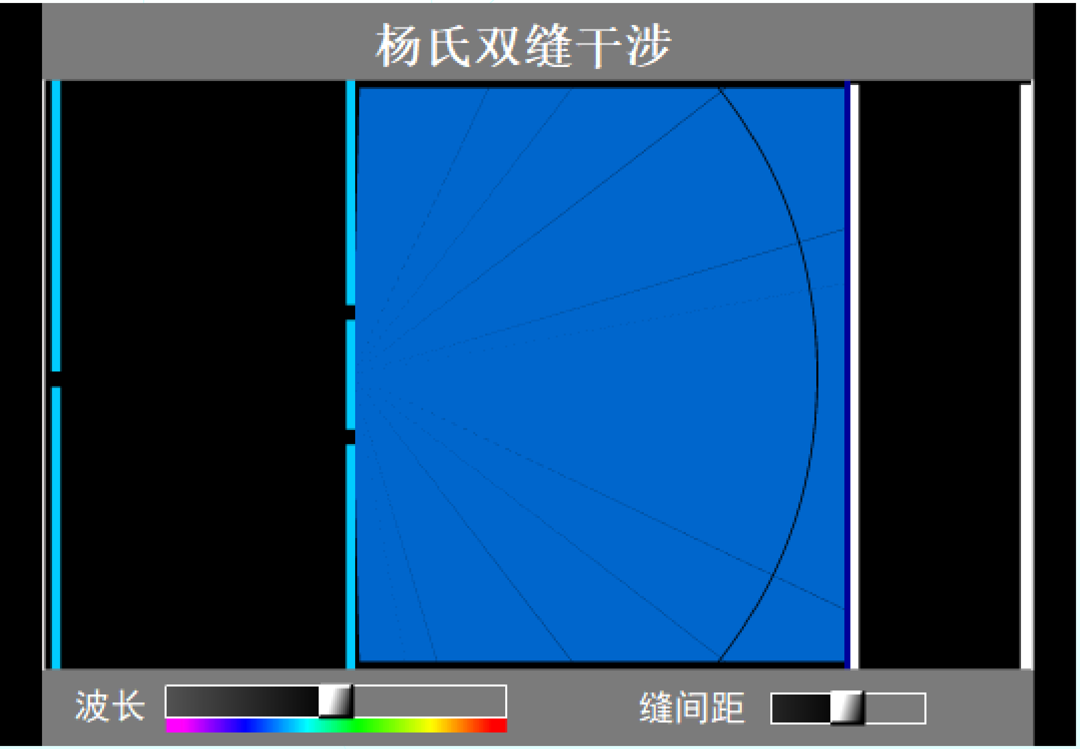
# 回顾




干涉加强：$\boxed{\delta = \pm k\lambda}$ $(k = 0,1,2,\cdots)$

干涉减弱：$\boxed{\delta = \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2}}$ $(k = 0,1,2,\cdots)$

干涉明纹：$\boxed{x = \pm\dfrac{kD\lambda}{d}}$ $(k = 0,1,2,\cdots)$

干涉暗纹：$\boxed{x = \pm(2k+1)\dfrac{D\lambda}{d}}$ $(k = 0,1,2,\cdots)$

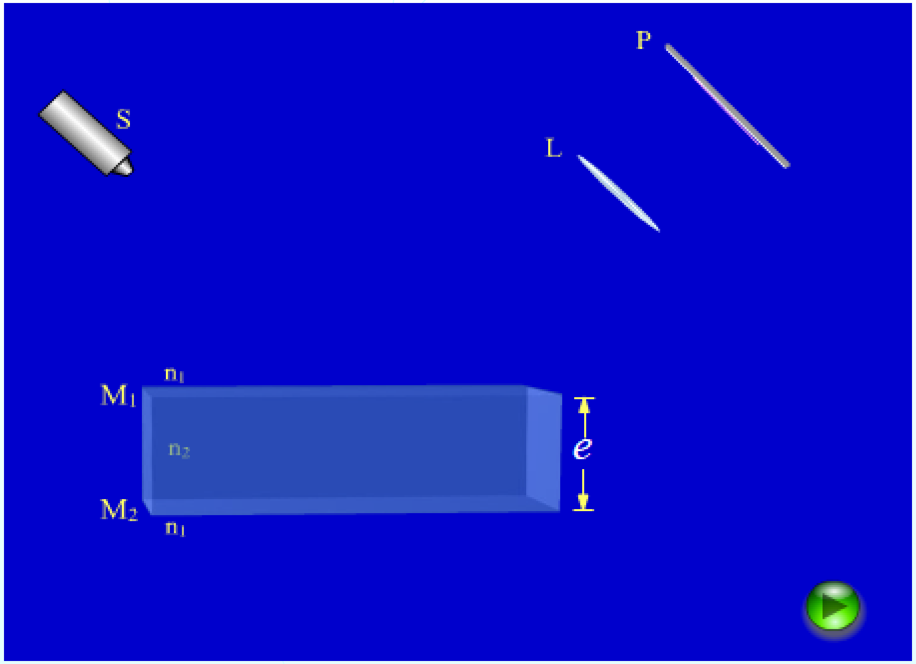
分波阵面法

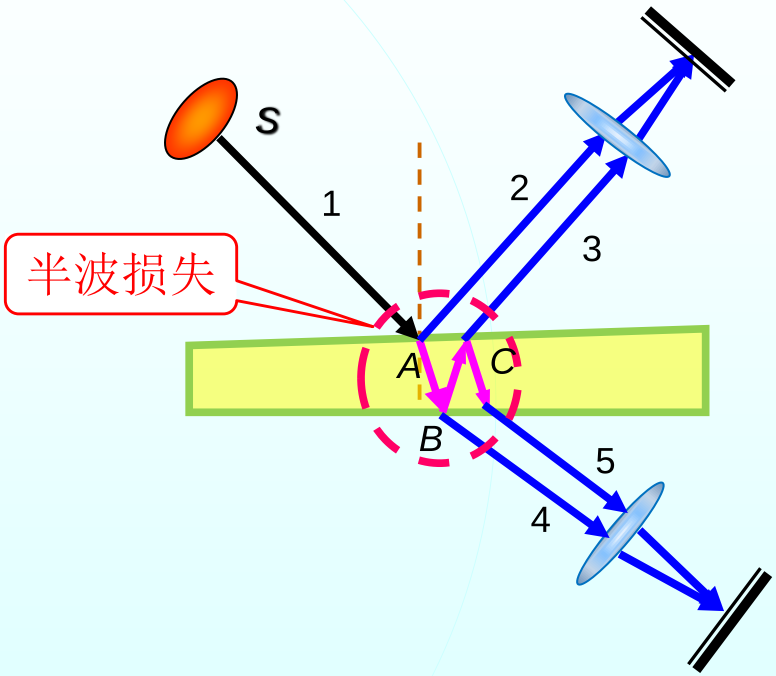
## 引入新课

**薄膜干涉：**光波经薄膜两表面反射后相互叠加形成的干涉现象

- 薄膜干涉的条纹特征取决于哪些因素？

# 一．薄膜干涉




分振幅法

- 反射光的干涉
- 透射光的干涉

PHYSICS 4

## 1. 反射光的干涉

因半波损失产生的附加光程差

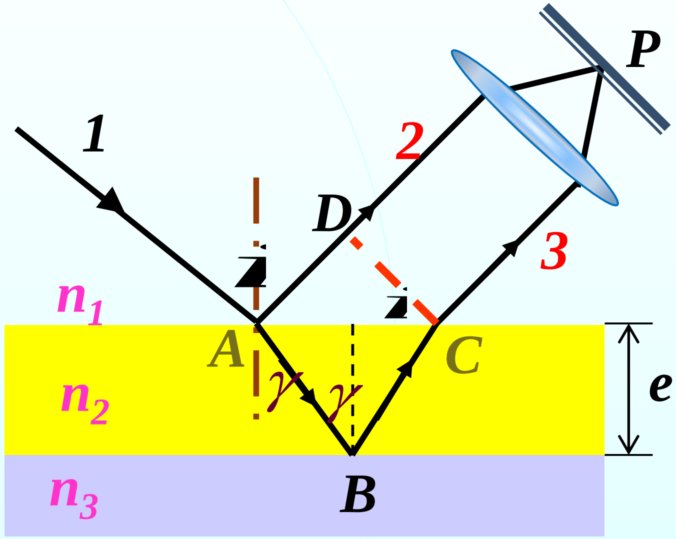
光程差：$\delta = n_2(\overline{AB}+\overline{BC}) - n_1\overline{AD} + \delta'$

$$\because \quad \overline{AB} = \overline{BC} = \frac{e}{\cos\gamma}$$

$$\overline{AD} = \overline{AC}\sin i = 2etg\gamma \sin i$$

$$\therefore \delta = \frac{2e\cdot n_2}{\cos\gamma} - 2e\cdot tg\gamma \sin i\cdot n_1 + \delta'$$

$$= \frac{2e}{\cos\gamma}(n_2 - n_1\sin\gamma\sin i) + \delta'$$




由折射定律:

$$\boxed{n_1\sin i = n_2\sin\gamma}$$

$$\therefore \delta = \frac{2en_2}{\cos\gamma}(1-\sin^2\gamma) + \delta'$$

$$\boxed{= 2n_2 e\cos\gamma + \delta'}$$

# 一． 薄膜干涉

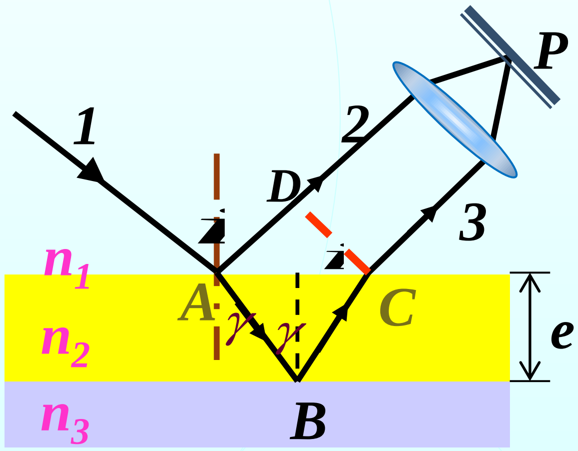


$$\boxed{\delta = 2en_2\cos\gamma + \delta'}\qquad \boxed{\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2 i} + \delta'}$$

**薄膜干涉条件：**

$$\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2 i} + \delta' = \begin{cases} k\lambda & k = 1, 2\cdots \quad \text{干涉加强} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0, 1, 2\cdots \quad \text{干涉减弱} \end{cases}$$

附加光程差 $\delta'$ 如何取值？




$$\delta' = \begin{cases} 0 & \begin{cases} n_1 < n_2 < n_3 \\ n_1 > n_2 > n_3 \end{cases} \\ \dfrac{\lambda}{2} & \begin{cases} n_1 > n_2 < n_3 \\ n_1 < n_2 > n_3 \end{cases} \end{cases}$$

$\delta'$ 取决于膜及周围介质的折射率

透射光的干涉结果又如何呢？

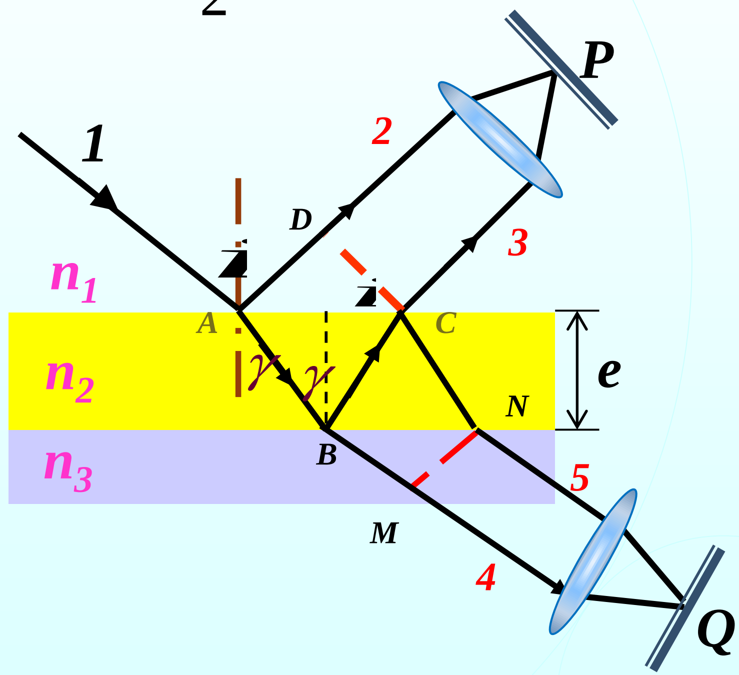
# 一．薄膜干涉

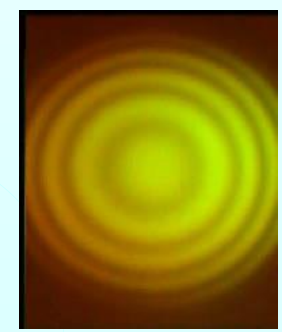
## 2. 透射光的干涉

$$\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta' = \begin{cases} k\lambda & k = 1, 2\cdots \quad \text{干涉加强} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0, 1, 2\cdots \quad \text{干涉减弱} \end{cases}$$

其中：

$$\delta' = \begin{cases} \dfrac{\lambda}{2} & \begin{cases} n_1 < n_2 < n_3 \\ n_1 > n_2 > n_3 \end{cases} \\ 0 & \begin{cases} n_1 > n_2 < n_3 \\ n_1 < n_2 > n_3 \end{cases} \end{cases}$$



结论：透射光和反射光干涉条纹明暗互补

# 一. 薄膜干涉



课堂讨论：

$$\delta = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \delta' = \begin{cases} k\lambda & k = 1, 2\cdots \quad \text{干涉加强} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0, 1, 2\cdots \quad \text{干涉减弱} \end{cases}$$

① $e$ 一定，$i$ 变化时：

厚度均匀的薄膜形成的干涉，称为**等倾干涉**

② $i$ 一定，$e$ 变化：

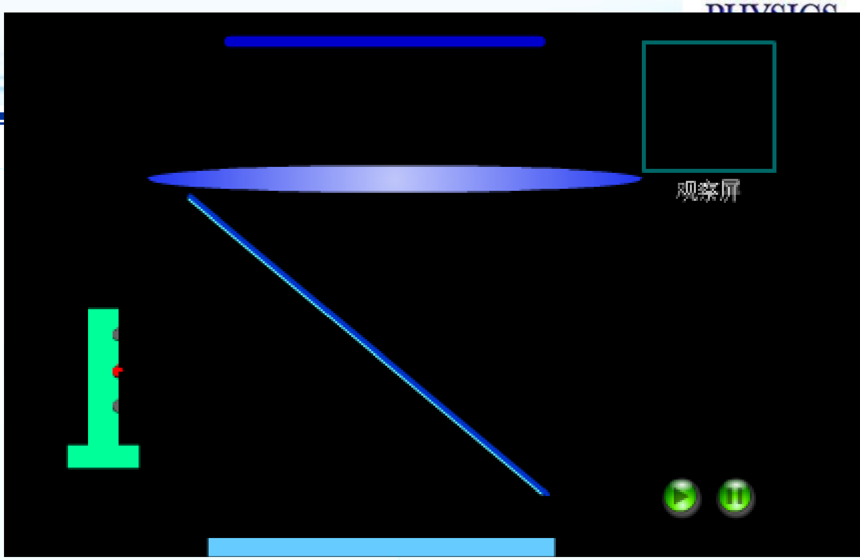
厚度不均匀的薄膜形成的干涉，称为**等厚干涉**

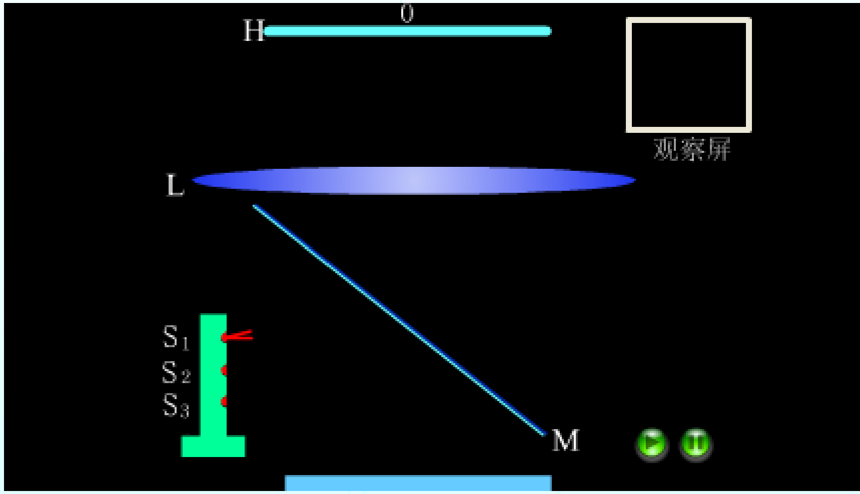
若单色平行光垂直入射（$i$ =0），则光程差为：

$$\boxed{\delta = 2n_2 e + \delta'}$$

# 二. 等倾干涉

$$\boxed{\delta_{反} = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}} = \begin{cases} k\lambda & \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{暗纹} \end{cases}$$



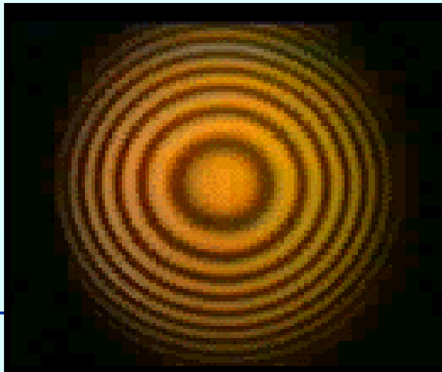

讨论: 干涉条纹特征

- 形状:一系列明暗相间的同心圆环
- 当膜厚和折射率一定时，
  条纹级次仅取决于入射角。

  倾角相同的光线对应同一级干涉条纹
- 波长对条纹的影响:

$$k, e 一定, \lambda \uparrow \rightarrow i \downarrow \rightarrow r_k \downarrow$$

圆环为何是内疏外密的呢?



# 二. 等倾干涉

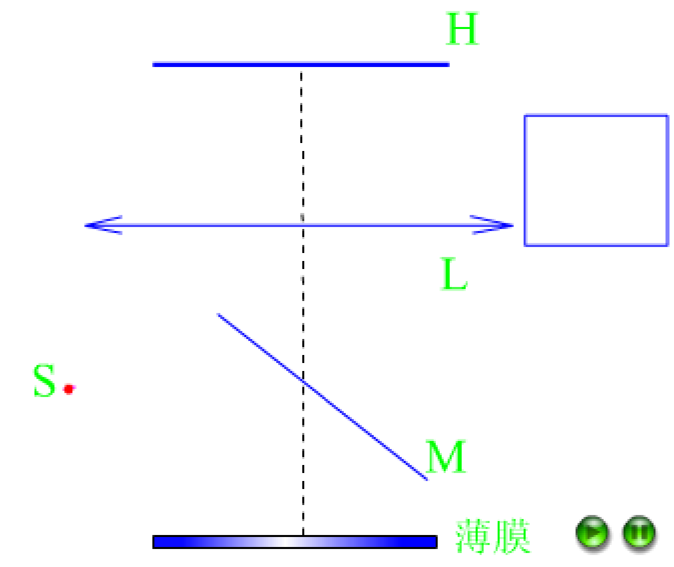
- 间隔分布：$\boxed{\delta = 2en_2\cos\gamma + \frac{\lambda}{2} = k\lambda}$

$$\Rightarrow \quad -2n_2 e\sin\gamma d\gamma = \lambda dk$$

令$dk=1$，角距离为$|-d\gamma| = \dfrac{\lambda}{2n_2 e\sin\gamma}$

$i\downarrow$(向内)$,\sin\gamma\downarrow$，$d\gamma\uparrow$，内疏

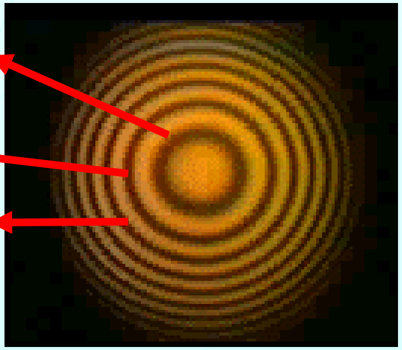
$i\uparrow$(向外)$,\sin\gamma\uparrow$，$d\gamma\downarrow$，外密




- 级次分布：$\boxed{\delta_{反} = 2e\sqrt{n_2^2 - n_1^2\sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = k\lambda}$

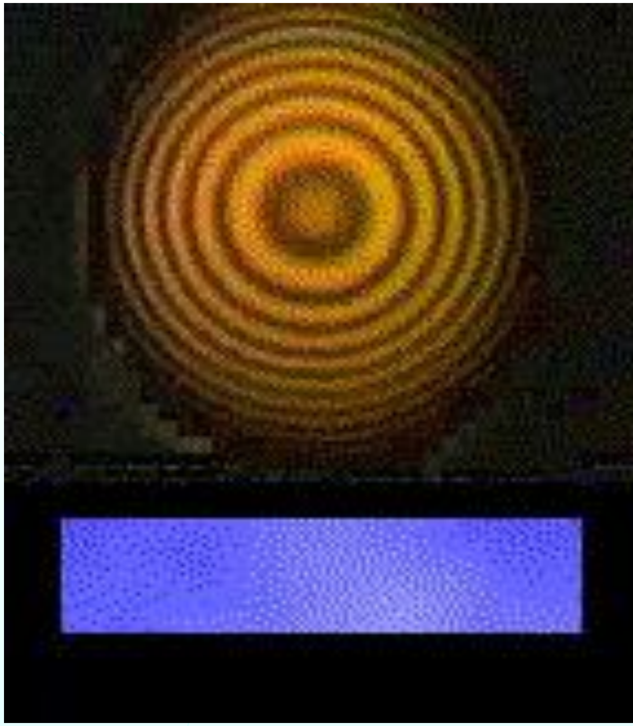
$e$ 一定时，$i\downarrow \to \delta\uparrow \to k\uparrow$，且$i\downarrow \to r_k\downarrow$

条纹中心级次高，即内高外低




内高外低、内疏外密的圆环

- 课堂思考：膜厚改变条纹如何变化？



$$\delta_{反}=2e\sqrt{n_2^2-n_1^2\sin^2 i}+\frac{\lambda}{2}=k\lambda$$

膜厚增加：$e\uparrow\rightarrow i\uparrow$，条纹外扩

膜厚减小：$e\downarrow\rightarrow i\downarrow$，条纹内缩

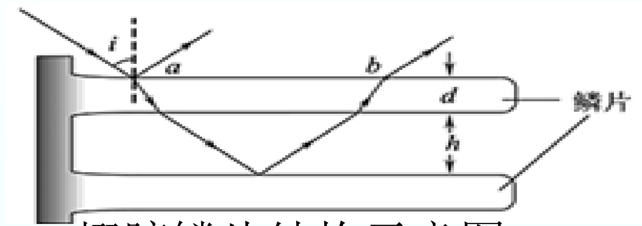
结论：改变薄膜厚度会改变中央条纹级次，出现条纹的吞吐现象。

- 思考：透射光的干涉情况如何呢

- **解决问题1：**

观察角度不同，产生干涉极大的波长随之变化，肥皂泡色彩不断变换。

# • 解决问题 2




翅膀鳞片结构示意图

蜻蜓

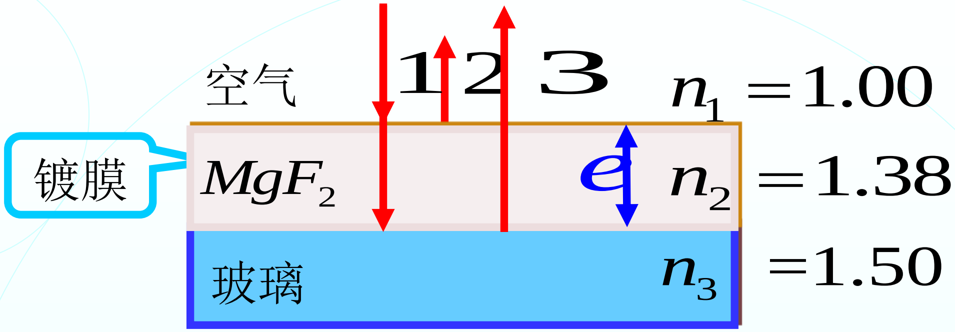
- 翅膀上表面的色彩是薄膜干涉等原因产生的；
- 垂直向下观察，反射光在蓝绿光区形成干涉极大，故翅膀上表面呈蓝绿色；
- 振翅时改变了观察方向，产生干涉极大的光波长随之变化，就产生了彩虹般的绚丽色彩。

# 三、等倾干涉的应用



## 1. 增透膜

利用薄膜上、下表面反射光的光程差符合干涉相消条件来减少反射，从而使透射增强。




$\because \quad n_1 < n_2 < n_3$，反射光在两个界面上均有半波损失

$\therefore \quad \delta' = 0$

若光垂直入射：$\delta_{反} = 2n_2 e$

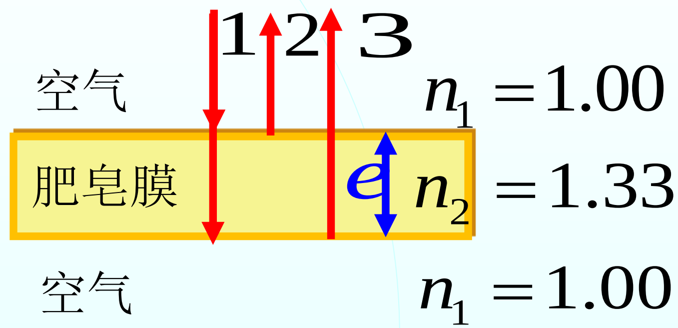
反射减弱时，透射加强，有：$\boxed{\delta_{反} = 2n_2 e = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2}}$

$$\Rightarrow \quad \boxed{n_2 e} = (2k+1)\frac{\lambda}{4} \quad \Rightarrow \quad \boxed{e_{\min} = \frac{\lambda}{4n_2}}$$

薄膜的光学厚度

例 空气中肥皂膜($n_1$=1.33)，厚为0.32μm.若白光垂直入射，问肥皂膜呈现什么色彩?

解: ∵ 反射光干涉加强




$$\therefore \quad 2n_2 e + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

$$\Rightarrow \quad \lambda = \frac{2n_2 e}{k - 1/2}$$

$$k = 1, \quad \lambda_1 = 4n_2 e = 1702\text{nm}$$

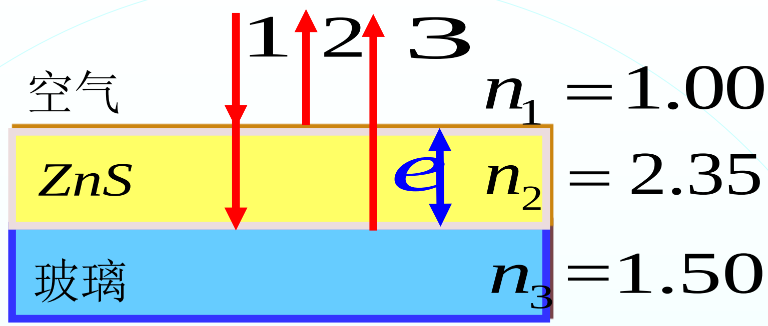
$$k = 2, \quad \lambda_2 = \frac{4}{3} n_2 e = 567\text{nm}$$ ⇒ 黄光 ⇒ 肥皂膜呈现黄色

$$k = 3, \quad \lambda_3 = \frac{4}{5} n_2 e = 340\text{nm}$$

可见光范围400~760nm

# 2. 增反膜

利用薄膜上、下表面反射光的光程差满足相长干涉，因此反射光因干涉而加强。




$\because\quad n_1 < n_2 > n_3$，反射光在第一个界面处有半波损失

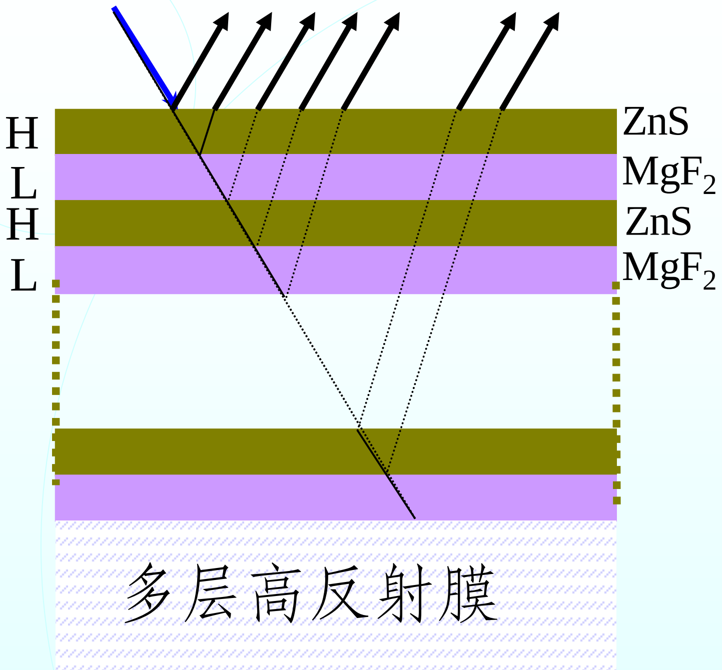
$\therefore\quad \delta' = \lambda/2$

若光垂直入射：$\delta_{反} = 2n_2 e + \dfrac{\lambda}{2}$

反射加强时，透射减弱，有 $\boxed{\delta_{反} = 2n_2 e + \dfrac{\lambda}{2} = k\lambda}$

$$\Rightarrow\quad n_2 e = (2k-1)\frac{\lambda}{4} \quad\Rightarrow\quad \boxed{e_{\min} = \frac{\lambda}{4n_2}}$$

# 拓 展





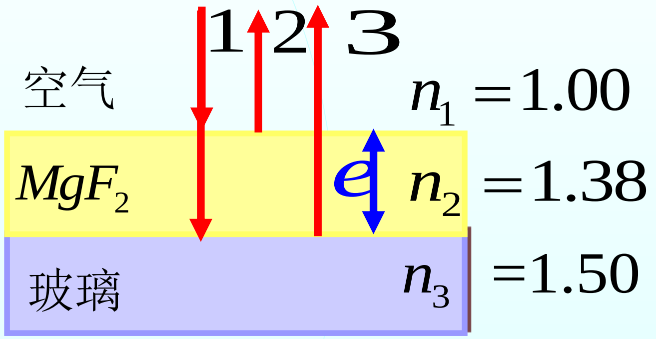
**推荐：** 《多层增透膜和高反射膜的基本构成特点》

曹建章, 徐平, 李景镇编著， 科学出版社出版

**例、在玻璃表面镀上一层$MgF_2$薄膜，使波长为$\lambda$ =550nm的绿光全部通过。求：膜的厚度。**

解法一：使反射绿光干涉相消，由反射光干涉相消条件

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




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

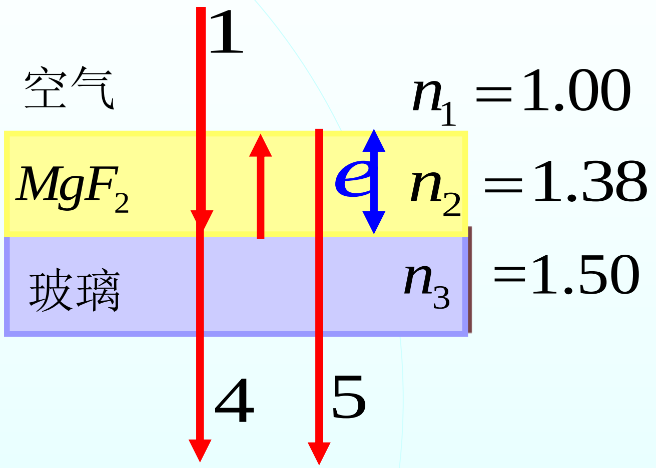
$$e_{\min} = \frac{\lambda}{4n_2} = \frac{550}{4\times 1.38} = 99.6\,(\mathrm{nm})$$

解法二：使透射绿光干涉相长

由透射光干涉加强条件：

$$\delta = 2n_2 e + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \qquad (k = 1, 2, \cdots)$$

取$k = 1$ 得 $e = \dfrac{\lambda}{4n_2} = 99.6nm$




问题：此时反射光呈什么颜色？

由 $\delta = 2n_2 e = k\lambda$

取$k$=1 $\lambda_1 = 2n_2 e = 825nm$

取$k$=2 $\lambda_2 = 2n_2 e/2 = 412.5nm$ 反射光呈现蓝紫色

例：一油轮漏出的油($n_1$=1. 20)，污染了某海域，在海水($n_2$=1. 30)表面形成一层厚为460nm的油膜。太阳在该海域正上方。

（1）一直升飞机的驾驶员向下观察，他看到油层呈什么颜色？

（2）一潜水员潜入水下，看到油层呈什么颜色?

解：（1）由反射光干涉条件知，驾驶员看到油层颜色满足干涉加强

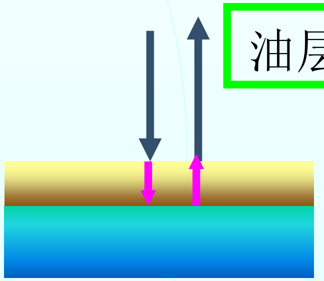
$$\boxed{2n_2e=k\lambda \qquad k=1,2,3} \Rightarrow \lambda=\frac{2en_2}{k}$$

$k=1,\quad \lambda_1=1104\ \text{nm}$

$k=2,\quad \lambda_2=552\ \text{nm}$ 绿光

$k=3,\quad \lambda_3=368\ \text{nm}$

油层呈绿色



空气

$n_2=1.20$

$n_3=1.30$

（2）由反射光干涉条件知，潜水员看到油层颜色满足干涉减弱

油层呈紫红色

$$\boxed{2en_2=(2k+1)\lambda/2 \quad k=0,1,2,3} \Rightarrow \lambda=\frac{4en_2}{2k+1}$$

$k=0,\quad \lambda_1=2208\ \text{nm}$

$k=1,\quad \lambda_2=736\ \text{nm}$ 红光

$k=2,\quad \lambda_3=441.6\ \text{nm}$ 紫光

$k=3,\quad \lambda_4=315.4\text{nm}$

由透射光干涉条件又如何计算呢？

# 课后思考：

- 干涉滤光片的作用原理是什么？
- 试分析汽车车窗的镀膜问题

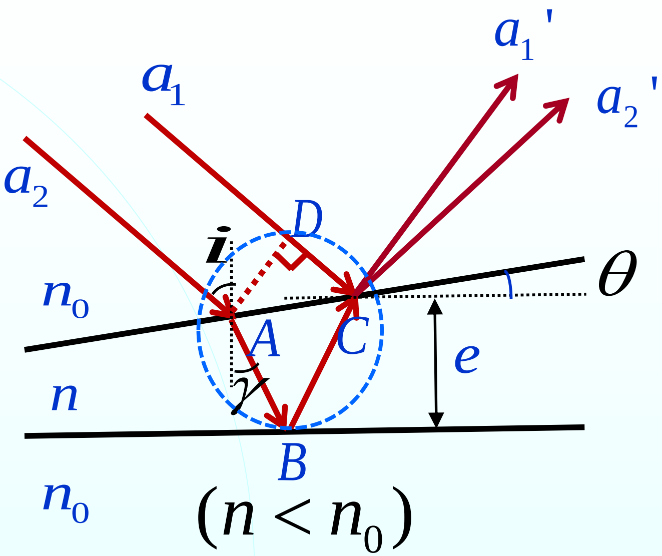
- 为什么我们看到的花纹不是同心圆环呢？

# 四. 等厚干涉

## 反射相干光的光程差

$$\delta = n(\overline{AB}+\overline{BC})-n_0\overline{CD}+\frac{\lambda}{2}$$

附加光程差

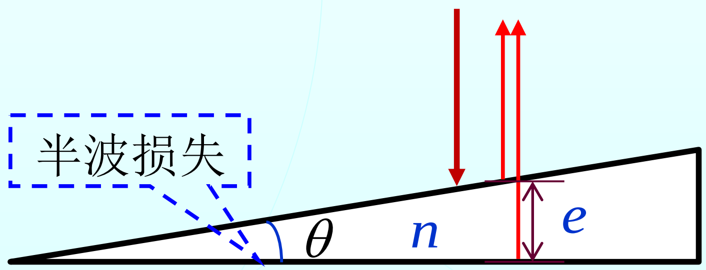



若 $\theta$ 很小且薄膜很薄，

$$\delta = 2ne\cos\gamma+\frac{\lambda}{2}$$

如用单色平行光垂直入射 $i=\gamma=0$

$$\Rightarrow \boxed{\delta = 2ne+\frac{\lambda}{2}} = \delta(e)$$

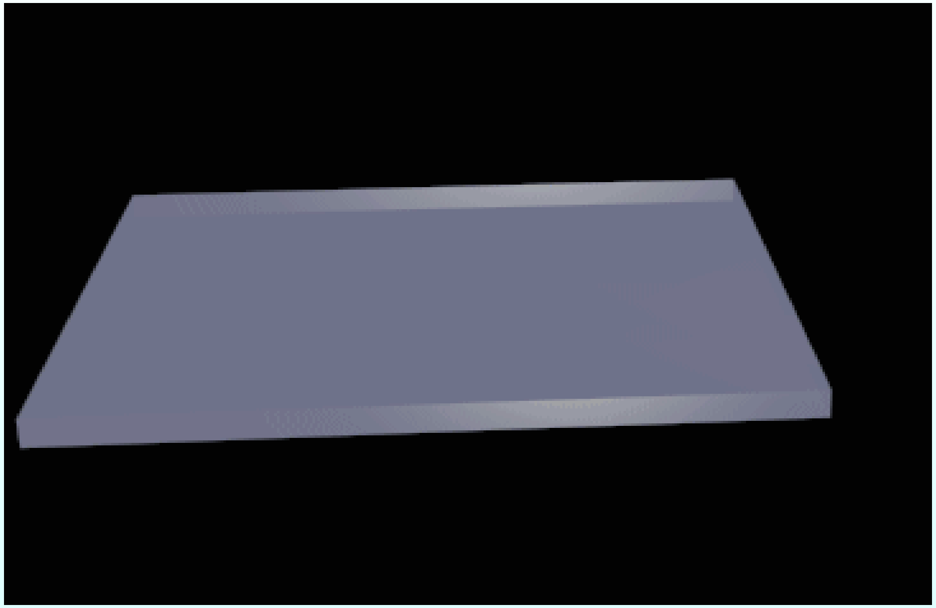



同一厚度$e$ 对应同一级条纹------等厚干涉！

由光程差能判断出干涉图样有何特点？

## 1. 劈尖膜的结构

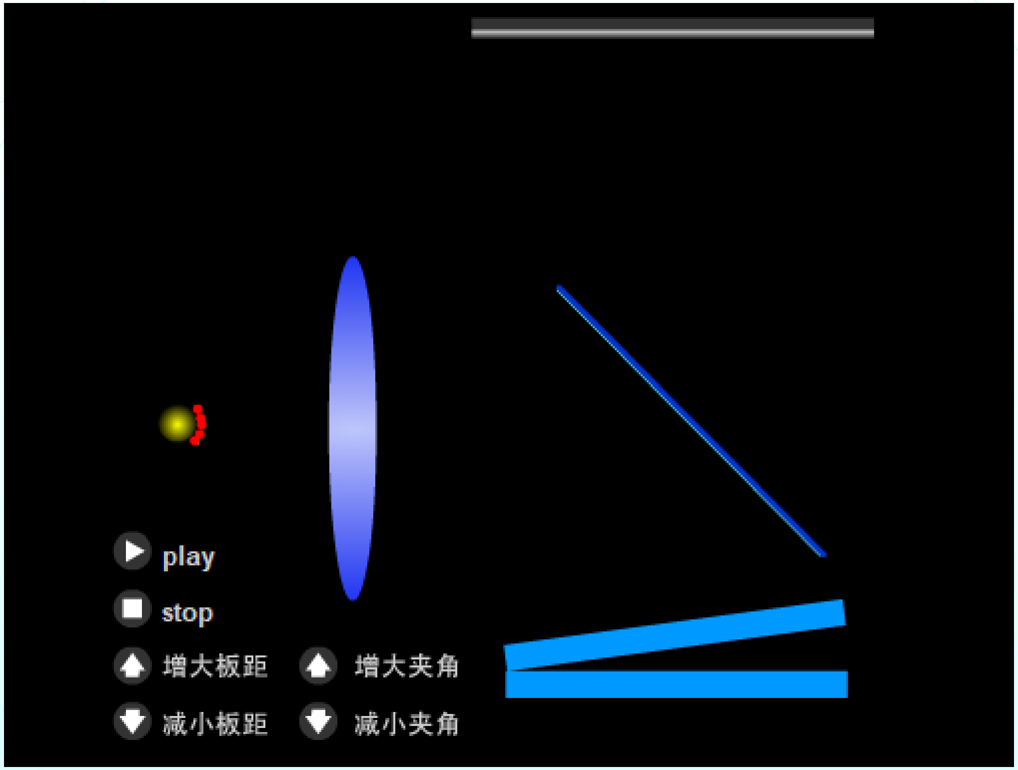
劈尖膜：夹角很小的两个平面构成的楔形薄膜



$$\theta \approx 10^{-4} \sim 10^{-5} rad$$

# 劈尖膜干涉

在劈尖膜表面如何产生干涉呢？

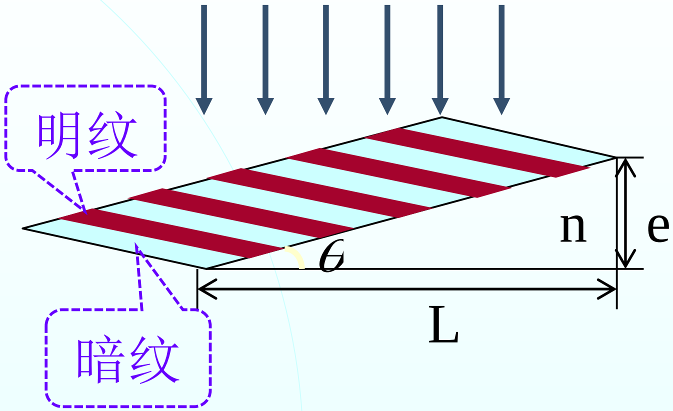



条纹明暗由什么决定？

## 2. 干涉条件

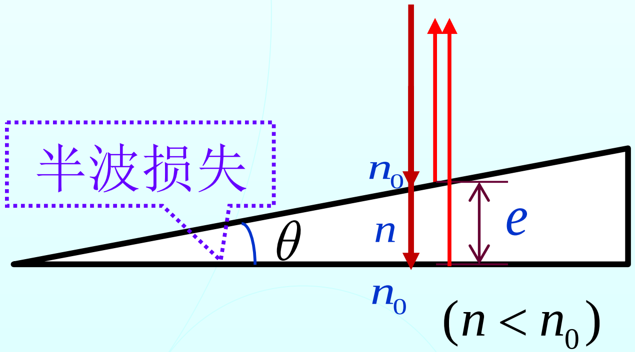
$$\boxed{\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2}}$$

$$\begin{cases} = k\lambda & k = 1,2,3\cdots \quad \text{明纹} \\ = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2\cdots \quad \text{暗纹} \end{cases}$$




## 3. 劈尖膜干涉图样的特征

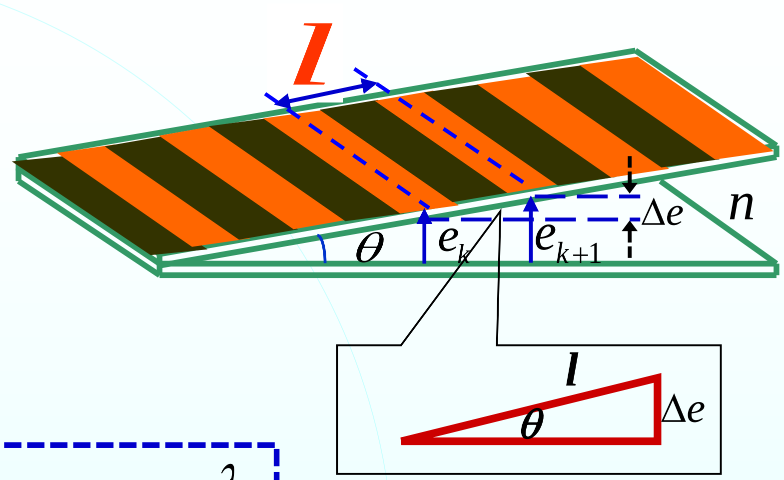
- 一系列平行于棱边的明暗相间的平直条纹
- 棱边是暗纹！  $e = 0 \Rightarrow \delta = \dfrac{\lambda}{2}$



# 劈尖膜干涉

## 讨论:

$$\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2}$$




- 相邻明纹（暗纹）间的厚度差 相同

$$\left.\begin{aligned} 2ne_k + \frac{\lambda}{2} &= k\lambda \\ 2ne_{k+1} + \frac{\lambda}{2} &= (k+1)\lambda \end{aligned}\right\} \Rightarrow \Delta e = e_{k+1} - e_k = \frac{\lambda}{2n}$$

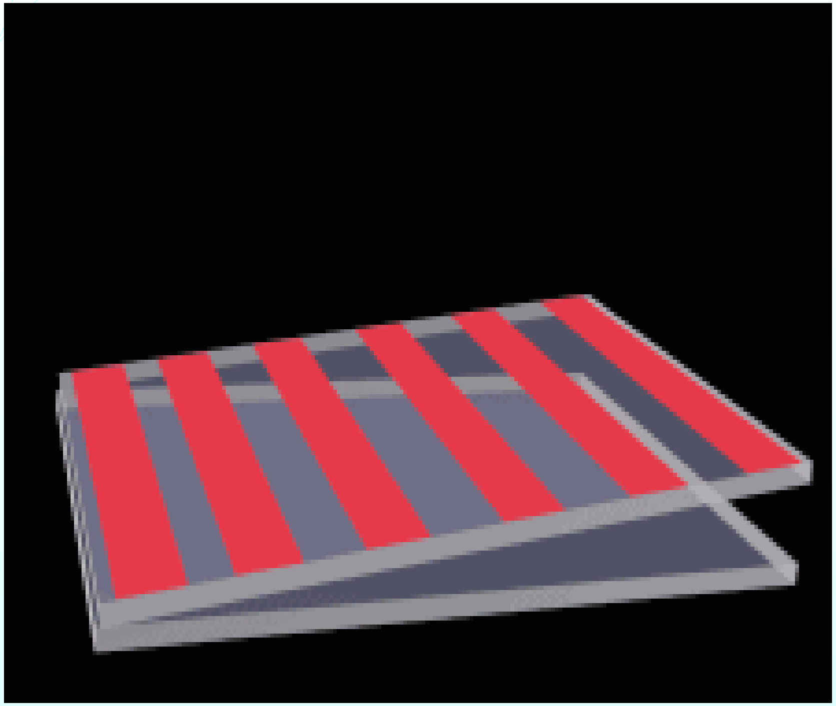
- 相邻明（暗）纹间的条纹间距 相同

$$\because \quad \Delta e = l\sin\theta$$

$$\therefore \quad l = \frac{\lambda}{2n\sin\theta} \approx \frac{\lambda}{2n\theta}$$

条纹等间距分布

**课堂思考：**转动空气劈尖的上玻璃片，条纹如何变化？



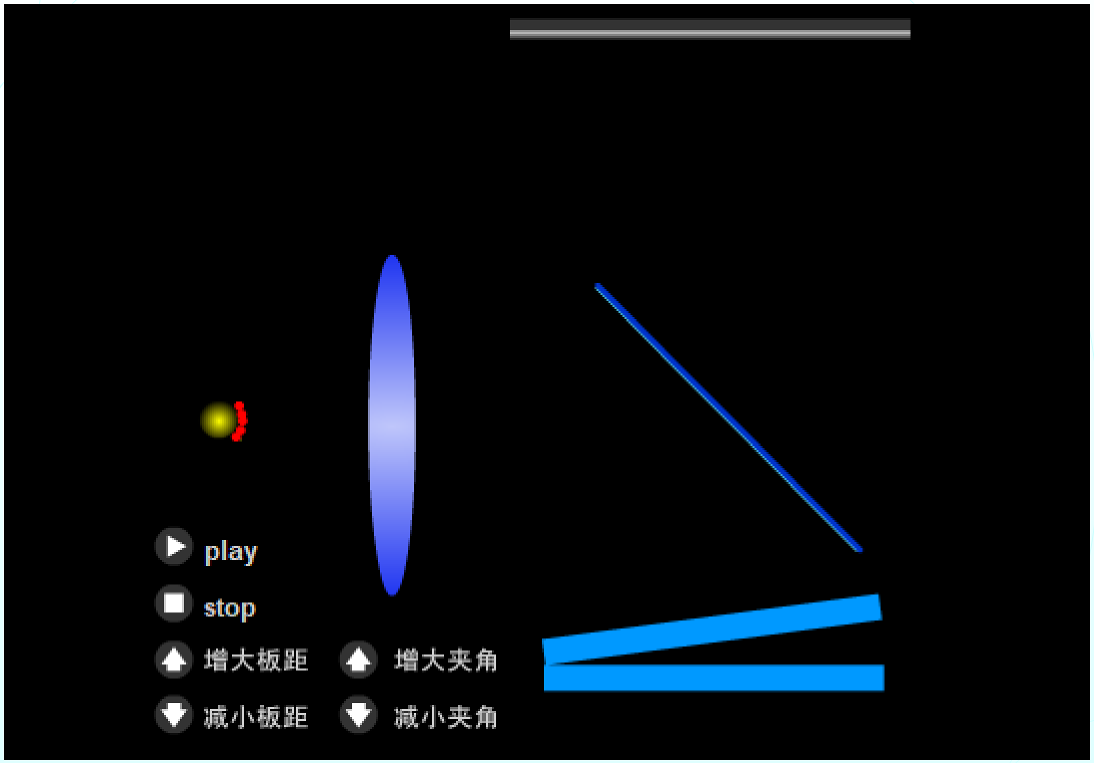
$$l \approx \frac{\lambda}{2n\theta}$$

θ 越小，条纹越疏；

θ 越大，条纹越密！

# 劈尖膜干涉

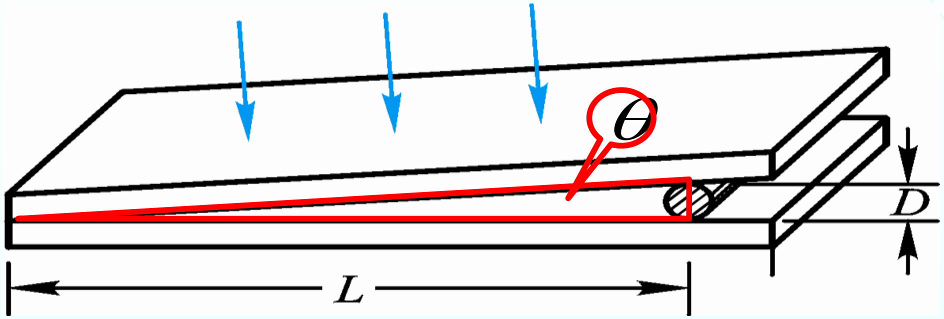
**课堂思考：**平移空气劈尖的上玻璃片，条纹如何变化？




平板上移，条纹间距不变，向着棱边移动；
平板下移，条纹间距不变，远离棱边移动。

## 4. 劈尖膜等厚干涉的应用

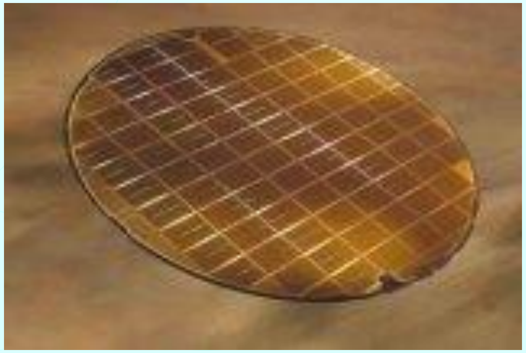
✓ 测量细丝直径、薄片厚度 D



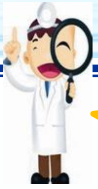

$$\because l=\frac{\lambda}{2n\sin\theta}, \quad \sin\theta\approx\frac{D}{L} \;\Rightarrow\; \boxed{D=\frac{\lambda}{2n}\frac{L}{l}}$$

$\left(N=\frac{L}{l}\right.$ 条纹数$\left.\right)$

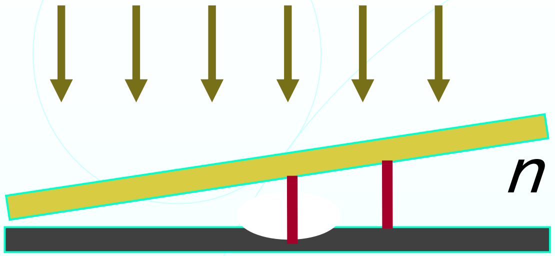
思考：在半导体元件生产中，如何测定硅片上的二氧化硅薄膜厚度呢？



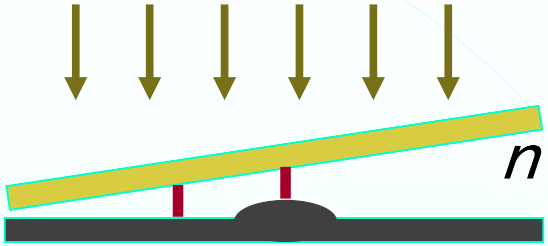
# 2、检查工件表面平整度



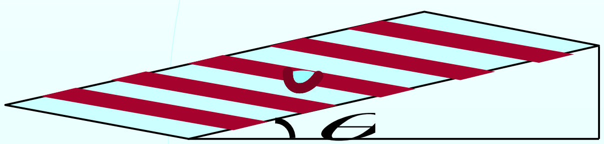
解释问题

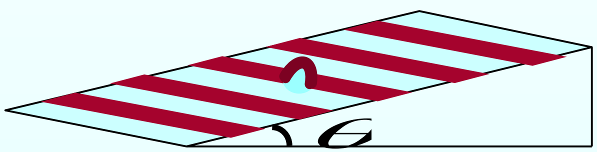


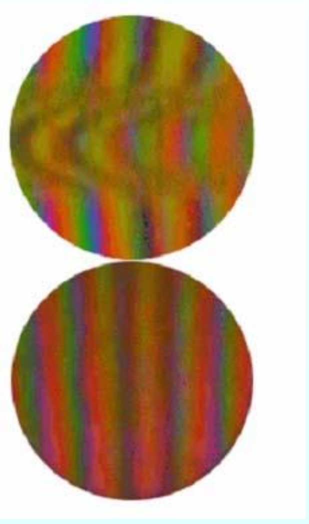

表面凹陷




表面凸起



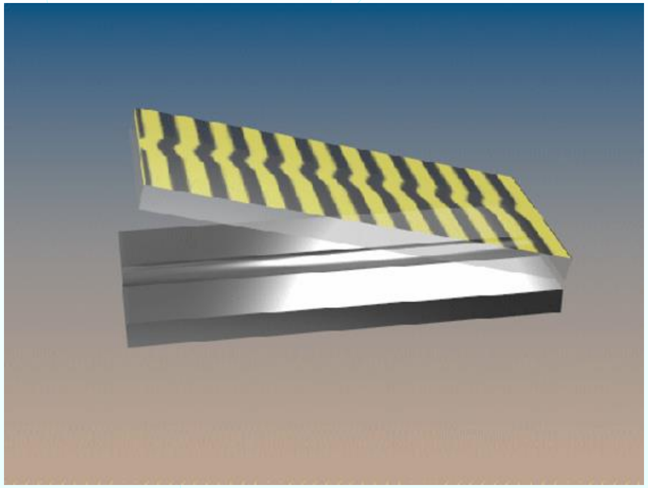



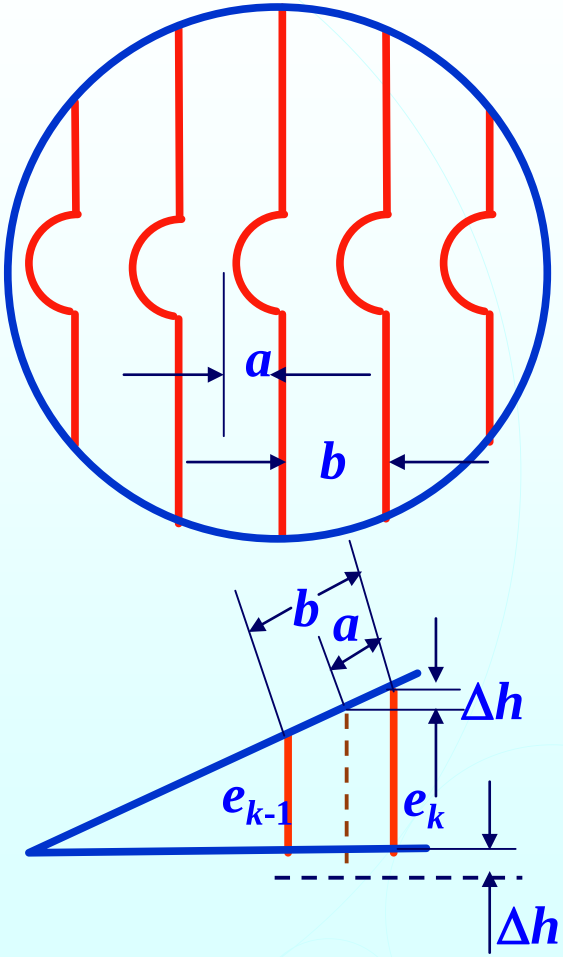



- 工件表面有凹陷，条纹朝向棱边弯曲
- 工件表面有凸起，条纹背向棱边弯曲

能检查不超过$\dfrac{\lambda}{4}$的凹凸缺陷！

思考：凹陷或凸起的高度是多少呢？

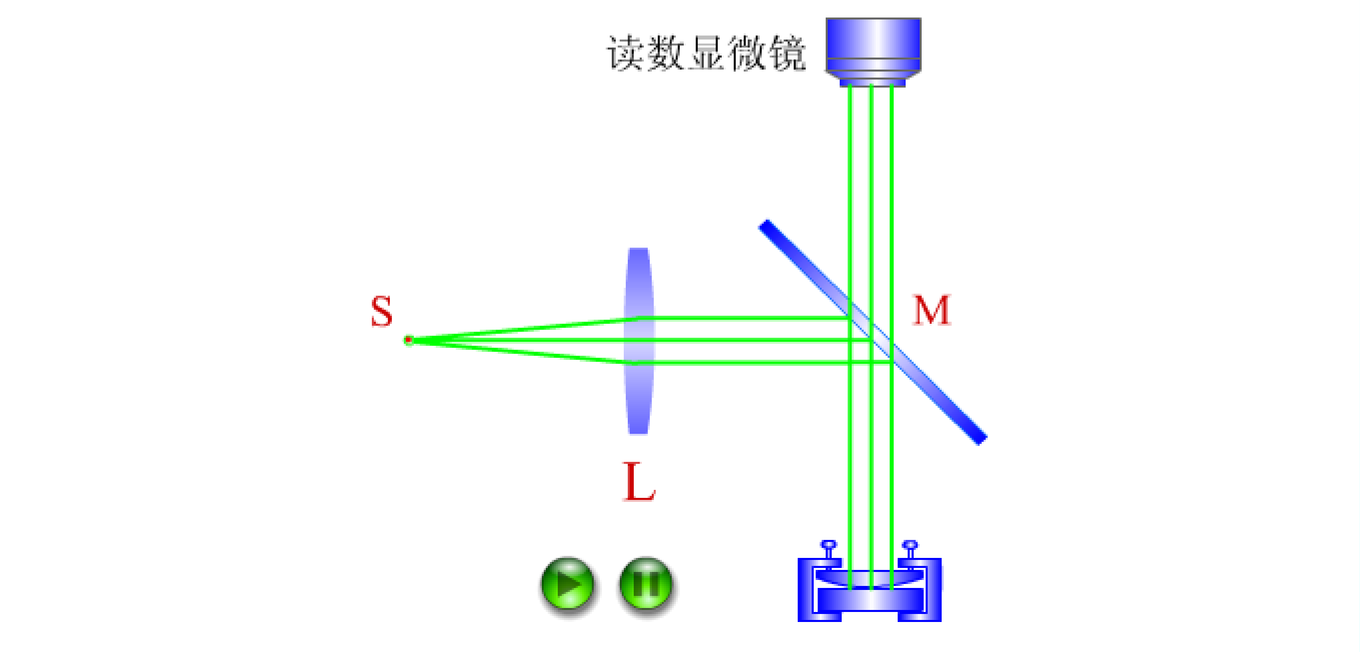


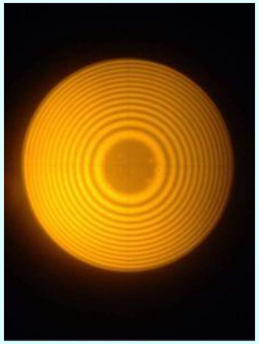



$$\frac{a}{b}=\frac{\Delta h}{(e_k-e_{k-1})}=\frac{\Delta h}{\frac{\lambda}{2}}$$

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

# 1. 牛顿环实验装置及光路



## 2. 反射相干光的干涉条件

若单色平行光垂直入射，则考虑到半波损失

$$\text{光程差：}\boxed{\delta = 2ne + \frac{\lambda}{2}} = \begin{cases} k\lambda & k = 1,2,3\cdots \quad \text{明环} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2\cdots \quad \text{暗环} \end{cases}$$

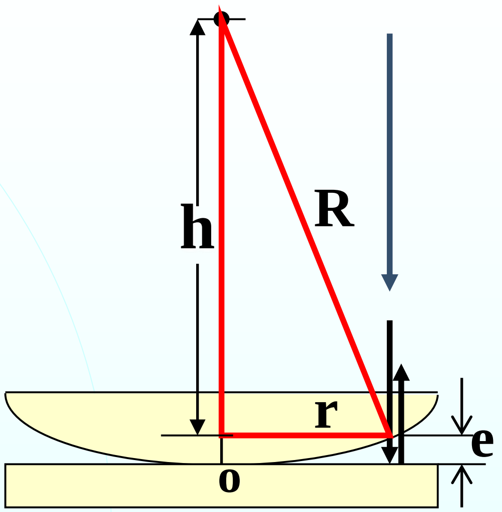
## 3. 牛顿环干涉图样

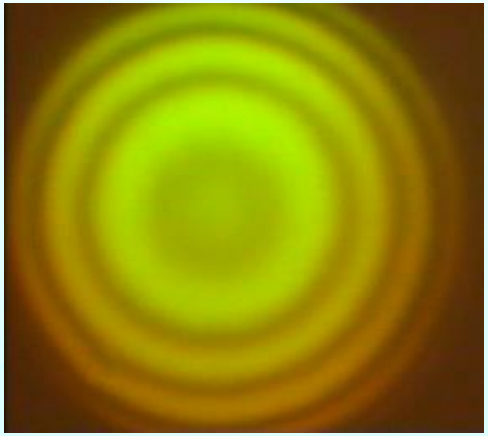
$$(R-e)^2 + r^2 = R^2 \Rightarrow \cancel{R^2} - 2Re + \boxed{e^2} + r^2 = \cancel{R^2}$$

$0$

$$\because \quad R >> e \rightarrow 2Re >> e^2$$

$$\therefore \quad e = \frac{r^2}{2R}$$



如何得知牛顿环的半径？

# 牛顿环

## ➤ 牛顿环半径公式：

$$\begin{cases} r=\sqrt{\dfrac{(2k-1)R\lambda}{2n}} \quad (k=1,2,\cdots) & \text{明环} \\ r=\sqrt{\dfrac{kR\lambda}{n}} \quad (k=0,1,2,\cdots) & \text{暗环} \end{cases}$$

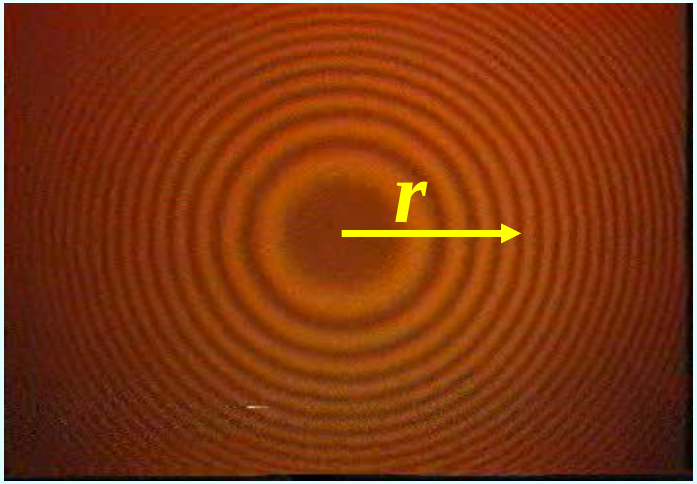
（空气膜 n=1）

$$\begin{cases} r_{明}=\sqrt{\dfrac{(2k-1)R\lambda}{2}} \\ r_{暗}=\sqrt{kR\lambda} \end{cases}$$

## ➤ 条纹特征：

- 明暗相间的内疏外密的同心圆环

$$\Delta r = r_{k+1} - r_k = \frac{\sqrt{R\lambda}}{\sqrt{k}+\sqrt{k+1}}$$




- 中央为一暗斑 $k=0$，$r=0$
- 条纹级次内低外高

# 4. 牛顿环应用

✓ 检测透镜表面平整度

✓ 测透镜曲率半径 $R$ 和波长 $\lambda$

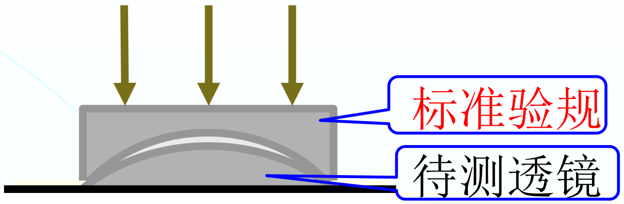
暗环 $r=\sqrt{kR\lambda}$ $(k=0,1,2,\cdots)$

$$\begin{cases} r_k^2=kR\lambda \\ r_{k+m}^2=(k+m)R\lambda \end{cases}$$

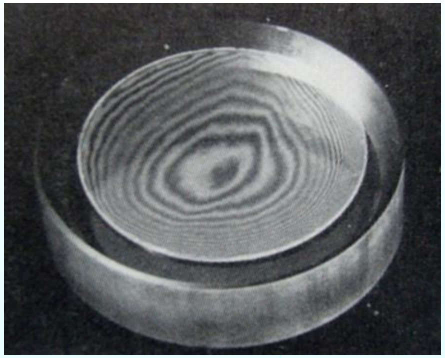
$$\Rightarrow \quad r_{k+m}^2-r_k^2=mR\lambda$$

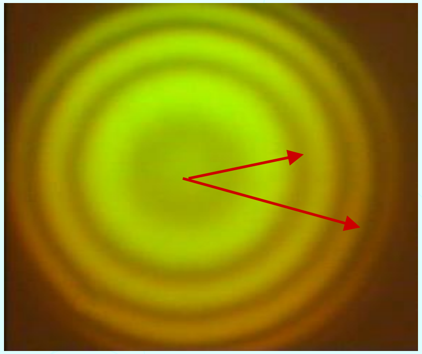
已知$\lambda$，测 $m$、$r_{k+m}$、$r_k$，可得$R$.

已知$R$，测出$m$ 、 $r_{k+m}$、$r_k$，可得$\lambda$.




检验透镜表面





在牛顿环实验中将平凸透镜垂直上移，可观察到干涉条纹如何移动？

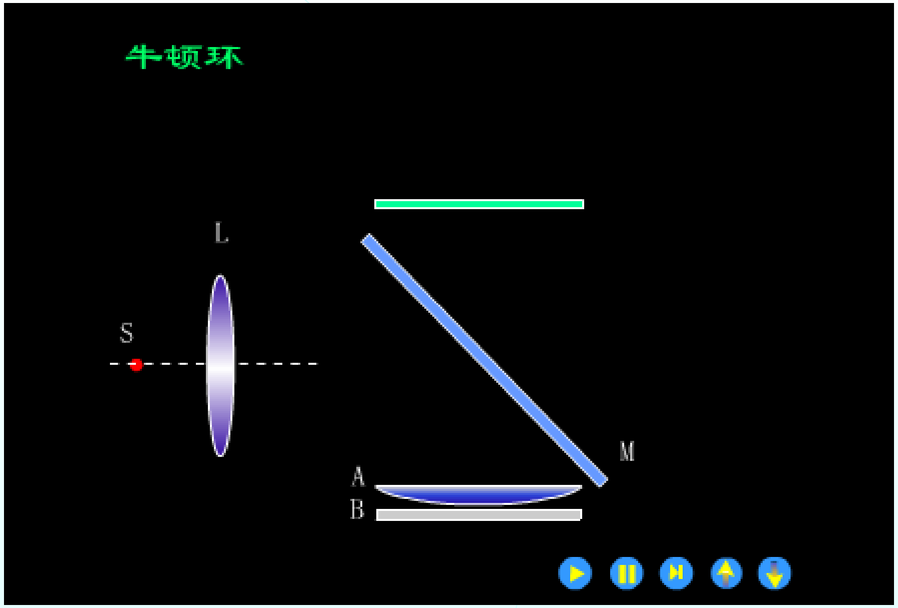
A. 向右平移　　　　（B）

B. 向中心收缩

C. 向外扩张

D. 静止不动

E. 向左平移




$$e=\frac{r^2}{2R}+h \qquad (1)$$

暗纹条件：$2ne+\frac{\lambda}{2}=(2k+1)\frac{\lambda}{2} \quad k=0,1,2\cdots$

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

$$\Rightarrow r=\sqrt{\left(\frac{k\lambda}{2n}-h\right)2R}$$

# 拓展：



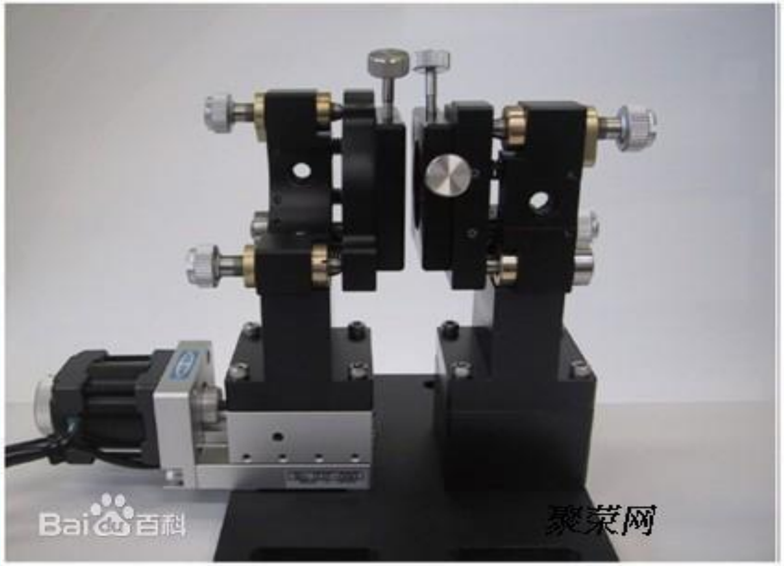
- 试解释运用“干涉膨胀仪” 测量热膨胀系数的原理？

# §12-6 迈克尔逊干涉仪



光的干涉被广泛运用于精密测长


迈克尔逊干涉仪

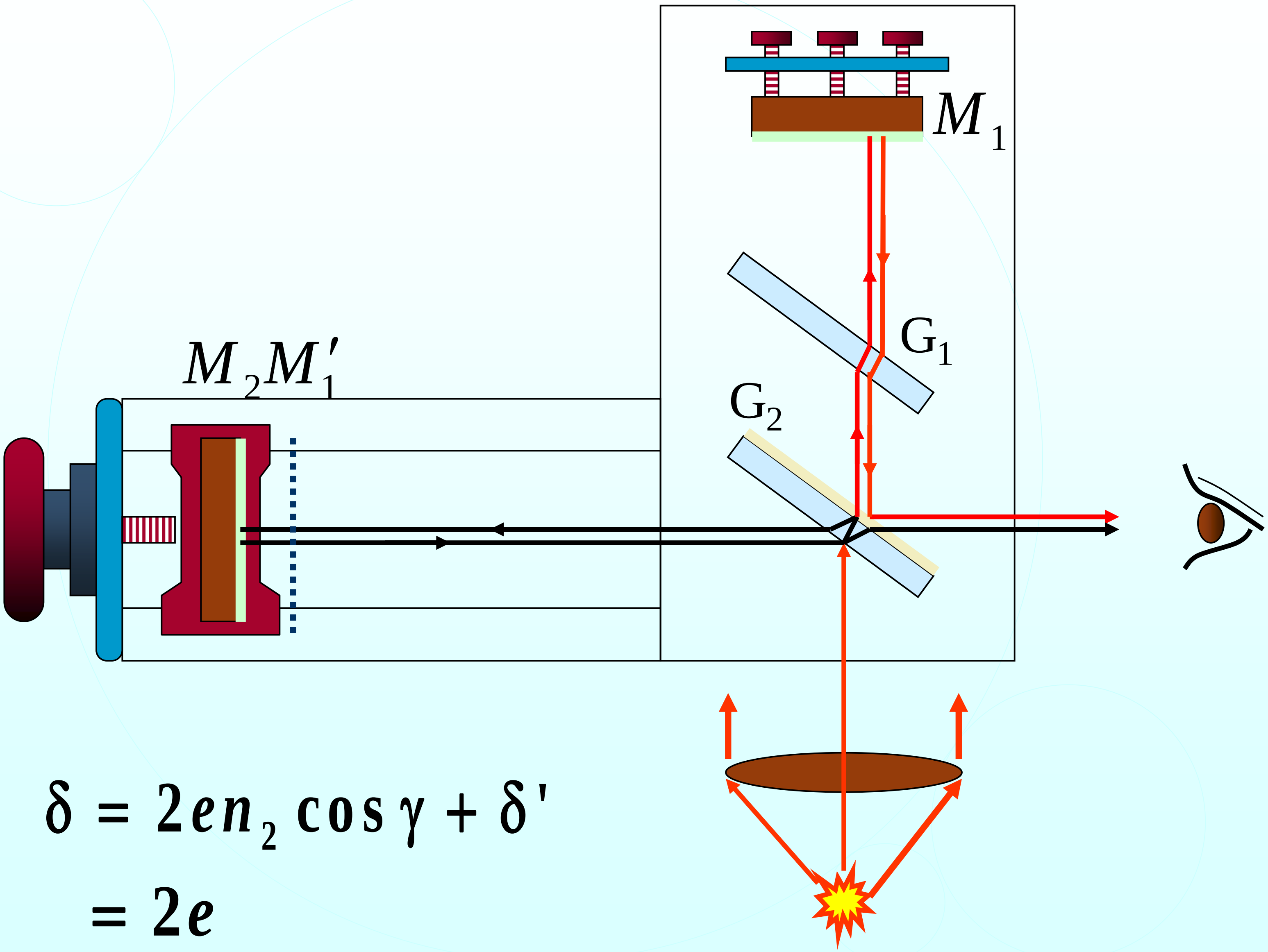



法布里-珀罗干涉仪

- 精度达到光波波长量级

# 迈克尔逊干涉仪

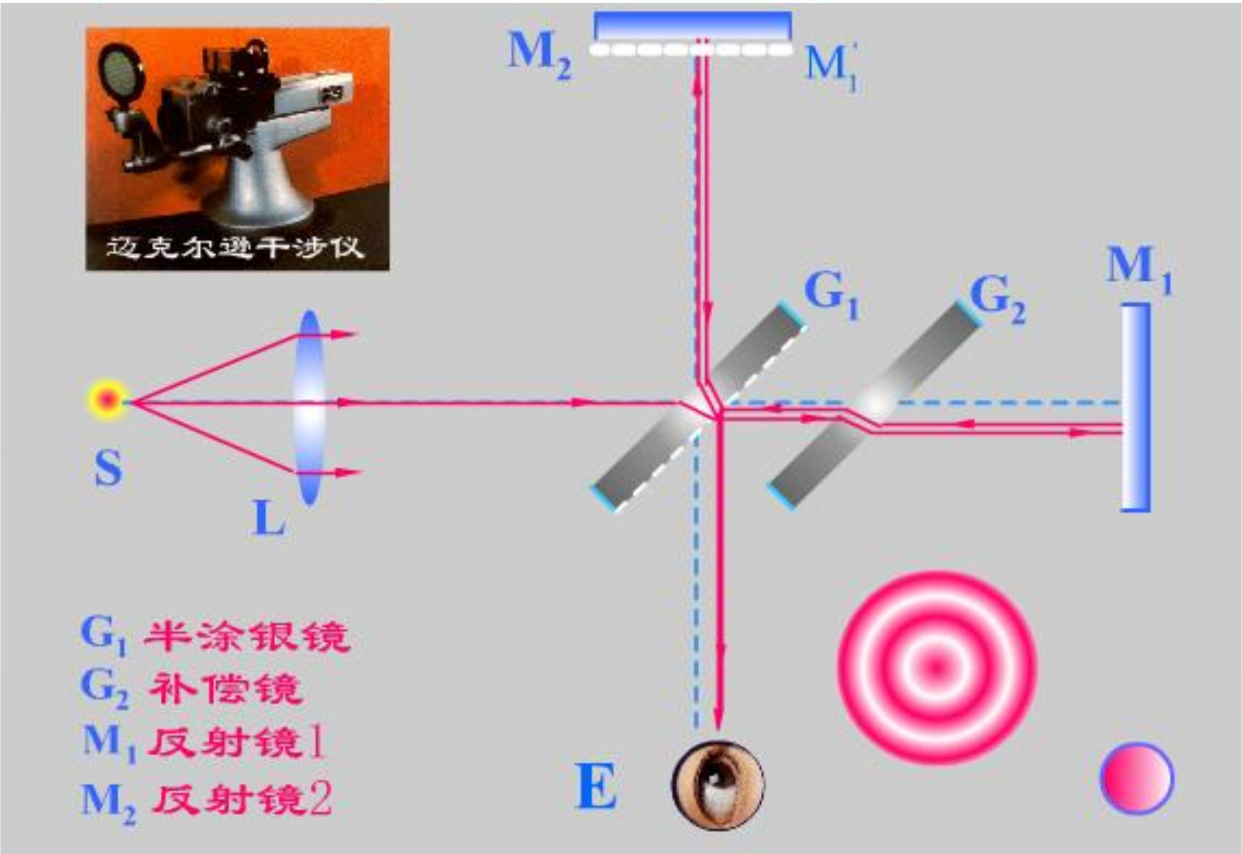





$$\delta = 2en_2\cos\gamma + \delta'$$
$$= 2e$$

# 在迈克尔逊干涉仪中看到的干涉条纹变化



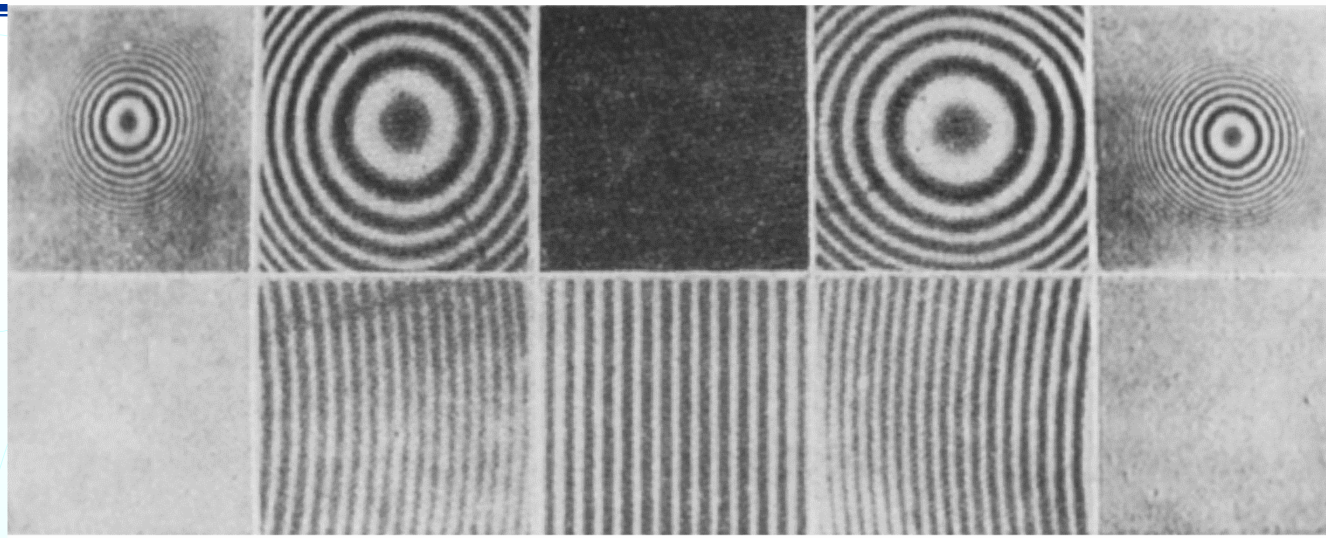



$M_1$移动距离为 $\Delta d$

条纹移动个数为$N$

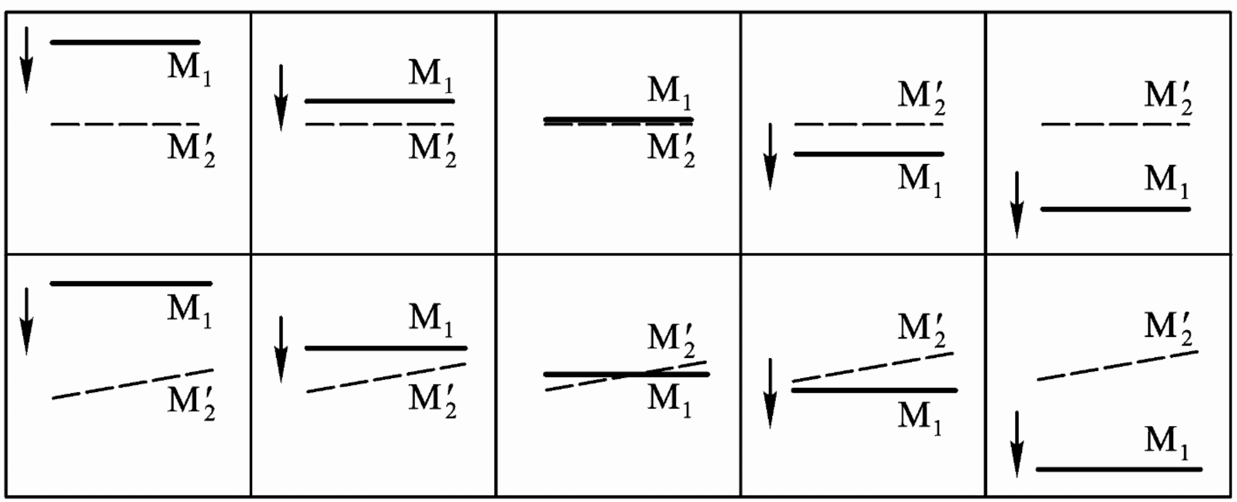
$$\boxed{\Delta d = N\frac{\lambda}{2}}$$

(a) (b) (c) (d) (e)



(f) (g) (h) (i) (j)

(a) (b) (c) (d) (e)




(f) (g) (h) (i) (j)

例、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$\lambda = 5893\text{Å}$）

解：

$$\Delta\delta = 2(n-1)t = \Delta k\lambda$$

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

$$= \frac{7\times 5893\times 10^{-10}}{2(1.4-1)} = 5.154\times 10^{-6}\ m$$