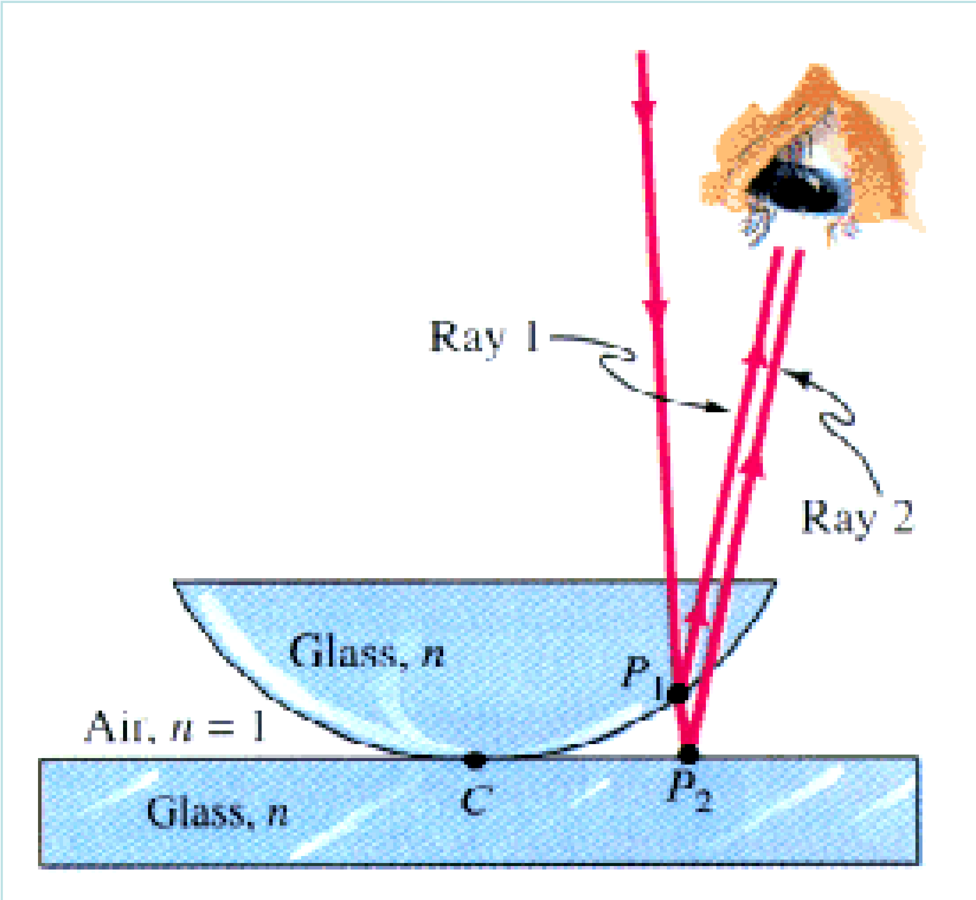
同学们好



光的干涉

干涉现象

干涉条件

干涉方法

双缝干涉

薄膜干涉

等倾干涉

等厚干涉

迈克耳逊干涉仪

重点内容：

1. 光程、光程差概念
2. 相干光条件
3. 获得相干光的方法
4. 干涉加强、减弱条件

一、光的相干性

当 $\Delta\varphi=\begin{cases}2k\pi & \text{相长} \sim \text{明} \\ (2k+1)\pi & \text{相消} \sim \text{暗}\end{cases}$ $k=0,\pm1,\pm2\cdots$

若 $\varphi_1=\varphi_2$ $\Delta\varphi=2\pi\dfrac{\Delta}{\lambda}$ $\Delta=\begin{cases}k\lambda & \text{明} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗}\end{cases}$ $k=0,\pm1,\pm2\cdots$

二、分波面两束光的干涉

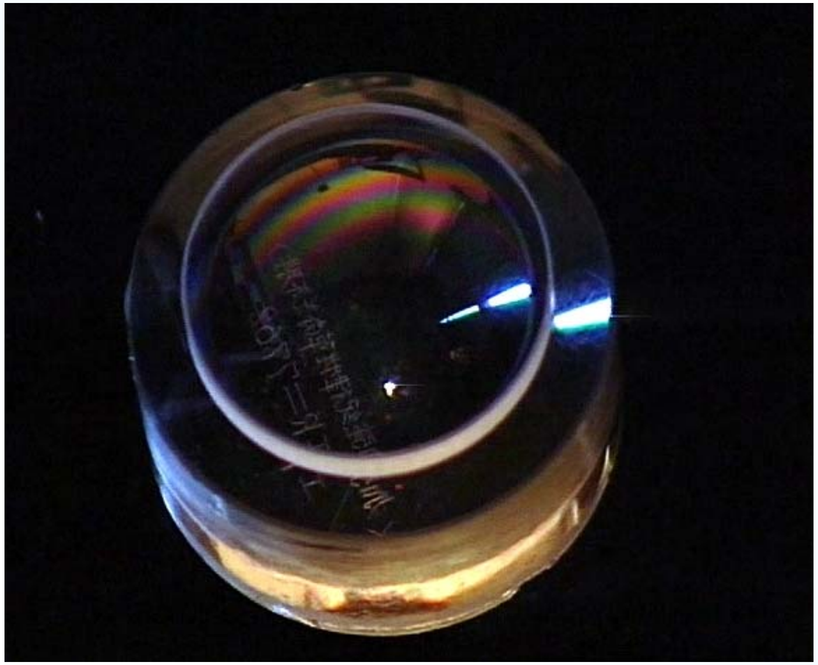
$$x=\begin{cases}\pm\dfrac{kD}{d}\lambda & \text{明} \quad k=0,1,2,\cdots \\ \pm(2k-1)\dfrac{D}{d}\cdot\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗} \quad k=1,2,\cdots\end{cases}$$

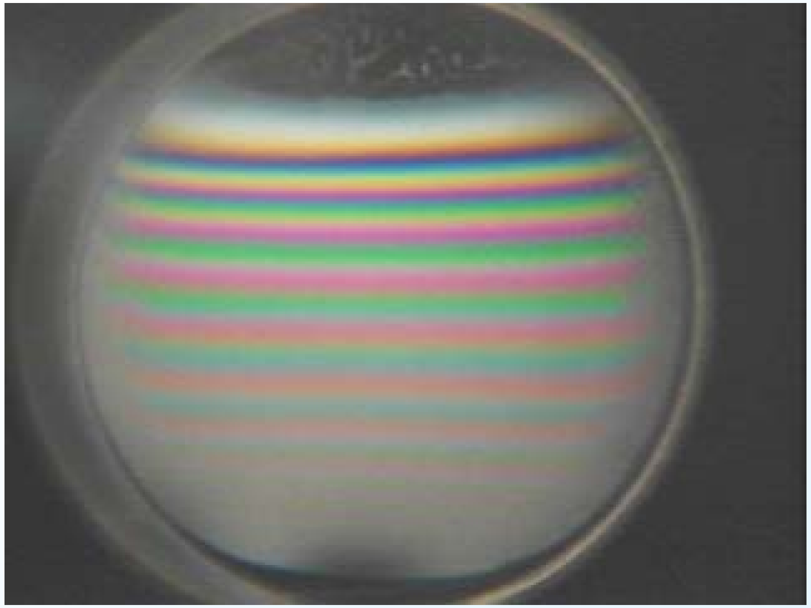
k 取值与条纹级次一致

薄膜干涉

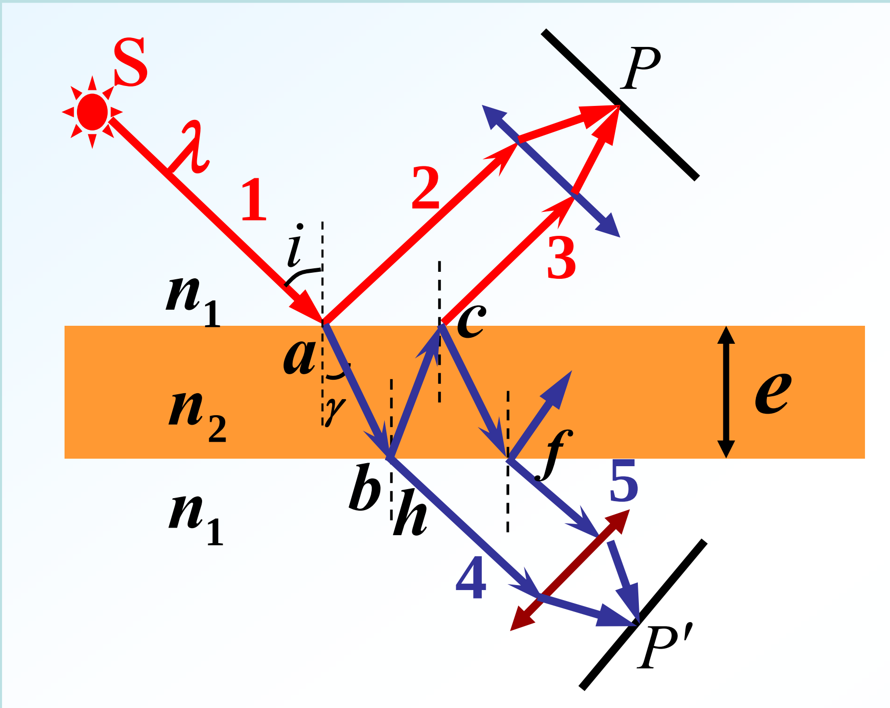
薄膜干涉(film interference): 介质薄膜受到照明而产生的干涉现象

分振幅干涉法: 利用薄膜界面将入射光分解而获得相干光束的方法。





一、薄膜干涉的一般性讨论



介质 n_1

薄膜 n_2, e

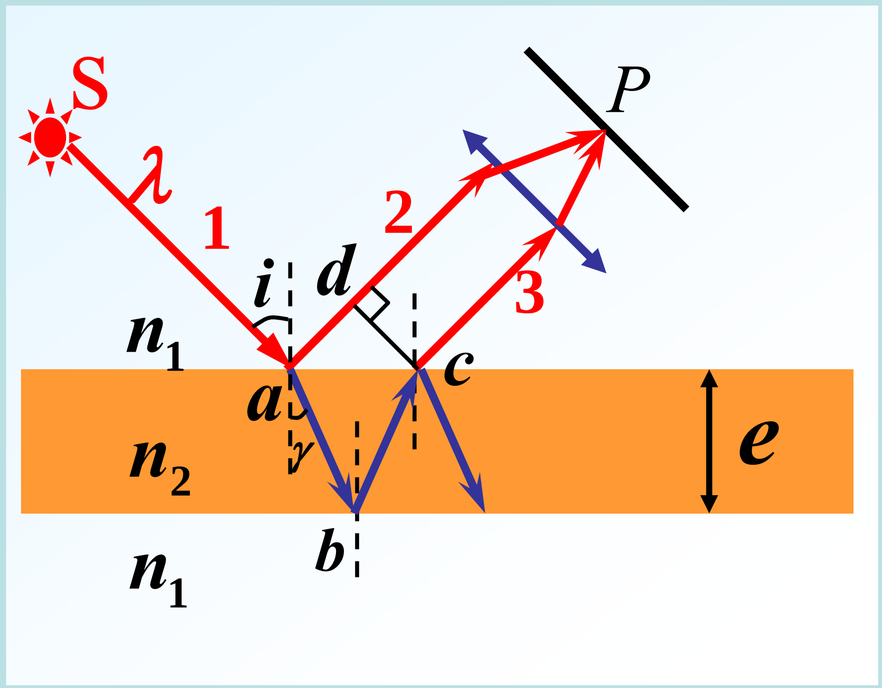
光波 λ、i、γ

入射光 1

反射光 2、3 相干光

透射光 4、5 相干光

相遇 $\begin{matrix} P \\ P' \end{matrix}$ 点光强取决于Δ



$$\Delta_{\text{反}}=n_2(\overline{ab}+\overline{bc})-n_1\overline{ad}+\boxed{\frac{\lambda}{2}}$$

由几何关系、折射定律

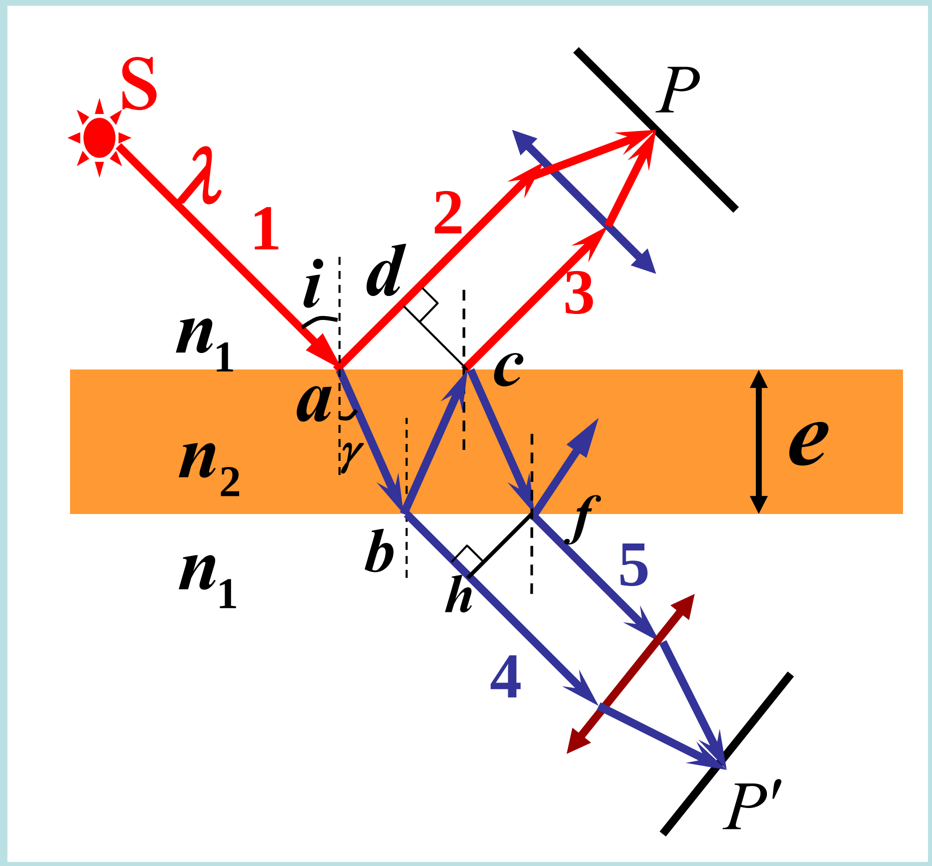
$$\Delta_{\text{反}}=2e\sqrt{n_2^2-n_1^2\sin^2 i}+\boxed{\frac{\lambda}{2}}$$

$\boxed{\dfrac{\lambda}{2}}$ 项：涉及反射，考虑有无半波损失

$$\left.\begin{array}{l} n_1<n_2 \quad 2\text{有} \quad 3\text{无} \\ \\ n_1>n_2 \quad 2\text{无} \quad 3\text{有} \end{array}\right\} \Delta_{\text{反}}\text{中有}\lambda/2\text{项}$$

$$\Delta_{透} = n_2(\overline{bc}+\overline{cf}) - n_1\overline{bh}$$

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



考虑半波损失:

$n_1 < n_2$　**4**无　**5**无

$n_1 > n_2$　**4**无　**5**两次

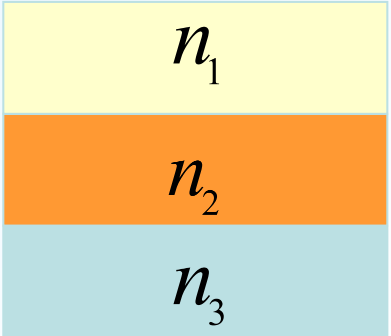
➡ $\Delta_{透}$中无$\lambda/2$项

明暗条纹条件:

无论$\Delta_{反}$，$\Delta_{透}$　$\Delta = \begin{cases} k\lambda & 明 \quad k = 1,2,3,\ldots \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & 暗 \quad k = 0,1,2,\ldots \end{cases}$

讨论 Δ公式中有无 $\lambda/2$ 项应该由具体情况决定

设



$n_1 < n_2, n_3 < n_2$ 　　$\Delta_{反}$有$\lambda/2$项

$n_1 > n_2, n_3 > n_2$ 　　$\Delta_{透}$无$\lambda/2$项

$n_1 > n_2 > n_3$ 　　$\Delta_{反}$无$\lambda/2$项　　$\Delta_{透}$有$\lambda/2$项

$n_1 < n_2 < n_3$

反射、透射光的光程差Δ总相差$\lambda/2$，

干涉条纹明暗互补,总的能量守恒。

二、增透膜和增反膜

增透膜： 在透镜表面镀一层厚度均匀的透明介质膜，使其上、下表面对某种色光的反射光产生相消干涉，其结果是减少了该光的反射，增加了它的透射.

照相机镜头

眼镜

增反膜：利用薄膜干涉原理, 使薄膜上、下表面对某种色光的反射光发生相长干涉, 其结果是增加了该光的反射, 减少了它的透射.

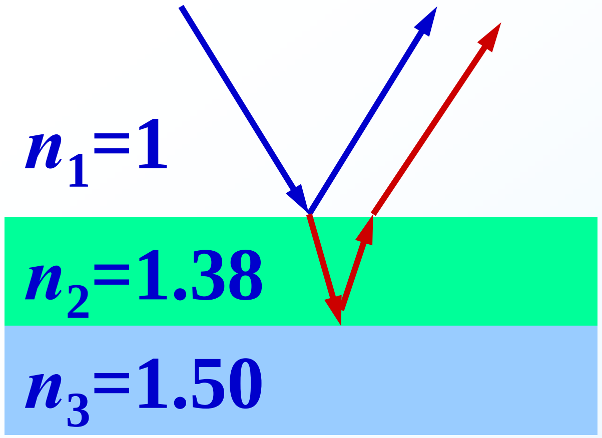
激光器谐振腔

宇航服

例1. 照相机透镜常镀上一层透明薄膜, 目的就是利用干涉原理减少表面的反射, 使更多的光进入透镜, 常用的镀膜物质是MgF_2, 折射率n=1.38（小于玻璃）, 为使可见光谱中λ=550nm的光有最小反射, 问膜厚e = ?

解: 假设光正入射，反射最小需

$$2n_2 e = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad k=0,1,2,\dots$$



对应于最小厚度, k = 0

得到

$$e_{\min} = \frac{\lambda}{4n_2} = \frac{550}{4\times 1.38}\text{nm} = 99.6\text{nm}$$

说明： 入射光能量一定, 反射光能量减弱必然使透射能量增强, 所以这种膜称为增透膜.

例2. 空气中肥皂膜(n=1.33), 厚为0.32μm. 如用白光垂直入射, 问肥皂膜呈现什么色彩?

解:

$$2n_2 e + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad \rightarrow \lambda = \frac{2ne}{k - 1/2}$$

$$k = 1, \quad \lambda_1 = 4ne = 1702\text{nm}$$

$$k = 2, \quad \lambda_2 = \frac{4}{3}ne = 567\text{nm}$$

$$k = 3, \quad \lambda_3 = \frac{4}{5}ne = 340\text{nm}$$

可见光范围400~760nm　　λ_2=567nm（绿光）

讨论

$$\Delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2 i} + \boxed{\frac{\lambda}{2}} = \begin{cases} k\lambda & k=1,2,\cdots \quad \text{明} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k=0,1,2,\cdots \quad \text{暗} \end{cases}$$

若λ、n_1、n_2一定，Δ与e、i有关

(1) 薄膜厚度均匀(e一定)，Δ随入射角 i 变化

同一入射角i 对应同一级干涉条纹
不同入射角 对应不同级次的条纹
干涉条纹为一组同心圆环

} 等倾干涉

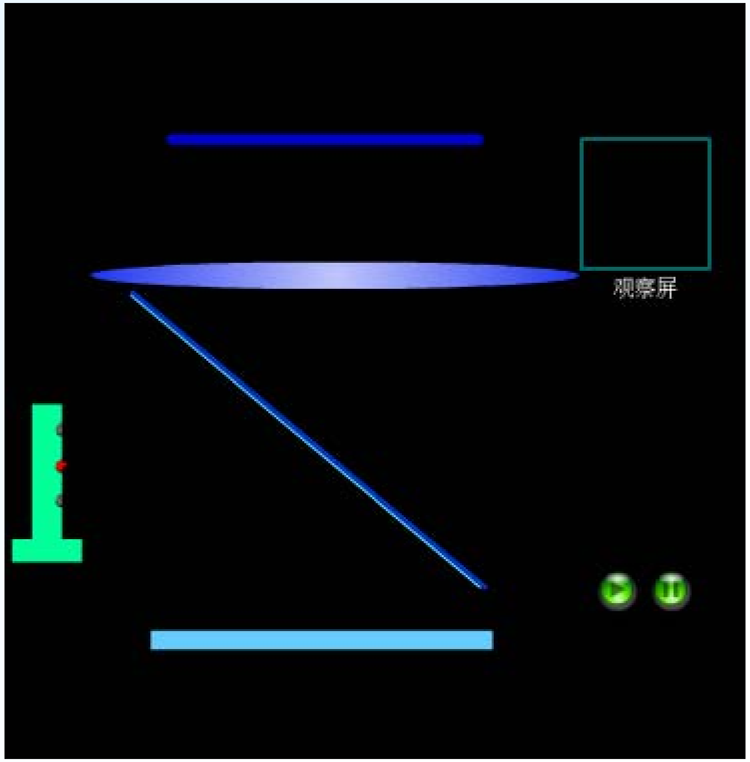
(2) 入射角i一定(平行光入射)，Δ随薄膜厚度e变化

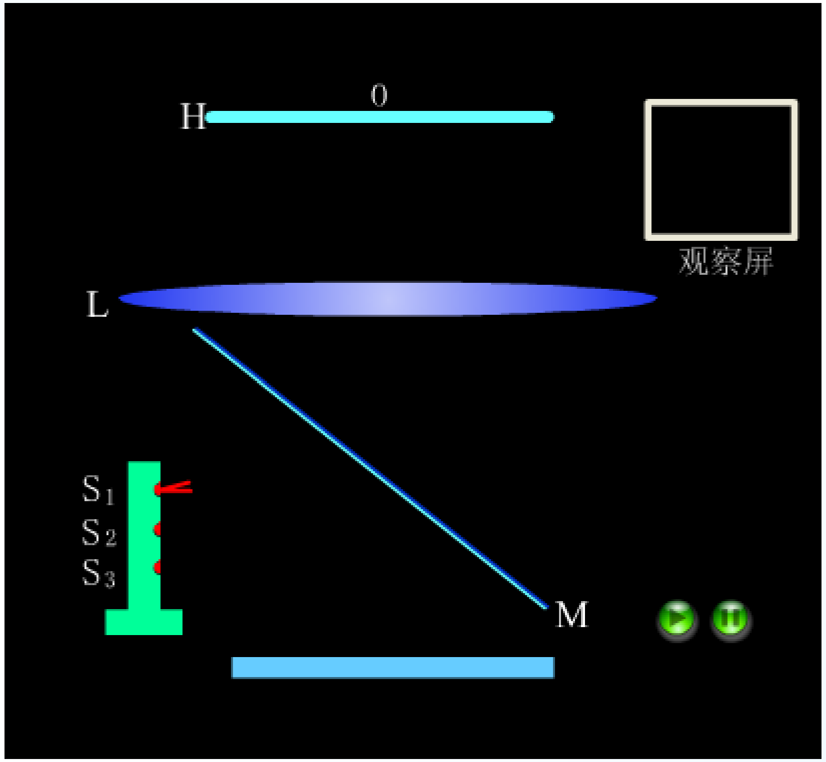
薄膜同一厚度处对应同一级干涉条纹
薄膜不同厚度处对应不同级次干涉条纹
条纹形状与薄膜等厚线相同

} 等厚干涉

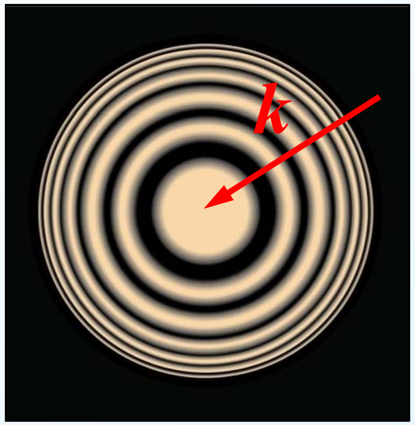
视频0:38

等倾干涉演示





等倾干涉条纹是一组内疏外密的同心圆环, 越向内, 级次越高. 入射角减小, 圆半径减小.

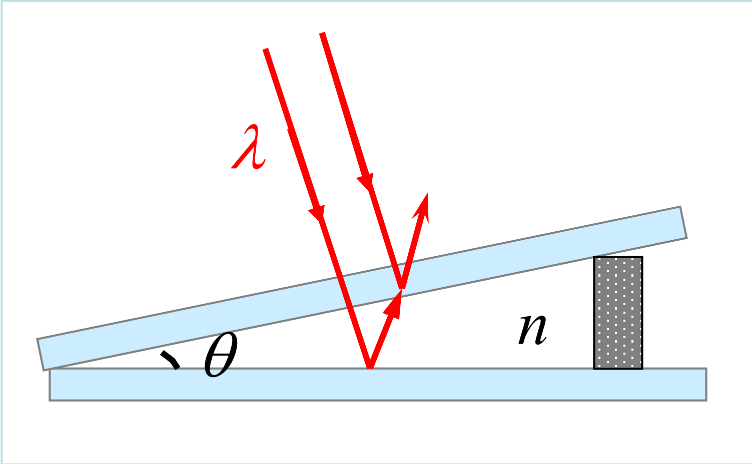


三、薄膜的等厚干涉

1.劈尖膜(wedge film)的干涉

装置:

两光学平板玻璃一端接触, 另一端垫一薄纸或细丝



明暗条纹条件:

单色、平行光垂直入射

$i = 0$

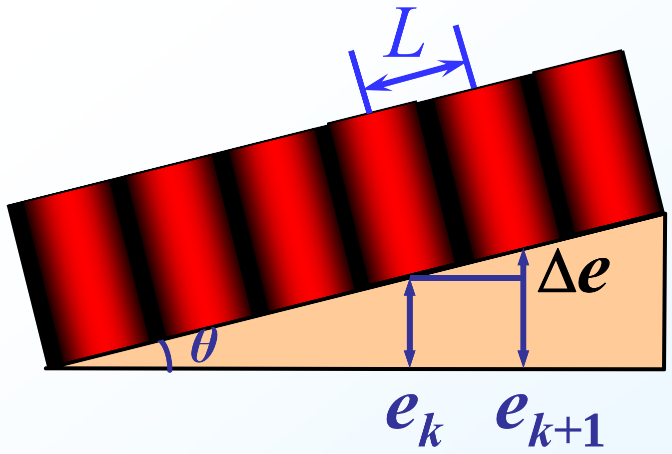
$$\Delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = 2ne + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & \text{明} \quad k = 1、2\cdots \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗} \quad k = 0、1、2\cdots \end{cases}$$

$$\varDelta = 2ne + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & \text{明} \quad k = 1、2\cdots \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗} \quad k = 0、1、2\cdots \end{cases}$$

条纹特点:

形态：平行于棱边, 明、暗相间条纹

棱边处 $e = 0$ $\varDelta = \dfrac{\lambda}{2}$ 为暗纹



相邻明(暗)纹对应薄膜厚度差:

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

条纹宽度(两相邻暗纹间距) $L = \dfrac{\Delta e}{\sin\theta} = \dfrac{\lambda}{2n\sin\theta} \approx \dfrac{\lambda}{2n\theta}$

变化： $L=\dfrac{\Delta e}{\sin\theta}=\dfrac{\lambda}{2n\sin\theta}\approx\dfrac{\lambda}{2n\theta}$

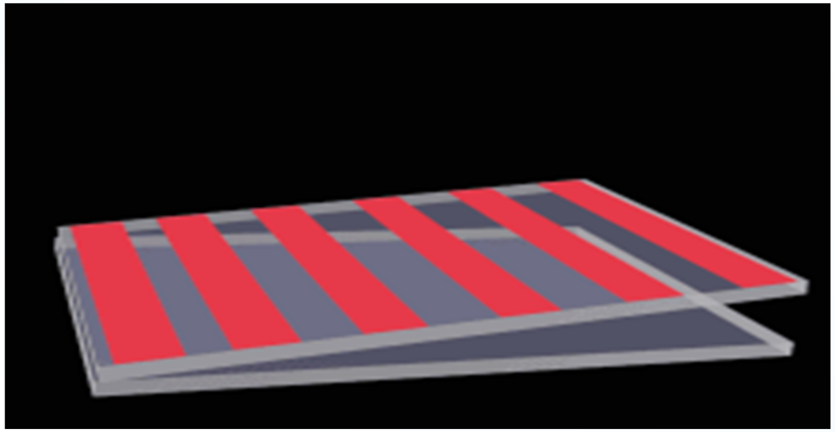
n、λ一定，$\theta\uparrow$ $L\downarrow$ 条纹变密

n、θ一定，$\lambda\uparrow$ $L\uparrow$ $L_{红}>L_{紫}$ 白光入射出现彩条

λ、θ一定，$n\uparrow$ $L\downarrow$ 空气劈尖充水条纹变密

动态 **思考**

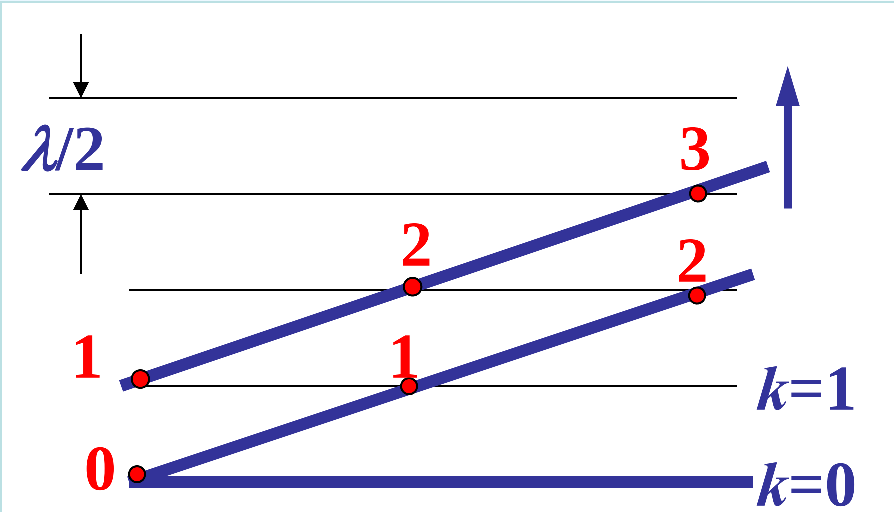
(1) 劈尖夹角变化，条纹如何变化？



θ变小条纹变宽

条纹向远离棱边方向移动

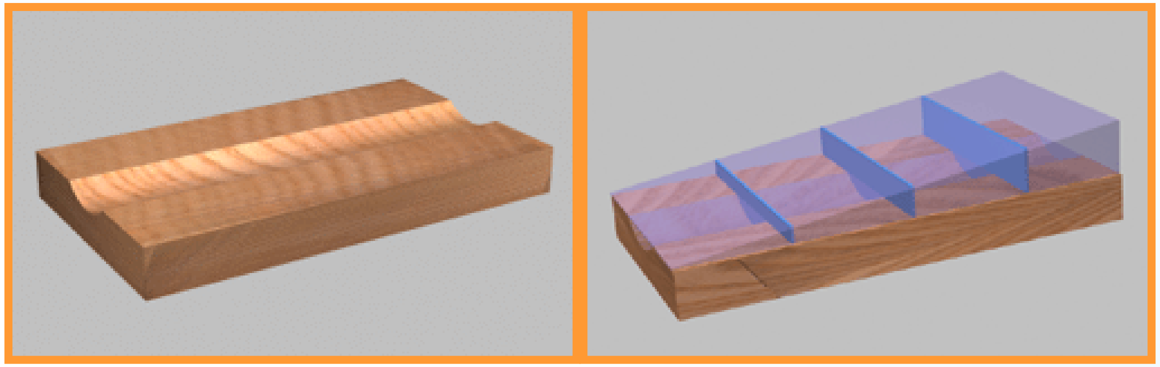
(2) 劈尖上表面平行上移, 条纹如何变化?

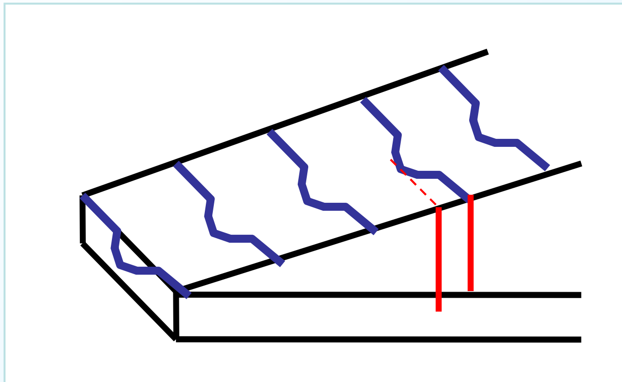


θ不变 条纹宽度不变

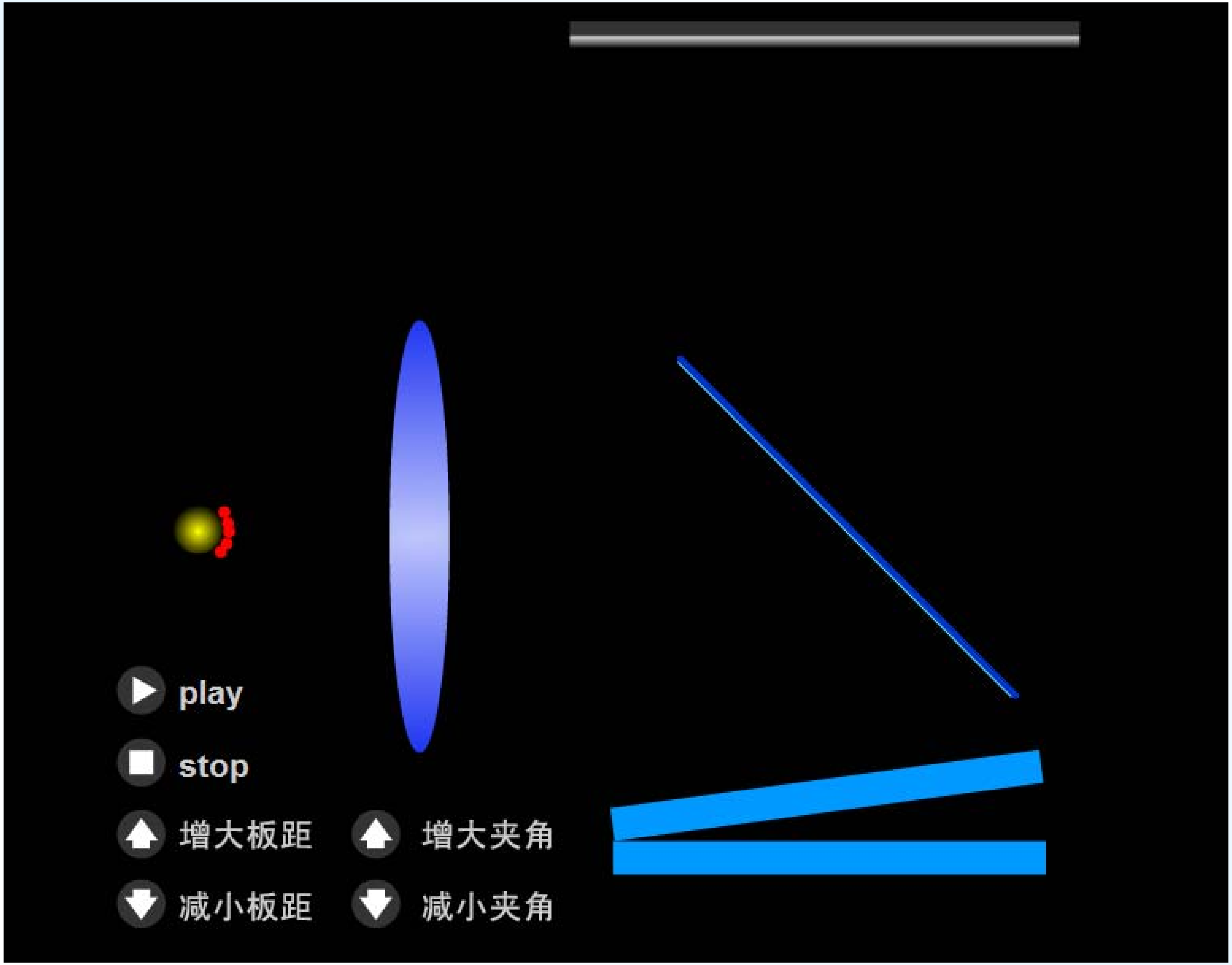
条纹向棱边方向移动

(3) 劈尖底面有一凹槽, 条纹形状如何?



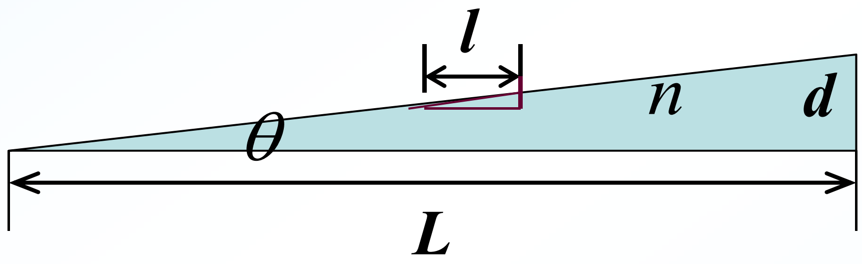


等厚条纹向棱边方向凸起


play
stop
增大板距
增大夹角
减小板距
减小夹角

应用一：薄膜端部厚度d的测量

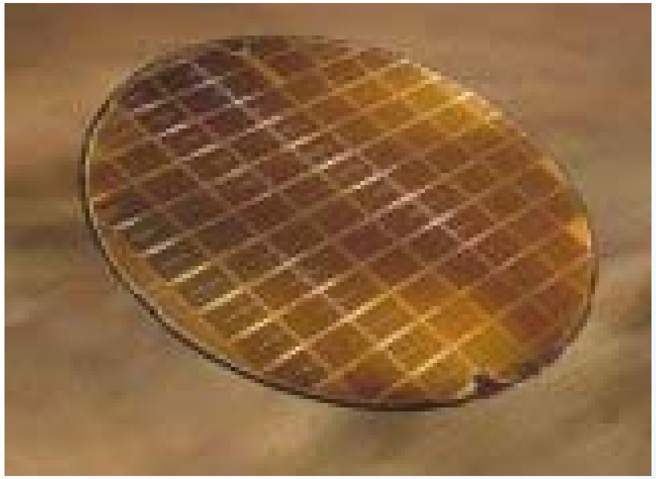
测量原理



$$l=\frac{\lambda}{2n\theta}=\frac{\lambda}{2nd/L}$$

$$d=\frac{\lambda L}{2nl}$$

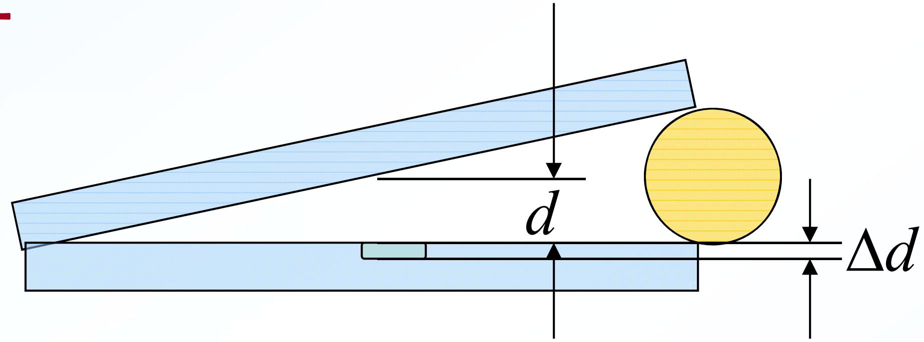
条纹数 $N=\frac{L}{l}$



薄膜厚度：$d=\frac{\lambda}{2n}N=\Delta e\cdot N$

在半导体元件生产中，测定硅片上的二氧化硅薄膜厚度的常用方法是：将薄膜的一部分磨成劈形膜，通过观察垂直入射光在其上面产生的干涉条纹，计算出厚度.

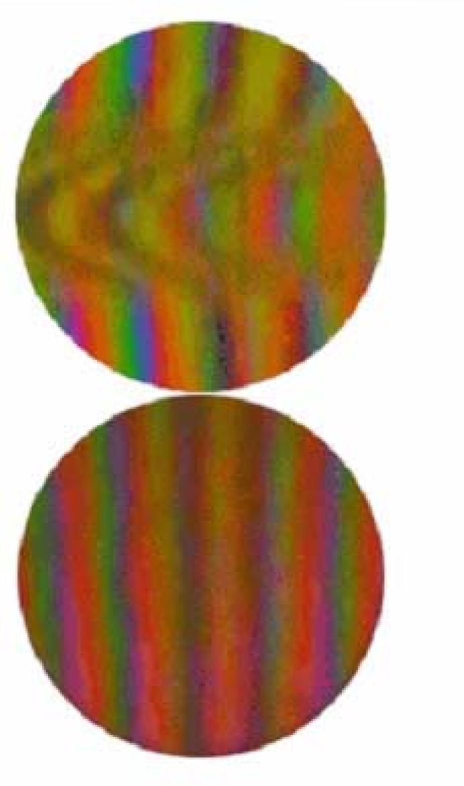
应用二:光学表面检查



$$2d + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

$$2(d + \Delta d) + \frac{\lambda}{2} = (k + \Delta k)\lambda$$

$$\boxed{\Delta d = \frac{\lambda}{2}\Delta k}$$



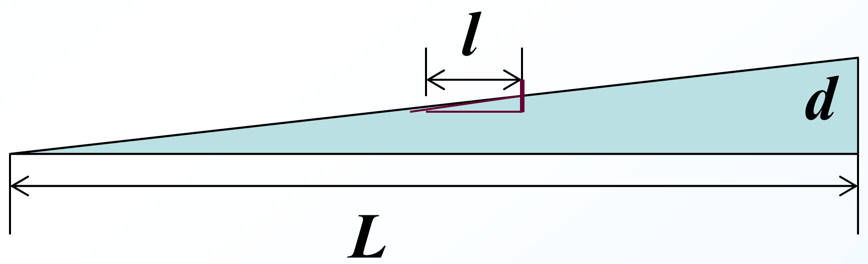
说明

Δk反映了偏离直线条纹的程度.

例3. 有一玻璃劈尖，放在空气中，劈尖夹角 $\theta = 8\times10^{-5}$ rad. 波长 λ=0.589μm的单色光垂直入射时，测得干涉条纹的宽度为 $l = 2.4$mm，求玻璃的折射率.

解：

$$l = \frac{\lambda}{2n\theta}$$

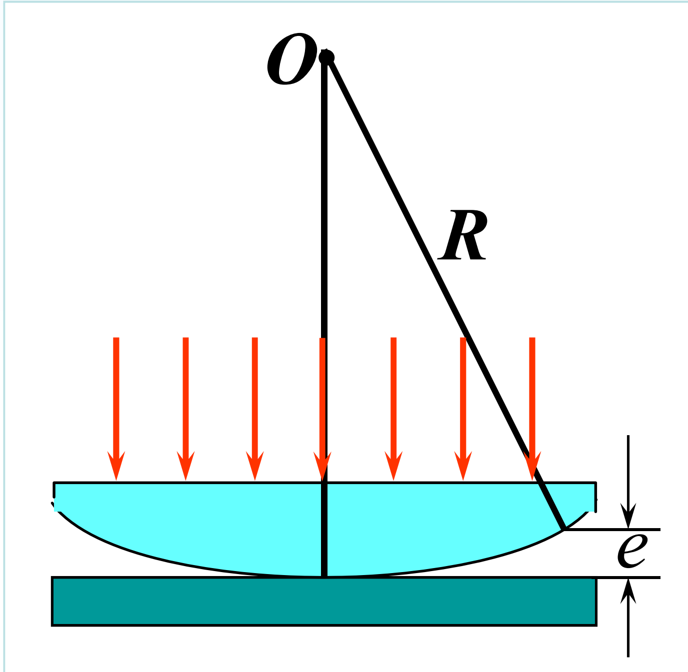


$$n = \frac{\lambda}{2\theta l}$$

$$= \frac{5.89\times10^{-7}}{2\times8\times10^{-5}\times2.4\times10^{-3}} = 1.53$$

2. 牛顿环

装置： 平板玻璃上放置曲率半径很大的平凸透镜



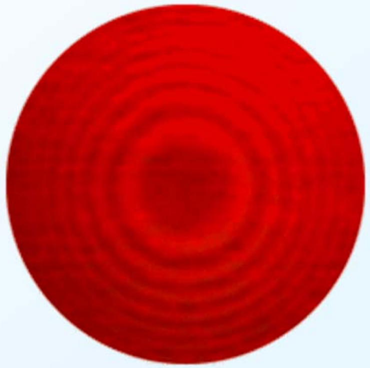
明暗纹条件：

单色平行光垂直入射 $i=0$

$$\Delta = 2ne + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & \text{明} \quad k = 1、2、3\cdots \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗} \quad k = 0、1、2\cdots \end{cases}$$

条纹特点：

以接触点为中心的明暗相间的同心圆环

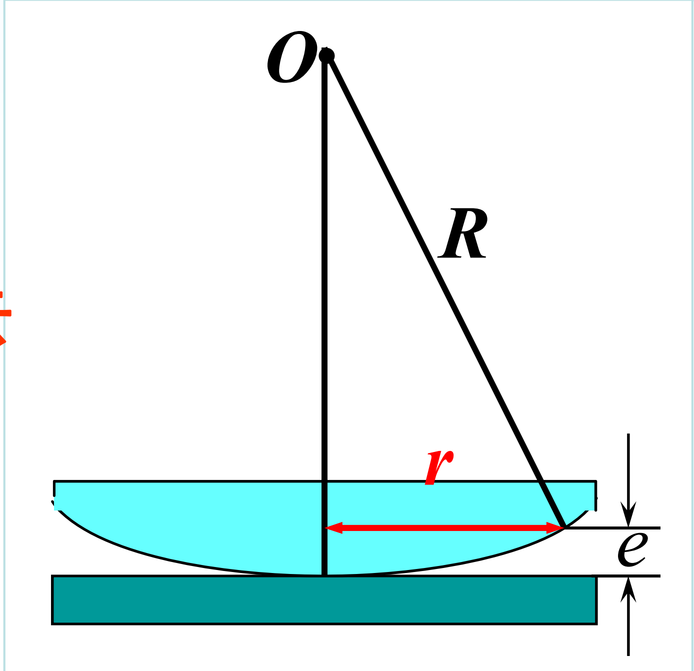


中心 $e=0$ $\Delta = \dfrac{\lambda}{2}$ 暗斑

明暗纹半径：

$$R^2 = r^2 + (R-e)^2 = r^2 + R^2 - 2Re + \underline{e^2}$$

略去

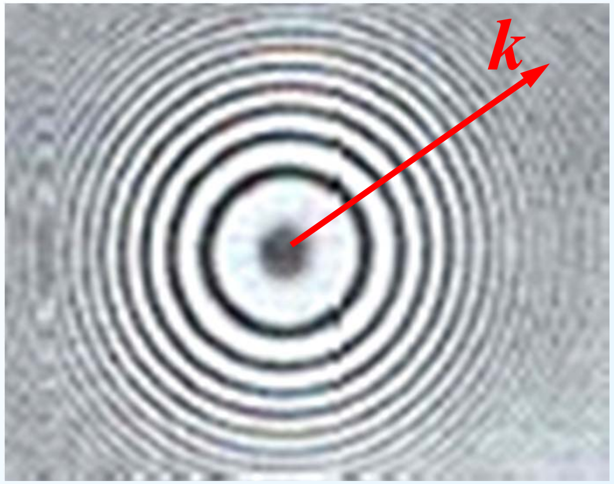


得 $\boxed{e = \dfrac{r^2}{2R}}$ 代入Δ得

$$\boxed{r = \begin{cases} \sqrt{\dfrac{(2k-1)R\lambda}{2n}} \\ \sqrt{\dfrac{kR\lambda}{n}} \end{cases}}$$

明 $k = 1、2、3\cdots$

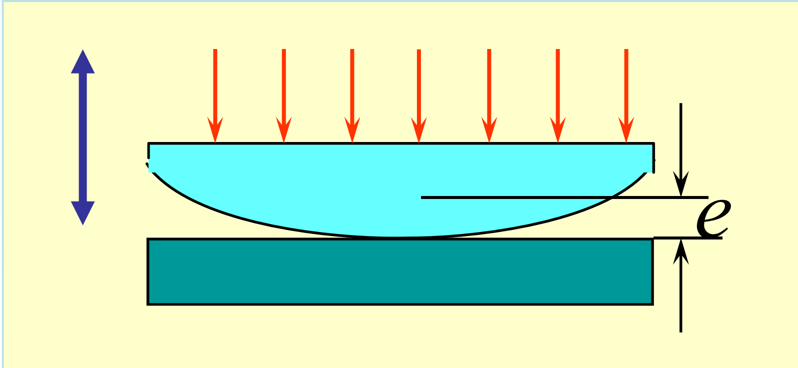
暗 $k = 0、1、2\cdots$



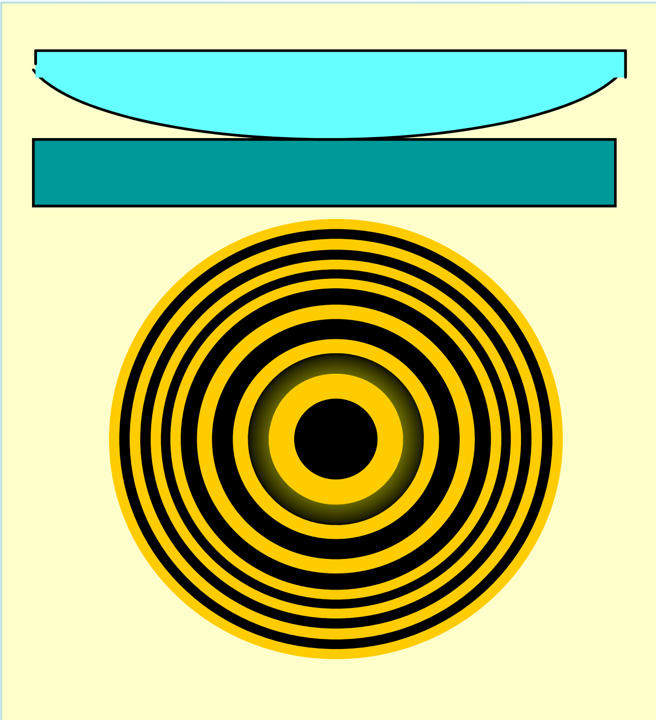
$r \propto \sqrt{k}$ 条纹内疏外密

$r \propto \sqrt{\lambda}$ 白光照射出现彩环

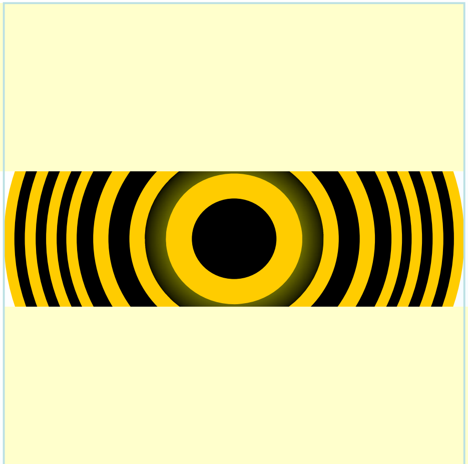
平凸透镜上(下)移动, 将引起条纹收缩(扩张)



条纹的形状取决于等厚膜线的形状



等价于角度逐渐增大的劈尖



$$L \propto \frac{1}{\theta} \qquad \Delta r \propto \frac{1}{\theta}$$

等厚干涉

牛顿环的应用——曲率半径测量

用钠灯(λ = 589.3nm)观察牛顿环, 看到第k条暗环的半径为r = 4mm, 第k+5条暗环半径r = 6mm,求所用平凸透镜的曲率半径R.

解:

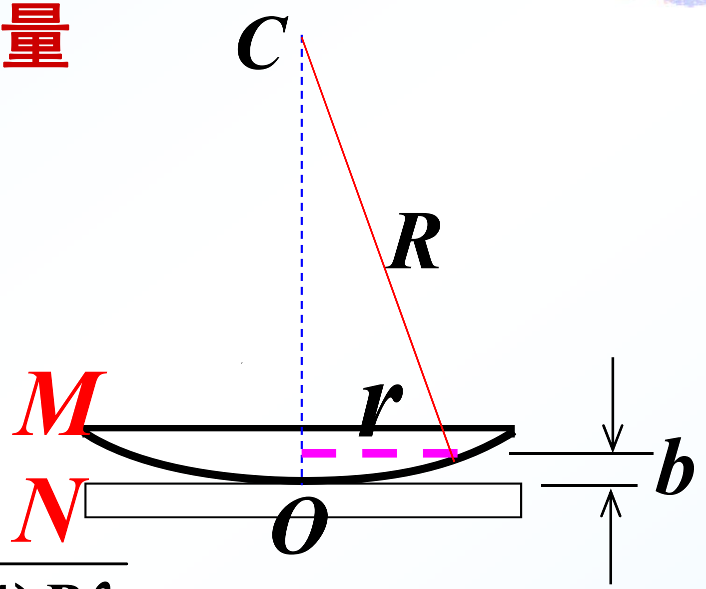
$$r_k = \sqrt{k R\lambda}$$

$$r_{k+5} = \sqrt{(k+5) R\lambda}$$

联立求解: $R = 6.79\ \mathrm{m} \qquad k = 4$

牛顿环的应用——波长测量

已知：用紫光照射，借助于低倍测量显微镜测得由中心往外数第 k 级明环的半径 $r_k = 3.0\times10^{-3}$ m, k 级往上数第16 个明环半径 $r_{k+16} = 5.0\times10^{-3}$ m，平凸透镜的曲率半径 R=2.50m



求：紫光的波长.

解： 根据明环半径公式：

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

$$r_{k+16} = \sqrt{\frac{[2\times(k+16)-1]R\lambda}{2}}$$

$$r_{k+16}^2 - r_k^2 = 16R\lambda$$

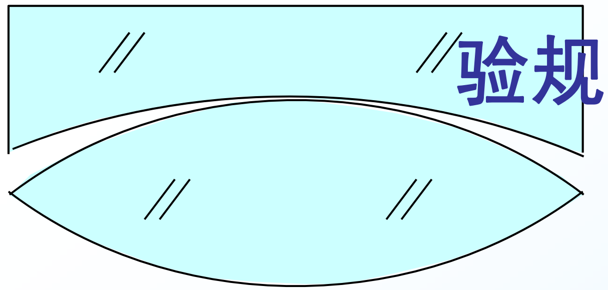
$$\lambda = \frac{(5.0\times10^{-2})^2 - (3.0\times10^{-2})^2}{16\times2.50} = 4.0\times10^{-7}\,\text{m}$$

牛顿环的应用

测量介质折射率

检测光学镜头表面曲率是否合格

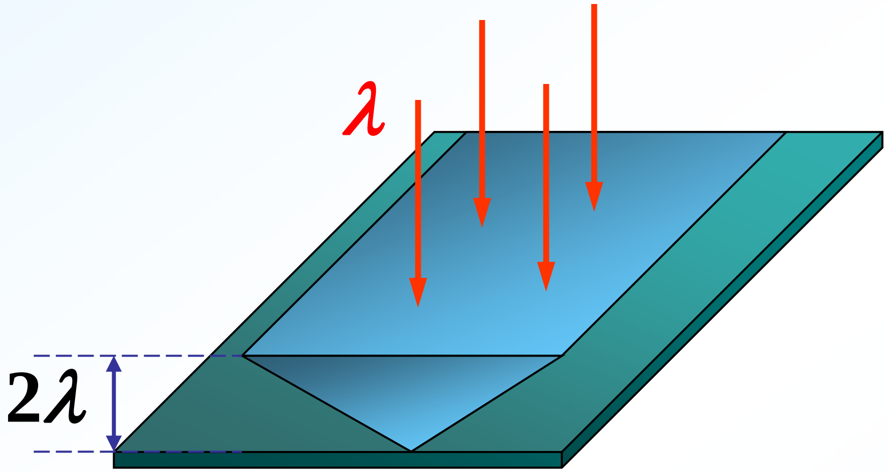
将玻璃验规盖于待测镜头上, 两者间形成空气薄层, 因而在验规的凹表面上出现牛顿环, 当某处光圈偏离圆形时, 则该处有不规则起伏.

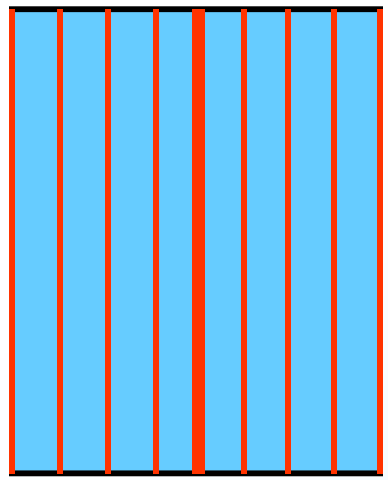


练习

1.平行光垂直入射图中装置, 画出反射光暗条纹并标明级次

(1)





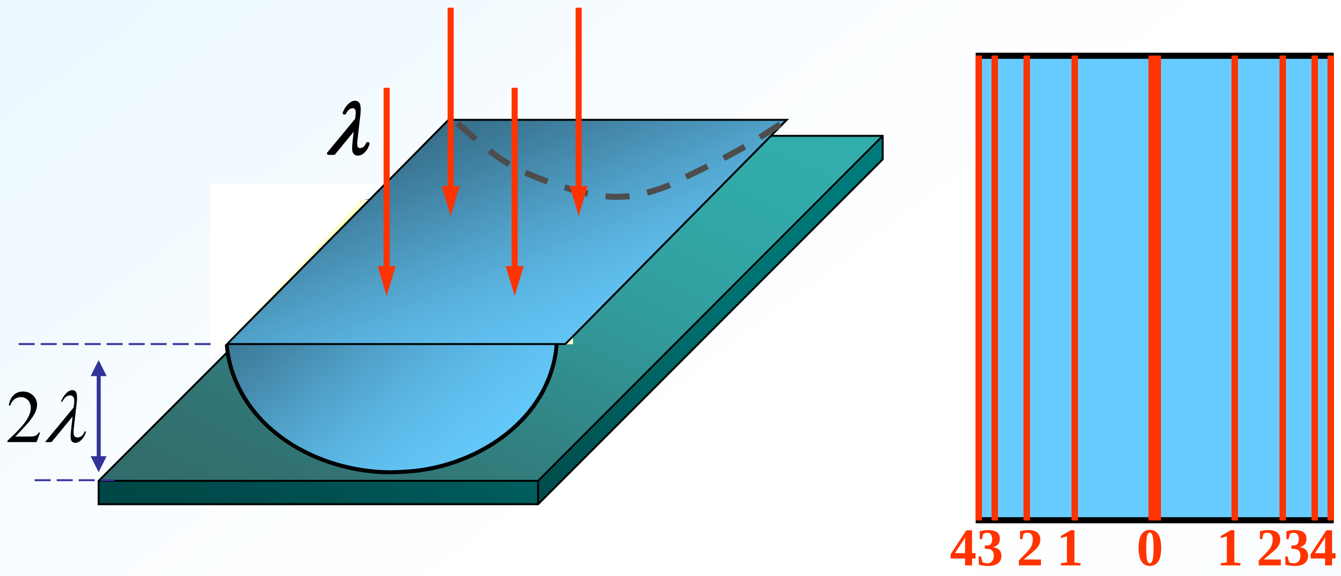
$$\Delta = 2e + \frac{\lambda}{2}$$

中心 $e = 0$　$\Delta = \frac{\lambda}{2}$　暗 $k = 0$

边缘 $e = 2\lambda$　$\Delta = \frac{9}{2}\lambda$　暗 $k = 4$

平行于棱边, 等间距直条纹.

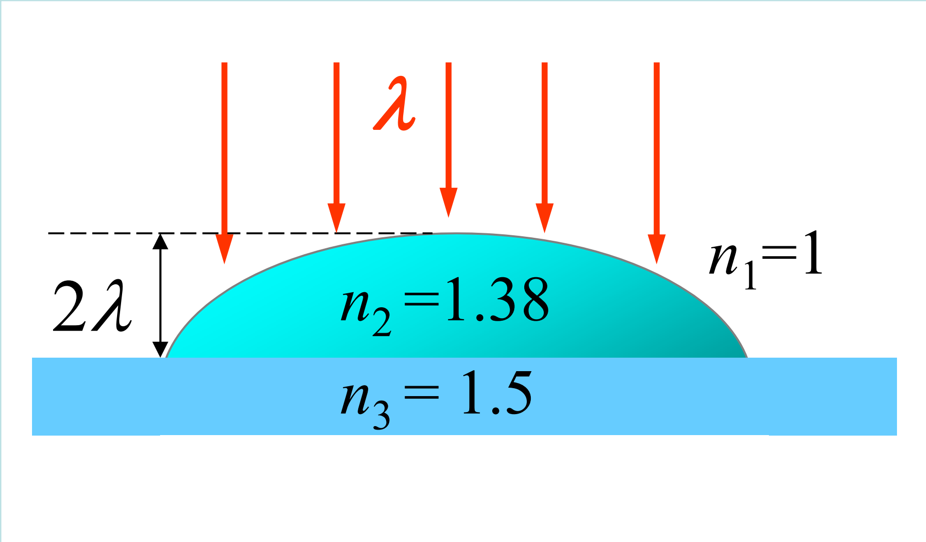
(2)

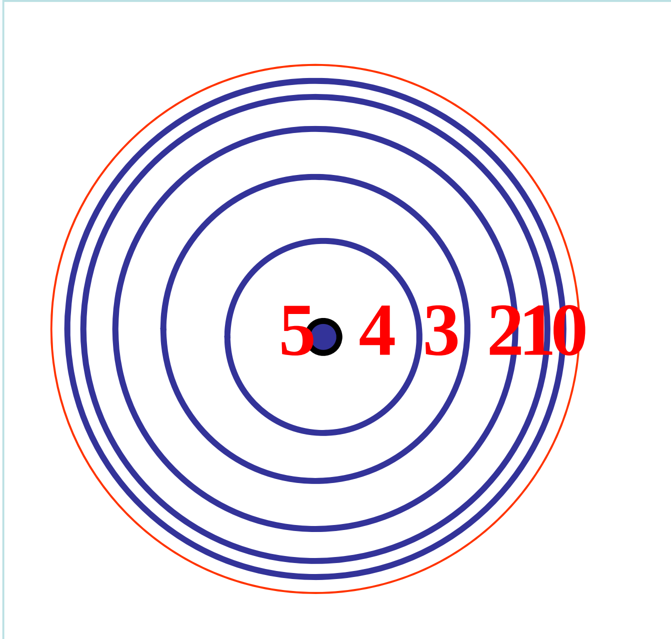


$$\Delta = 2e + \frac{\lambda}{2} \begin{cases} \text{中心} \quad \Delta = \dfrac{\lambda}{2} & \text{暗 } k = 0 \\ \text{边缘} \quad \Delta = \dfrac{9}{2}\lambda & \text{暗 } k = 4 \end{cases}$$

平行于棱边, 内疏外密直条纹.

(3)



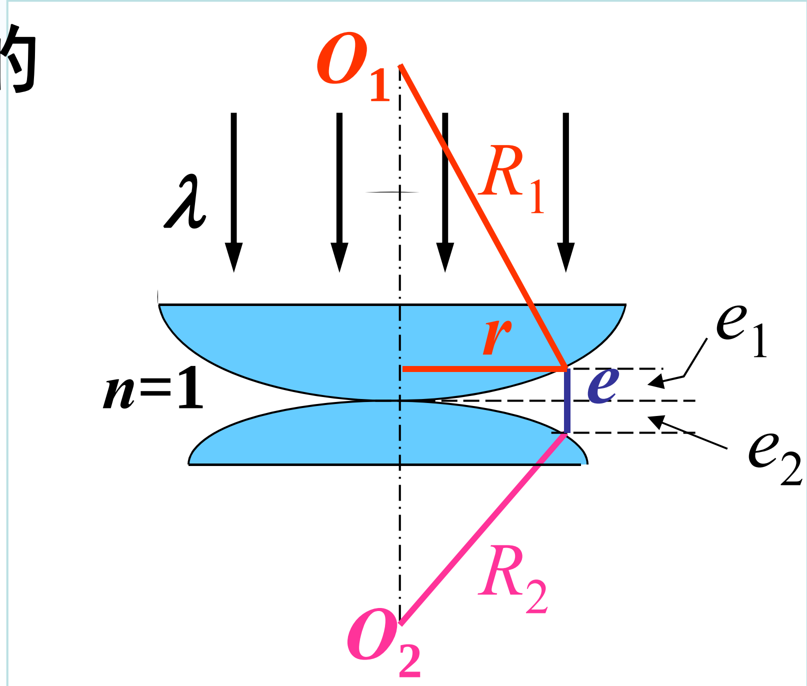


Δ中有无$\lambda/2$项？

$$\Delta = 2n_2 e \begin{cases} \text{边沿}\ e = 0 \quad \Delta = 0 \quad \text{明}\ k = 0 \\ \text{中心}\ e = 2\lambda \quad \Delta = 4n_2\lambda \approx 5\cdot 5\lambda\ \text{暗}\ k = 5 \end{cases}$$

等厚线： 圆环，条纹为内疏外密同心圆，共6条暗纹.

2. 推导图中情况下空气膜形成的干涉条纹的明、暗环半径公式.



解：膜厚如图e

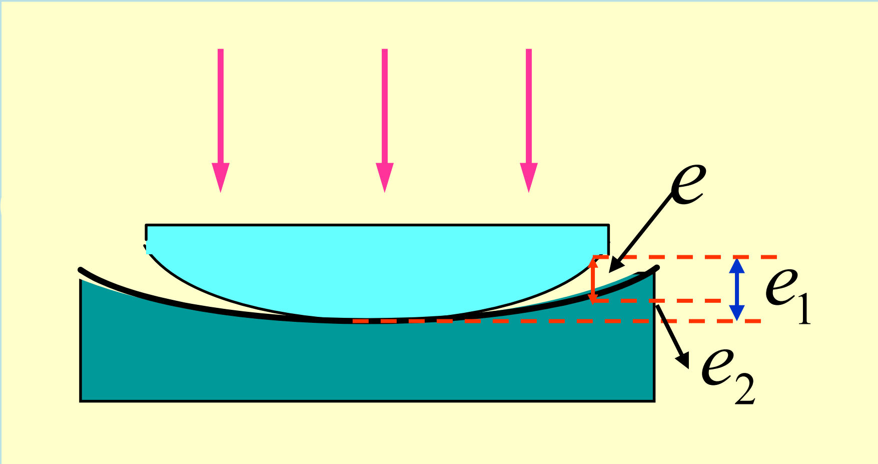
$$\Delta = 2e + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & \text{明} \quad k = 1、2\cdots \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗} \quad k = 0、1、2\cdots \end{cases}$$

将 $e = e_1 + e_2 = \dfrac{r^2}{2R_1} + \dfrac{r^2}{2R_2}$ 代入得

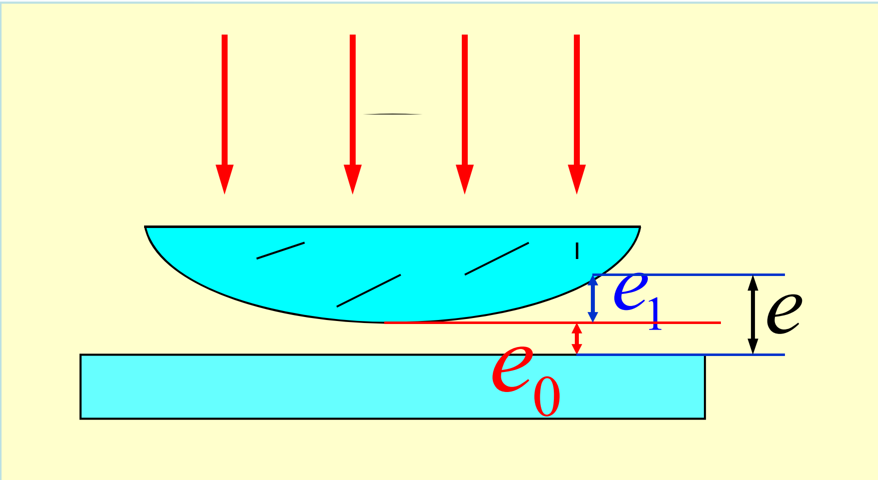
$$r_{明} = \sqrt{\frac{(2k-1)R_1R_2\lambda}{2(R_1+R_2)}} \quad k = 1,2,3\cdots$$

$$r_{暗} = \sqrt{\frac{kR_1R_2\lambda}{R_1+R_2}} \quad k = 0,1,2,3\cdots$$

练习：

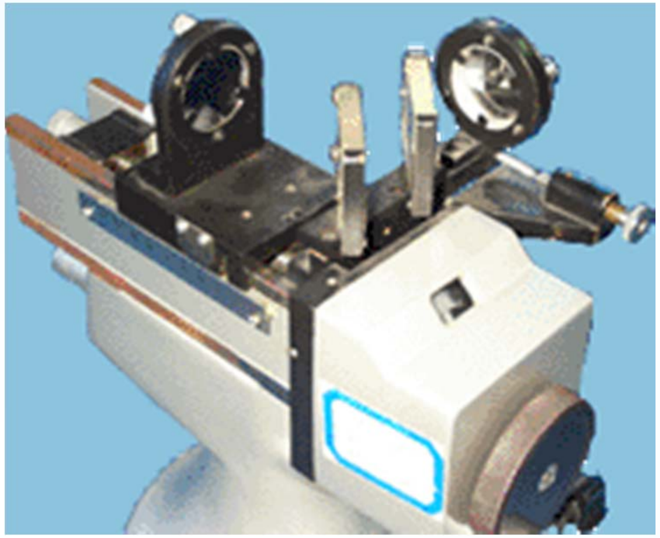


$$e = e_1 - e_2 = \frac{r^2}{2R_1} - \frac{r^2}{2R_2}$$



$$e = e_1 + e_0 = \frac{r^2}{2R} + e_0$$

四、迈克耳逊干涉仪

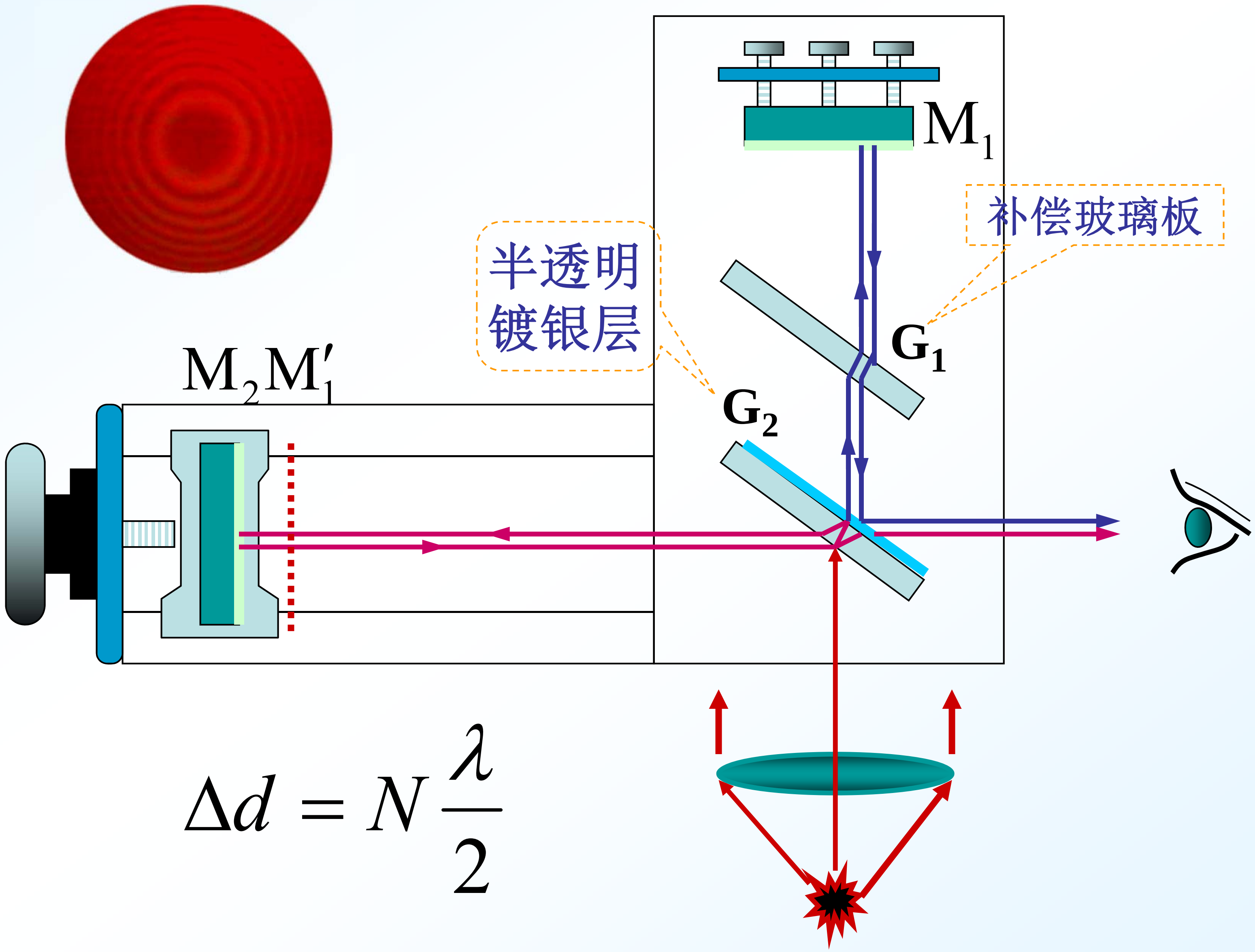


迈克耳逊干涉仪(Michelson interferometer)是利用光的干涉精确测量长度和长度变化的仪器。

迈克耳逊和莫雷曾利用它进行过著名的否定旧以太说的实验, 在物理学中占有一定地位.

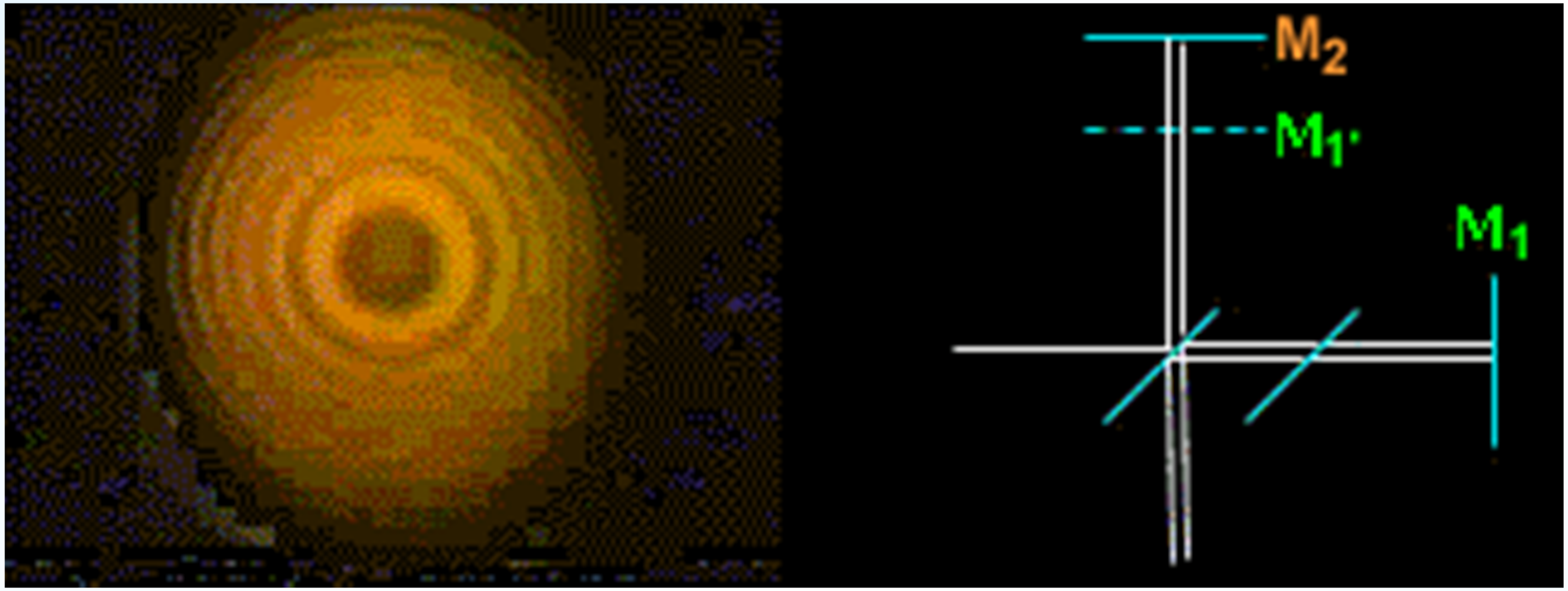
在近代科学技术中也有重要应用.

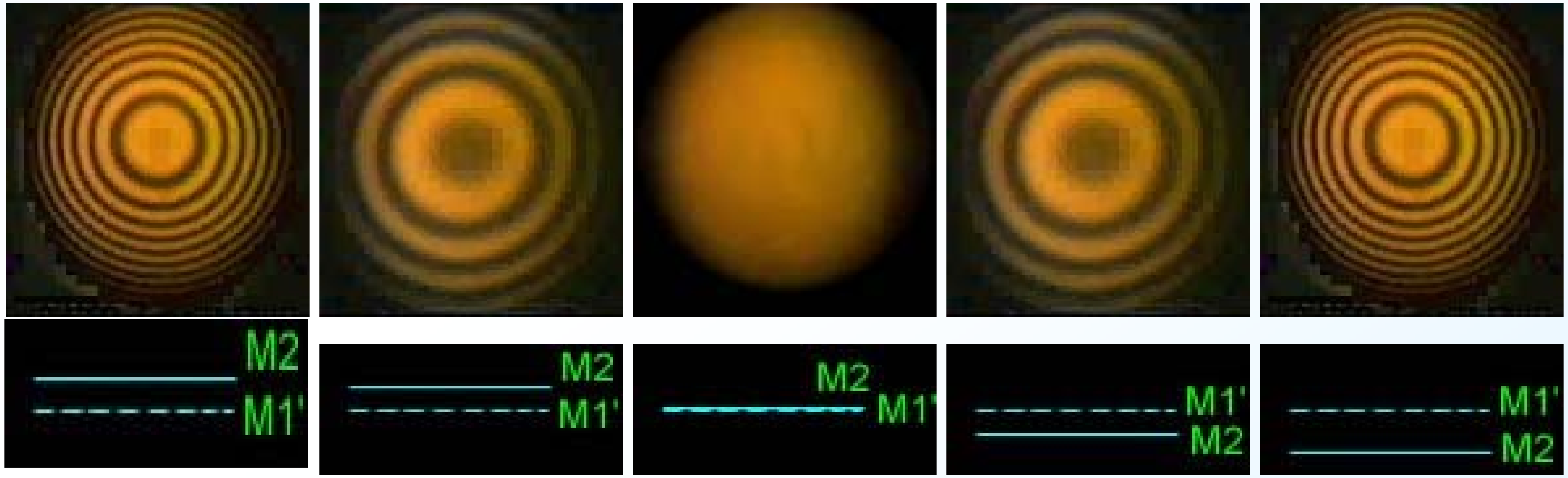
迈克尔逊干涉仪工作原理



$$\Delta d = N\frac{\lambda}{2}$$

迈克耳逊等倾干涉

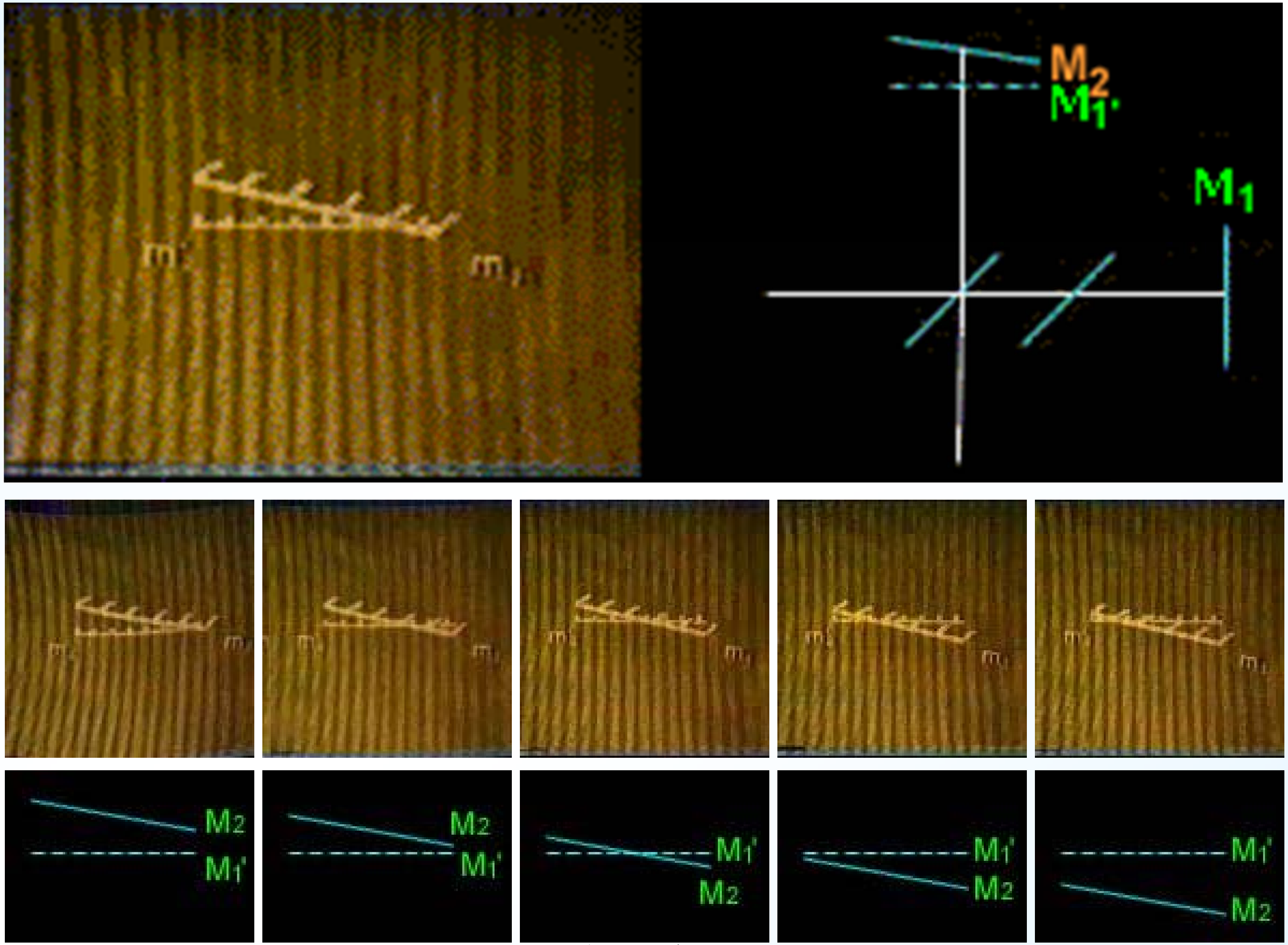




*e*减小，圆环逐渐收缩；　　　　*e*增大，环从中心冒出。

M_2每移动半个波长，中心就缩进或者冒出一个环纹。

迈克耳逊等厚干涉



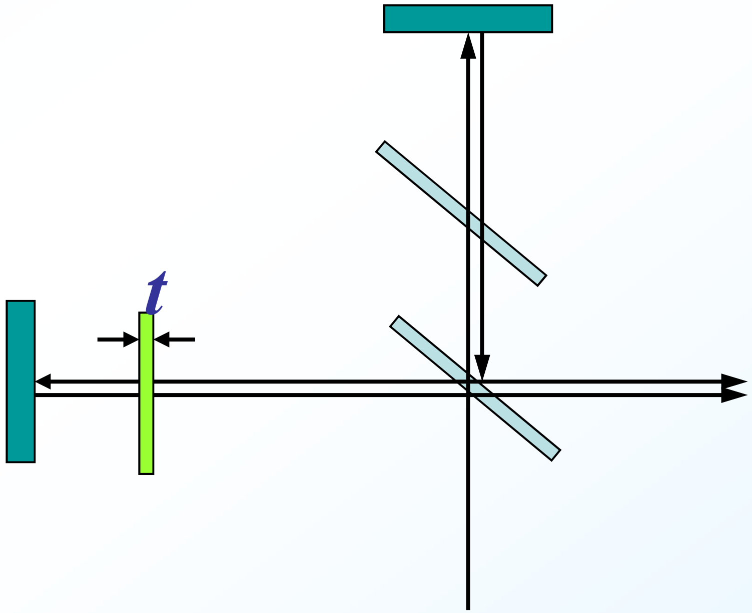
M2向下移动，等厚条纹往左移动；

M2每移动半个波长，就有一个条纹从视场中移过。

例4 当把折射率为n=1.40的薄膜放入迈克尔逊干涉仪的一臂时, 如果产生了7.0条条纹的移动, 求薄膜的厚度. （已知钠光的波长为λ = 589.3nm. ）

解:

$$\Delta\delta = \mathbf{2}(n-\mathbf{1})t = N\lambda$$



$$t = \frac{N \cdot \lambda}{2(n-1)}$$

$$= \frac{7\times 589.3\times 10^{-9}}{2(1.4-1)}\mathrm{m} = 5.156\times 10^{-6}\,\mathrm{m}$$