

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0215-04

基于光弹调制的消光椭偏测量技术

杨 坤¹ 王向朝²

(¹ 郑州轻工业学院技术物理系, 河南 郑州 450002; ² 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

摘要 为提高消光椭偏测量技术的测量精度, 提出了一种基于光弹调制的消光椭偏测量技术。将光弹调制器和两块 $\lambda/4$ 波片组合构成旋光调制器, 对相关方位角进行调制。通过测量基频分量消光时的起偏器和检偏器的方位角, 完成对椭偏参量的测量。与传统消光椭偏测量技术相比, 该技术消除了背景噪声和环境干扰等对测量结果的影响。利用琼斯矩阵分析了该椭偏测量技术的原理, 最后利用 ZnS 薄膜验证了基于光弹调制的消光椭偏测量技术的可行性。

关键词 测量; 椭偏测量技术; 偏振; 光弹调制; 薄膜厚度

中图分类号 O436.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0215

Null Ellipsometry Based on Photoelastic Modulation

Yang Kun¹ Wang Xiangzhao²

(¹ Department of Technical Physics, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou, Henan 450002, China)
(² Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

Abstract In order to improve the measurement accuracy of null ellipsometry, a null ellipsometry based on photoelastic modulation is presented. Azimuth modulation is achieved through a photoelastic modulator and two quarter-wave plate. The ellipsometric parameters are obtained by azimuth measurement of the polarizer and analyzer, for which the first harmonics of modulator frequency cross the zero. Comparing with traditional null ellipsometry, it can eliminate the effect of background noise and environmental disturbance. The measurement principle is analyzed by using Jones matrix. With measured thickness and optical parameters of ZnS film, the feasibility of the null ellipsometry based on photoelastic modulation is thus demonstrated.

Key words measurement; ellipsometry; polarization; photoelastic modulation; thickness of thin film

1 引 言

消光椭偏测量技术是一种经典的椭偏测量技术。它通过旋转起偏器和检偏器, 找出起偏器、补偿器和检偏器的一组方位角 (P, C, A), 使入射到探测器上的光强最小, 由这组消光角得出椭偏参数 Ψ 和 Δ 。由于消光式椭偏仪实际上测量的是角度而不是光通量, 光源的不稳定性和探测器的非线性所导致的误差较小, 所以其测量精度较高。为了实现探测系统的自动化, 逐渐采用光电倍增管等光电探测器^[1,2]。由于此类光电探测器在小光强时的信噪比较低, 将会增大偏振器件方位角的测量误差。利用法拉第盒等磁光调制器对方位角进行调制可以解决

上述问题^[3~5]。但由于磁光调制器相对较低的调制幅度、温度影响大和工作波段窄的缺点, 基于磁光调制的消光椭偏测量技术没有得到广泛的应用。

光弹调制器 (PEM) 是一种基于光弹效应的相位调制器件, 具有全视场角大、驱动电压低、功耗小、温度影响小和工作波段宽等优点, 是高精度偏振调制和偏振检测技术的关键核心器件。Postava 等^[6]把光弹调制器引入到 PCSA 结构的消光式椭偏仪中, 研制了基于光弹调制的消光式椭偏仪。该椭偏仪将起偏器和光弹调制器固定在一起, 旋转起偏器时光弹调制器也要随之旋转。光弹调制器和驱动器之间有电缆相连接, 所以在实际操作中, 该椭偏仪的

基金项目: 郑州轻工业学院博士科研启动基金 (2008BSJJ024) 资助课题。

作者简介: 杨 坤 (1980—), 男, 讲师, 博士, 主要从事偏振光应用技术方面的研究。E-mail: yyk2002@163.com

实现比较困难。

本文提出了一种基于光弹调制器的消光椭圆偏测量技术。将光弹调制器和两块 $\lambda/4$ 波片组合构成旋光调制器,对相关方位角进行调制。该椭圆偏测量技术中不需旋转光弹调制器。利用琼斯矩阵分析了该椭圆偏测量技术的原理,最后实验验证了该技术的有效性。

2 测量原理

椭圆偏测量的物理量被称为椭圆偏参数 Ψ 和 Δ , 定义为^[7]

$$\tan \Psi \exp(i\Delta) = r_p/r_s, \quad (1)$$

式中 r_p 和 r_s 分别是相对于入射面的偏振光平行分量和垂直分量的复菲涅耳反射系数。由测量得到的椭圆偏参数 Ψ 和 Δ 经数值反演即可得到相关的样品参数,如薄膜材料的折射率和膜层厚度。

基于光弹调制器的消光椭圆偏测量技术光路示意图如图 1 所示。光学测量系统主要包括激光器、起偏器、光弹调制器、两块 $\lambda/4$ 波片和检偏器组成。建立的坐标系定义为: z 轴为光的传播方向, x 轴平行于入射面, y 轴垂直于入射面。系统中光弹调制器的方位角为 0 (即光弹调制器的调制轴平行于入射面), 光弹调制器前的 $\lambda/4$ 波片的方位角为 -45° , 光弹调制器后的 $\lambda/4$ 波片的方位角为 45° 。激光器发出的光束经起偏器, -45° 方位角的 $\lambda/4$ 波片, 光弹调制器, 45° 方位角的 $\lambda/4$ 波片后入射到样品表面, 与样品作用后的反射光经检偏器后由光电探测器进行探测, 经锁相放大器得到基频分量。当起偏器的方位角固定为 45° 时, 旋转检偏器直至基频分量消光, 由此时检偏器的方位角可得到椭圆偏参数 Ψ ; 当检偏器的方位角固定为 45° 时, 旋转起偏器直至基频分量消光, 由此时起偏器的方位角可得到椭圆偏参数 Δ 。

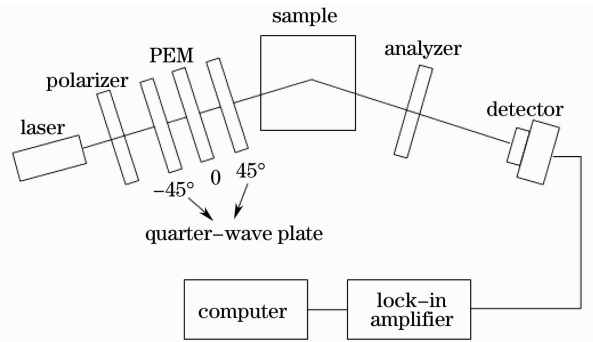


图 1 基于光弹调制器的消光椭圆偏测量技术光路示意图

Fig. 1 Schematic view of null ellipsometry based on photoelastic modulation

方位角 P 的起偏器出射光束的斯托克斯矢量是

$$\mathbf{S} = \frac{I_0}{2} \begin{pmatrix} 1 \\ \cos 2P \\ \sin 2P \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

式中 I_0 是起偏器入射光束的光强。

检偏器出射光束的斯托克斯矢量可表示为

$$\mathbf{S} = \mathbf{A} \mathbf{M} \mathbf{Q}(45^\circ) \mathbf{B} \mathbf{Q}(-45^\circ) \mathbf{S}, \quad (3)$$

其中 \mathbf{A} 是方位角为 α 时的检偏器的穆勒矩阵, $\mathbf{Q}(45^\circ)$ 和 $\mathbf{Q}(-45^\circ)$ 分别是方位角为 45° 和 -45° 时的 $\lambda/4$ 波片的穆勒矩阵, 其具体穆勒矩阵由参考文献 [8,9] 给出。

光弹调制器的穆勒矩阵为

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \beta(t) & -\sin \beta(t) \\ 0 & 0 & -\sin \beta(t) & \cos \beta(t) \end{pmatrix}, \quad (4)$$

式中 $\beta(t)$ 是偏振光通过光弹调制器时, 在光弹调制器感生的快、慢轴方向上两偏振分量的相位延迟量随时间变化的函数。该函数可以表示为

$$\beta(t) = B_0 \sin(\omega t), \quad (5)$$

式中 ω 是调制频率, B_0 是峰值延迟量。

各向同性待测样品的穆勒矩阵可以表示为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 1 & -\cos 2\Psi & 0 & 0 \\ -\cos 2\Psi & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sin 2\Psi \cos \Delta & \sin 2\Psi \sin \Delta \\ 0 & 0 & -\sin 2\Psi \sin \Delta & \sin 2\Psi \cos \Delta \end{pmatrix}, \quad (6)$$

将各器件穆勒矩阵代入(3)式, 可得到通过检偏器的光束光强为

$$I = \frac{I_0}{4} [1 - \cos 2\alpha \cos 2\Psi - (\cos 2P \sin 2\alpha \sin 2\Psi + \sin 2P \cos 2\Psi - \sin 2P \cos 2\alpha) \times \sin \beta(t) - (\cos 2P \cos 2\Psi - \cos 2P \cos 2\alpha - \sin 2P \sin 2\alpha \sin 2\Psi \cos \Delta) \times \cos \beta(t)], \quad (7)$$

于是,对(6)式进行傅里叶级数展开^[10],并将展开式代入(7)式中,可以得到检偏器出射光光强信号的基频分量为

$$I_{1f} = k(\cos 2P \sin 2\alpha \sin 2\Psi \cos \Delta + \sin 2P \cos 2\Psi - \sin 2P \cos 2\alpha), \quad (8)$$

式中的 k 是比例因子。

根据(8)式,当 $P=45^\circ$,如果基频分量消光,有

$$\cos 2\Psi = \cos 2\alpha. \quad (9)$$

当 $\alpha=45^\circ$,如果基频分量消光,有

$$\cos \Delta = -\frac{\tan 2P}{\tan 2\Psi}. \quad (10)$$

3 实 验

实验中,所用的光源是 He-Ne 激光器,工作波长是 632.8 nm,输出功率是 2 mW。起偏器和检偏器均为格兰-泰勒棱镜,其消光比为 10^{-5} 。两个 $\lambda/4$ 波片均是工作波长为 632.8 nm 的石英波片,起偏器、检偏器和两个 $\lambda/4$ 波片分别置于旋转台上,旋转台的最小角度为 0.1° ,分辨率为 0.002° 。光弹调制器为 Hinds 公司 PEM-90 系列的 I/FS50 型光弹调制器,其峰值延迟量可以利用配套的控制器的调整。光弹调制器的调制频率为 50 kHz,其光谱使用范围为 170~2600 nm。光电探测器为光电二极管,所用数据采集卡是 ADLINK 公司的 PCI-9812 采集卡,该采集卡是 4 通道 12 位的。利用信号调理器对光电二极管输出的电信号进行前置放大、滤波和主放大后,分离出直流分量和交流分量。交流分量经锁相放大器后得到基频分量,经过数据采集卡输入计算机。

测量样品是欧瑞康公司友情提供的 ZnS 薄膜,厂家标定厚度为 170 nm,基底是 K9 玻璃。为了消除玻璃基底下表面反射光的影响,将样品下表面经打磨后涂上消光漆。激光器发出的光束到达样品的入射角是 70° 。

光弹调制器的振动轴平行于水平面,其他器件

的方位角以光弹调制器的振动轴为标准。实验前,将光弹调制器前后的两块 $\lambda/4$ 波片的快轴和光弹调制器的振动轴的夹角分别调为 -45° 和 45° 。然后将待测薄膜样品放置在样品台上,调整入射角为 70° 。首先将起偏器的方位角固定为 45° ,旋转检偏器直至基频分量消光,记录此时检偏器的方位角 α 。然后将检偏器的方位角固定为 45° ,旋转起偏器直至基频分量消光,记录此时检偏器的方位角 P 。实验记录的消光角 α 和 P 分别为 17.68° 和 164.30° 。根据(9)式和(10)式,由记录的消光角 α 和 P 可得到椭偏参数 Ψ 和 $\cos \Delta$,分别为 17.68° 和 0.8601。在工作波长 632.8 nm 下,环境媒质的折射率为 1,K9 玻璃的折射率是 1.516,ZnS 的折射率的估计值 2.3,薄膜的标定厚度是 170 nm。利用这些初始值,通过数值反演程序,可得到 ZnS 的折射率和薄膜的厚度,分别为 2.237 和 171.5 nm。

为了估计该椭偏测量技术的性能,将上面的测量结果与利用 Wollam 公司的 W-VASETM 椭偏仪的测量结果做了比较。两椭偏仪测量结果如表 1 所示。

表 1 与 W-VASE 椭偏仪测量结果比较
Table 1 Comparison of the measured values using two type ellipsometers

	Refractive index	Thickness /nm
Our ellipsometer	2.237	171.5
W-VASE TM ellipsometer	2.228	172.3

由表 1 可以看出,基于光弹调制的消光椭偏仪和 W-VASETM 椭偏仪的测量结果很相符,这说明了本文提出的基于光弹调制的消光椭偏测量技术的有效性得到了验证。

为了确定重复测量精度,对样品进行多次测量,测量的消光角组合如表 2 所示。 α 和 P 的平均值分别为 17.67° 和 164.31° ;均方差分别为 0.013° 和 0.025°。

表 2 α 和 P 的重复测量值
Table 2 Repeated measured values of α and P

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\alpha /(^{\circ})$	17.68	17.65	17.68	17.66	17.69	17.67	17.67	17.68	17.69
$P /(^{\circ})$	164.30	164.35	164.29	164.34	164.29	164.30	164.32	164.28	164.29

根据测量的消光角,由(9)式和(10)式求出椭偏参数后,通过数值反演程序,可得到 ZnS 的折射率和薄膜的厚度。测得的 ZnS 的折射率(n)和薄膜的

厚度(d)如图 2 和图 3 所示。

根据图 2 和图 3,可以得到 ZnS 的折射率和薄膜的厚度的均方差,分别为 0.003 和 0.25 nm。

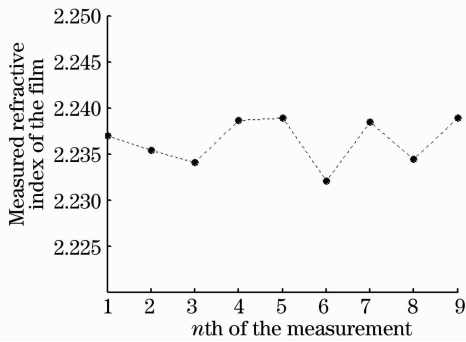


图 2 ZnS 折射率的测量值

Fig. 2 Measured refractive index of the ZnS film

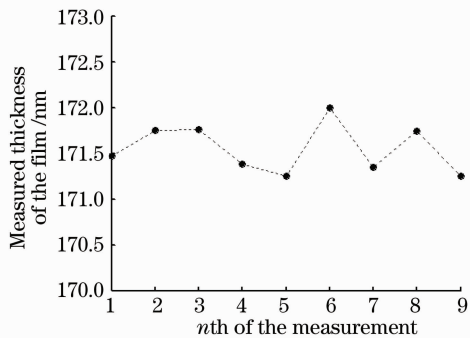


图 3 ZnS 薄膜厚度的测量值

Fig. 3 Measured thickness of the ZnS film

4 结 论

提出了一种基于光弹调制器的消光椭偏测量技术。将光弹调制器和两块 $\lambda/4$ 波片组合构成旋光调制器,对相关方位角进行调制。与传统消光椭偏测量技术相比,该技术利用的是探测光的基频分量,消除

了背景噪声和环境干扰等对测量结果的影响。该椭偏测量技术具有较高的测量精度。利用 ZnS 薄膜验证了基于光弹调制的消光椭偏测量技术的可行性。

参 考 文 献

- 1 Hiroshi Takasako. Automatic ellipsometer. automatic polarimetry by means of an ADP polarization modulator III [J]. *Appl. Opt.*, 1966, **5**(5): 759~764
 - 2 J. L. Ord, B. L. Wills. A computer-operated following ellipsometry[J]. *Appl. Opt.*, 1967, **6**(10): 1673~1677
 - 3 H. J. Mathieu, D. E. McClure, R. H. Muller. Fast self-compensating ellipsometer [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1974, **45**(6): 798~802
 - 4 M. Yamamoto, Y. Hotta, M. Sato. A tracking ellipsometer of picometer sensitivity enabling 0.1% sputtering-rate monitoring of EUV nanometer multilayer fabrication[J]. *Thin. Solid. Film*, 2003, **433**: 224~229
 - 5 H. Zhu, L. Liu, Y. Wen *et al.*. High-precision system for automatic null ellipsometric measurement[J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(22): 4536~4540
 - 6 K. Postava, A. Maziewski, T. Yamaguchi *et al.*. Null ellipsometer with phase modulation [J]. *Opt. Express*, 2004, **12**(24): 6040~6045
 - 7 Harland G. Tompkins, Eugene A. Irene. Handbook of Ellipsometry[M]. New York: William Andrew, Inc., 2005. 12
 - 8 Kun Yang, Aijun Zeng, Xiangzhao Wang *et al.*. Real-time measurement of the fast axis angle of a quarter-wave plate based on simultaneous shifting technique[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(8): 568~571
 - 9 Kun Yang, Aijun Zeng, Xiangzhao Wang *et al.*. Method for rapid measuring retardation of a quarter-wave plate based on simultaneous shifting technique [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(9): 673~675
 - 10 Yang Kun, Zeng Aijun, Wang Xiangzhao *et al.*. Fast axis calibration of quarter-wave plate by fundamental component extinction[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(11): 1553~1556
- 杨 坤, 曾爱军, 王向朝等. 基于基频分量消光的 $1/4$ 波片快轴标定方法[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11): 1553~1556