

光电自动补偿的椭偏仪

谢 北 星
(北京大学物理系)

提 要

本文介绍一种新的电光补偿自动椭偏仪。详细讨论了它的设计原理,并给出 SiO₂ 膜上的测量结果。这种方法可发展成为自动椭偏谱仪。

一、引 言

利用椭偏光经物质表面反射后偏振态的变化来探索物质性质的方法称椭圆偏振测量法。早在 1889 年德鲁德 (P. Drude)^[1]就在薄膜研究中采用椭圆测量法。随着计算技术的发展,椭偏术更被广泛地采用。目前,它已普遍地被应用于电子工业、标准计量、薄膜光学、集成光学、表面物理、半导体、金属、化学、生物和医学研究^[2~5]。

由于应用的需求,国外早已有多种规格型号的专用仪器生产,这类仪器统称椭偏仪。近十多年来,国内也已有多家工厂生产手动椭偏仪。此类仪器的特点是:1) 测量精度高。对薄膜的测量准确度可达 10 Å,相当于单分子层厚度,比电子显微镜的分辨力(几百埃)还高一个数量级。日本学者 K. Kinoshita 等人曾指出:椭偏仪的精度可以检测百分之几的单分子层厚度及其平均厚度值^[6]。2) 非破坏性测量。3) 能同时分别测量出多个物理量。4) 能区分不同物理效应。如在电光晶体薄膜的测量中能区分电光效应和电致伸缩效应。5) 能实现实时监控。能对一切动态过程甚至化学反应过程进行监测。

常规椭偏仪多数采用消光法和强度法原理制成。消光判读又可采用电光、磁光等方法。我们用电光晶体进行相位补偿设计了一种原理新颖的自动椭偏仪。

二、结构原理

我们以硅片上生长一层氧化硅薄膜作为被测样品来讨论这种椭偏仪的工作原理。

通常,光波经薄膜表面反射时,其 P 分量和 S 分量的反射系数不同。考虑它们的比值:

$$\frac{\tilde{r}_P}{\tilde{r}_S} = \operatorname{tg} \psi \cdot e^{i\Delta}, \quad (1)$$

其中 \tilde{r}_P 和 \tilde{r}_S 分别表示薄膜对 P 光和 S 光的反射系数。(1) 式定义了椭偏法中两个基本参量 ψ 和 Δ 。椭偏仪就是用于测量这两个基本参量的仪器。仪器结构原理图如图 1 所示。由 He-Ne 激光器发出的光经起偏器 P 后变成线偏振光。线偏振光通过电光补偿器 EOC 到待测样品 S , 由样品反射的光透过检偏器 A 最后到达光电探测器 D 。

下面用矩阵方法^[7]来分析这种椭偏仪的工作原理。大家知道,光波经过每一光学元件时,其偏振态的变化总可以用一个 4×4 的矩阵来描述,这一矩阵称为琼斯(Jones)矩阵。于是图1所示的椭偏仪当光到达探测器 D 时,其光强可以简单地表示为光所通过的各光学元件琼斯矩阵之积模平方,即

$$I_D = \left| (A)(S)(E) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right|^2, \quad (2)$$

式中各矩阵说明如下:

(A)代表检偏器的琼斯矩阵。当检偏器的方位角为 θ 时(θ 是与 x 坐标的坐角),有

$$(A) = \begin{pmatrix} \cos^2 \theta & \sin \theta \cos \theta \\ \sin \theta \cos \theta & \sin^2 \theta \end{pmatrix},$$

(S)代表样品的琼斯矩阵。它可以写成

$$(S) = \tilde{r}_s \begin{pmatrix} \tan \psi \exp(i\Delta) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix},$$

(E)代表电光补偿器的琼斯矩阵。它实际上是一块电光晶体。当电光晶体的方位角取 $\pi/4$ 时,有

$$(E) = \begin{pmatrix} 1 + \exp(-i\delta) & 1 - \exp(-i\delta) \\ 1 - \exp(-i\delta) & 1 + \exp(-i\delta) \end{pmatrix},$$

其中 δ 是电光晶体所造成的相位推迟,它的大小为

$$\delta = \frac{\pi}{V_\pi} V. \quad (3)$$

(3)式中的 V_π 为电光晶体的半波电压。 V 为加在电光晶体上的外加电压。

列阵 $\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}$

代表光波经起偏器后的线偏振态。这说明起偏器的方位角为零。整个光路图的坐标是这样选取的:令光的传播方向为 z 轴, P 光电矢量振动方向为 x 轴, S 光电矢量振动方向为 y 轴。(2)式经展开运算,得

$$I_D = 2|\tilde{r}_s|^2 \{ \sin^2 \theta + \cos^2 \theta \operatorname{tg}^2 \psi + \sin 2\theta \operatorname{tg} \psi \cos \Delta \\ + [(\cos^2 \theta \operatorname{tg}^2 \psi - \sin^2 \theta) \cos \delta + \sin 2\theta \operatorname{tg} \psi \sin \Delta \sin \delta] \}, \quad (4)$$

如果在电光晶体上外加交直流电压:

$$V = \bar{V} + V_0 \cos \omega t, \quad (5)$$

式中 \bar{V} 表示直流电压, V_0 为交流电压的振幅,从(4)式明显看到,探测器 D 接收到光强的交流成分为

$$\tilde{I}_D = 2|\tilde{r}_s|^2 [(\cos^2 \theta \operatorname{tg}^2 \psi - \sin^2 \theta) \cos \delta + \sin 2\theta \operatorname{tg} \psi \sin \Delta \sin \delta] \\ = 2|\tilde{r}_s|^2 \cos(\Phi - \delta) = 2|\tilde{r}_s|^2 \cos \left[\left(\Phi - \frac{\pi}{V_\pi} \bar{V} \right) - \frac{\pi}{V_\pi} V_0 \cos \omega t \right], \quad (6)$$

其中有

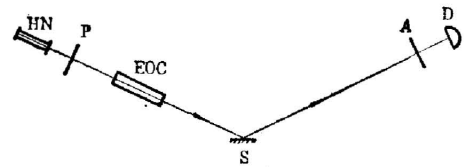


图1 光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the optical system

$$\operatorname{tg} \Phi = \frac{\sin 2\theta \sin \Delta \operatorname{tg} \psi}{\cos^2 \theta \operatorname{tg}^2 \psi - \sin^2 \theta} \quad (7)$$

将(6)式按级数展开,得

$$\begin{aligned} \tilde{I}_D \propto \cos \left(\Phi - \frac{\pi}{V_x} \bar{V} \right) & \left[J_0 \left(\frac{\pi}{V_x} V_0 \right) + 2J_2 \left(\frac{\pi}{V_x} V_0 \right) \cos 2\omega t + 2J_4 \left(\frac{\pi}{V_x} V_0 \right) \cos 4\omega t + \dots \right] \\ & + 2 \sin \left(\Phi - \frac{\pi}{V_x} \bar{V} \right) \left[J_1 \left(\frac{\pi}{V_x} V_0 \right) \sin \omega t + J_3 \left(\frac{\pi}{V_x} V_0 \right) \sin 3\omega t + \dots \right]. \end{aligned} \quad (8)$$

(8)式表明,当探测器 D 接收到光强的亦流成分基频(包括所有奇次谐波)分量为零时,必有

$$\Phi = \frac{\pi}{V_x} \bar{V}. \quad (9)$$

测量的基本原理就是通过调整 \bar{V} , 使探测器出现基频为零的情况,从而测得 Φ 。再由(7)式求出 ψ 和 Δ 。

三、实验测量

测量所用的仪器是自制的半自动椭偏仪。仪器的整体结构(包括电路方块图)如图2所示。

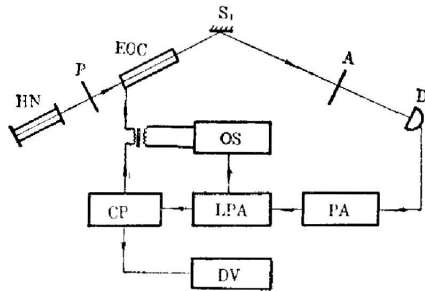


图2 自动椭偏仪方块图

Fig. 2 Block diagram of an automatic ellipsometer

半自动测量过程可作如下描述:振荡器 OS 输出的交流电信号与高压补偿电源 CP 输出的高压直流电信号迭加后加到电光晶体上。于是由光源来的线偏振光通过电光晶体 EOC 经样品 S 反射到检偏器 A 再到光电探测器 D 时,探测器可输出各种频率成分的电信号。这些信号经前置放大器 PA 放大后送给锁相放大器 LPA 。锁相放大器对信号的基频成分进行同步放大。放大后输出一个直流电压去调整高压补偿电源,使加在电光晶体上的高压发生变化。直至锁相放大器的输出为零(此时探测器接收

的基频信号为零),补偿电源的高压就保持不变。此时用数字电压表 DV 测出补偿电源加在电光晶体上的直流高压即可通过(9)式换算成 Φ 值。

实际测量时可先将检偏器的方位角置于 θ_1 等于 45° 的位置,待自动补偿系统平衡后记下数字电压表的读数 \bar{V}_1 ; 然后转动检偏器,使其方位角处于 θ_2 等于 30° ,再记下数字电压表读数 \bar{V}_2 。根据(9)、(7)式,可得

$$\operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{V_x} \bar{V} \right) = \frac{\sin 2\theta \sin \Delta \operatorname{tg} \psi}{\cos^2 \theta \operatorname{tg}^2 \psi - \sin^2 \theta} \quad (10)$$

最后把 θ_1 、 θ_2 、 \bar{V}_1 、 \bar{V}_2 分别代入(10)式,得

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{V_x} \bar{V}_1 \right) &= \frac{\sin 2\theta_1 \sin \Delta \operatorname{tg} \psi}{\cos^2 \theta_1 \operatorname{tg}^2 \psi - \sin^2 \theta_1}, \\ \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{V_x} \bar{V}_2 \right) &= \frac{\sin 2\theta_2 \sin \Delta \operatorname{tg} \psi}{\cos^2 \theta_2 \operatorname{tg}^2 \psi - \sin^2 \theta_2}. \end{aligned}$$

联立解得

$$\operatorname{tg} \psi = \sqrt{\frac{\sin 2\theta_2 \sin^3 \theta_1 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{V_x} \bar{V}_1 \right) - \sin 2\theta_1 \sin^3 \theta_2 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{V_x} \bar{V}_2 \right)}{\sin 2\theta_2 \cos^3 \theta_1 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{V_x} \bar{V}_1 \right) - \sin 2\theta_1 \cos^3 \theta_2 \operatorname{tg} \left(\frac{\pi}{V_x} \bar{V}_2 \right)}}, \quad (11)$$

$$\sin \Delta = \frac{\tan \left(\frac{\pi}{V_x} \bar{V}_1 \right) (\sin^2 \theta_1 - \cos^2 \theta_1 \tan^2 \psi)}{\sin 2\theta_1 \tan \psi}. \quad (12)$$

如果能在仪器上配一台微处理机, 直接将数字电压表的电压值输入计算机, 便可直接打印出被测薄膜的厚度和折射率。

表 1 是对六片硅—氧化硅膜测量的结果。由于光电晶体半波电压随环境温度的变化而改变, 所以每次测量前应先测半波电压。表 1 下面已注明了当时的半波电压。光电晶体的正、反向半波电压不对称, 所以在计算 ψ 和 Δ 时应注意这一点。表 1 中 2 号样品采用正半波电压计算, 其它样品均采用负半波电压计算。测量中电压读数精度只取到小数点后一位, 因为数字电压表的小数点后第二位已有明显的跳动, 于是把读数误差一概取为 $\pm 0.1 \text{ V}$ 。为了便于跟 TP-77 型椭偏仪测量结果对照, 所以将 ψ 和 Δ 的计算结果取到小数点后两位。实际上小数点后第二位是无效的。表 2 就是两种仪器测量结果的对照。从表中看到, 在读数误差范围内, 两种仪器测量结果是一致的。

表 1

样品编号	$\theta_1=45^\circ$ 时 \bar{V}_1 值(伏)	$\theta_2=30^\circ$ 时 \bar{V}_2 值(伏)	ψ (度)	Δ (度)
1	-9.7 ± 0.1	-18.0 ± 0.1	10.35	171.46
2	110.3 ± 0.1	180.8 ± 0.1	18.85	256.30
3	-18.9 ± 0.1	-34.9 ± 0.1	10.49	163.38
4	-12.8 ± 0.1	-23.7 ± 0.1	10.33	158.67
5	-12.9 ± 0.1	-23.9 ± 0.1	10.37	158.63
6	-110.8 ± 0.1	-182.6 ± 0.1	19.00	107.44

注: 2月12日上午测量 $V_x = \begin{matrix} -543.5 \\ +538.0 \end{matrix}$

表 2

样品编号	TP-77 型 测量 结果		自动仪测量结果	
	ψ (度)	Δ (度)	ψ (度)	Δ (度)
1	10.80 ± 0.15	168.20 ± 0.39	10.35	171.46
2	18.02 ± 1.42	249.44 ± 0.40	18.85	256.30
3	10.95 ± 0.25	165.44 ± 0.52	10.49	163.38
4	10.14 ± 0.51	153.50 ± 0.38	10.33	158.67
5	10.71 ± 0.41	162.30 ± 1.16	10.37	158.63
6	20.03 ± 1.78	103.34 ± 0.16	19.00	107.44

为了考察测量的重复性好坏和仪器的稳定度, 我们分别在三个不同时刻对同样的样品进行测量。结果列于表 3。对 A 样品进行多次测量, 所给的结果是多次测量的平均值和平均偏差。对 B 样品只作一次测量。

总的看来, 引起测量结果不完全一致的原因主要有以下三点:

1. 每次对样品进行测量时测点位置很不一致。由于样品膜厚不均匀, 所以测点位置不

表 3

样品编号	2月7日上午测		2月12日晚上测		2月9日下午测	
	ψ (度)	Δ (度)	ψ (度)	Δ (度)	ψ (度)	Δ (度)
A	19.5 ± 0.6	243.7 ± 4.3	19.8 ± 0.1	244.1 ± 1.0	19.6 ± 0.4	242.1 ± 2.5
B	10.36	166.7	10.49	163.38	10.66	164.6

定测量结果不一致是很自然。

2. TP-77 型椭偏仪两次测量结果对称性很不好, 说明仪器本身存在着较大的系统误差。因此不能完全以它的测量结果为标准。

3. 本自动椭偏仪存在着零点漂移问题, 这也是引起误差的原因。

综上所述, 本测量方法在原理上是新颖的, 目前国内尚未见到同类方法的报道。如果在光路后部分同时用两路接收, 这就无须临时改变检偏器的方位角。可使每个测量点的测量时间缩短到几十毫秒, 实现实时快速监测。只要适当改换光源, 很容易发展成自动椭偏谱仪。

仪器的零点漂移是影响测量精度的关键, 其原因将有待于今后进一步研究。

最后我们感谢王楚教授帮助我们设计了全部电子电路。还感谢北京照像机械技术研究所进一步完善本仪器并准备投入批量生产。

参 考 文 献

- [1] P. Drude; *Wied. Ann.*, 1889, **36**, 532.
- [2] A. Q. Tool; *Phys. Rev.*, 1910, **31**, No. 1 (Jul), 1.
- [3] R. H. Muller; *Advances in electrochemistry and electrochemical engineering*, (Wiley, New York, 1973), 542.
- [4] R. M. A. Azzam; *Appl. Opt.*, 1980, **19**, No. 18 (Sep), 3092.
- [5] 莫党, 叶贤京; *物理学报*, 1981, **30**, No. 10 (Oct), 283.
- [6] K. Kinoshita; *Thin Solid Films*, 1976, **34**, No. 2 (May), 283.
- [7] A. Gerrard and J. M. Burch; *Introduction to Matrix methods in Optics*, (A Wiley Interscience Publication, 1975), 207.
- [8] H. H. Bloem; *Electro-Opt. Syst. Des.*, 1980, **12**, No. 3 (Mar), 38.

A new type of automatic ellipsometer

XIE BILIXING

(Physics Department, Beijing University)

(Received 30 January 1984)

Abstract

In this paper, we describe a new electro-optical compensated automatic ellipsometer. The design principles are discussed in detail and the measurement results on SiO_2 film are given. A new type of automatic spectrum-ellipsometer may be developed based on it.