大学物理

张磊 （13072919527）
B824，Cyrus Tang Building

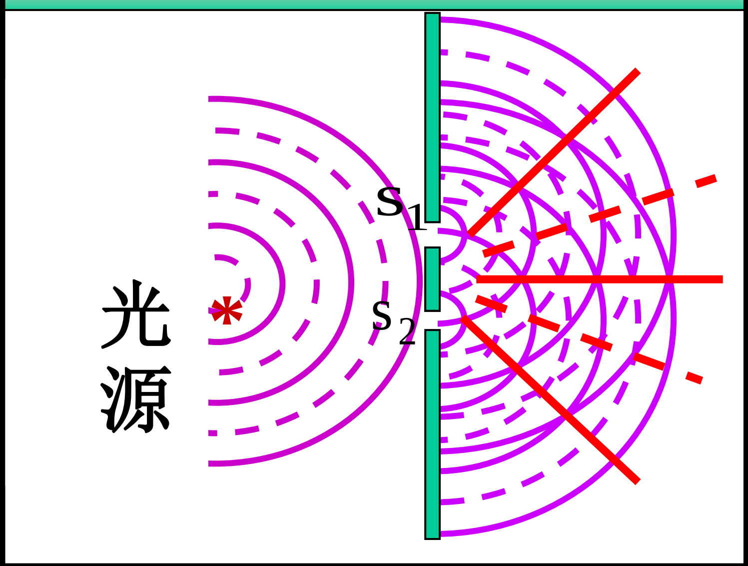
§14.3 获得相干光的方法 杨氏实验

原理： 将同一光源上同一点或极小区域发出的一束光分成两束

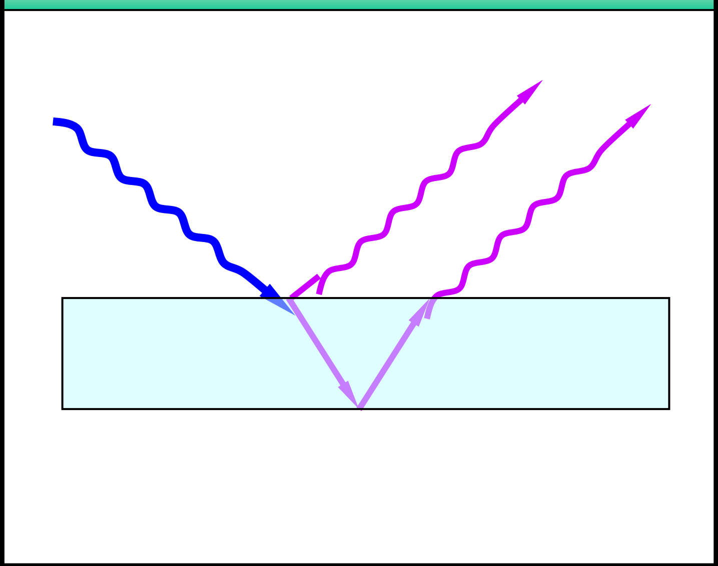
这两束光满足相干条件，是相干光；让它们经过不同的传播路径后，再使它们相遇，发生干涉现象

获得相干光的方法
- **1. 分波阵面法**（杨氏实验）
- **2. 分振幅法**（薄膜干涉）

分波阵面法



分振幅法



一. 杨氏双缝干涉实验

托马斯·杨（Thomas Young）

英国物理学家、医生和考古学家，光的波动说的奠基人之一

波动光学：杨氏双缝干涉实验

生理光学：三原色原理

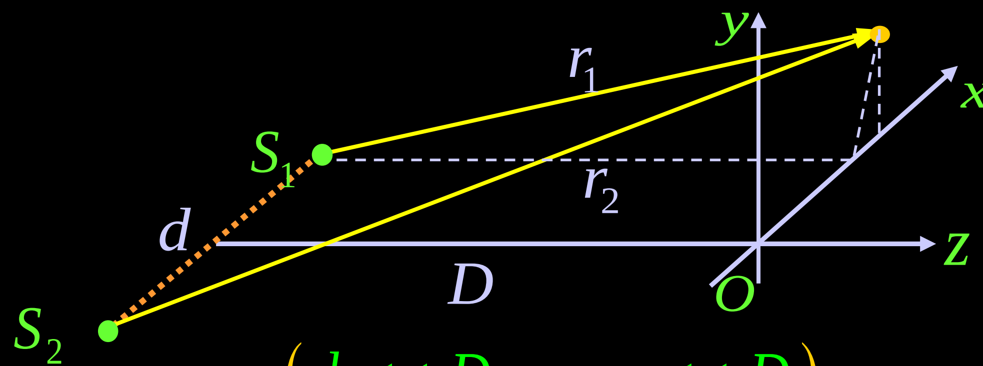
材料力学：杨氏弹性模量

考古学 ：破译古埃及石碑上的文字

1801年，杨氏巧妙地设计了一种把单个波阵面分解为两个波阵面以锁定两个光源之间的相位差的方法来研究光的干涉现象。杨氏用**叠加原理**解释了干涉现象，在历史上**第一次测定了光的波长**，为光的**波动学说**的确立奠定了基础。

- **理论分析**

$$\begin{cases} r_1^2 = D^2 + y^2 + (x - \frac{d}{2})^2 \\ r_2^2 = D^2 + y^2 + (x + \frac{d}{2})^2 \end{cases}$$



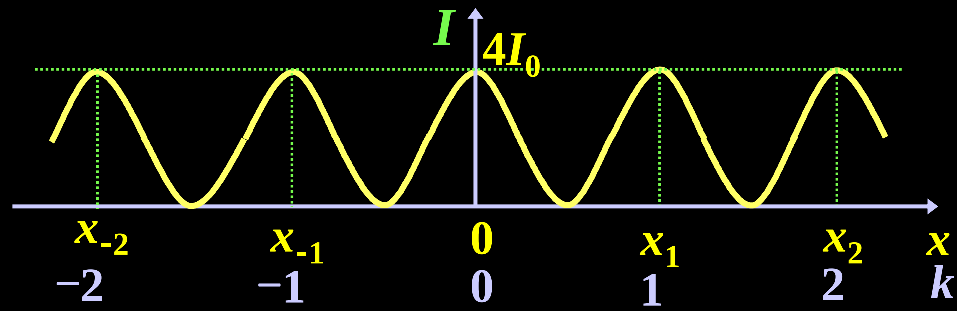
$$\left(d \ll D \ , \ x, y \ll D \right)$$

$$\delta = r_2 - r_1 = \frac{2xd}{r_2 + r_1} = \frac{xd}{D}$$

$$\begin{cases} \delta = \dfrac{xd}{D} = \pm 2k \cdot \dfrac{\lambda}{2} & k = 0, 1, 2, \quad \text{光强极大 —— 明纹} \\ \delta = \dfrac{xd}{D} = \pm(2k+1) \cdot \dfrac{\lambda}{2} & k = 0, 1, 2, \cdots \quad \text{光强极小 —— 暗纹} \end{cases}$$

$x = \pm 2k \dfrac{D\lambda}{2d}$ （光强极大位置） $x = \pm(2k+1) \dfrac{D\lambda}{2d}$ （光强极小位置）

- 光强分布



讨论

(1) 屏上相邻明条纹中心或相邻暗条纹中心间距为

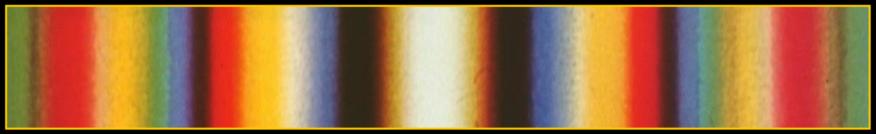
$$\boxed{\Delta x = \frac{D\lambda}{d}}$$

一系列相互平行等间距的明暗相间条纹

(2) 已知 d , D 及Δx, 可测λ

(3) Δx 正比 λ , D ; 反比 d

(4) 当用白光作为光源时



零级白色中央条纹，两边对称地排列着几条彩色条纹

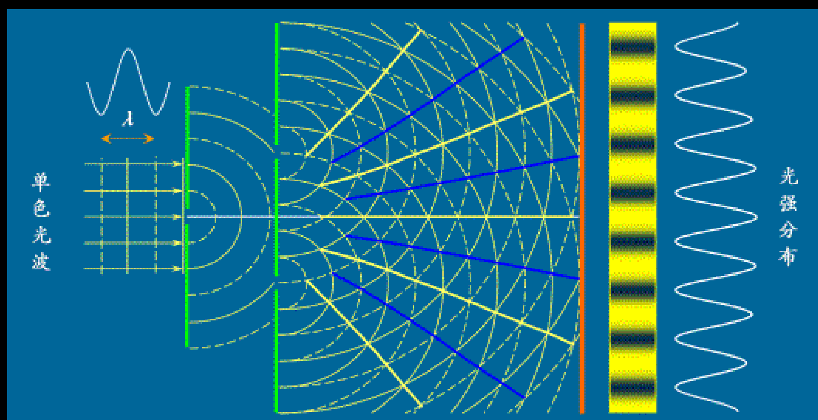
相干条件：频率相同、相位差恒定 、光矢量振动方向平行

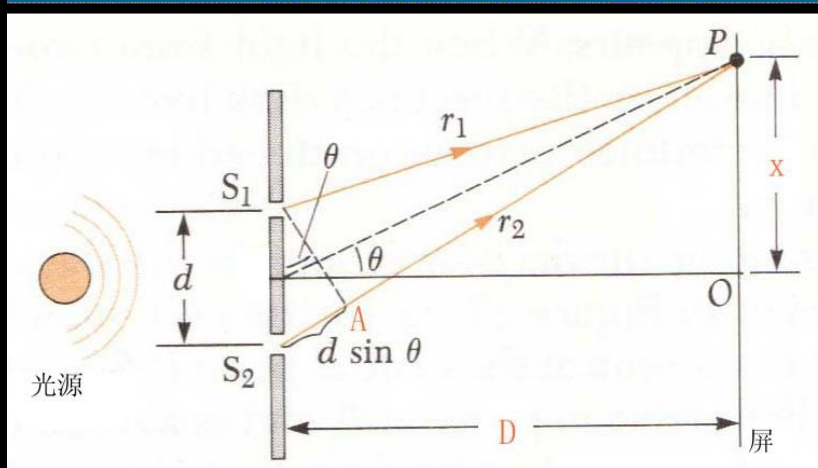
$$\text{相干叠加} \quad I_P = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi$$

普通光源 → 相干光：同一原子的同一次发光

获得相干光的方法　1. 分波阵面法　2. 分振幅法

杨氏双缝干涉实验





$$\delta = r_2 - r_1 = \frac{xd}{D}$$

$$= \begin{cases} \pm 2k\dfrac{\lambda}{2}, & \text{明条纹} \\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2}, & \text{暗条纹} \end{cases}$$

$$\Delta x = \frac{D\lambda}{d}$$

例 用白光作光源观察杨氏双缝干涉。设缝间距为 d ，缝面与屏距离为 D

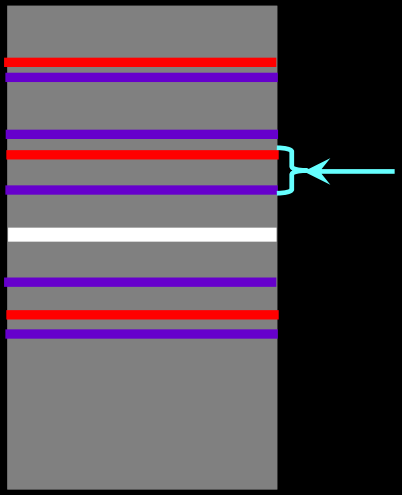
求 能观察到的清晰可见光谱的级次

解 在400 ~ 760 nm 范围内，明纹条件为 $\delta = \dfrac{xd}{D} = \pm k\lambda$

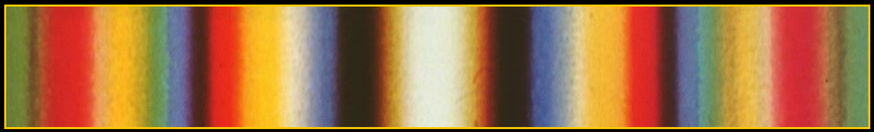
最先发生重叠的是某一级次的红光和高一级次的紫光

$$k\,\lambda_{红} = (k+1)\,\lambda_{紫}$$

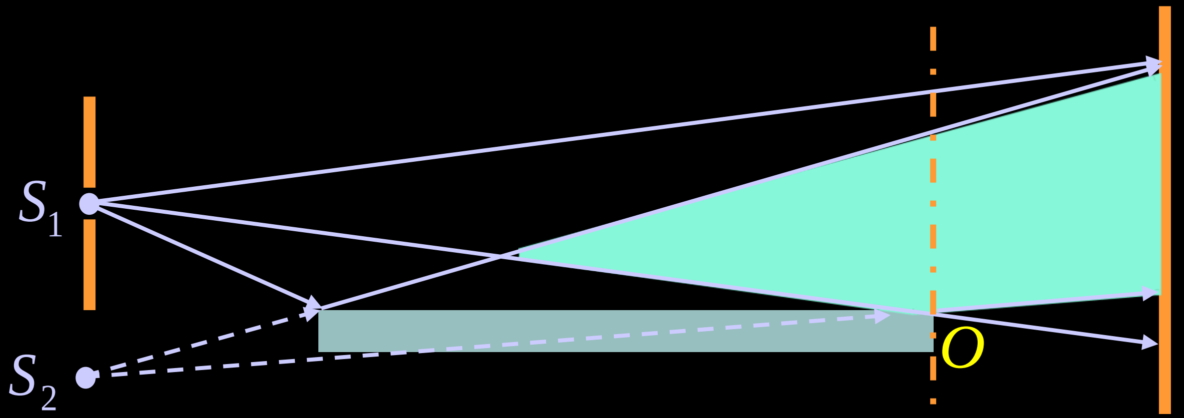
$$k = \frac{\lambda_{紫}}{\lambda_{红} - \lambda_{紫}} = \frac{400}{760-400} = 1.1$$



清晰的可见光谱只有一级



洛埃镜



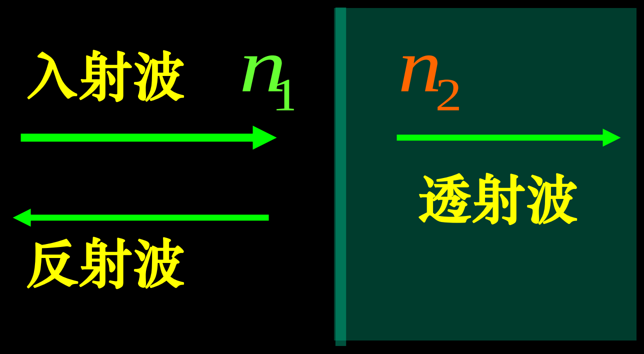
（洛埃镜实验结果与杨氏双缝干涉相似）

- 接触处，屏上 O 点出现**暗条纹** ⟶ **半波损失**

  相当于入射波与反射波之间附加了一个半波长的波程差

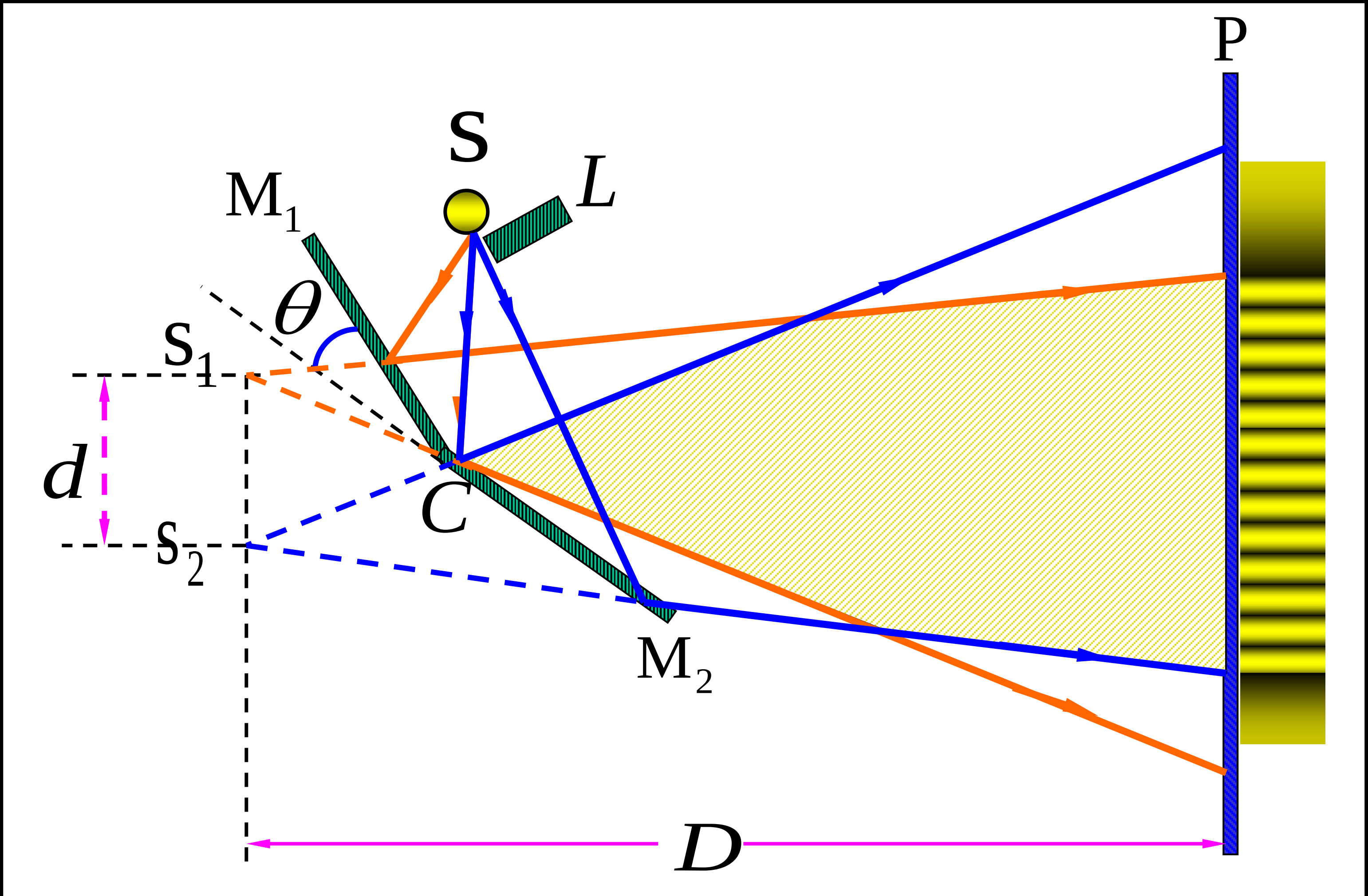
$n_1 < n_2$　　有半波损失

$n_1 > n_2$　　无半波损失



- 透射波没有半波损失

菲涅耳双面镜



§14.4 光程与光程差

在介质中传播的路程 r ⇔ 在真空中传播的路程 x

在相同时间 t 内

$$x = ct,\ r = ut \qquad u = \frac{c}{n} \Rightarrow x = nr$$

改变相同相位的条件下

$$\Delta\varphi = 2\pi\frac{r}{\lambda} = 2\pi\frac{x}{\lambda_0}$$

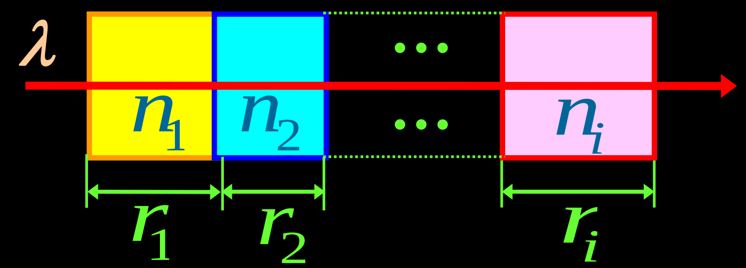
真空中光波长

$$\lambda = \frac{u}{\nu} = \frac{c}{n\nu} = \frac{\lambda_0}{n} \qquad x = \frac{\lambda_0 r}{\lambda} = nr$$

—— 光程

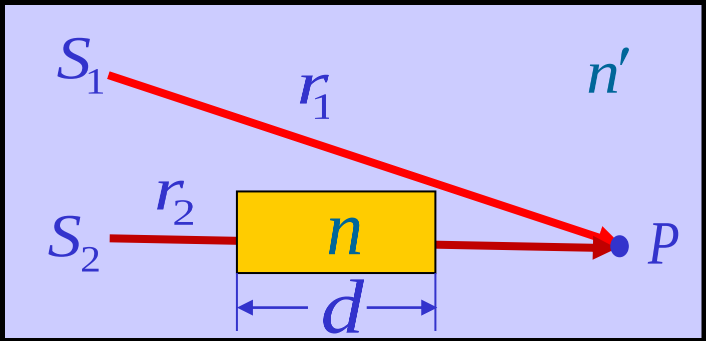
光程是一个折合量，在传播时间相同或相位改变相同条件下，把光在介质中传播的路程折合为光在真空中传播的路程

多种介质 → 光程 $= \sum_i n_i r_i$

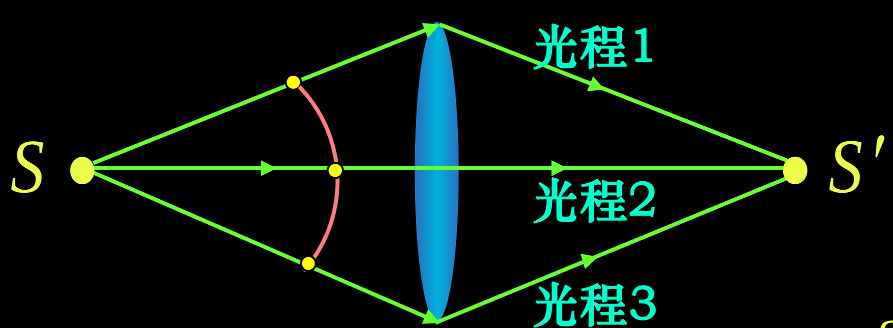


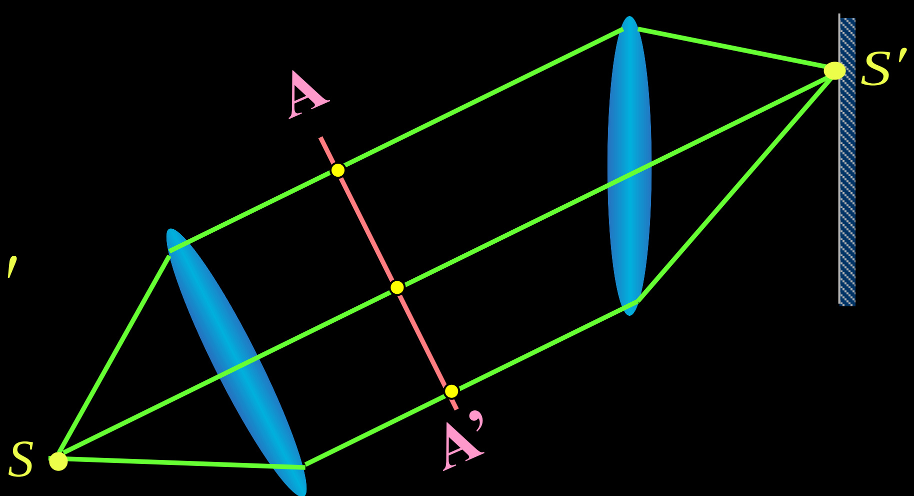
由光程差计算相位差

$$\left[n'(r_2-d)+nd-n'r_1\right]\frac{2\pi}{\lambda_0}$$



物象之间等光程原理

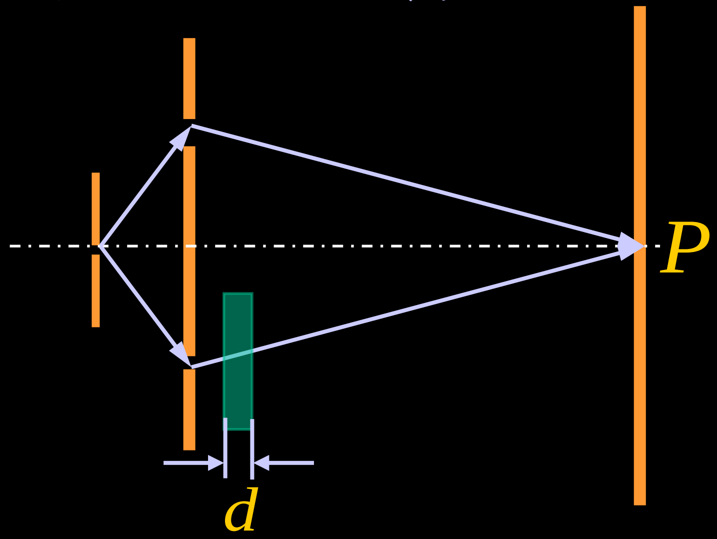




例 用折射率 n =1.58 的很薄的云母片覆盖在双缝实验中的一条缝上，这时屏上的第七级亮条纹移到原来的零级亮条纹的位置上。如果入射光波长为 550 nm

求 此云母片的厚度是多少?

解 设云母片厚度为 d 。无云母片时，零级亮纹在屏上 P 点，则到达 P 点的两束光的光程差为零。加上云母片后，到达 P 点的两光束的光程差为



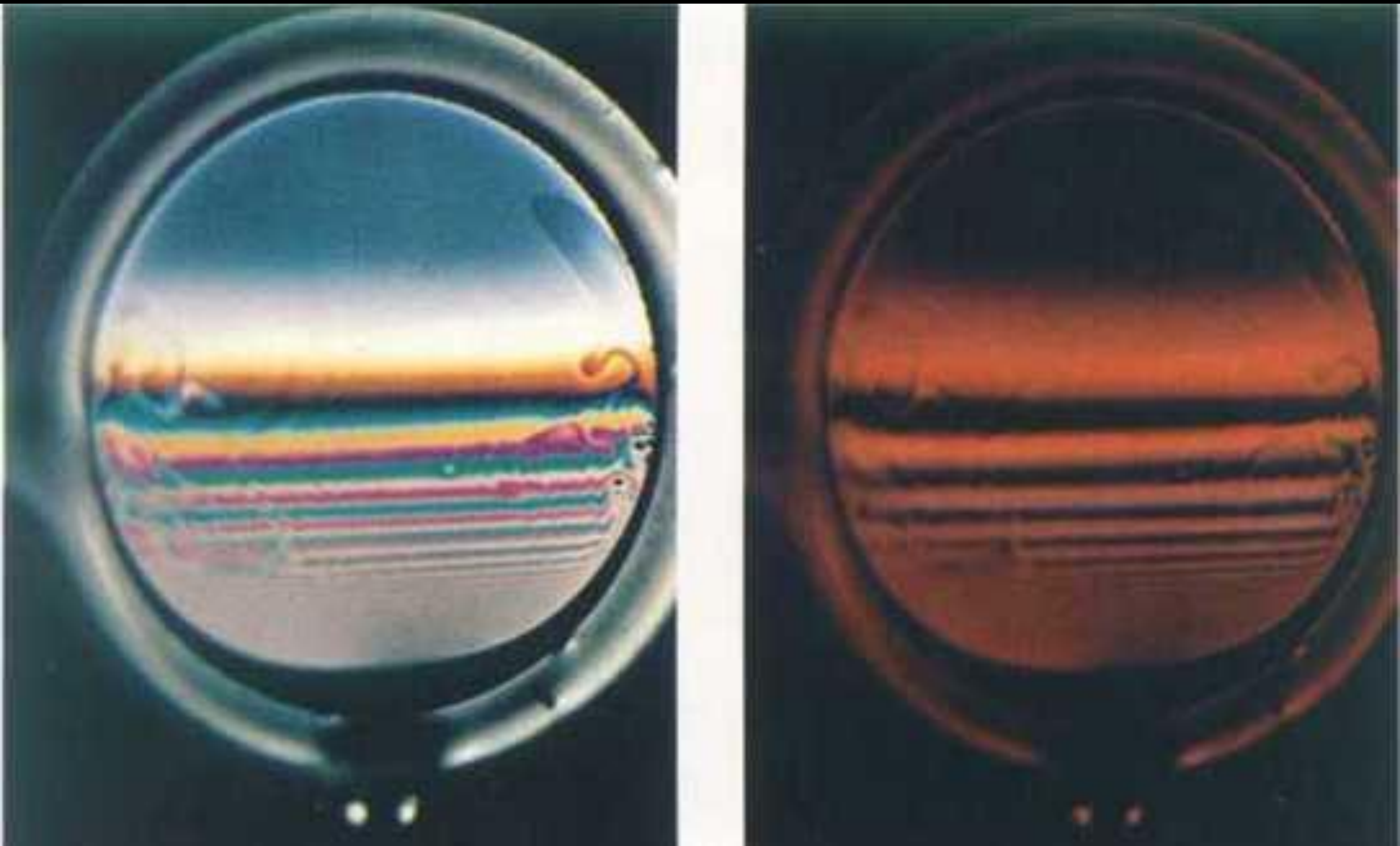
$$\delta = (n-1)d$$

当 P 点为第七级明纹位置时

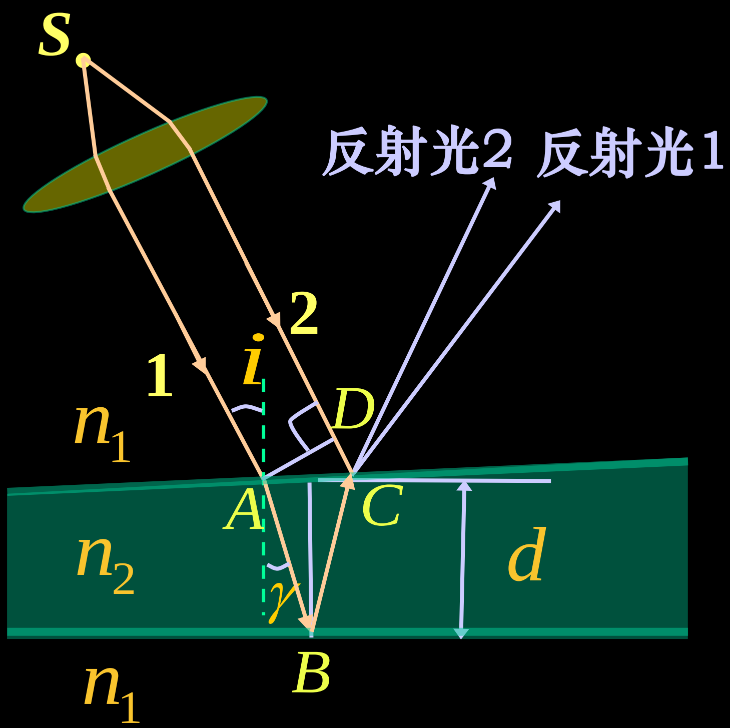
$$\delta = 7\lambda$$

$$d = \frac{7\lambda}{n-1} = \frac{7\times 550\times 10^{-6}}{1.58-1} = 6.6\times 10^{-3}\text{mm}$$

§14.5 薄膜干涉



一. 等厚干涉（分振幅法）



两条光线的光程差

$$\delta = n_2(AB + BC) - n_1 DC$$

$$\begin{cases} AB = BC = d/\cos\gamma \\ DC = AC\sin i = \sin i \cdot 2d\ \tan\gamma \\ n_1 \sin i = n_2 \sin\gamma \end{cases}$$

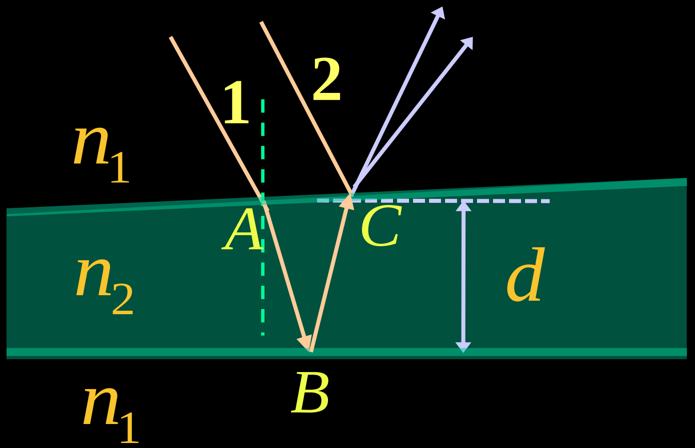
光程差 $\delta = 2n_2 AB - n_1 DC$

$$= 2n_2 d/\cos\gamma - n_1 \sin i \cdot 2d\ \tan\gamma$$

$$= 2n_2 d\left(\frac{1}{\cos\gamma} - \sin\gamma \cdot \tan\gamma\right)$$

$$= 2n_2 d\cos\gamma$$

光程差 $\boxed{2n_2 d\cos\gamma}$

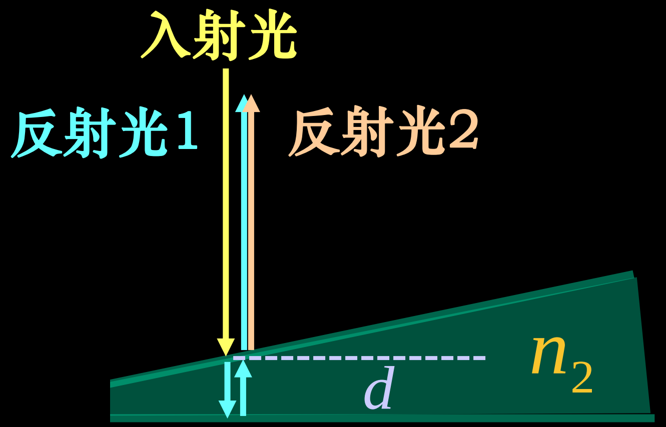


考虑半波损失 $\delta = 2n_2 d\cos\gamma + \dfrac{\lambda}{2}$

$$\delta = 2n_2 d\cos\gamma + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} 2k\cdot\dfrac{\lambda}{2} & k = 1, 2, \quad \text{相长干涉} \\ (2k+1)\cdot\dfrac{\lambda}{2} & k = 0, 1, 2, \quad \text{相消干涉} \end{cases}$$

光线垂直入射

$i = \gamma = 0$



$$\delta = 2n_2 d + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} 2k \cdot \dfrac{\lambda}{2} & k = 1,2,\cdots \text{相长干涉} \\ (2k+1) \cdot \dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \text{相消干涉} \end{cases}$$

讨论

(1) 同一厚度 *d* 对应同一级条纹——等厚条纹

(2) 两相邻明条纹（或暗条纹）对应的厚度差都等于

$$d_{k+1} - d_k = \frac{\lambda}{2n_2}$$

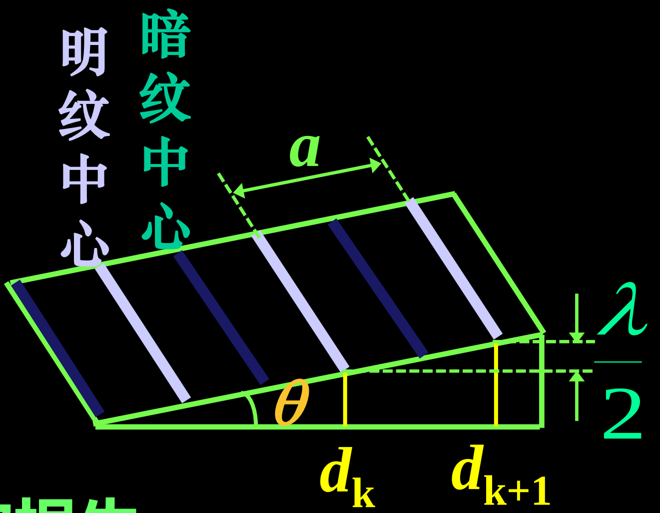
若为空气层时，相邻明条纹（或暗条纹）对应的厚度差

$$d_{k+1} - d_k = \frac{\lambda}{2}$$

1. 劈尖干涉

光垂直入射时，两相邻条纹对应的空气层厚度差都等于

$$d_{k+1}-d_k=\frac{\lambda}{2}$$



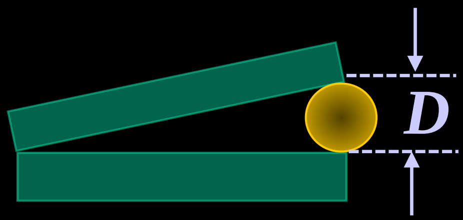
相邻条纹之间距 $a\sin\theta=\frac{\lambda}{2}$

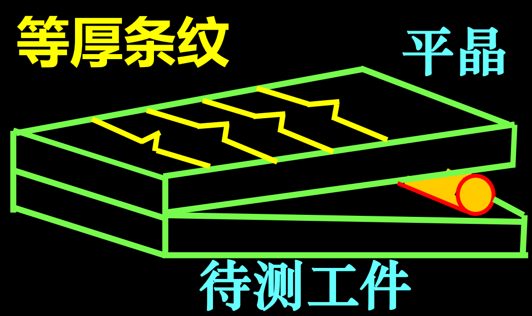
讨论

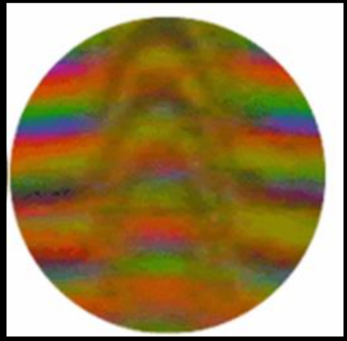
(1) 空气劈尖顶点处是**暗纹 —— 半波损失**

(2) 可测量小角度θ、微位移 x、微小直径 D、波长 λ 等

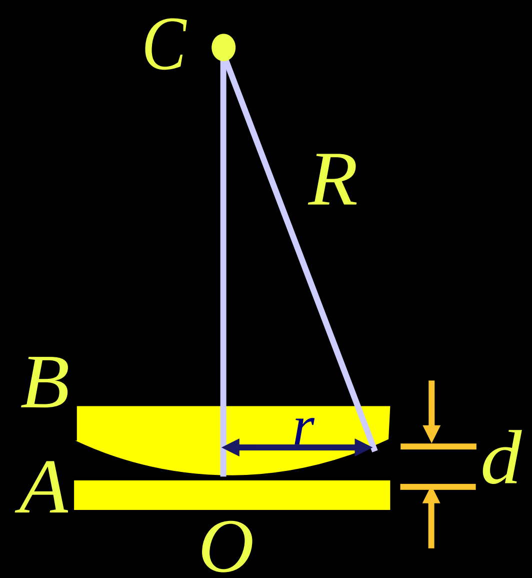
(3) 测表面不平整度

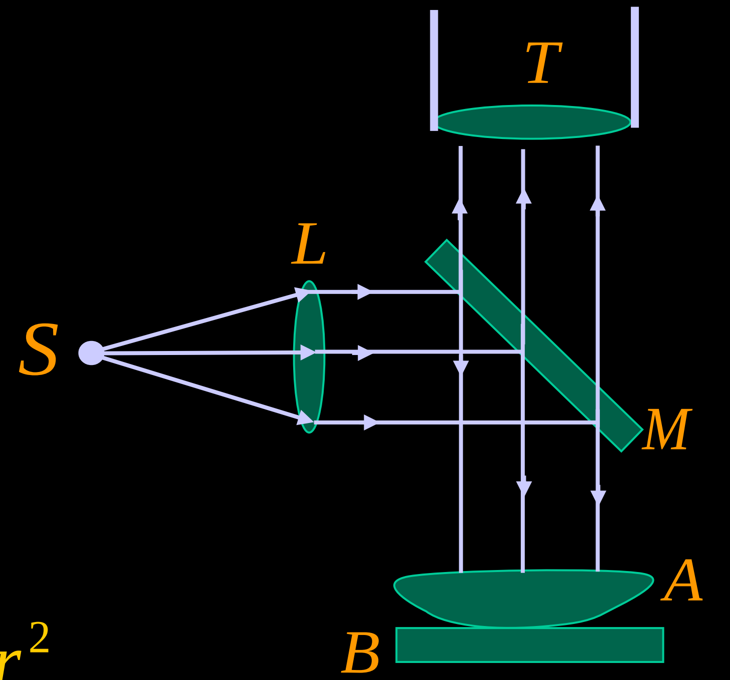






2. 牛顿环





光程差

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

$$R^2 = r^2 + (R-d)^2 \xrightarrow{\text{R>>d, 消去}d^2} d = \frac{r^2}{2R}$$

明纹 $$2\cdot\frac{r^2}{2R} + \frac{\lambda}{2} = 2k\frac{\lambda}{2}, k = 1,2,3,\cdots$$

暗纹 $$2\cdot\frac{r^2}{2R} + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, k = 0,1,2,\cdots$$

半径 $\begin{cases} r = \sqrt{(2k-1)\cdot\dfrac{R\lambda}{2}} & k = 1,2,3,\cdots \text{明纹} \\ r = \sqrt{k\lambda R} & k = 0,1,2,\cdots \text{暗纹} \end{cases}$

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

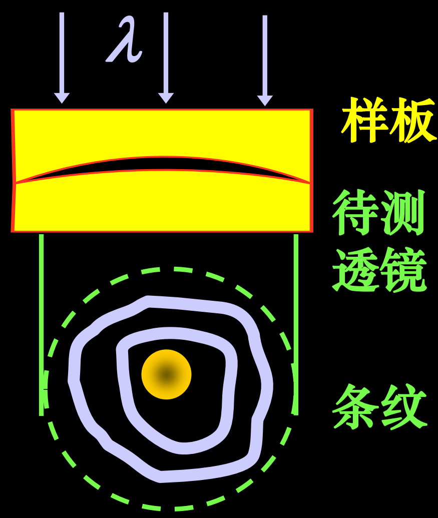
讨论

(1) 测透镜球面的半径 R

已知 λ，测 m、r_{k+m}、r_k，可得 R

(2) 测波长 λ

已知 R，测出 m、r_{k+m}、r_k，可得 λ

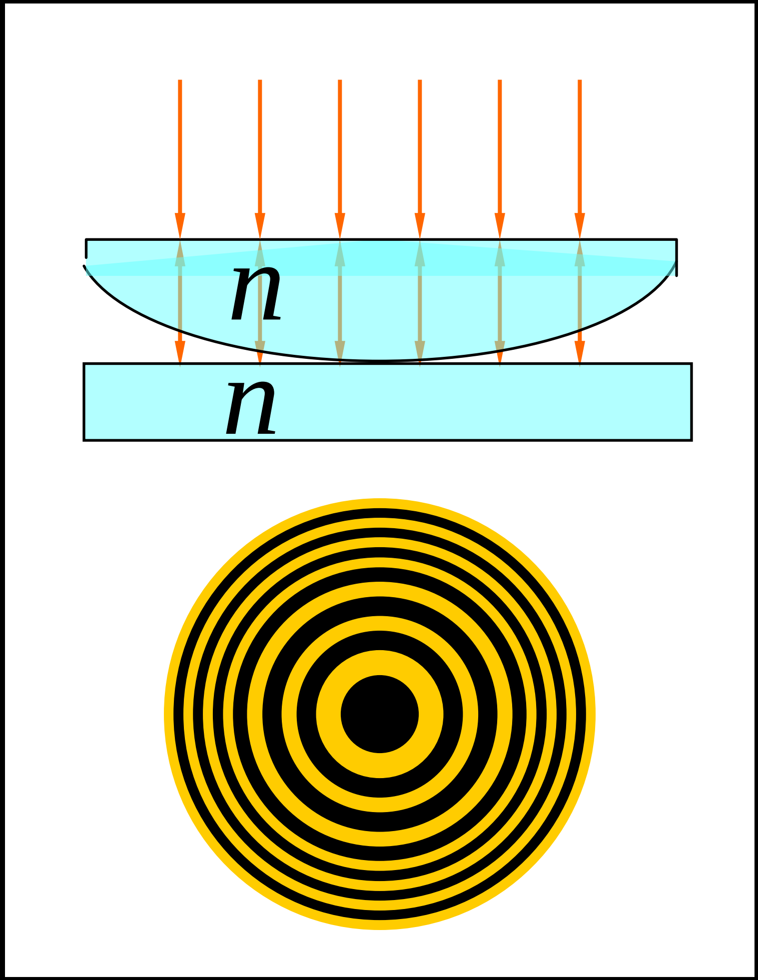


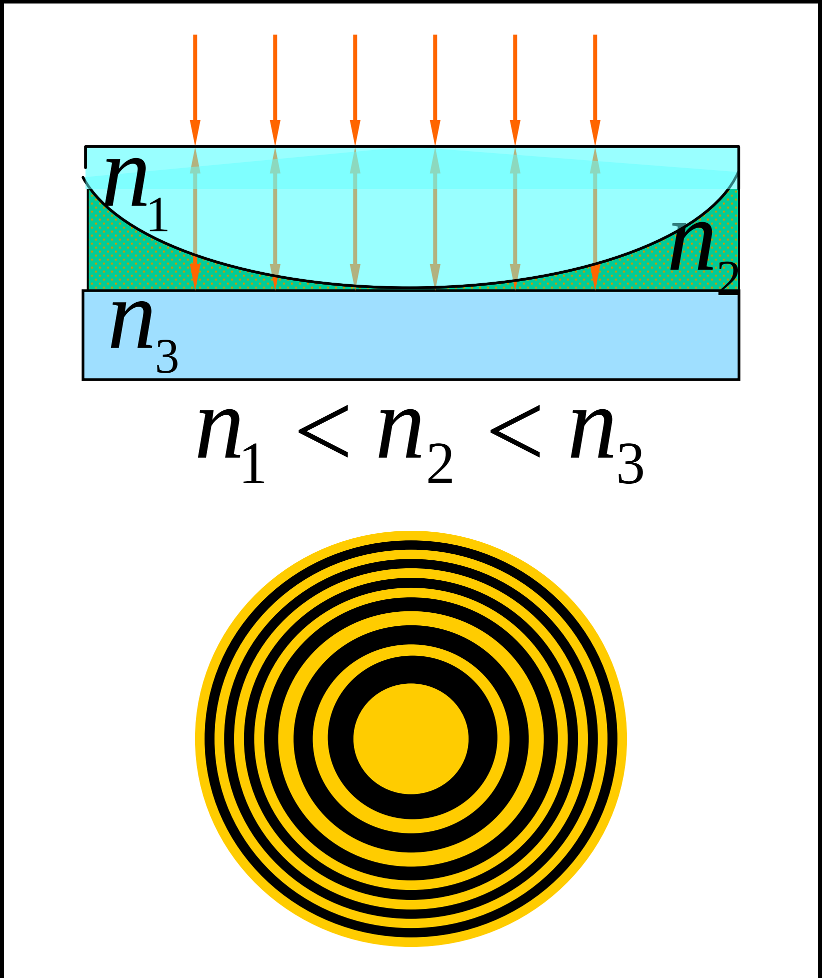
(3) 检测透镜的曲率半径误差及其表面平整度

(4) 若接触良好，中央为暗纹——半波损失

(5) 透射图样与反射图样互补

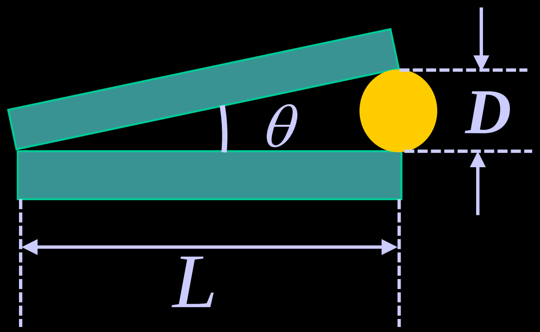
半波损失需具体问题具体分析





例 为了测量一根细的金属丝直径 D，按图办法形成空气劈尖，用单色光照射形成等厚干涉条纹，用读数显微镜测出干涉明条纹的间距，就可以算出 D。已知 单色光波长为589.3 nm，测量结果是：金属丝与劈尖顶点距离 L=28.880 mm，第1条明条纹到第 31 条明条纹的距离为 4.295 mm

求 金属丝直径 D



解 $\sin\theta \approx \dfrac{D}{L}$ $\qquad a\cdot\dfrac{D}{L}=\dfrac{\lambda}{2}$ $\qquad D=\dfrac{L}{a}\cdot\dfrac{\lambda}{2}$

由题知 $a=\dfrac{4.295}{30}=0.14317\text{mm}$

直径 $D=\dfrac{L}{a}\cdot\dfrac{\lambda}{2}=\dfrac{28.880}{0.14317}\times\dfrac{1}{2}\times 0.5893\times 10^{-3}\text{mm}$

$=0.05944\text{mm}$

例 一平面单色光波垂直照射在厚度均匀的薄油膜上，油膜覆盖在玻璃板上，所用光源波长可连续变化，观察到500nm和700nm这两个波长的光在反射中消失。油的折射率为1.30，玻璃的折射率为1.50

求 油膜的最小厚度

解 根据题意，不需考虑半波损失，暗纹的条件为

$$\begin{cases} 2nd=(2k_1+1)\dfrac{\lambda_1}{2} \\ 2nd=[2k_2+1]\dfrac{\lambda_2}{2} \end{cases} \qquad k_1=k_2+1$$

$$d=\frac{\lambda_1\lambda_2}{2n(\lambda_2-\lambda_1)}=\frac{500\times700}{2\times1.30\times(700-500)}$$

$$=6.73\times10^2(\text{nm})$$

例 在平面玻璃板上滴一滴油，用 λ=576nm 的单色光垂直照射，从反射光中看到图示的干涉条纹。

问 (1)油滴与玻璃交界处是明条纹还是暗条纹?

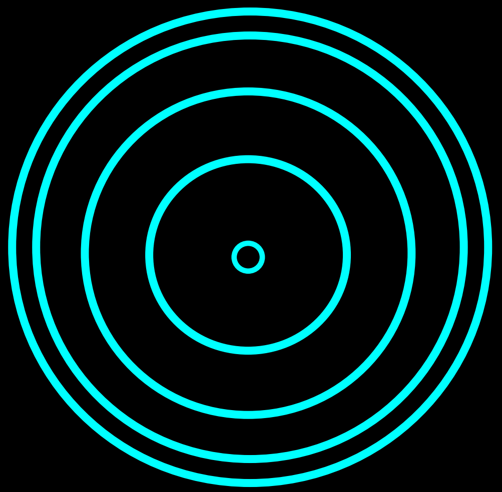
(2)油膜的最大厚度是多少? (油: n_2=1.60, 玻璃: n_3=1.50)

(3)若油滴逐渐摊开，条纹将如何变化

解 (1)因$n_1<n_2$，$n_2>n_3$，所以要考虑半波损失

由光程差 $$2n_2 d + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

→ 交界处 $d = 0$ 对应于 $k = 0$ 的暗纹



(2) 中心点为 $k = 4$ 的暗纹

$$\therefore d_{\max} = \frac{k\lambda}{2n_2} = 7.2\times10^{-7}\ \text{m}$$

(3) 最外暗环逐渐向外扩大，中心点明暗交替变化，条纹级数逐渐减少

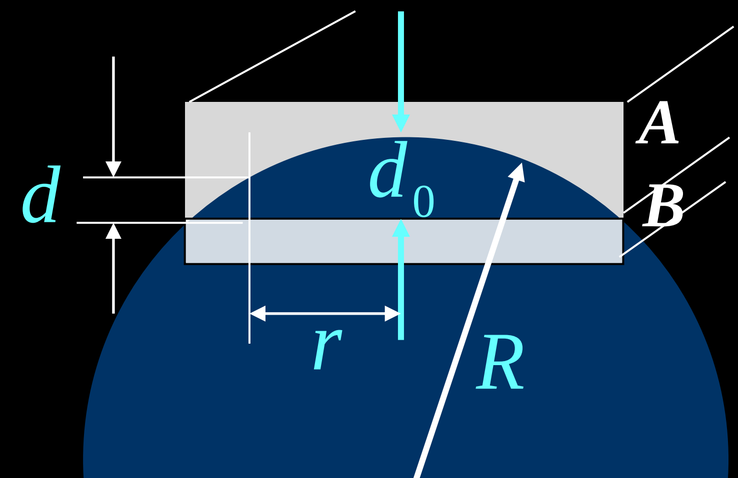
例 如图*A*为一柱面状平凹透镜，*B*为一平面玻璃片。现用波长为 λ 的单色平行光自上方垂直往下照射，观察*A*和*B*间空气薄膜的反射光干涉的等厚条纹。已知 R，d_0　$d_0 = 2\lambda$

求 (1) 分析干涉条纹的特点(形状，分布，级次高低)

(2) 明条纹距中心线的距离

(3) 共能看到多少条明条纹

(4) 若玻璃片*B*向下平移，条纹如何移动？



解 (1) 关于中心对称的平行于玻璃片长边的平行直条纹；条纹中间疏两侧密；中间条纹级次高，边上条纹级次低。

(2) $\delta = 2d + \dfrac{\lambda}{2}$　　$R^2 = r^2 + [R-(d_0-d)]^2$

$$d \approx d_0 - \frac{r^2}{2R} \qquad \delta = 2(d_0 - \frac{r^2}{2R}) + \frac{\lambda}{2}$$

明条纹 $\delta = 2(d_0 - \frac{r^2}{2R}) + \frac{\lambda}{2} = 2k \cdot \frac{\lambda}{2} \qquad k = 1,2,3\cdots$

$$r = \sqrt{2Rd_0 - (k - \frac{1}{2})R\lambda} \qquad k = 1,2,3\cdots$$

(3) 中间条纹级次高

$$\delta_{\max} = 2d_0 + \frac{\lambda}{2} = 2(2\lambda) + \frac{\lambda}{2} = 4.5\lambda$$

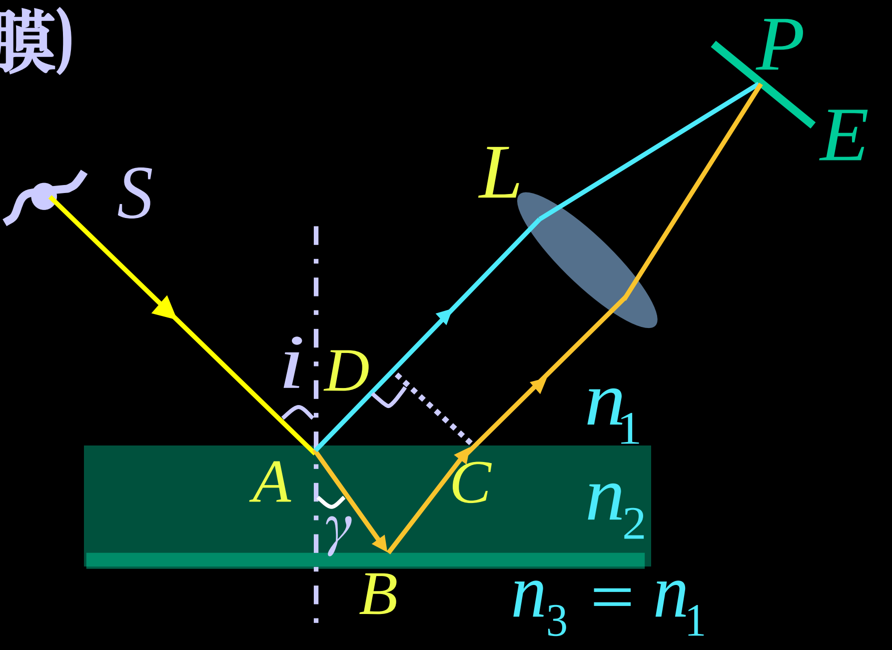
可以看到**8**条明条纹。

(4)若玻璃片***B***向下平移，条纹向两侧移动。

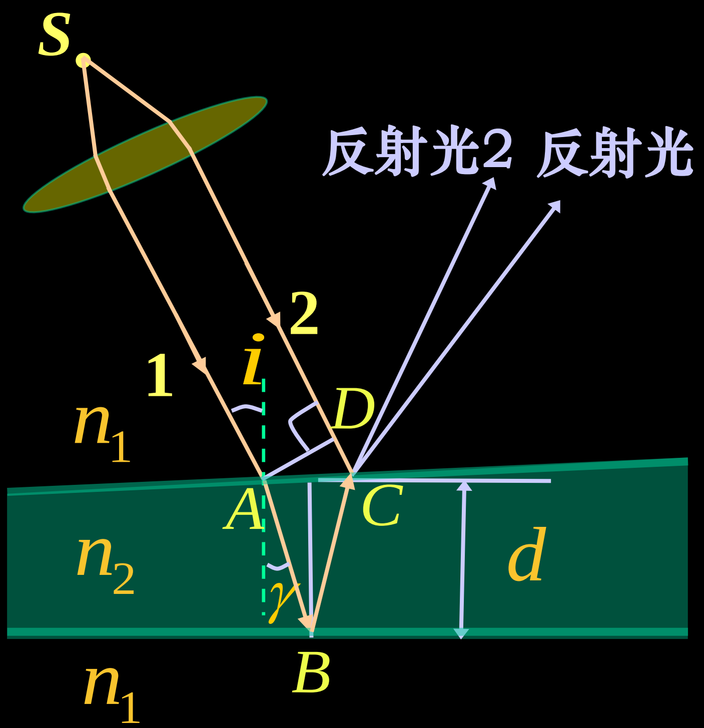
二. 等倾干涉(厚度均匀的薄膜)

两条光线的光程差

$$\delta = n_2\left(AB + BC\right) - n_1 AD$$



*等厚干涉　（分振幅法）



两条光线的光程差

$$\delta = n_2(AB + BC) - n_1 DC$$

$$\begin{cases} AB = BC = d/\cos\gamma \\ DC = AC\sin i = \sin i \cdot 2d\ \tan\gamma \\ n_1 \sin i = n_2 \sin\gamma \end{cases}$$

光程差 $\delta = 2n_2 AB - n_1 DC$

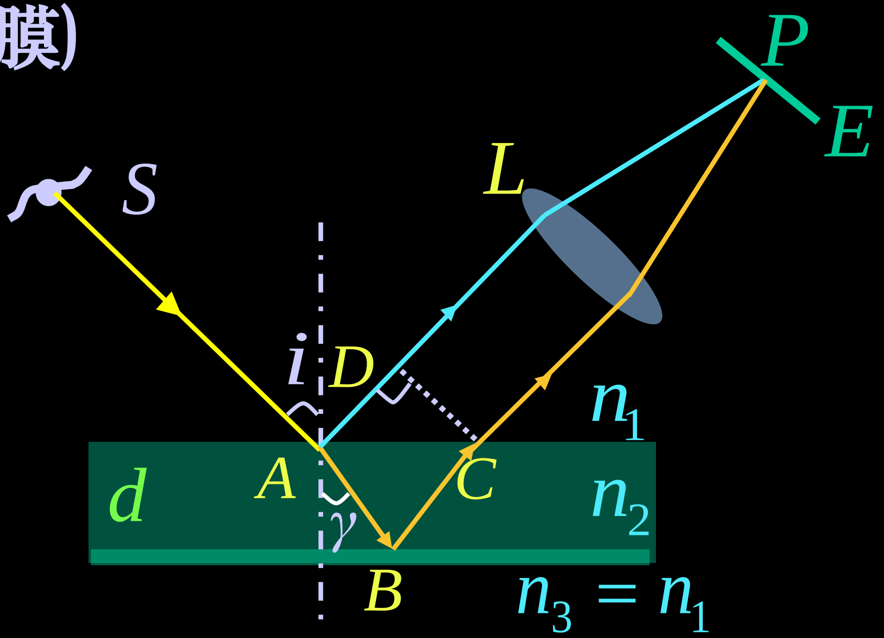
$$= 2n_2 d/\cos\gamma - n_1 \sin i \cdot 2d\ \tan\gamma$$

$$= 2n_2 d\left(\frac{1}{\cos\gamma} - \sin\gamma \cdot \tan\gamma\right)$$

$$= 2n_2 d\cos\gamma$$

二. 等倾干涉(厚度均匀的薄膜)

两条光线的光程差



$$\delta = n_2\left(AB + BC\right) - n_1 AD$$

$$= 2n_2 d\cos\gamma$$

考虑到有半波损失

$$\delta = 2n_2 d\cos\gamma + \frac{\lambda}{2}$$

$$\delta = 2n_2 d\cos\gamma + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} 2k \cdot \dfrac{\lambda}{2} & k = 1,2,3\cdots \text{相长干涉} \\ (2k+1) \cdot \dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \text{相消干涉} \end{cases}$$

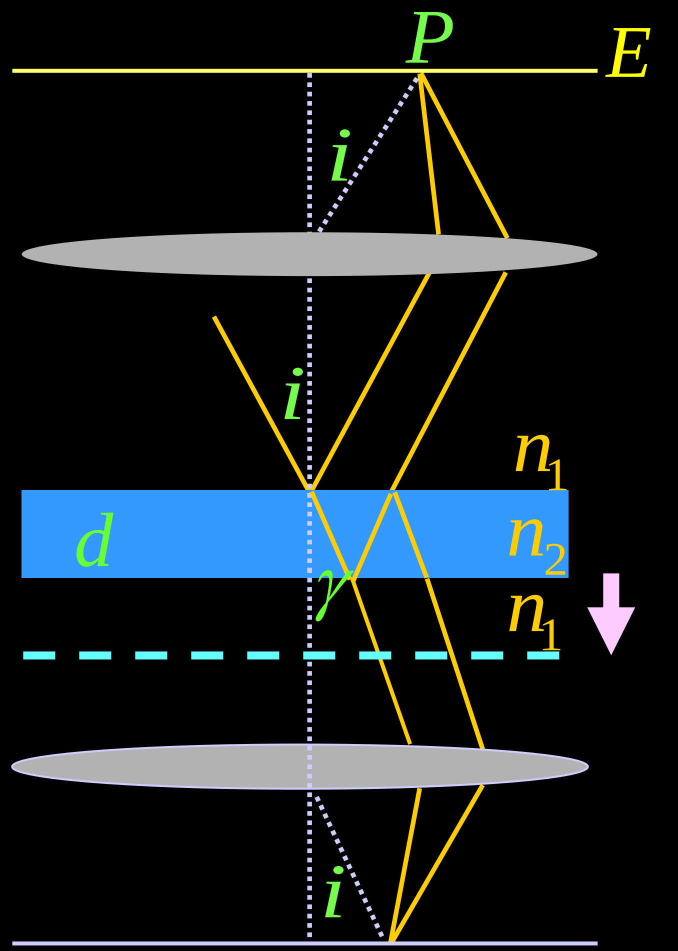
条纹特点 $\delta = 2n_2 d\cos\gamma + \dfrac{\lambda}{2}$

(1) 等倾干涉条纹为一系列**同心圆环**；**内疏外密**；内圆纹的级次比外圆纹的级次高

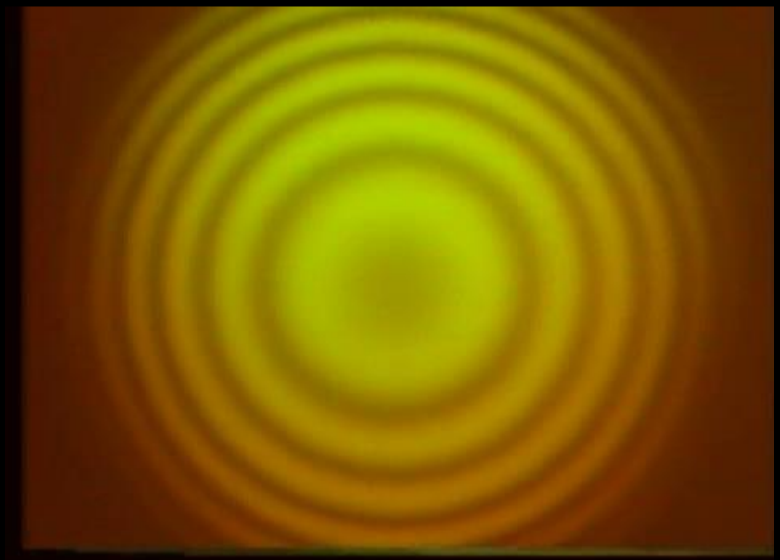
(2) **膜厚变化时，条纹发生移动。** 当薄膜厚度增大时，圆纹从中心冒出，并向外扩张，条纹变密

(3) 使用**面光源条纹更清楚明亮**

(4) **透射光图样与反射光图样互补**



薄膜干涉的一般情况是相当复杂的。其干涉的特征与光源的尺寸、膜的厚薄和形状以及如何观测都有十分密切的关系。



等倾条纹

牛顿环

如何在实验上区分上述条纹是等倾还是牛顿环？

牛顿环与等倾条纹都是**内疏外密**的**圆环形**条纹

牛 顿 环：级次由环心向外**递增**

等倾条纹：级次由环心向外**递减**

当膜层厚度减少时，牛顿环的环纹向外扩张，等倾条纹则相反

增反膜和增透膜

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.

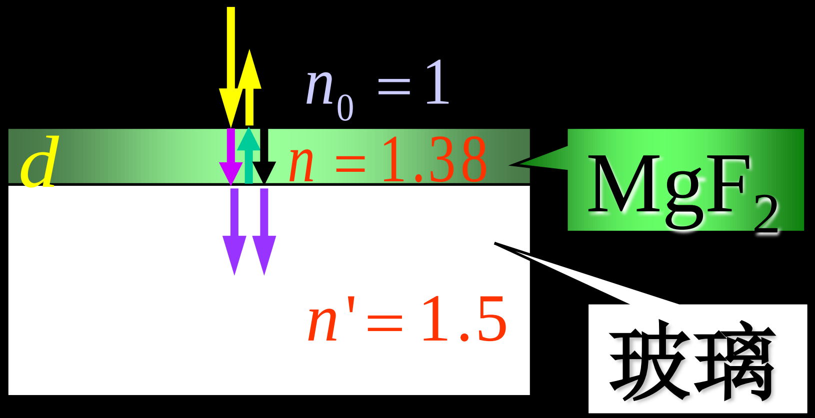
激光器谐振腔

宇航服

光学薄膜的应用

1. 增透膜

在光学器件（透镜等）镀以一层薄膜以提高或降低透射率



光在膜的上下表面反射时都有半波损失

欲使透射最大，则要求**反射光干涉相消——无反射光**

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

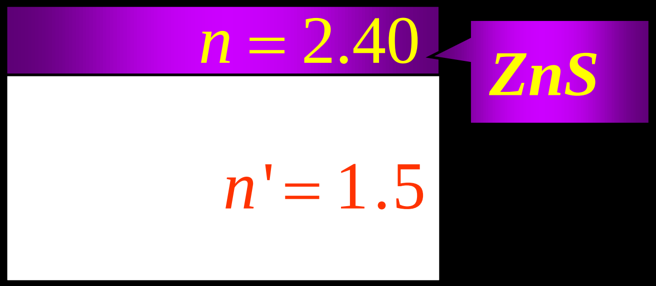
膜的最小厚度为 $d_{\min} = \dfrac{\lambda}{4n}$ ---- 此时**透射光增强**

或 $nd_{\min} = \dfrac{\lambda}{4}$

即光学厚度为某一波长的1/4时，则膜为该波长的增透膜

2. 高反射膜(增反膜)

光在每层膜的上下表面反射时只有一个面有半波损失

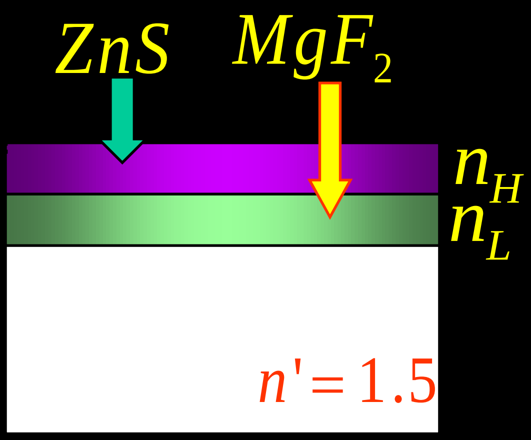


第一层

$$2n_H d_H + \lambda/2 = k\lambda, k = 1, 2,$$

最小光学厚度为

$$n_H d_H = \lambda/4$$



第二层

$$2n_L d_L + \lambda/2 = k\lambda, k = 1, 2,$$

最小光学厚度为

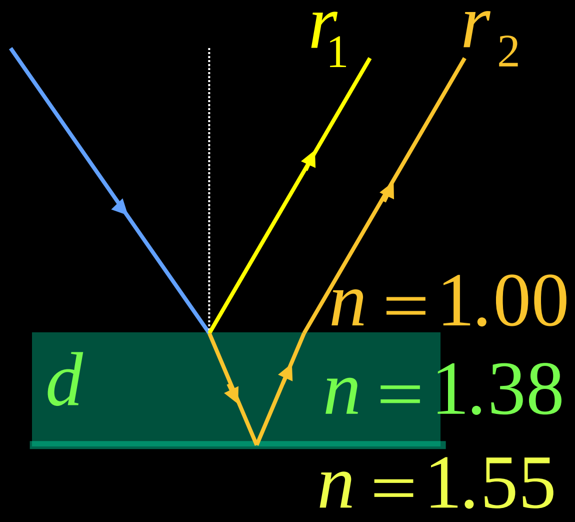
$$n_L e_L = \lambda/4$$

即每层膜的光学厚度都为λ/4时，可得到该波长的高反射膜

例 波长550 nm黄绿光对人眼和照像底片最敏感。要使照像机对此波长反射小，可在照像机镜头上镀一层氟化镁MgF_2薄膜，已知氟化镁的折射率 $n=1.38$，玻璃的折射率$n=1.55$

求 氟化镁薄膜的最小厚度

解 两条反射光干涉减弱条件



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

增透膜的最小厚度

$$d=\frac{\lambda}{4n}=\frac{550}{4\times1.38}\approx100\mathrm{nm}$$

说明 **增反膜** ⟶ **薄膜光学厚度（nd）仍可以为 $\lambda/4$**

但膜层折射率 n 比玻璃的折射率大

镜头颜色为什么发紫?