

文章编号 : 0253-2239(2001)06-0734-03

椭圆偏振光谱中的主角测量条件分析*

赵海斌 夏国强 陈岳立 李 晶 周仕明 陈良尧

(复旦大学物理系, 上海 200433)

摘要: 对椭圆偏振光谱中的主角测量条件进行了分析。当入射角等于主角 θ_p 时, 椭圆参数的相位为 90° , 据此给出了当材料的介电函数已知时对 θ_p 进行数值和解析计算的公式和方法, 并可相应地计算出椭圆参数的幅值 ρ_{p0} 。在 θ_p 入射角下测量可获得较高的数据精度。主角条件下椭圆参数 ρ_{p0} 及其相位 Δ_p 的实验测量结果与计算值符合得很好。本工作给出的计算公式和方法可在其他光谱实验中获得应用。

关键词: 光谱学; 椭圆光谱; 主角; 布儒斯特角

中图分类号: O433.5+9 文献标识码: A

1 引 言

椭圆偏振光谱可用于众多固体材料的光学性质研究和分析, 可将实验中测量到的椭圆参数与光学常数、材料的微观电子的光学跃迁机理及多种物理机制联系起来^[1~7]。在实际测量中, 呈偏振性的探测光以某一固定角度入射到样品, 在与样品的微观结构发生相互作用后, 其偏振态将发生改变。这种偏振态的改变可被检偏器分析和测量, 再通过计算即可获得样品的椭圆参数。实验条件所引起椭圆参数的变化会给光学常数测量的准确性带来影响。例如, 对于某样品和在某入射角条件下, 当椭圆参数中的幅值 $\tan\psi$ 接近于 1 以及相位角 Δ 接近零或 180° 时, 将会对 $\cos\Delta$ 值的测量和介电函数的计算产生较大的不确定性^[2,3]。为了减少测量误差, 可采用在光路中添置一个辅助 $1/4$ 波片的方法, 使得椭圆参数的相位角偏移 90° 。然而, 如果考虑到大多数具有相位延迟特性的光学器件都具有色散, 即相位延迟是光子的波长和能量的函数, 使得这种方法在能量可变的宽光谱测量和研究中受到了限制, 除非预先对波长延迟器的特性进行仔细研究和定标, 这在某种程度上又可能引进新的实验误差, 并需要附加新的光学元件而增加了实验系统的复杂性。本研究将给出一种新的方法, 即在椭圆光谱测量的过程中, 按相应入射光子的波长或能量计算出某特定的入射角, 即主角条件。在此入射角测量条件下, 椭圆参数的相位角将

始终为 90° , 从而显著降低了实验测量的误差, 提高了数据精度。研究给出的计算结果和实验测量值符合得很好。

2 原 理

当探测光从环境媒质 O 入射到样品媒质 S 时, 可分别用垂直和平行于入射面的两个复反射系数, 即 \tilde{r}_v 和 \tilde{r}_p 来表征两媒质界面的反射特性^[8]

$$\left. \begin{aligned} \tilde{r}_v &= \frac{\tilde{n}_O \cos\theta_O - \tilde{n}_S \cos\theta_S}{\tilde{n}_O \cos\theta_O + \tilde{n}_S \cos\theta_S}, \\ \tilde{r}_p &= -\frac{\tilde{n}_O \cos\theta_S - \tilde{n}_S \cos\theta_O}{\tilde{n}_O \cos\theta_S + \tilde{n}_S \cos\theta_O}, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

θ_O 和 θ_S 分别为光在环境媒质 O 和样品媒质 S 中的入射和折射角, \tilde{n}_O 和 \tilde{n}_S 分别为媒质 O 和媒质 S 的光学复折射率, 与复介电函数 ϵ_O 和 ϵ_S 的关系为:

$$\epsilon_O = \tilde{n}_O^2, \quad \epsilon_S = \tilde{n}_S^2. \quad (2)$$

通过对椭圆参数 ρ 的测量,

$$\rho = \frac{\tilde{r}_p}{\tilde{r}_v} = \tan\psi \exp(i\Delta) = \rho_0 \exp(i\Delta), \quad (3)$$

可直接求得介电函数^[3],

$$\frac{\epsilon_S}{\epsilon_O} = \sin^2\theta_O + \sin^2\theta_O \tan^2\theta_O \left(\frac{1-\rho}{1+\rho} \right)^2, \quad (4)$$

实验中对样品介电函数测量的相对误差为:

$$\frac{\delta\epsilon_S}{\epsilon_S} = \frac{4(1+\cos^2\theta_O)}{\sin^2\theta_O} \delta\theta_O - \frac{4}{1-\rho^2} \delta\rho. \quad (5)$$

显然, 当椭圆参数 ρ 的相位 Δ 接近零或 180° 时, 将会对介电函数的测量产生较大的误差, 而相位在 90° 附近时, 可显著减小误差。

对大多数在大气中测量的实验条件, 让 $\epsilon_O = 1$,

* 国家自然科学基金(69878003) 国家科技部和上海应用物理研究中心资助项目。

$\epsilon_s = \epsilon = \epsilon_1 + i\epsilon_2$, $\tilde{n}_s = \tilde{n} = n + ik$, m 为实部, k 为虚部, 便可由(4)式得到:

$$\sqrt{\frac{\epsilon - \sin^2 \theta_0}{\sin^2 \theta_0 \tan^2 \theta_0}} = \frac{1 - \rho}{1 + \rho}. \quad (6)$$

如果对入射角进行扫描, 当 θ_0 等于主角 θ_p 时, 可满足 $\Delta = \Delta_p = 90^\circ$, 即 $\rho = \rho_p = i\rho_{p0}$ 为纯虚数的条件, 由上式可得:

$$\left| \sqrt{\frac{\epsilon - \sin^2 \theta_p}{\sin^2 \theta_p \tan^2 \theta_p}} \right| = \left| \frac{1 - i\rho_{p0}}{1 + i\rho_{p0}} \right| = 1. \quad (7)$$

由此可解得:

$$\left. \begin{aligned} |\epsilon - \sin^2 \theta_p| &= \sin^2 \theta_p \tan^2 \theta_p, \\ |\epsilon|^2 - 2\epsilon_1 \sin^2 \theta_p + \cos 2\theta_p \tan^4 \theta_p &= 0. \end{aligned} \right\} (8)$$

如果让 $\cos 2\theta_p = x$, 还可进一步求解:

$$x^3 + Ax^2 + Bx + C = 0, \quad (9)$$

上式中,

$$A = \frac{|\epsilon|^2 + \epsilon_1 - 2}{\epsilon_1 + 1},$$

$$B = \frac{2|\epsilon|^2 - \epsilon_1 + 1}{\epsilon_1 + 1},$$

$$C = \frac{|\epsilon|^2 - \epsilon_1}{\epsilon_1 + 1}.$$

(4)式可被改写为:

$$\epsilon = \tan^2 \theta_0 - \sin^2 \theta_0 \tan^2 \theta_0 \left[\frac{4\rho}{(1 + \rho)^2} \right], \quad (10)$$

当 $\theta_0 = \theta_p$ 时, $\rho^2 = -\rho_{p0}^2$, 于是可解得:

$$\epsilon_1 = \tan^2 \theta_p - \sin^2 \theta_p \tan^2 \theta_p \left[\frac{8\rho_{p0}^2}{(1 + \rho_{p0}^2)^2} \right] \quad (11)$$

$$\epsilon_2 = -\sin^2 \theta_p \tan^2 \theta_p \left[\frac{4\rho_{p0}(1 - \rho_{p0}^2)}{(1 + \rho_{p0}^2)^2} \right], \quad (12)$$

$$\epsilon_1 = \tan^2 \theta_p + \left[\frac{2\rho_{p0}\epsilon_2}{(1 - \rho_{p0}^2)} \right], \quad (13)$$

$$\rho_{p0} = \frac{\epsilon_2}{\epsilon_1 - \tan^2 \theta_p} \pm$$

$$\left[\sqrt{1 + \frac{(\epsilon_1 - \tan^2 \theta_p)^2}{\epsilon_2^2}} - 1 \right]. \quad (14)$$

当被测量对象为透明介质时, $k = 0$ 且 $\epsilon_2 = 0$, 可得:

$$\left. \begin{aligned} \tan \theta_p &= \tan \theta_B = \sqrt{\epsilon_1} = n, \\ \rho_0 &= \rho_{p0} = \rho_{B0} = 0, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

θ_B 即为布儒斯特角, ρ_{B0} 为当 $\theta_0 = \theta_B$ 时的 ρ_0 值。

3 实验结果

一个入射角可变和波长扫描的全自动椭圆偏振

光谱仪^[9]可被用来检验(8)式、(9)式和(14)式的适用性。实验中采用了金膜样品。先在入射角为 70° 条件下和 $1.5 \text{ eV} \sim 4.5 \text{ eV}$ 光子能量范围测量得到样品的 ϵ_1 和 ϵ_2 谱, 如图1所示。然后, 按(8)式或(9)式计算出不同光子能量时的主角值。实际运算时, 对(8)式可采用快速数值迭代的方法求解。如输入 $\epsilon_1 = \epsilon_2$ 的值(9)式有三个解析解, 仅取 $0 \leq \theta_p \leq 90^\circ$ 的实数解。两种方法可获得相同的 θ_p 值, 再通过(14)式计算出在 $0 \leq \rho_{p0} \leq 1$ 范围 ρ_{p0} 的值。图2显示了 θ_p 的计算谱。

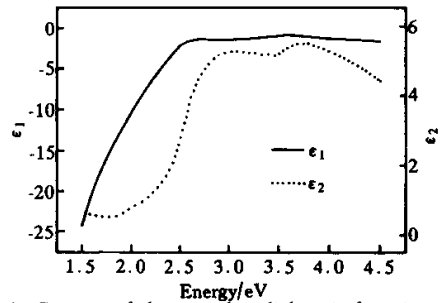


Fig. 1 Spectra of the complex dielectric function for the Au film measured in the $1.5 \text{ eV} \sim 4.5 \text{ eV}$ photon energy range and in room temperature

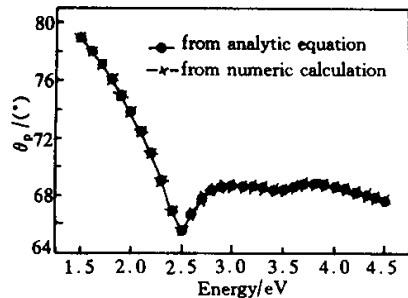


Fig. 2 Calculated spectra of θ_p from Eqs.(8) and (9)

最后, 按所解得的在不同光子能量下的 θ_p 值, 通过计算机自动控制, 改变入射角, 在 $\theta_0 = \theta_p$ 的条件下重新对样品进行测量, 获得 Δ_p 和 ρ_{p0} 的谱。在 θ_p 入射角下所测量到的 Δ_p 和 ρ_{p0} 的谱显示在图3中, 并与计算值进行了比较, 其相对误差分别为 0.13% 和 0.18% , 两者有很好的符合。

(8)式、(9)式和(14)式还可在其他光谱实验中获得应用。例如, 即使对于吸收介质, 也可根据其介电函数谱计算出 θ_p 的谱, 在 θ_p 入射角条件下, ρ_{p0} 具有最小值。因此, 如选择合适的材料, 在某些光谱区, ϵ_2 具有较小的值, 从吸收介质反射的光虽然不是完全线偏振的, 但依然可十分接近于线偏振状态。这一特性可被用来制作反射式偏振器, 能够在不易制备透射式光学偏振器的一些实验光谱区获得实际

应用。另外对于具有高反射率的样品,在 θ_p 入射角条件下, $\Delta_p = 90^\circ$, ρ_{p0} 虽在 ρ_0 的谱中具有最小的值,但依然可十分接近于 1,如图 3 中所显示的金在长波区的特点。这种特性可被用来制备成一个反射式的近似 $1/4$ 波长的相位延迟器,也具有实际应用价值。

参数的幅值 ρ_{p0} 。在 θ_p 入射角下测量可获得较高的数据精度。 Δ_p 和 ρ_{p0} 的实验测量结果与计算值符合得很好。本工作给出的计算公式和方法可在许多光谱实验中获得应用。

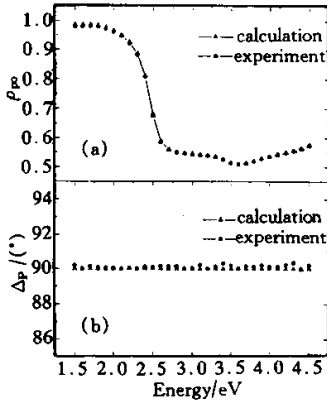


Fig. 3 Comparison between the experimental and calculated spectra of ρ_{p0} and Δ_p . (a) Spectra of ρ_{p0} measured at incident angle of θ_p and calculated from Eq.(14); (b) Spectra of Δ_p measured at incident angle of θ_p and expected from calculation

结论 为了减小实验误差,提高数据测量精度,本工作对椭圆偏振光谱中的主角测量条件进行了分析。当入射角等于主角 θ_p 时,椭圆参数的相位为 90° ,据此给出了当材料的介电函数已知时对 θ_p 进行数值和解析计算的公式和方法,并可相应地计算出椭圆偏

参 考 文 献

- [1] Aspnes D E. Fourier transform detection system for rotating-analyzer ellipsometers. *Opt. Commun.*, 1973, **8** (3):222~225
- [2] Aspnes D E, Studua A A. High precision scanning ellipsometer. *Appl. Opt.*, 1975, **14**(1):220~228
- [3] Aspnes D E. Spectroscopic ellipsometry of solids. In Seraphin B O eds., *Optical Properties of Solids-New Developments*. Amsterdam: North-Holland, 1976. 799~846
- [4] Zaghoul A-R M, Azzam R M. Single-element rotating-polarizer ellipsometer: PSI meter. *Surf. Sci.*, 1980, **96** (1):168~173
- [5] Chen L Y, Lynch D W. Scanning ellipsometer by rotating polarizer and analyzer. *Appl. Opt.*, 1987, **26**(24):5221~5228
- [6] Woollam J A, Snyder P G, Rost M C. Variable angle spectroscopic ellipsometry: a nondestructive characterization technique for ultrathin and multilayer materials. *Thin Solid Films*, 1988, **166**(1):317~323
- [7] Jellison G E, Modine F A. Two-channel polarization modulation ellipsometer. *Appl. Opt.*, 1990, **29**(7):959~974
- [8] Klein M V, Furtak T E. *Optics*. 2nd Edit. New York: John Wiley & Sons Inc., 1986. 59~127
- [9] Chen L Y, Feng X W, Su Y *et al.*. Design of a scanning ellipsometer by synchronous rotation of the polarizer and analyzer. *Appl. Opt.*, 1994, **33**(7):1299~1305

Analysis of Measuring Condition for Principle Angle in Spectroscopic Ellipsometry

Zhao Haibin Xia Guoqiang Chen Yueli Li Jing Zhou Shiming Cheng Liangyao

(Department of Physics, Fudan University, Shanghai 200433)

(Received 30 December 1999; revised 10 March 2000)

Abstract: The measuring condition for principle angle in spectroscopic ellipsometry is analyzed. As the incident angle is equal to principle angle θ_p , the phase angle of ellipsometry parameters is 90° . It gives a way to obtain θ_p from numerical calculation and analytic equation as the dielectric function of the material is known, and the amplitude ρ_{p0} of ellipsometry parameters can be calculated accordingly. Higher precision of data can be acquired as measuring at incident angle of θ_p . The experimental results of Δ_p and ρ_{p0} correspond very well with the calculated ones. The calculation formulas and methods given in this work can be applied to other spectroscopic experiments.

Key words: spectroscopy; spectroscopic ellipsometry; principle angle; Brewster's angle