

各向异性表面的椭偏测量的消光过程

梁 民 基

(北京轻工业学院自动化工程系, 北京 100037)

提 要

本文描述了在正向入射条件下, 当待测的各向异性反射面(如全息光栅)的两个笛卡儿本征矢方向与系统的指向有微小偏离时, 椭偏测量的消光过程由理想的两步过程转变成多步过程。文中同时定量指出该偏离所造成的影响及应用。

关键词: 椭偏测量; 光栅。

一、引 言

以文献[1, 2]为代表的众多椭偏测量文献指出, 在无误差、无缺陷的理想条件下, 在常用的测量布局中(例如, 起偏器-补偿器-样品-检偏器的POSA布局), 可以实现极值意义下的两步消光过程: 即先调节起偏器的方位角 P 使测量系统输出光强达到极小, 然后调节检偏器的方位角 A 使光强变成零。

本文证明, 在正向入射条件下测量各向异性表面样品时, 如待测面的笛卡儿本征矢方向与测量系统 x, y 的轴取向存在着微小偏离 θ , 如图1所示, 正如一般实际测量过程中会出现的那样, 则上述的两步极值消光过程会转变成多步过程。

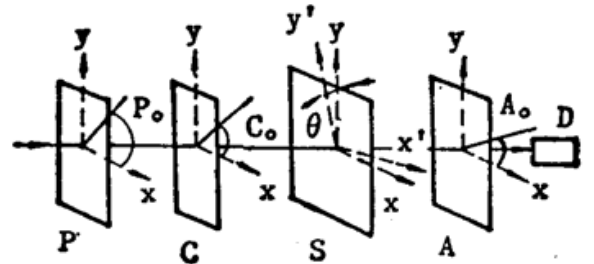


Fig. 1 PCSA ellipsometry system

二、理想椭偏消光过程

在如 POSA 布局的椭偏测量系统中, 如图1所示, 当正向入射条件下各向异性待测样品 S 的两笛卡儿本征矢方向与系统的 x, y 轴取向一致时, 由检偏器输出到检测器的光强 I_D 可以表示成

$$I_D = GLL^*, \tag{1}$$

$$L = V_{ex} \cos A [\cos O \cos (P - O) - \rho_0 \sin O \sin (P - O)] + V_{ey} \sin A [\sin O \cos (P - O) - \rho_0 \cos O \sin (P - O)], \tag{2}$$

式中 P, O 和 A 分别为线性起偏器, 线性补偿器和线性检偏器的方位角, ρ 为补偿器的慢-快轴本征值之比(复数值); V_{ex} 和 V_{ey} 为待测样品两笛卡儿本征偏振态的本征值, G 为常数。为达到消光 $I_D = 0$, 可以置(2)式为零, 得到

$$T_s \exp(i\delta_s) = \frac{V_{ex}}{V_{ey}} = -\tan A \left[\frac{\tan O + \rho_c \tan(P-O)}{1 - \rho_c \tan O \tan(P-O)} \right], \quad (3)$$

由(3)式可以看出,待测样品的 $T_s \exp(i\delta_s)$ 值可以用消光状态下的一组测量参量 (P, A, O, ρ_c) 表示。这便是椭偏测量的消光原理。

所谓消光过程乃是指改变 P, A, O, ρ_c 之中任意两 O 实数量使(2)式的复量 $L=0$, 从而也就是使 $I_D=0$ 的步骤。由于补偿器的 $\rho_c = T_c \exp(i\delta_c)$ 中的相位延迟 δ_c 的调节精度较之方位角 P, A, O 差得多, 以及在 POA 布局中, $O = \pi/4$ 能最大限度地减小起偏器和检偏器方位角及缺陷误差造成的影响^[1], 一般取这组量为 $(P, A, \pi/4, -i)$ 来进行消光*。简记为 (P, A) , 它表示在 $O = \pi/4, \rho_c = -i$ 条件下取 P, A 为测量参量。此时, (1)、(2)、(3)式成为

$$\left. \begin{aligned} I_D &= G' [(T_s^2 + 1) + (T_s^2 - 1) \cos 2A + 2T_s \sin 2A \sin(2P + \delta_s)], \\ G' &= \frac{1}{4} G |V_{ey}|^2, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$L = \frac{V_{ey}}{\sqrt{2}} \left[T_s \exp(i\delta_s) \cos A \exp \left[i \left(P - \frac{\pi}{4} \right) \right] + \sin A \exp \left[-i \left(P - \frac{\pi}{4} \right) \right] \right], \quad (5)$$

$$T_s \exp(i\delta_s) = -\tan A \exp \left[i \left(-2P + \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (6)$$

所谓极值意义下的消光过程是指消光过程中, 以 $\delta I_D = 0$ 作为每次测量参量变化终结的判别准则。由(1)式有

$$\delta I_D = G \delta(LL^*), \quad (7)$$

由(7)式可见, 光强 I_D 的极值点是由 $L=0$ 以及 $L \neq 0$ 条件下 $\delta(LL^*) = 0$ 这两者给出的

(1) $L=0$ 表明, 满足此条件的 I_D 极值点同时也必然是 I_D 的消光点(以及极小点), 记为 (P_0, A_0) 。从(6)式直接可得到**

$$T_s = -\tan A_0, \quad (8)$$

$$\delta_s = -2P_0 + (\pi/2). \quad (9)$$

把(8)、(9)式代入(4)式得

$$I_D = \frac{2G'}{\cos^2 A_0} [\sin^2(A - A_0) + \sin 2A_0 \sin 2A \sin^2(P - P_0)]. \quad (10)$$

(2) $L \neq 0$ 条件下 $\delta(LL^*) = 0$ 给出另两类极值点, 展开 $\delta(LL^*)$ 有

$$\delta(LL^*) = \frac{\partial(LL^*)}{\partial P} \delta P + \frac{\partial(LL^*)}{\partial A} \delta A, \quad (11)$$

$\partial(LL^*)/\partial P = 0$ 对应的极值点的值由(10)式可以得到为

$$P = P_0, \quad \text{或} \quad P = P_0 + (\pi/2), \quad (12)$$

$\partial(LL^*)/\partial A = 0$ 对应的极值点的值由(9)式可以得到

$$\tan 2A = \tan 2A_0 \cos^2(P - P_0), \quad (13)$$

由(10)式到(13)式可以看出, 在理想测量条件下, 从任意一组 (P, A) 初值出发, 先取 P 的极小值 P_0 , 然后取 A 的极值 A_0 , 则两步便完成了消光; 但如先让 A 取极值, 则需要三步方能完成消光: 即 A 先取(13)式的值, 然后 P 取 P_0 , 最后 A 取 A_0 , 两者稍有不同。

* 对 $(P, A, \pi/4, i)$ 以及 $(P, A, -\pi/4, \pm i)$ 讨论相同。

** 另一个结果是 $T_s = \tan A_0, \delta_s = -2P_0 - (\pi/2)$; 讨论相同。

三、存在小偏离 θ 时的消光过程

正向入射条件下, 各向异性表面的笛卡儿本征矢与系统的指向存在小偏离 θ 时, 样品的琼斯矩阵从原来的 J_s 变成 $J_{s\theta}$

$$J_{s\theta} = R(\theta) J_s R(-\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ea} & 0 \\ 0 & V_{ey} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \\ \approx \begin{pmatrix} V_{ea} & \theta(V_{ea} - V_{ey}) \\ \theta(V_{ea} - V_{ey}) & V_{ey} \end{pmatrix}. \quad (14)$$

注意到 J_s 的这个变化, 并规定是 POSA 布局且 $C = (\pi/4)$, $\rho_c = -i$ 的条件, 可以得到此时的输出光强

$$I_{D\theta} = G L_\theta L_\theta^*, \quad (15)$$

$$L_\theta = L + \theta Y,$$

$$Y = \left(\frac{V_{ey}}{\sqrt{2}} \right) \left\{ \cos A \exp \left[-i \left(P - \frac{\pi}{4} \right) \right] + \sin A \exp \left[i \left(P - \frac{\pi}{4} \right) \right] \right\} [T_s \exp(i\delta_s) - 1]. \quad (16)$$

完全按上节相同的步骤令 $L_\theta = 0$, 便求得消光状态下待测样品的 $T_{s\theta} \exp(i\delta_\theta)$ 的量值

$$T_{s\theta} \exp(i\delta_\theta) = \frac{V_{ea}}{V_{ey}} = [T_s - \theta(1 + T_s^2 + 2T_s \cos \delta_s)] \exp(i\delta_s), \quad (17)$$

不妨把(17)式写成类似(6)式的形式

$$T_{s\theta} \exp(i\delta_\theta) = -\tan A_\theta \exp \left[i \left(-2P_\theta + \frac{\pi}{2} \right) \right]. \quad (18)$$

由(17)、(18)式以及(8)、(9)式便有

$$P_\theta = P_0 \quad (19)$$

$$\tan A_\theta = \tan A_0 + \theta(\sec^2 A_0 - 2 \tan A_0 \sin 2P_0). \quad (20)$$

此处 (P_θ, A_θ) 代表 $\theta \neq 0$ 条件下的消光点。

现在来求(15)式的 $I_{D\theta}$ 的表达式。将(16)式代入(15)式, 准确到 θ 的一级量, 有

$$I_{D\theta} \doteq I_D + 2G'\theta [2(\tan^2 A_0 \cos^2 A - \sin^2 A) \sin 2P \\ + 2 \tan A_0 \cos 2A \cos 2(P - P_0) + (\tan^2 A_0 - 1) \sin 2A]. \quad (21)$$

由(21)式求得使 $\partial I_{D\theta} / \partial P = 0$ 的极值点 $P_{i\theta}$, 其值对 θ 展开化简后为

$$P_{i\theta} \doteq P_0 - \theta \frac{(\tan^2 A_0 \cos^2 A - \sin^2 A) \cos 2P_0}{\tan A_0 (\sin 2A - 2\theta \cos 2A)}. \quad (22)$$

同理, 由(21)式也可求得使 $\partial I_{D\theta} / \partial A = 0$ 的极值点 $A_{i\theta}$ 其值这里不再列出。

于是, 可以从任意一组 (P, A) 初值出发, 依次取极值点 $(P_{i\theta}, A_{i\theta})$, $i=1, 2, \dots$, 即按光强 $I_{D\theta}$ 的极值准则顺序调节 P 和 A , 使光强单调下降, 逼近(19)式和(20)式所表示的完全消光点, 即 (P_θ, A_θ) , 这就是 θ 存在时所造成的多步消光过程。

这一讨论可以推广到其他异于 POSA 的椭偏测量布局, 也可以推广到补偿器设定的方位角不是 $\pm(\pi/4)$ 或者延迟不是四分之一波长的场合。

四、讨 论

由(19)式、(20)式可以直接看到,在一级近似条件下, θ 的存在对偏振量 $T_s \exp(i\delta_s)$ 中的相移差测量值 δ_s 并没有影响,受影响的只是振幅衰减比 T_s 。

在正向入射条件下、高反射的全息光栅分光偏测量工作中,光栅凹槽及与之相垂直的方向是该样品的两个正交的线性本征矢方向;实验和模拟计算都证实,在很宽的波段上,它的 T_s 取值接近 1,随波长变化很小,重要的测量工作是 δ_s 。把上述结论用到这项工作,便能大大地减轻样品光栅凹槽取向调节带来的困难,换言之,无需太精确地调节光栅凹槽的取向便能保证 δ_s 的测量精度^[3,4]。

参 考 文 献

- [1] R. M. A. Azzam, N. M. Bashara; «Ellipsometry and Polarized light»(North-Holland, New York, 1977).
R. M. A. Azzam *et al.*; «椭圆偏振测量术和偏振光», (科学出版社,北京,1986)。
- [2] P. S. Theocaris, E. E. Gdoutos; Matrix Theory of Photoelasticity (Springer-Verlag, Berlin, 1979).
- [3] Liang *et al.*; J. Physics(D): *Appl. Phys.*, 1990, **23**, No. 1 (an), 156~163.
- [4] Liang, G. G. Siu; J. Phys. (D): *Appl. Phys.*, 1990, **23**, No. 11 (Nov), 1633~1639.
Liang Minji, G. G. Siu; *Engineer Opt.*, 1991, No. 1 (Jan), 21~24

Nulling procedures used in the ellipsometry for anisotropic surface

LIANG MINJI

(Beijing Institute of Light Industry Department of Automatic Engineering, Beijing 100037)

(Received 3 October 1990)

Abstract

This paper describes the nulling procedures used in the ellipsometry for anisotropic surface (e.g., holographic grating) transformed into multi-step regulations from ideal two-step ones, if the orientation of two cartesian eigenvectors of the sample surface deviate a small angle from that of ellipsometer. The influence of this deviation and its application are also discussed.

Key words: ellipsometry, grating.