

## § 2.7 迈克尔逊干涉仪

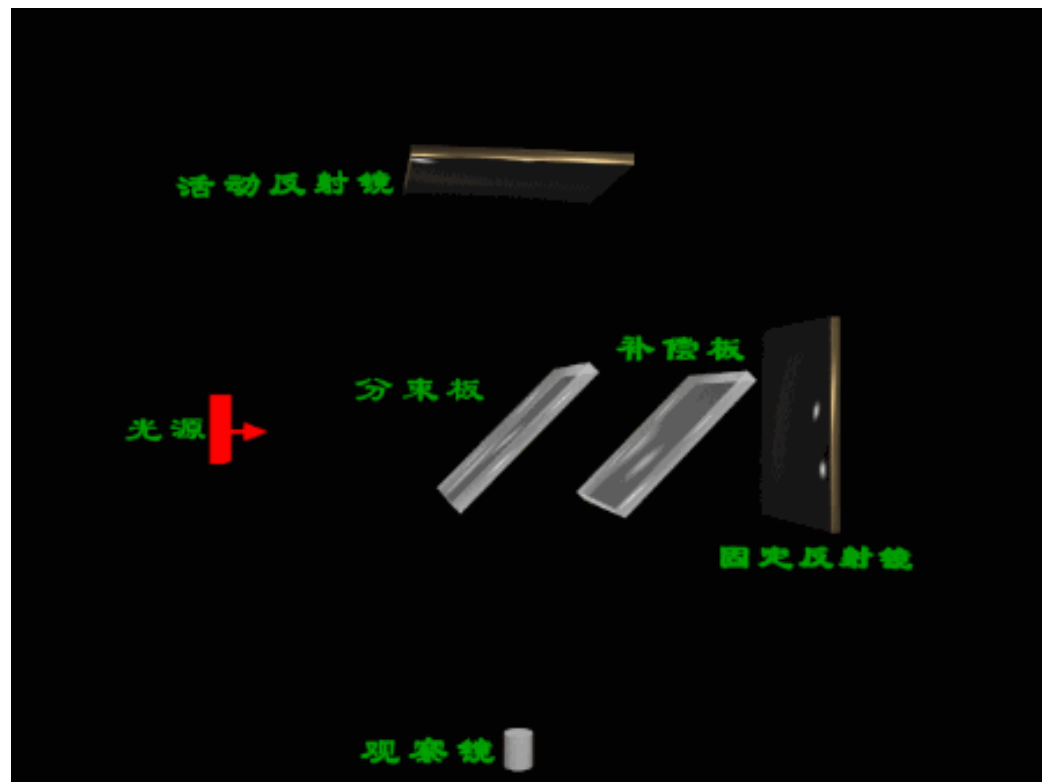
### Albert Abraham Michelson

#### 1. 迈克尔逊干涉仪的结构及原理

$G_1$ 和 $G_2$ 是两块材料相同  
厚薄均匀、几何形状完  
全相同的光学平晶。

$G_1$ 一侧镀有半透半反的薄  
银层。与水平方向成 $45^\circ$ 角  
放置； $G_2$ 称为补偿板。

在 $G_1$ 镀银层上 $M_1$ 的虚象 $M_1'$



## § 2.7 迈克尔逊干涉仪



迈克尔逊干涉仪

## 2. 迈克耳孙干涉仪的干涉条纹

光程差：由 $M_1'$  和 $M_2$ 形成的空气膜上下两个面反射光的光程差。

薄膜干涉条纹：

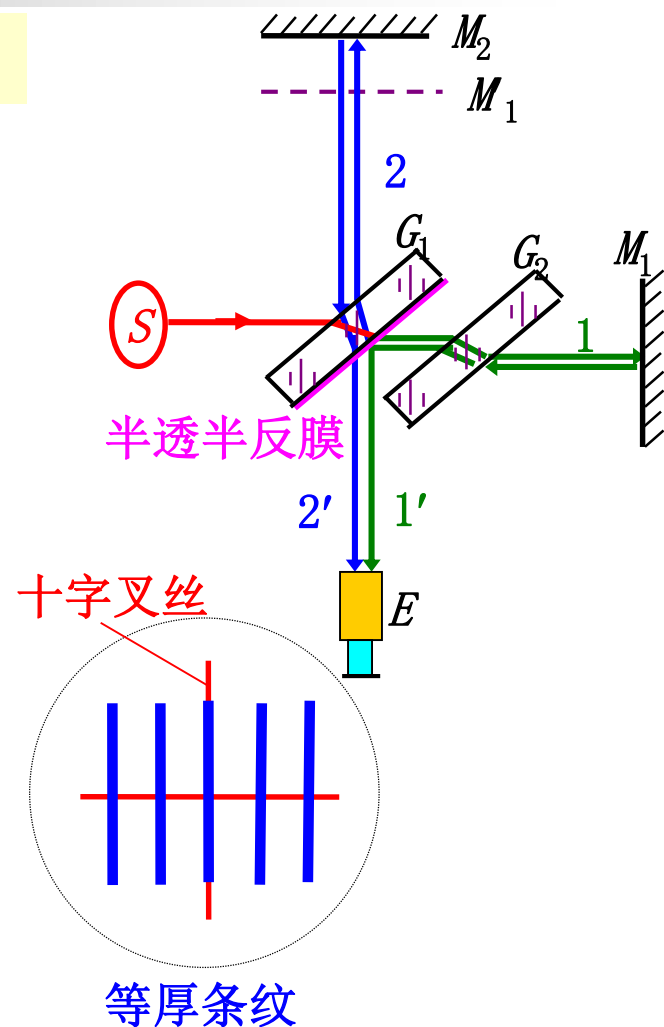
$d = \text{常数}$ ，薄膜等倾

$d \neq \text{常数}$ （如劈尖）等厚干涉条纹。

若 $M_1$ 平移 $\Delta d$ 时，

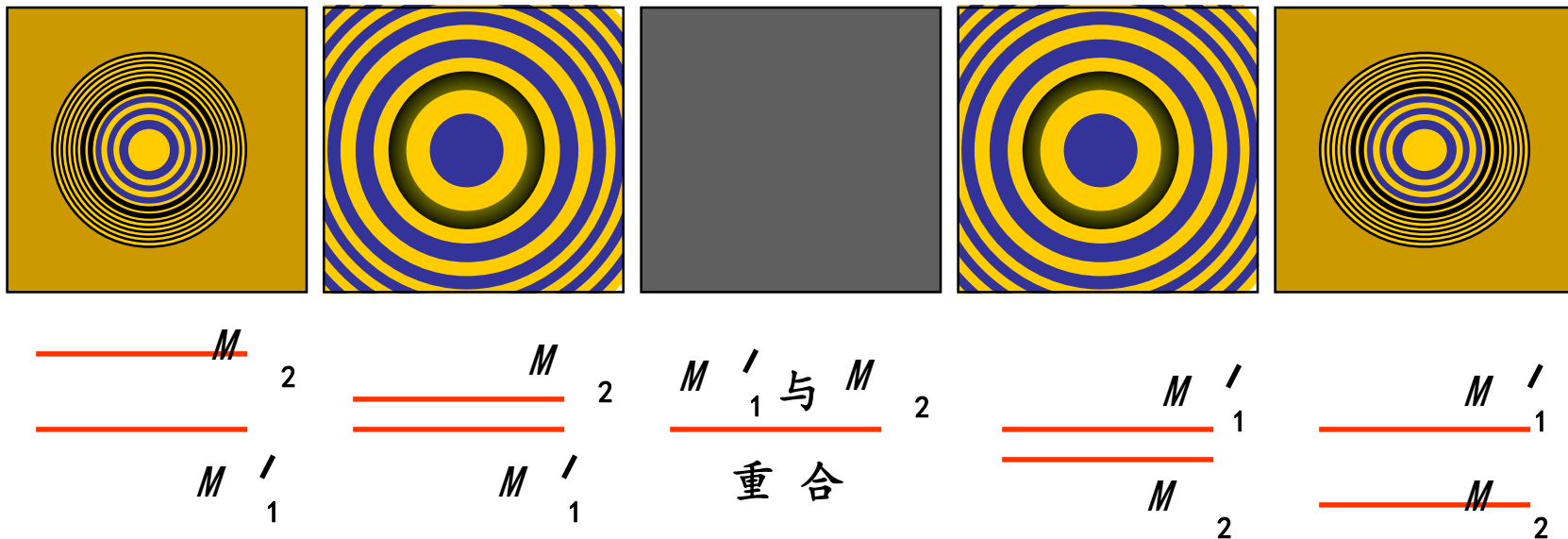
干涉条移过 $N$ 条，则有：

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



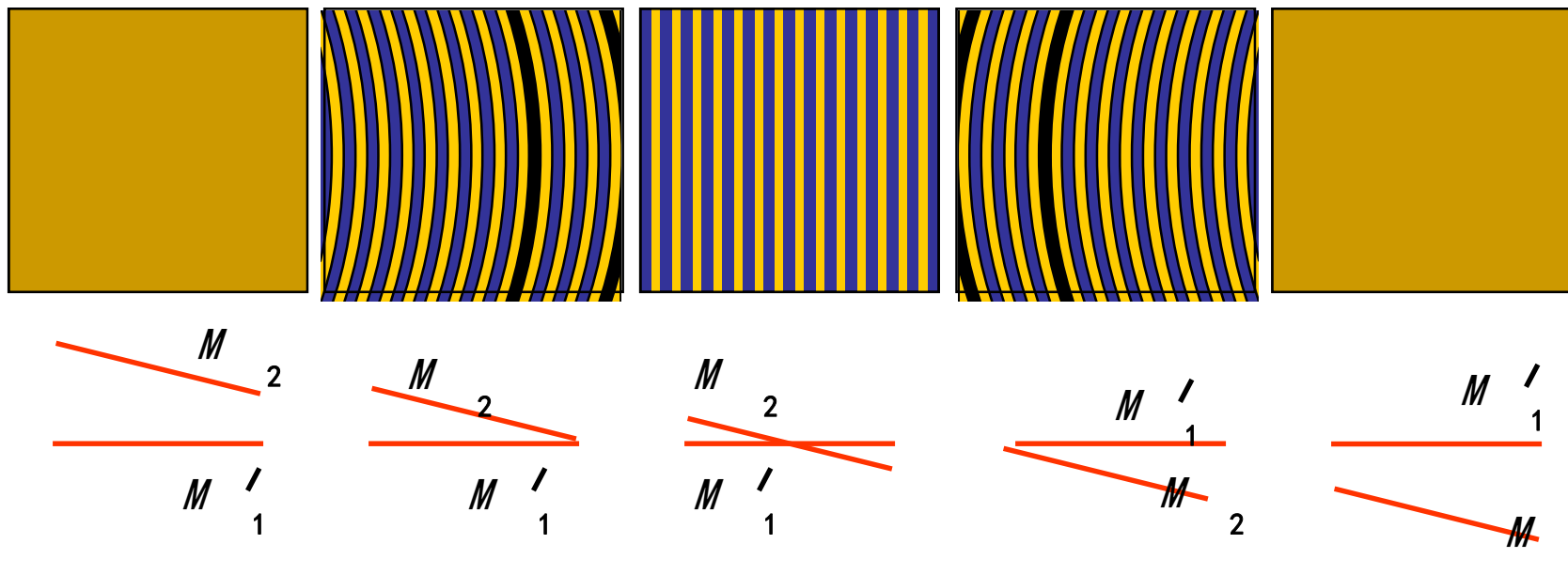
# 迈克耳逊干涉仪的干涉条纹

等倾干涉条纹



# 迈克耳逊干涉仪的干涉条纹

等厚干涉条纹

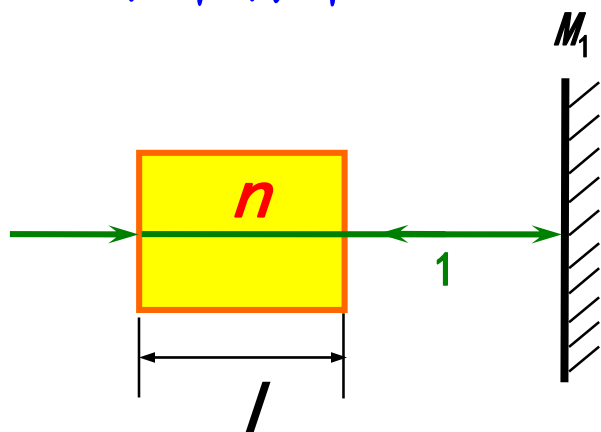


### 3. 迈克尔逊干涉仪的应用

#### ▲ 测量微小位移

(以波长为尺度, 可精确到  $\frac{\lambda}{20}$  )

#### ▲ 测折射率:



光路1中插入待测介质,

产生附加光程差:

$$\delta = 2(n - 1)l$$

由此可测折射率  $n$  。

用氦氖激光器作光源 ( $\lambda=632.8\text{nm}$ ), 迈克尔逊干涉仪中的内  $M_2$  反射镜移动一段距离, 这时数得干涉条纹移动了 **79.2**条, 试求  $M_2$ 所移过的距离。

解:

$$\begin{aligned} d &= N \frac{\lambda}{2} = 79.2 \times \frac{6328}{2} = 2.508 \times 10^5 \text{ \AA} \\ &= 25 \mu\text{m} . \end{aligned}$$

## § 2.7 迈克尔逊干涉仪

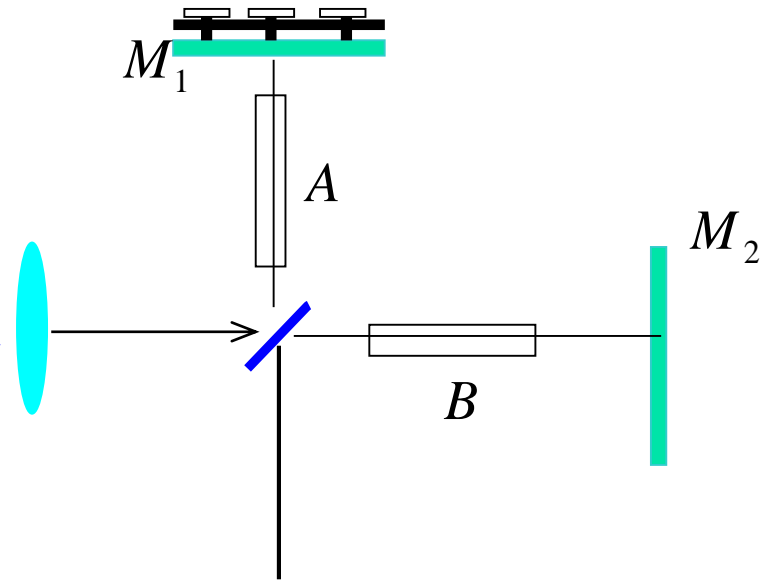
在迈克尔逊干涉仪的两臂中分别引入10 厘米长的玻璃管 A、B，其中一个抽成真空，另一个在充以一个大气压空气的过程中观察到107.2 条条纹移动，所用波长为546nm。求空气的折射率？

解：设空气的折射率为  $n$

$$\Delta L = 2nl - 2l = 2l(n - 1)$$

$$2l(n - 1) = 107.2 \times \lambda$$

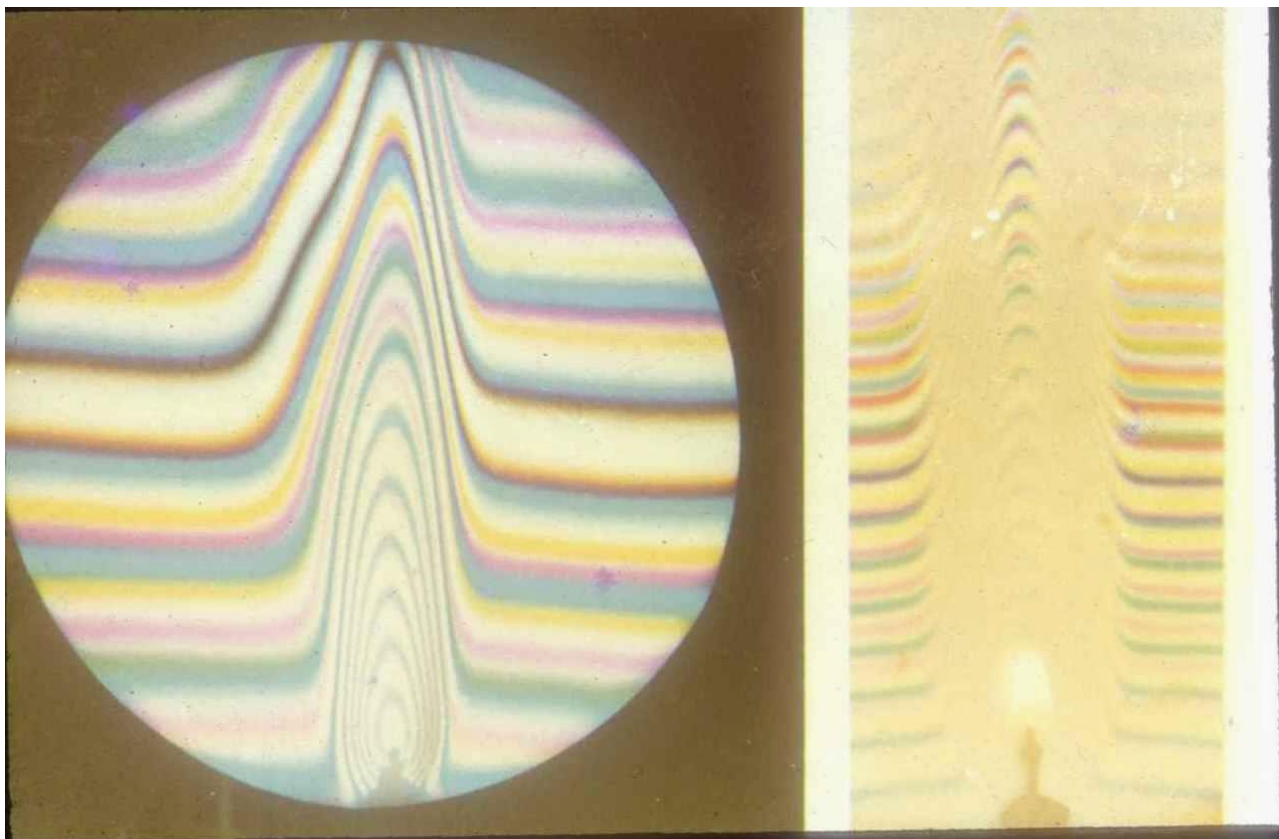
$$n = \frac{107.2 \times \lambda}{2l} + 1 = 1.0002927$$



精度高



## § 2.7 迈克尔逊干涉仪



用迈克尔逊干涉仪测气流

## ■ 光学相干CT — 断层扫描成像新技术

(Optical Coherence Tomography, 简称OCT)

计算机断层成像 (CT-Computed tomography)

$\gamma$  射线 CT—工业CT

第一代: X射线 CT

第二代: NMR CT—核磁共振成像

第三代: 光学相干CT—OCT

空间分辨率达微米的量级

# 1. 原理

## (1) 样品反射光脉冲的延迟时间

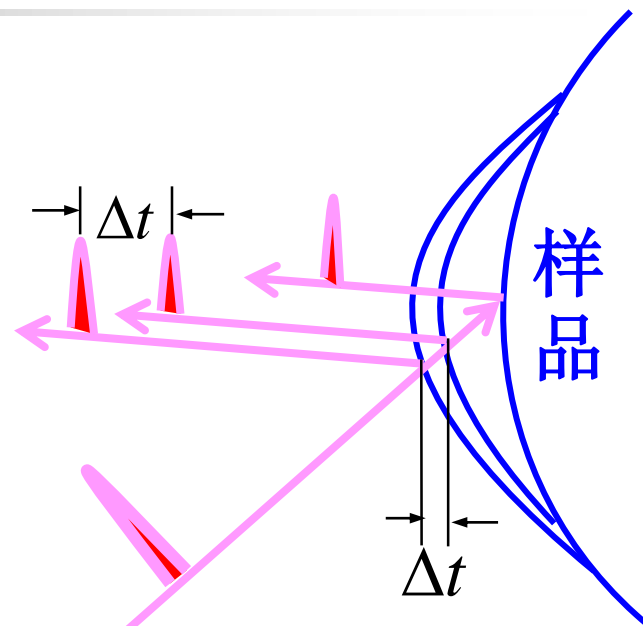
样品中不同位置处反射的光脉冲延迟时间也不同：

$$\Delta t \approx \frac{2n\Delta d}{c} = \frac{2n\Delta d}{3 \times 10^8 \text{ m/s}}$$

数量级估计： $\Delta t \approx 10^{-8} \Delta d \cdot \text{s/m} = 10^{-14} \Delta d \cdot \text{s}/\mu\text{m}$

要实现微米量级的空间分辨率（即 $\Delta d \sim \mu\text{m}$ ），就要求能测量  $\Delta t \leq 10^{-14}$  秒的时间延迟。

激光器的脉冲宽度要很小  $\sim 10^{-15}$  秒 — 飞秒



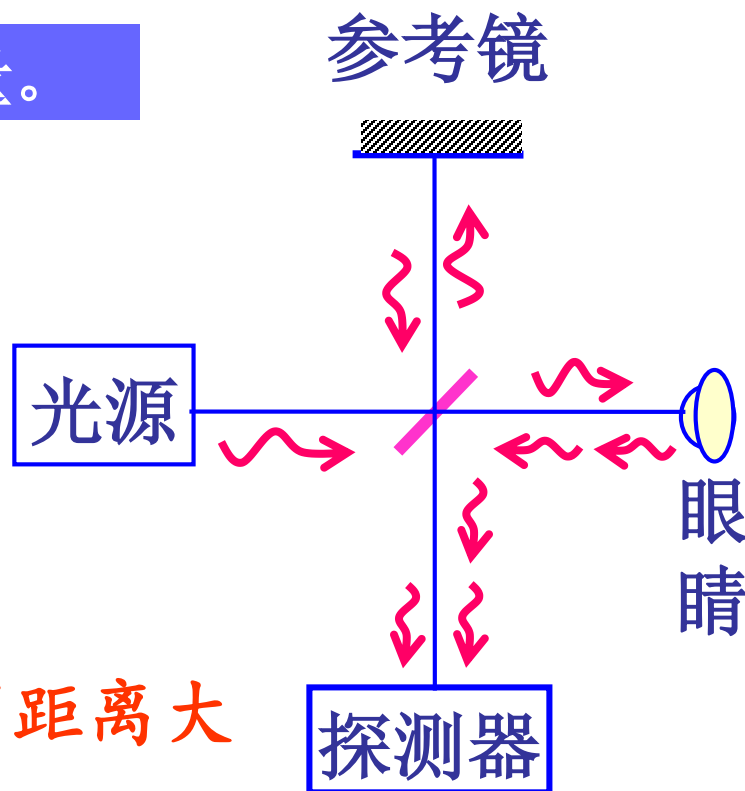
## § 2.7 迈克尔逊干涉仪

时间延迟短至 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{s}$ ，电子设备难以直接测量！！

可利用迈克尔逊干涉仪原理测量。

当参考光脉冲和信号光脉冲序列中的某一个脉冲同时到达探测器表面时，就会产生光学干涉现象。这种情形，只有当参考光与信号光的这个脉冲经过相等光程时才会产生。

因为 $10^{-15}$ 秒的光脉冲对应的空间距离大约只有一个波长。



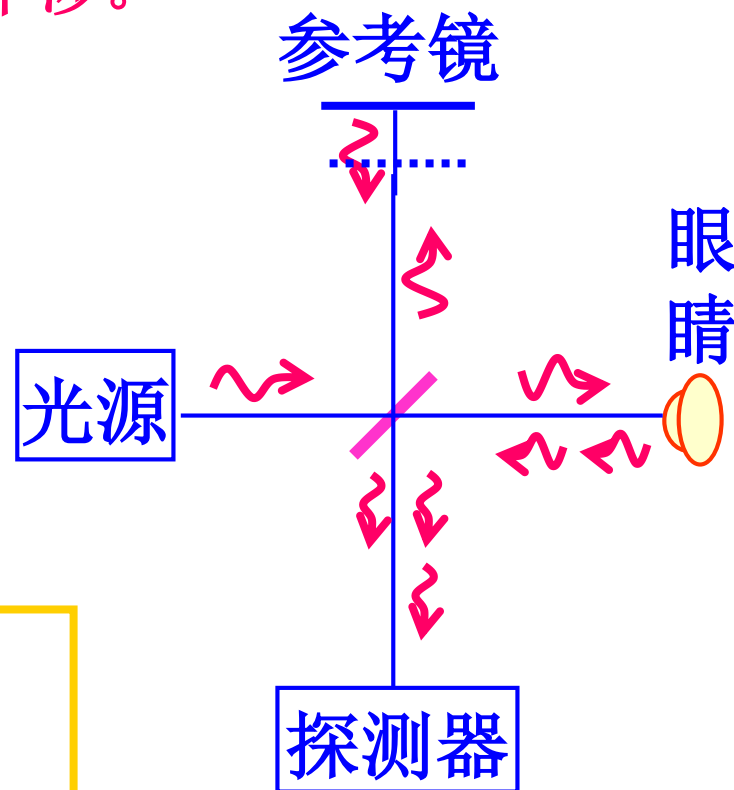
## § 2.7 迈克尔逊干涉仪

测量不同结构层面返回的光延迟，只须移动参考镜，使参考光分别与不同的信号光产生干涉。

分别记录下相应的参考镜的空间位置，这些位置便反映了眼球内不同结构的相对空间位置。

参考臂扫描可得到样品深度方向的一维测量数据。光束在平行于样品表面的方向进行扫描测量，可得到横向的数据。

将得到的信号经计算机处理，便可得到样品的立体断层图像。





## (2) 样品反射光脉冲强度的处理

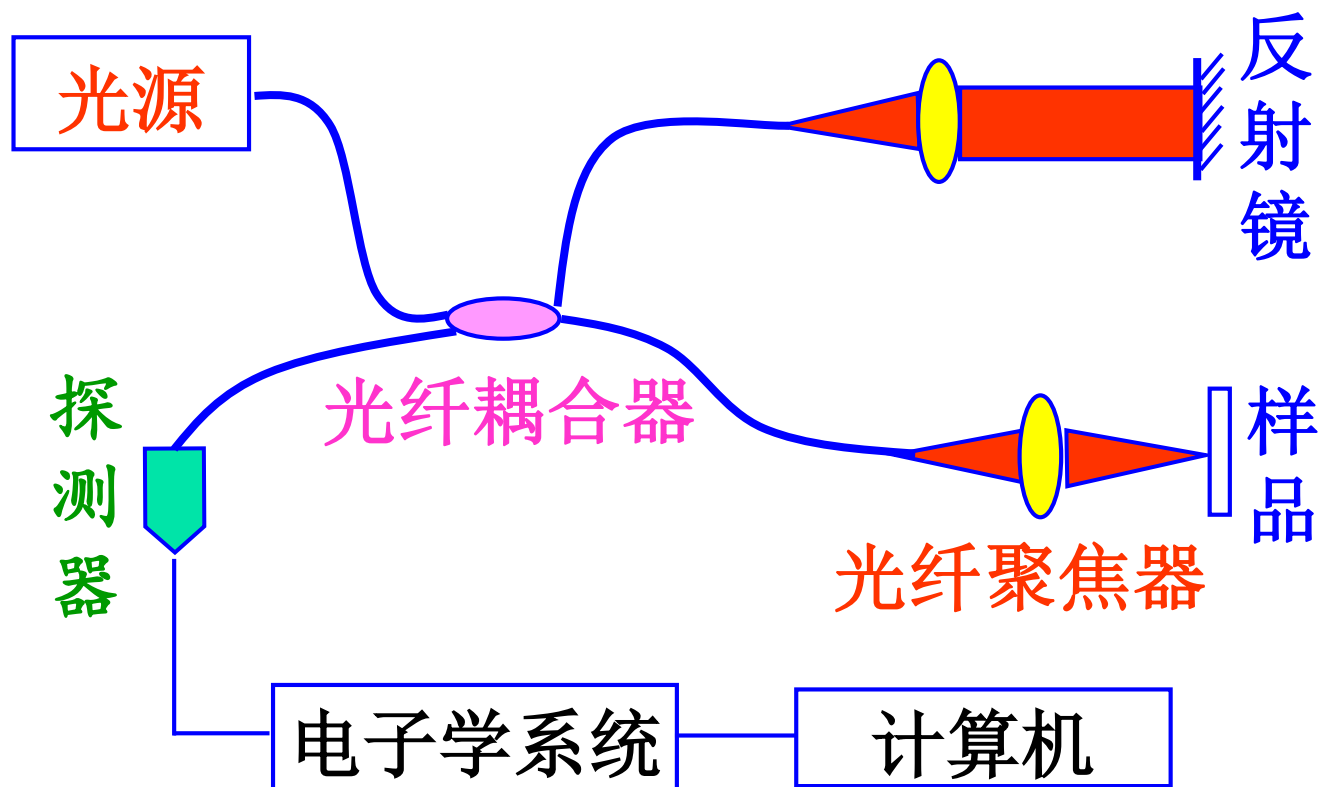
不同材料或结构的样品反射光的强度不同。根据反射光信号的强弱，赋予其相应的色彩，这样便得到样品的假彩色图。

## (3) OCT成像的特点：

- \* 对光程较长的多次散射光有极强的抑制作用。即使透明度很差的样品，仍可得到清晰的图像。
- \* 图象的断层分辨率由光的脉宽决定。
- \* 图象的横向分辨率由光束的直径决定

## 2. 实验装置

——光纤化的迈克尔逊干涉仪



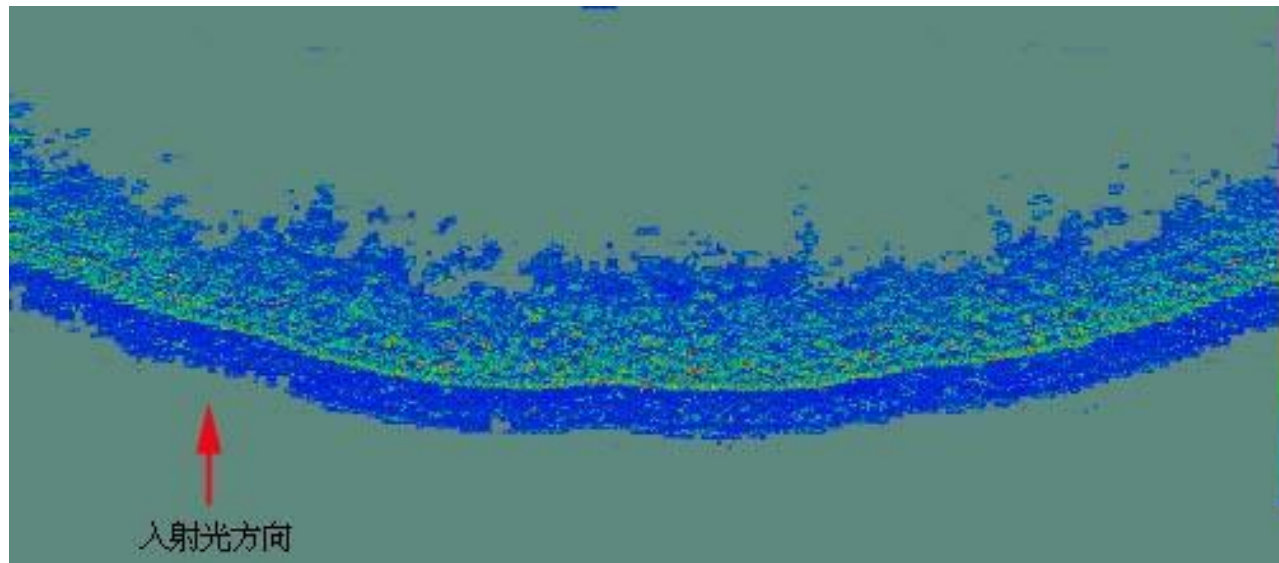
### 3. 应用

生物

医学

材料科学

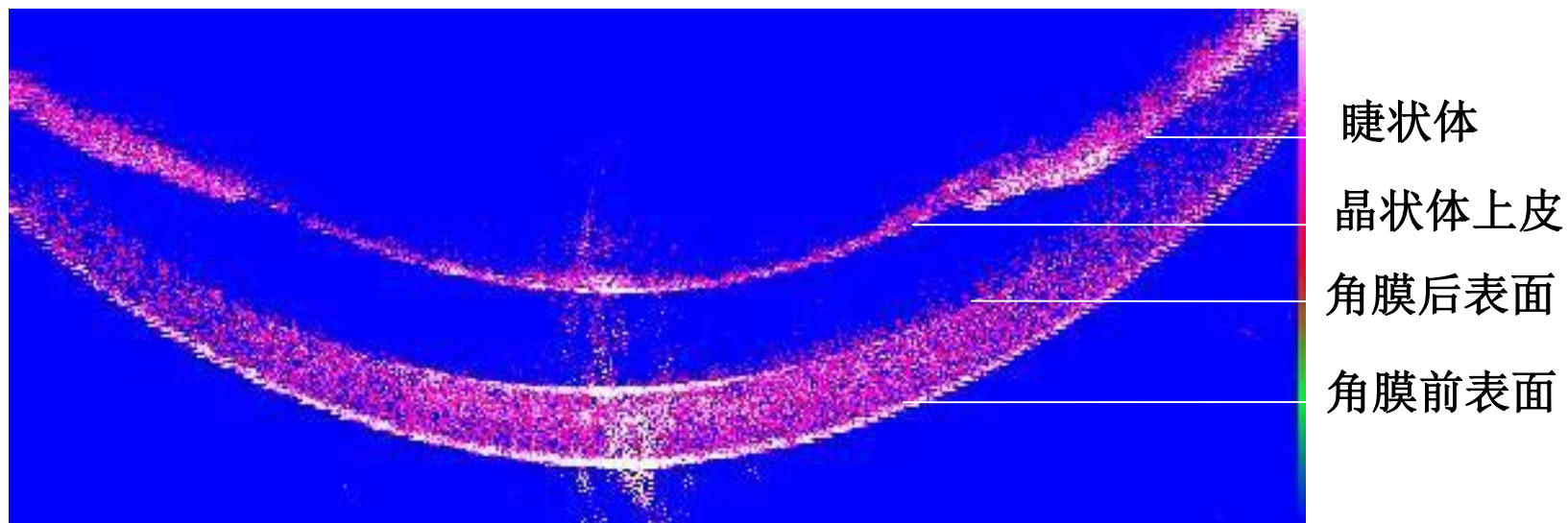
.....



大葱表皮的光学相干断层扫描 (OCT) 图像

实际样品大小为 $10\text{mm} \times 4\text{mm}$ ，图中横向分辨率约为 $20\mu\text{m}$ ，纵向分辨率约为 $25\mu\text{m}$ 。



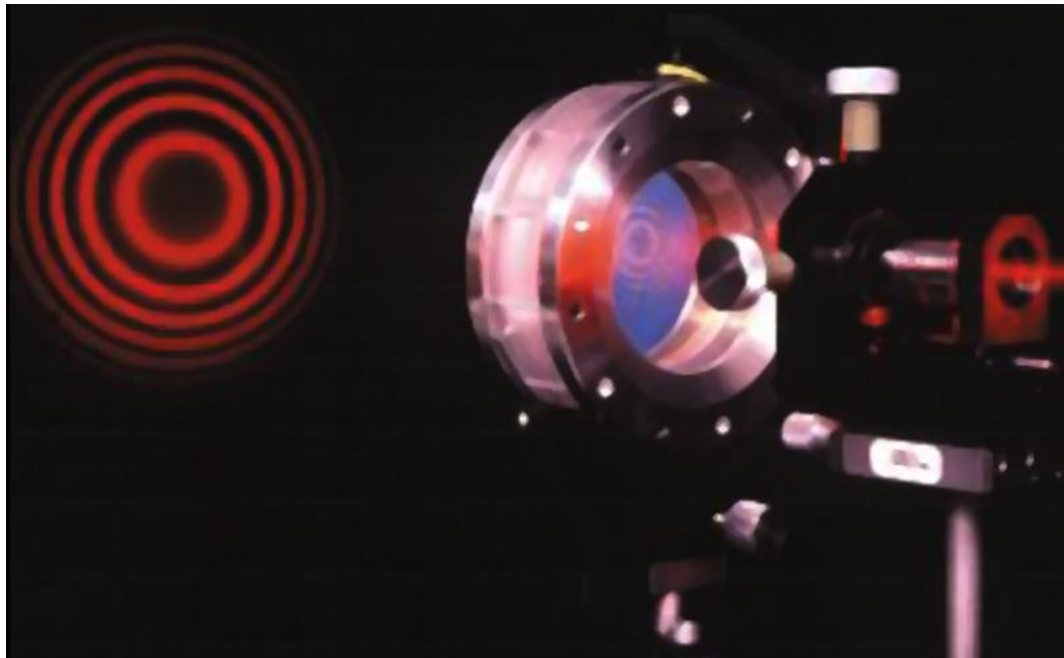


兔子眼球前部的OCT图像

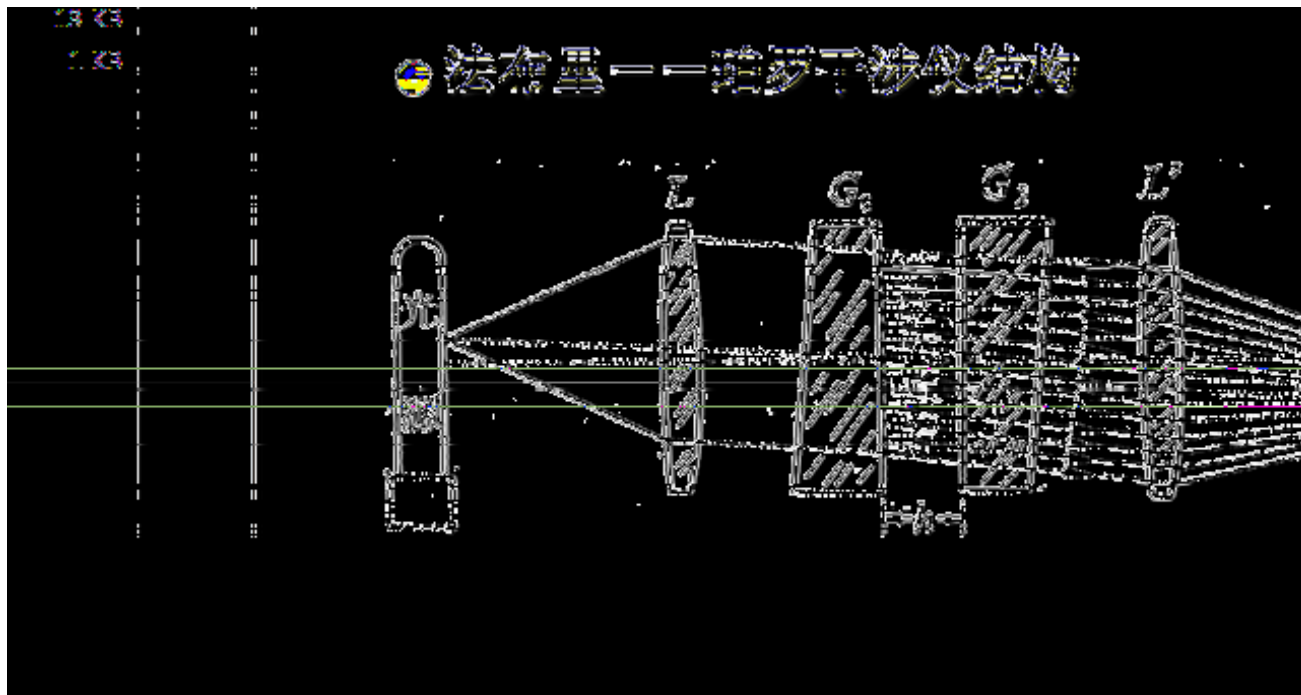
# 法布里-珀罗干涉仪

## Fabry-Pérot interferometer \*

- 基于多光束等倾干涉
- 法国物理学家C. 法布里和A. 珀罗于1897 年发明



# 1. F-P 几何结构



## 2. 干涉光强分析

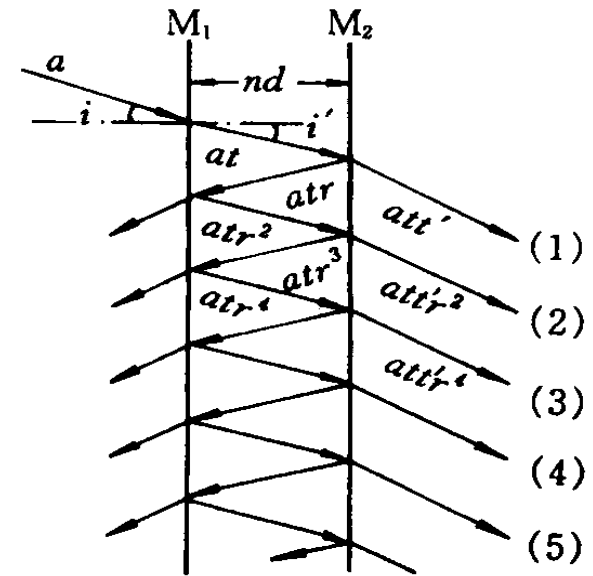
反射镜的振幅反射系数  $r$

入射光的振幅  $a$

第一面的振幅透射系数  $t$

第二面的振幅透射系数  $t'$

透射光的振幅



$$U(T) = att' + att'r^2e^{-i\delta} + att'r^4e^{-2i\delta} + \cdots = att' \left( \frac{1}{1 - r^2e^{-i\delta}} \right)$$

位相差  $\delta = k\Delta = \frac{2\pi \cdot 2nd \cos i'}{\lambda} = \frac{4\pi \cdot nd \cos i'}{\lambda}$

$$I_T = U_T U_T^* = \frac{(att')^2}{(1 - r^2e^{-i\delta})(1 - r^2e^{i\delta})} = \frac{(att')^2}{(1 - r^2)^2 + 4r^2 \sin(\delta/2)}$$



斯托克斯定律

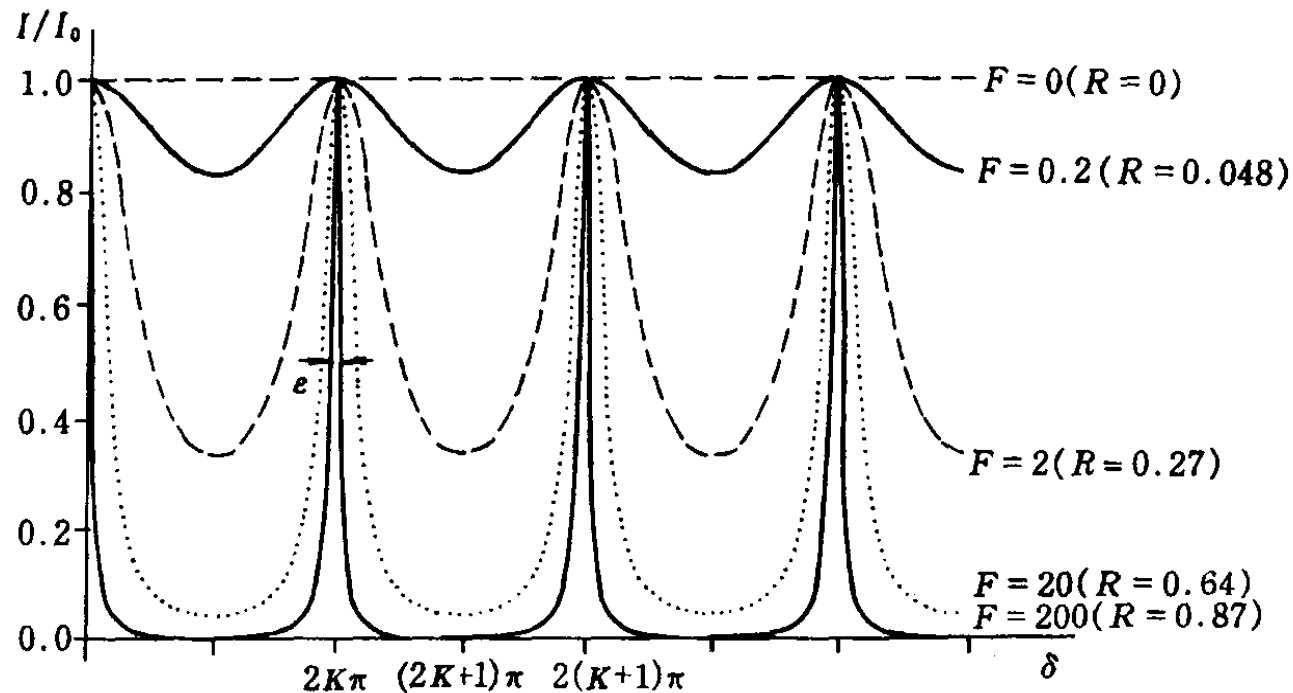
$$tt' = 1 - r^2 = 1 - R$$

$R$  为反射镜的反射率

$$F = 4R / (1 - R)^2$$

$$\begin{aligned} I_T &= \frac{a^2 (1 - R)^2}{(1 - R^2)^2 + 4R \sin^2(\delta / 2)} \\ &= \frac{a^2}{1 + [4R / (1 - R)^2] \sin^2(\delta / 2)} = \frac{a^2}{1 + F \sin^2(\delta / 2)} \end{aligned}$$

反射率 $R$  接近100% 时，透射光花样由几乎全黑的背景上一组很细的亮条纹构成。

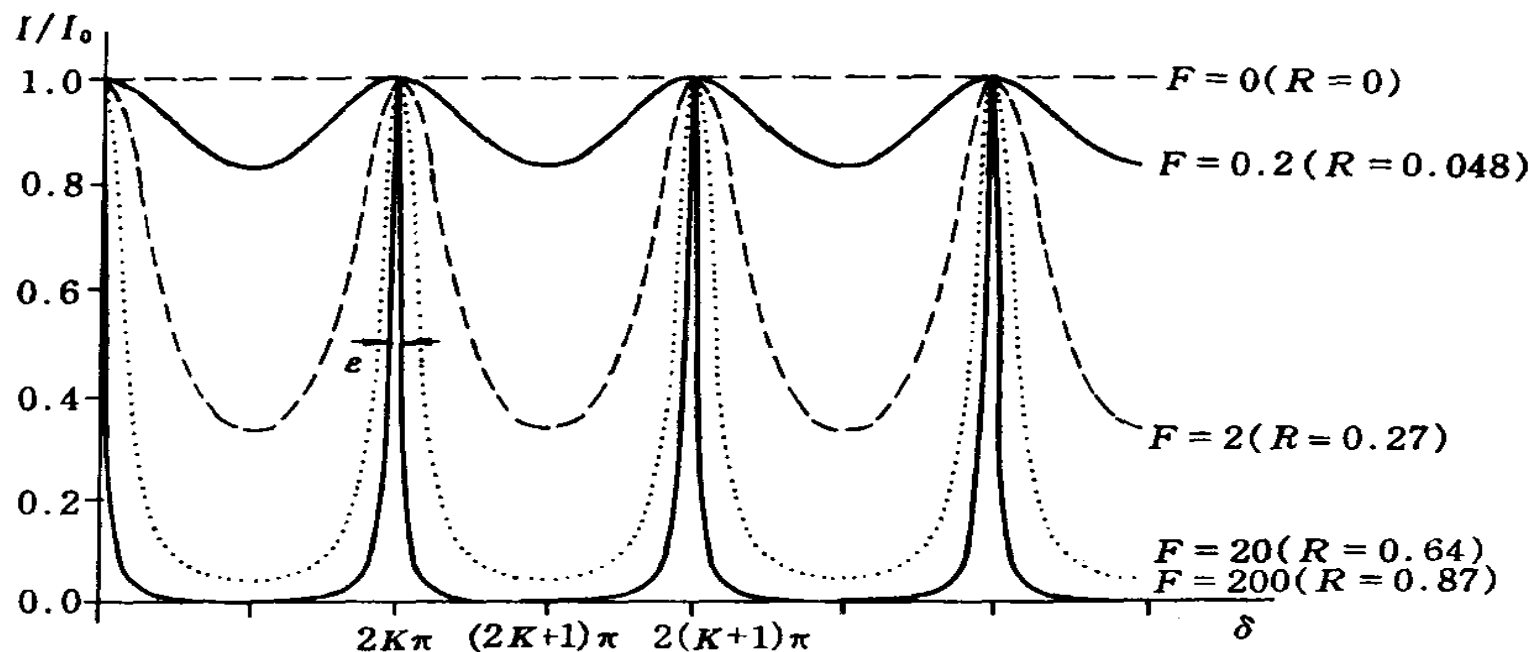


反射率很小时，极大到极小的变化十分缓慢，透射光条纹的可见度很差。

定义条纹的半角宽度  $\varepsilon$ :

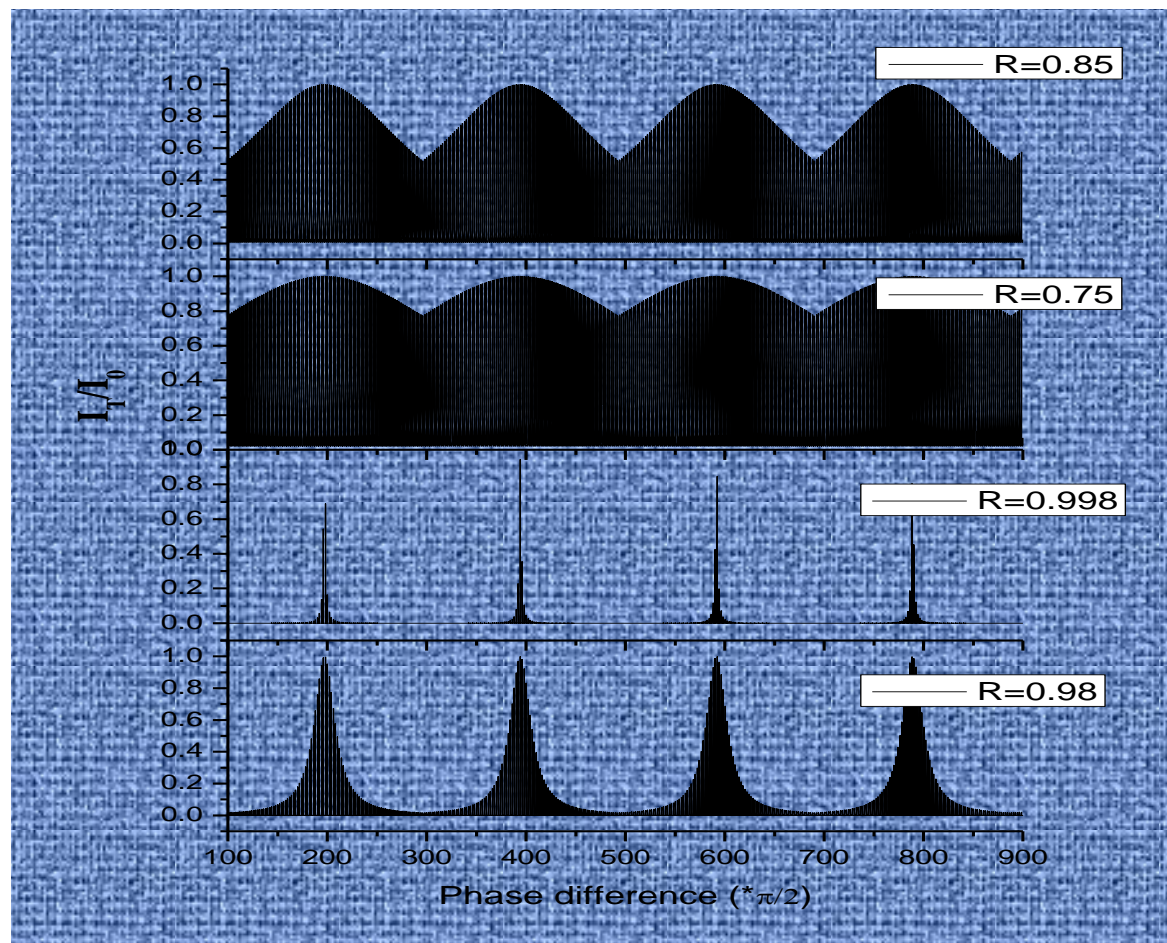
干涉光强降到最大值的一半时, 对应的相位差的差值。

小角度近似下: 
$$\varepsilon = \frac{2(1-R)}{\sqrt{R}}$$



$$I_T = \frac{a^2}{1 + [4R/(1-R)^2] \sin^2(\delta/2)}$$

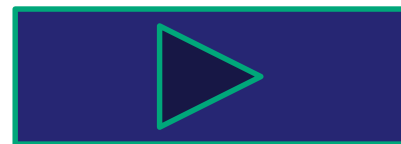
# F-P干涉仪的相对透射光强数值模拟





条纹形状:

入射光源的空间分布  
使用的几何装置



F-P干涉的特性:

1. 角色散特性
2. 自由光谱范围
3. 色分辨特性

### 3. 迈克耳逊干涉仪与法-珀 (F-P) 干涉仪比较:

反射镜的反射率 $R$  越大, 干涉条纹越清晰越明锐, 这是F-P干涉仪的最大优点。

$$\Delta i_k = \frac{\lambda}{2\pi n h \sin i_k} \frac{1-R}{\sqrt{R}}$$

$$A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \pi k \frac{\sqrt{R}}{1-R}$$

$$R \uparrow, \Delta i_k \downarrow, A \uparrow$$

两种干涉条纹的性质相似:

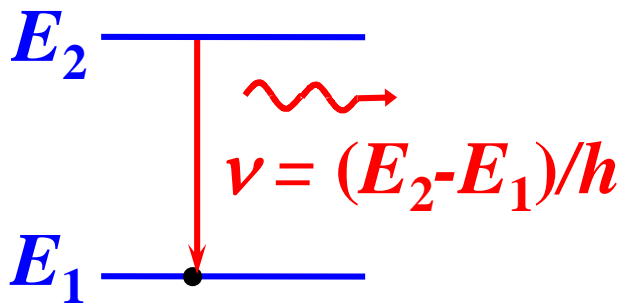
1. 内环的干涉级次较高;
2. 相邻条纹的间隔随波长的增加而增大, 随两反射面间隔 $d$ 的增加而减小;
3. 离条纹中心越远条纹越密。

## § 2.8 时间相干性

- 薄膜干涉时对光源要求不高，但强调“薄”，为什么？多薄？

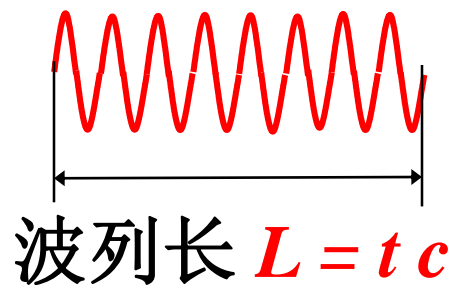
普通光源

自发辐射跃迁



发光时间  $t \approx 10^{-8} \sim 10^{-10} \text{ s}$

波列  $\longrightarrow$

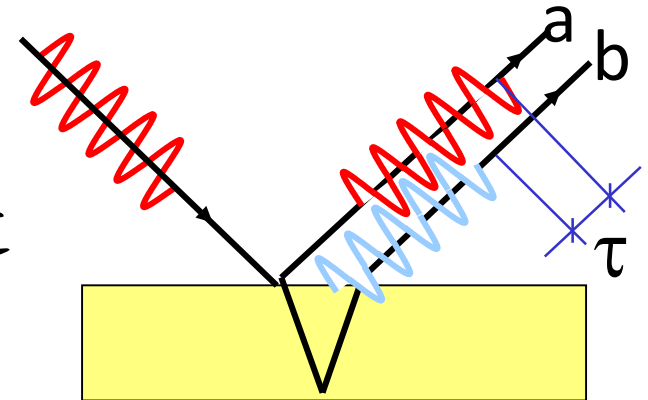


- 由光程差造成反射光a与折射光b的时间差 $\tau$

$$\tau = \Delta L / c$$

光程差 $\Delta L$ 越大，折射光b越落后于反射光a。

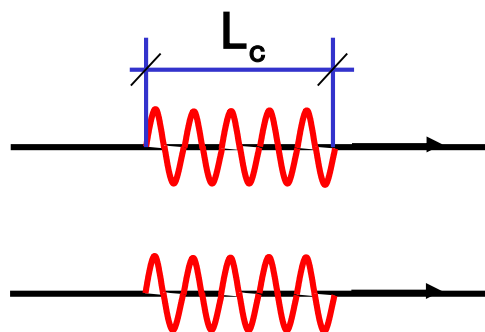
若 $\Delta L$ 过大，则b光落后a光将超过列波长 $L$ 。



➔ a、b光将无法进行相干叠加。

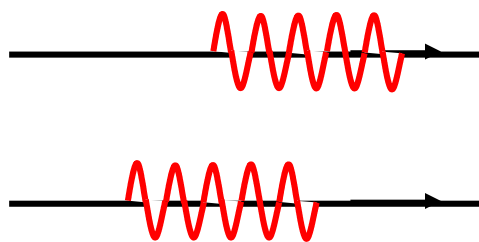


- 把列波 $L$ 称为相干长度，记为 $L_c$ 。
- 传播 $L_c$ 距离所花的时间 $\tau_c$ 称为相干时间， $\tau_c = L_c / c$



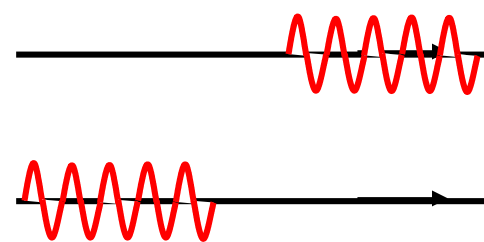
$$\Delta L = 0$$

完全相干



$$0 < \Delta L < L_c$$

部分相干



$$\Delta L > L_c$$

完全不相干

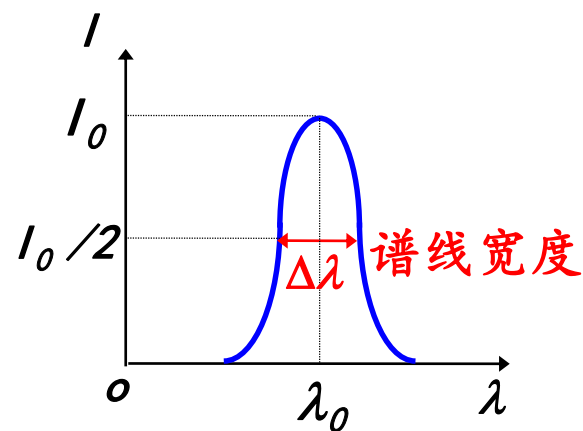
- 光源发出的列波越长，即相干时间越长，两波相互叠加的部分就越多，干涉条纹越清晰，时间相干性越好

时间相干性与光源的单色性相关。

相关长度 $L_c$ 与谱线宽度 $\Delta\lambda$ 有关系：

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

$$\Delta E \cdot \Delta t = \hbar$$



光谱的**单色性**越好，**相干长度**越长，**时间相干性**越好。

## § 2.8 时间相干性

氦氖激光

$$\lambda = 0.6328 \mu m \quad \Delta\lambda = 10^{-11} \mu m$$

$$L_c = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda} = \frac{0.6328^2}{10^{-11}} \approx 40 km$$

白光光源

$$\bar{\lambda} = 0.55 \mu m \quad \Delta\lambda = 0.40 \mu m$$

$$L_c = \Delta_{\max} = \frac{0.40^2}{0.55} \approx 10^2 \mu m$$

要想看到白光干涉必须在零光程的位置



# 总结

---

## 1、一个原则

一个原子一次发光中取得

## 2、两大类型

分波面和分振幅

## 3、三个典型装置

双缝 多缝 薄膜

## 4、四个基本问题

装置 相干光束和光程差 强度分布 应用



# Albert A. Michelson

爱因斯坦：

“我总认为迈克尔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。”

许多著名的实验都堪称科学中的艺术，如：全息照相实验，吴健雄实验，兰姆赛移位实验等等。

重要的物理思想 + 巧妙的实验构思  
+ 精湛的实验技术 → 科学中的艺术



迈克耳逊在工作

