

➤ 上次课内容回顾

§ 1.1 波动的独立性、叠加性和相干性

§ 1.2 单色光波叠加形成的干涉条纹

光程差: $\delta = n_2 r_2 - n_1 r_1$

相位差: $\Delta\varphi = 2\pi\delta / \lambda$

§ 1.4 分波面双光束干涉

杨氏双缝干涉



§ 1.5 干涉条纹的可见度

$$\text{可见度 } V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

§ 1.7 等倾干涉

薄膜干涉



§ 1.8 等厚干涉

劈尖干涉



本次课内容:

§ 1.8 迈克尔逊干涉仪

§ 1.9 法布里-珀罗干涉仪 多光束干涉

§ 1-10 干涉现象的应用 牛顿环

§ 1.9 迈克尔逊干涉仪

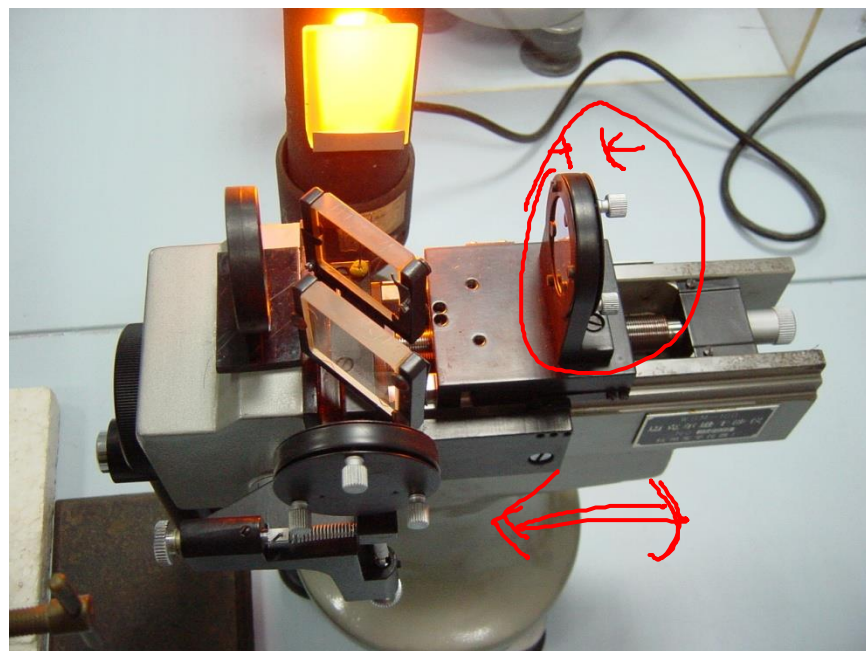
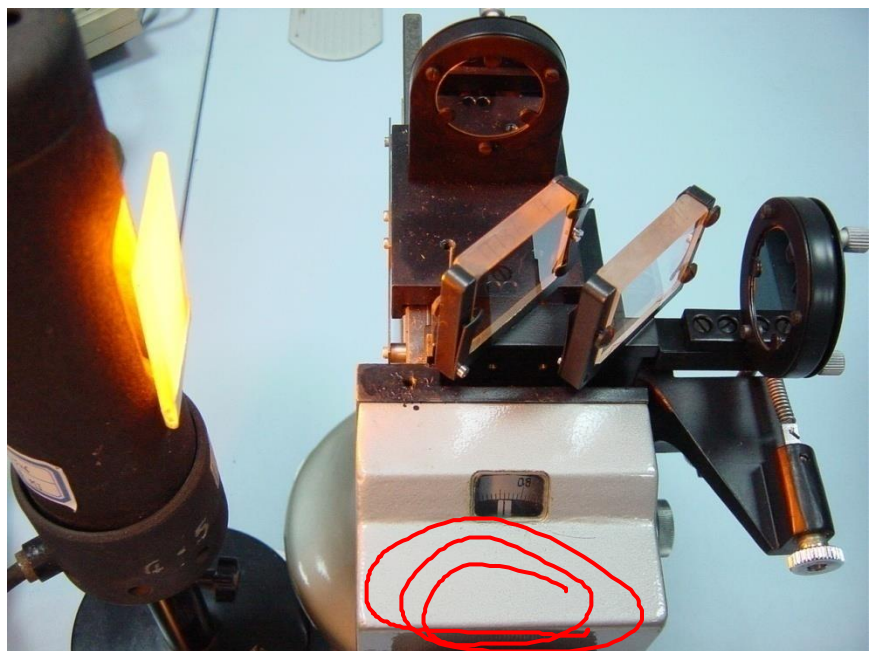


迈克耳逊
美籍德国人

创造精密光学仪器，进行光谱学和度量学的研究，并精确测出光速，**获1907年诺贝尔物理奖。**

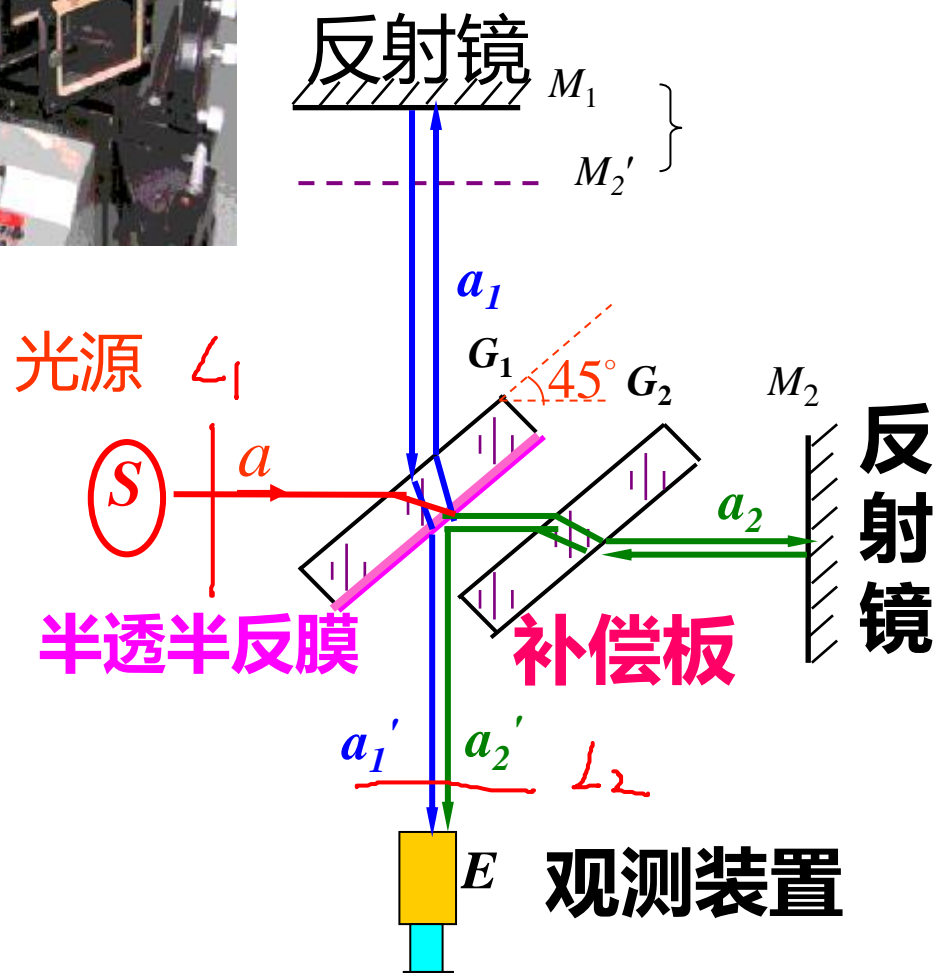
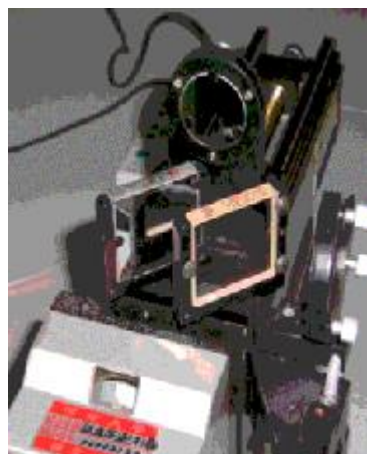
我总认为迈克耳逊是科学中的艺术家，他的最大乐趣似乎来自实验本身的优美和所使用方法的精湛，他从来不认为自己在科学上是个严格的“专家”，事实上的确不是，但始终是个艺术家。
——爱因斯坦

迈克耳逊干涉仪是根据分振幅薄膜干涉原理制成的精密仪器，它不仅用于观察和精确测定等倾等厚干涉，而且在光的电磁本性研究（否定‘以太’的存在）和相对论的建立中起了决定性的作用。



一、装置：

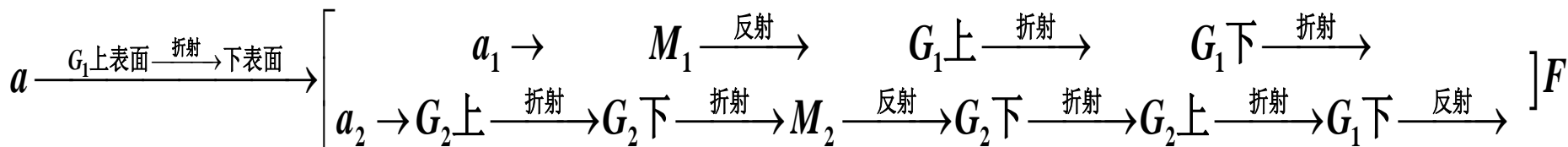
如右图示： M_1 、 M_2 是两块垂直的平面镜，分别称为动镜、定镜； G_1 和 G_2 是两块材料相同、厚薄均匀、几何形状完全相同且平行放置的光学平板，与水平方向成 45° 角放置。 G_1 底面镀有半透半反的薄银层； G_1 称为分光板， G_2 称为补偿板。 M_2' 为 M_2 对 G_1 镀银层所成的虚象。 S 为扩展光源， F 为接收屏， L_1 、 L_2 为凸透镜。



什么情况下，不需要补偿板？什么情况下，需要补偿板？

二、原理：

1、光路：

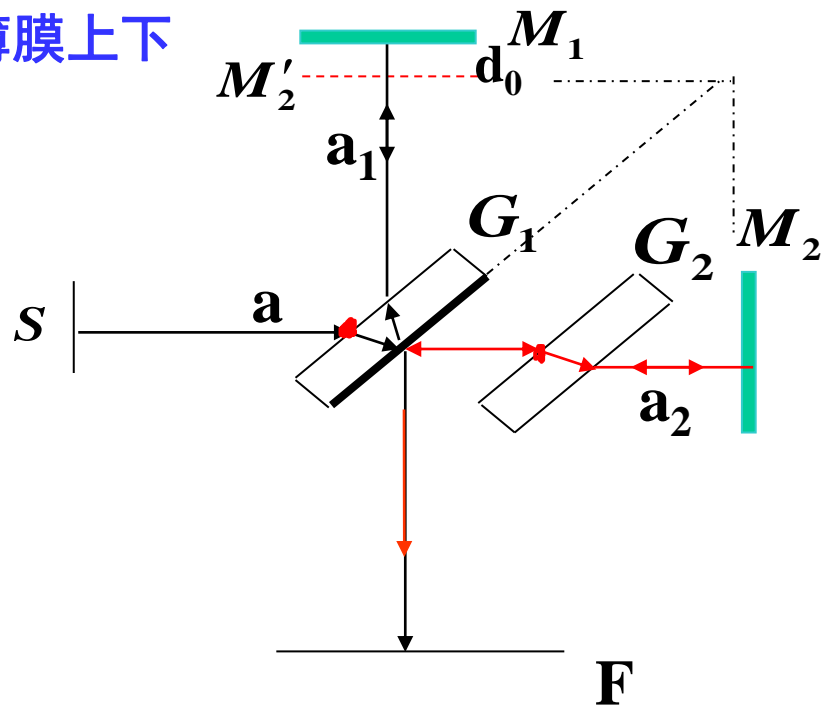


相当于由 M_1 和 M_2' 所形成的厚为 d_0 的空气薄膜上下两个表面的两束反射光的干涉。

2、光程差：

- ① 由于 G_2 的存在，两臂均穿过玻璃板三次，补偿了 a_2 光程的不足
- ② 由于是空气薄膜，上、下两表面反射时均存在半波损失，故无额外程差，所以，光程差为：

$$\delta = 2d_0 \cos i \quad \text{其中 } i \text{ 为入射到薄膜上的入射角}$$



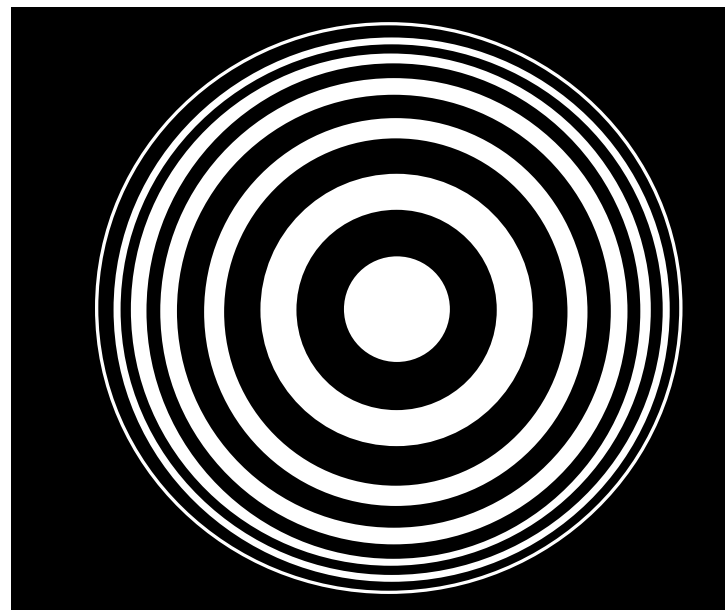
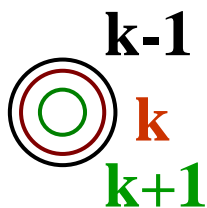
3、干涉公式：

$$2d_0 \cos i = \begin{cases} j\lambda & \text{亮条纹} \\ (2j+1)\frac{\lambda}{2} & \text{暗条纹} \end{cases} \quad j = 0, 1, 2, 3, \dots$$

4、条纹特征：

(-)、当 M_1 、 M_2 严格垂直时，形成的空气薄膜厚度均匀，产生等倾干涉条纹（ $d_0 = \text{const}$ ，同一个 i 形成同一级条纹，且需用扩展光源）；

- ① 明暗相间、内疏外密的同心圆环，
干涉级内高外低；



② 调节 M_1 ,使 d_0 改变时, 整个条纹发生移动。当 d_0 每改变 $\lambda/2$, 在条纹中心处 j 将增加或减少1, 即: 在中心处将产生或消失一个条纹。

设: 当 d_0 改变 Δd_0 时, (光程差变化 $2 \Delta d_0$), 有 N 个条纹在中心处产生或消失, 则:

$$\Delta d_0 = N \frac{\lambda}{2}$$

当 $d_0 \downarrow \Rightarrow$ 条纹半径 $\downarrow \Rightarrow$ 向中心收缩 \Rightarrow 条纹消失

$d_0 \uparrow \Rightarrow$ 条纹半径 $\uparrow \Rightarrow$ 向外扩散 \Rightarrow 中心冒出条纹



Dd_0

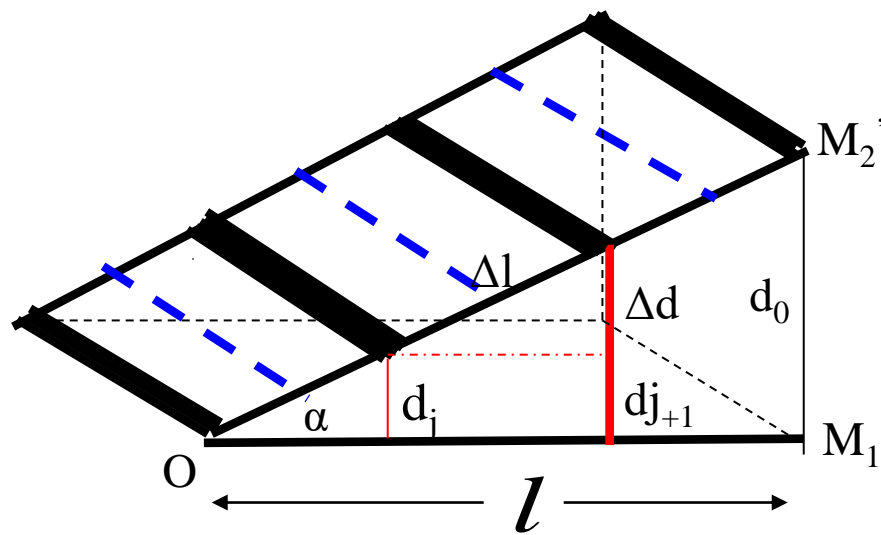


③若用白光光源，除中央条纹为白色外，其余条纹为彩色。

(二)、当M1、M2不垂直时，形成的空气劈尖，产生等厚干涉条纹（ $i=\text{const}$ ，同一个 d_0 形成同一级条纹，且需用点光源）；

① 明暗相间、等间距、平行于棱的直线状条纹，干涉级高高低低；

② 调节M₁,使 d_0 改变（平移）时，整个条纹发生移动。当 d_0 每平移 $\lambda/2$ ，在任一定点处 j 将增加或减少1，即：将有一个条纹移动过该点。



设：当 d_0 平移 Δd_0 时，有N个条纹移动过该点，则： $\Delta d_0 = N \square \frac{\lambda}{2}$

③若仍用扩展光源，则条纹有弯曲。

三、应用：

1、以波长量级确定国际“标准米”标准；

1960年国际计量会议上规定用氪--86在液氮温度下 $2p_{10} \rightarrow 5d_5$ 的橙色光在真空中的波长 $\lambda = 605.6 \text{ nm}$ 的1,650,763.73 倍作为长度的标准单位。

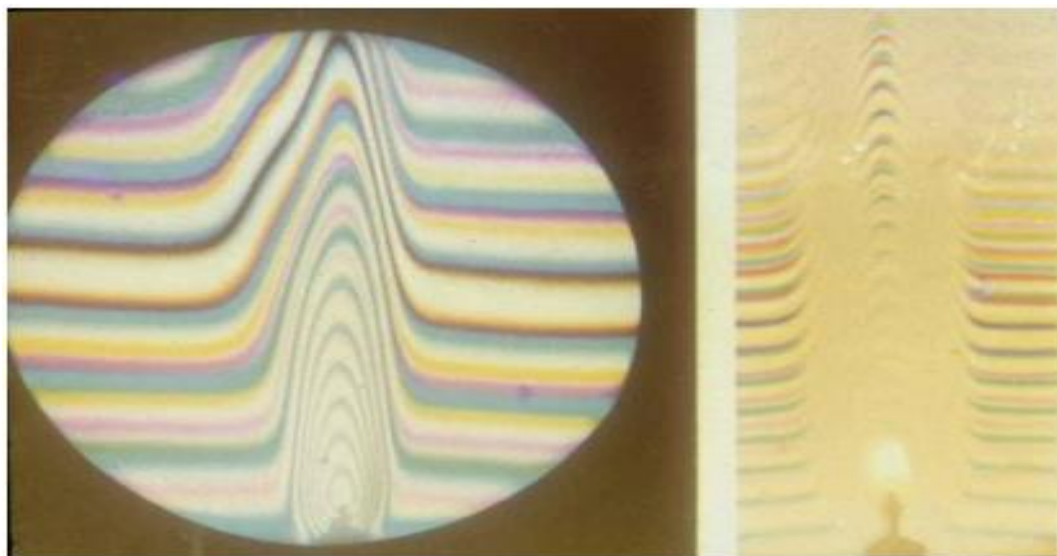
$$1 \text{ 标准米} = 1,650,763.73 \lambda$$

使精度提高了两个数量级，由 $10^{-7} \rightarrow 10^{-9}$ 米。

2、精确地测定光谱线的波长及其精细结构；

3、测定介质（气、液、固体）折射率；

4、测定“以太风”速度，从而否定“以太”的存在。



用迈克耳孙干涉仪测气流

§ 1.10 法布里-珀罗干涉仪 多光束干涉

对前述双光束干涉，其光强分布（设 $A_1=A_2$ ）满足：
$$\bar{I} = 4A_1^2 \cos^2 \frac{\Delta\varphi}{2}$$

其光强分布如图示（黑线）：

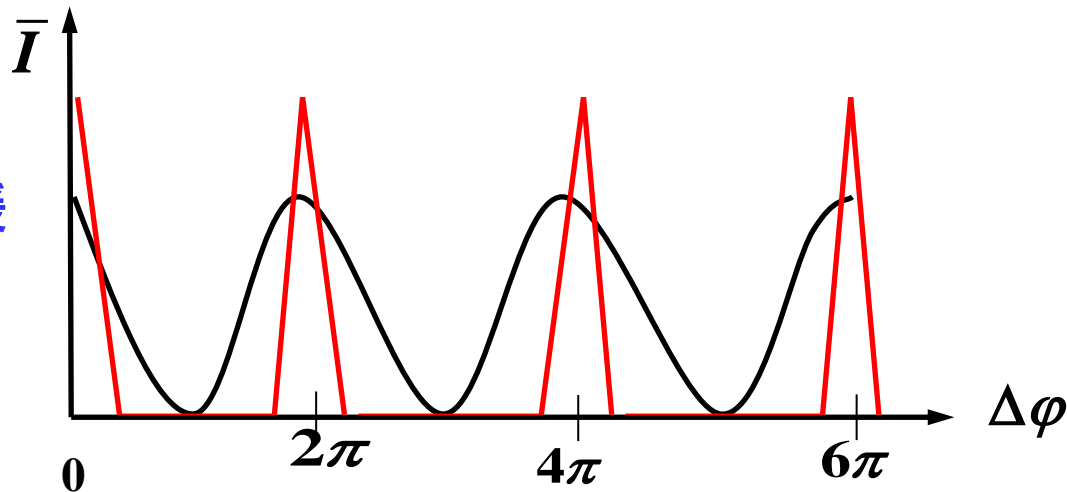
①各条纹光强介于 $4A_1^2$ （最大值）和0（最小值）之间，并在其间随 $\Delta\varphi$ 的连续变化而缓慢变化。

②亮、暗条纹均有一定宽度，所以在实际观察和测量中不能准确测定最大、最小值的位置；

③若 $A_1 \neq A_2$ ，最小值不为0，条纹可见度相当低。

实际测量中，要求亮条纹十分狭窄、明亮且被较宽阔而黑暗的区域（暗条纹）隔开。即：仅在某些特定的 $\Delta\varphi$ 处才出现锐利的最大值，而其它各处都为最小值。如上图红线示。

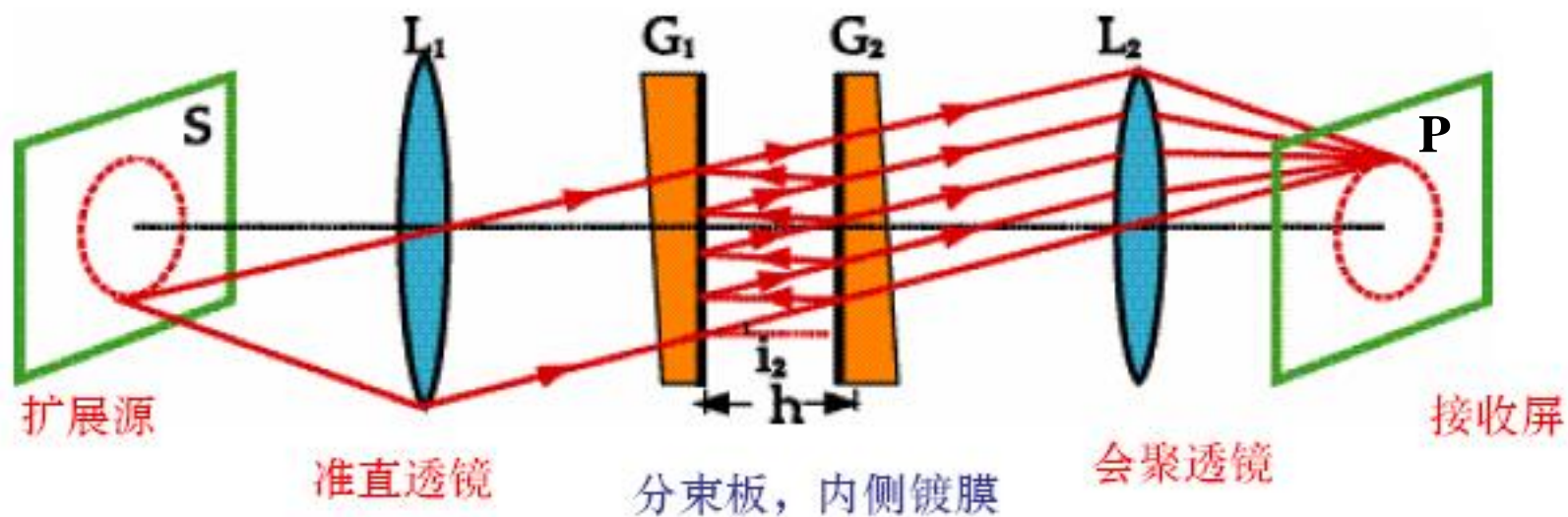
法布里-珀罗干涉仪所产生的多光束干涉条纹可达此要求。



一、实验装置

如图示：G1、G2为两块平行放置的透明介质板，两内表面镀有反射系数 ρ 较高的薄膜且与理想平面的偏差在 $(1/20 \sim 1/50)\lambda$ 之间，而两外表面是不平行的，有一微小夹角，用以消除外表面反射光的干涉；S、P为分别处于透镜 L_1 、 L_2 焦平面上的面光源和接收光屏。

若G1、G2间用热胀系数很小的透明介质（如石英）固定，使其间距不能改变，则该装置称为法布里—珀罗标准具；若G1、G2间的间距可以改变，则称为法布里—珀罗干涉仪。



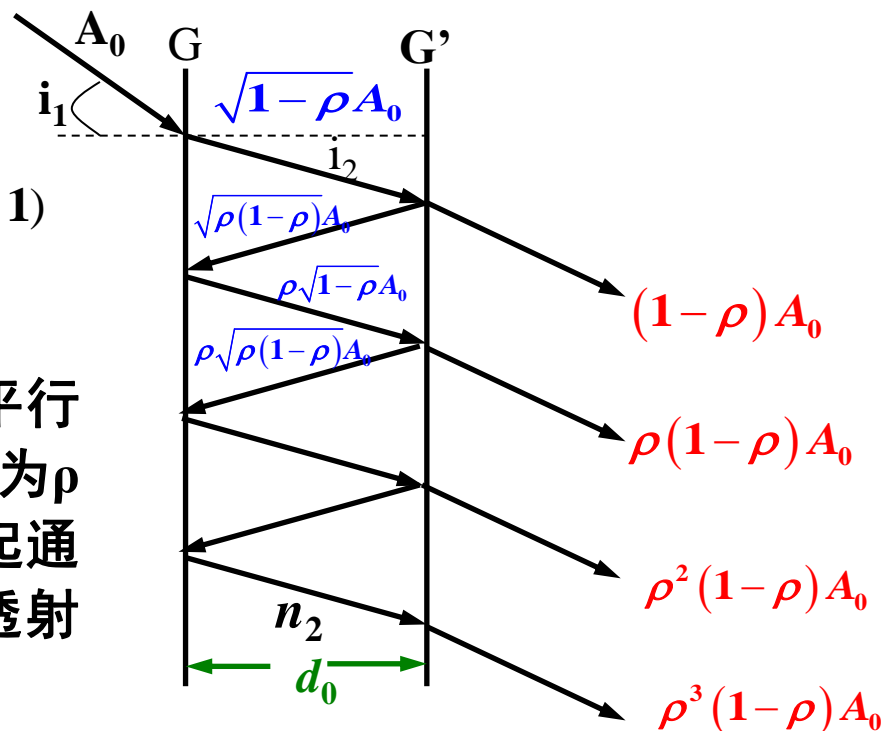
二、实验原理

原理图如右图示：

设镀膜面反射系数为 $\rho = \left(\frac{A'}{A_0} \right)^2$, ($\rho \leq 1$)

A_0, A' 分别为入射和反射光的振幅

则：从G'后表面透射出的各光束是平行光束，且其振幅（如图示）形成公比为 ρ 的等比数列，依次减小。当它们一起通过L₂后，将在光屏P上形成**多光束透射光的等倾干涉条纹**。



◆ 多束透射光的振幅

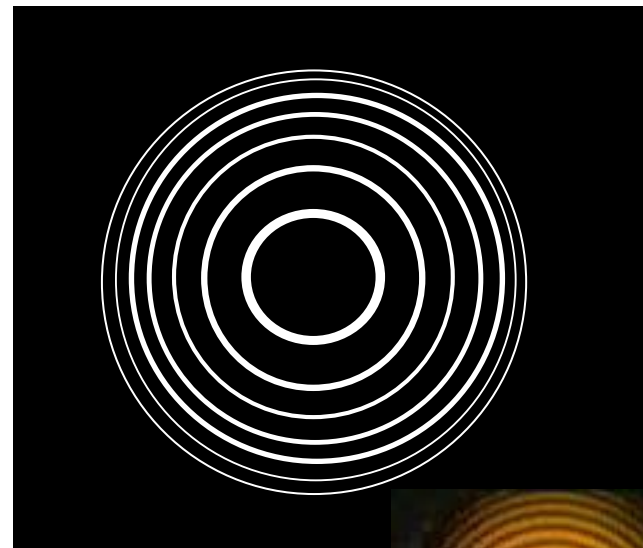
透射光	A_1	A_2	A_3
振 幅	$(1-\rho)A_0$	$\rho(1-\rho)A_0$	$\rho^2(1-\rho)A_0$
相 位	0	φ	2φ

◆ 相邻透射光束的位相差

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 d_0 \cos i_2$$

三、干涉条纹

- (1) 是**等倾干涉条纹**——明暗相间同心圆环，条纹间距、干涉级分布与迈克尔逊干涉条纹相同，但亮纹强度增大、宽度变窄。



- (2) 光强分布

多束透射光叠加的结果： $A^2 = \frac{A_0^2}{\left[1 + \frac{4\rho}{(1-\rho)^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right]}$

(见P62附录1.5)

令 $F = \frac{4\rho}{(1-\rho)^2}$ 为条纹精细度，用来描述条纹细锐程度

则： $\frac{1}{\left(1 + F \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right)}$ 称为爱里函数

光强分布 $A^2 = \frac{A_0^2}{\left(1 + F \sin^2 \frac{\varphi}{2} \right)}$

➤讨论:

① 对一定的镀膜, ρ 一定, A^2 随 j 而变化;

$$\varphi = \begin{cases} 2j\pi & \text{亮条纹 振幅最大 } A_0 \\ (2j+1)\pi & \text{暗条纹 振幅最小 } \left(\frac{1-\rho}{1+\rho}\right)A_0 \end{cases}$$

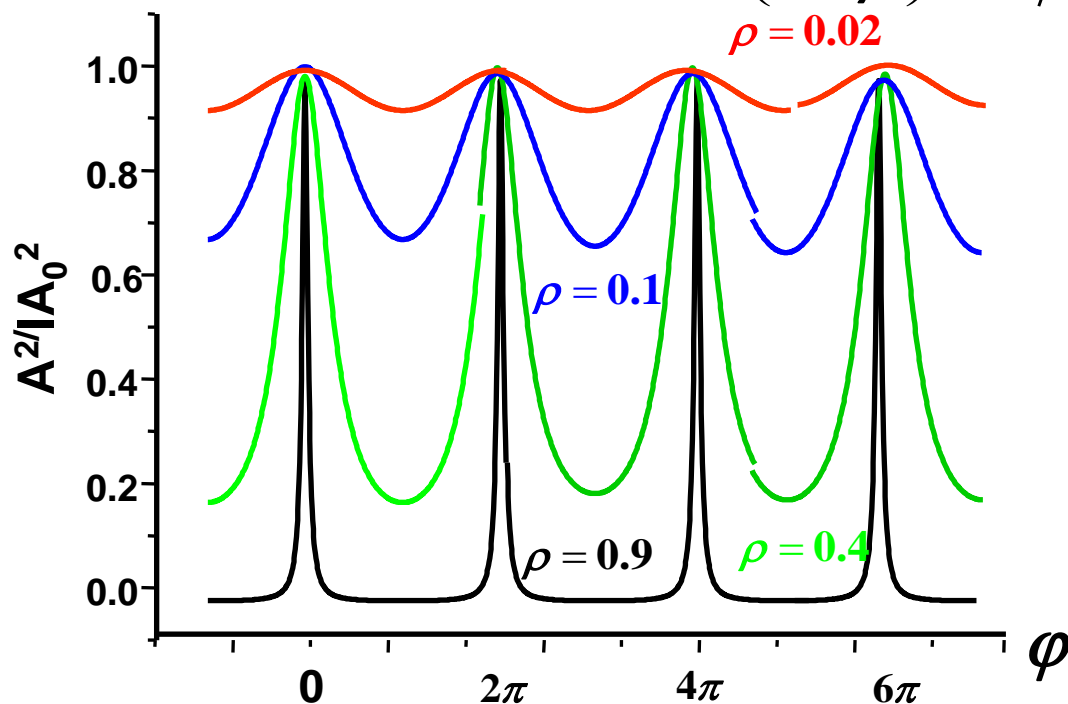
$j = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$

$$A^2 = \frac{A_0^2}{\left[1 + \frac{4\rho}{(1-\rho)^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}\right]}$$

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 d_0 \cos i_2$$

② 暗、亮条纹强度比

$$\left(\frac{1-\rho}{1+\rho}\right)^2 A_0^2 / A_0^2 = \left(\frac{1-\rho}{1+\rho}\right)^2$$



✓ ρ 越大, 明暗条纹强度比越高, 可见度越高; 反之, 可见度越低。

③ $\rho \rightarrow 0$ 时, 无论 φ 如何变化, $A = \text{const}$, 最大值与最小值相等, 亮、暗条纹无法区分, 可见度为0;

$$A^2 = \frac{A_0^2}{\left[1 + \frac{4\rho}{(1-\rho)^2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}\right]}$$

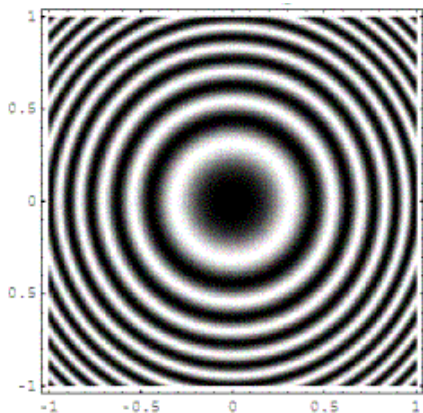
④ $\rho \rightarrow 1$ 时, 只有 $\varphi = 2j\pi$ 时方出现最大值

$$A_0, \varphi \text{ 稍有变化, 则 } \sin^2 \frac{\varphi}{2} \neq 0 \text{ 而 } F = \frac{4\rho}{(1-\rho)^2} \rightarrow \infty \Rightarrow A \approx 0$$

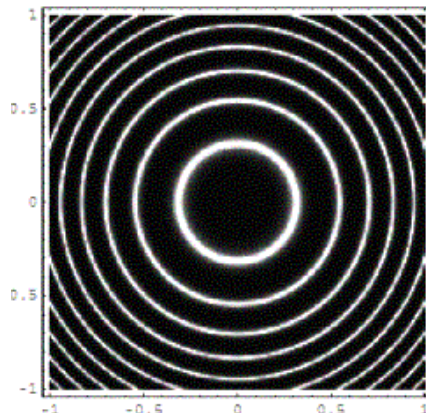
此时, 干涉花样为几乎全黑的背景上一组很细的亮条纹组成; 随着 ρ 的增大, 暗条纹强度减小, 亮条纹强度增加, 宽度变窄, 锐度增加。

多光束等倾干涉透射条纹

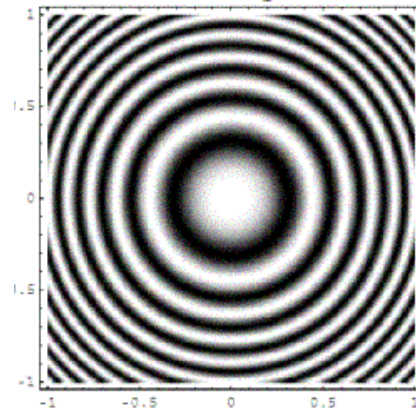
多光束等倾干涉反射条纹



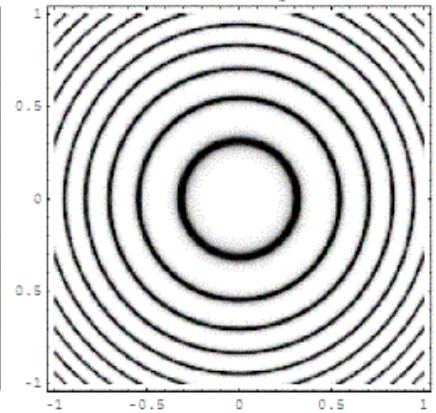
$\rho = 0.04$



$\rho = 0.8$



$\rho = 0.04$



$\rho = 0.8$

条纹互补

- ⑤ 若使用复色光源，则 j 还将随 λ 而变，干涉条纹将展开成彩色光谱线， ρ 越大，谱线越细锐。

(3) $\rho \rightarrow 1$ 时的定量研究 (见P63附录1.6)

可视为等振幅的多光束干涉。叠加结果：

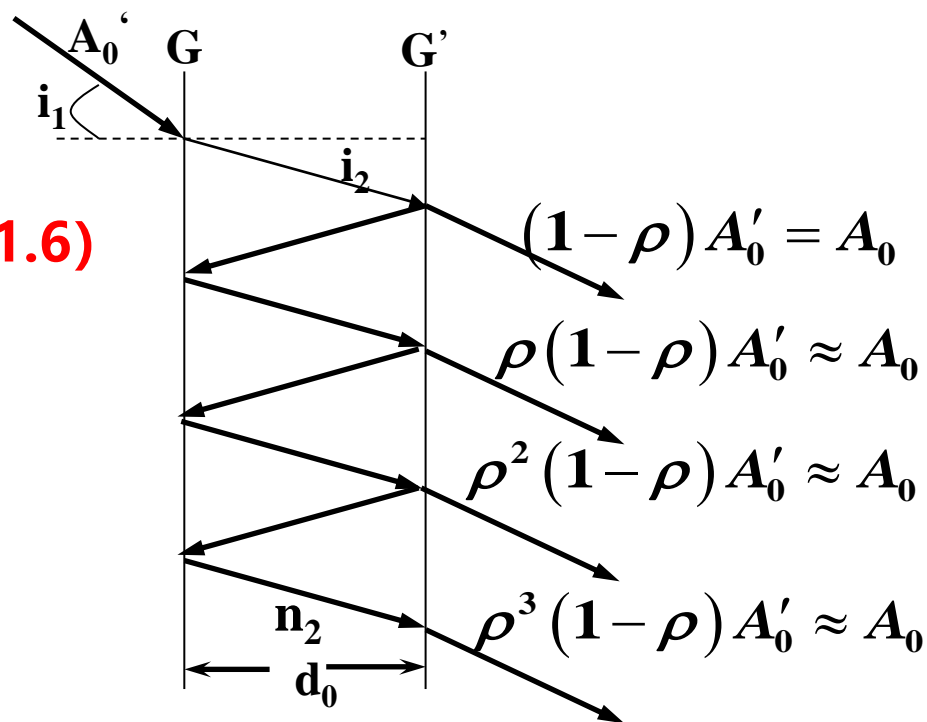
$$A^2 = A_0^2 \cdot \frac{\sin^2\left(\frac{1}{2}N\varphi\right)}{\sin^2\left(\frac{1}{2}\varphi\right)}$$

讨论：

- ① 当 $\varphi = 2j_0 \frac{\pi}{N}$ ($j_0 = 0, \pm N, \pm 2N, \pm 3N, \dots$) 时

即： $\varphi = 2j\pi$ ($j = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$) 达最大值 (亮条纹)

$$\varphi \rightarrow 2j\pi \quad A_{\max}^2 = \lim \left[A_0^2 \frac{\sin^2\left(\frac{1}{2}N\varphi\right)}{\sin^2\left(\frac{1}{2}\varphi\right)} \right] = N^2 A_0^2$$



② 当 $\varphi = 2j' \frac{\pi}{N}$ ($j' = \pm 1, \pm 2, \dots, \pm(N-1), \pm(N+1), \dots$) 时

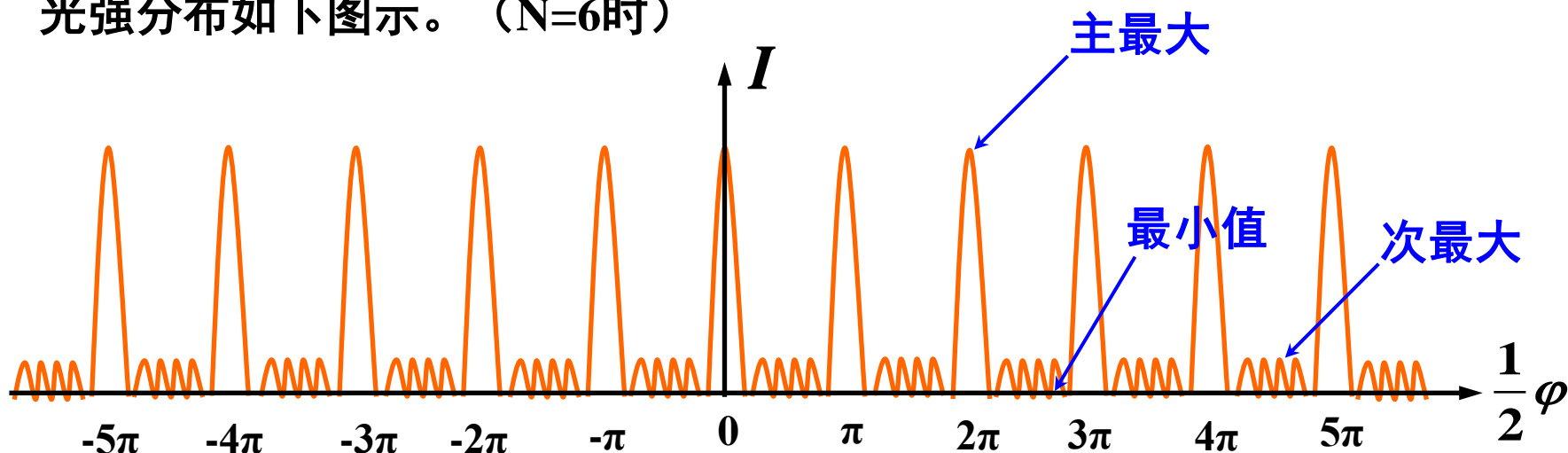
达最小值 (暗条纹) $A_{\min}^2 = 0$

综上所述:

对等振幅多光束干涉, 在 $j = 0, \pm N, \pm 2N, \dots$ 处将出现主最大值;
在相邻主最大间分布着 $(N-1)$ 个最小值, $(N-2)$ 个次最大值。

当 N 很大时, 最强的次最大度强度不到主最大的 $1/23$ 。

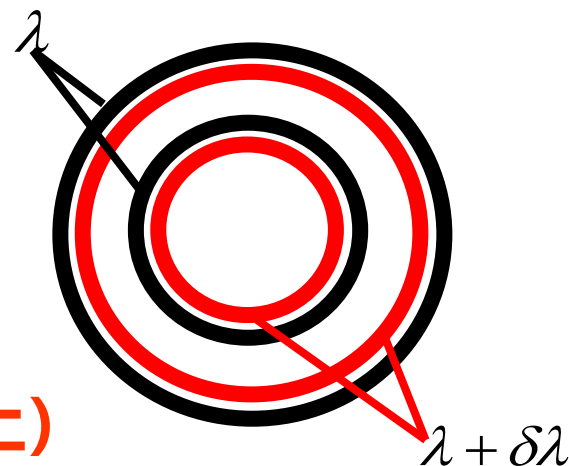
光强分布如下图所示。(N=6时)



四、应用

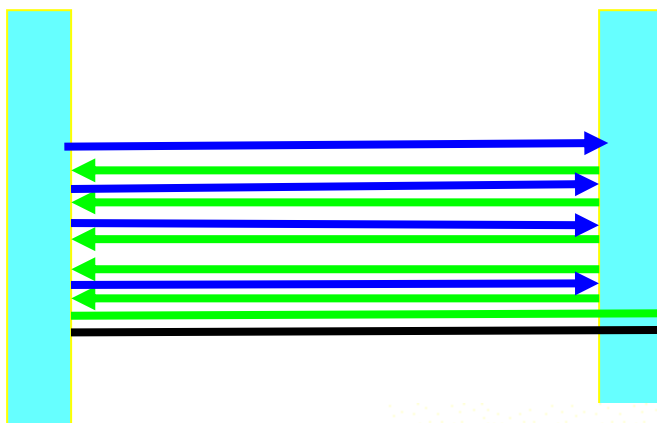
1、研究光谱线的超精细结构

$$\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 d_0 \cos i_2$$



2、激光器谐振腔

$\rho \rightarrow 1$ (98%以上)



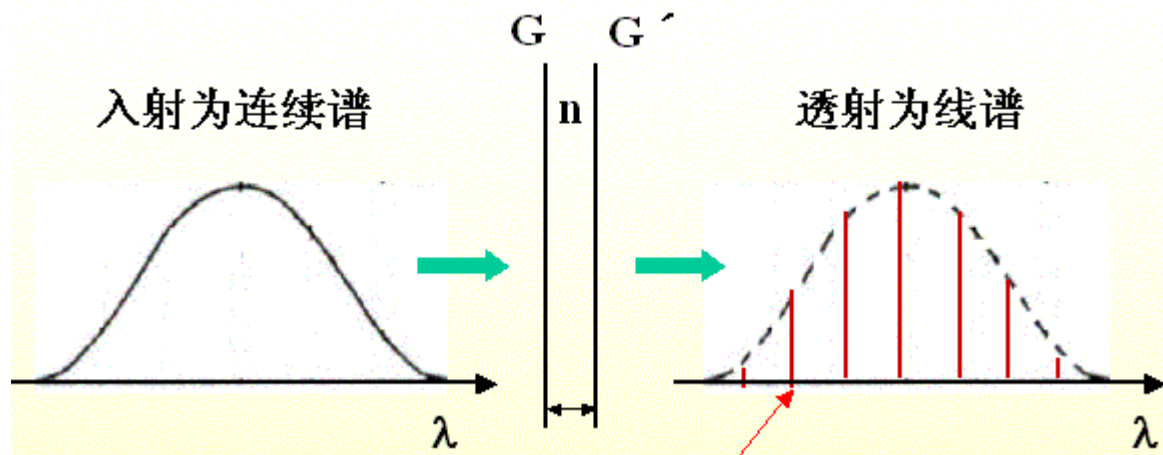
产生激光的三要素：

增益介质，能级反转，**谐振腔**

探测器

3、干涉滤波片

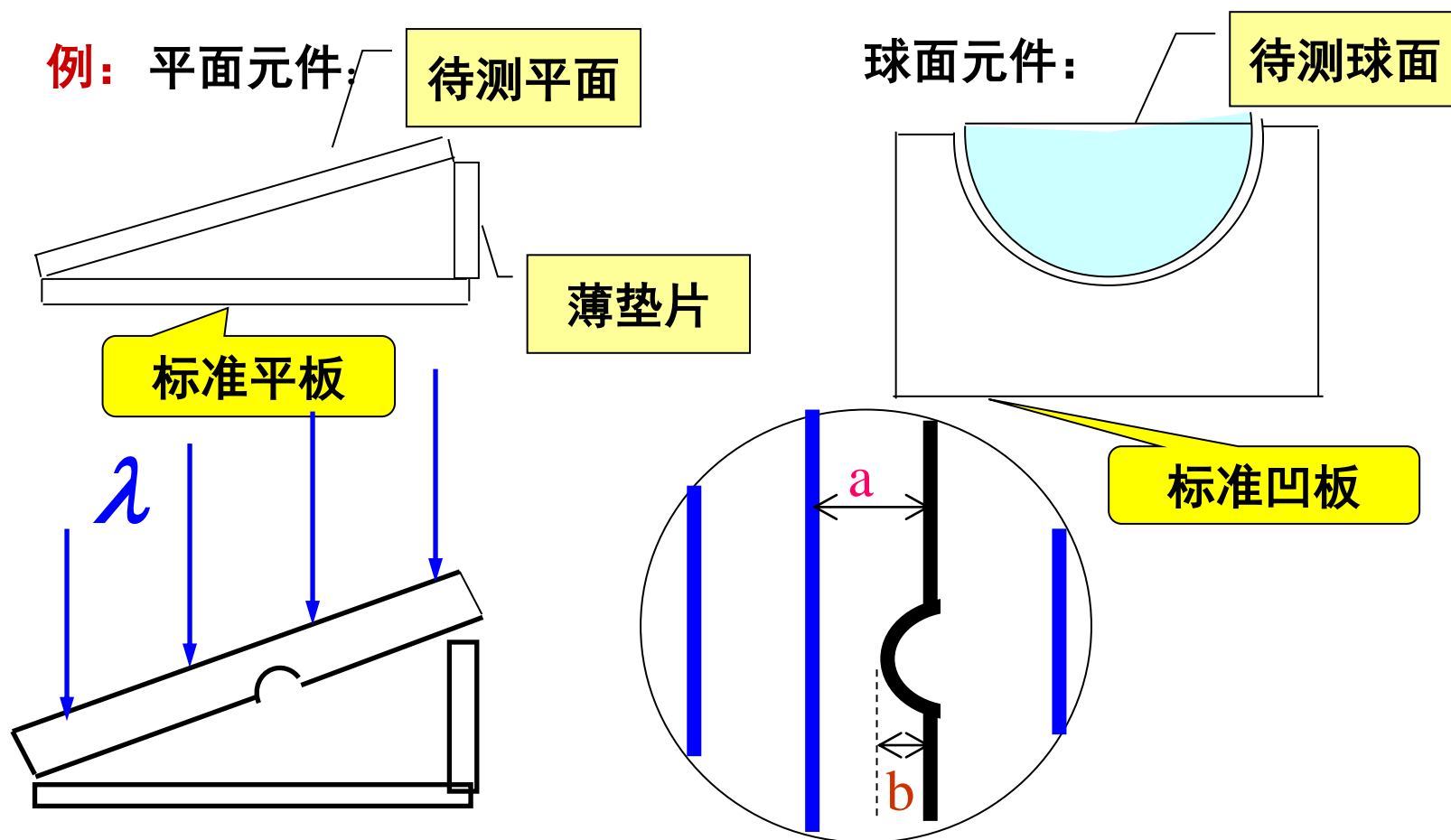
利用多光束干涉原理制成的一种从白光中过滤出波段较窄的单色光的装置



§ 1-11 干涉现象的应用 牛顿环

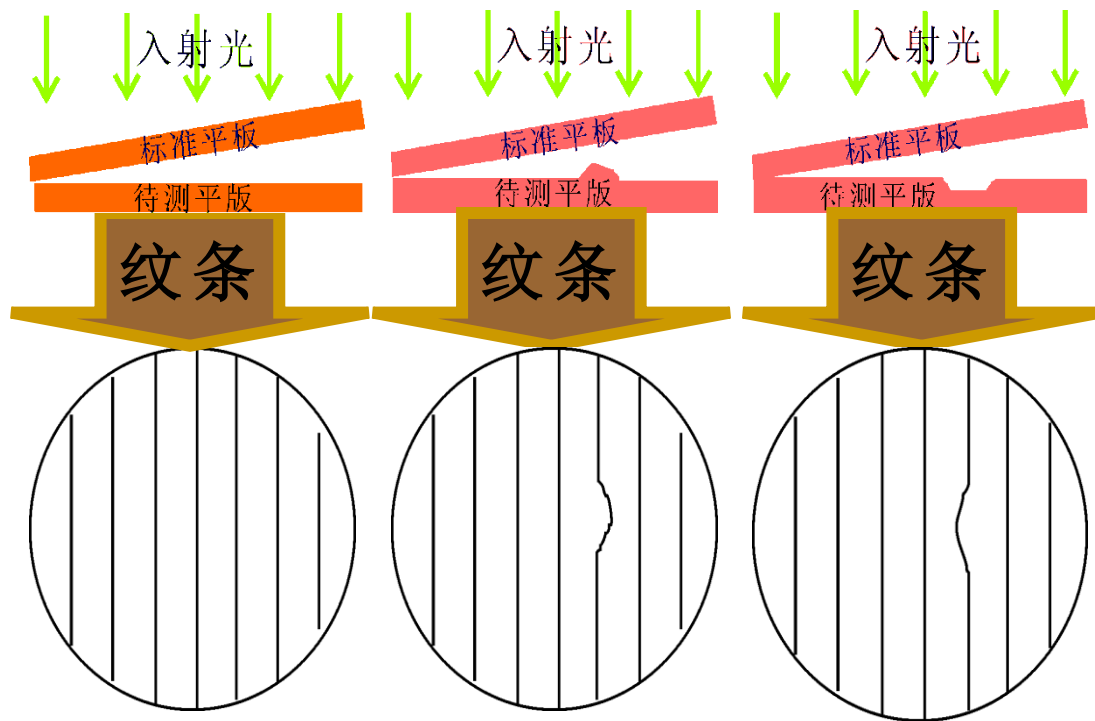
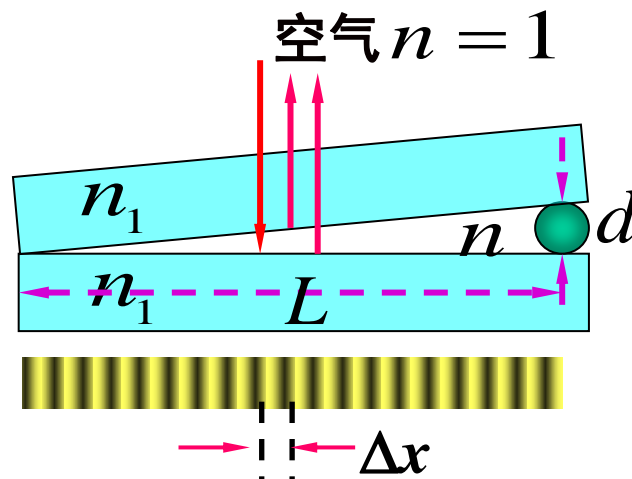
一、检查光学元件表面的质量

将待查光学元件置于几何形状完善、曲率半径相同且已知的标准样板上，观测所形成的干涉条纹，再与标准花样比较，若相同，则待测元件质量合格，否则，根据条纹奇变情况，判断出待测元件缺陷。



二、劈尖干涉的应用

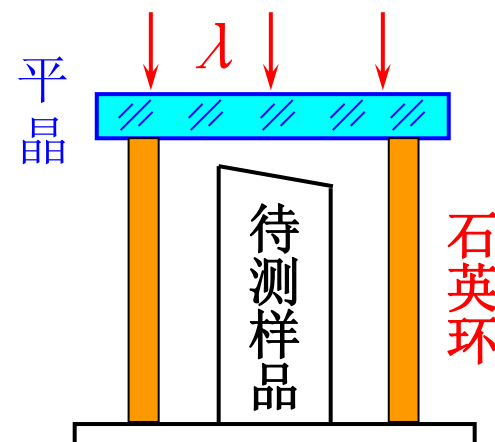
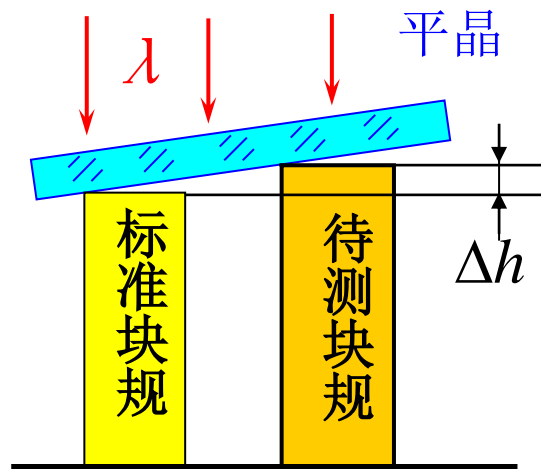
- 1、测量微小的角度
- 2、测细丝的直径
- 3、检查光学元件的表面



4、精确工件规格

5、干涉膨胀仪

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



干涉膨胀仪

三、增透膜与增反膜



1、增透膜：

① 定义：减少元件表面反射能量，增加透射光能量，提高成像质量的镀膜。

②原理：利用薄膜干涉原理，使薄膜上、下两表面的两束反射光形成干涉相消，从而减少反射，增加透射。

注意：应选择合适的透明介质（折射率 $n_0^2 = n_1 n_2$ ）和适当的镀膜厚度。

2、增反膜：

① 定义：减少透射光能量，增加元件表面反射能量，提高成像质量的镀膜。

② 原理：利用薄膜干涉原理，使薄膜上、下两表面的两束反射光形成干涉相长，从而减少透射，增加反射。

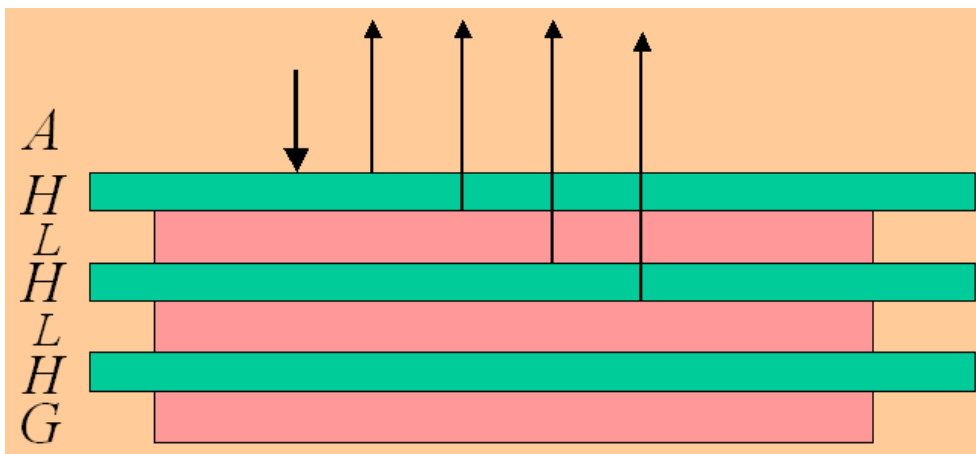
注意：应选择合适的透明介质（折射率）和适当的镀膜厚度。



3、多层高反膜

单层可提高反射率，再增加反射可增加膜层数目。

构造：选择两种折射率相差较大的材料，交替在基板上，即形成空气-H-L-H-…H-G结构。



每层光学厚度为
 $\lambda/4$

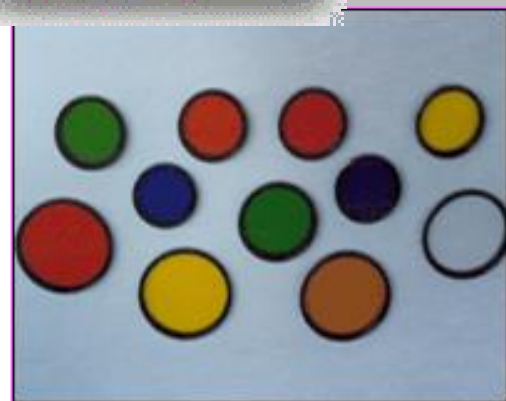
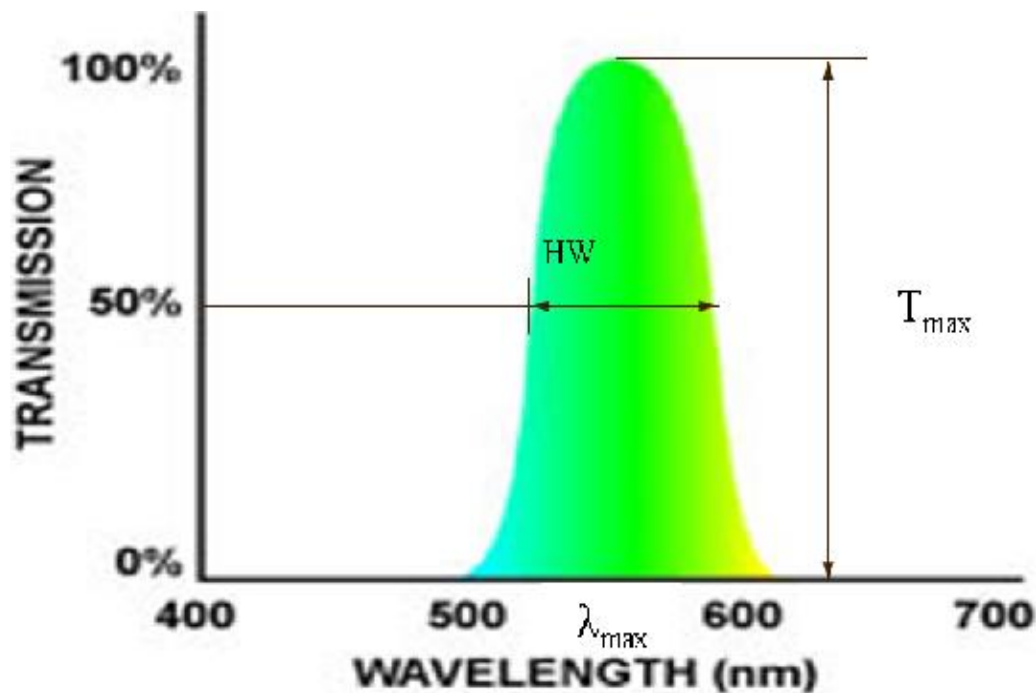
实例：选He-Ne激光的谐振腔就镀有15-19层ZnS-MgF₂的 $\lambda/4$ 膜层，R=99.6%.

应用：

- 激光器谐振腔的反射器
- 滤光片

➤ 滤光片

- **作用：**只是让某一波段范围的光通过，而其余波长的光不能通过。
- **按照结构分类：**
 - 1 吸收滤光片—利用物质对光波的选择性吸收进行滤光。
 - 2 干涉滤光片—利用多束光干涉的原理实现滤光的。



例题：增透、增反膜

➤已知：照相机镜头 $n_3=1.5$ ，其上涂一层 $n_2=1.38$ 的氟化镁增透膜，用波长 $\lambda = 550 \text{ nm}$ 光垂直照射。

问：若反射光相消干涉的条件中取 $j=1$ ，膜的厚度为多少？此增透膜在可见光范围内有没有增反？

解：因为 $n_1 < n_2 < n_3$ ，所以反射光经历两次半波损失。反射光干涉相消的条件是：

$$2n_2d_0 = (2j+1)\lambda / 2$$

代入 j 和 n_2 求得：

$$d_0 = \frac{3\lambda}{4n_2} = \frac{3 \times 550 \times 10^{-9}}{4 \times 1.38} = 2.982 \times 10^{-7} \text{ m}$$

此膜对反射光相干相长的条件： $2n_2d = k\lambda$

$$k = 1 \quad \lambda_1 = 855 \text{ nm}$$

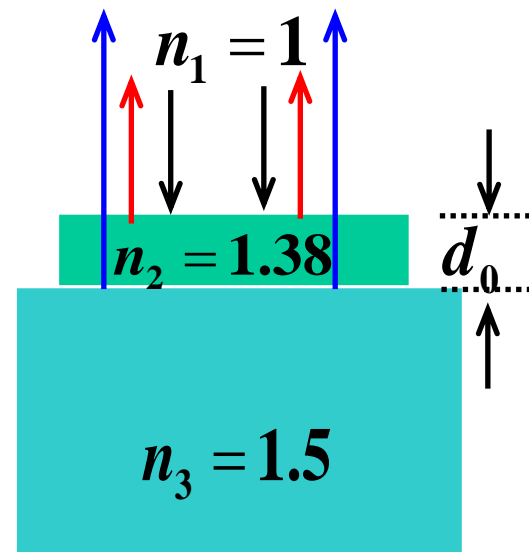
$$k = 2 \quad \lambda_2 = 412.5 \text{ nm}$$

$$k = 3 \quad \lambda_3 = 275 \text{ nm}$$

结果

可见光波长范围 400~700nm

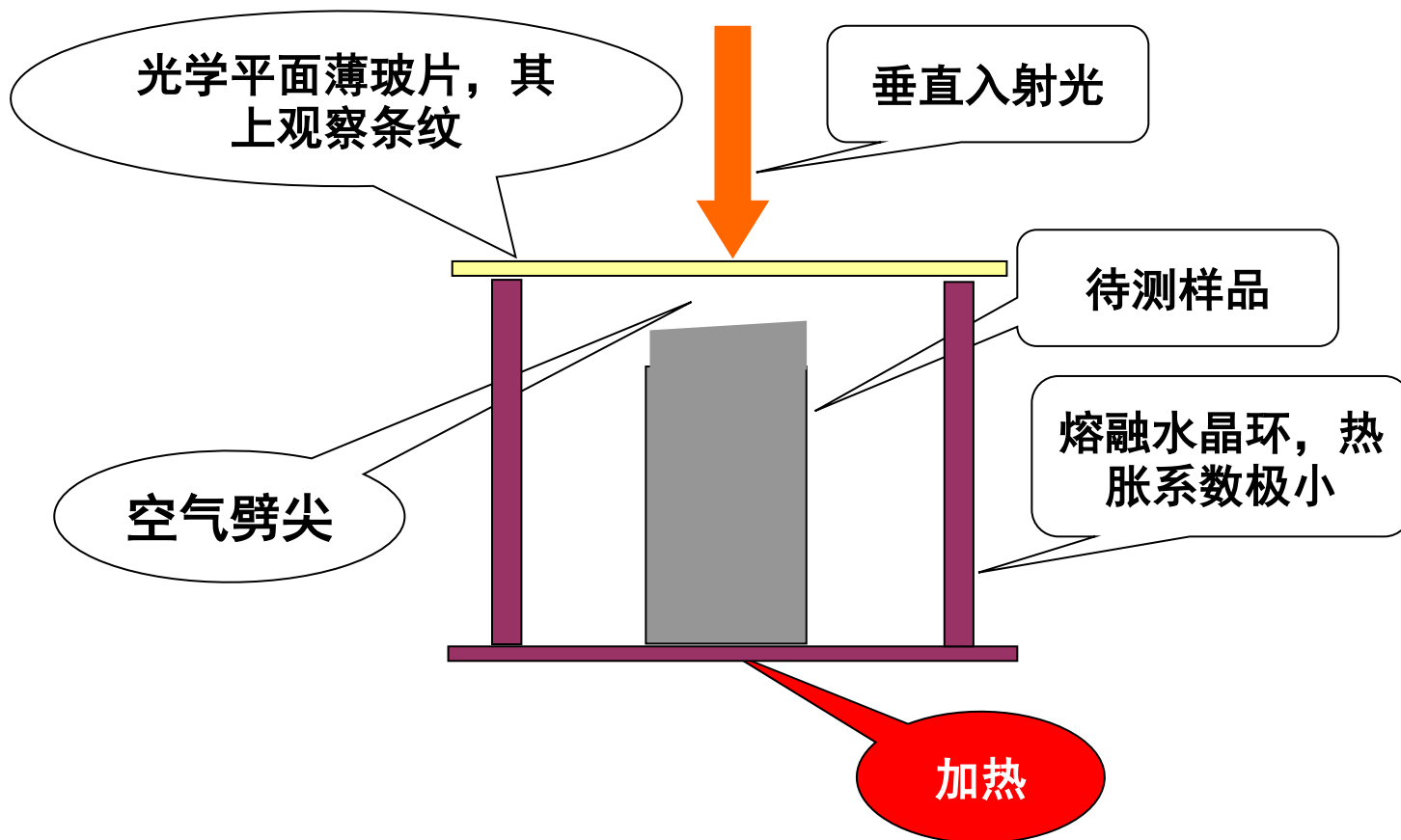
波长412.5nm的可见光有增反。



三、测量长度的微小变化

原理：当薄膜厚度发生微小改变时，干涉条纹将发生移动。设当厚度改变 Δd_0 时，有 N 个条纹移过，则 $\Delta d_0 = N \cdot \frac{\lambda}{2}$

➤ **例：**热胀仪—测热胀系数



四、牛顿环：

曲率半径较大的平凸透镜M置于平板玻璃N之上，其间形成空气劈尖。当垂直M的凸球面所反射的光和平板上表面所反射的光发生干涉，形成等厚干涉条纹。由于厚度相同的点光程差相同强度相同，形成同一级条纹，所以，干涉花样为以O为圆心的一组同心圆环。

其原理图如右下图示：

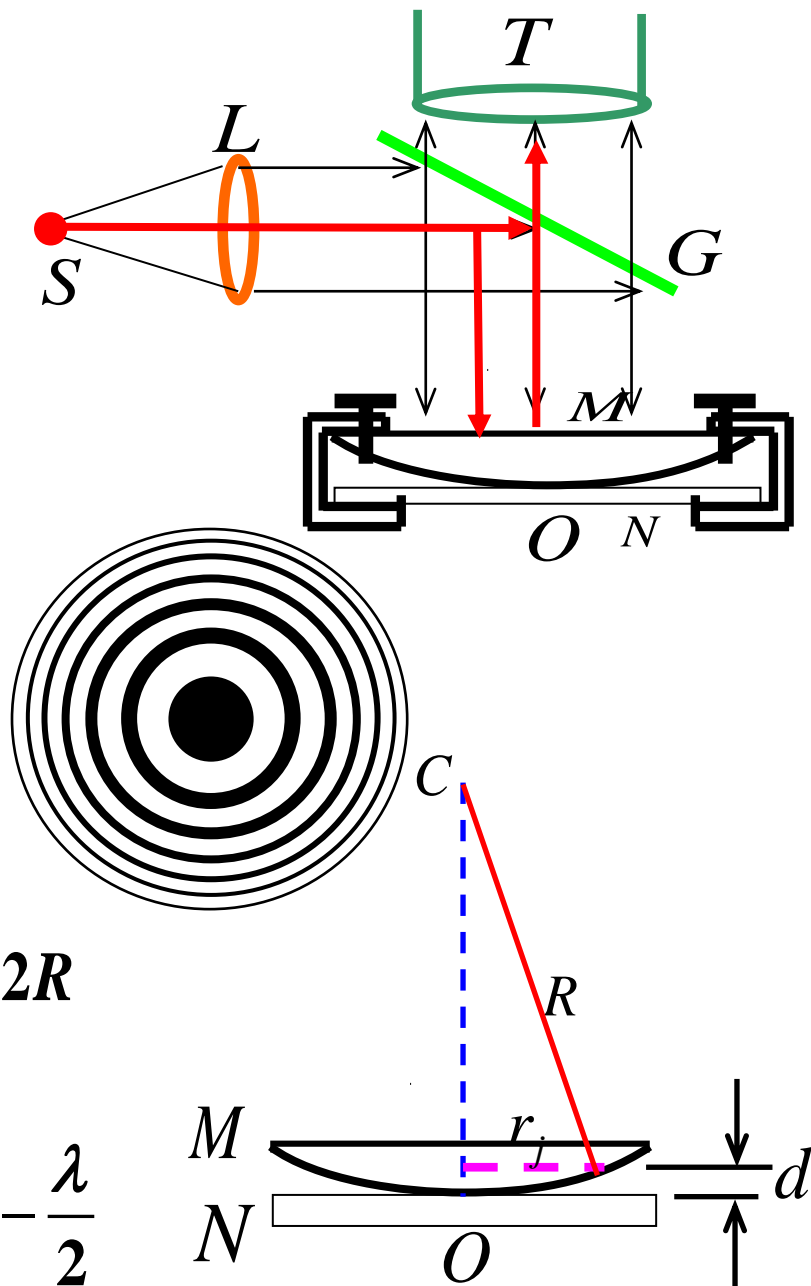
几何关系：

$$r_j^2 = R^2 - (R - d)^2 = 2Rd - d^2$$

∵ $R \gg d$ ∴ 略去二阶小量,得: $d = r_j^2 / 2R$

又：凸球面所反射时有半波损失

$$\text{光程差 } \delta = 2d \cos i_2 - \frac{\lambda}{2} = 2d - \frac{\lambda}{2} = \frac{r_j^2}{R} - \frac{\lambda}{2}$$



代入干涉公式 $\delta = \begin{cases} j\lambda & \text{亮环} \\ (2j+1)\frac{\lambda}{2} & \text{暗环} \end{cases}$

可得：

$$r_j = \begin{cases} \sqrt{(2j+1)\frac{\lambda}{2}R} & j=1,2,3,\dots \quad \text{亮环} \\ \sqrt{j\lambda R} & j=0,1,2,\dots \quad \text{暗环} \end{cases}$$

- 说明：1、O点 $\Rightarrow j=0 \Rightarrow r_j=0$ 由干涉公式可判断O点应为暗点
2、透射光也有干涉，且条纹与反射光条纹明暗互补。

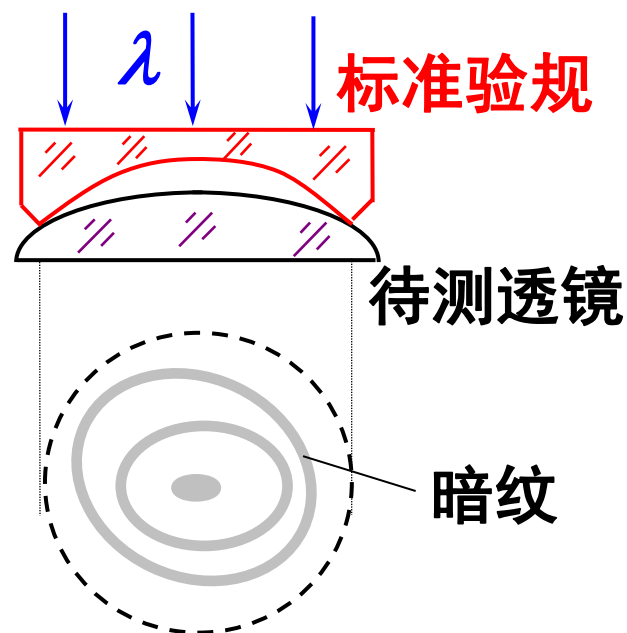
结论

牛顿环中心为暗环，级次最低。离开中心愈远，程差愈大，圆条纹间距愈小，即愈密。其透射光也有干涉，明暗条纹互补。

牛顿环应用

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

- a. 测透镜球面的半径R
- b. 测波长
- c. 测量压力或长度微小变化
- d. 检验透镜球表面质量



光的干涉 小结

一、目的要求：

- 1、**掌握**光的相干条件和获得相干光源的方法；
- 2、**掌握**光程的概念，明确光程差和位相差的关系；
- 3、**掌握**双光束干涉的特点和光强分布规律，**掌握**杨氏双缝干涉、等倾、等厚干涉的规律和应用；
- 4、**理解**半波损失的概念和产生条件；
- 5、**理解**多光束干涉的条纹分布特点。

二、基本概念和规律

- 1、光程和光程差、位相和位相差、干涉花样和干涉级、相干与非相干、半波损失和额外程差、条纹可见度、单色光和复色光；
- 2、双光束干涉规律；（杨氏、等倾、等厚、迈氏、牛顿环）
- 3、多光束干涉规律。

第一章作业：

P66 1-2, 1-3, 1-8, 1-9, 1-11, 1-16, 1-21

本周日前补交上一次课作业

下周上课前交作业！