

实验 19 椭偏仪测量薄膜厚度和折射率

当样品对光存在着强烈吸收（如金属）或者待测薄膜厚度远远小于光的波长时，通常用来测量折射率的几何光学方法和测量薄膜厚度的干涉法均不再适用。这里介绍一种用反射型椭偏仪测量折射率和薄膜厚度的方法。用反射型椭偏仪可以测量金属的复折射率，并且可以测量很薄的薄膜（几十埃），当把它安装在超高真空系统上时，可对从准单原子层开始的薄膜生长过程和其反过程——薄膜的溅射刻蚀过程进行即时监测。反射型椭偏仪又称为表面椭偏仪，它在表面科学研究中是一个很重要的工具。

[预习提要]

- (1)、椭偏仪的结构和使用方法是怎样的？
- (2)、椭偏仪的基本原理是什么？
- (3)、椭偏仪的用途和特点是什么？

[实验要求]

- (1)、进一步掌握椭偏仪的基本原理。
- (2)、熟悉椭偏仪的结构和操作方法。
- (3)、掌握处理实验数据的查表方法。

[实验目的]

- (1) 测量玻璃基底上的薄膜的厚度和折射率。
- (2) 测量金属的复折射率。

[实验器材]

椭偏仪整机、激光电源、6-8 伏变压器、 $(\Delta; \psi) \sim (n; a)$ 关系表。

[实验原理]

反射型椭偏仪的基本原理是，用一束椭圆偏振光做为探针照射到样品上，由于样品对入射光中平行于入射面的电场分量（以下简称 P 分量）和垂直于入射面的电场分量（以下简称 S 分量）有不同的反射、透射系数，因此从样品上出射的光，其偏振状态相对于入射光要发生变化。

一、测量原理

如图 5-19-1 所示，入射光可分为 E_{IS} 和 E_{IP} 两个分量，经过折射和反射之后，总的

$$\text{反射光也可分为 } E'_S \text{ 和 } E'_P \text{ 两个分量。} \begin{cases} E'_S = E'_{1S} + E'_{2S} + E'_{3S} + \dots \\ E'_P = E'_{1P} + E'_{2P} + E'_{3P} + \dots \end{cases} \quad (5-19-1)$$

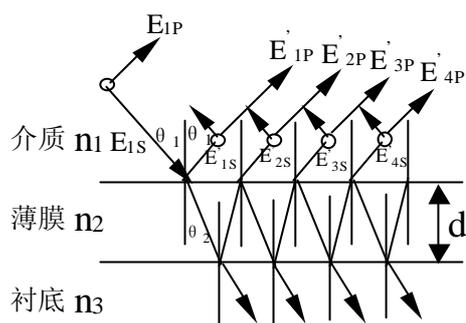


图 5-19-1 光在介质薄膜上的反射

在反射光中，相邻两束光之间的位相差为： $2\delta = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 d \cos \theta_2$

设 $\begin{cases} R_P = E'_P / E_{1P} \\ R_S = E'_S / E_{1S} \end{cases}$ R_S 、 R_P 分别称为 S 光（垂直分量）和 P 光（平行分量）的总反射系数。

$$\text{令: } \frac{R_S}{R_P} = \text{tg} \psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{E'_S}{E'_P} \cdot \frac{E_{1P}}{E_{1S}} \quad (5-19-2)$$

$\text{tg} \psi \cdot e^{i\Delta}$ 称为反射系数比， $\text{tg} \psi$ 相当于模，规定 ψ 在 $0 - \pi/2$ 之间取值。

R_S 和 R_P 的比值反映了与反射有关的光学参量信息，通过测量 ψ 、 Δ ，可以测量出 α 和 n_2 等参数。

反射系数比的椭偏测量法的光路如图 5-19-2 所示，图中 X、X' 轴在入射面内且分别垂直于入射光和反射光的行进方向。Y、Y' 垂直于入射面。

单色光经起偏器以后成为线偏振光， $\lambda/4$ 波片与 X 轴成 45° 夹角，以获得等幅椭圆偏入射光。反射线偏振光 E' 的正方向可由检偏器测出。

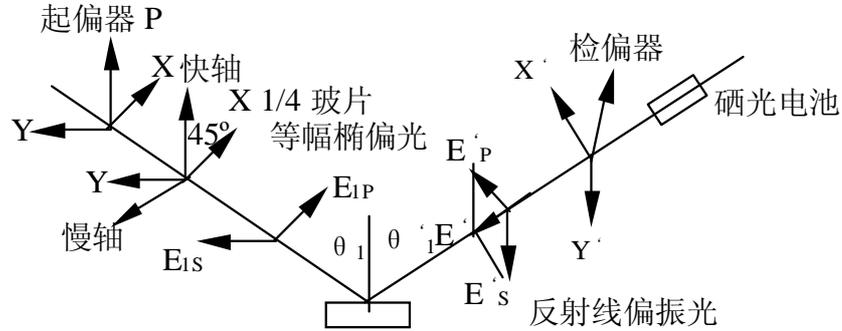


图 5-19-2 反射椭圆偏仪的基本光路图

在图 5-19-3 中, E_o 为单色光经起偏器以后的线偏振光, E_o 经过与 P 平面成 45° 角的 $\lambda/4$ 波片以后, 在其快慢轴上分量为:

$$\begin{cases} E_{\text{快}} = E_o e^{i\frac{\pi}{2}} \cdot \cos(P - 45^\circ) \\ E_{\text{慢}} = E_o \sin(P - 45^\circ) \end{cases} \quad (5-19-3)$$

这两个分量分别在 X、Y 轴上投影合成 E_X 、 E_Y , 即是 E_{1P} 和 E_{1S} 。

$$\begin{aligned} E_{1P} = E_X &= E_{\text{快}} \times \cos 45^\circ - E_{\text{慢}} \times \sin 45^\circ \\ &= \frac{\sqrt{2}}{2} E_o \left[e^{i\frac{\pi}{2}} \cos(P - 45^\circ) - \sin(P - 45^\circ) \right] \end{aligned}$$

$$\begin{cases} E_{1P} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_o e^{i\frac{\pi}{2}} \cdot e^{i(P-45^\circ)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_o e^{i(\frac{\pi}{4}+P)} \\ E_{1S} = E_Y = \frac{\sqrt{2}}{2} E_o e^{i\frac{\pi}{2}} \cdot e^{-i(P-45^\circ)} = \frac{\sqrt{2}}{2} E_o e^{i(\frac{3\pi}{4}-P)} \end{cases} \quad (5-19-4)$$

从 (5-19-4) 式可知, E_{1P} 和 E_{1S} 位相差为 $2P - \pi/2$, 振幅为 $\frac{\sqrt{2}}{2} |E_o|$, 即为所需的等幅椭圆偏振光。

如果 $\lambda/4$ 波片的快轴与 X 成 -45° 夹角, 同样也可获得等幅椭圆偏光, 此时振幅仍为

$$\frac{\sqrt{2}}{2} |E_o|, \text{ 位相差变为 } \frac{\pi}{2} - 2P。$$

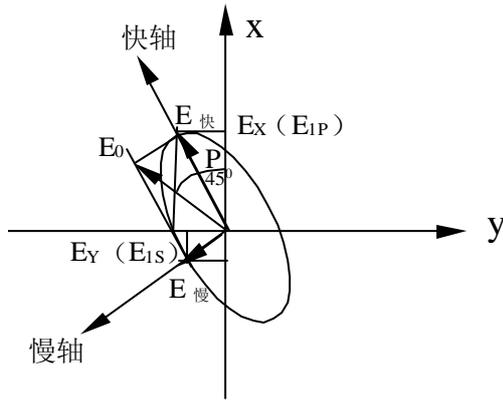


图 5-19-3 等幅椭圆偏光的获得

当由 (5-19-4) 式给出的椭圆偏振光以 θ_1 的入射角入射到待测样品的表面后, 则反射后总的 E_P' 和 E_S' 分量为:

$$\begin{cases} E_P' = |E_P'| e^{i\beta} P' \\ E_S' = |E_S'| e^{i\beta} S' \end{cases} \quad (5-19-5)$$

根据公式 (5-19-2)、(5-19-4)、(5-19-5) 则有

$$\begin{cases} \operatorname{tg} \psi = \frac{|E_S'|}{|E_P'|} \dots\dots (5-19-6) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Delta = (\beta_S' - \beta_P') + (2P - \frac{\pi}{2}) \dots\dots (5-19-7) \end{cases}$$

我们希望反射光成为线偏振光, 即 E_S' 和 E_P' 的位相差为 $K\pi$ 取主值有:

$$\beta_S' - \beta_P' = \begin{cases} \pi \\ 0 \end{cases} \quad (5-19-8)$$

所以, 转动起偏器总可以找到某个方向角, 使反射光成为线偏振光, 即当

$$\Delta = \begin{cases} 2P - \frac{\pi}{2} \\ 2P + \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (5-19-9)$$

时, 起偏器转到 P 方位角时, 可使经过样品的反射光成为线偏振光, 因此由起偏器的方位角 P 便可确定 Δ , 至于经样品反射后的线偏振光的方向是由 (5-19-6) 式确定的。利用检偏器, 转动其方位, 当检偏器方位角 A 与反射线偏振光振动方向垂直时, 光束不能通过, 出现消光, 此时

$$A = \operatorname{tg}^{-1} \frac{R_S}{R_P} = \psi \quad (5-19-10)$$

因此, 利用检偏器的方位角 A 便可确定 ψ 。

具体分析如下:

为方便起见, 假定 A 角的取值在 I、IV 象限。

1、 $\beta_S' - \beta_P' = 0$

使上式成立的 P 角记为 P_1 ，如图 5-19-3 所示，合成线偏振光 E' 位于 XOY 右手坐标系的 II、IV 象限，所以 A 在第 I 象限，记为 A_1 。即

$$\begin{cases} \psi = A_1 \cdots \cdots (5-19-12) \\ \Delta = 2P_1 - \frac{\pi}{2} \cdots \cdots (5-19-13) \end{cases}$$

2、 $\beta'_s - \beta'_p = \pi$

使上式成立的 P 角记为 P_2 ， E' 位于 I、III 象限内，A 位于第 IV 象限内，记为 A_2 。即

$$\begin{cases} \psi = -A_2 \\ \Delta = \frac{\pi}{2} + 2P_2 \end{cases} \quad (5-19-14)$$

为方便起见，给出表 5-19-1。

表 5-19-1

A_1P_1 组	A_2P_2 组
$\frac{\pi}{2} > A_1 > 0$ 为判据	$0 > A_2 > -\frac{\pi}{2}$ 为判据
$\psi = A_1$ $\Delta = 2P_1 - \frac{\pi}{2}$	$\psi = -A_2$ $\Delta = \frac{\pi}{2} + 2P_2$

同时，我们还可以注意到如下的关系式：

$$\begin{cases} A_1 = -A_2 \\ P_1 - P_2 = \frac{\pi}{2} \end{cases} \quad (5-19-15)$$

从前面的推导分析可知，要从 (ψ, Δ) 的函数关系推出所对应的 (n_2, α) 的关系是很困难的。通常我们都是先计算制作 $(\psi, \Delta) \sim (n_2, \alpha)$ 数据表，然后通过查表来求得对应的 (n_2, α) ，或者用计算机辅助计算。

二、对具有复折射率基底的薄膜的测量

在自然界中，许多物质对光都具有吸收性，对于这类物质的折射率，我们通常用复折射率 \hat{n} 来表示：

$$\hat{n} = n(1 - ik) \quad (5-19-16)$$

其中的虚部表示物质的吸收性。

通过对光在具有吸收性的物质上的反射和折射现象的理论分析可知，折射定律和反射定律仍然成立

$$\sin \theta_\tau = \frac{n_i}{\hat{n}} \cdot \sin \theta_i = \frac{n_i \sin \theta_i}{n - iKn} \quad (5-19-17)$$

在这里 θ_τ 并不是简单的代表折射角， $\sin \theta_\tau$ 是一个复数，椭偏法测量反射系数比的原理对复折射率也是适用的。所以我也可以测量在具有吸收基底上的薄膜的参数，这使得这一测量法又广泛地用于半导体领域。

三、金属复折射率的测量

设光束由实折射率 n_1 的物质以 θ_1 角入射到金属表面，金属的复折射率为 \hat{n}_2 ，复折射角为 $\hat{\theta}_2$ ，由 (5-19-17) 式：

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (5-19-18)$$

$$\text{或：} \quad \hat{n}_2 \cos \hat{\theta}_2 = \sqrt{\hat{n}_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1} \quad (5-19-19)$$

由于金属表面仅有一次反射，而无折射，根据菲涅耳公式可以得到

$$\text{tg}\psi \cdot e^{i\Delta} = \frac{R_s}{R_p} = -\frac{\cos(\theta_1 - \hat{\theta}_2)}{\cos(\theta_1 + \hat{\theta}_2)}$$

$$\text{即有：} \quad \frac{1 + \text{tg}\psi e^{i\Delta}}{1 - \text{tg}\psi e^{i\Delta}} = \frac{\sin \theta_1 \sin \theta_2}{\cos \theta_1 \cos \theta_2} = \frac{\hat{n}_2 \sin \hat{\theta}_2 \text{tg}\theta_1}{\hat{n}_2 \cos \hat{\theta}_2} = \frac{n_1 \sin \theta_1 \text{tg}\theta_1}{\sqrt{\hat{n}_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}}$$

$$\frac{1 + \text{tg}\psi e^{i\Delta}}{1 - \text{tg}\psi e^{i\Delta}} = \frac{1 + \text{tg}^2\psi + 2\text{tg}\psi \cos \Delta}{1 - \text{tg}^2\psi - 2i\text{tg}\psi \sin \Delta} = \frac{1 + \sin 2\psi \cos \Delta}{\cos 2\psi - i \sin 2\psi \sin \Delta} \quad (5-19-20)$$

$$\text{即：} \quad \sqrt{\hat{n}_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1} = \frac{n_1 \sin \theta_1 \cdot \text{tg}\theta_1 \cos 2\psi}{1 + \sin 2\psi \cos \Delta} - i \frac{n_1 \sin \theta_1 \text{tg}\theta_1 \sin 2\psi \sin \Delta}{1 + \sin 2\psi \cos \Delta} \quad (5-19-21)$$

$$\hat{n}_2 = N_2 - iN_2 \cdot \kappa \quad (5-19-22)$$

$$\text{令} \quad \sqrt{\hat{n}_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1} = a - ib \quad (5-19-23)$$

代入 (5-19-22) 解得：

$$\begin{cases} N_2 = \sqrt{\frac{\sqrt{A^2 + B^2} + A}{2}} \\ K = \frac{\sqrt{A^2 + B^2} - A}{B} \\ A = a^2 - b^2 + n_1^2 \sin^2 \theta_1 \\ B = 2ab \end{cases} \quad (5-19-24)$$

将 (5-19-23) 代入 (5-19-21) 得：

$$\begin{cases} a = \frac{n_1 \sin \theta_1 \text{tg}\theta_1 \cos 2\psi}{1 + \sin 2\psi \cos \Delta} \\ b = \frac{n_1 \sin \theta_1 \text{tg}\theta_1 \sin 2\psi \sin \Delta}{1 + \sin 2\psi \cos \Delta} \end{cases} \quad (5-19-25)$$

当 \hat{n}_2 的实部 $N_2^2(1 - K^2)$ 比 $n_1^2 \sin^2 \theta_1$ 大得多时，可取近似公式：

$$\sqrt{\hat{n}_2^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1} \approx \hat{n}_2$$

则有： $N_2 \approx a$ $N_2 K \approx b$

$$\text{即：} \begin{cases} N_2 = \frac{n_1 \sin \theta_1 \operatorname{tg} \theta_1 \cos 2\psi}{1 + \sin 2\psi \cos \Delta} \\ K = \operatorname{tg} 2\psi \sin \Delta \end{cases} \quad (5-19-26)$$

上式是求金属复折射率的近似公式。

[实验内容]

实验采用了 JT75-1 型激光椭偏测厚仪，实验装置如图 4 所示，激光器光源波长： $\lambda = 6328\text{\AA}$ 。

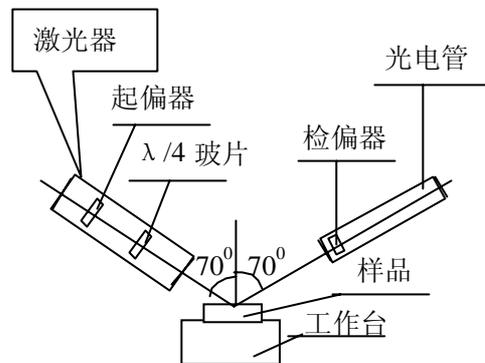


图 5-19-4 椭偏测厚仪的主要部件

(一)、仪器调整

- 1、 分别将左、右光管调 70° 位置（入射角=反射角= 70° ）。
- 2、 将被测样品放于工作台上。
- 3、 开启激光电源，按下“ I ”键（切勿按下 II 键，以免烧坏激光及电源）。
- 4、 调整激光电流 3mA 至 9mA 左右。
- 5、 调整工作台，使反射光线进入光管（可暂时去掉硅光电池外套用半透明白纸放于圆孔上检查或用检流计检查）。
- 6、 将仪器底板后部小插头插入小变压器 6 伏处，照亮光学度盘。

(二)、读数方法

起偏器度盘刻度 $0 \sim 180^\circ$ ，共 180 个分度，游标刻线 10 分度，图 5-19-5 (a) 所示应读 96.2° 。

$\lambda/4$ 波片度盘刻线为 $\pm 90^\circ$ ，共 180 个分度，游标刻线 ± 10 分度，图 5-19-5 (b) 应该 44.3° 图 5-19-5 (c) 应该 -38.7° 。

检偏器度盘刻线及读数方式与 $\lambda/4$ 波片度盘相同。

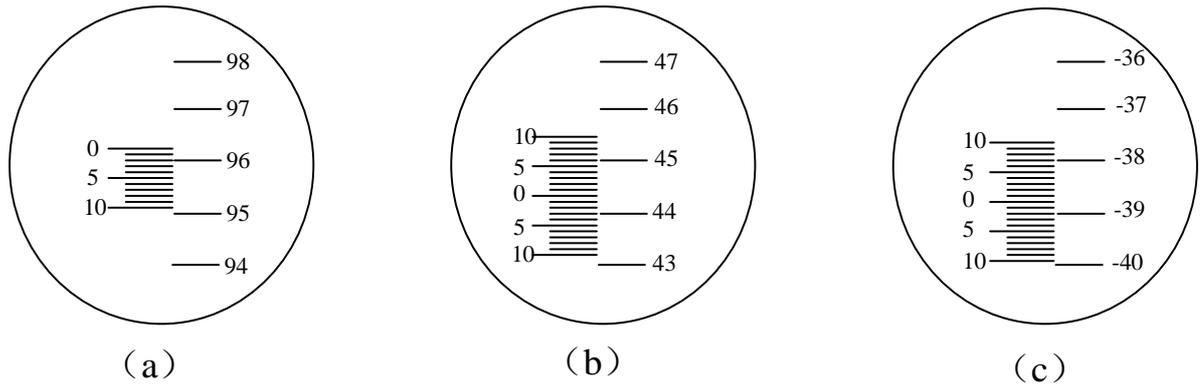


图 5-19-5 椭偏仪读数示例

(三)、测量方法

(1)、把被测样片放在工作台上，调整好位置，供激光束照在样片上，并检查样片的反射光是否进入反射光管，入射角和反射角是否分别成 56.5° (玻璃衬底)。

(2)、规定 P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 表示消光时起偏器的方位角， ψ_1 、 ψ_2 、 ψ_3 、 ψ_4 表示消光时检偏器方位角。

(3) 首先转动 $1/4$ 波片，在其零读数的基础上转过 45° 角，然后转动起偏器和检偏器，找出消光的角度 (即平衡指示仪指示最小的位置)。

为消减误差，测量时按四步进行：

第一步： P_1 在 $0 \sim 180^\circ$ ， ψ_1 在 $0 \sim 90^\circ$ 范围内，转动起偏器和检偏器，找出消光角度。

第二步： P_2 在 $0 \sim 180^\circ$ ， ψ_2 在 $0 \sim -90^\circ$ 范围内，转动起偏器和检偏器，找出消光角度。

再使 $1/4$ 波片在零读数的基础上转到 -45° 角，再进行以下步骤：

第三步： P_3 在 $0 \sim 180^\circ$ ， ψ_3 在 $0 \sim 90^\circ$ 范围内，转动起偏器和检偏器，找出消光角度。

第四步： P_4 在 $0 \sim 180^\circ$ ， ψ_4 在 $0 \sim -90^\circ$ 范围内，转动起偏器和检偏器，找出消光角度。

可发现 $|P_1 - P_2| \approx |P_3 - P_4| \approx 90^\circ$

$$\psi_1 \approx \psi_3 \approx -\psi_2 \approx -\psi_4$$

(四)、测量内容：

1、 测量玻璃基底上的薄膜折射率和厚度。

已知玻璃基底折射率 $n_3 = 1.52$ ，薄膜折射率为实数，厚度在第一周期内，取 $n_1 = 1$ 。

2、 测量金属的复折射率。

取 $n_1 = 1$ ，按 (26) 式近似计算。

3、 测量硅基底上的二氧化硅膜的折射率和厚度。

已知 $n_3 = 3.90 - 0.21i$ ，薄膜折射率为实数，厚度在第一周期内，取 $n_1 = 1$ 。

[数据处理]

求 Δ 方法为： P_1 、 P_2 、 P_3 、 P_4 中大于 90° 的减去 90° ，不大于 90° 的保持原值，记

为 $\{P_1\}$ ，然后求出 $\bar{p}_1 = \frac{\{p_1\} + \{p_2\}}{2}$ $\bar{p}_3 = \frac{\{p_3\} + \{p_4\}}{2}$

测椭圆开口角： $r = |\bar{p}_1 - \bar{p}_3|$

再按下表规则求出 Δ

	P_1	Δ		P_1	Δ
a	$0 \sim 45^\circ$	$360^\circ - r$	c	$90 \sim 135^\circ$	$180^\circ - r$
b	$135 \sim 180^\circ$	$180^\circ + r$	d	$45 \sim 90^\circ$	r

至于 ψ 可由下式得出

$$\psi = \frac{|\psi_1| + |\psi_2| + |\psi_3| + |\psi_4|}{4}$$

已知 Δ 和 ψ ，可查表得出厚度 a 和折射率 n 。

[思考题]

- (1) 反射型椭偏仪测量材料的折射率和薄膜的厚度时，对样品的制备有什么要求？
- (2) 举例说明椭偏仪测量中几种可能的误差来源并分析它们对测量结果的影响。

[参考文献]

1. 梁铨延. 物理光学. 杭州: 浙江大学出版社
2. 曹昌祺. 电动力学. 北京: 人民教育出版社, 1962
3. 刘乐书, 樊光汉. 近代物理实验. 成都: 电子科技大学出版社, 1998
4. 吴思诚, 王祖铨. 近代物理实验. 北京: 北京大学出版社, 1986