大学物理

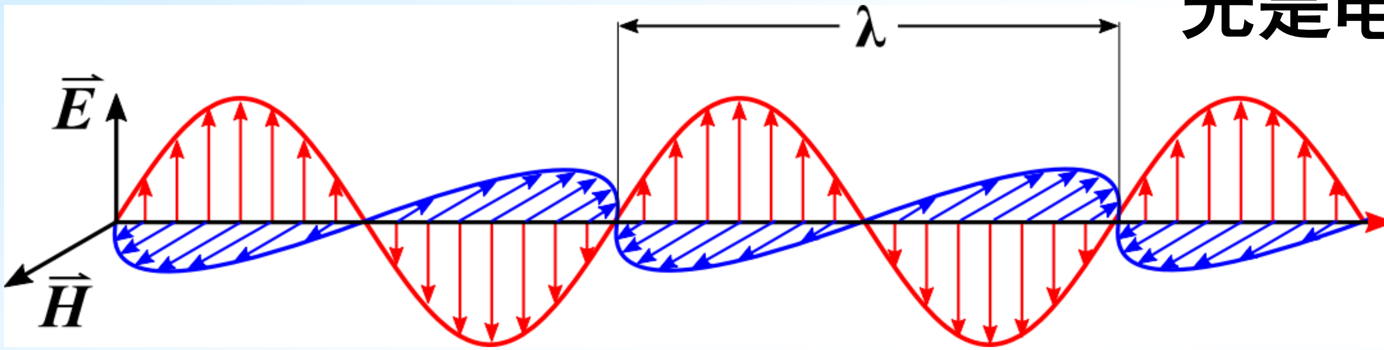
University Physics

华 中 科 技 大 学 物 理 学 院

王 宁

ningwang@hust.edu.cn

回顾 第1-2节 光波 光波的叠加 光程



光是电磁波

- 真空中的光速 $c = \dfrac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$

- 介质中的光速 $v = \dfrac{c}{\sqrt{\varepsilon_r \mu_r}} = \dfrac{c}{n}$

折射率

$$\boxed{n = \frac{c}{v} = \sqrt{\mu_r \varepsilon_r}}$$

电场强度 $\vec{E}$ ⇨ 光矢量

光强 I：光波的平均能流密度 $I = E_0^2$

回顾 第1-2节 光波 光波的叠加 光程

1、光源的发光机理： 能级跃迁辐射

2、相干叠加和衬比度

3、普通光源获得相干光的途径

分波阵面法、分振幅法

4、光程：

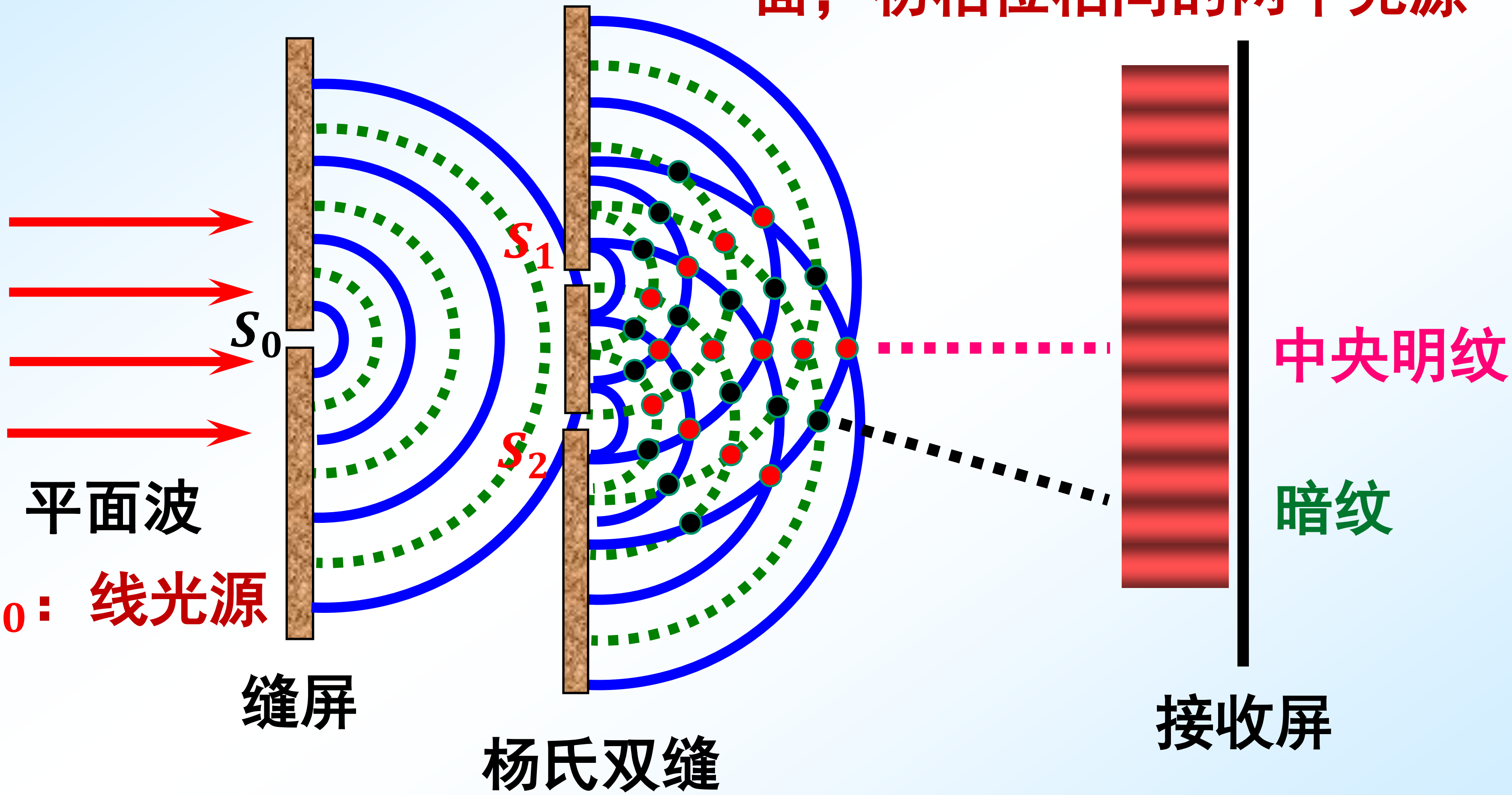
$$L = \Sigma (n_i d_i)$$

回顾 第3节 分波阵面干涉

Interference by Dividing Wave front

杨氏双缝干涉

S_1, S_2：来自于S_0的同一个波阵面，初相位相同的两个光源

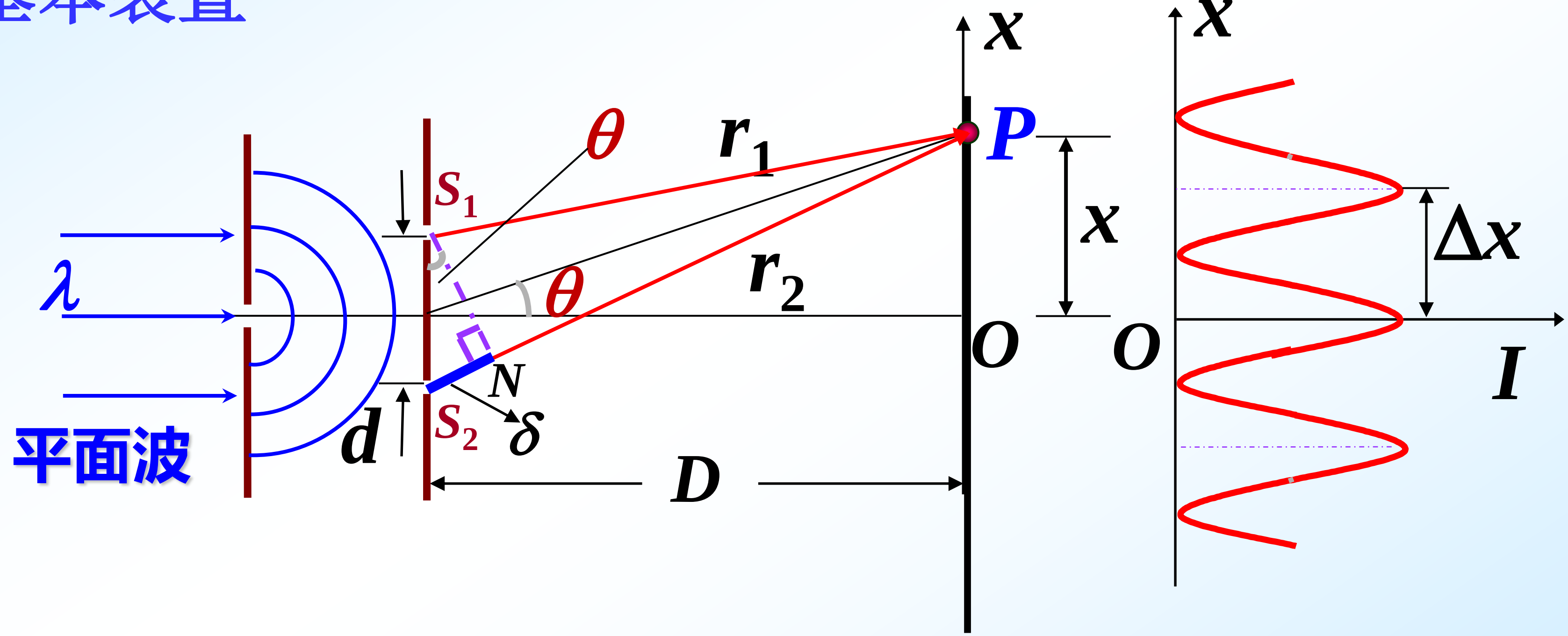


回顾 第3节 分波阵面干涉

Interference by Dividing Wave front

一、杨氏双缝干涉

1、基本装置



$d >> \lambda$，$D >> d$ ($d \sim 10^{-4}$ m，$D \sim$ m)

2、光程差: $\delta = r_2 - r_1 \approx \overline{S_2N} = d\sin\theta$

3、光强公式

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2}\cos\Delta\varphi$$

$$I_1 = I_2 = I_0 \qquad \boxed{I = 4I_0\cos^2\frac{\Delta\varphi}{2}}$$

4、屏上强弱中心位置

$$\delta = d\sin\theta \approx d\tan\theta = d\cdot\frac{x}{D}$$

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda}\delta = \begin{cases} 2k\pi & \text{明纹} \\ (2k+1)\pi & \text{暗纹} \end{cases}$$

明纹 $\delta = k\lambda$ $\quad\sin\theta = k\frac{\lambda}{d}$ $\quad x = k\frac{D}{d}\lambda$

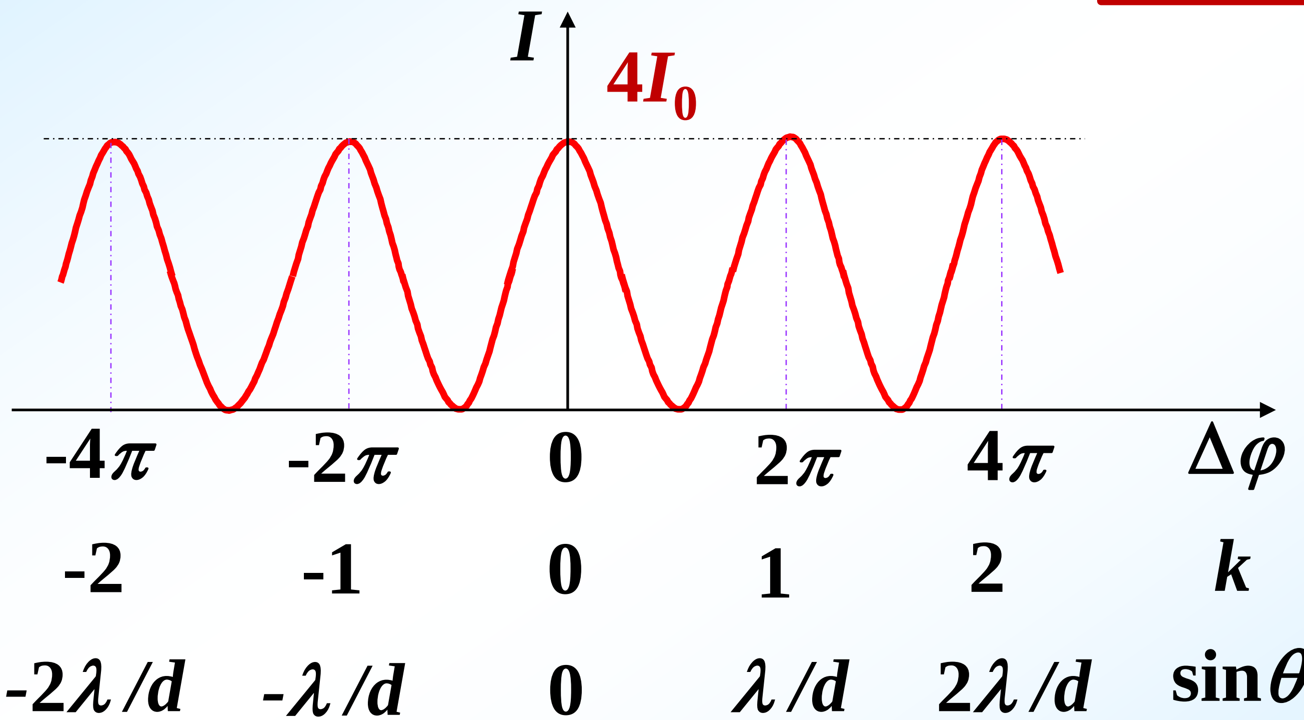
暗纹 $\delta = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$ $\quad\sin\theta = (2k+1)\frac{\lambda}{2d}$ $\quad x = (2k+1)\frac{D}{2d}\lambda$

$$k = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3 \ldots\ldots$$

光强曲线

明纹级次

$$\boxed{k=\frac{\delta}{\lambda}=\frac{d\sin\theta}{\lambda}}$$



5、双缝干涉条纹的特点

（1）一系列平行的明暗相间的条纹；

（2）中间级次低，两边级次高；

级次：$k=\dfrac{d\sin\theta}{\lambda}=\dfrac{r_2-r_1}{\lambda}$

明纹：k　　暗纹：$\dfrac{(2k+1)}{2}$　　$k=0,\pm1,\pm2\ldots\ldots$

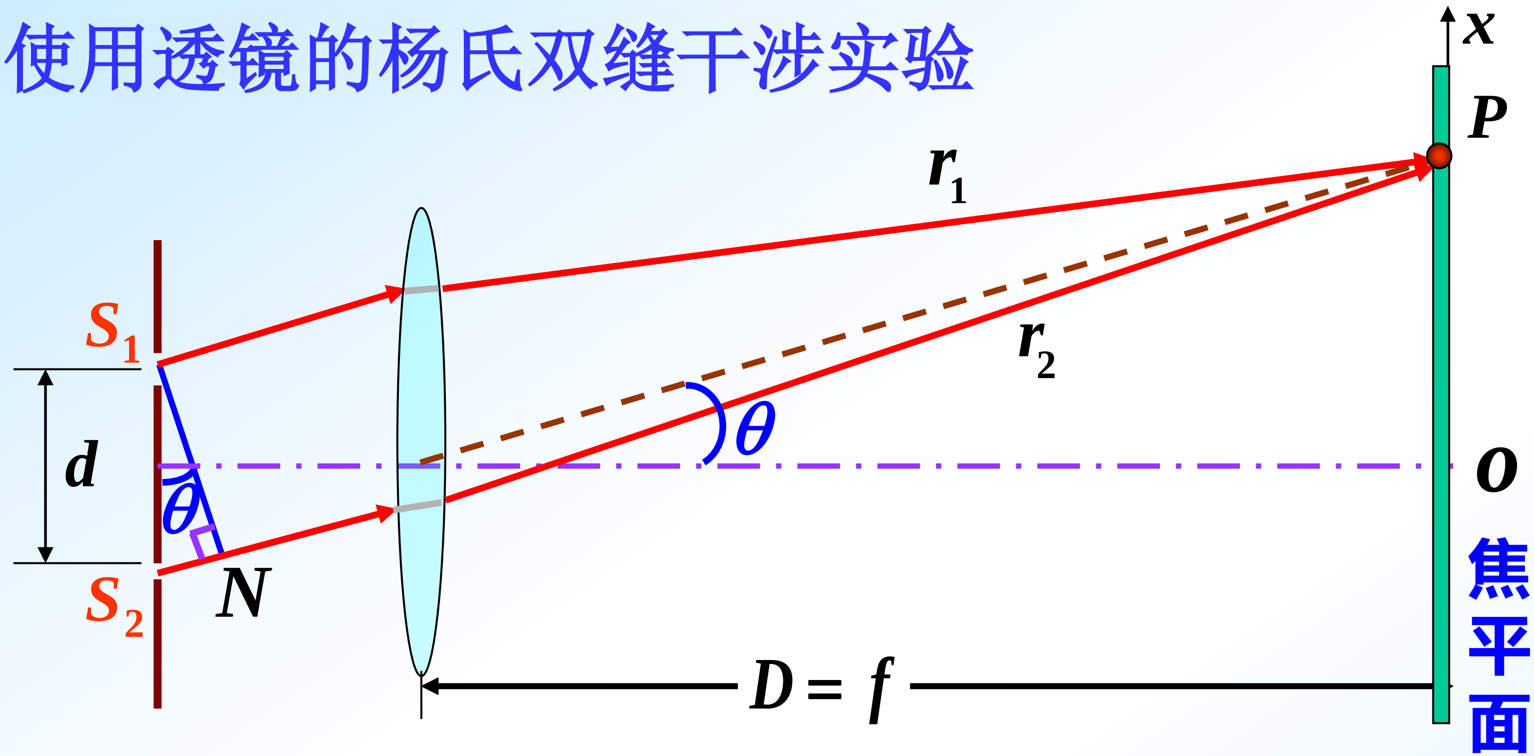
（3）θ不太大时条纹等间距

$$x_{明}=k\frac{D}{d}\lambda \qquad \Delta x=\frac{D}{d}\lambda$$

$\Delta x\propto\lambda$　　可测量波长

$\Delta x\propto\dfrac{1}{d}$　　$d\downarrow,\ \Delta x\uparrow$　　条纹越清晰易分辨。

6、使用透镜的杨氏双缝干涉实验



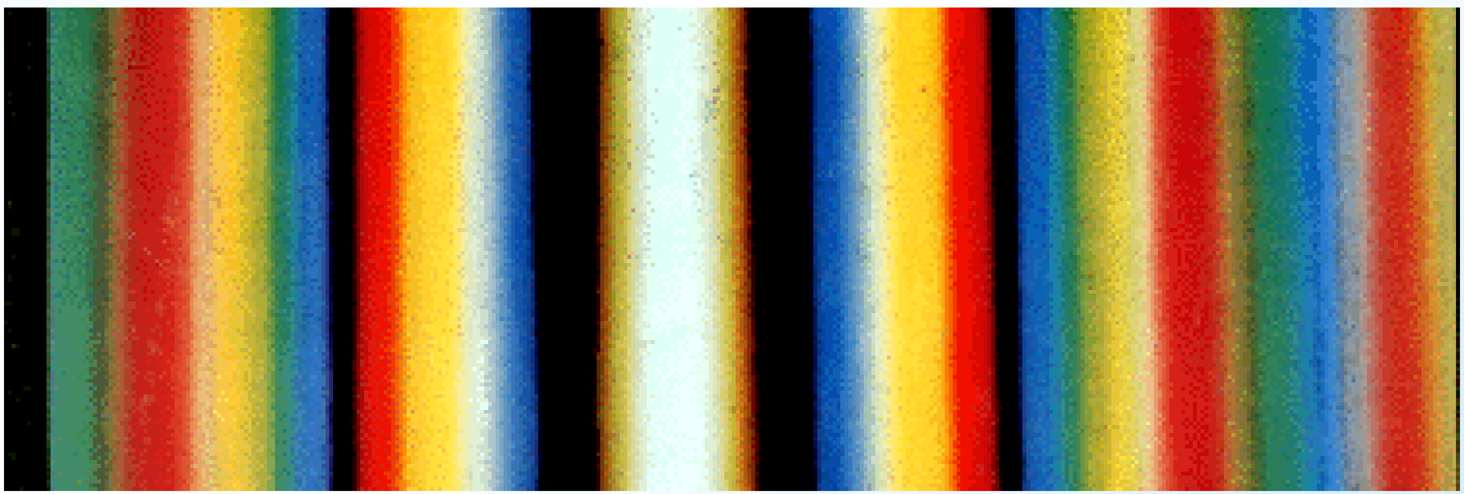
光程差及明暗条件：

$$\delta = \overline{S_2N} = d\sin\theta = \begin{cases} k\lambda & \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \end{cases} \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2 \cdots)$$

明纹

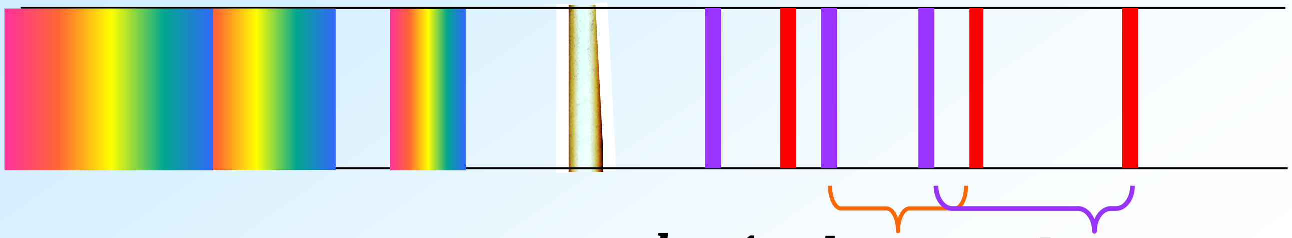
暗纹

红光入射的杨氏双缝干涉照片



白光入射的杨氏双缝干涉照片

7、白光入射 ——色散

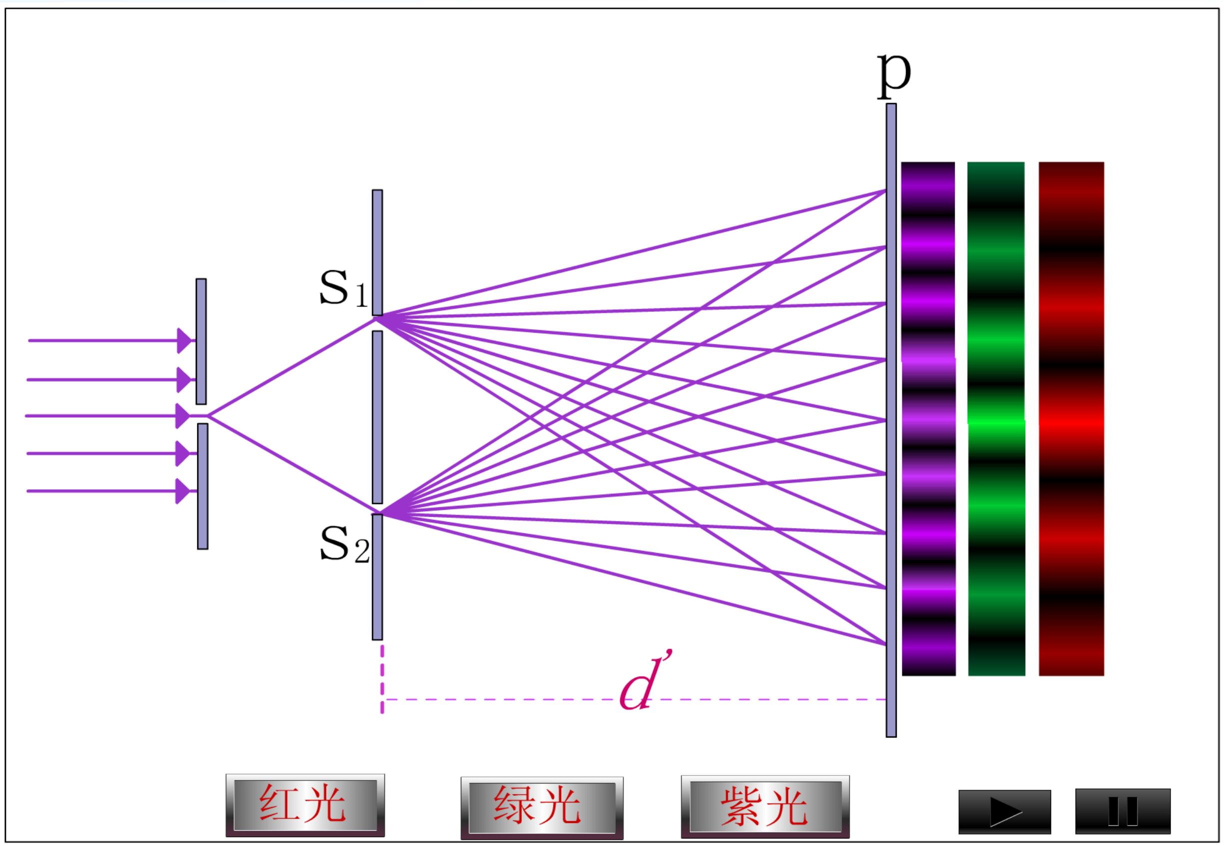


$k=-3$ $k=-2$ $k=-1$ $k=1$ $k=2$ $k=3$

$$x_{明}=\pm k\frac{D}{d}\lambda$$

重级现象！

$x_k \propto \lambda$ **同一级上** $\lambda\uparrow, x_k\uparrow$ **(中央极大除外)**



在屏幕上 x 处发生重级时：

$$\boxed{x_{明}=\pm k\frac{D}{d}\lambda}$$

$$\boxed{x = k_1\lambda_1 D/d = k_2\lambda_2 D/d}$$

干涉级次越高重叠越容易发生。

8、干涉现象的分析小结：

① 明确两相干光源；

② 正确计算相干光线的光程差；

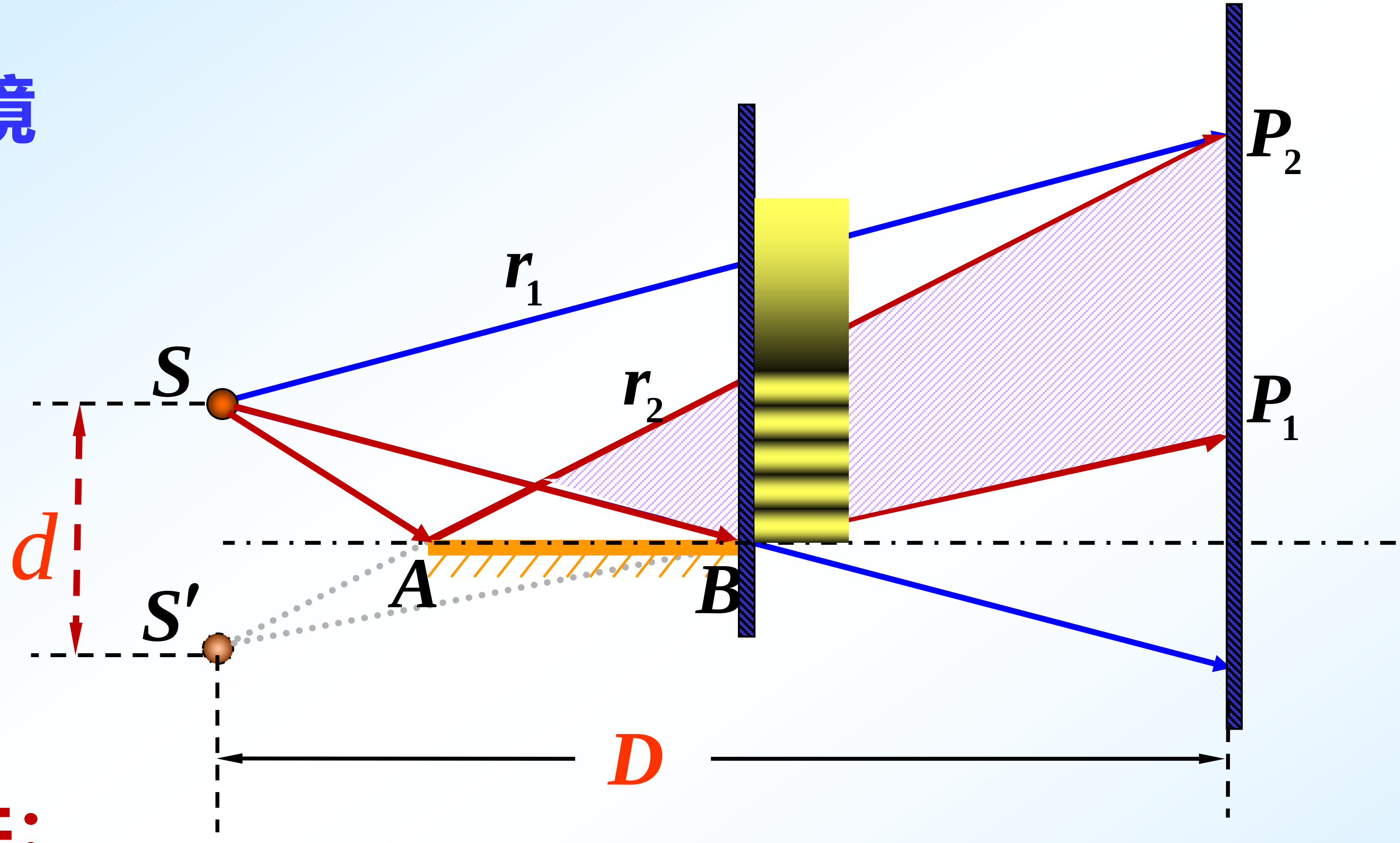
③ 由干涉条件 $\delta=\begin{cases}\pm k\lambda & \text{(明)}\\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{(暗)}\end{cases}$

确定条纹的性质。

形状、位置、级次分布、条纹移动等。

二、分波阵面干涉的其它一些实验

1、洛埃镜

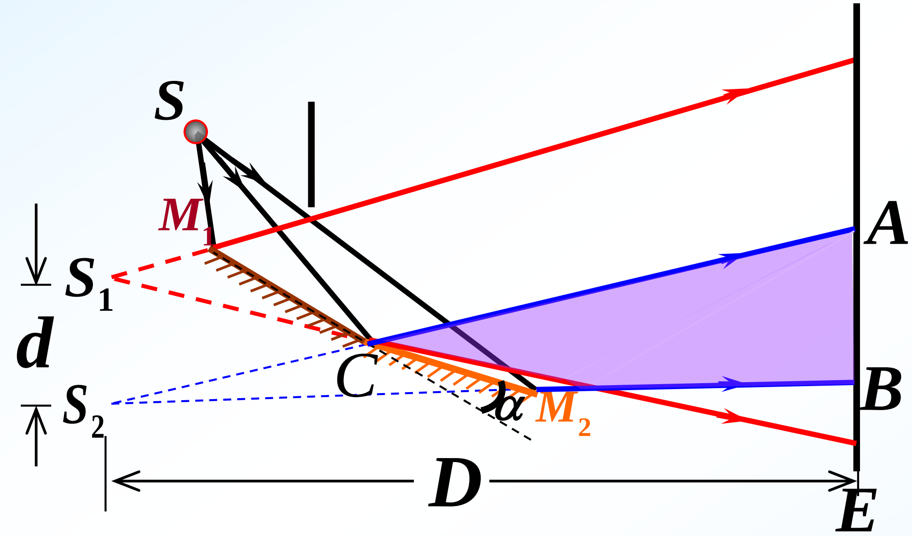


明暗条件：

$$\delta = r_2 - r_1 \boxed{+\frac{\lambda}{2}} = \begin{cases} \pm k\lambda & \text{(明)} \\ \pm(2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & \text{(暗)} \end{cases} \qquad (k = 0,1,2\cdots)$$

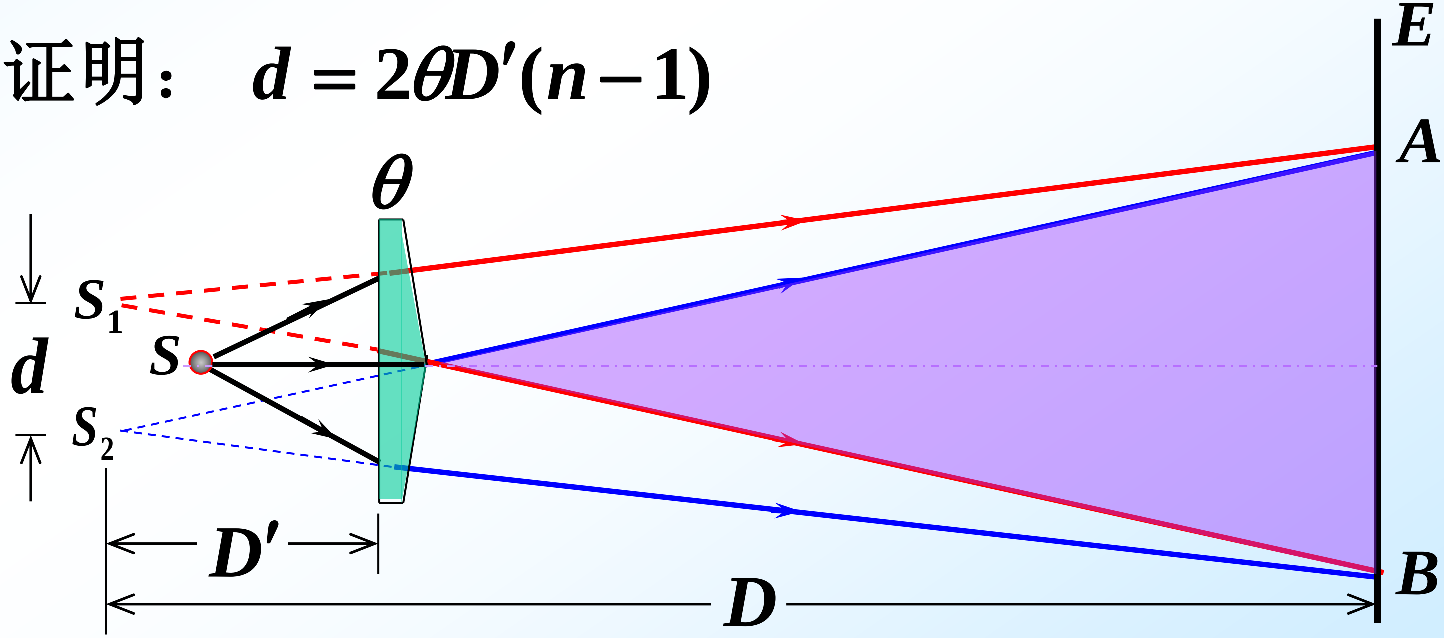
证实了半波损失现象。

2、菲涅耳双面镜实验：

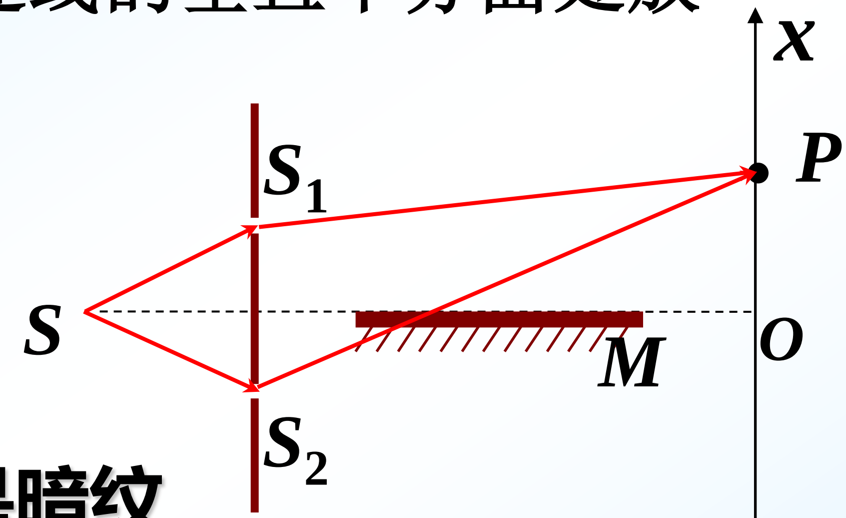


3、菲涅耳双棱镜实验

几何光学证明： $d = 2\theta D'(n-1)$



例4. 在双缝干涉实验中，屏幕上的P点处是明条纹。若将缝S_2盖住，并在S_1、S_2连线的垂直平分面处放一反射镜M，则此时：



A、**P点处仍为明条纹**

B、**P点处为暗条纹**

C、**无干涉条纹**

D、**不能确定P点是明纹还是暗纹**

例5. 在双缝干涉实验中，两条缝的宽度原来是相等的，若其中一缝的宽度略为变窄，则：

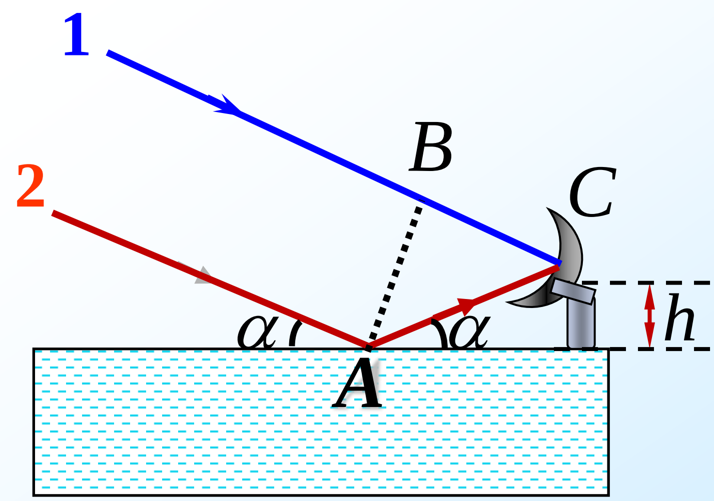
A、**干涉条纹的间距变宽**

B、**干涉条纹的间距变窄**

C、**干涉条纹的间距不变，但原极小的强度不再为零**

D、**不再发生干涉现象**

例6. 如图，离湖面 $h = 0.5$ m处有一电磁波接收器位于C，当一射电星从地平面渐渐升起时，接收器断续地检测到一系列极大值 。已知射电星所发射的电磁波的波长为20.0 cm，求第一次测到极大值时，射电星的方位与湖面所成角度。



解： 计算波程差

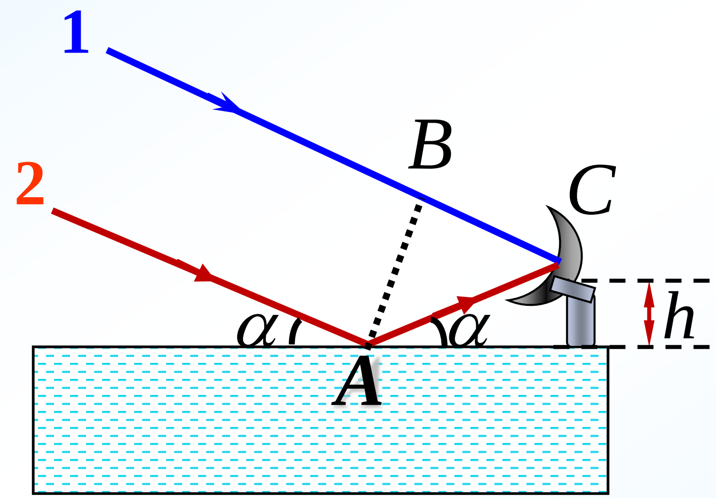
$$\delta = AC - BC \boxed{+\frac{\lambda}{2}}$$

$$= AC(1-\cos 2\alpha)+\frac{\lambda}{2}$$

$$= \frac{h}{\sin\alpha}(1-\cos 2\alpha)+\frac{\lambda}{2}$$

极大时 $\delta = k\lambda$

$$\delta = \frac{h}{\sin\alpha}(1-\cos 2\alpha)+\frac{\lambda}{2}=k\lambda$$



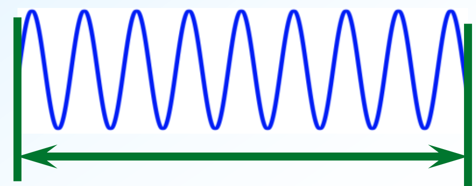
$$\sin\alpha = \frac{(2k-1)\lambda}{4h}$$ 取 $k=1$

$$\alpha_1 = \arcsin\frac{20.0\times10^{-2}\ \mathrm{m}}{4\times0.5\ \ \mathrm{m}} = 5.74^\circ$$

注： 考虑半波损失时，附加波程差取 $\boxed{\pm\frac{\lambda}{2}}$ 均可，

符号不同，k 取值不同，对问题实质无影响。

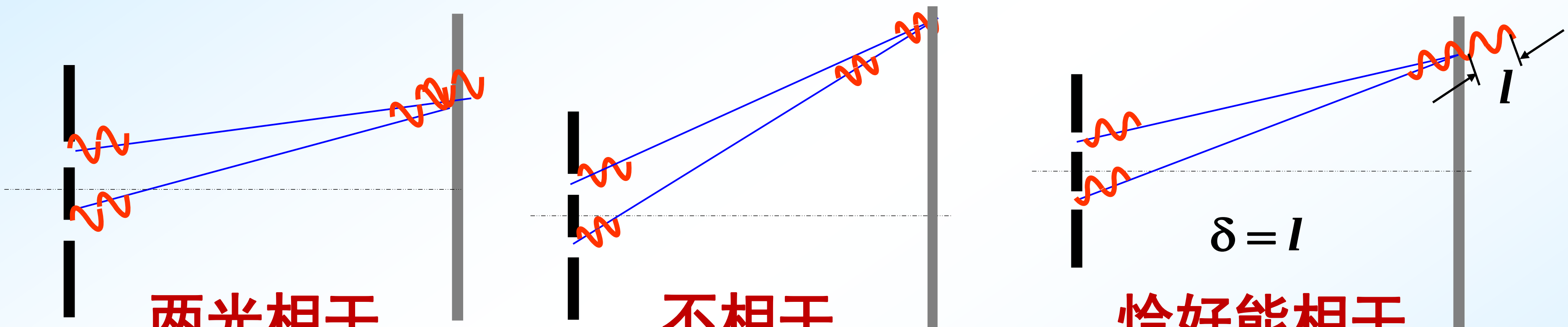
三、时间相干性



$l = c\Delta t$

l：相干长度

原子发光是间歇性的，每个波列持续的时间是 $\Delta t < 10^{-8}s$



两光相干　　不相干　　恰好能相干

恰好能相干的最大光程差 = 相干长度 = 波列长度l

可以证明：

$$L = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$

普通光源：$\Delta\lambda$ ： 10^{-3}–10^{-1} nm　$L: 10^{-3} \rightarrow 10^{-1}$m

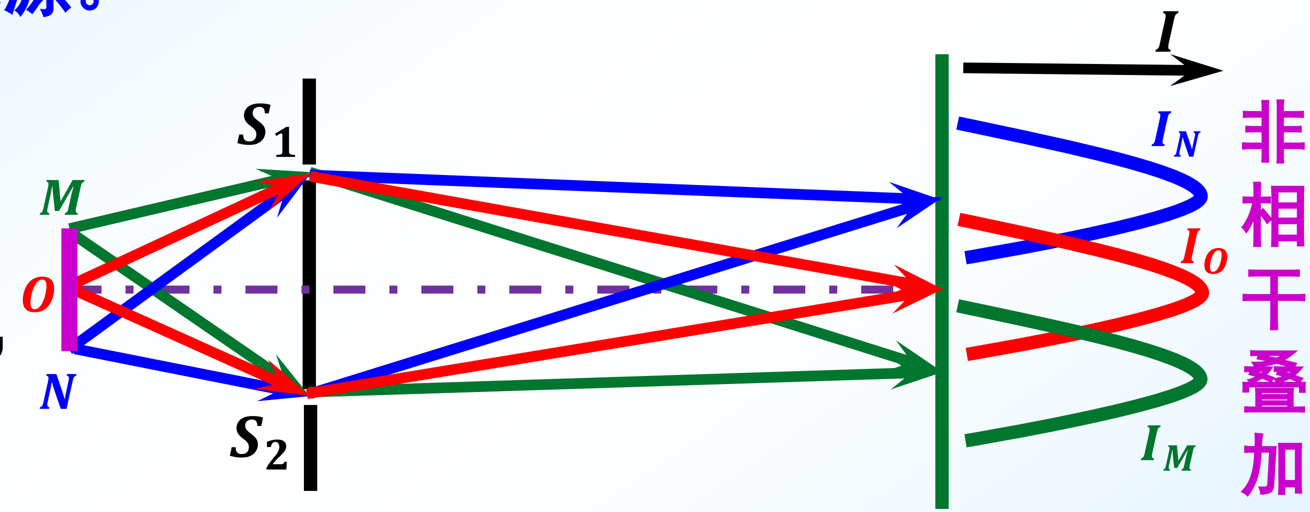
激光：　$\Delta\lambda$ ： $10^{-9} - 10^{-6}$ nm　$L: 10^{-1} \rightarrow 10^{2}$km

四、空间相干性

——光源宽度对干涉条纹衬比度的影响

各点可看成非相干光源。

各点形成的干涉条纹相互错开，强度相加，使条纹衬比度降低。



当N（M）点的零级极大和O点的零级极小重合时，干涉条纹消失，总光强均匀分布。

光源线度越小，干涉条纹越清晰，空间相干性越好。

第4节　分振幅薄膜干涉

Interference by Dividing Amplitude

薄膜干涉是分振幅干涉。

日常见到的薄膜干涉：

肥皂泡上的彩色、 雨天地上油膜的彩色、 昆虫翅膀的彩色…

膜为何要薄？　－光的相干长度所限。

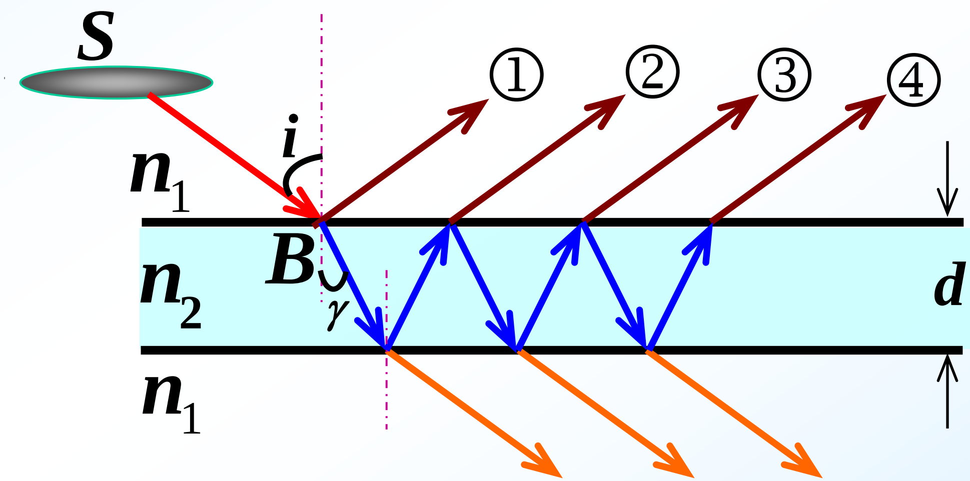
膜的薄、厚是相对的，与光的单色性好坏有关。

有实际意义的是厚度均匀薄膜在无穷远处的等倾条纹和厚度不均匀薄膜表面的等厚条纹。

一、等倾干涉

厚度均匀的薄膜所形成的干涉。

用扩展光源照射薄膜，其反射和透射光如图所示：



设入射光振幅为A，电磁理论给出一系列反射光振幅比：

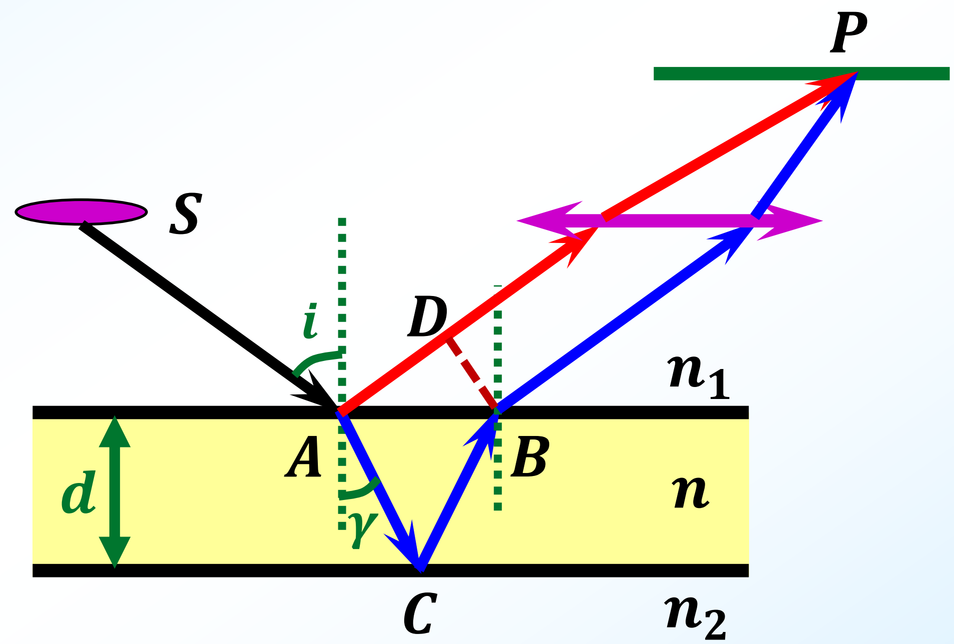
①: ② : ③ :④=0.2A: 0.192A: 0.00768A: 1.2×10^{-5}A

所以，我们只考虑前两条出射光 ① 、②的干涉。

等倾干涉 ----厚度均匀的薄膜所得到的干涉

设薄膜厚度为d，折射率为n，
且两边介质的折射率满足：

$$n_1 < n < n_2$$



光程差：

$$\delta = n(\overline{AC} + \overline{CB}) - n_1\overline{AD}$$

$$\overline{AC} = \overline{CB} = \frac{d}{\cos\gamma}$$

$$\overline{AD} = \overline{AB}\sin i = 2d\tan\gamma\sin i$$

$$\boxed{\frac{n_1}{n} = \frac{\sin\gamma}{\sin i}}$$

$$\delta = \frac{2nd}{\cos\gamma} - 2n_1 d\tan\gamma\sin i \;+\lambda/2\;-\lambda/2$$

$$\delta = 2nd\cos\gamma = 2d\sqrt{n^2 - n_1^2\sin^2 i} = \begin{cases} k\lambda & k = 1,2,\cdots \quad \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \quad \text{暗纹} \end{cases}$$

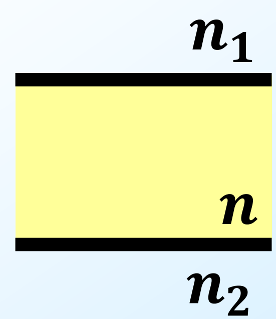
等倾干涉的特点

$$\delta = 2d\sqrt{n^2 - n_1^2\sin^2 i} = \begin{cases} k\lambda & k = 1,2,\cdots \quad \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \quad \text{暗纹} \end{cases}$$

1）没有零级明纹，因为光程差恒大于零；

2）明暗条件中没有“$\pm$”号，条纹不对称。

3）光程差也可以用折射角来表示：$\delta = 2nd\cos\gamma$



4）半波损失：

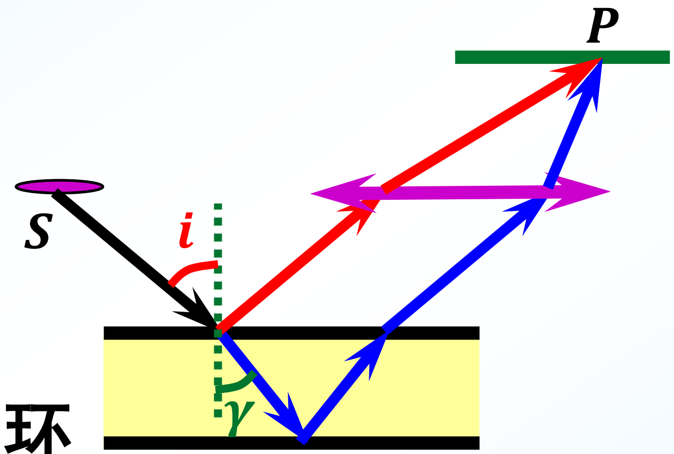
$\left.\begin{matrix} n_1 < n < n_2 \\ n_1 > n > n_2 \end{matrix}\right\}$ 不考虑半波损失

$\left.\begin{matrix} n_1 > n < n_2 \\ n_1 < n > n_2 \end{matrix}\right\}$ 要加 $\dfrac{\lambda}{2}$

$$\delta = 2d\sqrt{n^2 - n_1^2\sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & k = 1,2,\cdots \quad \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \quad \text{暗纹} \end{cases}$$

干涉条纹的特点

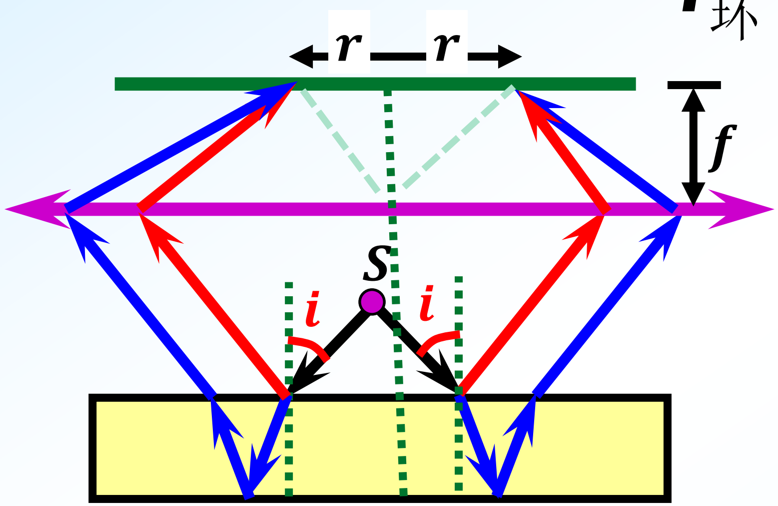
(1) 倾角 i 相同的光线对应于同一条干涉圆环条纹

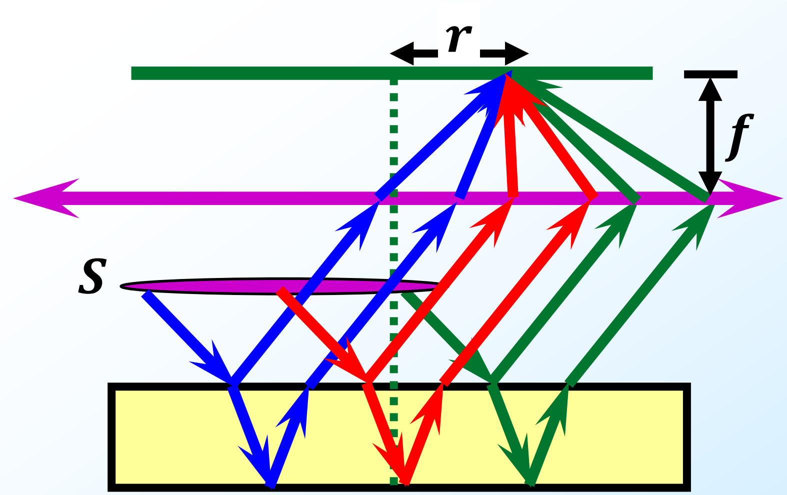


----等倾干涉

(2) 不同倾角 i 构成的等倾条纹是一系列同心圆环

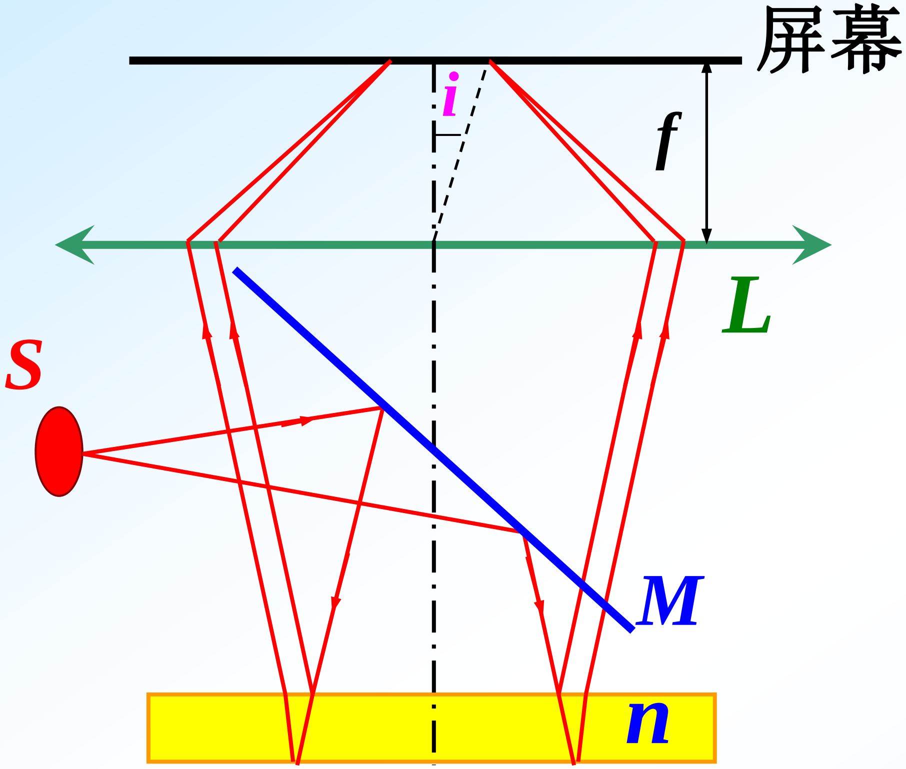
$$r_{环} = f\,\mathrm{tg}\,i$$

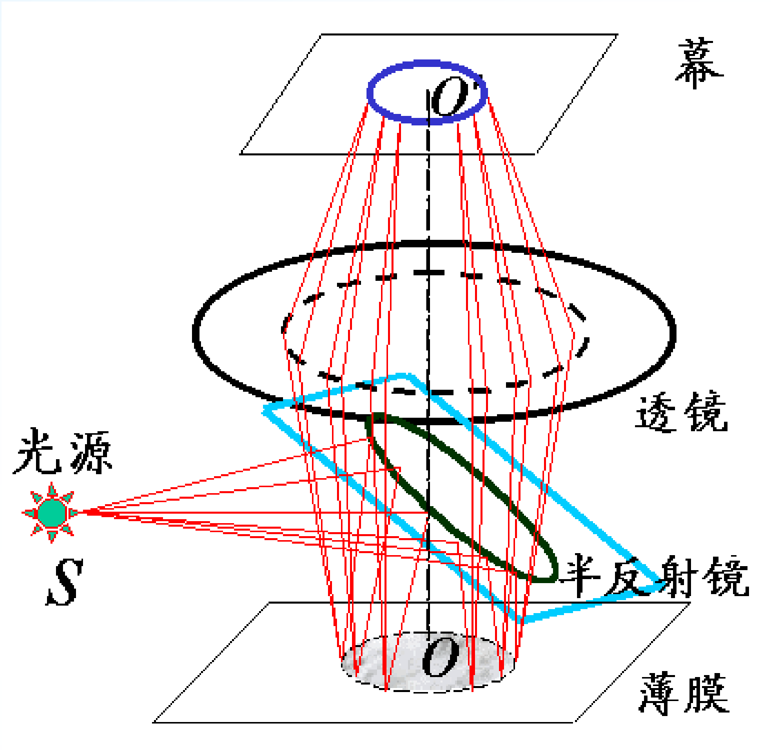


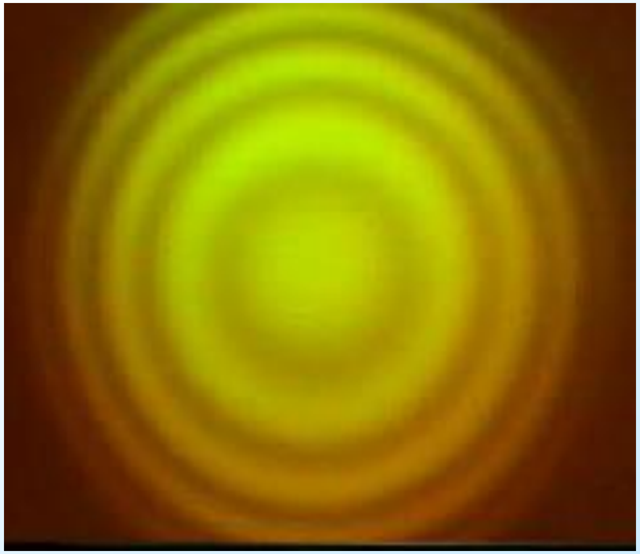


面光源照明：只要 i 相同，都将汇聚在同一干涉环上（非相干叠加），明暗对比更鲜明。

对于观察等倾条纹，没有光源宽度和条纹衬比度的矛盾！







观察等倾条纹的实验装置和光路

$$2d\sqrt{n^2 - n_1^2\sin^2 i} = \begin{cases} k\lambda & k = 1,2,\cdots \quad \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \quad \text{暗纹} \end{cases}$$

(3) 条纹分布间隔(与折射角的关系)

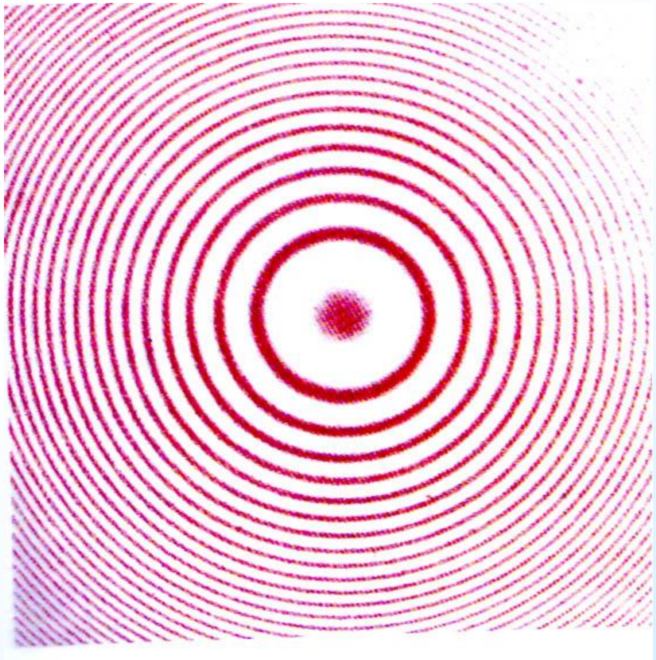
以明纹为例

$$\begin{cases} 2nd\cos\gamma_k = k\lambda \\ 2nd\cos\gamma_{k+1} = (k+1)\lambda \end{cases}$$

$$\therefore \quad \Delta\gamma_k = \frac{\lambda}{2nd\sin\gamma_k}$$

γ_k增大，$\Delta\gamma_k$减小

条纹内疏外密



等倾干涉条纹

$$2d\sqrt{n^2 - n_1^2\sin^2 i} = \begin{cases} k\lambda & k = 1,2,\cdots \quad \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \quad \text{暗纹} \end{cases}$$

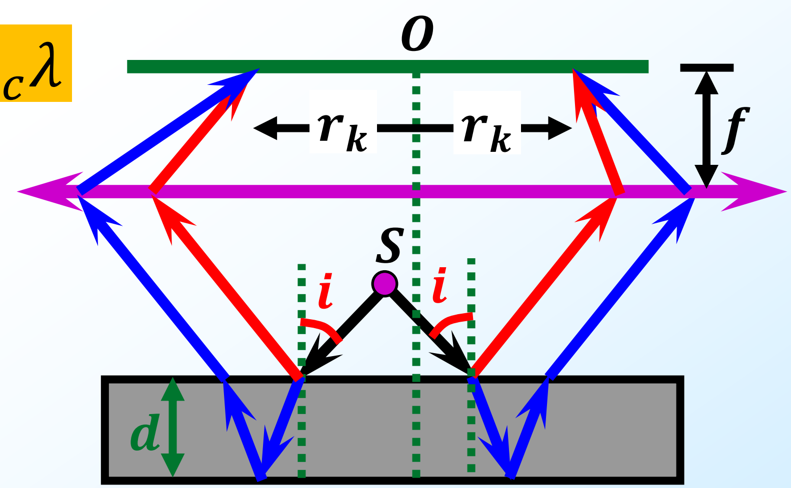
(4) 越往中心，条纹级别越高

厚度d一定时， $k\uparrow \Rightarrow i\downarrow\ r_k\downarrow$

中心O点处的干涉级次最高 $2nd = k_c\lambda$

从中心亮斑起，级次分别为

$k_c, k_c - 1, k_c - 2 \ldots \ldots$



若厚度d改变

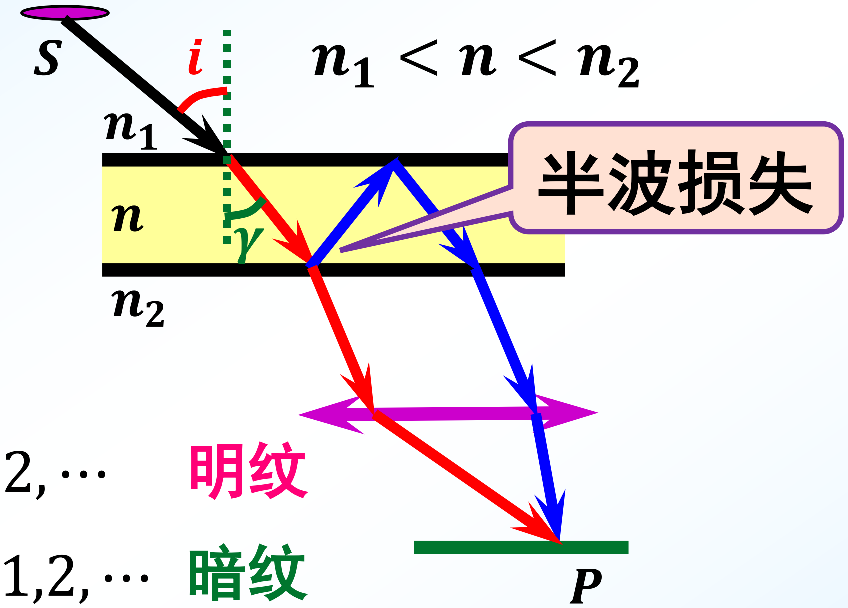
- $d\uparrow$ **中心往外冒条纹**
- $d\downarrow$ **中心往内吞条纹**

(5) 光源是白光

k, d一定时， $\lambda\uparrow \Rightarrow i\downarrow\ r_k\downarrow$ **——彩色干涉条纹**

说明

(1) 透射光也有干涉现象



明暗条件：

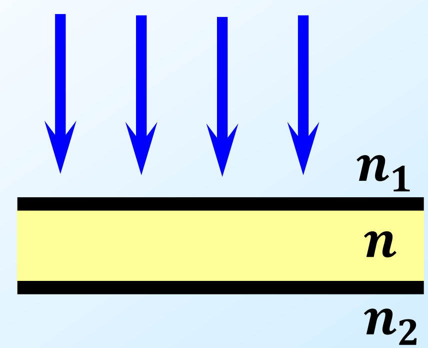
$$2d\sqrt{n^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & k = 1,2,\cdots \quad \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \quad \text{暗纹} \end{cases}$$

反射光加强的点，透射光正好减弱(互补)

(2) 平行光垂直入射的干涉现象

单色光：薄膜表面或全亮，或全暗，或不亮不暗

复色光：薄膜表面有的颜色亮，有的消失。



等倾干涉的应用 ----增透膜

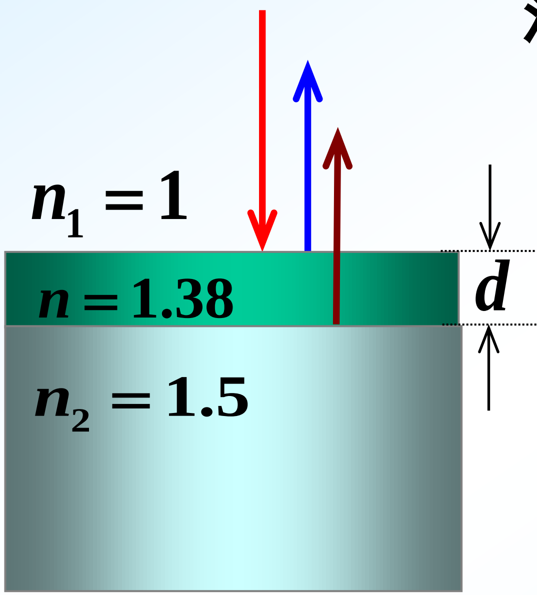
使某些颜色的单色光在表面的反射干涉相消，增加透射

等倾干涉应用

1、测定波长或薄膜的厚度

2、增透膜、增反膜（提高或降低光学器件的透射率）

增透膜： 通过减少反射光强度而增加透射光强度的薄膜。



薄膜上下两界面反射光的光程差为：

$$\delta = 2nd$$

干涉相消：

$$2nd = (2k+1)\frac{\lambda}{2} \qquad k = 0,1,2,3\cdots$$

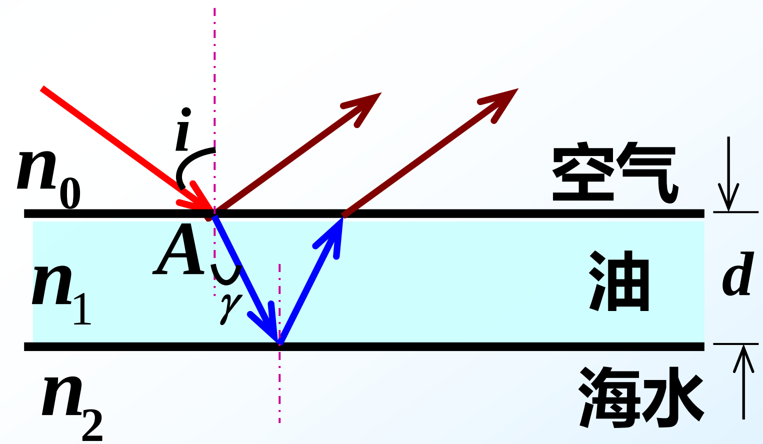
膜的最小厚度为：$d = \dfrac{\lambda}{4n}$

增反膜： 对反射光应用干涉相长条件。

例1. 一油轮漏出的油 (n_1=1.20)污染了某海域，在海水 (n_2 =1.30)表面形成一层薄薄的油污。

1、如果太阳正位于海域上空，一飞机驾驶员从机上向下观察，他所正对的油层厚度为460nm，他将观察到油层呈什么颜色?

解: 1、油层上下表面反射的太阳光均有半波损失。



$$\delta = 2n_1 d_1 = k\lambda$$

$$k = 1,2,3\cdots$$

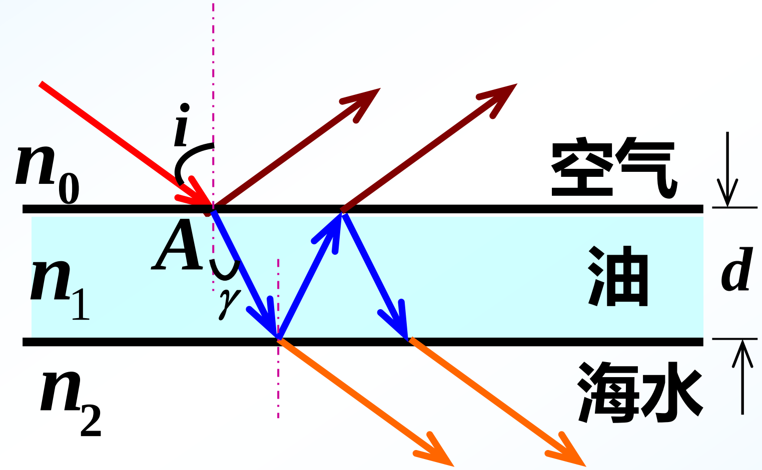
得干涉加强的光波波长为:

$k = 1, \lambda_1 = 1104\text{nm}$ $k = 2, \lambda_2 = 552\text{nm}$ $k = 3, \lambda_3 = 368\text{nm}$

红外 可见，绿 紫外

2、如果一潜水员潜入该区域水下，又将观察到油层呈什么颜色？

透射光光程差为：



$$\delta = 2n_1 d_1 + \frac{\lambda}{2} = k\lambda$$

$$k = 1,2,3,\cdots$$

$$k = 1, \lambda_1 = \frac{2n_1 d}{1-\frac{1}{2}} = 2208\text{nm}$$ 红外

$$k = 2, \lambda_2 = \frac{2n_1 d}{2-\frac{1}{2}} = 736\text{nm}$$ 可见，红

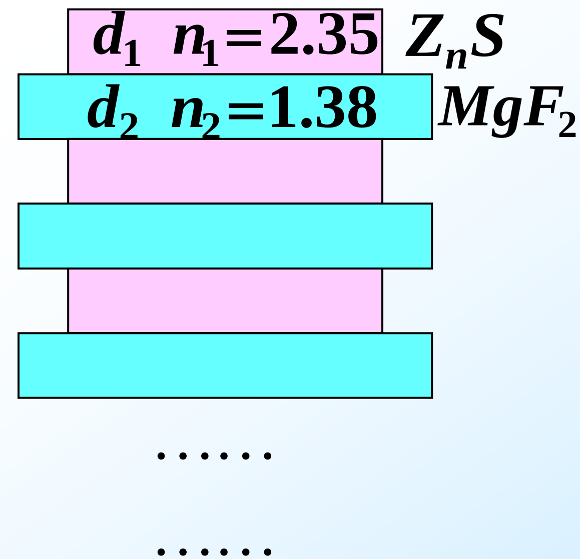
$$k = 3, \lambda_3 = \frac{2n_1 d}{3-\frac{1}{2}} = 441.6\text{nm}$$ 可见，紫

紫红色

$$k = 4, \lambda_4 = \frac{2n_1 d}{4-\frac{1}{2}} = 315.4\text{nm}$$ 紫外

例2：（多层膜）氦氖激光器中的谐振腔反射镜，对波长$\lambda = 6328Å$的单色光反射率在99%以上，为此反射镜采用在玻璃表面镀上ZnS（$n_1 = 2.35$）和MgF_2（$n_2 = 1.38$）的多层膜，求每层薄膜的实际厚度（按最小厚度要求，光近似垂直入射）。

解： **要求每一层反射都是干涉相长，才能让反射效率达到最大。**



第一层： $1 < 2.35 > 1.38$

$$2n_1d_1 + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad k = 1,2,\cdots$$

取$k = 1$， $d_1 = \dfrac{\lambda}{4n_1} = \dfrac{6328}{4 \times 2.35} = 673Å$

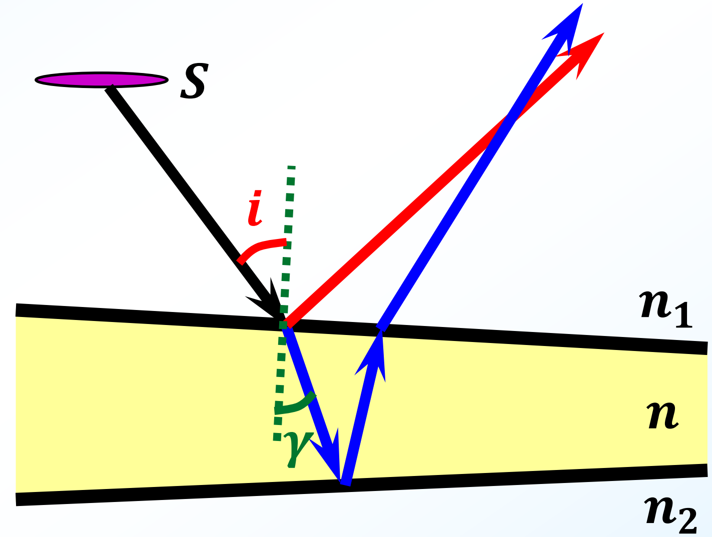
第二层： $2.35 > 1.38 < 2.35$

$$2n_2d_2 + \frac{\lambda}{2} = k\lambda \quad d_2 = \frac{\lambda}{4n_2} = \frac{6328}{4 \times 1.38} = 1146Å$$

二、等厚干涉（厚度不均匀的薄膜干涉）

两表面有一定夹角的薄膜所产生的干涉。

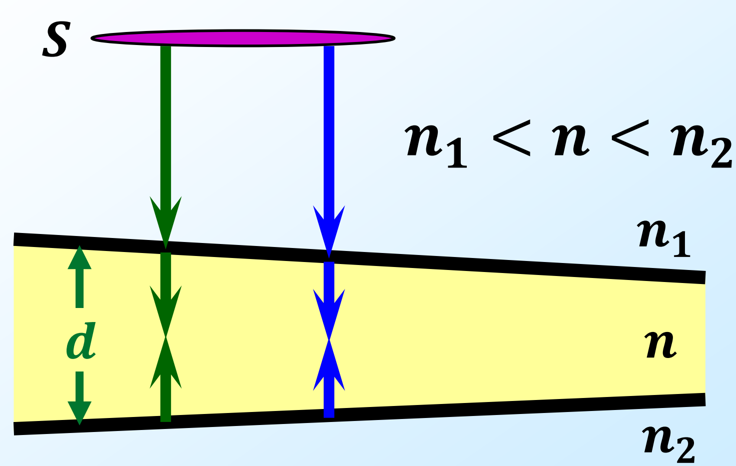
$$\delta = 2nd\cos\gamma$$



通常观察方向垂直膜面，仅讨论近垂直入射情况

$$i = \gamma = 0$$

可将薄膜分成很多窄条，每个窄条的上下表面近似等距，上下表面反射光的光程差为：

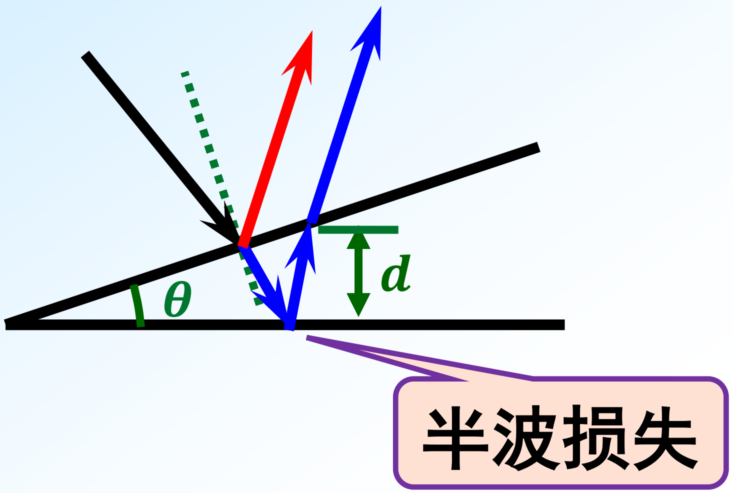


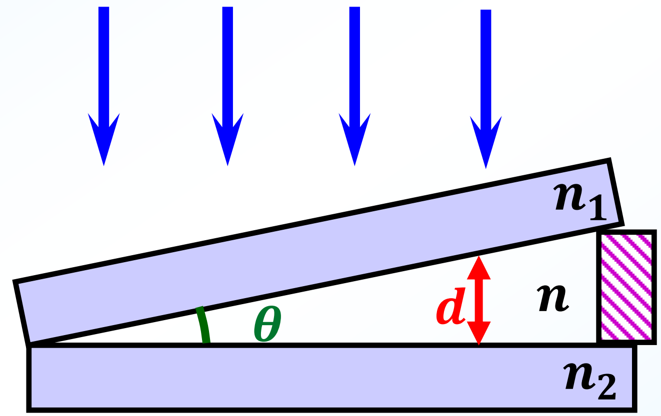
$$\delta = 2nd = \begin{cases} k\lambda & k = 1,2,\cdots \quad \text{明纹} \\ (2k+1)\dfrac{\lambda}{2} & k = 0,1,2,\cdots \quad \text{暗纹} \end{cases}$$

同一厚度对应同一条纹 ——等厚干涉

三、干涉现象的应用

1 劈尖干涉(空气隙劈尖)





厚度为*d*处的明暗条件：（仅考虑近垂直入射）

$$n_1 > n < n_2$$

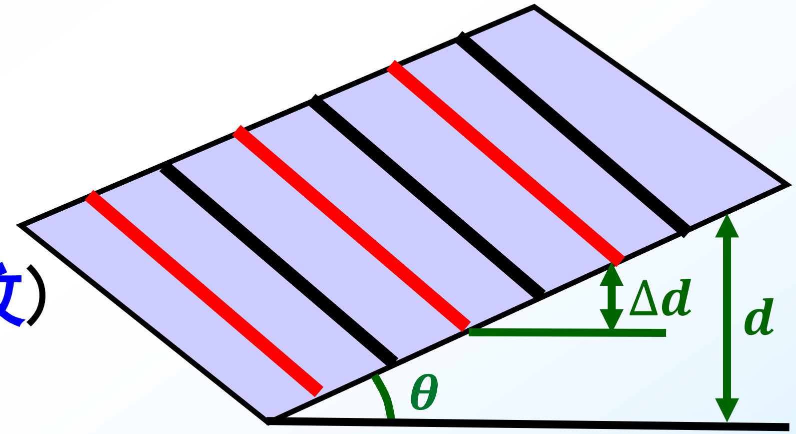
$$\delta = 2nd + \frac{\lambda}{2} = \begin{cases} k\lambda & \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2} & \end{cases} \quad k = 0,1,2,\cdots$$

明纹

暗纹

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

干涉条纹的分布特征：



(1) 每一k值对应劈尖某一确定厚度d

同一厚度对应同一干涉级（等厚条纹）

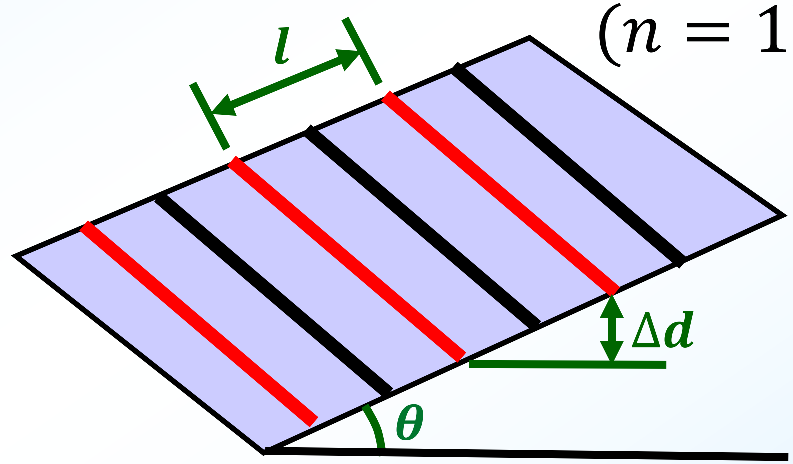
干涉条纹是一组与棱边平行的明暗相等的条纹。

(2) 棱边处$d = 0$ $\begin{cases} n_1 = n_2 > n & \text{对应着暗纹（有半波损失）} \\ n_1 < n < n_2 & \text{对应着明纹（无半波损失）} \end{cases}$

(3) 相邻两明（暗）纹间对应的厚度差为：$\Delta d = \dfrac{\lambda}{2n}$

(4) 相邻两明(暗)纹间距为：

$$l\sin\theta = \Delta d = \frac{\lambda}{2n} \qquad \boxed{l = \frac{\lambda}{2n\sin\theta}}$$



当θ很小时，有 $\sin\theta \approx \theta$

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

θ, λ一定，l确定，条纹等间距；

θ一定，　$\lambda\uparrow, l\uparrow$　$\lambda\downarrow, l\downarrow$

$\theta\uparrow, l\downarrow$ 条纹变密　$\theta\downarrow, l\uparrow$ 条纹变疏

(5) 白光入射得到彩色干涉条纹。

作业： Chap.13 —T6、T7、T8、T9、T10

1. 独立完成作业。
2. 图和公式要有必要的标注或文字说明。
3. 通过学习通提交作业。
4. 作业缺交三分之一及以上者按规定不能参加考试。