

近代物理实验报告 3.1：椭偏光法测量薄膜的厚度和折射率

林杨 211840092 物理学院

2024 年 10 月 31 日

1 引言

椭圆偏振测量法，简称椭偏光法，是测量研究介质表面界面或薄膜光学特性的一种重要光学方法。它是将一束偏振光非垂直地投射到被测样品表面，有由观察反射光或透射光的偏振状态的变化来推知样品的光学特性。例如薄膜的厚度，材料的复折射率等。这种测量方法的优点是测量精度非常高，而且对样品是非破坏性的，它可以测量出薄膜厚度约 0.1nm 的变化。因此可以用于表面界面的研究。也可用于准单原子层开始的薄膜生长过程的实时自动检测。

椭偏光法的应用范围广泛，自然界中普遍存在各种各样的薄膜和 i 二面，人工制备薄膜的种类也越来越多，因此椭偏光法应用于物理、化学、表面科学、材料科学、生物科学以及有关光学、微电子、机械、冶金和生物医学等领域中。在材料科学中椭偏测量常用来测量各种功能介质薄膜、硅上超薄氧化层以及超薄异质层生长的实时监控、溅射过程的实时监控等。

自 1945 年罗申 (A. Rothen) 描述了用以测量薄膜表面光学性质的椭偏仪来，随着科学技术的迅速发展，椭偏光法发展很快，椭偏仪的制造水平也不断提高，特别是使用计算机处理复杂繁冗的而太平洋测量数据后使测量快捷简便了许多。

2 实验目的

1. 了解椭偏光法测量原理和实验方法。
2. 熟悉椭偏光仪器的结构和调试方法。
3. 测量介质薄膜样品的厚度和折射率，以及硅的消光系数和复折射率。

3 实验仪器

椭圆偏振仪。本实验使用的手动型椭偏仪 (TP-77 型) 如图 (! 椭偏仪!) 所示一起采用 632.8nm 的波长 He-Ne 激光器作为单色光源，入射角和反射角均在 90° 内自由调节，样品台可绕纵轴旋转，其高度和水平可以调节。检偏器旁边有一个观察窗，窗下的旋钮用以改变经检偏器出射的光或射向观察窗或射向光电倍增管。为了保护光电倍增管，该旋钮应经常放在观察窗位置。

4 实验原理

本实验介绍反射型椭偏光测量方法。其基本原理是用一束椭偏光照射在薄膜样品上，光在介质的交界面发生多次反射和折射，反射光的振幅和相位发生变化，这些变化与薄膜的厚度和光学参数 (折射率、消光系数等) 有关，因此只要测出反射光偏振状态的变化，就可以推出薄膜的厚度和折射率等。

4.1 椭圆偏振方程

在一光学材料上镀各向同性的单层介质膜后，光线的反射和折射在一般情况下会同时存在的。通常，设介质层为 n_1 、 n_2 、 n_3 ， ϕ_1 为入射角，那么在 1、2 介质交界面和 2、3 介质交界面会产生反射光和折射光的多光束干涉，如图 1。

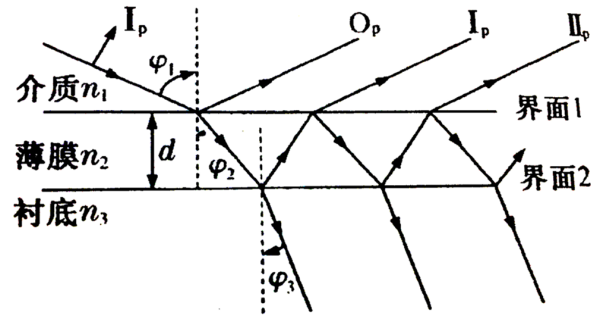


图 1: 多光束干涉示意图

这里我们用 2δ 表示相邻两分波的相位差，其中 $\delta = \frac{2\pi d n_2}{\lambda} \cos \phi_2$ ，用 r_{1p} 、 r_{1s} 表示光线的 p 分量、s 分量在界面 1、2 间的反射系数，用 r_{2p} 、 r_{2s} 表示光线的 p 分量、s 分量在界面 2、3 间的反射系数。由多光束干涉的复振幅计算可知：

$$E_{rp} = \frac{r_{1p} + r_{2p}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p}r_{2p}e^{-i2\delta}} E_{ip},$$

$$E_{rs} = \frac{r_{1s} + r_{2s}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s}r_{2s}e^{-i2\delta}} E_{is}.$$

其中 E_{ip} 和 E_{is} 分别代表入射光波电矢量的 p 分量和 s 分量， E_{rp} 和 E_{rs} 分别代表反射光波电矢量的 p 分量和 s 分量。现将上述 E_{ip} 、 E_{is} 、 E_{rp} 、 E_{rs} 四个量写成一个量 G ，即：

$$G = \frac{E_{rp}/E_{rs}}{E_{ip}/E_{is}} = \tan \Psi e^{i\Delta} = \frac{r_{1p} + r_{2p}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p}r_{2p}e^{-i2\delta}} \frac{r_{1s} + r_{2s}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s}r_{2s}e^{-i2\delta}}.$$

我们定义 G 为反射系数比，它应为一个复数，可用 $\tan \Psi$ 和 Δ 表示它的模和幅角。上述公式的过程量转换可由菲涅耳公式和折射公式给出：

$$\begin{cases} r_{1p} = (n_2 \cos \phi_1 - n_1 \cos \phi_2) / (n_2 \cos \phi_1 + n_1 \cos \phi_2) \\ r_{2p} = (n_3 \cos \phi_2 - n_2 \cos \phi_3) / (n_3 \cos \phi_2 + n_2 \cos \phi_3) \\ r_{1s} = (n_1 \cos \phi_1 - n_2 \cos \phi_2) / (n_1 \cos \phi_1 + n_2 \cos \phi_2) \\ r_{2s} = (n_2 \cos \phi_2 - n_3 \cos \phi_3) / (n_2 \cos \phi_2 + n_3 \cos \phi_3) \\ 2\delta = 4\pi d n_2 \cos \phi_2 / \lambda \\ n_1 \cos \phi_1 = n_2 \cos \phi_2 = n_3 \cos \phi_3 \end{cases}$$

G 是变量 n_1 、 n_2 、 n_3 、 d 、 λ 、 ϕ_1 的函数 (ϕ_2 、 ϕ_3 可用 ϕ_1 表示)，即 $\Psi = \tan^{-1} f$ ， $\Delta = \arg |f|$ ，称 Ψ 和 Δ 为椭圆参数，上述复数方程表示两个等式方程：

$$\begin{aligned}\operatorname{Re}\{\tan \Psi e^{i\Delta}\} &= \operatorname{Re}\left\{\frac{r_{1p} + r_{2p}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p}r_{2p}e^{-i2\delta}} \frac{r_{1s} + r_{2s}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s}r_{2s}e^{-i2\delta}}\right\} \\ \operatorname{Im}\{\tan \Psi e^{i\Delta}\} &= \operatorname{Im}\left\{\frac{r_{1p} + r_{2p}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1p}r_{2p}e^{-i2\delta}} \frac{r_{1s} + r_{2s}e^{-i2\delta}}{1 + r_{1s}r_{2s}e^{-i2\delta}}\right\}\end{aligned}$$

若能从实验测出 Ψ 和 Δ 的话，原则上可以解出 n_2 和 d (n_1 、 n_3 、 λ 、 ϕ_1 已知)，根据公式 (4)~(9)，推导出 Ψ 和 Δ 与 r_{1p} 、 r_{1s} 、 r_{2p} 、 r_{2s} 、和 δ 的关系：

$$\begin{aligned}\tan \Psi &= \left[\frac{r_{1p}^2 + r_{2p}^2 + 2r_{1p}r_{2p} \cos 2\delta}{1 + r_{1p}^2r_{2p}^2 + 2r_{1p}r_{2p} \cos 2\delta} \cdot \frac{1 + r_{1s}^2r_{2s}^2 + 2r_{1s}r_{2s} \cos 2\delta}{r_{1s}^2 + r_{2s}^2 + 2r_{1s}r_{2s} \cos 2\delta} \right]^{1/2}, \\ \Delta &= \tan^{-1} \frac{-r_{2p}(1 - r_{1p}^2) \sin 2\delta}{r_{1p}(1 + r_{2p}^2) + r_{2p}(1 + r_{1p}^2) \cos 2\delta} - \tan^{-1} \frac{-r_{2s}(1 - r_{1s}^2) \sin 2\delta}{r_{1s}(1 + r_{2s}^2) + r_{2s}(1 + r_{1s}^2) \cos 2\delta}\end{aligned}$$

由上式经计算机运算，可制作数表或计算程序。这就是椭圆仪测量薄膜的基本原理。若 d 是已知， n_2 为复数的话，也可求出 n_2 的实部和虚部。那么，在实验中是如何测定 Ψ 和 Δ 的呢？现用复数形式表示入射光和反射光：

$$\tilde{E}_{ip} = |E_{ip}|e^{i\beta_{ip}}, \tilde{E}_{is} = |E_{is}|e^{i\beta_{is}}, \tilde{E}_{rp} = |E_{rp}|e^{i\beta_{rp}}, \tilde{E}_{rs} = |E_{rs}|e^{i\beta_{rs}}$$

所以：

$$G = \tan \Psi e^{i\Delta} = \frac{|E_{rp}/E_{rs}|}{|E_{ip}/E_{is}|} e^{i((\beta_{rp}-\beta_{rs})-(\beta_{ip}-\beta_{is}))}$$

其中：

$$\begin{aligned}\tan \Psi &= \frac{|E_{rp}/E_{rs}|}{|E_{ip}/E_{is}|}, \\ e^{i\Delta} &= e^{i((\beta_{rp}-\beta_{rs})-(\beta_{ip}-\beta_{is}))}.\end{aligned}$$

这时需测四个量，即分别测入射光中的两分量振幅比和相位差及反射光中的两分量振幅比和相位差，如设法使入射光为等幅椭圆偏光， $E_{ip}/E_{is} = 1$ ，则 $\tan \Psi = |E_{rp}/E_{rs}|$ ；对于相位角，有：

$$\Delta = (\beta_{rp} - \beta_{rs}) - (\beta_{ip} - \beta_{is}) \Rightarrow \Delta + \beta_{ip} - \beta_{is} = \beta_{rp} - \beta_{rs}.$$

因为入射光 β_{ip} 和 β_{is} 连续可调，调整仪器，使反射光成为线偏光，即 $\beta_{rp} - \beta_{rs} = 0$ 或 π ，则 $\Delta = -(\beta_{ip} - \beta_{is})$ 或 $\Delta = \pi - (\beta_{ip} - \beta_{is})$ ，可见 Δ 只与反射光的 p 波和 s 波的相位差有关，可从起偏器的方位角算出。对于特定的膜， Δ 是定值，只要改变入射光两分量的相位差 ($\beta_{ip} - \beta_{is}$)，肯定会找到特定值使反射光成线偏光， $\beta_{rp} - \beta_{rs} = 0$ 或 π 。

4.2 实际检测方法

等幅椭圆偏振光的获得 (实验光路如图 2)，平面偏振光通过四分之一波片，使得具有 $\pm\pi/4$ 相位差，使入射光的振动平面和四分之一波片的主截面成 45° 。

4.3 反射光的检测

将四分之一波片置于其快轴方向 f 与 x 方向的夹角 α 为 $\pi/4$ 的方位， E_0 为通过起偏器后的电矢量， P 为 E_0 与 x 方向间的夹角。通过四分之一波片后， E_0 沿快轴的分量与沿慢轴的分量比较，相位上超前 $\pi/2$ 。

$$\begin{cases} E_f = E_0 e^{i\pi/2} \cos(P - \pi/4) \\ E_s = E_0 \sin(P - \pi/4) \end{cases}$$

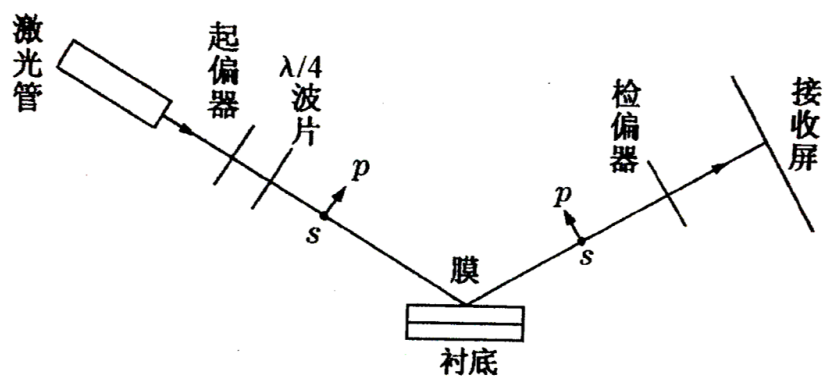


图 2: 椭圆偏测厚仪光路图

在 x 轴、 y 轴上的分量为:

$$E_x = E_f \cos \pi/4 - E_s \sin \pi/4 = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 e^{i\pi/2} e^{i(P-\pi/4)},$$

$$E_y = E_f \sin \pi/4 + E_s \cos \pi/4 = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 e^{i\pi/2} e^{-i(P-\pi/4)}.$$

由于 x 轴在入射面内，而 y 轴与入射面垂直，故 E_x 就是 E_{ip} ， E_y 就是 E_{is} 。

$$E_{ip} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 e^{i(\pi/4+P)},$$

$$E_{rp} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_0 e^{-i(\pi/4+P)}.$$

由此可见，当 $\alpha = \pi/4$ 时，入射光的两分量的振幅均为 $E_0/\sqrt{2}$ ，它们之间的相位差为 $2P - \pi/2$ ，改变 P 的数值可得到相位差连续可变的等幅椭圆偏振光。这一结果写成：

$$|E_{ip}/E_{is}| = 1, \beta_{ip} - \beta_{is} = 2P - \pi/2.$$

5 实验内容

测量硅衬底上二氧化硅 (SiO_2) 薄膜的厚度和折射率。

1. 仪器开机预热
2. 入射角度设置
3. 样品放置和调整
4. 样品测量
5. 数据分析
6. 结果输出
7. 仪器关机

6 实验数据

实验全程按照计算机所集成的程序进行操作，测得的实验数据如表 (1)。

表 1: 实验数据

膜厚 (nm)	折射率 n	MSE	波长 (nm)	入射角 (deg)
97.23	1.5028	3.32×10^{-3}	632.8	69.89
$\Phi_{\text{exp}}(\text{deg})$	$\Delta_{\text{exp}}(\text{deg})$	$\Phi_{\text{mod}}(\text{deg})$	$\Delta_{\text{mod}}(\text{deg})$	
41.991	76.320	41.9919	76.3232	

7 思考题

7.1 椭偏参数 Ψ, Δ 的物理含义是什么？消光时，它们与起偏器、检偏器方位角 P, A 之间由什么样的表达式？

消光时，我们已经通过调节仪器简化了 Δ ， $\Delta = 270 - 2P$ 。而 $\tan \Psi = (\frac{I_p}{I_s})_r$ ，也就是分母为 1，直接反映检偏器的方位角。故 $\Psi = |A|$ 。

7.2 椭偏测量中，若被测量薄膜厚度超过一个周期，试提出确定周期数的其他方法。

7.3 试分析本实验测量中系统误差的来源。

- 实验通过进步长的方式寻找消光点，根据步长选择的不同，确定消光点的位置会发生变化。步长选择的越小，消光点的位置确定的越准确。
- 实验中薄膜的状态不佳。实验时观察到薄膜的表面有明显的指纹印，这会影响激光在膜表面的反射和折射。

参考文献

[1] 黄润生. 近代物理实验. 南京大学出版社, 2 edition, 2008.