

TPP - 1 型椭偏谱仪测膜厚的探讨*

吴永汉¹, 李艳峰², 吴兴惠²

(1. 云南大学 物理系, 云南 昆明 650091; 2. 云南大学 材料科学与工程系, 云南 昆明 650091)

摘要: 说明原椭偏谱仪不能直接测量膜厚, 提出外加波长片后可以测量膜厚的 2 种方法.

关键词: 椭圆偏振; 薄膜厚度; 位相差

中图分类号: TH 744.2 文献标识码: A 文章编号: 0258 - 7971(2003)06 - 0515 - 03

TPP - 1 型椭偏谱仪是上世纪 80 年代制造的. 它与 TP - 77 型椭偏仪比较的最大优点是可在 0.26 ~ 0.86 μm 波长范围内对材料的光电参数进行测试; 其缺点是单色仪所提供的测试光源强度较弱; 说明书的概述中说到用它可以测量膜厚, 但这是需要另加条件的.

1 椭偏谱仪的测试原理

椭偏谱仪是利用光度进行测量的. 起偏器保持在 45° 方向不变, 于是入射到样品的 p 光和 s 光是等振幅的线偏振光. 经样品反射后变为椭圆偏振光^[1], 用检偏器、光电倍增管、电器箱可检测出椭圆偏振光长轴的光强度 I_{\max} 和它的方位角 α_{\max} ; 以及检测出椭圆偏振光短轴的光强度 I_{\min} 和它的方位角 α_{\min} . 由此可算出如下参数

反射椭圆偏振光长轴的方位角 α_{\max} 为

$$\alpha_{\max} = \alpha_{\min} \text{ 或者 } \alpha_{\max} = \alpha_{\min} \pm 90^\circ, \quad (1)$$

反射椭圆偏振光短轴 b 与长轴 a 之比为

$$\tan \alpha = \frac{b}{a} = \sqrt{\frac{I_{\min}}{I_{\max}}} \text{ 或者 } \cos 2\alpha = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}, \quad (2)$$

单层薄膜 p 光和 s 光的总反射系数分别为

$$\begin{cases} R_p = \frac{r_{1p} + r_{2p}e^{-2i}}{1 + r_{1p}r_{2p}e^{-2i}}, \\ R_s = \frac{r_{1s} + r_{2s}e^{-2i}}{1 + r_{1s}r_{2s}e^{-2i}}, \end{cases} \quad (3)$$

式中 r_{1p}, r_{2p}, r_{1s} 和 r_{2s} 是单层薄膜上下两介面 p 光和 s 光菲涅耳反射比, α 是薄膜厚度 d 引起的位相差, 它由下式决定

$$\alpha = 2d \sqrt{(n_2 - ik_2)^2 - n_1^2 \sin^2 \theta_1}. \quad (4)$$

总反射系数比为

$$\frac{R_p}{R_s} = \tan^2 \alpha \cdot e^{i\alpha}. \quad (5)$$

其中 $\tan \alpha$ 和 α 分别是反射 p 光与 s 光的相对振幅衰减和位相差. 另有如下关系式

$$\tan \alpha = \frac{\pm \tan 2\alpha}{\sin 2\alpha}, \quad (6)$$

$$\cos 2\alpha = -\cos 2\alpha \cos 2\alpha. \quad (7)$$

样品复折射率的实部 n 和虚部 k 与其它参数有如下关系

$$\begin{cases} n = \sqrt{\frac{\sqrt{A^2 + B^2} + A}{2}}, \\ k = \sqrt{\frac{\sqrt{A^2 + B^2} - A}{2}}, \\ A = \sin^2 \left[1 + \frac{\tan^2(\cos^2 2\alpha - \sin^2 \theta_1 \sin^2 \alpha)}{(1 + \sin 2\alpha \cos 2\alpha)^2} \right], \\ B = \frac{\sin^2 \alpha \tan^2 \alpha \sin 4\alpha \sin 2\alpha}{(1 + \sin 2\alpha \cos 2\alpha)^2}. \end{cases} \quad (8)$$

膜的吸收系数 k , 样品复介电常数的实部 ϵ_1 和虚部 ϵ_2 , 样品表面的反射率 R 与其它参数关系为

* 收稿日期: 2003 - 03 - 11

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50162002).

作者简介: 吴永汉 (1936 -), 男, 四川人, 副教授, 主要从事物理实验.

$$\begin{cases} (\) = \frac{4k}{n^2 - k^2}, \\ 1 = n^2 - k^2; \quad 2 = 2nk, \\ R = \frac{(n-1)^2 + k^2}{(n+1)^2 + k^2}. \end{cases} \quad (9)$$

以上各符号的详细意义见原说明书。

2 椭圆偏振仪不能直接测膜厚

公式(6)右端分子上有个正负号问题。取正号,表示反射的椭圆偏振光逆时针方向旋转;取负号,表示反射的椭圆偏振光顺时针方向旋转。如果样品表面没有薄膜,仅仅是测量样品本身的光电参数,可以证明无论(6)式右端分子取正或取负,都不会影响(8)式关于 n 和 k 的计算结果,当然也不会影响(9)式中 $(\)$, 1 , 2 , R 等的计算结果。但在测样品表面的单层薄膜厚度时,椭圆偏振仪的光度测量方法不能判定椭圆偏振光的旋转方向,也就不能确定(6)式中到底取什么符号。

(6)式取正或取负会给计算薄膜厚度带来完全不同的结果:如果薄膜的 n_2 、衬底的 n_3 均为实数(空气的 n_1 也为实数),则测试薄膜厚度具有周期性,设周期厚度为 D ,膜厚为 $l = ND + d$,其中 N 为膜厚周期数^[2](取 $0, 1, 2, 3, \dots$ 中的某一个整数),而 $d < D$, d 是可由测试参数计算出来的。由(6)式取正计算出的 d_+ 与取负计算出的 d_- 是不相同的。不过在 n_2, n_3 均为实数的条件下它们具有互补性: $d_+ + d_- = D$ 。如果 n_2 仍为实数,而 n_3 为复数。虽然测量膜厚仍具有周期性,但 d_+ 和 d_- 已是没有互补性的 2 个数。如果 n_2 为复数,测量膜厚已经没有周期性了, d_+ 和 d_- 是完全不相关联的 2 个厚度。由此说明用原椭圆偏振仪不能直接和唯一地测量出薄膜厚度。

3 改进椭圆偏振仪结构能测膜厚的方法

只需在椭圆偏振仪光路中新增加一个移动方便的光具座夹住的波长片就可测量薄膜厚度了。具体的原理和方法有如下 2 种。

3.1 波长片加在反射光路中

选波长片快慢光位相差 $30^\circ \sim 0.5 \text{ rad}$ 左右,将它置于反射光路中样品与检偏器光筒之间,并使它的快轴与 p 光电矢量方向相同(即 0°),这将使反射的 p 光比 s 光的位相再超前 δ 。

测量中要求起偏片的电矢量振动方向固定在

p 光和 s 光平分角线(即 45°)处,所以经过起偏片的入射 p 光和 s 光的振幅比为 $E_{pi}/E_{si} = 1$ 。

反射光路中不加波长片测量相关参数。考虑到(5)式得

$$\frac{E_{po}}{E_{so}} = \frac{E_p E_{pi}}{R_s R_{si}} = \frac{R_p}{R_s} = \tan \delta \cdot e^{i\delta} \quad (10)$$

由所测相关参数,根据(6)式取正或取负分别算出 d_+ 和 d_- 2 个值。

将波长片加入到反射光路中后测量同一样品的参数。考虑到波长片附加相移 δ 则

$$\frac{E_{po}}{E_{so}} = \frac{E_{po}}{E_{so}} e^{i\delta} = \tan \delta \cdot e^{i(\delta + \delta)} = \tan \delta \cdot e^{i\delta} \quad (11)$$

式中: $\delta = \delta + \delta$ 。 (12)

由所测相关参数,根据(6)式取正或取负分别算出 d_+ 和 d_- 2 个值。

因为 $30^\circ > 0$,由(12)式可见 d_+ 才是正确的。由前后 2 次测量和计算出的 d_+ 与 d_+ 比较以及 d_- 与 d_- 比较,哪一个能满足 $d_+ > d_-$ 就选定那个 d_+ 作为计算膜厚的正确参数(也就同时确定了反射光的旋转方向),进一步就可计算膜厚 d 值。

椭圆偏振仪的入射光波长是在 $0.26 \sim 0.86 \mu\text{m}$ 范围内取某一个波长值,而波长片位相差 δ 值也是随波长有所变化,但这种变化对判断椭圆偏振光旋转方向和测量膜厚没有影响,由(12)式还可计算出在该测量波长下波长片的位相差值 $\delta = |\delta - \delta|$ 。

如果波长片调整成为快轴与 s 光方向相同(即 90°),则判断公式相反: $d_+ < d_-$ 。

3.2 波长片加在入射光路中

TP-77 型椭圆偏振仪的入射光源是固定不变氦氖激光,入射光筒中前面是起偏片,紧接它是快轴方位在 45° ,位相差 $\delta = 90^\circ$ 也是固定不变的 $1/4$ 波长片,通过它可将前面起偏片产生的线偏振光变为 p 光和 s 光为等幅的椭圆偏振光,其计算公式相对简单一点。但对 TP-1 型椭圆偏振仪,其入射光源波长 λ 在 $0.26 \sim 0.86 \mu\text{m}$ 范围内变化,选取波长片位相差 $\delta(\delta \sim 90^\circ)$ 附近也将随波长不同而有所变化(所以它不可能像 TP-77 型椭圆偏振仪中是固定不变的 $1/4$ 波长片),但要求这种变化不是特别大。在该波长范围内大致均匀选定 10 多个的特定波长,准确测量出相应波长片的位相差 $\delta(\delta)$,再用曲线拟合的方法得

到与连续变化的函数关系,于是在这个范围内任何一个波长的位相差都可通过这种函数关系计算出来而作为已知值.将该波长片置于入射起偏器光筒与样品之间,使波长片快轴在 p 光和 s 光平分角线(即 45°)处固定不动.起偏片(其方位角用 P 表示)和检偏片(其方位角用 A 表示)在 0°~ 180° 范围内连续可调.这就将椭偏谱仪改造成与 TP - 77 型椭偏仪类似的用消光法测膜厚的仪器.因为这里的值随波长而有所变化,它不恰好为 90°,故入射光的 p 光和 s 光不是等振幅的椭圆偏振光,相应的计算公式变得更复杂一些,根据测量原理推导出^[1]

$$\frac{E_{p\omega}}{E_{s\omega}} = \frac{b_p}{b_s} \cdot \tan e^{i\left(2P - \frac{\pi}{2} + \varphi_p + \varphi_s\right)} = \tan e^{i\left(2P - \frac{\pi}{2} + \varphi_p + \varphi_s\right)}, \quad (13)$$

式中 b_p/b_s 是入射光的振幅比,它与其它参数的关系如下式

$$\frac{b_p}{b_s} = \left\{ \frac{1 + \cos \cos(2P)}{1 - \cos \cos(2P)} \right\}^{\frac{1}{2}}. \quad (14)$$

由(14)可知,当 = 90°时, $b_p = b_s = 1$. 当 偏离 90°不太大时, b_p/b_s 也偏离 1 不太大.

φ_p 和 φ_s 与其它参数的关系如下式

$$2P - \frac{\pi}{2} + \varphi_p + \varphi_s = \arctan \left[\sin \cdot \tan \left[2P - \frac{\pi}{2} \right] \right]. \quad (15)$$

由(15)可知,当 = 90°时, $\varphi_p + \varphi_s = 0$. 当 偏离

90°不太大时,它偏离 0 也不太大.(13) 式中的

$$\tan = \frac{b_p}{b_s} \cdot \tan .$$

测试中消光时满足如下关系,反射光就变为线偏振光了

$$+ 2P - \frac{\pi}{2} + \varphi_p + \varphi_s = k, \quad (k = 0, 1, 2, 3, \dots). \quad (17)$$

将(15) 式代入(17) 可改写为如下形式

$$+ \arctan \left[\sin \cdot \tan \left[2P - \frac{\pi}{2} \right] \right] = k. \quad (18)$$

有了上述各个公式后就可用与 TP-77 型椭偏仪完全类似的测量和计算方法,给定 n_1, n_2, n_3, \dots 以及 d 等值,由(4) 式算出 $r_{1p}, r_{2p}, r_{1s}, r_{2s}$ 等;由(3) 式算出 R_p 和 R_s ,进而由(5) 式算出 φ_p 和 φ_s ;由(18) 式算出起偏角 P ,再由(14) 和(16) 算出 b_p/b_s ,于是检偏角 $A = \dots$ 也就算出来了.这也就计算出了 $(n, d) - (A, P)$ 数表.或者反过来由测试值 (A, P) 去近似计算 (n, d) ^[3].虽然这种计算更复杂,但在电子计算机广泛应用的今天,编程计算是轻而易举的事.

参考文献:

[1] 母国光,战元龄.光学[M].北京:高等教育出版社,1978.
 [2] 吴永汉.用《TP - 77 型椭偏仪》测膜厚周期数的方法[J].物理实验,1982,2(3):97—99.
 [3] 吴永汉,龚菊英.椭偏法测膜厚的直接计算方法[J].物理实验,1998,18(1):11—13.

Investigation on the type of TPP - 1 the ellipsometer for measuring the thickness of thin films

WU Yong-han¹, LI Yan-feng², WU Xing-hui²

(1. Department of Physics, Yunnan University, Kunming 650091, China;

2. Department of Material Science and Engineering, Yunnan University, Kunming 650091, China)

Abstract: It is shown that the conventional ellipsometer can not be used to measuring the films' thickness. To solve this problem, it is suggested that two kinds of methods for measuring the thickness of thin films by addition of filter wavelength leaf.

Key words: ellipsometer; the thickness of thin films; phase difference