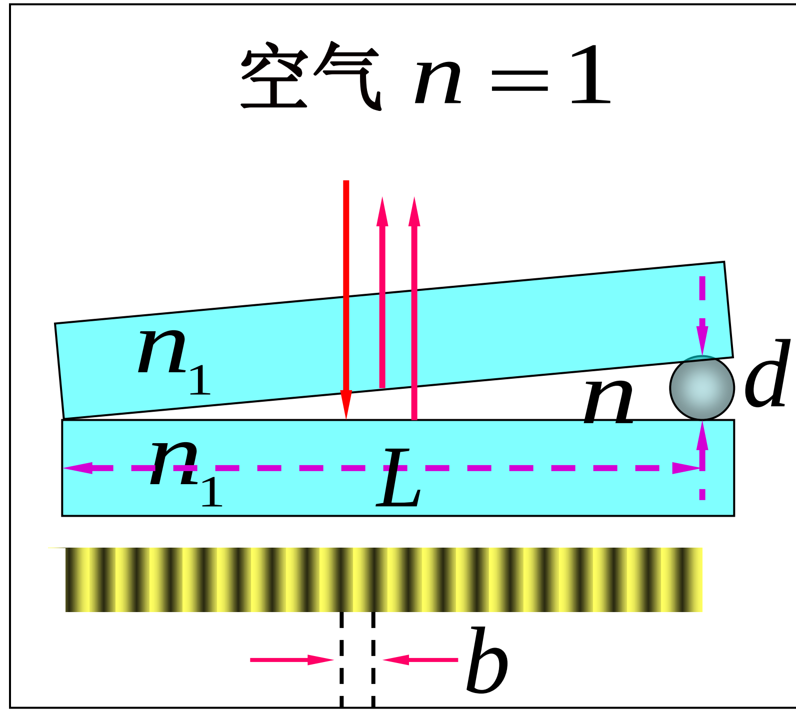
2）测膜厚



$$\frac{e}{L}=\frac{\lambda}{2nb}=\sin\theta$$

3）检验光学元件表面的平整度　　4）测细丝的直径



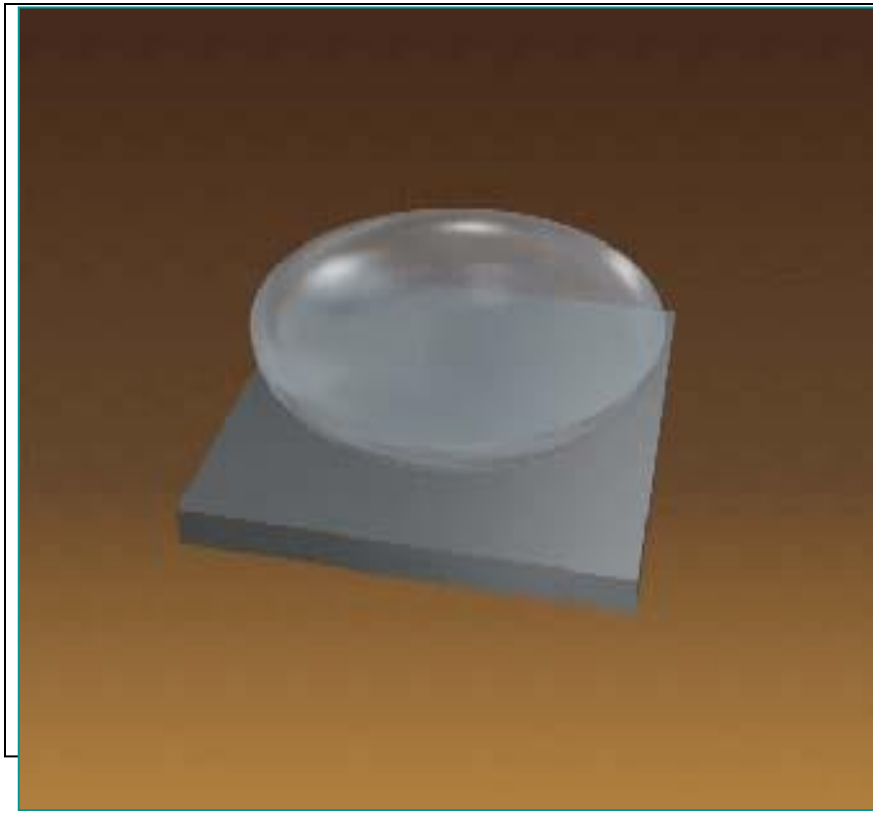


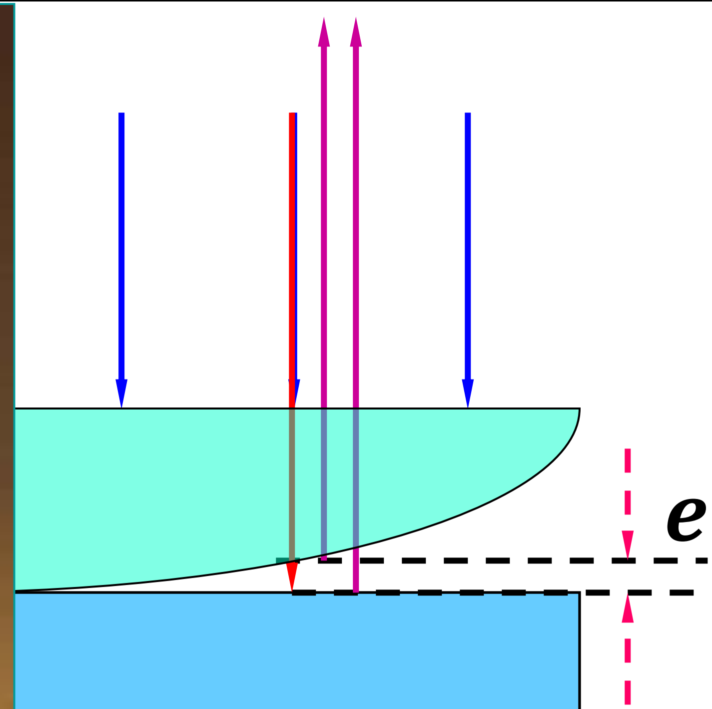
$$\Delta e = \frac{b'}{b}\frac{\lambda}{2} \approx \frac{1}{3}\cdot\frac{\lambda}{2} = \frac{\lambda}{6}$$

$$d = \frac{\lambda}{2n}\cdot\frac{L}{b}$$

二　牛顿环

由一块平板玻璃和一平凸透镜组成



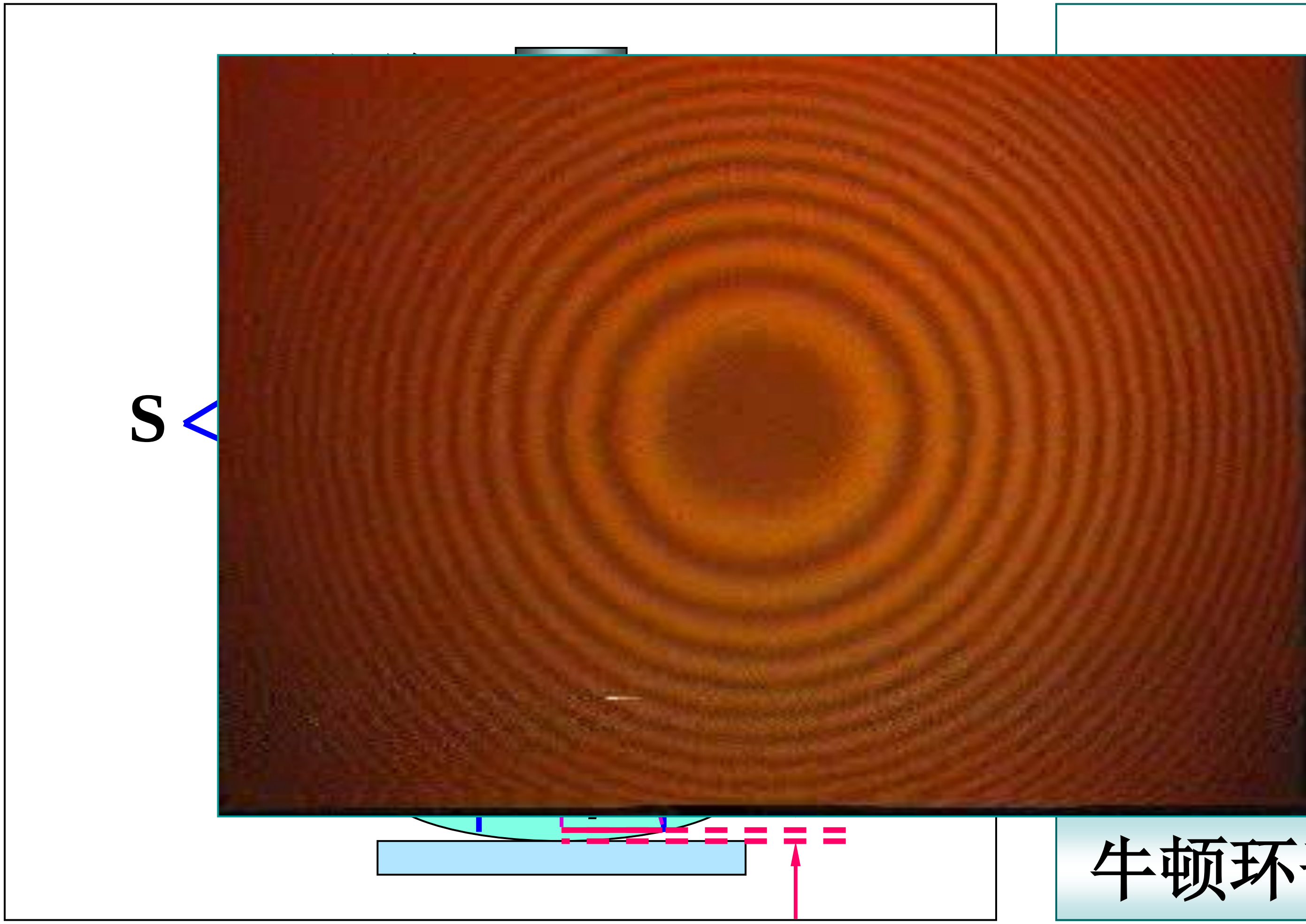


光程差

$$\Delta = 2e + \frac{\lambda}{2}$$

返回 退出

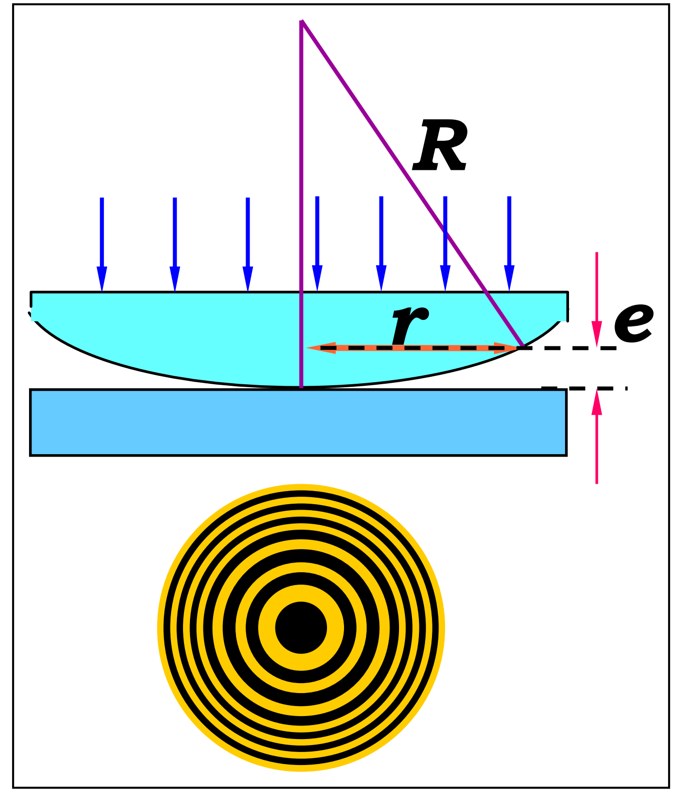
牛顿环实验装置



牛顿环干涉图样

光程差 $\Delta = 2e + \frac{\lambda}{2}$

$$\Delta = \begin{cases} k\lambda \quad (k = 1,2,\cdots) & \text{明纹} \\ (k+\frac{1}{2})\lambda \quad (k = 0,1,\cdots) & \text{暗纹} \end{cases}$$



$$r^2 = R^2 - (R-e)^2 = 2eR - e^2$$

$$\because R \gg e \quad \therefore e^2 \approx 0$$

$$r = \sqrt{2eR} = \sqrt{(\Delta - \frac{\lambda}{2})R} \Rightarrow \begin{cases} r = \sqrt{(k-\frac{1}{2})R\lambda} & \text{明环半径} \\ r = \sqrt{kR\lambda} & \text{暗环半径} \end{cases}$$

- 条纹特点

形状：同心圆环（由等厚条纹+几何结构决定）

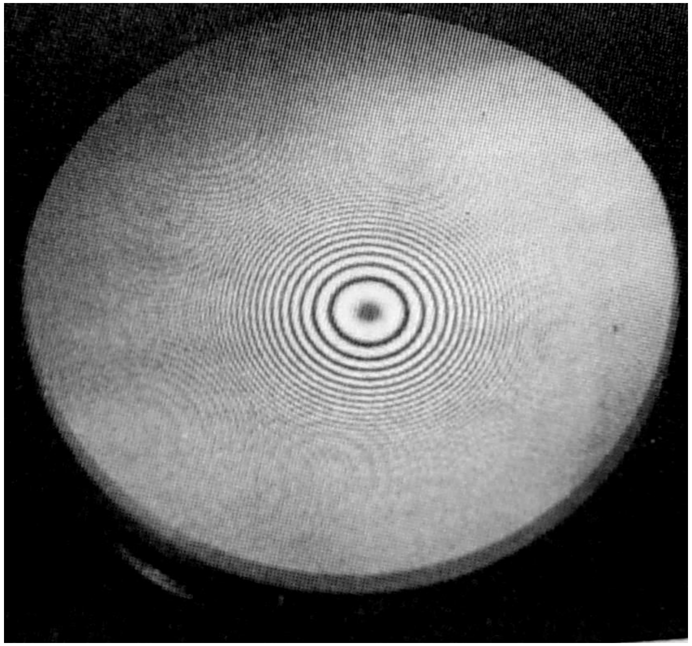
条纹级次分布： 圆心处为0级暗纹。

半径越大，级次越高。(与等倾干涉条纹不同)

若压紧透镜， 牛顿环的条纹向外扩张。

条纹间隔分布：内疏外密

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

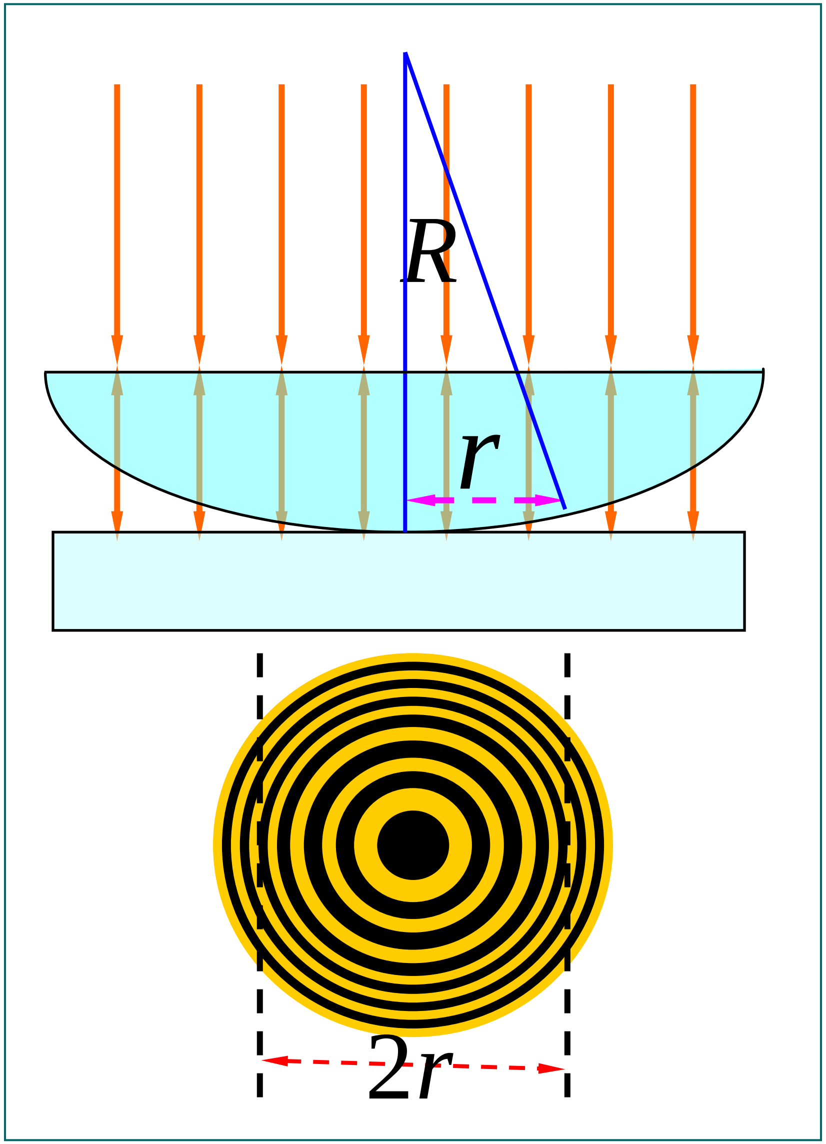


◆ 测量透镜的曲率半径

$$r_k^2 = kR\lambda$$

$$r_{k+m}^2 = (k+m)R\lambda$$

$$R = \frac{r_{k+m}^2 - r_k^2}{m\lambda}$$



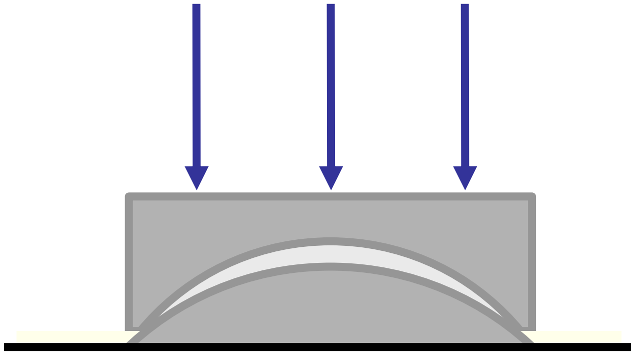
- 牛顿环的应用

$$r_{暗} = \sqrt{\frac{kR\lambda}{n}}$$

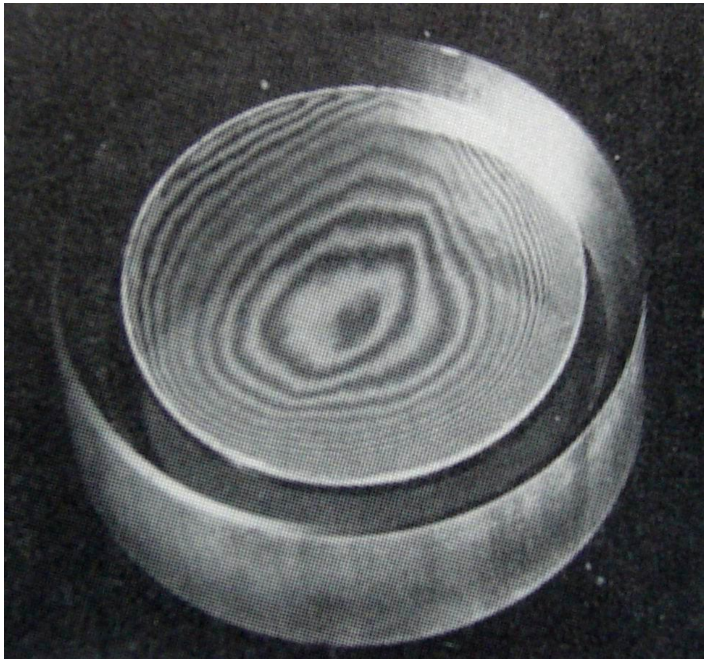
$$\Rightarrow \quad r_{k+m}^2 - r_k^2 = m\frac{R\lambda}{n}$$

测量第$k+m$和第k级暗条纹半径

$\Rightarrow$ 波长或球面透镜半径



检验透镜表面质量



返回 退出

例： 用氦氖激光器发出的波长为633nm的单色光做牛顿环实验，测得第个 k 暗环的半径为5.63mm，第 k+5 暗环的半径为7.96mm，求平凸透镜的曲率半径R.

解 $r_k = \sqrt{kR\lambda}$ $\qquad r_{k+5} = \sqrt{(k+5)R\lambda}$

$$5R\lambda = \left(r_{k+5}^2 - r_k^2\right)$$

$$R = \frac{r_{k+5}^2 - r_k^2}{5\lambda} = \frac{(7.96\text{mm})^2 - (5.63\text{mm})^2}{5\times 633\text{nm}} = 10.0\text{m}$$