

## 第十一章 光学

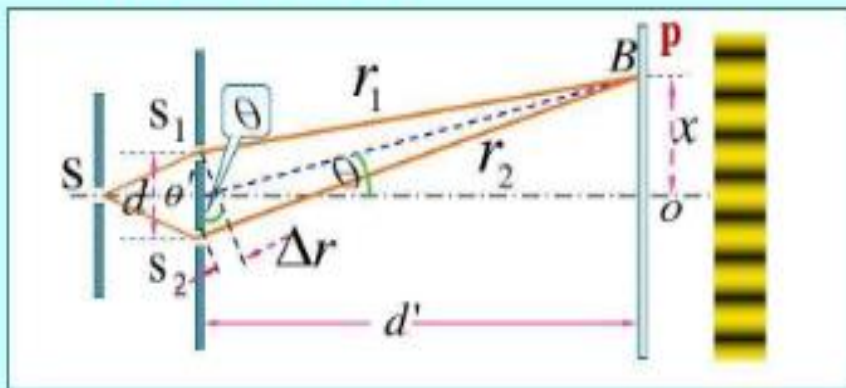
### 第3节 《光程 薄膜干涉》

- 一 理解光程的概念。
- 二 理解薄膜干涉的半波损失。
- 三 理解薄膜干涉的干涉条纹特征



# 知识回顾：杨氏双缝干涉实验

## 一 杨氏双缝干涉实验



红光入射的杨氏双缝干涉照片

$$\Delta r = d \frac{x}{d'} = \begin{cases} \pm k\lambda & \text{加强} \\ \pm (2k+1)\frac{\lambda}{2} & \text{减弱} \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$

$$x = \begin{cases} \pm \frac{d'}{d} k\lambda & \text{明纹} \\ \pm \frac{d'}{d} (2k+1)\frac{\lambda}{2} & \text{暗纹} \end{cases} \quad k = 0, 1, 2, \dots$$



白光入射的杨氏双缝干涉照片

如何考虑光在不同介质中的干涉问题？





## 11-3 光程与光程差

为了便于计算相干光在不同介质中传播相遇时的相位差，引入光程。

### 一、光程

光程等于介质折射率乘以光在介质中传播的路程。

$$\text{光程} = nr$$

当光连续经过几种介质时

$$\text{光程} = \sum_i n_i r_i$$



## 引入光程的意义

光在真空中传播  $c$   $\nu$   $\lambda$

光在介质中传播  $u$   $\nu$   $\lambda' = \frac{\lambda}{n}$

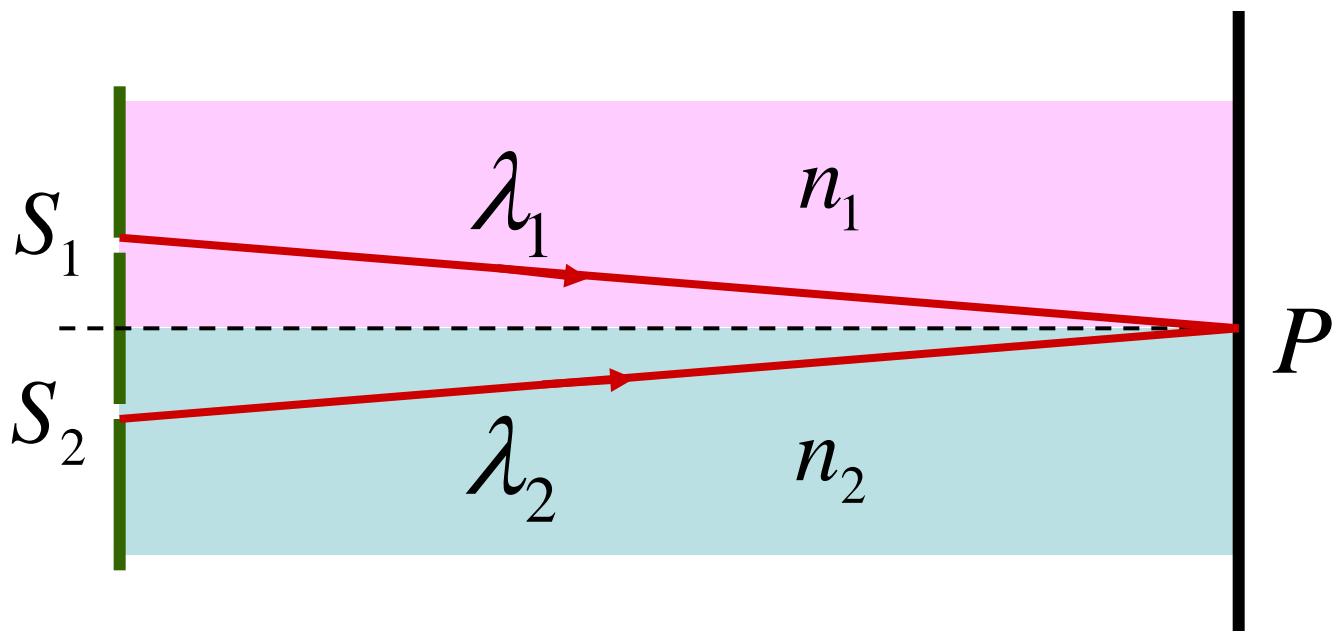
在介质中传播距离  $r$  时，相位的改变为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda'} r = \frac{2\pi}{\lambda/n} r = \frac{2\pi}{\lambda} (nr)$$

在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相应路程。



**例1**  $S_1$ 和 $S_2$ 为初相位相同的相干光源, 光束 $S_1P$ 和 $S_2P$  分别在折射率为 $n_1$ 和  $n_2$  的介质中传播, 在 $P$ 点两束光相遇, 计算其相位差。





解 相位差  $\Delta\varphi = \frac{2\pi r_2}{\lambda_2} - \frac{2\pi r_1}{\lambda_1}$

$$= \frac{2\pi n_2 r_2}{\lambda_0} - \frac{2\pi n_1 r_1}{\lambda_0}$$

即  $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0} (n_2 r_2 - n_1 r_1)$

计算通过不同介质的相干光的相位差, 可不用介质中的波长, 而统一采用真空中的波长计算。



## 二、光程差

在式子  $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}(n_2r_2 - n_1r_1)$  中，令

$$\delta = n_2r_2 - n_1r_1$$

$\delta$  称为光程差。

相位差与光程差的关系  $\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda_0}\delta$

引入光程和光程差后，给我们计算光通过不同介质时的干涉带来方便。



**例2** 真空中波长为550nm的两列光束，垂直进入厚度为2.60 μm、折射率分别为 $n_2=1.60$ 和 $n_1=1.00$ 的介质时具有相同的相位，问出射时，它们之间的相位差是多大？

**解** 两列光出射时的**光程差**

$$\begin{aligned}\delta &= n_2 r_2 - n_1 r_1 \\ &= 2.60 \times (1.60 - 1.00) \times 10^{-6} \\ &= 1.56 \times 10^{-6} \text{ m}\end{aligned}$$



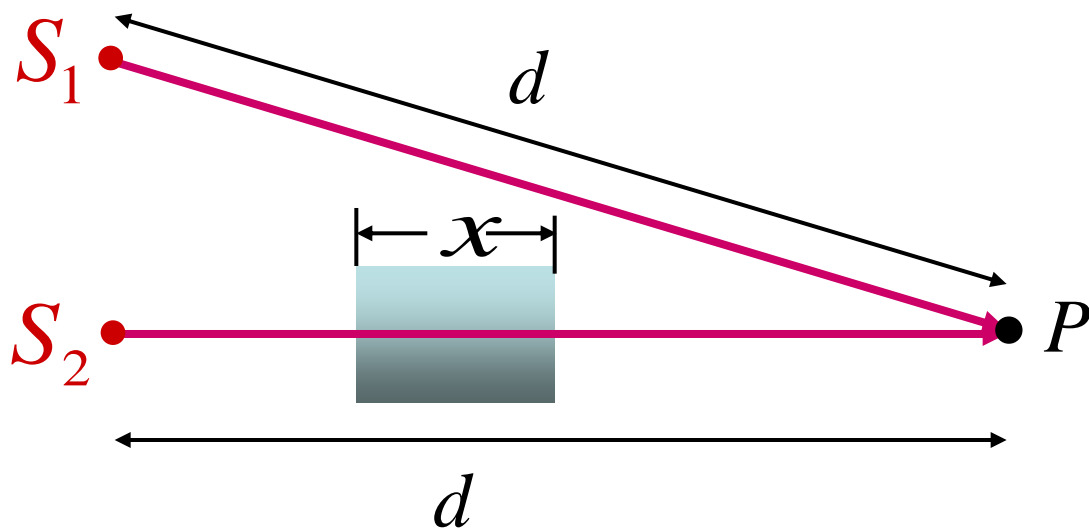


相位差

$$\begin{aligned}\Delta\varphi &= \frac{2\pi}{\lambda_0} \delta \\ &= \frac{2\pi}{550 \times 10^{-9}} \times 1.56 \times 10^{-6} \\ &= 17.8 \text{rad}\end{aligned}$$



**例3** 计算  $S_1$  和  $S_2$  发出波长  $\lambda_0 = 0.5\mu\text{m}$  的相干光在  $P$  点的相位差，其中一束光经过空气( $n_0 \approx 1$ )到  $P$  点，另一束光还通过厚度为  $x$ 、折射率为  $n$  的玻璃片，已知  $n=1.5$ ， $x=0.1\text{mm}$ ， $S_1$  和  $S_2$  的初相差  $\varphi_2 - \varphi_1 = \pi$ 。



**解** 两束光在 $P$ 点的光程差和相位差分别为

$$\delta = (d - x)n_0 + nx - dn_0$$

$$= (n - 1)x$$

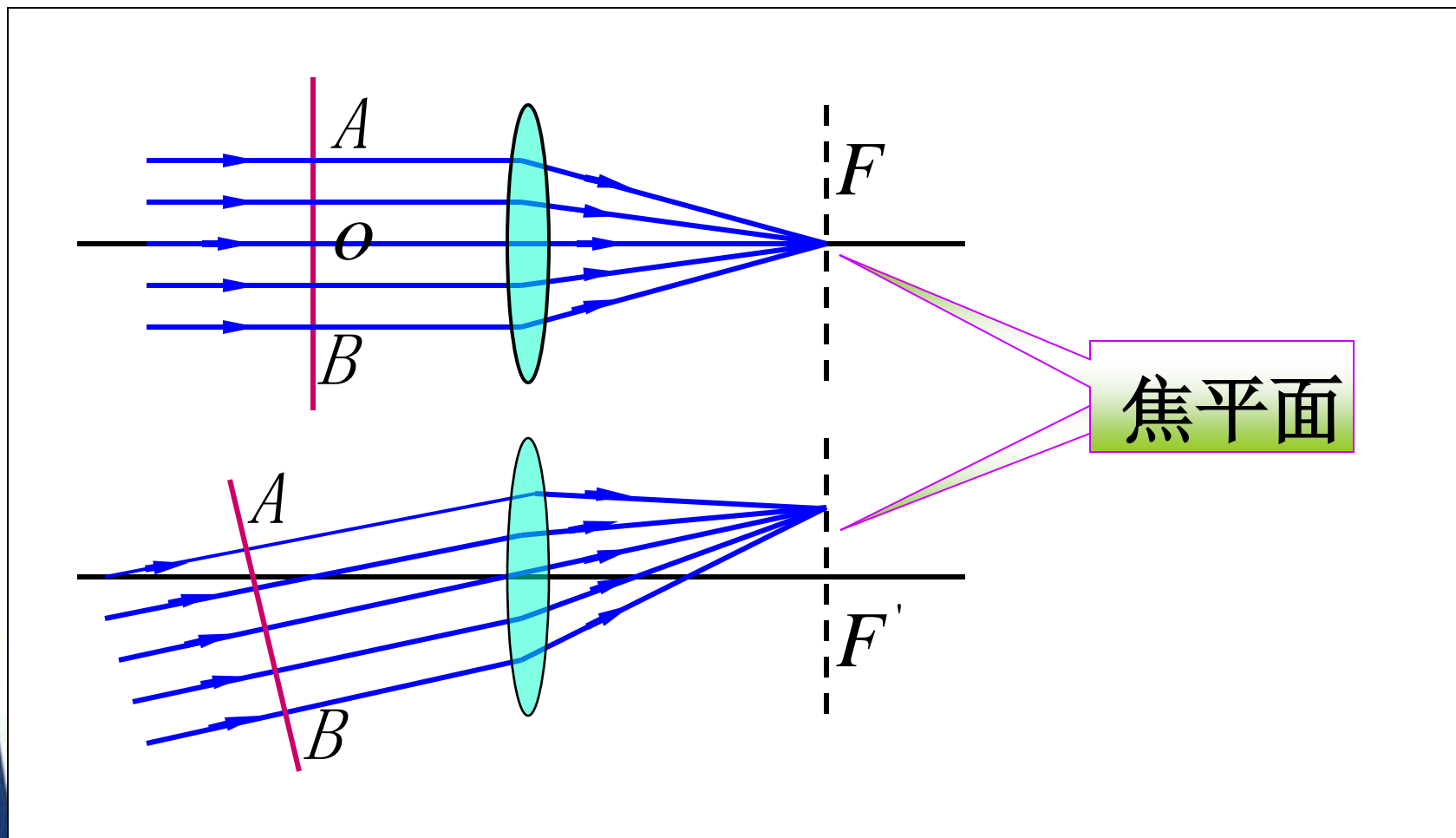
$$\Delta\varphi = 2\pi \frac{\delta}{\lambda_0} + (\varphi_2 - \varphi_1)$$

$$= 2\pi \frac{(n - 1)x}{\lambda_0} + \pi$$

$$= 2\pi \times \frac{0.5 \times 0.1 \times 10^{-3}}{0.5 \times 10^{-6}} + \pi = 201\pi$$



## 二 透镜不引起附加的光程差



# 生活中光在不同介质中的干涉问题



肥皂泡表面缘何是彩色？单反的镜头缘何是彩色？



### 三 薄膜干涉

#### 2、3光线的光程差

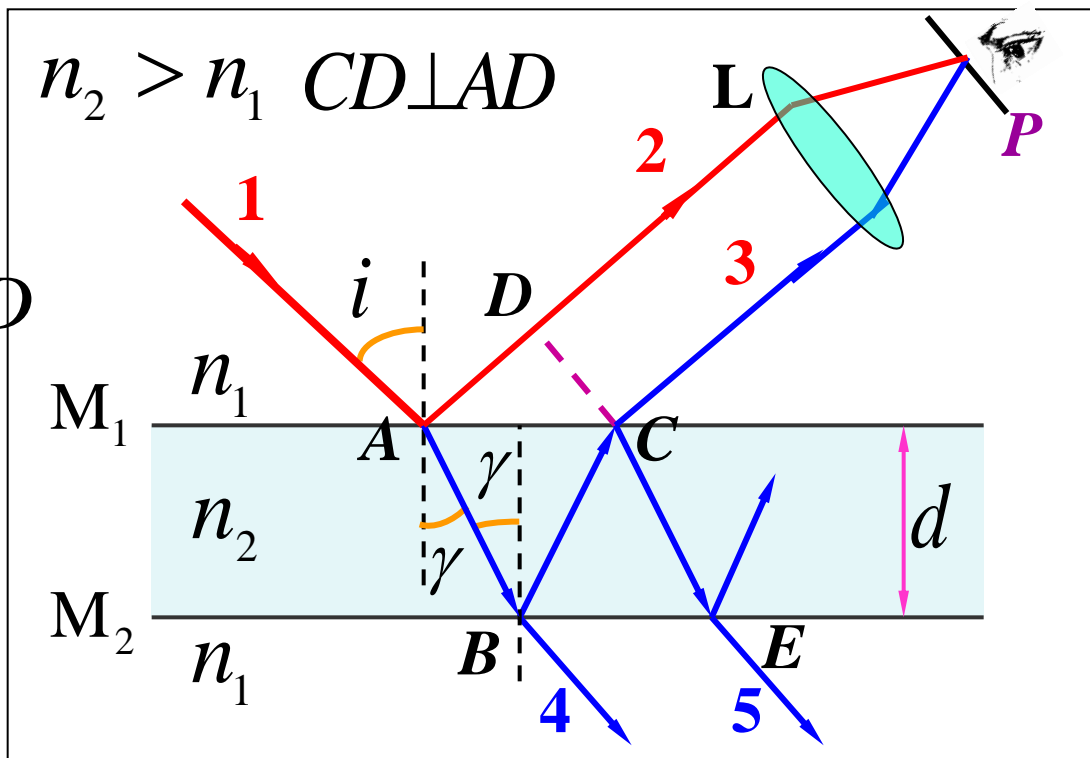
$$\delta_{32} = n_2(AB + BC) - n_1 AD$$

$$AB = BC = \frac{d}{\cos \gamma}$$

而

$$DC = AC \sin i = 2d \tan \gamma \cdot \sin i$$

根据折射定律  $n_1 \sin i = n_2 \sin \gamma$





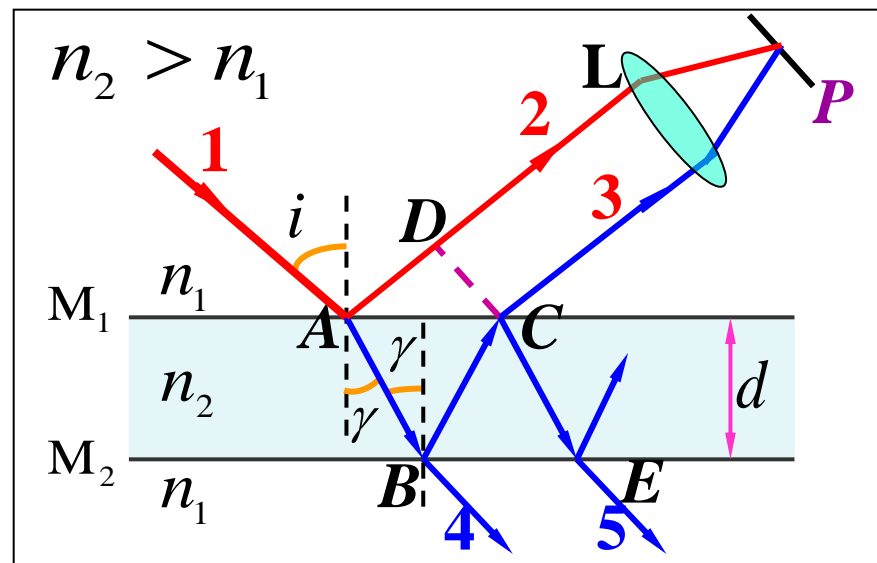
光程差为

$$\delta_{32} = 2n_2 AB - n_1 AD = 2d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} = 2n_2 d \cos \gamma$$

考虑  $n_2 > n_1$  半波损失，光程差为  $\delta_{32} = 2n_2 d \cos \gamma + \frac{\lambda}{2}$

➤ 反射光的光程差  $\Delta_r = 2d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}$

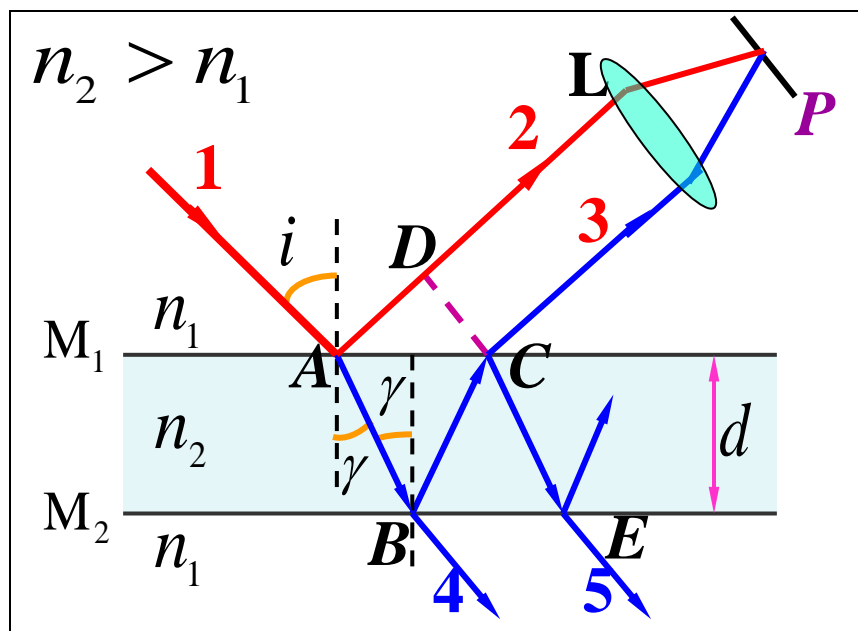
$$\Delta_r = \begin{cases} k\lambda & \text{加强} \\ (k=1, 2, \dots) \\ (2k+1)\frac{\lambda}{2} & \text{减弱} \\ (k=0, 1, 2, \dots) \end{cases}$$



$$\Delta_r = 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \lambda/2$$

根据具体情况而定

► 透射光的光程差  $\Delta_t = 2d\sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i}$

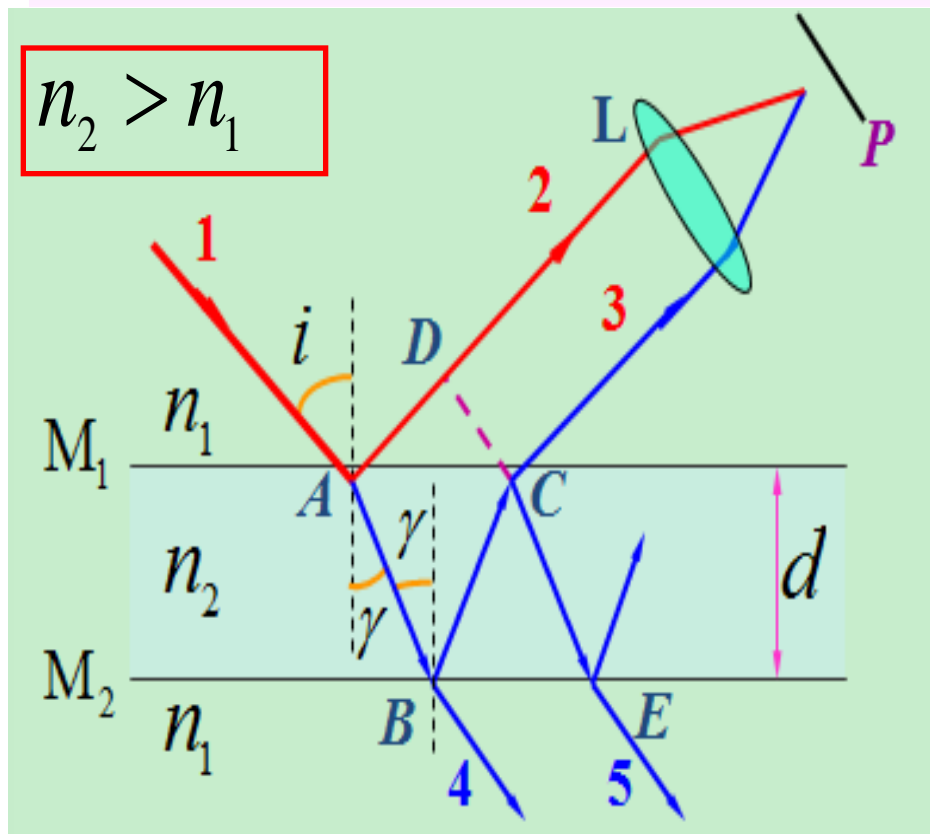


**注意：**透射光和反射光干涉具有互补性，符合能量守恒定律。



# 知识总结：薄膜干涉的光程结果分析

注:透射光和反射光干涉具有互补性，符合能量守恒定律.



两束反射光(光线2、3)的光程差

$$\Delta_r = 2d \sqrt{n_2^2 - n_1^2 \sin^2 i} + \frac{\lambda}{2}$$

两束透射光(光线4、5)的光程差

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



## 知识新解：反射光的干涉结果分析

$$\Delta_r = \begin{cases} k\lambda & (k = 1, 2, \cdots) \text{ 加强(明纹)} \\ (2k + 1)\frac{\lambda}{2} & (k = 0, 1, 2, \cdots) \text{ 减弱(暗纹)} \end{cases}$$

## 知识新解：透射光的干涉结果分析

$$\Delta_t = \begin{cases} k\lambda & (k = 1, 2, \cdots) \text{ 加强(明纹)} \\ (2k + 1)\frac{\lambda}{2} & (k = 0, 1, 2, \cdots) \text{ 减弱(暗纹)} \end{cases}$$





**例** 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?





已知  $n_1=1.20$   $n_2=1.30$   $d=460\text{ nm}$

解 (1)  $\Delta_r = 2dn_1 = k\lambda$

$$\lambda = \frac{2n_1d}{k}, \quad k = 1, 2, \dots$$

$$k = 1, \quad \lambda = 2n_1d = 1104\text{ nm}$$

$$k = 2, \quad \lambda = n_1d = 552\text{ nm}$$

绿色

$$k = 3, \quad \lambda = \frac{2}{3}n_1d = 368\text{ nm}$$





(2) 透射光的光程差  $\Delta_t = 2dn_1 + \lambda/2$

$$k = 1, \quad \lambda = \frac{2n_1d}{1-1/2} = 2208 \text{ nm}$$

紫红色

$$k = 2, \quad \lambda = \frac{2n_1d}{2-1/2} = 736 \text{ nm} \quad \text{红光}$$

$$k = 3, \quad \lambda = \frac{2n_1d}{3-1/2} = 441.6 \text{ nm} \quad \text{紫光}$$

$$k = 4, \quad \lambda = \frac{2n_1d}{4-1/2} = 315.4 \text{ nm}$$



# 问题描述：垂直入射时的光程差

当光线垂直入射时  $i = 0^\circ$

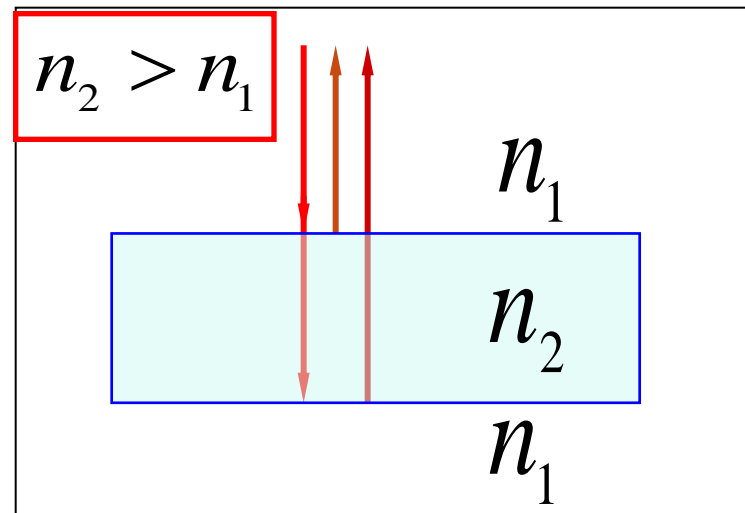
反射光的光程差

$$\Delta_r = 2dn_2 + \frac{\lambda}{2}$$

透射光的光程差

$$\Delta_t = 2dn_2$$

注意：是否有半波损失与折射率关系紧密



薄膜干涉的应用——增透膜：减少或消除透镜、棱镜、平面镜等光学表面的反射光，从而增加这些元件的透光量。



军事望远镜镜头上的增透膜。

眼镜镜片上所镀的增透膜。

单反相机镜头所贴的增透膜。



**增反膜：主要功能增加反射，减少投射。由于光路补偿原理，从里面可以看到外面。**



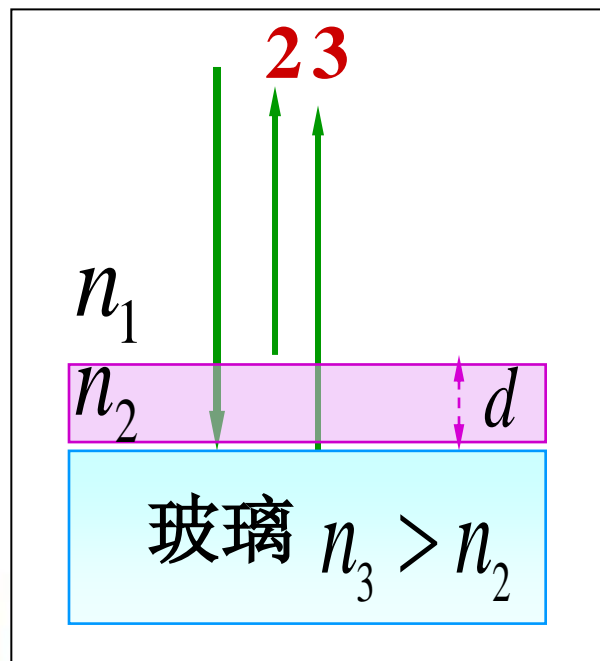
汽车车窗玻璃上贴的增反膜。

高楼大厦的外墙玻璃上贴的增反膜。

手机外壳所贴的防蓝光增反膜。



例：眼镜的镜片为了增加透射率，通常会镀上一层氟化镁，一束光线从空气垂直射入人的眼睛时，试求所镀的氟化镁膜的最小厚度．已知空气  $n_1=1.00$ ，氟化镁  $n_2=1.38$ ， $\lambda=550\text{ nm}$ (绿光)



$$\Delta_t = 2n_2d + \frac{\lambda}{2} = \lambda \quad (\text{增强})$$

$$d = d_{\min} = \frac{\lambda}{4n_2} = 99.6\text{ nm}$$

氟化镁为增透膜

思考题：这么薄的膜是如何镀上去的呢？

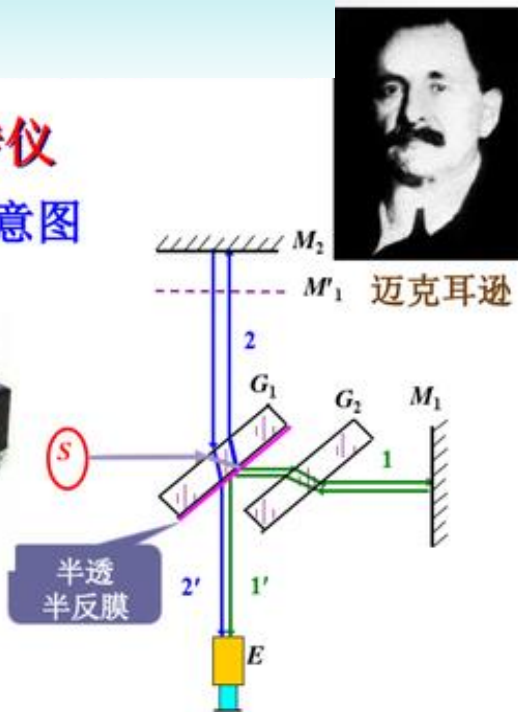


## 光的薄膜干涉—光的本质—未完待续

.....

### 1. 迈克耳孙干涉仪

#### 1.1 构造与光路示意图



1、劈尖干涉用来检测工件的平整度，也用来测量光线的波长。

2、牛顿环——让牛顿都无法解释的光现象。

3、迈克尔逊干涉仪——狭义相对论的产生



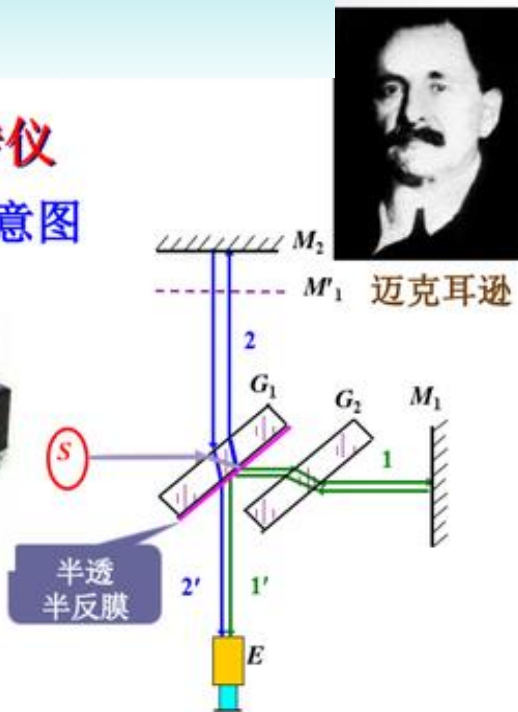


## 光的薄膜干涉——光的本质——未完待续

.....

### 1. 迈克耳孙干涉仪

#### 1.1 构造与光路示意图



1、劈尖干涉用来检测工件的平整度，也用来测量光线的波长。

2、牛顿环——让牛顿都无法解释的光现象。

3、迈克尔逊干涉仪——狭义相对论的产生

