

斯托克斯椭偏仪仪器矩阵在位定标方法

张 勇¹ 黄佐华¹ 赵振堂^{1,2} 曾宪佑¹ 周进朝¹

(¹ 华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006)
² 中国移动韶关分公司, 广东 韶关 512000)

摘要 斯托克斯椭偏仪可以快速测量薄膜材料的光学参数,其仪器矩阵的精确度直接影响系统对薄膜反射光线斯托克斯参量的测量,间接限制了薄膜参数的测量精度。对线偏振光与标准薄膜片产生不同偏振态的机制进行理论推导,并根据四点定标法原理,利用线偏振光与标准薄膜片组合的在位定标方法实现对斯托克斯椭偏仪仪器矩阵的精确测量,有效避免了传统定标方法中光学元件方位角及其不完美产生的误差,进而提高了薄膜光学参数的测量精度。实验表明,采用在位定标方法,薄膜反射光线的斯托克斯参量的测量精度达 0.6%,薄膜厚度及折射率的测量偏差分别小于 0.2 nm 及 0.003。

关键词 测量;斯托克斯椭偏仪;在位定标;仪器矩阵;薄膜厚度;折射率

中图分类号 O443 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/AOS201333.0212002

In-Place Calibration of Stokes Ellipsometer's Instrument Matrix

Zhang Yong¹ Huang Zuohua¹ Zhao Zhentang^{1,2} Zeng Xianyou¹ Zhou Jinzhao¹

(¹ School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University,
Guangzhou, Guangdong 510006, China
² Shaoguan Branch, China Mobile, Shaoguan, Guangdong 512000, China)

Abstract Stokes ellipsometer can measure the optical parameters of thin films rapidly. The precision of the instrument matrix of Stokes ellipsometer directly affects the measurement of the Stokes parameters of the light reflected by films and indirectly limits the measurement accuracy of the optical parameters of films. It is studied that how to generate elliptically polarized light with a combination of linearly polarized light and standard films theoretically. According to the four-point calibration method, the instrument matrix with combination of linearly polarized light and standard films in place are calculated, and the errors caused by the azimuth of optical components and its defects in traditional calibration methods are avoided effectively, thereby improving measurement accuracy of the optical parameters of thin films. The experimental results show that, in the method, the deviation of the measurement of Stokes parameters of light reflected by the film is less than 0.6% and the measurement deviations of thickness and refractive index are less than 0.2 nm, 0.003 respectively.

Key words measurement; Stokes ellipsometer; in-place calibration; instrument matrix; thickness of film; index of refraction

OCIS codes 120.5410; 230.0040; 230.5160; 310.6860; 310.68701

1 引 言

椭偏仪能够精确测量薄膜材料的光学参数,如厚度、折射率和吸收系数等。斯托克斯椭偏仪由于没有转动部件,能够近似实时地测量薄膜反射光线

的偏振态进而测量薄膜光学参数,特别在薄膜快速生长、薄膜受激形变及金属热物性测量等领域有重要应用^[1~4]。通过对斯托克斯椭偏仪的研究发现^[5,6],其仪器矩阵的精确度决定了薄膜参数测量

收稿日期: 2012-08-27; **收到修改稿日期:** 2012-09-27

基金项目: 广东省科技计划项目(C60109, 2006B12901020)和教育部高等学校博士学科点专项科研基金(20104407110008)资助课题。

作者简介: 张 勇(1987—),男,硕士研究生,主要从事光电技术与系统等方面的研究。E-mail: 397210785@qq.com

导师简介: 黄佐华(1961—),男,硕士,教授,主要从事光电技术与系统和光信息处理等方面的研究。

E-mail: zuohuah@163.com(通信联系人)

的精度,是测量误差的主要来源。仪器矩阵常见的定标方法有四点法和椭圆偏振-偏振定标(E-P)法^[7,8],它们都是通过一组包含起偏器和1/4波片的偏振光发生器(PSG)产生4组或4组以上的偏振光直接入射进入斯托克斯椭圆仪测量模块进行仪器矩阵的定标。PSG中光学元件方位角误差及光学元件本身缺陷^[9-11]以及测量过程中测量角度调节引起的光路偏移严重影响定标的准确性。基于以上不足,结合四点法,本文运用线偏振光与标准薄膜片组合的在位方案实现斯托克斯椭圆仪测量系统仪器矩阵的精确定标。实验表明,薄膜反射光线的斯托克斯参量的测量精度达0.6%,优于四点法的3%和E-P法的2%^[12,13]。

2 椭圆仪仪器矩阵定标原理

2.1 四点定标法

利用PSG产生4个线性无关的偏振态 $S_1 \sim S_4$,斯托克斯椭圆仪相应的电信号矢量为 $I_1 \sim I_4$ 。根据光的传输理论^[14]有

$$I_k = AS_k, \quad k = 1, 2, 3, 4, \quad (1)$$

将(1)式组合成一个矩阵,即

$$\mathbf{Y} = \mathbf{A}\mathbf{X}, \quad (2)$$

式中矩阵 $\mathbf{Y} = [I_1 \ I_2 \ I_3 \ I_4]$,矩阵 $\mathbf{X} = [S_1 \ S_2 \ S_3 \ S_4]$, \mathbf{A} 为仪器矩阵。矩阵 \mathbf{X} 中的各列经过选择可保证线性无关,所以一定存在逆矩阵 \mathbf{X}^{-1} 。由(2)式得到仪器矩阵 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = \mathbf{Y}\mathbf{X}^{-1}. \quad (3)$$

2.2 偏振光与标准薄膜片组合在位偏振态的产生

选取椭圆仪测量时的入射角,如 70° ,用 (E_{ip}, E_{is}) 和 (E_{rp}, E_{rs}) 分别表示入射光和反射光电矢量的

复振幅, (β_{ip}, β_{is}) 和 (β_{rp}, β_{rs}) 分别表示入射光和反射光电矢量的幅角,椭圆参量 ϕ 和 Δ 可写为^[15]

$$\begin{cases} \tan \phi = \frac{|E_{rp}/E_{rs}|}{|E_{ip}/E_{is}|} = \left| \frac{E_{rp}}{E_{rs}} \cdot \frac{E_{is}}{E_{ip}} \right|, \\ \Delta = (\beta_{rp} - \beta_{rs}) - (\beta_{ip} - \beta_{is}) \end{cases} \quad (4)$$

设光束先通过一方位角为 α 的起偏器再射入薄膜,入射线偏振光的归一化斯托克斯参量为 $\{1, \cos 2\alpha, \sin 2\alpha, 0\}$,可知

$$\begin{cases} \left| \frac{E_{ip}}{E_{is}} \right| = \frac{1}{\tan \alpha}, \\ \beta_{is} - \beta_{ip} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

将(5)式代入(4)式可得

$$\begin{cases} \left| \frac{E_{rp}}{E_{rs}} \right| = \frac{\tan \phi}{\tan \alpha}, \\ \beta_{rs} - \beta_{rp} = -\Delta \end{cases} \quad (6)$$

将(6)式代入斯托克斯参量表达式并归一化得

$$\begin{cases} S_0 = 1 \\ S_1 = \frac{\tan^2 \phi - \tan^2 \alpha}{\tan^2 \phi + \tan^2 \alpha} \\ S_2 = \frac{2 \tan \phi \tan \alpha \cos \Delta}{\tan^2 \phi + \tan^2 \alpha} \\ S_3 = -\frac{2 \tan \phi \tan \alpha \sin \Delta}{\tan^2 \phi + \tan^2 \alpha} \end{cases} \quad (7)$$

在入射光波长、入射角及环境折射率确定的条件下,椭圆参数 ϕ 与 Δ 只与薄膜本身的光学属性有关^[16],由(7)式可通过线偏振光及标准薄膜片的组合在位产生已知的偏振光。采用厚度分别为86.0、9.5、199.3、57.3 nm且折射率为1.46的Si衬底SiO₂标准片进行定标。在激光波长632.8 nm、入射角 70° 、起偏器方位角 45° 状态下,经4块标准薄膜片反射后光线的斯托克斯参量如表1所示。

表1 经标准薄膜片反射后光线的斯托克斯参量

Table 1 Stokes parameters of reflected light from standard thin films

Thickness /nm	$\phi /(^{\circ})$	$\Delta /(^{\circ})$	Stokes parameters of reflected light			
			S_0	S_1	S_2	S_3
86.0	35.12	79.10	1	-0.3381	0.1780	-0.9241
9.5	11.92	152.88	1	-0.9147	-0.3597	-0.1842
199.3	33.90	279.32	1	-0.3778	0.1499	0.9136
57.3	25.12	90.33	1	-0.6396	-0.0044	-0.7687

3 椭圆测量系统及定标

3.1 系统光路

图1是椭圆仪四点在位定标实验系统示意图。波长为632.8 nm的高稳定度He-Ne激光器发射的激光经偏振器后入射薄膜表面,反射光由4个探测

器组成的分振幅偏振测量模块(DOAP)接收。经过测试,4个探测器对于光强的响应具有线性一致性。光电信号经过放大、模数(A/D)转换,经由数据采集仪输入计算机^[17]。

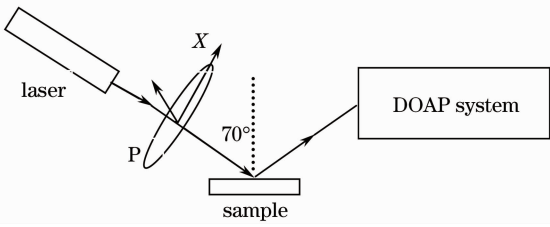


图 1 斯托克斯参量椭圆偏测量系统

Fig. 1 Experimental system of the Stokes ellipsometer

3.2 定标过程

对于椭圆偏仪, 70° 为其薄膜参数测量的最佳入射角, 且实验表明起偏器方位角为 45° 时, 薄膜参数测量误差最小, 故先将图 1 实验系统的入射角选为 70° , 起偏器方位角调至 45° , 再把 4 块标准薄膜片依次放置在样品台上, 并相应记录下所采集到的电流信号。为了消除暗电流的影响, 对每个光电探测器的暗电流进行了测量记录, 并在最终得到的电流信号中将暗电流减去。经标准薄膜片反射进入 DOAP 的光线的斯托克斯矩阵 \mathbf{S} 及相应的电流矩阵 \mathbf{I} 分别为

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -0.3381 & -0.9147 & -0.3778 & -0.6396 \\ 0.1780 & -0.3597 & 0.1499 & -0.0044 \\ -0.9241 & -0.1842 & 0.9136 & -0.7687 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 0.1236 & 0.1984 & 0.0846 & 0.1679 \\ 0.2727 & 0.0067 & 0.3234 & 0.1563 \\ 0.0675 & 0.0141 & 0.0433 & 0.0484 \\ 0.7008 & 1.1592 & 0.7478 & 0.9977 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

由(3)式得到 \mathbf{A} 为

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0.0488 & -0.1564 & -0.0053 & -0.0247 \\ 0.3229 & 0.2137 & 0.3165 & 0.0370 \\ 0.0544 & 0.0237 & 0.0577 & -0.0118 \\ 0.1475 & -1.3402 & 0.5924 & 0.0056 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

其行列式为 9.39×10^{-4} , 是非奇异的, 存在逆矩阵。

4 实验结果

为了验证 \mathbf{A} 的正确性, 对 4 个标准薄膜片以及北京大学提供的已知薄膜片(折射率为 1.46, 厚度为 100 nm)进行测试并且与美国产 L116S300 型椭圆偏仪的测试结果进行对比, 结果如表 2 所示。

表 2 本文系统与 L116S300 型椭圆偏仪的测试结果对比
Table 2 Measurement results comparison between our system and type L116S300 of ellipsometer

Thickness / nm	Results of our system		Results of L116S300	
	n	d / nm	n	d / nm
199.3	1.464	199.40	1.458	199.02
86.0	1.460	86.08	1.469	86.51
9.5	1.460	9.44	1.460	9.09
57.3	1.468	57.52	1.457	57.09
100.0	1.459	99.81	1.469	101.34

表 2 所示的两台仪器对标准片测量结果, 薄膜折射率 n 及薄膜厚度 d 相关性系数高于 99.9%, 这说明两仪器具有很好的一致性, 同时也说明了所给出的定标方法是可行且精确的。为了进一步验证定标的稳定性, 对 4 个标准薄膜片及北京大学提供的厚度为 100 nm 的已知薄膜片进行多次测量, 薄膜厚度及折射率的测量测量偏差分别小于 0.2 nm 及 0.003。

5 误差分析

(3)式中, \mathbf{Y} 矩阵是定标测量值, 存在着平均值和平均绝对误差, 于是(3)式可写成

$$\mathbf{A} = (\bar{\mathbf{Y}} \pm \delta \mathbf{Y}) \mathbf{X}^{-1} = \bar{\mathbf{A}} \pm \delta \mathbf{A}, \quad (11)$$

(11)式右边第二项包含了误差信息。由(1)式, 当 \mathbf{A} 确定后, 通过测量任意状态下的电信号 $i(i_0, i_1, i_2, i_3) = \bar{i} \pm \delta i$, 即可以确定偏振光的状态 \mathbf{S} 。(11)式代入(1)式得

$$\mathbf{S} = \mathbf{A}^{-1} i = (\bar{\mathbf{A}} + \delta \mathbf{A})^{-1} (\bar{i} + \delta i), \quad (12)$$

根据泰勒展开公式计算得

$$\mathbf{S} = \mathbf{A}^{-1} i = \bar{\mathbf{A}}^{-1} \bar{i} \mp \bar{\mathbf{A}}^{-1} \delta \mathbf{A} \bar{\mathbf{A}}^{-1} \bar{i} \pm \bar{\mathbf{A}}^{-1} \delta i \mp \bar{\mathbf{A}}^{-1} \delta \mathbf{A} \bar{\mathbf{A}}^{-1} \delta i, \quad (13)$$

式中等号右边第一项为实验结果, 第二、三、四项均为误差, 由于第四项为一个二阶小量, 故可舍去。

运用定标所用的 4 个标准薄膜片及北京大学提供的厚度为 100 nm 的已知薄膜片对系统进行测试, 每一薄膜片都进行多次测量, 并从结果中随机抽取 30 组, 测试结果如表 3 所示。

把表 3 数据带入(13)式进行矩阵运算, 获得斯托克斯矢量各个分量的测量偏差分别为 0.0015、0.0002、0.0009、0.0053。由此可知, 工作波长为 632.8 nm 时, 椭圆偏仪的斯托克斯参量测量的测量偏差小于 0.6%。

表 3 标准薄膜片的电信号测试结果

Table 3 Testing results of electric signals from the standard films

Thickness /nm	i_0	i_1	i_2	i_3
86.0	0.1236±0.00015	0.2727±0.00015	0.0675±0.00010	0.7008±0.00015
9.5	0.1984±0.00015	0.0067±0.00020	0.0141±0.00010	1.1591±0.00025
199.3	0.0846±0.00015	0.3232±0.00025	0.0433±0.00020	0.7478±0.00025
57.3	0.1679±0.00020	0.1564±0.00020	0.0484±0.00015	0.9977±0.00030
100.0	0.0961±0.00025	0.3237±0.00060	0.0750±0.00025	0.4484±0.00060

椭圆参数 ψ 、 Δ 的不确定度可由误差传递公式计算,由(7)式分别可得

ψ 的不确定度:

$$\delta\psi = \frac{1}{2S_0 \sqrt{S_0^2 - S_1^2}} (S_0 \delta S_1 - S_1 \delta S_0); \quad (14)$$

Δ 的不确定度:

$$\delta\Delta = \frac{S_2}{S_2^2 + S_3^2} \delta S_3 - \frac{S_3}{S_2^2 + S_3^2} \delta S_2. \quad (15)$$

利用实验数据计算得 ψ 和 Δ 的不确定度分别为 0.0001 和 0.0003,可分别换算为 0.0057° 和 0.0172°。由椭圆参数 ψ 和 Δ 无法直接解析出薄膜厚度 d 及折射率 n ,只能借助数据处理软件^[18]求解。将数据计算所得的 ψ 和 Δ 及其不确定信息代入数据处理软件可得出 d 及 n 的不确定度分别为 0.2 nm 和 0.003。

6 结 论

根据四点定标法原理,运用线偏振光和标准薄膜片的组合进行斯托克斯椭圆仪的在位定标,避免了传统定标方法中 PSG 中光学元件方位角及其缺陷引起的误差,实现对斯托克斯椭圆仪仪器矩阵的精确测量。实验误差分析表明薄膜反射光线的斯托克斯参量的测量偏差小于 0.6%,薄膜厚度及折射率的测量偏差分别小于 0.2 nm 和 0.003,表明所给出的定标方法可行且精确,为斯托克斯椭圆仪的精确测量提供了保障。

参 考 文 献

- 1 A. Seifert, F. Sachsenhofer, G. Pottlacher *et al.*. A fast laser polarimeter improving a micro-second pulse heating system[J]. *Int. J. Thermophys.*, 2002, **23**(5): 1267~1280
- 2 G. Pottlacher, A. Seifert. Microsecond laser polarimetry for emissivity measurements on liquid metals at high temperatures — application to tantalum[J]. *Int. J. Thermophys.*, 2002, **23**(5): 1281~1291
- 3 H. Schwiecker. High speed ellipsometry for the production of thin metal layers [C]. *SPIE*, 1992, **1746**: 222~230
- 4 Li Zhicheng, Tang Zhilie, Chen Ping *et al.*. Study of photoelastic stress distribution and imaging method base on Stokes parameters [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(5): 0512005

李志诚,唐志列,陈萍等.基于斯托克斯参量的光弹性应力分

布及成像方法研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(5): 0512005

- 5 Cheng Minxi, He Zhenjiang, Huang Zuohua. Polarimeter system of Stokes parameters based on division-of-amplitude [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, **35**(5): 93~97
- 程敏熙,何振江,黄佐华.分振幅法偏振光斯托克斯参量测量系统[J]. *光电工程*, 2008, **35**(5): 93~97
- 6 Cheng Minxi, He Zhenjiang, Huang Zuohua. A method of ellipsometry based on Stokes parameters with a division-of-amplitude polarimeter (DOAP) system [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2009, **36**(7): 100~106
- 程敏熙,何振江,黄佐华.分振幅斯托克斯参量的椭圆测厚方法[J]. *光电工程*, 2009, **36**(7): 100~106
- 7 R. M. A. Azzam, E. Masetti, I. M. Elminyawi *et al.*. Construction, calibration, and testing of a four-detector photopolarimeter[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1988, **59**(1): 84~88
- 8 R. M. A. Azzam, Ali G. Lopez. Accurate calibration of the four-detector photopolarimeter with imperfect polarizing optical elements[J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1989, **6**(10): 513~521
- 9 Bo Feng, Zhu Jianqiang, Kang Jun. Precise measurement and factors analysis for phase retardation of wave plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(6): 851~856
- 薄锋,朱健强,康俊.波片相位延迟的精确测量及影响因素分析[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6): 851~856
- 10 Du Xiliang, Dai Jingmin. New grating-based division-of-amplitude photopolarimeter [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(7): 57~62
- 杜西亮,戴景民.光栅分振幅光偏振测量系统的研制[J]. *光电工程*, 2006, **33**(7): 57~62
- 11 Hou Junfeng, Yu Jia, Wang Dongguang *et al.*. Phase retardation measurement of wave plates based on the self-calibration method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(4): 0408007
- 侯俊峰,于佳,王东光等.自校准法测量波片相位延迟[J]. *中国激光*, 2012, **39**(4): 0408007
- 12 Cheng Minxi. A Theoretical and Experimental Research of New Type Ellipsometry Based on Stokes Parameters [D]. Guangzhou: South China Normal University, 2007. 62~66
- 程敏熙.基于斯托克斯参量的新型椭圆测厚理论和实验研究[D].广州:华南师范大学,2007.62~66
- 13 Du Xiliang. Study of the Technique for Measuring the Polarization State of Light Based on Division of Amplitude Method [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. 49~60
- 杜西亮.基于振幅分割的光偏振测量技术的研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.49~60
- 14 Liao Yanbiao. Polarization of Optics [M]. Beijing: Science Press, 2003. 52~56, 243~244
- 廖延彪.偏振光学[M].北京:科学出版社,2003.52~56, 243~244
- 15 Wu Sicheng, Wang Zuquan. Modern Physics Experiment [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. 155~165
- 吴思诚,王祖铨.近代物理实验[M].北京:高等教育出版社,2006.155~165
- 16 R. M. A. Azzam, N. M. Bashara. Ellipsometry and Polarized Light [M]. Liang Jimin, Yin Shubai, Zhang Fuchu *et al.*

Transl. Beijing: Science Press, 1986. 187~190

R. M. A. 阿查姆, N. M. 巴夏拉. 椭圆偏振测量术和偏振光 [M]. 梁基民, 尹树白, 张福初 等译. 北京: 科学出版社, 1986. 187~190

- 17 Wang Libo, Shi Zhidong, Yin Jun *et al.*. Measurement system of Stokes parameters by virtual instrument [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, **47**(4): 040701

王立波, 石志东, 殷 俊 等. 基于虚拟仪器的斯托克斯参量测试系统[J]. 激光与光电子学进展, 2010, **47**(4): 040701

- 18 Huang Zuohua, Wu Xuezhong, He Zhenjiang *et al.*. Design of a software for the ellipsometric data processing [J]. *College Physics*, 2004, **23**(9): 41~45
黄佐华, 吴雪忠, 何振江 等. 椭圆偏振法数据处理软件设计 [J]. 大学物理, 2004, **23**(9): 41~45

栏目编辑: 何卓铭