

第三章 光的干涉

(干涉装置, 光场的时空相干性)

第二节 分振幅干涉装置

2.1 等厚干涉

(Fringes of equal thickness)

2.1 等厚干涉

2.1.1 分振幅干涉概述

2.1.2 薄膜表面的等厚条纹

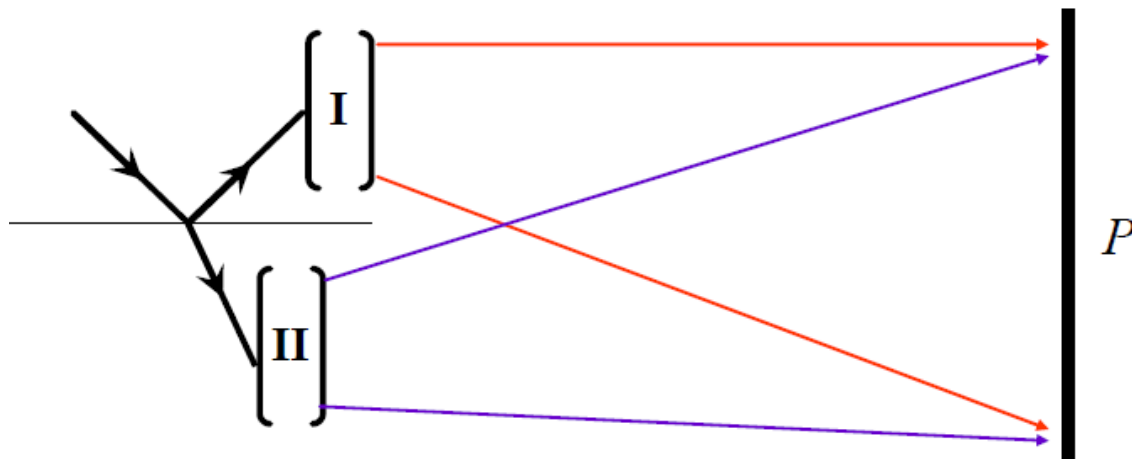
2.1.3 楔形薄膜的等厚条纹

2.1.4 牛顿环

2.1.5 等厚干涉条纹的观测方法及倾角的影响

2.1.1 分振幅干涉概述

分振幅干涉装置



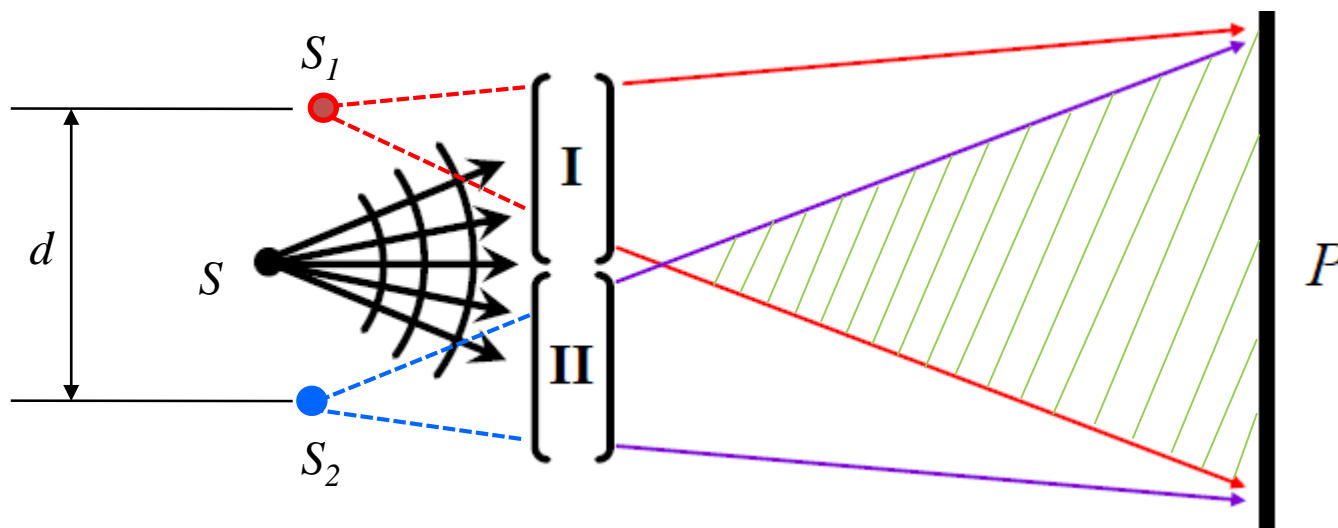
分振幅法： 让一束光透射到透明媒质的分界面上，光能流一部分透射、一部分反射，再分别通过光具组，使反射和透射光发生交叠。由于这些光都是从同一列光分得的，所以是相干的。因为能流正比于复振幅的模平方，而相干涉的光是将原入射光的能量（振幅）分为几部分得到的，因此被称为分振幅法。

典型： 薄膜干涉等。

分波前干涉装置

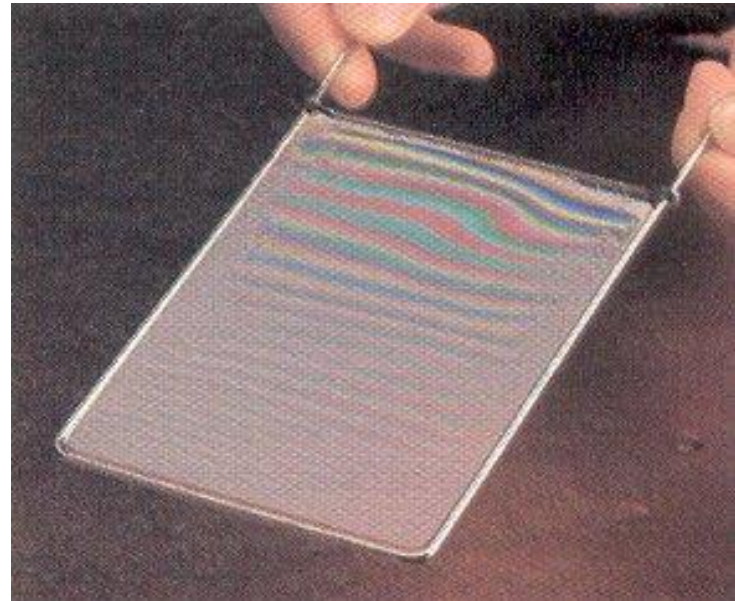
分波前法：将点光源产生的**波前横向分为两个部分**，使其分别通过两个光具组，经衍射、反射和折射后交叠，在一定区域产生干涉场。

典型：杨氏双缝干涉。



2.1.1 分振幅干涉概述

生活中的彩色薄膜干涉



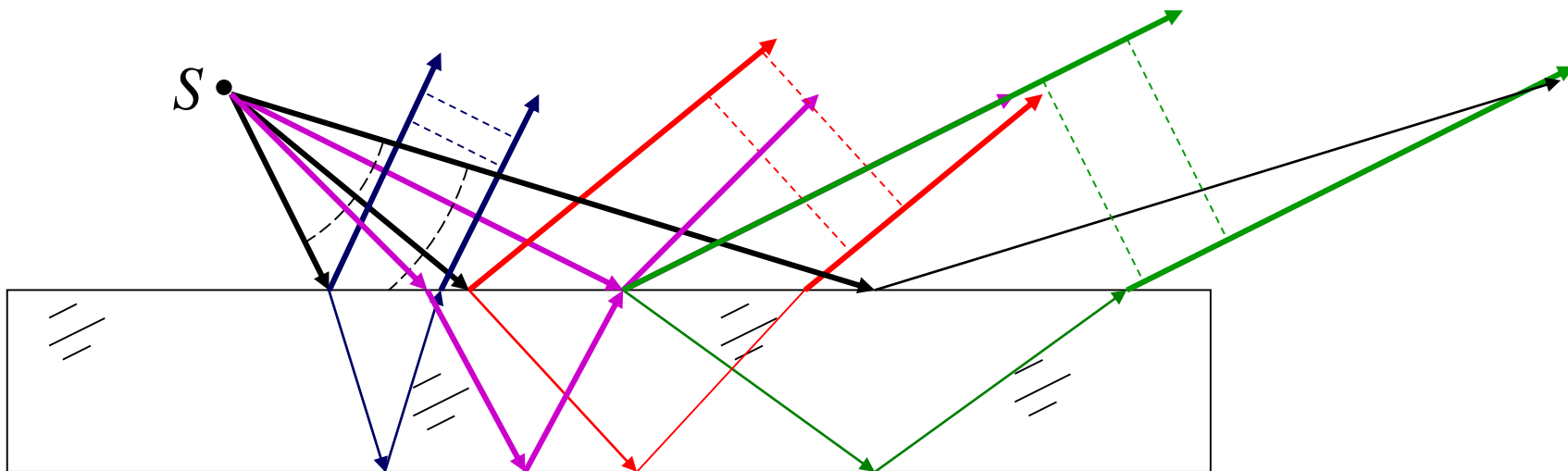
2.1.1 分振幅干涉概述

薄膜干涉概述

薄膜干涉存在于折射光和反射光交迭的所有区域，但有实际意义的主要有两种，分别定位于薄膜表面和无限远：

- (1) 等厚条纹：厚度不均匀薄膜表面的干涉场；
- (2) 等倾条纹：厚度均匀薄膜无穷远处的干涉场

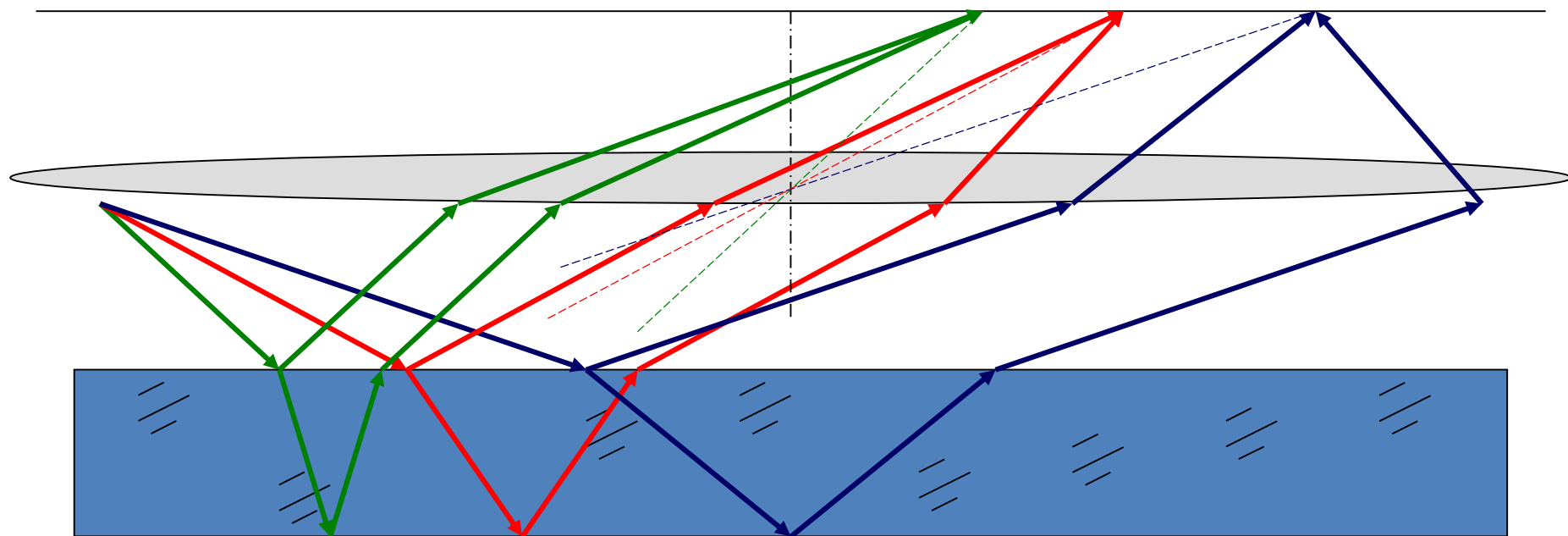
因此需要采用一定的方法或装置，观察某一类光波的干涉



2.1.1 分振幅干涉概述

薄膜干涉概述

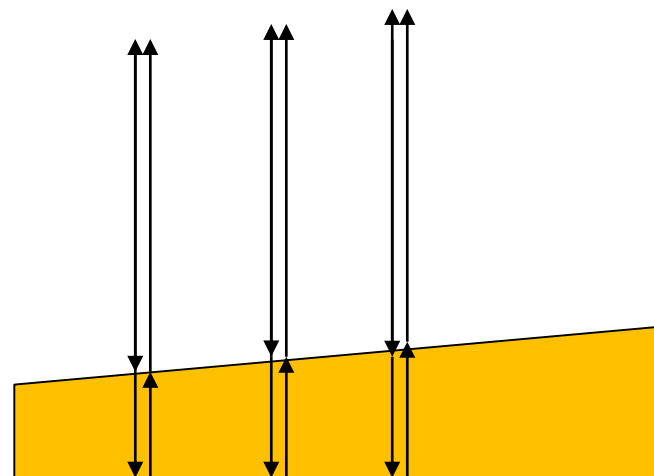
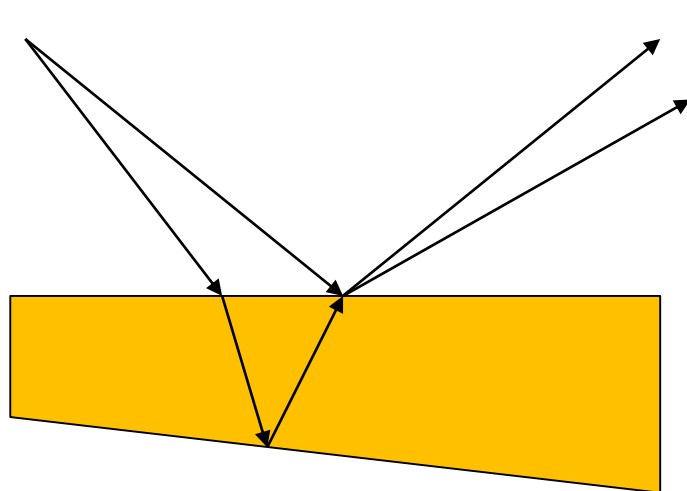
(1) 相同方向的光波之间的干涉——等倾干涉



2.1.1 分振幅干涉概述

薄膜干涉概述

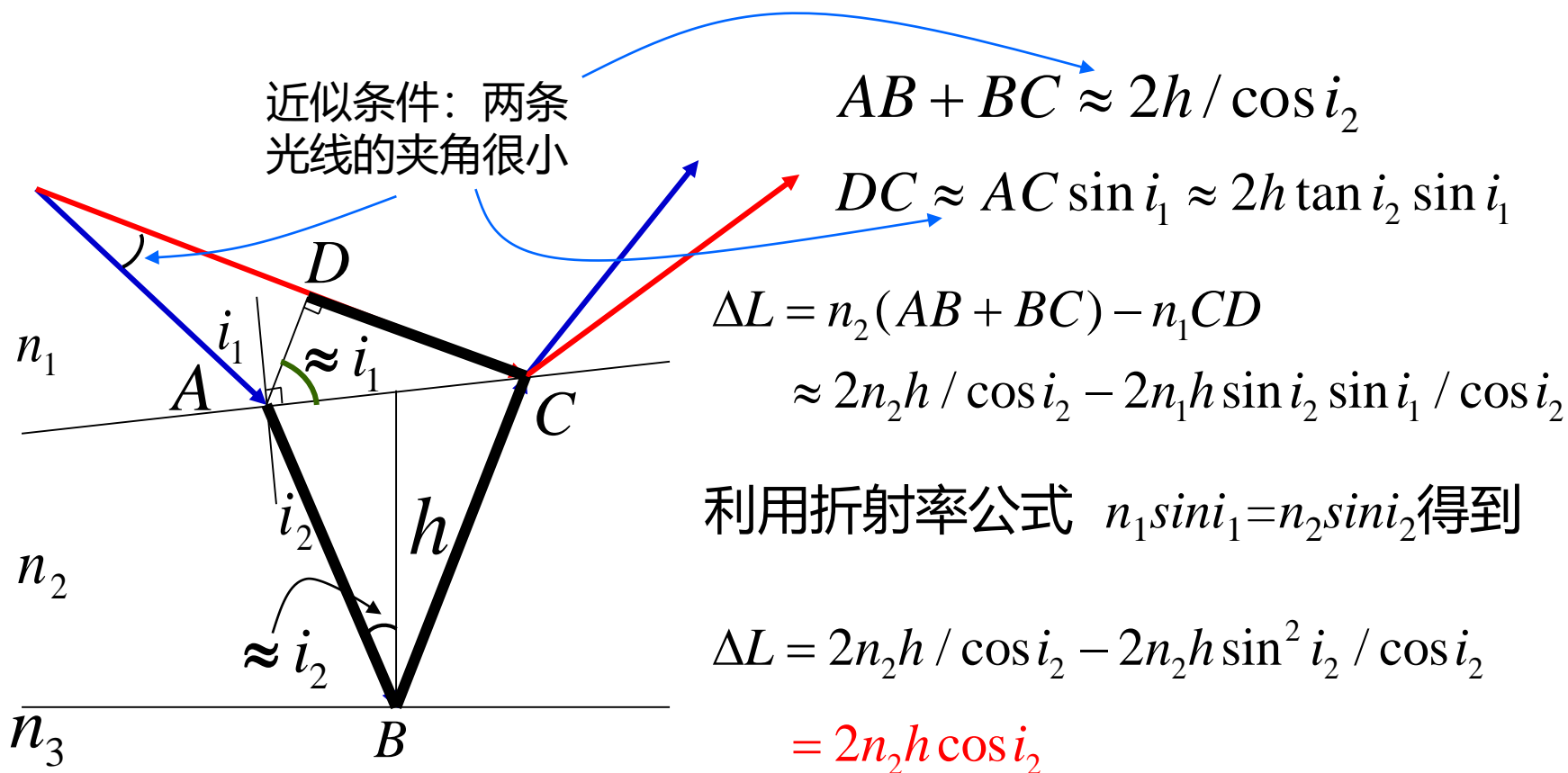
(2) 不同方向的光波之间的干涉——等厚干涉



等厚干涉的“厚”指的并非膜的厚，而是指光线的“厚”，光线“经过相同的厚度”。

2.1.2 薄膜表面的等厚条纹

等厚干涉的计算— (1) 几何光程差



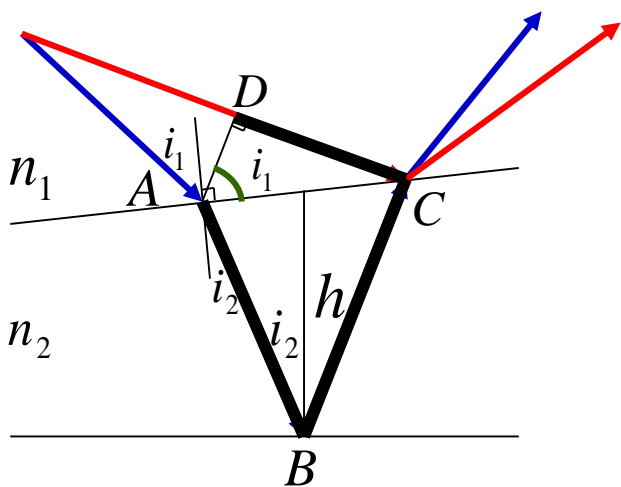
本图描绘的是点光源发出的两条临近光线之间的干涉，而非单一光线自身的干涉。因为在薄膜干涉中，单一光线自己的交点一般不在薄膜的表面，以这样的模型，可以将干涉点定位在薄膜的上表面，从而简化讨论。

此处暂时不考虑界面反射时的半波损问题

2.1.2 薄膜表面的等厚条纹

等厚干涉的计算— (1) 几何光程差

薄膜干涉的干涉条纹 (仅考虑几何光程差) $\Delta L = 2n_2 h \cos i_2$



(1) 亮条纹

$$\Delta L = j\lambda \Rightarrow h = \frac{j\lambda}{2n_2 \cos i_2}$$

(2) 暗条纹

$$\Delta L = (j + \frac{1}{2})\lambda \Rightarrow h = \frac{(2j + 1)\lambda}{4n_2 \cos i_2}$$

干涉条纹在薄膜表面沿等厚线分布, 称为等厚干涉条纹

正入射 $i_1 = i_2 = 0$ $\cos i_1 = \cos i_2 = 1$

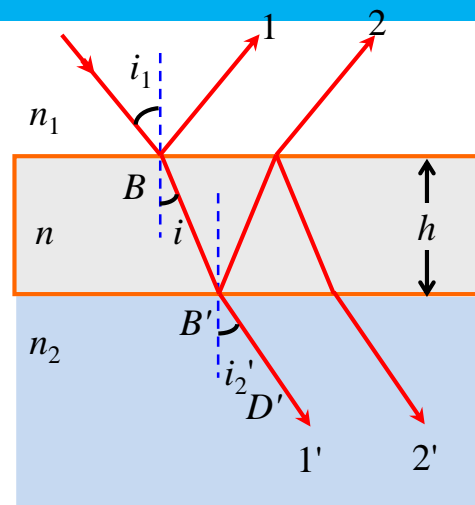
$$\Delta L = 2n_2 h$$

总结: 相邻条纹间的光程差 $\Delta L = \lambda$, 相应位置的厚度差 $h = \lambda / 2n_2$ 。

2.1.2 薄膜表面的等厚条纹

等厚干涉的计算— (2) 附加光程差

由光波在薄膜表面上反射时产生的相位突变引起



① $n_1 > n > n_2$ 或 $n_1 < n < n_2$

- 反射光波1、2相对于入射光波**均无或均有**半波损失，但两者之间的 $\Delta_\lambda = 0$ ；
- 透射光波1'(2')相对于入射光波均无（有）半波损失，两者之间的 $\Delta_\lambda' = \lambda/2$ 。

② $n_1, n_2 > n$, 或 $n_1, n_2 < n$

- 反射光波1(2)相对于入射光波无（有）半波损失，两者之间的 $\Delta_\lambda = \pm \lambda/2$ ；
- 透射光波1'和2'相对于入射光波均无半波损失，两者之间的 $\Delta_\lambda' = 0$ 。

结论：由于两反射光波的几何程差与两透射光波的几何程差相同，而附加程差相总是相差半个波长，故**反射光的干涉图样与透射光的干涉图样互补**，即前者满足相长干涉条件时，后者则正好满足相消干涉条件。

2.1.2 薄膜表面的等厚条纹

薄膜干涉的干涉条纹（考虑总光程差）

① 反射光波

总光程差:

$$\Delta = \Delta L_r + \Delta_\lambda = \begin{cases} 2hn \cos i \pm \frac{\lambda}{2} & n_1, n_2 < n \text{ 或 } n_1, n_2 > n \\ 2hn \cos i & n_1 < n < n_2 \text{ 或 } n_1 > n > n_2 \end{cases}$$

总相位差:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta = \begin{cases} \frac{4\pi}{\lambda} hn \cos i \pm \pi & n_1, n_2 < n \text{ 或 } n_1, n_2 > n \\ \frac{4\pi}{\lambda} hn \cos i & n_1 < n < n_2 \text{ 或 } n_1 > n > n_2 \end{cases}$$

② 透射光波

总光程差:

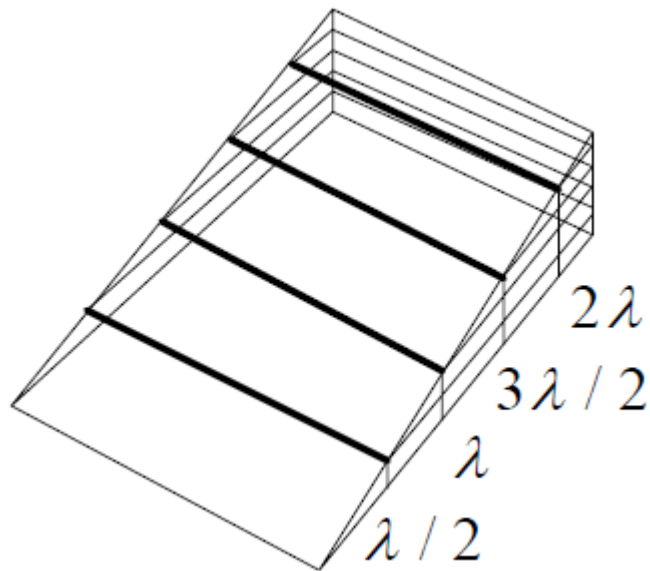
$$\Delta' = \Delta L_r' + \Delta_\lambda' = \begin{cases} 2hn \cos i & n_1, n_2 < n \text{ 或 } n_1, n_2 > n \\ 2hn \cos i + \frac{\lambda}{2} & n_1 < n < n_2 \text{ 或 } n_1 > n > n_2 \end{cases}$$

总相位差:

$$\delta' = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta' = \begin{cases} \frac{4\pi}{\lambda} hn \cos i & n_1, n_2 < n \text{ 或 } n_1, n_2 > n \\ \frac{4\pi}{\lambda} hn \cos i + \pi & n_1 < n < n_2 \text{ 或 } n_1 > n > n_2 \end{cases}$$

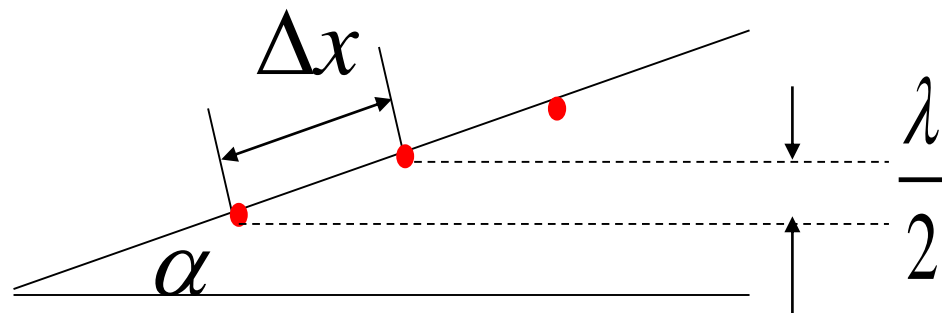
2.1.3 楔形薄膜的等厚条纹

楔形空气薄膜分析



正入射条件下

干涉图样是平行于
交棱的直线

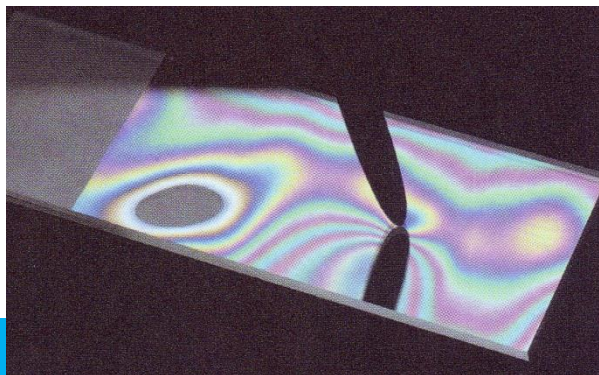
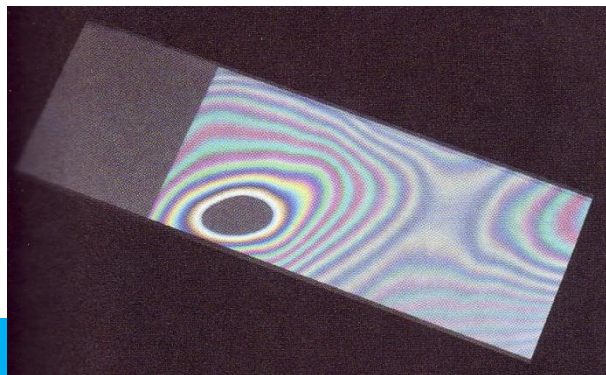
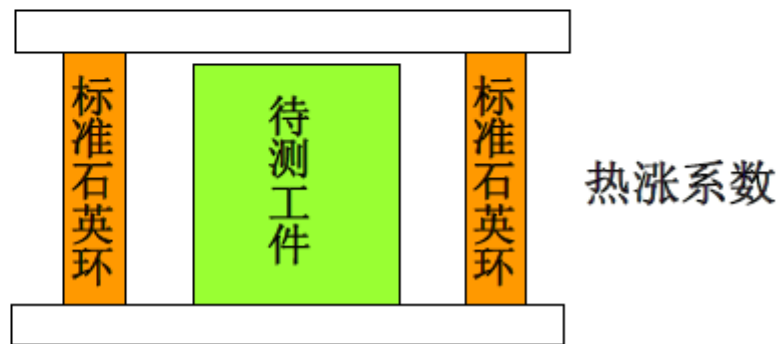
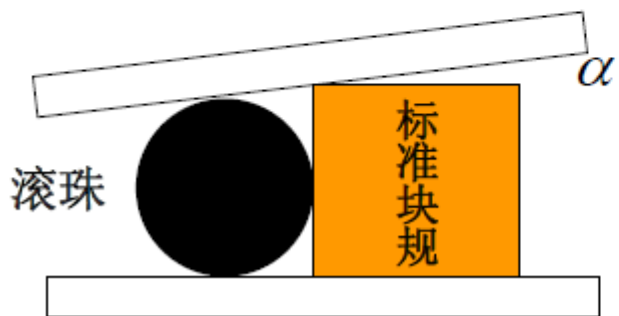
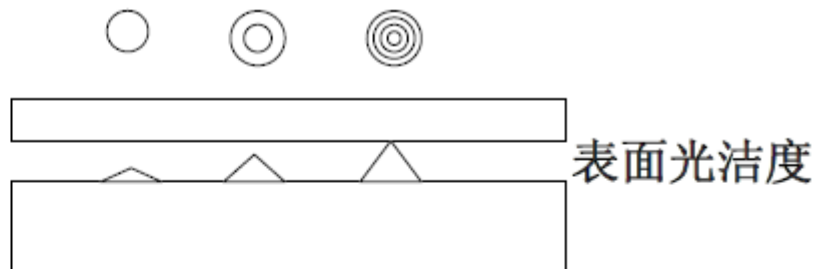
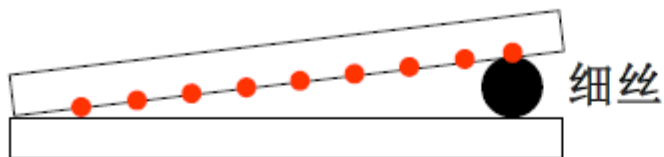


$$\Delta x = \frac{\lambda}{2 \sin \alpha} \approx \frac{\lambda}{2 \alpha} \quad \alpha \approx \frac{\lambda}{2 \Delta x}$$

Δx 相当于通过小的倾角 α 对 λ 进行了放大, 因此可以用于各种精密测量

2.1.3 楔形薄膜的等厚条纹

应用 测量：细丝、滚珠直径、表面光洁度、热胀系数



2.1.3 楔形薄膜的等厚条纹

例2-1

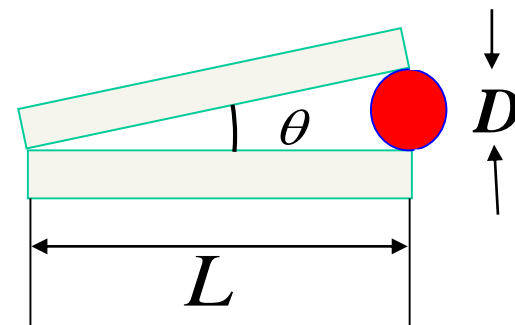
检测细金属丝直径 D ，用空气劈尖。用单色光照射形成等厚干涉条纹，用读数显微镜测出干涉明条纹的间距，就可以算出 D 。已知单色光波长为 589.3nm ，金属丝与劈尖顶点距离 $L=28.880\text{mm}$ ，第1条明条纹到第31条明条纹的距离为 4.295 mm 。求金属丝直径 D

解答

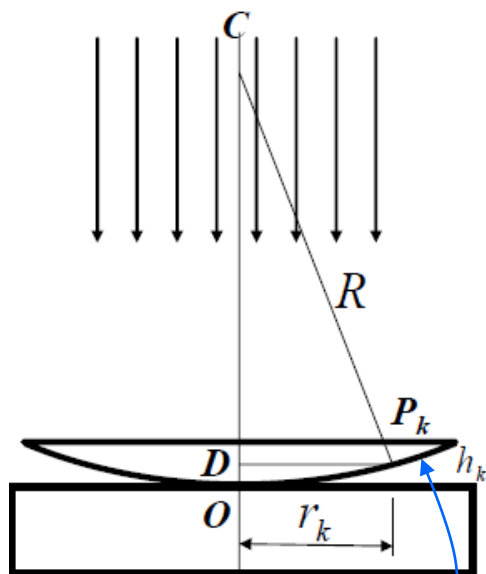
$$\theta \approx \tan \theta = \frac{D}{L} = \frac{\lambda}{2} / \Delta x \Rightarrow D = \frac{L}{\Delta x} \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$\Delta x = \frac{4.295}{31-1} = 0.14317 \text{ mm}$$

$$D = \frac{L}{\Delta x} \cdot \frac{\lambda}{2} = \frac{28.880}{0.14317} \times \frac{589.3 \times 10^{-6}}{2} = 0.059\text{mm} = 59\mu\text{m}$$



2.1.4 牛顿环



发生干涉的位置:空气薄膜上表面

$$DP_j^2 = CP_j^2 - CD^2$$

$$r_j^2 = R^2 - (R - h_j)^2 = 2Rh_j - h_j^2$$

$$h_j = \frac{j\lambda}{2}$$

h_j 很小, 忽略高阶项

$$r_j^2 \approx 2Rh_j = jR\lambda$$

$$r_j = \sqrt{j\lambda R}$$

说明: r_j 与干涉级数 j 的平方根成正比, 因此随着级数 j 的增大, 干涉条纹变密。

$$R = \frac{r_{j+m}^2 - r_j^2}{m\lambda}$$

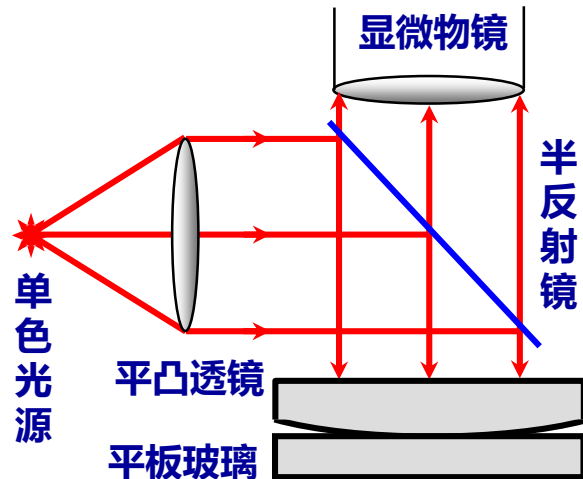
说明:

(1) 通过计算 $j+m$ 级和 j 级条纹的间距, 可以计算牛顿环的曲率半径。

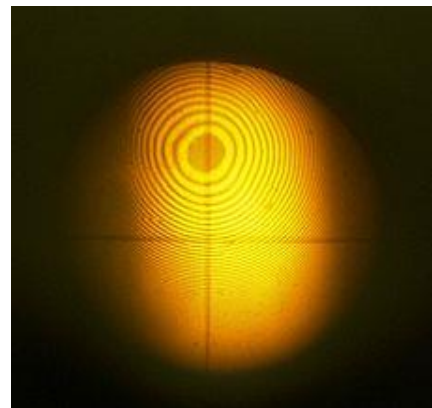
(2) 由于半波损失, 牛顿环的中心是暗纹。

条件: 透镜与玻璃板紧密接触

2.1.4 牛顿环



实验装置

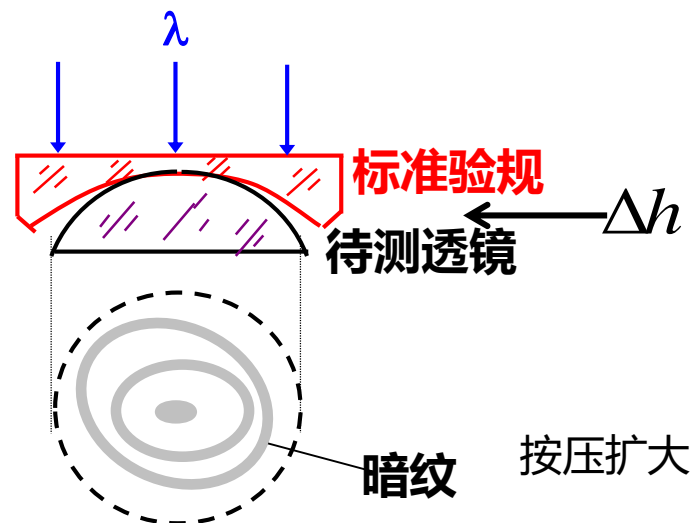
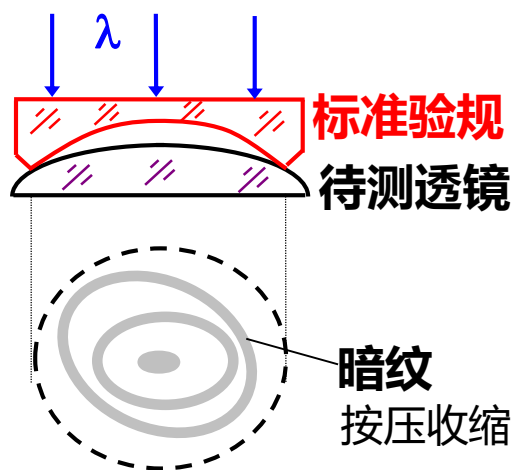


单色光照射牛顿环干涉条纹



白光照射牛顿环干涉条纹

应用



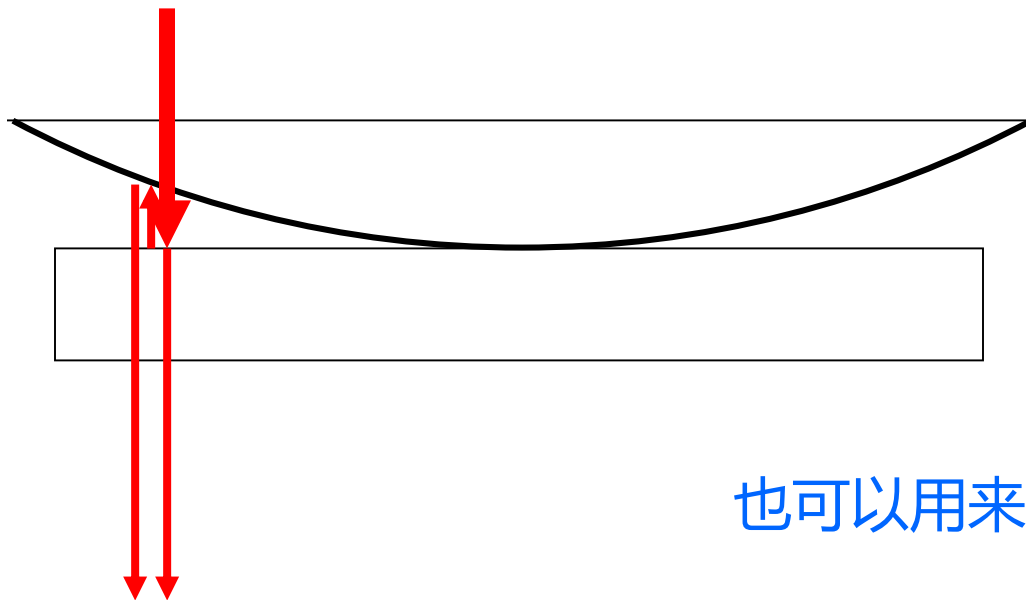
思考：如果待测透镜合格，则现象如何？

2.1.4 牛顿环

透射式牛顿环的干涉

透射光：一列直接透过，另一列在平面和球面间反射后透过，由于两次反射，无半波损失。

Newton Ring 半径 $r_j = \sqrt{j\lambda R} \quad j=0, 1, 2, 3, \dots$



反射光与透射光互补

(1) 能流互补

(2) 干涉条纹互补

也可以用来测透镜的曲率半径 R

2.1.4 牛顿环

例2-2

用等厚干涉测量平凸透镜的曲率半径. 光源波长 $\lambda=589.3\text{ nm}$, 用测量显微镜测得牛顿环第 j 级暗纹直径 $d_j=6.220\text{ mm}$, 第 $j+5$ 级暗纹直径 $d_{j+5}=8.188\text{ mm}$, 问透镜的曲率半径 R 是多少?

解: 对第 j 级暗纹有

$$r_j^2 \approx \left(\frac{d_j}{2}\right)^2 = jR\lambda \qquad r_{j+5}^2 \approx \left(\frac{d_{j+5}}{2}\right)^2 = (j+5)R\lambda$$

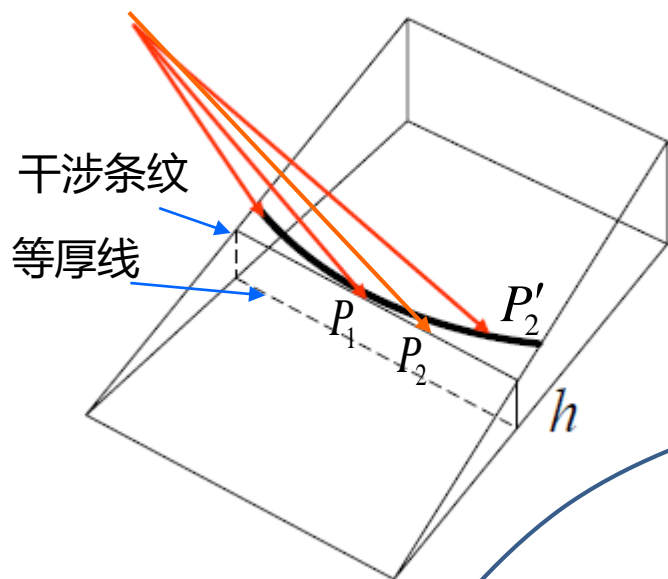
$$\frac{d_{j+5}^2 - d_j^2}{4} = 5R\lambda$$

$$R = \frac{d_{j+5}^2 - d_j^2}{4 \times 5 \lambda} = \frac{(8.188 \times 10^{-3})^2 - (6.220 \times 10^{-3})^2}{4 \times 5 \times 589.3 \times 10^{-9}} = 2.40\text{ m}$$

2.1.5 等厚干涉条纹的观测方法及倾角的影响

严格的等厚干涉要求点光源、正入射。但扩展光源、斜入射，用眼睛也能观察到干涉现象。其原因主要是眼睛的瞳孔对光束进行了限制，但干涉的结果会受到一定的影响。

(1) 条纹偏离等厚线



同一干涉条纹上的点满足

$$2nh \cos i = \text{const}$$

两边取微分可以得到

$$\delta(\Delta L) = -2nh \sin i \delta i + 2n \cos i \delta h = 0$$

$$\frac{dh}{di} = h \tan i \quad \frac{dh}{di} \propto h, \quad \frac{dh}{di} \propto \tan i$$

dh/di —偏离度

dh/di 的几何意义：同一条纹上膜厚随光线倾角的变化率。

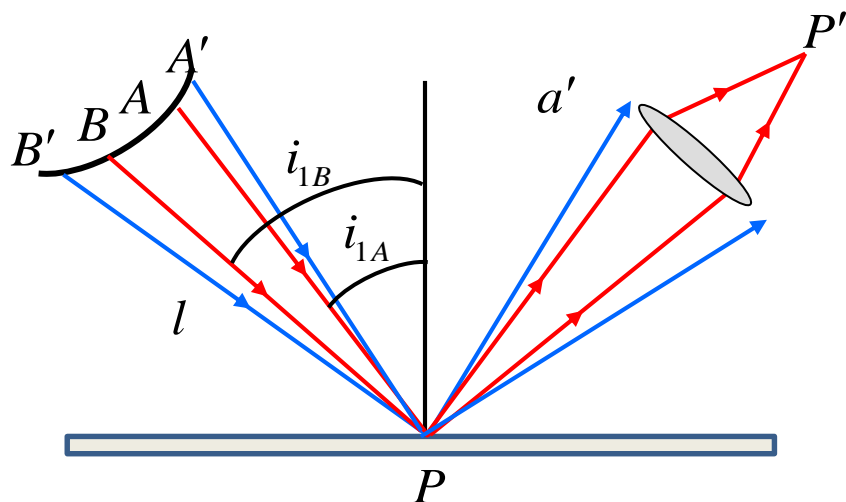
结论：倾角增大将引起光程差的减小，需要由膜厚的增加来补偿。

$$\frac{dh}{di} \propto h$$

意味着薄膜越薄，条纹形貌与几何等厚线的一致性越好，这是“薄膜”的一种含义。

2.1.5 等厚干涉条纹的观测方法及倾角的影响

(2) 条纹反衬度下降



点光源 A $\Delta L(P) \approx 2nh_p \cos i_A$

点光源 B $\Delta L'(P) \approx 2nh_p \cos i_B$

由于 $i_A \neq i_B$

$$2nh_p \cos i_A \neq 2nh_p \cos i_B$$

强度分布不同的表面条纹非相干叠加，将降低表面干涉场的反衬度

$$\delta(\Delta L) = \delta(2nh \cos i) = -2nh \sin i \delta i$$

当 $\delta(\Delta L) \approx \lambda$ 时，反衬度=0，干涉条纹消失，光源极限角宽度为

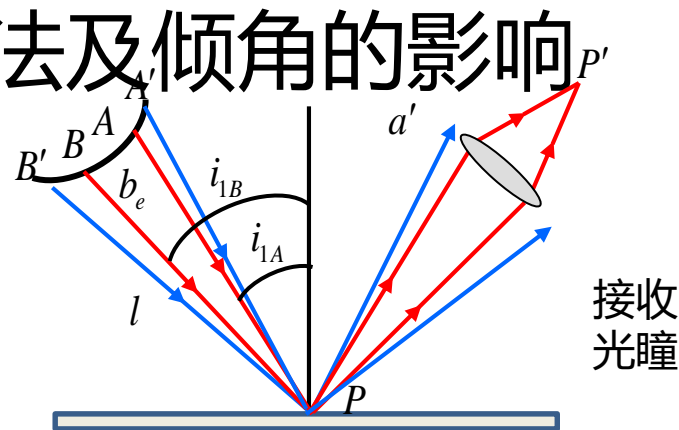
$$\Delta \theta = \frac{\lambda}{2nh \sin i} \propto \frac{1}{h}$$

从式中可以看出，膜越薄，即 h 越小，允许的光源极限角宽度或线度越大，这也是“薄膜”的另一个意义。

2.1.5 等厚干涉条纹的观测方法及倾角的影响

(3) 条纹反衬度的进一步讨论

例题: 如右图所示, 设入射角 $i_1 \approx 30^\circ$, 光源与表面观察处的线距离 $l \approx 30\text{cm}$, 膜厚 $h \approx 60\mu\text{m}$, 入射光波长 $\lambda \approx 600\text{nm}$ 。



(1) 试计算光源极限角宽度和线宽度。

(2) 如果在实验室内用一日光灯管以上述参数照射牛顿环干涉装置, 一般仍可用肉眼看到牛顿环图样。灯管长度一般超过10cm, 膜层厚度一般也不小于 $100\mu\text{m}$ 。这一现象与(1)的计算结果矛盾吗? 如果用照相机在同等情况下, 能否拍摄到和人眼一样清晰的条纹? 试解释。

解答: (1) 将题中参数带入 $\Delta\theta = \frac{\lambda}{2nh \sin i}$ 得到光源的极限角宽度 $\Delta\theta \approx 10^{-2}\text{rad} \approx 34'$
 此时的光源线宽度 $b_0 \approx l\Delta\theta \approx 3\text{mm}$ 。

(2) 在题目所述条件下能看到牛顿环干涉条纹的关键在于人眼接收光瞳做出的贡献。如图所示, 有限的光瞳孔径对应于局部光源 \overline{AB} 产生的干涉场, 与之对应的 b_e 被称为光源的有效线度。光源有效线度之外的光线在膜表面产生的干涉场并未进入接收光瞳, 因此也就不影响反衬度。即使光源表观的线度远大于 b_e , 只要 $b_e < b_0$, 即可观测到有一定反衬度的干涉场。照相机的镜头孔径一般大于人眼瞳孔, 因此同等条件下拍摄的条纹不如人眼所见的清晰。

第三章 光的干涉

(干涉装置, 光场的时空相干性)

第二节 分振幅干涉装置

2.2 等倾干涉

(Fringes of equal inclination)

2. 2 等倾干涉

2.2.1 无穷远处的等倾干涉

2.2.2 等倾干涉的特点

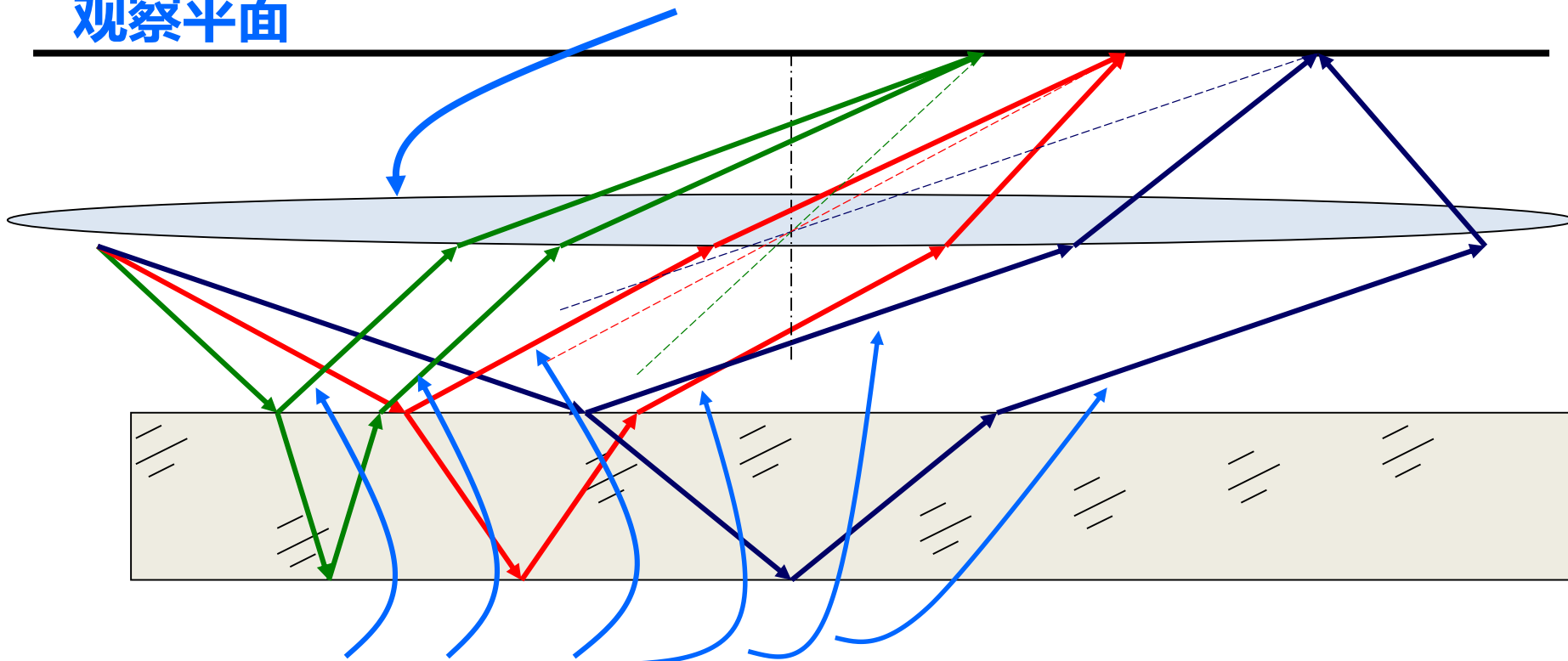
2.2.3 等倾干涉的进一步讨论

2.2.1 无穷远处的等倾干涉

等倾干涉过程

薄膜上方放置凸透镜用于将平行光聚焦到观察平面上

观察平面

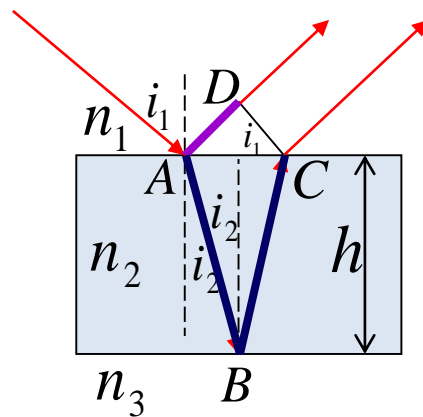
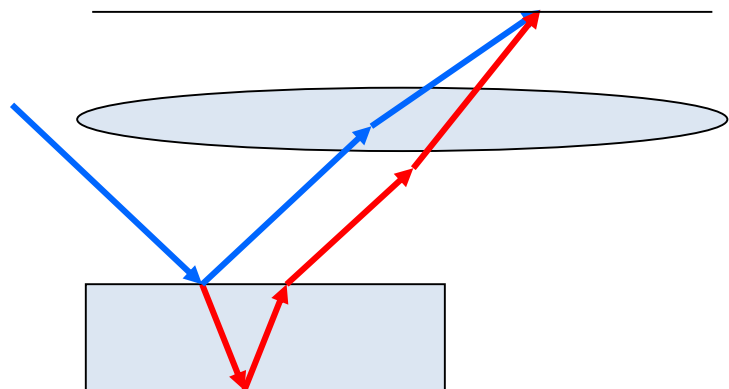


只有相互平行的光线才能良好聚焦在观测平面上

由于相互平行的光线对于光轴具有相同倾角，因此称为**等倾干涉**。

2.2.1 无穷远处的等倾干涉

等倾干涉的计算



光程差 $\Delta L = n_2(AB + BC) - n_1 AD$

$$AB + BC = 2h / \cos i_2$$

$$AD = AC \sin i_1 = 2h \tan i_2 \sin i_1$$

$$\Delta L = 2h \left(\frac{n_2}{\cos i_2} - n_1 \tan i_2 \sin i_1 \right) = \frac{2h}{\cos i_2} (n_2 - n_2 \sin^2 i_2) = \frac{2n_2 h}{\cos i_2} (1 - \sin^2 i_2)$$

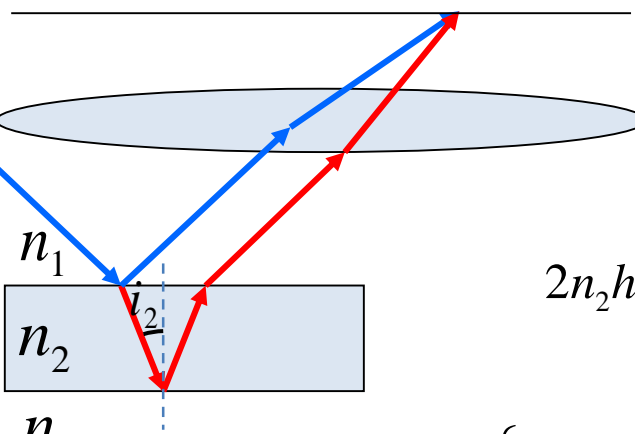
$$= 2n_2 h \cos i_2 = 2h \sqrt{n_2^2 - n_2^2 \sin^2 i_2} = 2h \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i_1}$$

虽然与等厚干涉形式一样，但等厚干涉是近似，而等倾干涉是严格的。

2.2.1 无穷远处的等倾干涉

等倾干涉的计算

以光线从空气入射到介质薄膜再出射到空气为例，此时一般满足 $n_2 > n_1$ 。因此，在薄膜上表面的反射会带来半波损失。



$\Delta L = 2n_2h \cos i_2$

考虑半波损失的干涉方程可以写作

$$2n_2h \cos i_2 - \lambda / 2 = \begin{cases} j\lambda & j=0,1,2,\dots \quad \text{干涉相长} \\ (2j+1)\frac{\lambda}{2} & j=0,1,2,\dots \quad \text{干涉相消} \end{cases}$$

亦可写作 $\cos i_2 = \begin{cases} \frac{(2j+1)\lambda}{4n_2h} & j=0,1,2,\dots \quad \text{第 } j \text{ 级亮条纹} \\ \frac{j\lambda}{2n_2h} & j=0,1,2,\dots \quad \text{第 } j \text{ 级暗条纹} \end{cases}$

越往中心处 i_2 越小，级次越高，中心级次最高

如果只考虑条纹间的相对特性，一般可以忽略半波损失

2.2.2 等倾干涉的特点

等倾条纹的特性

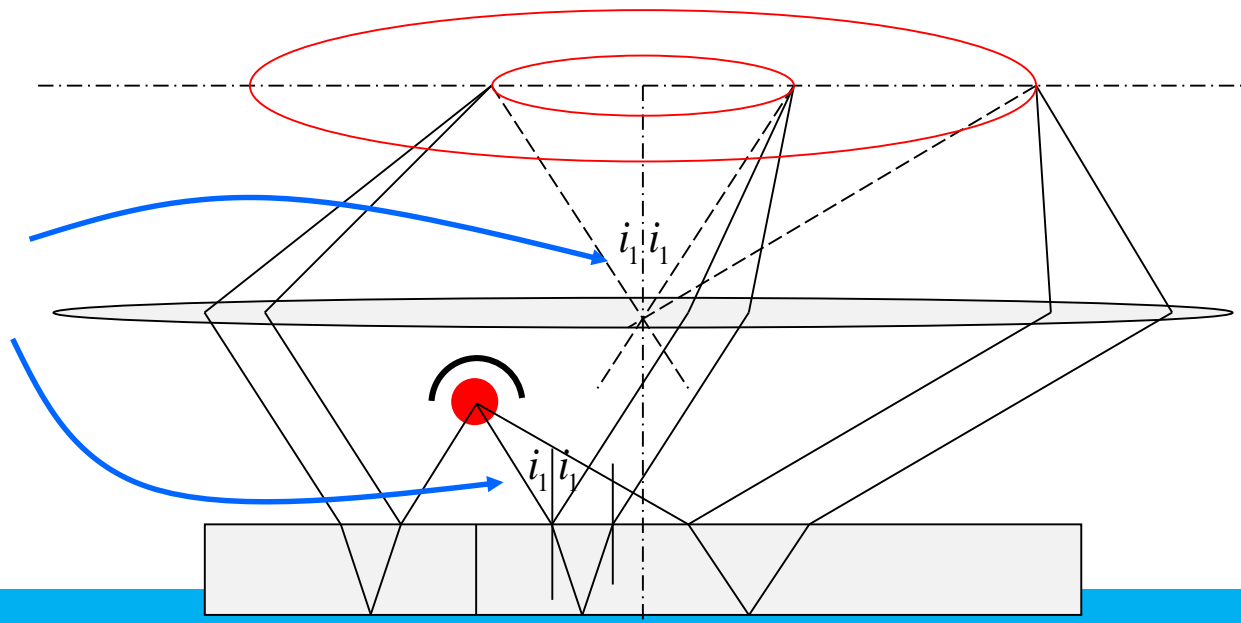
干涉条纹的分布由双光束的干涉结果决定，即

$$I = A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos(k\Delta L)$$

从 $\Delta L = 2n_2h \cos i_2 \pm \lambda / 2 = 2h\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i_1} \pm \lambda / 2$ 可以看出

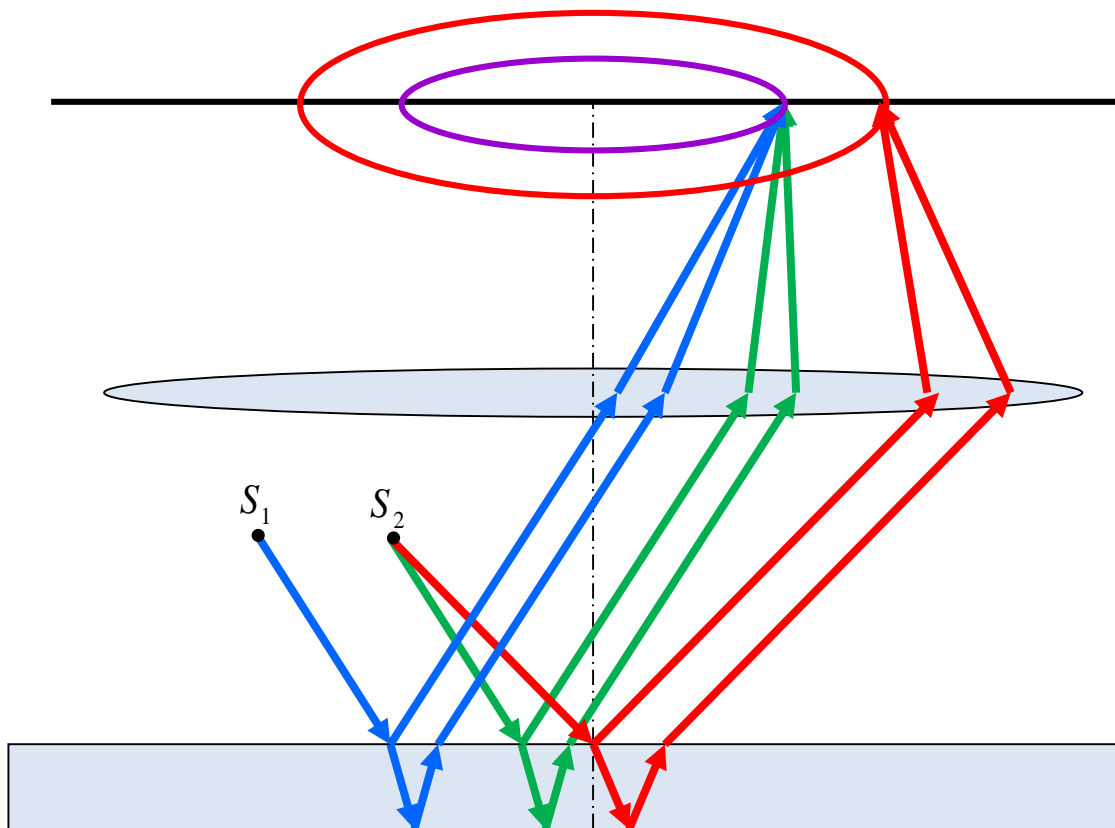
当薄膜是折射率和厚度一定的平行薄板时，双光束的干涉结果只与入射光线到薄膜的入射角度有关，相同入射角光线处于同一干涉级。

注意到辅助线过透镜光心，平行于入射光，因此 i_1 既是入射角，同时也是屏上条纹对透镜光心的张角

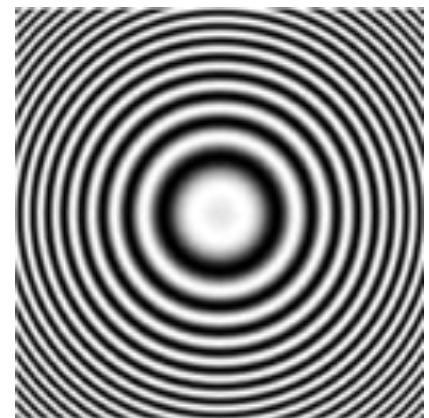


2.2.2 等倾干涉的特点

等倾干涉条纹的图样



- 相互平行的光，汇聚到焦平面上同一点；
- 系统是轴对称的，所以干涉条纹是同心圆环；
- 同一倾角的光是同一干涉级，故称**等倾干涉**。

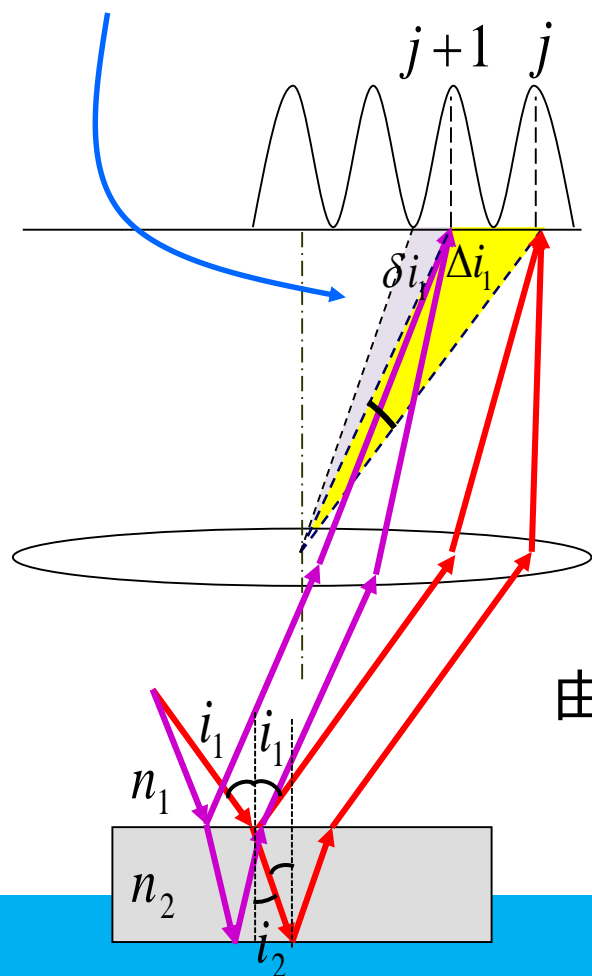


等倾干涉条纹的仿真图形

2.2.2 等倾干涉的特点

等倾干涉条纹的条纹间距

Δi_1 —相邻暗纹或亮纹间的角宽度
 δi_1 —相邻亮纹与暗纹之间的半角宽度



$$\text{由 } \cos i_2 = \begin{cases} \frac{(2j+1)\lambda}{4n_2h} & j \text{ 级亮纹} \\ \frac{j\lambda}{2n_2h} & j \text{ 级暗纹} \end{cases}$$

得到相邻亮条纹或暗纹的间距为

$$\cos i_{2,j+1} - \cos i_{2,j} = \frac{\lambda}{2n_2h}$$

近似条件：
倾角相差很小。

$$\cos i_{2,j+1} - \cos i_{2,j} \approx -\sin i_{2,j} (i_{2,j+1} - i_{2,j}) = -\sin i_{2,j} \Delta i_{2,j}$$

$$\text{因此 } \Delta i_{2,j} = \frac{-\lambda}{2n_2h \sin i_{2,j}}$$

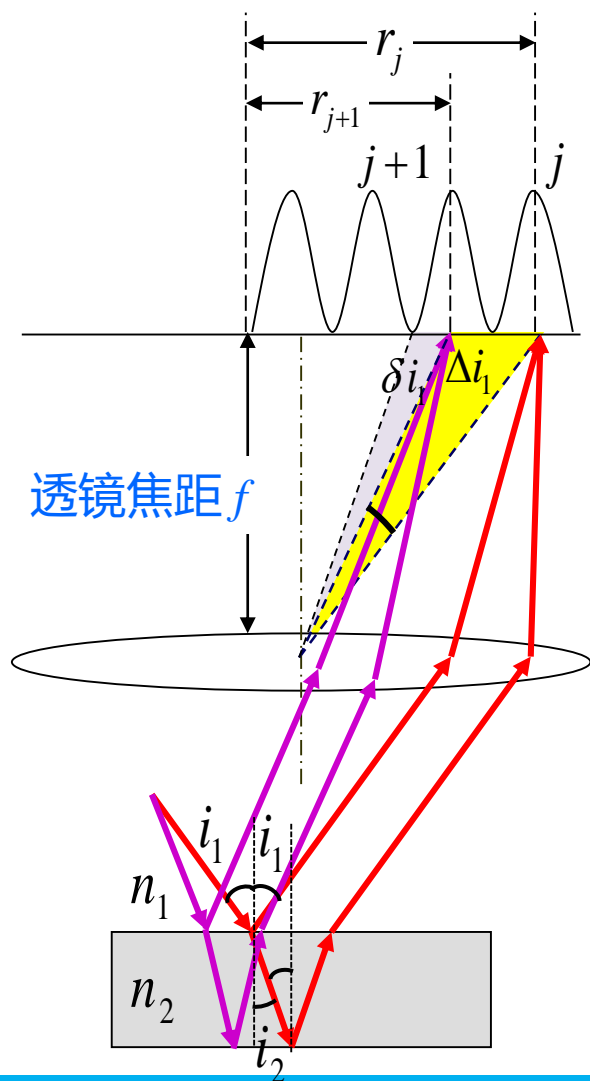
由折射定律 $n_1 \sin i_1 = n_2 \sin i_2$ 两边取微分可以得到

$$\Delta i_{1,j} = \frac{n_2 \cos i_{2,j}}{n_1 \cos i_{1,j}} \Delta i_{2,j}$$

$$\cos \alpha - \cos \beta = -2 \sin \frac{\alpha + \beta}{2} \sin \frac{\alpha - \beta}{2}$$

2.2.2 等倾干涉的特点

等倾干涉条纹的条纹间距



由 $\Delta i_2 = \frac{-\lambda}{2n_2 h \sin i_2}$ 若透镜焦距为 f , 傍轴条件下

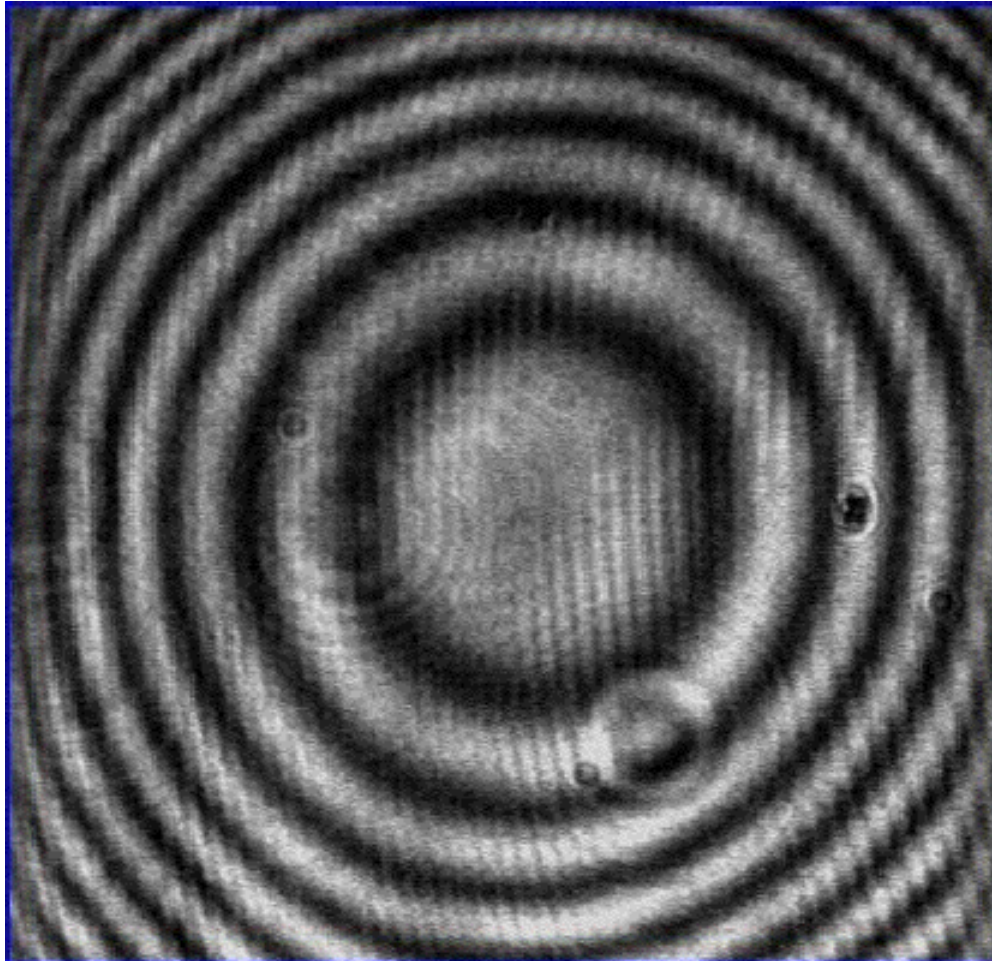
则条纹间距为 $\Delta r = r_{j+1} - r_j \approx \frac{-f \lambda}{2n_1 h \sin i_{2,j}}$

等倾条纹的特点

- 中心级次高，边缘级次低
- 中心处条纹间隔较为稀疏，但条纹角宽度大，看起来较宽，边缘条纹较密，看起来细锐；
- 膜厚 h 增大，条纹变的更加细锐
- 膜厚 h 增大，中心条纹级次增大，中心级次变化 ± 1 时，相应的膜厚变化为 $\Delta h = \pm \lambda / 2n_2$
(对比牛顿环)
- h 连续增大（减小），条纹从中心生出（消失）并向外扩展（向内收缩）

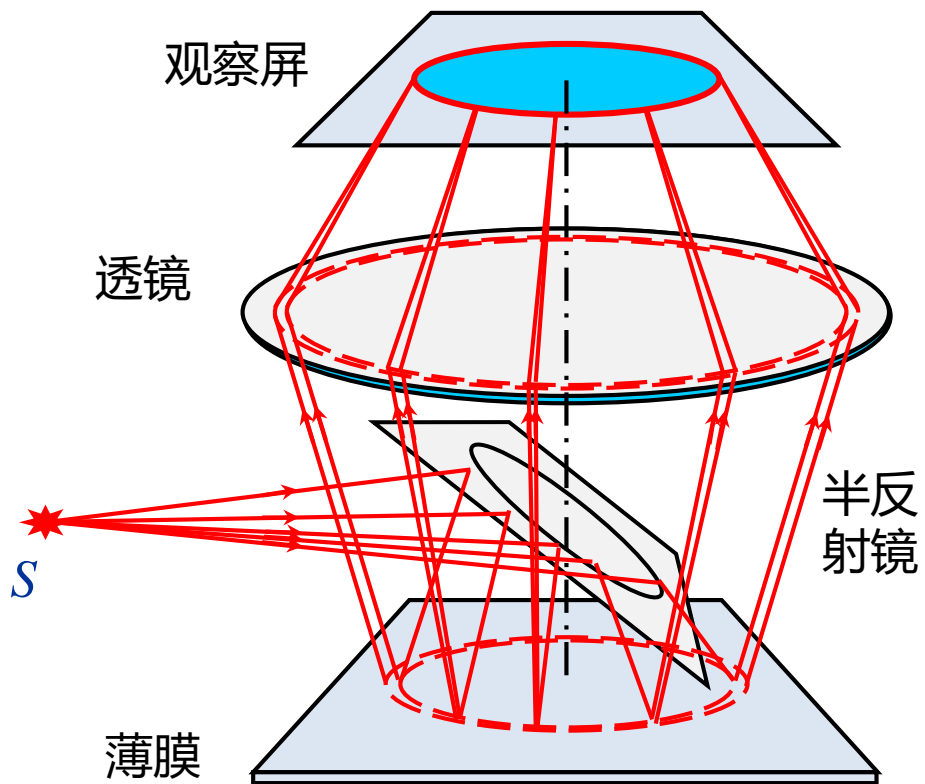
2.2.2 等倾干涉的特点

等倾干涉条纹的图样

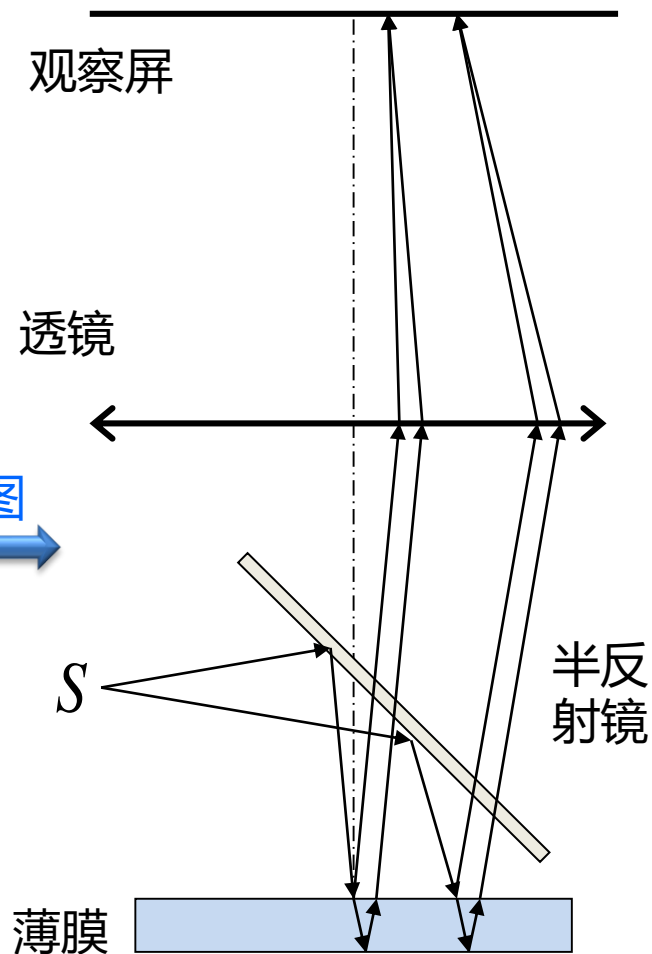


2.2.2 等倾干涉的特点

等倾干涉的观察装置(单色点光源照明)

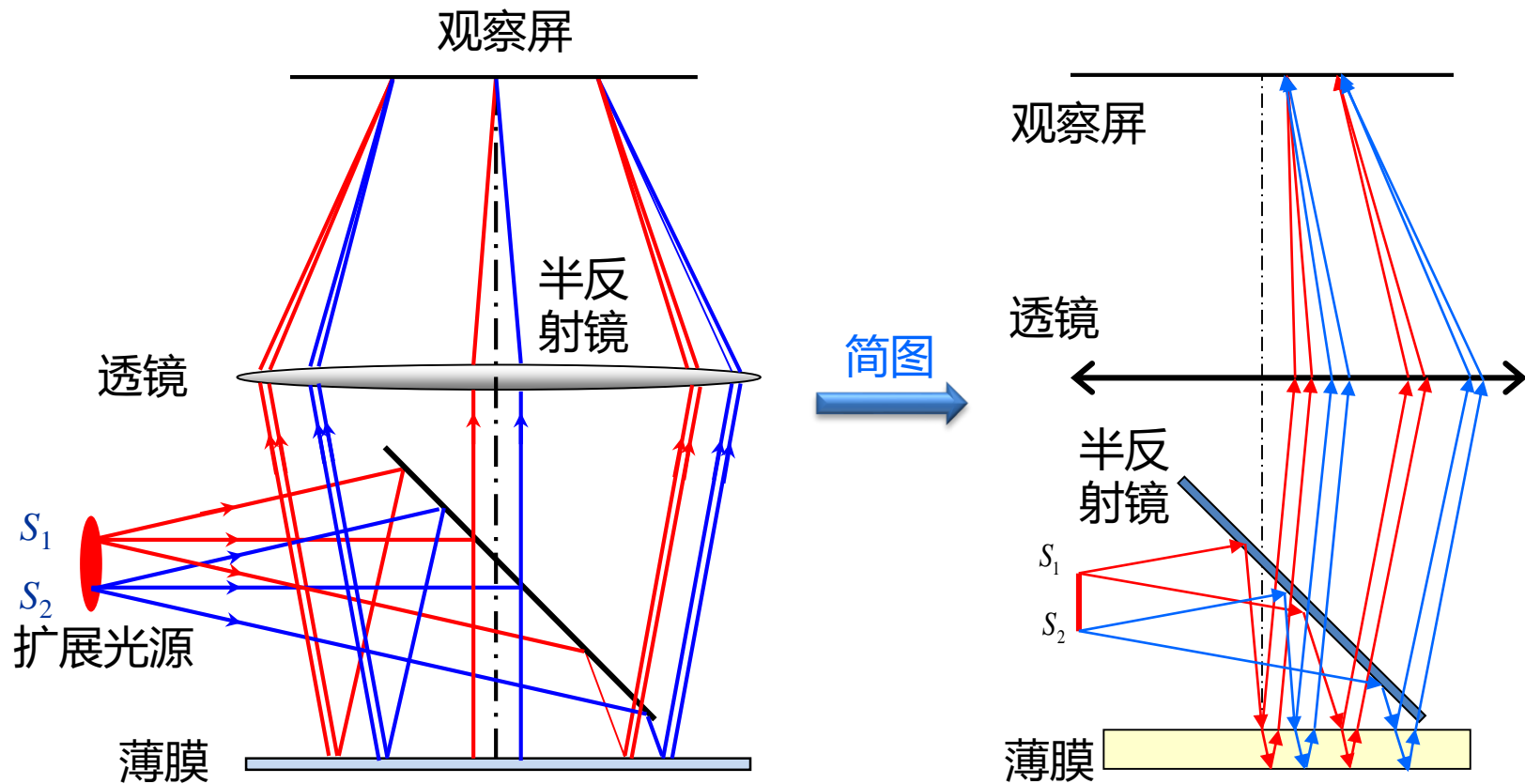


简图
→



2.2.2 等倾干涉的特点

等倾干涉的观察装置(扩展光源照明)



从扩展光源不同点发出的波列之中，同方向的都汇聚到同一点进行干涉，是同一级干涉条纹。所以等倾干涉条纹的图样与采用点光源还是扩展光源照明无关。扩展光源会增加条纹的反衬度，因此有益无害。

2.2.3 等倾干涉的进一步讨论

等倾干涉条纹的中心级次及明暗

从 $\Delta L = 2n_2 h \cos i_2 \pm \lambda / 2 = 2h\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i_1} \pm \lambda / 2$ 可以看出

等倾干涉圆环条纹越靠近中心，对应的入射角 i_1 越小，光程差越大，即相应的干涉级次越高（ m 越大）。如果设定等倾条纹圆环中心的干涉级次为 m' ，则有

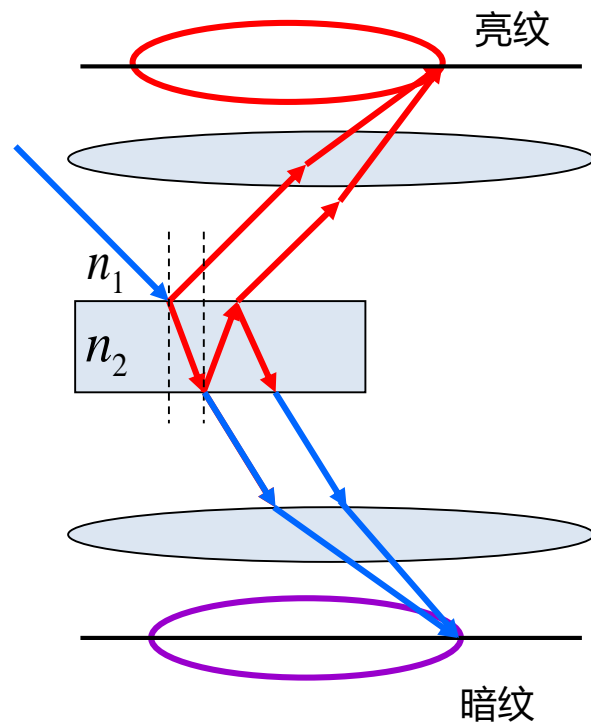
$$m' = \frac{\Delta_0}{\lambda} = \frac{2nh}{\lambda} + \frac{1}{2}$$

此处形式考虑了半波损。实际中，干涉级次往往是一个大数，但不一定是整数。例如：设平板厚度为 $h=1\text{mm}$ ，玻璃折射率为 $n_2=1.5$ ，如果波长为 $\lambda=0.5\mu\text{m}$ 的光从空气入射，则干涉级次 $m' \approx 6000$ ，不是整数。因此等倾条纹的中心条纹（圆斑）可能是亮纹，也可能是暗纹，也可能是中间亮度的条纹。

2.2.3 等倾干涉的进一步讨论

透射与反射的等倾干涉条纹

透射光的等倾条纹，干涉的两条光束一条是直接透射的，第二条是经过玻璃平板两次内反射后的透射光，光程差为 $\Delta=2nh\cos i_2$ 。对于同一束光线，比较反射光和入射光的光程差可以看出，**两者相差 $\lambda/2$ ，原于必有一方考虑半波损**。因此，反射光与入射光的干涉条纹**互补**。

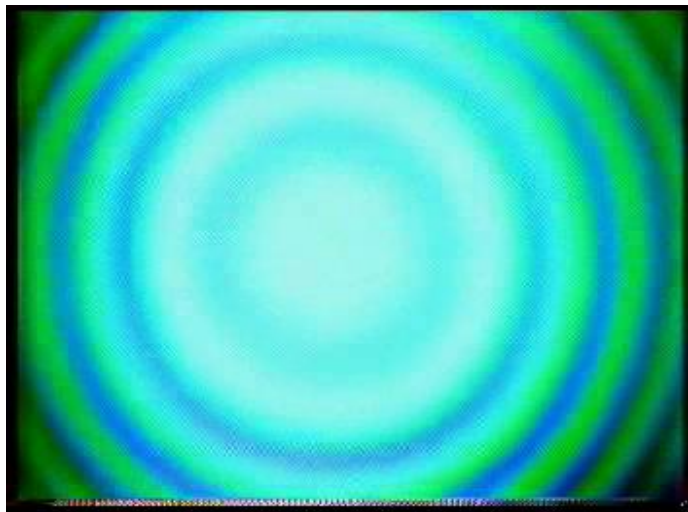


透射和反射条纹的互补性

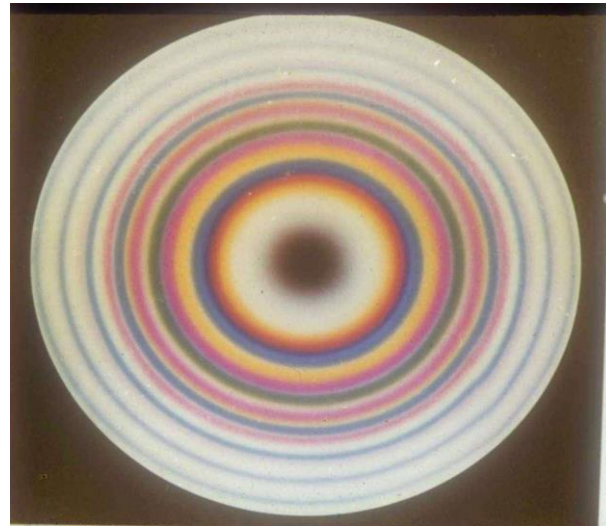
无论是等厚干涉，还是等倾干涉，既可在薄膜的上方，也可在薄膜的下方观察到干涉条纹，只是反衬度不同（通常为互补）。

2.2.3 等倾干涉的进一步讨论

白光干涉等倾条纹和牛顿环的比较



汞灯（白光）照明的等倾干涉



白光照明的牛顿环

- 注意到等倾干涉的公式 $\cos i_k = k\lambda/2nh + \lambda/2$, 波长越大, 倾角 i_k 越小, 因此从中心点看去 (中心点是最高干涉级), **红光在内侧、紫光在外侧**。
- 由牛顿环的公式 $r_k = \sqrt{kR\lambda}$, 得到波长越长离中心点的距离 r_k 越大。因此从中心看去 (中心是零级), **红光在外侧, 紫光在内侧**。

问题：是否可以通过一个干涉条纹直接判断是牛顿环还是等倾干涉？

第三章 光的干涉

(干涉装置, 光场的时空相干性)

第二节 分振幅干涉装置

2.3 薄膜干涉讨论、增透膜与增反膜

2.3 薄膜干涉讨论、增透膜与增反膜

2.3.1 薄膜的颜色、增透与高反膜

2.3.2 例题

2.3.1 薄膜的颜色、增透和高反膜

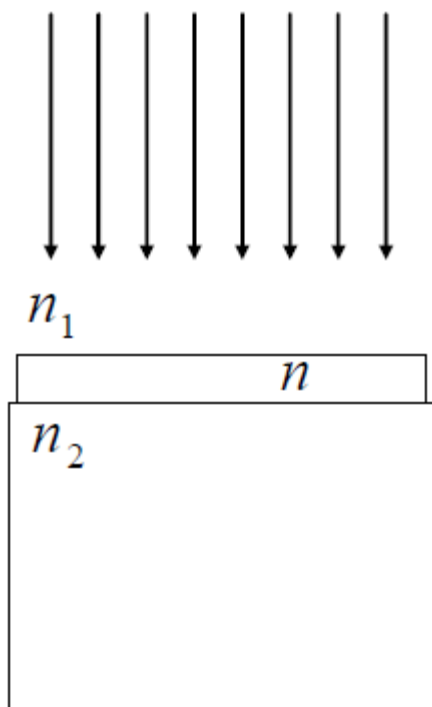
薄膜的颜色

干涉相长 $\Delta L = 2nh \cos i_2 = k\lambda$

干涉相消 $\Delta L = 2nh \cos i_2 = (k + \frac{1}{2})\lambda$

干涉条纹的间隔与
波长有关

干涉导致在同一点观察，不同波长光的反射率不同，因此形成薄膜的颜色。



增透膜 $n_1 < n < n_2$ 上下表面反射光无半波损 (均有导致无)

$$nh = \frac{\lambda}{4}, \dots, \frac{(2n+1)\lambda}{4} \quad (\text{垂直入射})$$

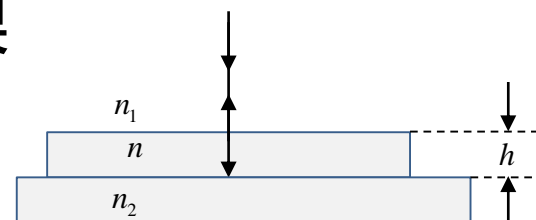
$$n = \sqrt{n_1 n_2} \text{ 时, 完全消光}$$

增反膜 $n_1 < n > n_2$ 上下表面反射光有半波损

$$nh = \frac{\lambda}{4}, \dots, \frac{(2n+1)\lambda}{4} \text{ 时, 完全反光 (亮纹)}$$

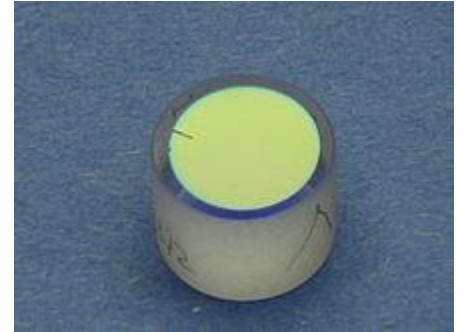
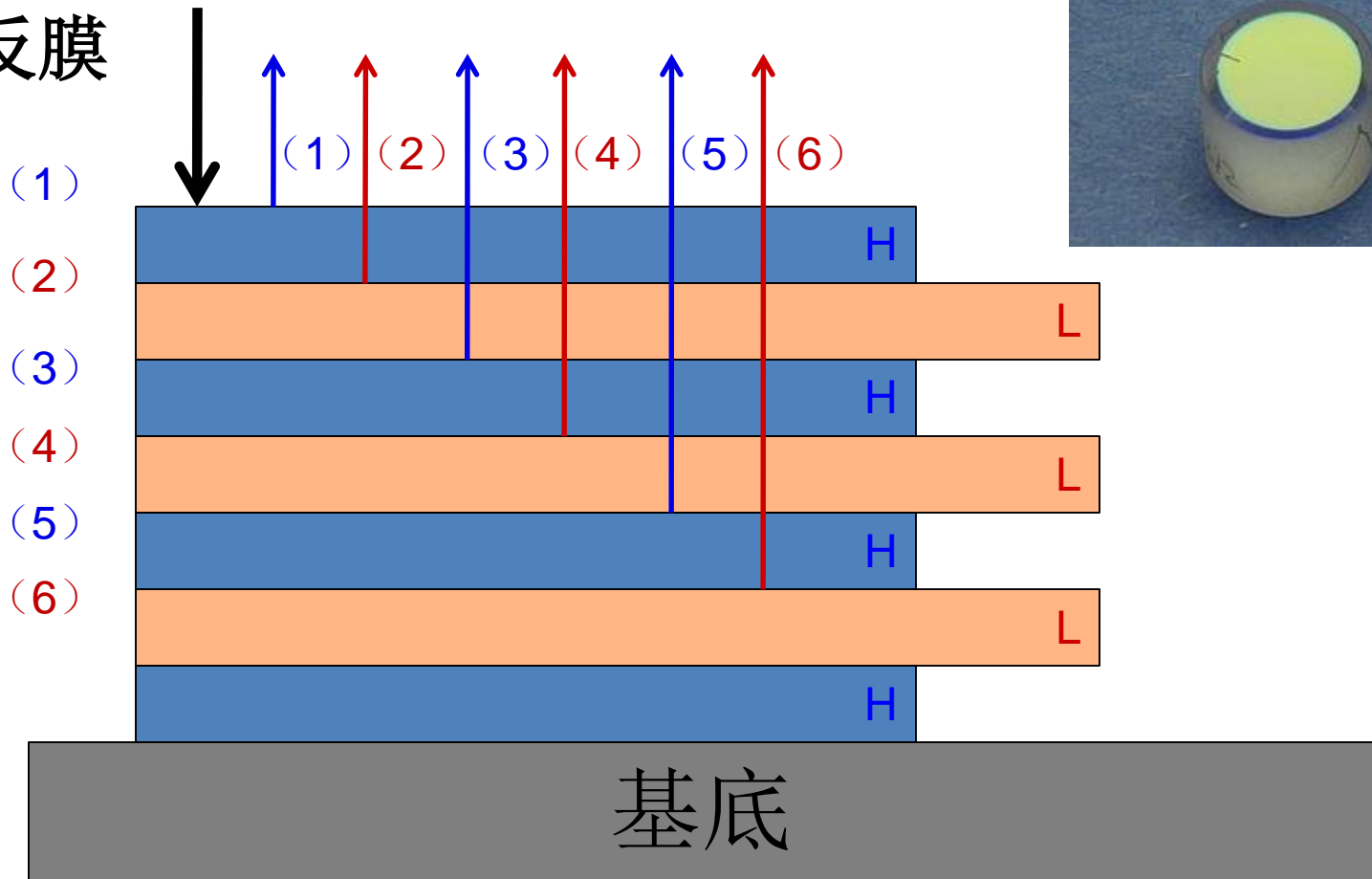
2.3.1 薄膜的颜色、增透和高反膜

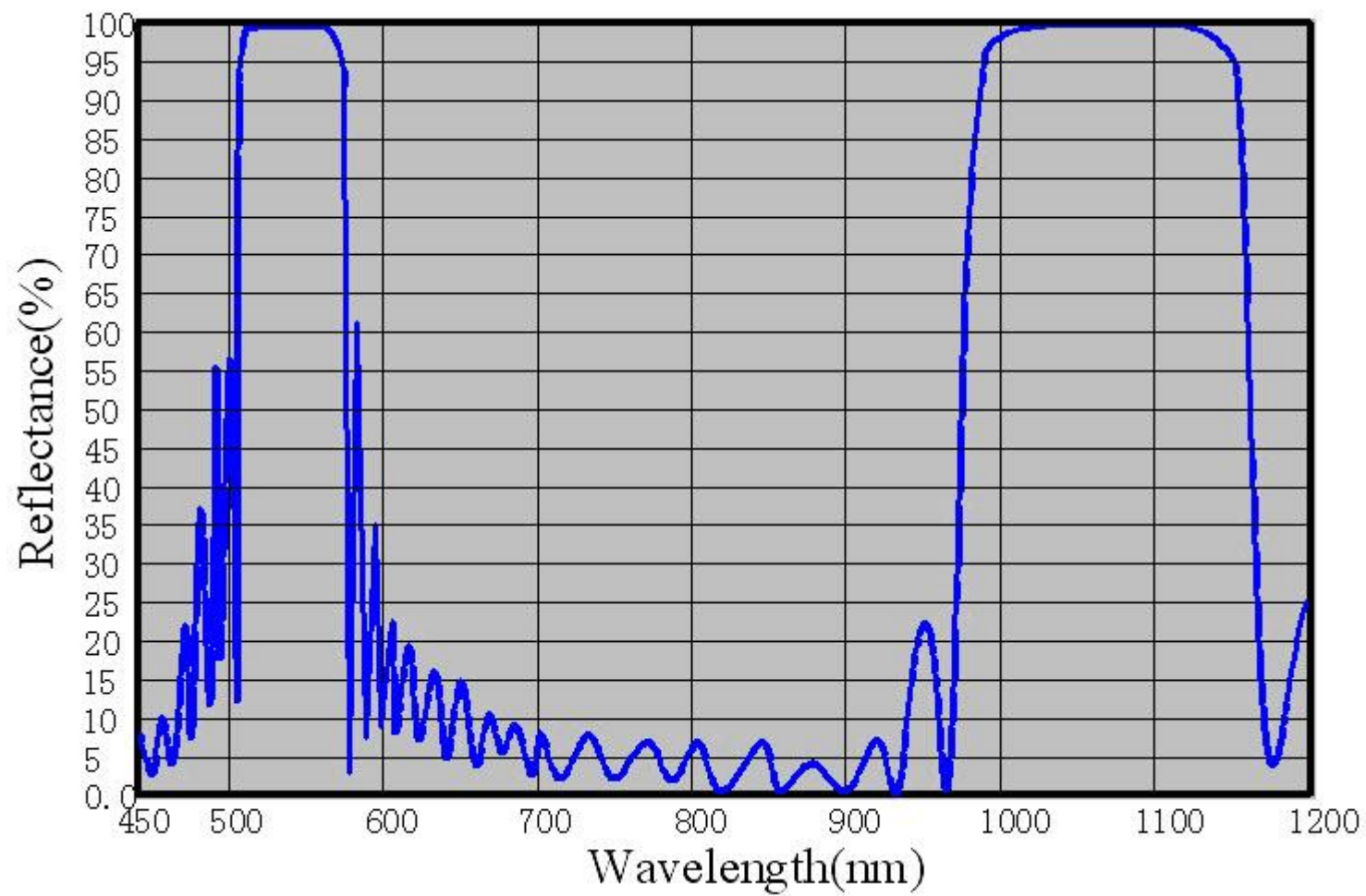
高透与高反膜比较



	增透膜	增反膜
膜的选择	低膜 (L) , $n_1 < n < n_2$	高膜 (H) , $n_1 < n > n_2$
膜层光学厚度	$nh = \lambda/4$	$nh = \lambda/4$
半波损	无	有
反射双光束光程差	$\Delta L = \Delta L_r = \lambda/2$	$\Delta L = \Delta L_r + \lambda/2 = \lambda$
在光路中的效果	相干相消, 消反增透	相干相长, 消透增反
典型材料及折射率	MgF_2 , $n_{\text{MgF}_2} \approx 1.38$	ZnS , $n_{\text{ZnS}} \approx 2.4$
典型反射率	1.2%	33.8%

高反膜





2.3.1 薄膜的颜色、增透和高反膜

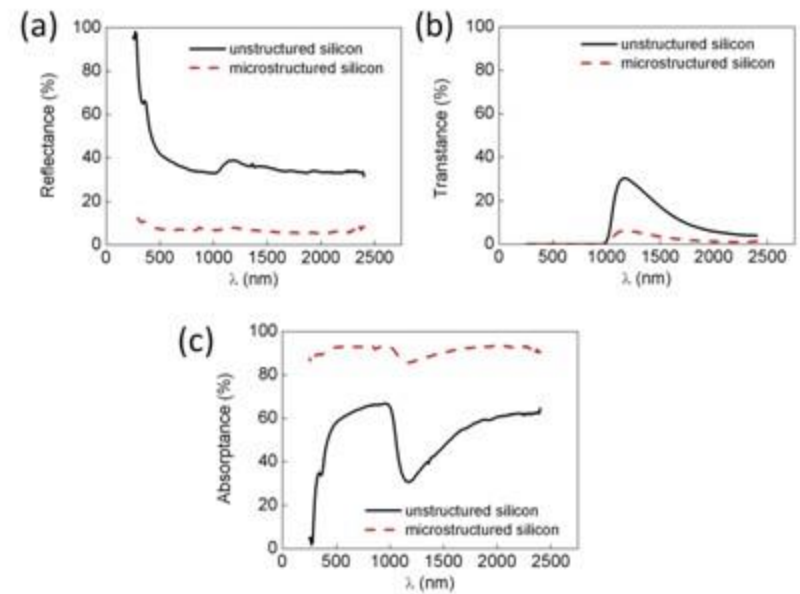
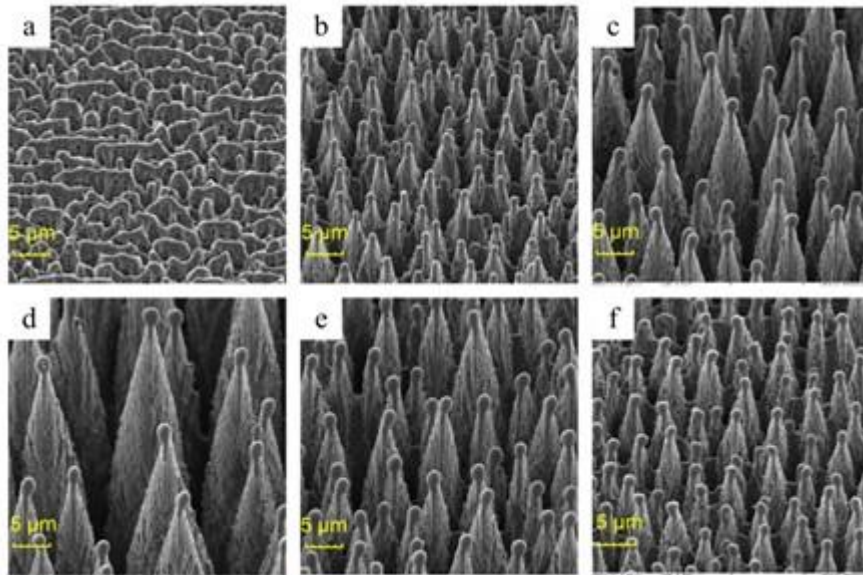
对增透膜和增反膜的说明

(1) 即使不满足条件 $n=(n_1n_2)^{1/2}$ ，但满足条件 $n_1 < n < n_2$ 或 $n_1 > n > n_2$ ，则总会降低薄膜的反射率，仍可以对相应波长达到增透目的。

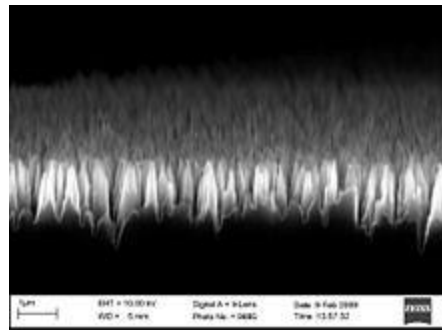
(2) 当薄膜的折射率满足条件 $n_1 > n < n_2$ 或 $n_1 < n > n_2$ 时，具有比没有镀膜时高的反射率。但要获得很高的反射率，需要在光学元件表面交替的镀上一系列高折射率的 $\lambda/4$ 膜和低折射率的间隔层。膜层越多，总的强度反射率就越高。

(3) 无论增透还是增反膜，其光学厚度 (nh) 均选定为 $2k\lambda + \lambda/4$ 。即镀膜总是针对某一波长而言的，需要针对不同应用设计不同的特性。

降低反射率



黑硅

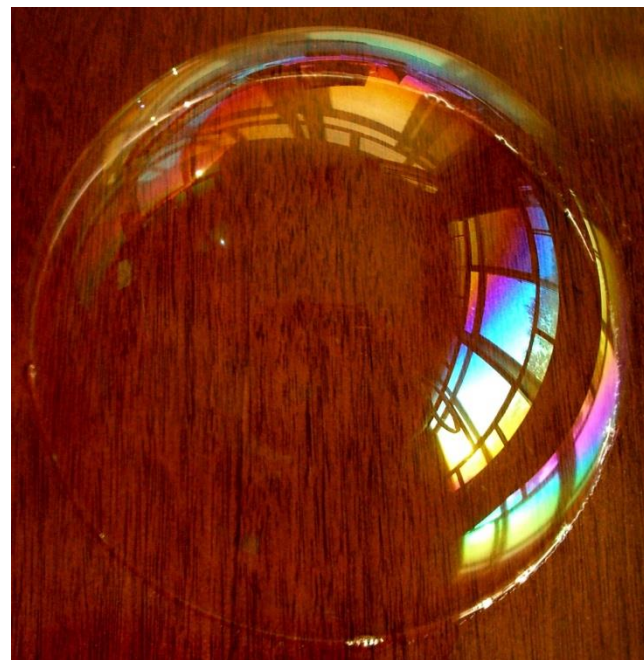


2.3.1 薄膜的颜色、增透和高反膜

薄膜的颜色



半球形水膜



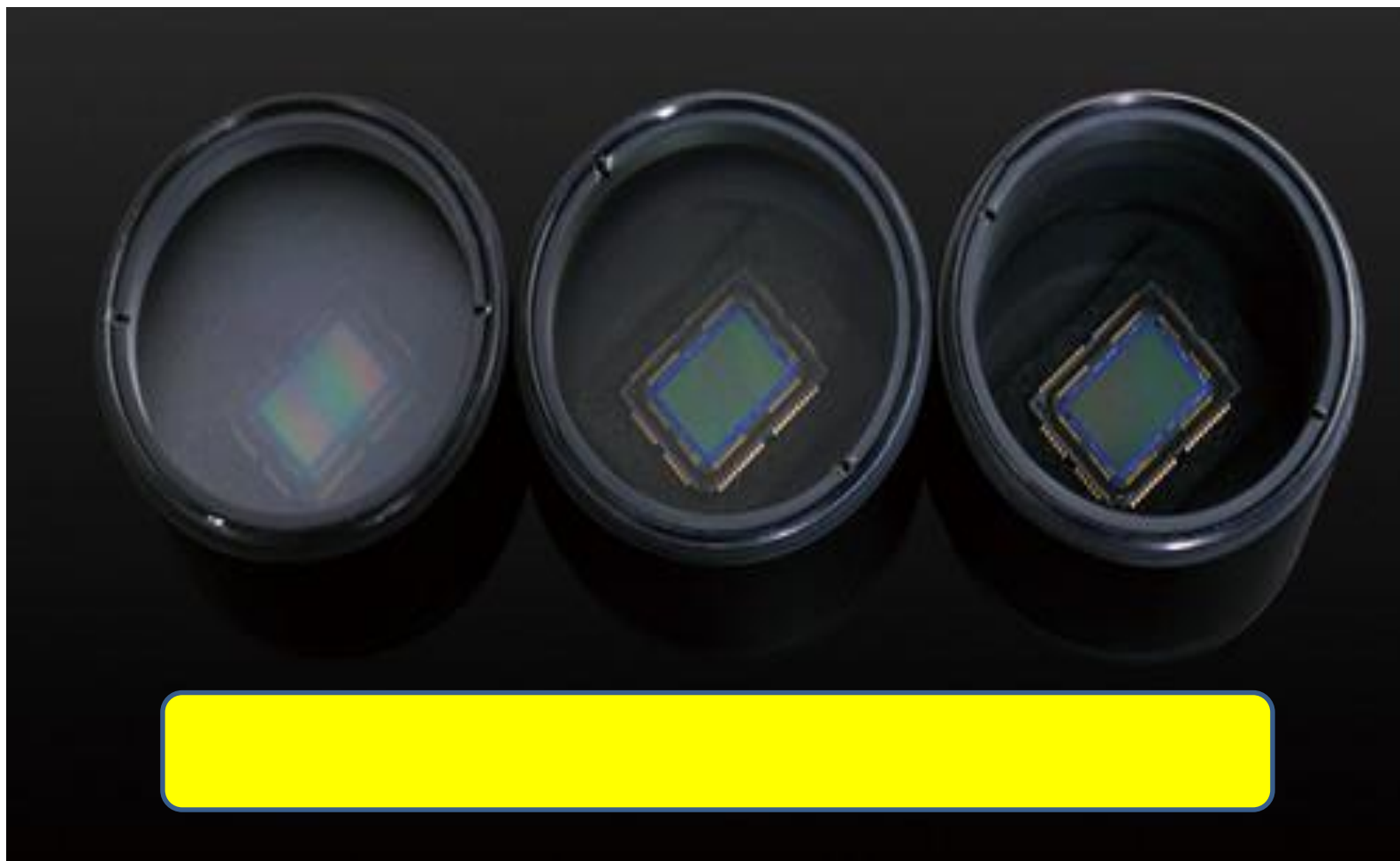
正在破裂的半球形水膜

薄膜干涉的颜色用于膜厚的精密测量—干涉比色法

- (1) 通过称重等方法可以确定标准样板的膜厚
- (2) 将待测膜与样板膜置于相同照明条件下，对比其干涉颜色
- (3) 在380nm-760nm，人眼分辨的色阶达 10^2 以上—膜厚精度可达10nm。

2.3.1 薄膜的颜色、增透和高反膜

镜头的镀膜



2.3.1 薄膜的颜色、增透和高反膜

镜头的镀膜



cnrepair.com

- 单层镀膜的镜头，其镜片表面的反光较弱，它能大大增加光谱中部的黄绿光透过率，只有光谱两端的红光和蓝光才被反射，因此反光一般呈淡蓝紫色；
- 多层镀膜的镜头，其镜头的透光率极高，镜片表面的直接反光很弱，盖上镜头尾盖，正对着镜片玻璃逆光观看，只见镜头内“很黑”，只有从镜片的侧面观察才可以看到彩色的反光，这种反光多为深红（大幅增透蓝光）、深蓝（大幅增透红光）、深黄（大幅增透蓝绿光）和深绿色

2.3.1 薄膜的颜色、增透和高反膜

镜头的镀膜



图左：镜头炫光（flare）下造成画面的影响；
图右：镜片前镀膜减少炫光的产生也强化了画面的明亮度

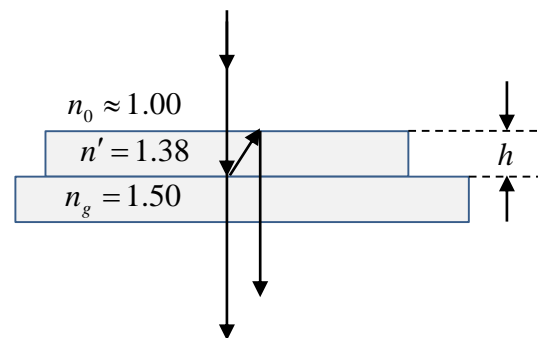
2.3.2 例题

例3-1

在折射率 $n = 1.50$ 的玻璃上，镀上 $n' = 1.38$ 的 MgF_2 薄膜。使从空气入射的波长为 $\lambda = 550\text{nm}$ 的绿光通过最多($1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$)，求

- (1) 膜的厚度
- (2) 此时反射光的波长

解答：设介质薄膜的厚度为 h ，上、下表面反射均为由光疏介质到光密介质，因此透射光强考虑半波损。考虑当光垂直入射 $i = 0$ 时，依公式有：



$$\Delta L = 2n'h = (2k + 1)\frac{\lambda}{2}$$

原则上 k 有多种取法，若取 $k=0$ ，此时 $h_0 = \frac{\lambda}{4n'} = \frac{1 \times 550}{4 \times 1.38} \approx 99.6\text{nm}$ (不可见)

反射光满足干涉相长的方程 $\Delta L = 2n'h_0 = k'\lambda$ $k'=1$ ，得到 $\lambda'_1 \approx 274.9\text{nm}$ (不可见)

$k=1$ 时， $h_1 \approx 298.9\text{nm}$

反射光满足干涉相长的方程 $\Delta L = 2n'h_1 = k'\lambda$ $k'=1$ ，得到 $\lambda'_1 \approx 825\text{nm}$ (不可见)

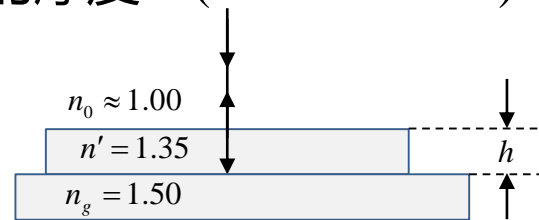
$k'=2$ ，得到 $\lambda'_2 \approx 412.5\text{nm}$ (蓝紫色)

2.3.2 例题

例3-2

在折射率 $n = 1.50$ 的玻璃上，镀上 $n' = 1.35$ 的透明介质薄膜。入射光波垂直于介质膜表面照射，观察反射光的干涉，发现对 $\lambda_1 = 600 \text{ nm}$ 的光波干涉相消，对 $\lambda_2 = 700 \text{ nm}$ 的光波干涉相长。且在 600 nm 到 700 nm 之间没有别的波长是最大限度相消或相长的情形。求所镀介质膜的厚度。（ $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ）

解答：设介质薄膜的厚度为 h ，上、下表面反射均为由光疏介质到光密介质，故不计附加光程差。当光垂直入射 $i = 0$ 时，依公式有：



$$\text{对 } \lambda_1: \quad 2n'h = (2k + 1) \frac{\lambda_1}{2} \quad (1)$$

$$\text{对 } \lambda_2: \quad 2n'h = k\lambda_2 \quad (2)$$

$$\text{由 (1) (2) 两式可得:} \quad k = \frac{\lambda_1}{2(\lambda_2 - \lambda_1)} = 3$$

$$\text{将 } k, \lambda_2, n' \text{ 代入 (2) 式得} \quad h = \frac{k\lambda_2}{2n'} = 7.78 \times 10^{-4} \text{ mm}$$

2.3.2 例题

例3-1

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.

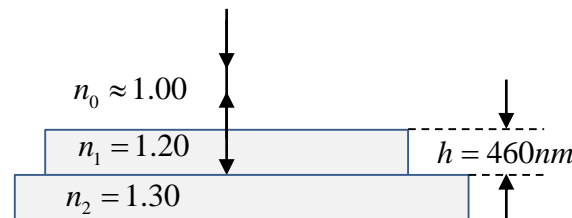
(1)如果太阳正位于海域上空, 一直升飞机的驾驶员从机上向正下方观察, 他所正对的油层厚度为460 nm, 则他将观察到油层呈什么颜色?

(2)如果一潜水员潜入该区域水下, 并向正上方观察, 又将看到油层呈什么颜色?

解答:

(1) 驾驶员所见应是阳光在油膜上的反射光干涉的明线.

$n_0 < n_1 < n_2$, 因此无半波损.



$$\Delta L = 2n_1h = k\lambda \Rightarrow \begin{cases} k=1, \lambda_1 \approx 1104nm \\ k=2, \lambda_2 \approx 552nm \\ k=3, \lambda_3 \approx 368nm \end{cases} \quad \text{绿色}$$

(2) 潜水员看到的是油膜的透射的干涉亮纹, 此时可以用反射的暗纹来计算

$$\Delta L = 2n_1h = \frac{2k+1}{2}\lambda \Rightarrow \lambda = \frac{2208}{2k+1}nm \Rightarrow$$

$$\begin{cases} k=0, \lambda_0 \approx 2208nm \\ k=1, \lambda_1 \approx 736nm \\ k=2, \lambda_2 \approx 441.6nm \\ k=3, \lambda_3 \approx 315.4nm \end{cases} \quad \begin{matrix} \text{红光} \\ \text{紫光} \end{matrix} \rightarrow \text{红紫光}$$

本节重点

1. 薄膜干涉的分析方法、干涉相长相消的条件（理解）
2. 牛顿环的计算和应用（计算）
3. 等倾干涉的原理（理解）
4. 理解等倾干涉与等厚干涉的对比（理解）
5. 增透与增反膜及其应用（理解）
6. 薄膜干涉的计算（计算）

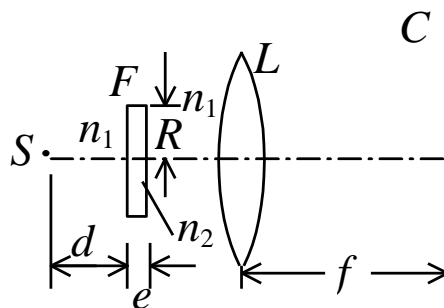
作业

P300-2,3,5,6,7,8,9

重排版: P220-2,3, 5,6,7,8,9

补充习题一

如图所示, 用波长为 $\lambda = 632.8 \text{ nm}$ ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) 的单色点光源 S 照射厚度为 $e = 1.00 \times 10^{-5} \text{ m}$ 、折射率为 $n_2 = 1.50$ 、半径为 $R = 10.0 \text{ cm}$ 的圆形薄膜 F , 点光源 S 与薄膜 F 的垂直距离为 $d = 10.0 \text{ cm}$, 薄膜放在空气 (折射率 $n_1 = 1.00$) 中, 观察透射光的等倾干涉条纹. 请问最多能看到几个亮纹? (注: 亮斑和亮环都是亮纹) .



提示: 此处观察的是透射光的等倾干涉条纹

补充习题二

一滴油 ($n_1 = 1.20$) 浮在水面上 ($n_2 = 1.33$), 用白光垂直照射。

- (1) 从空气中看去, 油滴外围最薄的区域是亮区还是暗区? (3 分)
- (2) 从油滴最薄的边缘数起, 第 3 个黄绿色 ($\lambda = 550\text{nm}$) 区域的油层约有多厚? (2 分)
- (3) 为什么彩色会随着油滴的变厚而逐渐消失? (2 分)
- (4) 如果垂直入射的白光经过一个干涉滤波片 (厚度 $h = 0.3\mu\text{m}$ 、折射率 $n' = 1.50$ 的透明膜, 两边镀反射率 $R = 0.98$ 的银膜), 再照在射油滴上, 肉眼看上去只剩一种颜色, 则该颜色的波长是多少? 从边缘算起, 油滴厚度达到多少时, 干涉条纹将第一次消失? (7 分)

