

椭圆偏振法测量薄膜的厚度和 折射率

姚焜

06.7.5

内容简介

- 1. 椭偏法测量薄膜的技术特点
- 2. 椭偏法的基本概念
- 3. 椭偏仪的基本结构和原理
- 4. 椭偏仪实验的操作方法
- 5. 椭偏仪实验的数据处理
- 6. 总结

椭偏法测量的技术特点和应用

- 椭偏法是70年代以来随着电子计算机的广泛应用而发展起来的目前已有的测量薄膜的最精确的方法之一。
- 能测量很薄的膜（1nm），且精度很高，比干涉法高1-2个数量级。
- 是一种无损测量，不必特别制备样品，也不损坏样品，比其它精密方法：如称重法、定量化学分析法简便。
- 可同时测量膜的厚度、折射率以及吸收系数。因此可以作为分析工具使用。
- 对一些表面结构、表面过程和表面反应相当敏感。是研究表面物理的一种方法。

椭圆偏振光的基本概念

- 椭圆偏振光可以看成是由两个互相垂直振动（x和y分量）具有固定位相差的偏振光迭加而成的。

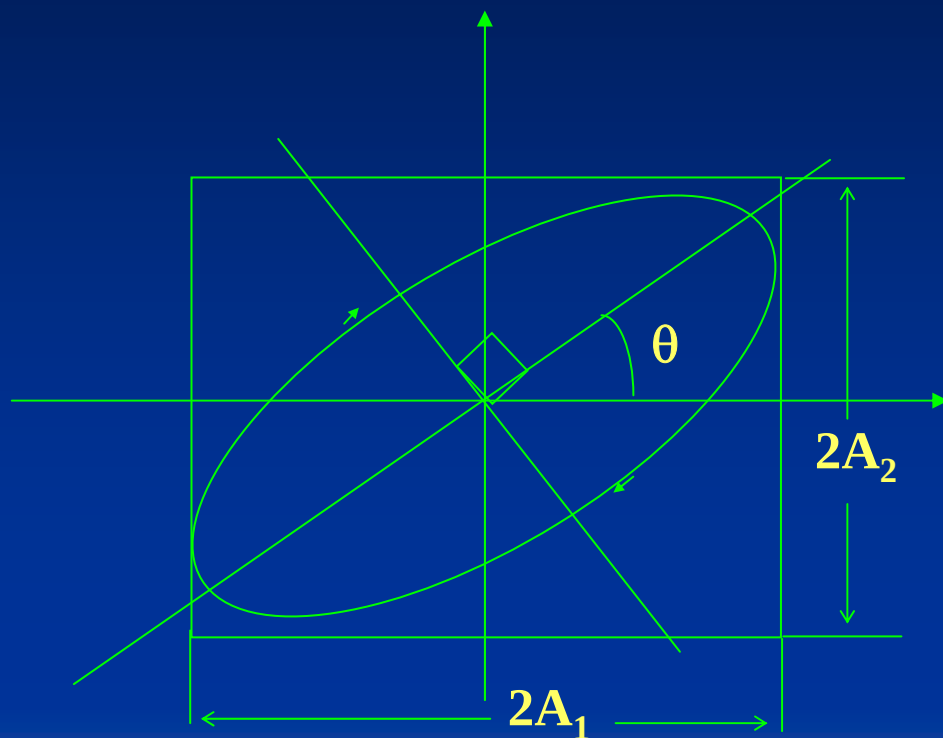
$$E_x = A_1 \cos(\omega t + \alpha_1)$$

$$E_y = A_2 \cos(\omega t + \alpha_2)$$

$$\frac{E_x^2}{A_1^2} + \frac{E_y^2}{A_2^2} - 2 \frac{E_x E_y}{A_1 A_2} \cos(\delta) = \sin^2(\delta)$$

$$\delta = \alpha_2 - \alpha_1$$

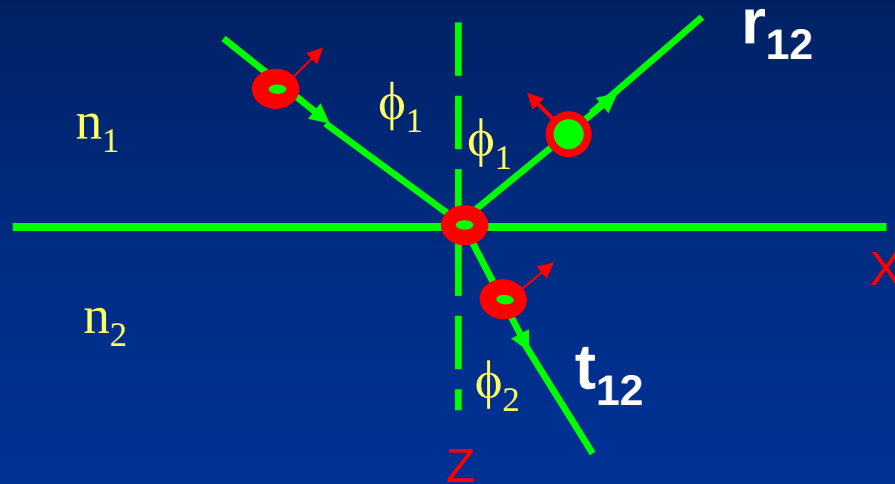
两个互相垂直振动的合成轨迹



$$\tan 2\theta = \frac{2A_1A_2}{A_1^2 - A_2^2} \cos \delta$$

等幅椭圆偏振光

菲涅尔公式



坐标系统的确定 (x,y,z) 右手坐标系如图所示, 光线的局部坐标系 (p,s,k) 右手坐标系, **s** 的正方向与 **y** 的正方向重合

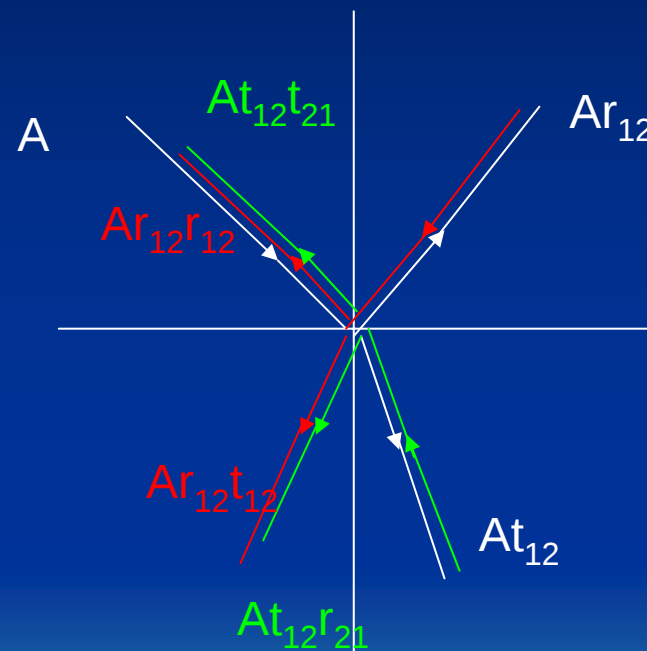
$$r_P = \frac{n_2 \cos \phi_1 - n_1 \cos \phi_2}{n_2 \cos \phi_1 + n_1 \cos \phi_2} \quad r_S = \frac{n_1 \cos \phi_1 - n_2 \cos \phi_2}{n_1 \cos \phi_1 + n_2 \cos \phi_2}$$

斯托克斯倒逆关系

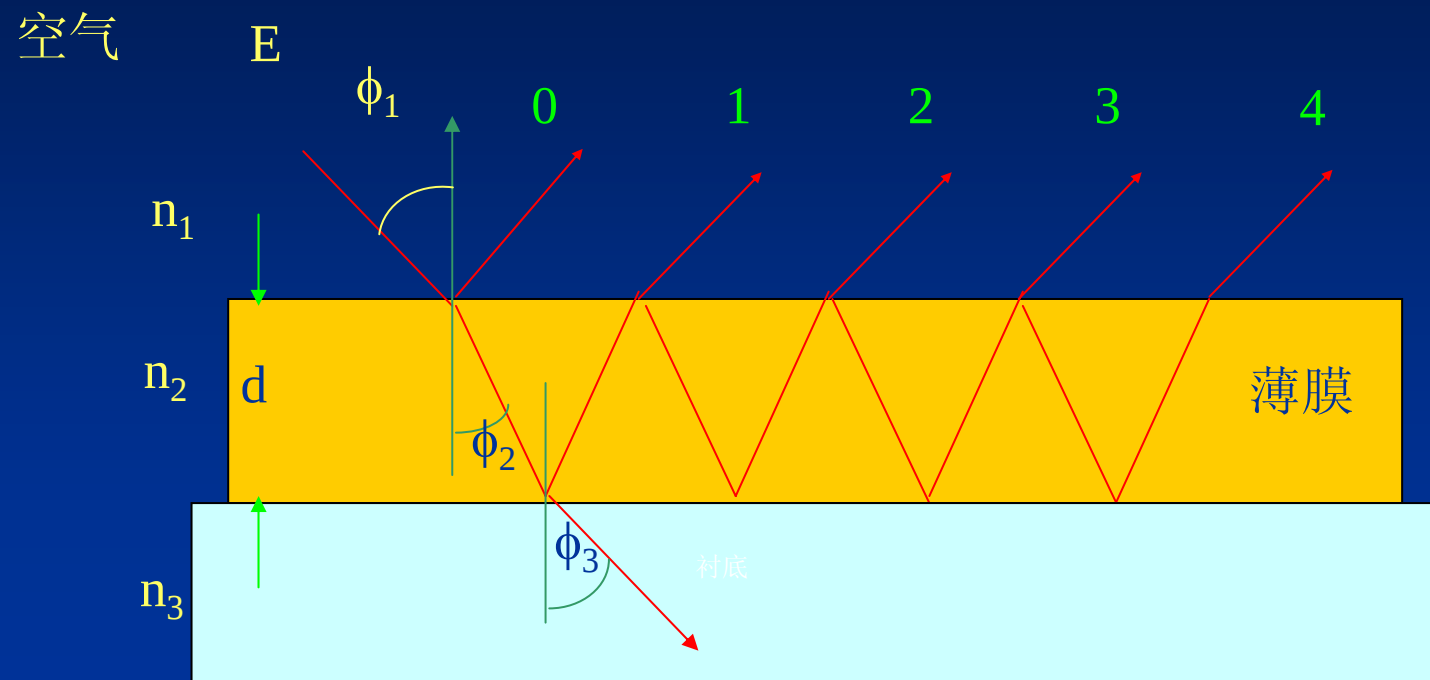
(对P分量和S分量都适用)

$$t_{12}t_{21} = 1 - r_{12}^2$$

$$r_{12} = -r_{21}$$



光在双层界面薄膜系统上的反射规律



$$\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 d \cos \phi_2$$

薄膜的椭圆函数

$$\frac{R_P}{R_S} = \frac{\frac{(E_P)_r}{(E_P)_i}}{\frac{(E_S)_r}{(E_S)_i}} = \left[\frac{r_{1P} + r_{2P}e^{-i\delta}}{1 + r_{1P}r_{2P}e^{-i\delta}} \right] \left[\frac{r_{1S} + r_{2S}e^{-i\delta}}{1 + r_{1S}r_{2S}e^{-i\delta}} \right]^{-1} = \tan \psi e^{i\Delta}$$

$$\tan \psi \exp(i\Delta) = f(n_2, \phi_1, n_3, d, \lambda)$$

椭圆参量 ψ 、 Δ

$$(E_P)_r = (A_P)_r e^{i\beta_{Pr}}$$

$$(E_S)_r = (A_S)_r e^{i\beta_{Sr}}$$

$$(E_P)_i = (A_P)_i e^{i\beta_{Pi}}$$

$$(E_S)_i = (A_S)_i e^{i\beta_{Si}}$$

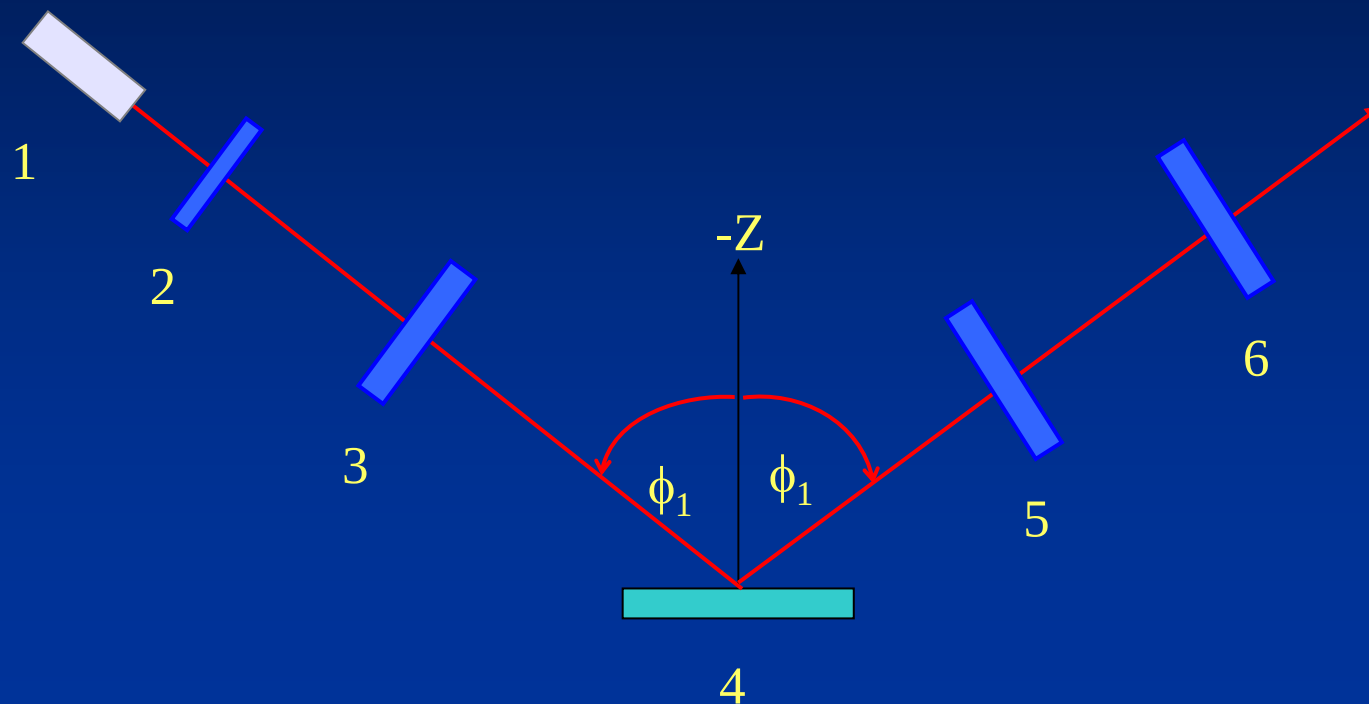
$$\operatorname{tg} \psi = \frac{(A_P)_r / (A_P)_i}{(A_S)_r / (A_S)_i}$$

$$(A_P)_i = (A_S)_i$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{(A_P)_r}{(A_S)_r}$$

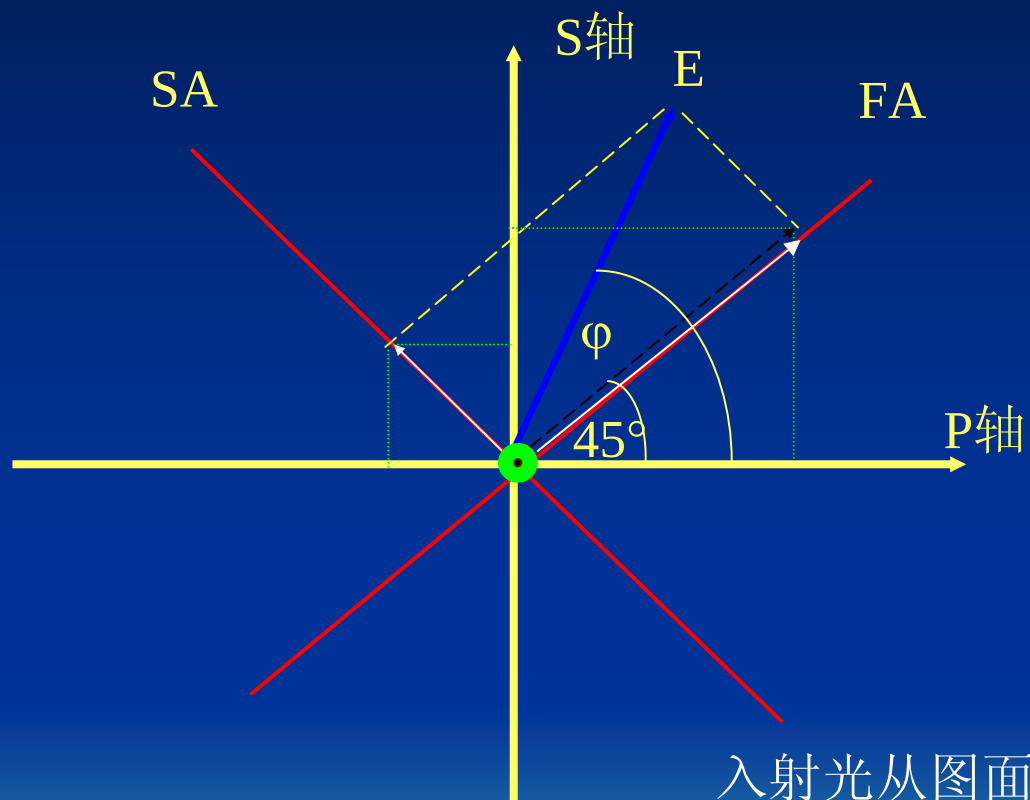
$$e^{i\Delta} = e^{i[(\beta_{Pr} - \beta_{Sr}) - (\beta_{Pi} - \beta_{Si})]} = e^{i(\beta_r - \beta_i)}$$

椭偏仪的结构图和测量原理



1 氦氖或半导体激光器 2 起偏器 3 四分之一波片 4 待测薄膜 5 检偏器 6 毛玻璃或光电探测器

薄膜表面入射光的振幅和位相



入射光从图面向外

ϕ 的符号正负规定说明

入射光为等幅椭圆偏振光

四分之一波片的快轴（FA）倾斜+45°时，所有角度的相对位置下有

$$\beta_i = \beta_{Pi} - \beta_{Si} = 2\varphi - 90^\circ$$

四分之一波片的快轴（FA）倾斜-45°时，所有角度的相对位置下有

$$\beta_i = \beta_{Pi} - \beta_{Si} = 90^\circ - 2\varphi$$

消光法

- 对于一定的薄膜系统 Δ 一定，只要改变 φ （即改变起偏器的透光方向就改变了 β_i ）使出射光为线偏振光。（在薄膜反射光路上放上一个检偏器，如果产生消光现象就可以知道出射线偏振光，此线偏振光的方位与 ψ 有关）



$$\Delta = \beta_r - \beta_i \quad \beta_r = \begin{cases} 0 \\ \pi \end{cases}$$

实验仪器

- 激光器（氦氖或半导体）
- 分光计
- 黑色反光玻璃镜和薄膜样品
- 起偏器
- 检偏器

仪器图片

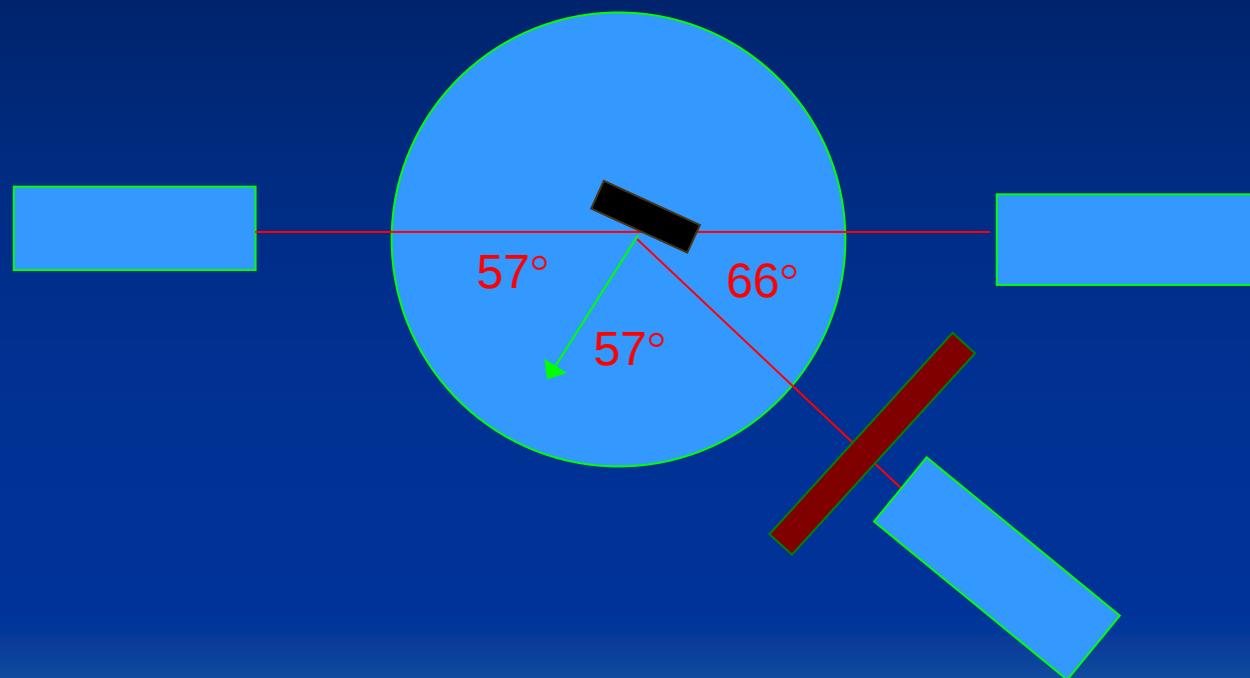


实验步骤

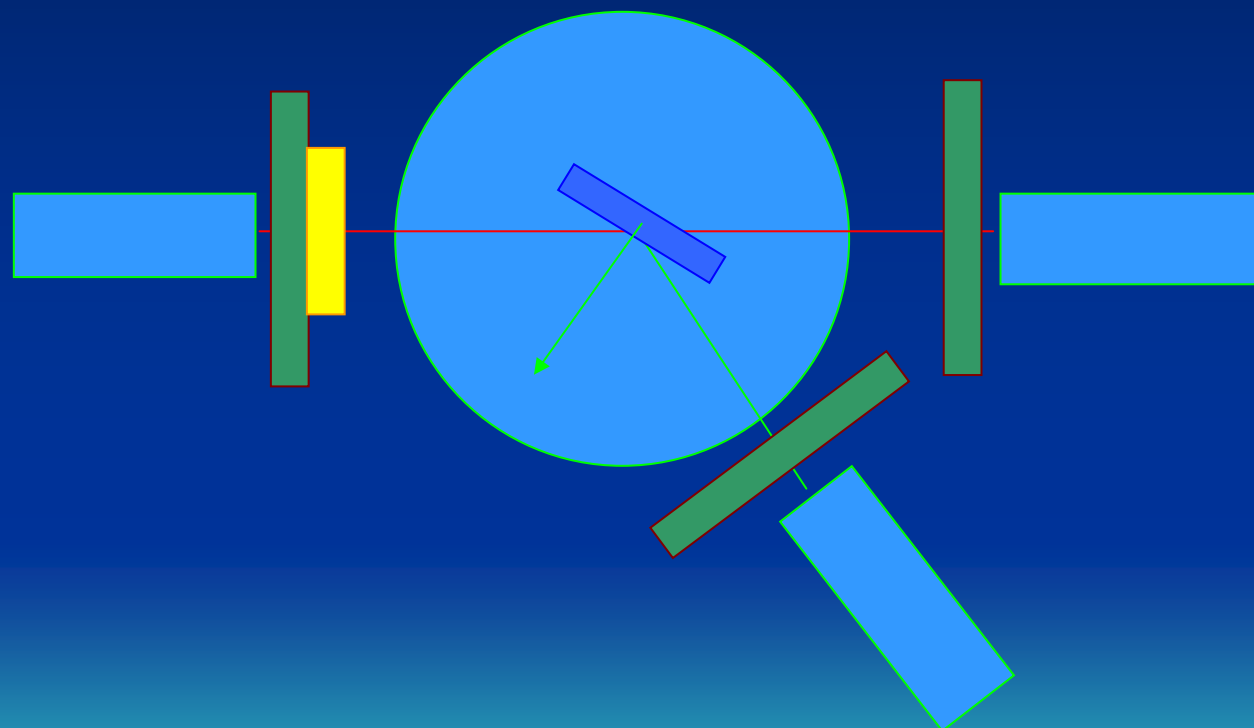
- 调节分光计的水平与光路的共轴等。
- 利用黑色玻璃反光镜的布儒斯特角确定检偏器和起偏器的初始方位。（检偏器透光方向与p分量重合，起偏器透光方向与s分量重合）
- 在起偏器后加入四分之一波片，并定好波片的快轴的初始位置。
- 在载物台上放上薄膜样品，使入射角为 70° （也可以是其它角度）。

- 将四分之一波片顺时针转动 45° ，转动检偏器和起偏器观察或用光电检流计检查消光。
- 读出消光时检偏器的偏转的表观度数 A_1 和 A_2 ($180^\circ > A_1 > 90^\circ$ 、 $0^\circ < A_2 < 90^\circ$) 和起偏器的偏转的表观度数 p_1 、 p_2 。
- 将四分之一波片逆时针转动 45° ，重复以上步骤得到检偏器的偏转的表观度数 A_3 和 A_4 ($180^\circ > A_3 > 90^\circ$ 、 $0^\circ < A_4 < 90^\circ$) 和起偏器的偏转的表观度数 p_3 、 p_4 。

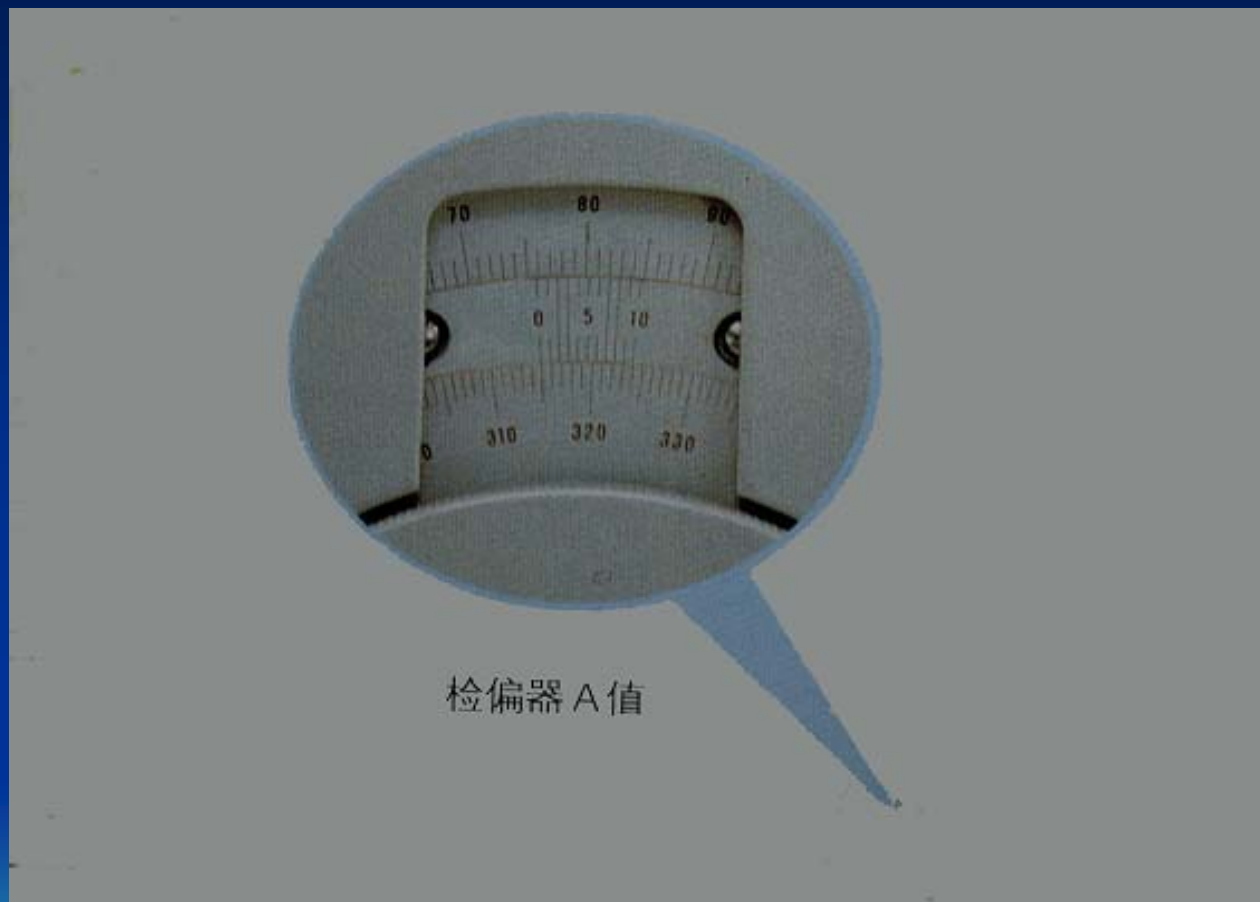
操作示意图1



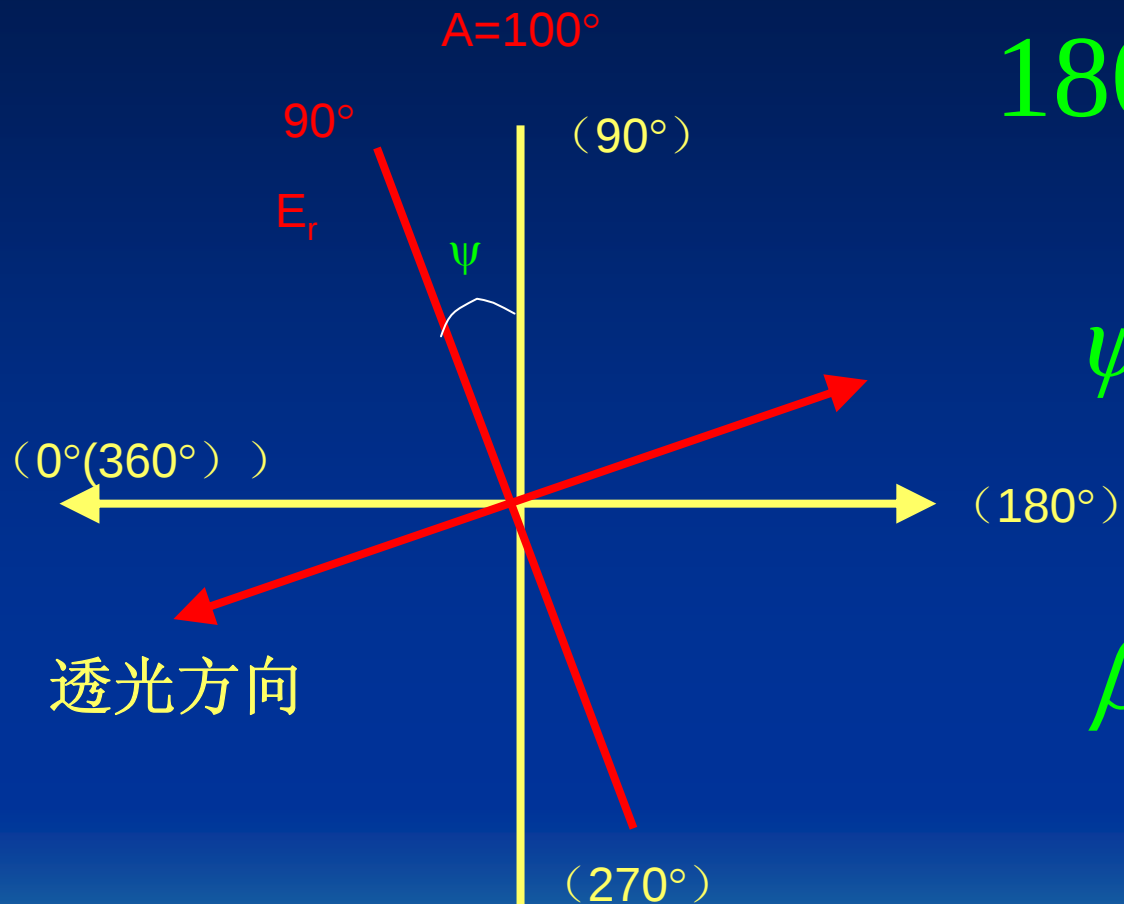
操作示意图2



检偏器读数图



检偏器 A 值



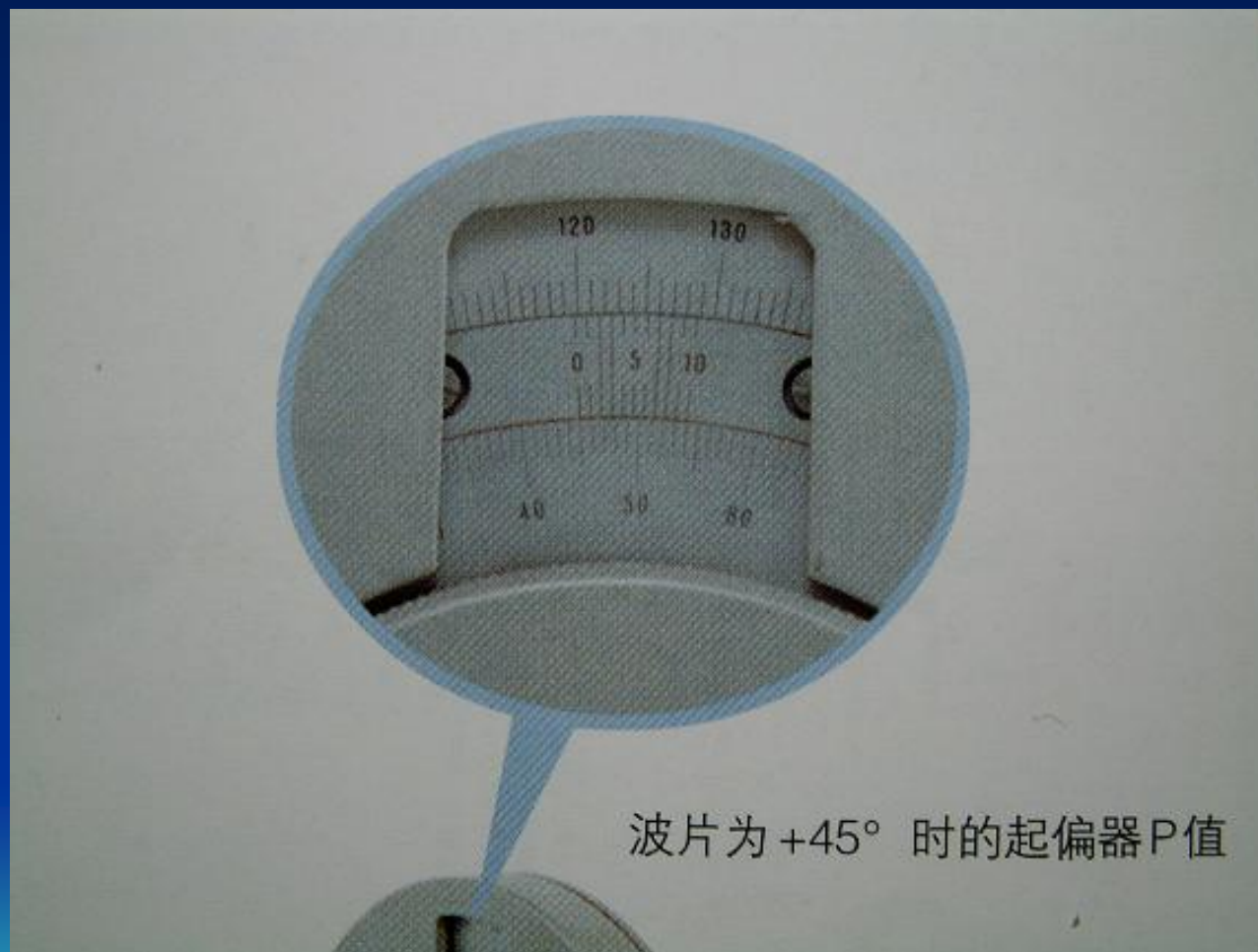
$$180^\circ > A > 90^\circ$$

$$\psi = A - 90^\circ$$

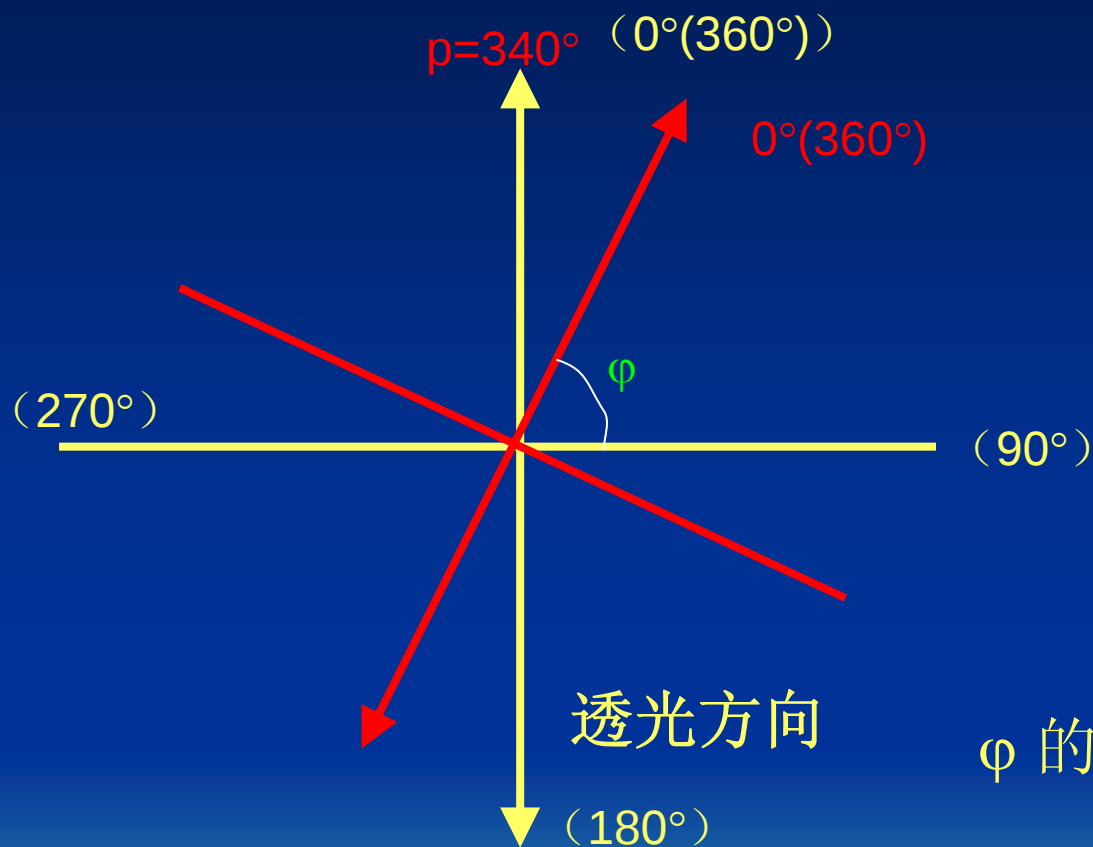
$$\beta_r = 180^\circ$$

透光方向

起偏器读数图



起偏器的表观刻度P与椭圆参数的关系

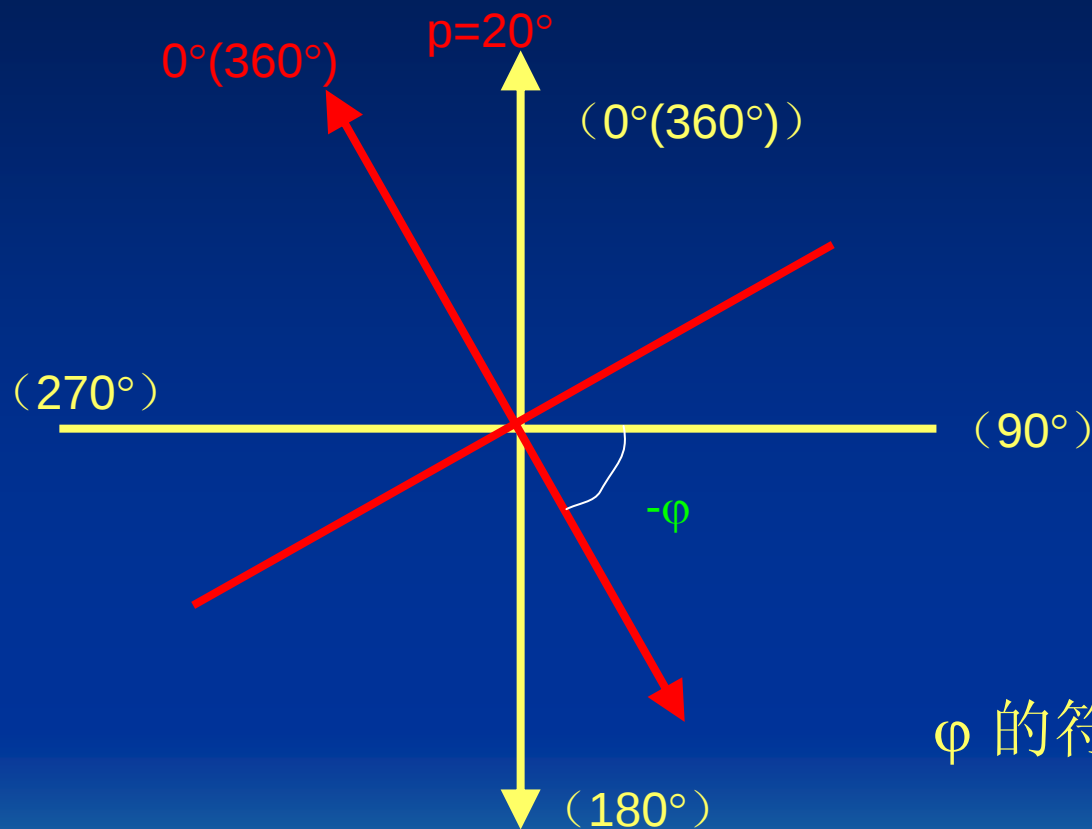


$$360^\circ > p > 180^\circ$$

$$\varphi = p - 270^\circ$$

φ 的符号正负规定如前说明

透光方向



$$180^\circ > p > 0^\circ$$

$$\varphi = p - 90^\circ$$

φ 的符号正负规定如前说明

由表观读数求椭圆参数

$$\overline{\psi} = \frac{1}{4}(A_1 - A_2 + A_3 - A_4)$$

$$\overline{\Delta} = 90^\circ + \frac{1}{2}(\varphi_3 + \varphi_4) - \frac{1}{2}(\varphi_1 + \varphi_2)$$

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \varphi_4$ 与 p_1, p_2, p_3, p_4 的关系由前面公式决定

数据处理方法

计算机程序处理

- 查表法
- 绘图法
- 迭代法

查表法

- 按理论公式计算好 (n_2 、 d — ψ_c 、 Δ_c) 制成表文件
- 输入测量得出的 ψ_m 、 Δ_m 计算

$$\varepsilon = (\psi_m - \psi_c)^2 + (\Delta_m - \Delta_c)^2$$

- 找出 ε 为最小的值的 (ψ_c 、 Δ_c) 所对应的 n_2 、 d

绘图法

- 根据理论公式计算 (n_2 、 d — ψ_c 、 Δ_c) 制成等折射率和等厚度表文件
- 根据输入的制图条件，绘出等厚度和等折射率曲线，通过设置作图的坐标实现局部放大和缩小，
- 利用将测量的 (ψ_m 、 Δ_m) 值与图中 (ψ_c 、 Δ_c) (理论曲线与实验值相交或很接近) 逐步逼近的方法得到(ψ_c 、 Δ_c)所对应的 n_2 、 d

迭代法

$$\tan\psi \exp(i\Delta) = f(n_2, \phi_1, n_3, d, \lambda) = f(n_2, d)$$

$$\begin{cases} R(n_2, d) - \tan \psi \cos \Delta = 0 \\ I(n_2, d) - \tan \psi \sin \Delta = 0 \end{cases}$$

解非线性方程组的牛顿迭代法

$$\left\{ \begin{array}{l} n_2(k+1) = n_2(k) + \frac{1}{J} \begin{vmatrix} \frac{\partial R}{\partial d}, (R - \tan \psi \cos \Delta) \\ \frac{\partial I}{\partial d}, (I - \tan \psi \sin \Delta) \end{vmatrix} \\ d(k+1) = d(k) + \frac{1}{J} \begin{vmatrix} (R - \tan \psi \cos \Delta), \frac{\partial R}{\partial n} \\ (I - \tan \psi \sin \Delta), \frac{\partial I}{\partial n} \end{vmatrix} \end{array} \right.$$

$$J = \begin{vmatrix} \frac{\partial R}{\partial n} & \frac{\partial R}{\partial d} \\ \frac{\partial I}{\partial n} & \frac{\partial I}{\partial d} \end{vmatrix}$$

膜厚的周期与厚膜的测量方法

- 薄膜厚度的周期:

$$\therefore \delta = \frac{4\pi}{\lambda} d n_2 \cos \varphi_2 = 2m\pi (m = 1, 2, 3, \dots)$$

$$\therefore d_T = \frac{\lambda}{2n_2 \cos \varphi_2}$$

利用改变入射角的方法

$$\therefore d_{\text{测量1}} = d_{\text{真实}} - m_1 d_{T1}$$

$$\therefore d_{\text{测量2}} = d_{\text{真实}} - m_2 d_{T2}$$

$$\therefore d_{\text{测量2}} - d_{\text{测量1}} = m_1 d_{T1} - m_2 d_{T2}$$

总结

- 掌握椭偏法的测量原理——利用反射光的偏振特性。
- 了解反射型椭偏仪的基本结构。
- 掌握反射型椭偏仪测量薄膜厚度的方法和基本概念：等幅椭圆偏振光的产生、
- 菲涅尔公式、薄膜表面的反射光的多光束干涉、四分之一波片的使用、起偏器和检偏器等。

谢谢大家！