

文章编号 1004-924X(2016)04-0690-08

## 弹光和电光级联的组合相位调制型椭偏测量术

李克武<sup>1,2,3</sup>, 王黎明<sup>1\*</sup>, 王志斌<sup>1,2,3</sup>, 张瑞<sup>1,2,3</sup>, 薛瑞<sup>2</sup>, 陈友华<sup>1,2,3</sup>

(1. 中北大学 信息与通信工程学院, 山西 太原 030051;

2. 山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051;

3. 中北大学 电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051)

**摘要:**利用弹光调制器的偏振调制优势,提出了将弹光调制器和电光调制器级联的组合相位调制型椭偏测量术。该技术采用单光路实现信号探测,通过切换电光调制器的两个工作状态,并结合数字锁相信号处理技术来完成样品反射光的 p 分量和 s 分量的幅值比  $\Psi$  和相位差  $\Delta$  的全范围高精度测量。对提出的新型椭偏测量原理进行了分析,搭建了相应的实验系统。完成了弹光调制器的调制电压峰峰值和相位调制幅值关系的定标,定标结果优于 99.05%, 而且还采用系统初始偏移值的方法对实验系统进行了校准。最后,运用该系统对石英玻璃反射样品进行了实验分析,得到的  $\Psi$  和  $\Delta$  的测量精度分别优于 0.08° 和 0.81°。实验结果显示系统校准有效地消除了电光调制器和弹光调制器的剩余双折射引入的测量误差;数据采集和处理时间均在 ms 量级。提出的测量技术具有宽光谱测量、工作稳定、重复度高、测量速率快、成本相对较低和系统便于工业自动化集成的潜在优势。

**关键词:** 椭偏仪; 相位调制型椭偏测量术; 弹光调制; 电光调制

**中图分类号:** O436.3; TH744.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162404.0690

## Phase-modulated ellipsometry combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation

LI Ke-wu<sup>1,2,3</sup>, WANG Li-ming<sup>1\*</sup>, WANG Zhi-bin<sup>1,2,3</sup>, ZHANG Rui<sup>1,2,3</sup>, XUE Rui<sup>2</sup>, CHEN You-hua<sup>1,2,3</sup>

(1. School of Information and Communication Engineering,  
North University of China, Taiyuan 030051, China;

2. Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for  
Opto-electric Information and Instrument, Taiyuan 030051, China;

3. Key Laboratory of Electronic Measurement Technology,  
North University of China, Taiyuan 030051, China)

\* Corresponding author, E-mail: wlm@nuc.edu.cn

**Abstract:** On the basis of the advantages of photo-elastic modulation, a phase-modulated ellipsometry combined a photo-elastic modulator with an electro-optic modulator is proposed. It uses one single detection light path to obtain the signals. By switching two work conditions of the electro-optic modulator, it takes lock-in signal processing technology to solve out the two ellipsometric parameters, ampli-

收稿日期: 2015-11-13; 修订日期: 2016-01-03.

基金项目: 国家国际科技合作专项 (No. 2013DFR10150); 国家自然科学基金资助项目 (No. 61127015, No. 61471325, No. 61505179); 山西省青年科技研究基金资助项目 (No. 2014021012)

tude ratio  $\Psi$  and phase difference  $\Delta$ , from the p component and s component of reflection light of a simple. The principle of the new type of ellipsometry is analyzed, and a principle prototype is set up. The relationship between the peak value of modulated voltage and the phase modulation amplitude of the photo-elastic modulator is calibrated, and the calibration result is better than 99.95%. Then, an instrument offset method is used to calibrate the experimental system. Finally, a quartz glass reflective sample is analyzed by using this system, and the measurement accuracy of the  $\Psi$  and  $\Delta$  are respectively better than  $0.08^\circ$  and  $0.81^\circ$ . The experimental results show that the instrument offset method effectively eliminates the detection errors introduced by the residual birefringence of the photo-elastic modulator and electro-optic modulator, and the data acquisition time and signals processing time are in the order of the millisecond. In conclusion, this phase-modulated ellipsometry proposed has potential advantages of wide spectrum measurement, stable operation, high repetition rate, fast measurement speed, low cost, and is conducive to industrial automation integration.

**Key words:** ellipsometer; phase-modulated ellipsometry; photo-elastic modulation; electro-optic modulation

## 1 引言

薄膜光学在信息技术、生物医学和集成电路等领域发挥着重要作用<sup>[1]</sup>。椭偏测量技术则是研究薄膜物理特性最有效的手段之一。该技术通过测量经薄膜反射(或透射)光的  $p$  分量和  $s$  分量的幅值比  $\Psi$  和相位差  $\Delta$  两个椭偏参量,来分析薄膜的厚度、折射率和消光系数等物理参数<sup>[2]</sup>。近年来,椭偏测量技术逐渐被拓展应用于 Mueller 矩阵元素分析,亚波长结构测量以及薄膜生长研究等领域<sup>[3-5]</sup>。

自 1887 年 Paul Drude 首次提出并运用椭偏理论来分析金属膜层厚度和光学参数以来<sup>[6]</sup>,椭偏测量技术及其工业应用得到了快速发展。目前,椭偏仪大致分为旋转偏振器件型和相位调制型两大类。前者在测量过程中通常需旋转检测光路中的起偏器、检偏器或补偿器。其中,旋转起偏器型或检偏器型椭偏仪适用于宽光谱光源测量和椭偏成像系统,其数据反演简单,并能够应用对称测量的方法消除测量误差;但当相位差  $\Delta$  为 0 或  $\pi$  时,测量不准确。旋转补偿器型椭偏仪虽能够准确测量  $\Psi$  和  $\Delta$ ,但它在宽光谱光源测量系统中应用时的定标复杂。此外,旋转偏振器件型椭偏仪在旋转偏振器件时,测量光斑会发生漂移,测量重复性差,并且测量速率一般较低。

相位调制型椭偏仪通常使用弹光调制器(Photo-elastic Modulator, PEM)作为其核心器件。PEM 具有光谱范围宽、通光孔径大、调制频率高和调制幅值大等优势<sup>[7-8]</sup>,结合数字锁相信号处理技术,能够设计出高精度、高灵敏度和高测量速率的椭偏仪。1969 年, S. N. Jaspersen 首次提出单个 PEM 的相位调制型椭偏仪,后来该类型椭偏仪由法国 Horiba 公司生产并销售<sup>[9-10]</sup>。该椭偏仪在测量过程需要调整一次仪器,通过两次测量才能够得到全部椭偏参数,这无疑降低了测量的精度和速率。1997 年, G. E. Jellison 设计了双 PEM 相位调制型椭偏仪。该仪器虽然一次测量便可得到全部椭偏参量,但对 PEM 要求严格、数据处理过程复杂、成本昂贵<sup>[11]</sup>。

现阶段,具有宽光谱测量、无需机械调节和快速操控的自动化椭偏测量技术受到越来越广泛地研究。因此,为了实现  $\Psi(0\sim 90^\circ)$  和  $\Delta(0\sim 360^\circ)$  全范围的高精度和高灵敏测量,本文利用 PEM 的偏振调制优势,将 PEM 和电光调制器(Electro-optical Modulator, EOM)级联<sup>[12]</sup>,克服了现有 PEM 相位调制型椭偏仪存在的不足,并运用数字锁相技术处理调制信号,开发出单个 PEM 和单个 EOM 组合、单个探测通道和两个数据处理模式切换的弹光和电光级联的组合相位调制型椭偏测量技术。然后搭建了试验系统,并对该试验系统进行了定标和实验分析。

## 2 弹光和电光级联的椭偏测量原理

PEM 和 EOM 级联的相位调制型椭偏测量系统原理如图 1 所示。检测光源经缩束准直后,通过起偏器(P)入射到待测样品,构成椭偏测量系统的入射光臂。入射光经样品反射后依次通过 EOM、PEM 和检偏器(A),最后被探测器探测,并构成椭偏测量系统的出射光臂。首先,调节 P 和 A 的偏振轴与  $x$  轴分别成  $45^\circ$  和  $0^\circ$ ,此时 EOM 调制快轴相对  $x$  轴成  $22.5^\circ$ ,PEM 调制快轴相对  $x$  轴成  $45^\circ$ 。

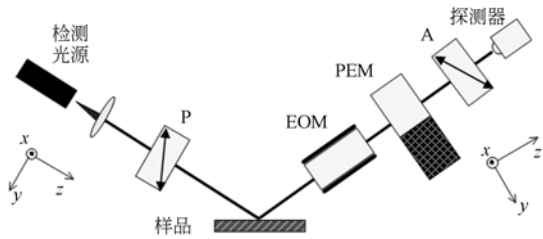


图 1 PEM 和 EOM 级联的组合相位调制型椭偏测量系统原理图

Fig. 1 Scheme of phase-modulated ellipsometric system combined PEM with EOM

运用 Stokes 参量和 Mueller 矩阵分析上述系统。通过 P 后入射光的 Stokes 参量为:

$$\mathbf{S}_m = I_0 [1 \ 0 \ 1 \ 0]^T, \quad (1)$$

式中  $I_0$  为检测激光通过起偏器后的总强度。待测各向同性样品的 Mueller 矩阵可表述为<sup>[13]</sup>:

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

其中: $\Psi$  为样品反射光的  $p$  分量和  $s$  分量的幅值比, $0^\circ \leq \Psi \leq 90^\circ$ ;  $\Delta$  为样品反射光的  $p$  分量和  $s$  分量的相位差, $0^\circ \leq \Delta \leq 360^\circ$ 。 $\Psi$  和  $\Delta$  为椭偏仪能够直接测量的两个椭偏参量,同理对于透射样品也具有相同的 Mueller 矩阵表达式。 $\Psi$  和  $\Delta$  满足:

$$\tan \Psi e^{i\Delta} = \frac{r_p}{r_s}, \quad (3)$$

其中: $r_p$  和  $r_s$  分别为样品对  $p$  分量和  $s$  分量的反射系数。PEM 和检偏器的 Mueller 矩阵分

别为<sup>[7]</sup>:

$$\mathbf{M}_{\text{PEM}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\delta_{\text{PEM}}) & 0 & -\sin(\delta_{\text{PEM}}) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & \sin(\delta_{\text{PEM}}) & 0 & \cos(\delta_{\text{PEM}}) \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中: $\delta_{\text{PEM}} = \delta_0 \sin(2\pi ft)$ ,  $\delta_0$  为 PEM 的相位调制幅值, $f$  为 PEM 的谐振频率。

EOM 是利用铌酸锂单轴晶体的横向体电光效应研制的<sup>[12]</sup>,采用 Y 切晶片,沿晶片光轴 Z 方向通光,在晶片 Y 方向上施加电场。该类型横向体电光调制器无静态双折射,未施加电场,即  $V=0$  时,入射光通过 EOM 不发生调制;施加半波电压,即  $V=V_\pi$  时,调制快轴沿晶片 Y 方向,入射光通过时使沿感应主轴的两个偏振分量产生  $\pi$  的相位延迟。因此,EOM 作为一个可开关的电光半波片引入本系统中,当  $V=0$  时,电光半波片处于关闭状态;当  $V=V_\pi$  时,电光半波片处于开状态<sup>[14]</sup>。EOM 两种工作状态下的 Mueller 矩阵分别描述为:

未施加电场, $V=0$  时,

$$\mathbf{M}_{\text{EOM}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

施加半波电压, $V=V_\pi$  时,

$$\mathbf{M}_{\text{EOM}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

各光学元件轴向理想匹配后,忽略检测光在传播过程中的损失,经 A 后出射光的 Stokes 参量为:

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M}_A \mathbf{M}_{\text{PEM}} \mathbf{M}_{\text{EOM}} \mathbf{M}_s \mathbf{S}_m. \quad (8)$$

将式(1)、(2)、(4)和(5)带入式(8),并考虑 EOM 的两种工作状态,得到探测器探测到的光强分别为:

$$I_1 = \frac{I_0}{2} (1 + \sin 2\Psi \sin \Delta \sin(\Delta_{\text{PEM}}) - \cos 2\Psi \cos(\delta_{\text{PEM}})), \quad (9)$$

$$I_{\parallel} = \frac{I_0}{2} (1 - \sin 2\Psi \sin \Delta \sin(\delta_{\text{PEM}}) + \sin 2\Psi \cos \Delta \cos(\delta_{\text{PEM}})), \quad (10)$$

$$\begin{cases} V_{\text{I(DC)}} = \frac{KI_0}{2} \\ V_{\text{II(DC)}} = \frac{KI_0}{2} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $I_{\text{I}}$  和  $I_{\text{II}}$  为 EOM 未施加调制电压即  $V=0$  时和施加半波电压即  $V=V_{\pi}$  时, 探测器探测到的光强。将上式中的  $\sin(\delta_{\text{PEM}}) = \sin(\delta_0 \sin(2\pi ft))$  和  $\cos(\delta_{\text{PEM}}) = \cos(\delta_0 \sin(2\pi ft))$  利用第一类贝塞尔级数展开得:

$$I_{\text{I}} = \frac{I_0}{2} (1 + \sin 2\Psi \sin \Delta (\sum_{2k-1} 2J_{2k-1}(\delta_0) \cdot \sin(2(2k-1)\pi ft)) - \cos 2\Psi (J_0(\delta_0) + \sum_{2k} 2J_{2k}(\delta_0) \cos(4k\pi ft))), \quad (11)$$

$$I_{\text{II}} = \frac{I_0}{2} (1 - \sin 2\Psi \sin \Delta (\sum_{2k-1} 2J_{2k-1}(\delta_0) \cdot \sin(2(2k-1)\pi ft)) + \sin 2\Psi \cos \Delta (J_0(\delta_0) + \sum_{2k} 2J_{2k}(\delta_0) \cos(4k\pi ft))), \quad (12)$$

式中:  $k$  为正整数,  $J_0$  为 0 阶贝塞尔级数,  $J_{2k-1}$ ,  $J_{2k}$  分别为  $2k-1$  阶和  $2k$  阶贝塞尔级数。探测器输出的信号经低通滤波后得到直流项, 式(11)和式(12)对应的直流项为:

$$\begin{cases} V_{\text{I(DC)}} = \frac{KI_0}{2} (1 - J_0(\delta_0) \cos 2\Psi) \\ V_{\text{II(DC)}} = \frac{KI_0}{2} (1 + J_0(\delta_0) \sin 2\Psi \cos \Delta) \end{cases}, \quad (13)$$

其中  $K$  是探测器的光电转换系数。将式(11)和式(12)对应的交流信号运用数字锁相放大技术分别提取出调制信号的一倍频项和二倍频项, 得到:

$$\begin{cases} V_{\text{I(1f)}} = \frac{KI_0}{\sqrt{2}} J_1(\delta_0) \sin 2\Psi \sin \Delta \\ V_{\text{I(2f)}} = -\frac{KI_0}{\sqrt{2}} J_2(\delta_0) \cos 2\Psi \end{cases}, \quad (14)$$

$$\begin{cases} V_{\text{II(1f)}} = -\frac{KI_0}{\sqrt{2}} J_1(\delta_0) \sin 2\Psi \sin \Delta \\ V_{\text{II(2f)}} = \frac{KI_0}{\sqrt{2}} J_2(\delta_0) \sin 2\Psi \cos \Delta \end{cases}. \quad (15)$$

由式(14)和式(15)可知, 椭偏参量的测量是相互关联的。值得注意的是,  $\sqrt{2}$  表明锁相输出的是倍频信号的均方根值而不是幅值。结合式(13)、式(14)和式(15), 通常将 PEM 的相位调制幅值设置为  $\delta_0 = 2.405 \text{ rad}$ , 使得  $J_0(2.405) = 0$ , 此时  $J_1(2.405) = 0.5192$ ,  $J_2(2.405) = 0.4318$ 。式(13)可简化为:

解调待测样品的椭偏参量时, 通常用到锁相输出的倍频项数据与直流项数据的比值, 比值分别为:

$$\begin{cases} R_1 = \frac{V_{\text{I(2f)}}}{V_{\text{I(DC)}}} = -A_1 \cos 2\Psi \\ R_2 = \frac{V_{\text{II(1f)}}}{V_{\text{II(DC)}}} = -A_2 \sin 2\Psi \cos \Delta \\ R_3 = \frac{V_{\text{II(2f)}}}{V_{\text{II(DC)}}} = A_1 \sin 2\Psi \sin \Delta \end{cases} \quad (17)$$

其中:  $A_1 = \sqrt{2} J_2(2.405) = 0.6107$  和  $A_2 = \sqrt{2} J_1(2.405) = 0.7343$ 。因此, 两个椭偏参量为:

$$\begin{cases} \Psi = \frac{1}{2} \arccos(-\frac{R_1}{A_1}) \\ \Delta = \arctan(-\frac{A_2 R_3}{A_1 R_2}) \end{cases}. \quad (18)$$

结合式(17)可得:

- (1) 当  $R_1 \leq 0$  时,  $\Psi \in [0^\circ, 45^\circ]$ ;
- (2) 当  $R_1 > 0$  时,  $\Psi \in (45^\circ, 90^\circ]$ 。特别地, 当  $\Psi$  取  $0^\circ$  或  $90^\circ$  时,  $\Delta$  不存在;
- (3) 当  $R_2 \leq 0, R_3 \geq 0$  时,  $\Delta \in [0^\circ, 90^\circ]$ ;
- (4) 当  $R_2 > 0, R_3 \geq 0$  时,  $\Delta \in (180^\circ, 270^\circ]$ ;
- (5) 当  $R_2 \geq 0, R_3 < 0$  时,  $\Delta \in (180^\circ, 270^\circ]$ ;
- (6) 当  $R_2 > 0, R_3 \leq 0$  时,  $\Delta \in (270^\circ, 360^\circ]$ 。

### 3 定标及实验

本文按图 1 搭建了实验系统。检测光源选用 632.8 nm 的 He-Ne 激光; 检偏器和起偏器为 Thorlabs 公司生产的格兰泰勒偏振器, 消光比优于 100 000 : 1。EOM 为 Y 切晶片, 沿晶片光轴 Z 方向通光, 在晶片 Y 方向上施加电场, 晶片尺寸为 31.10 mm × 11.45 mm × 4.62 mm, 针对 632.8 nm 的入射光, 测量得到半波电压为 1 132 V<sup>[12]</sup>。PEM 是课题组自行研制的双压电石英驱动的八角对称结构 PEM, 通光晶体为熔融石英, 谐振频率为 49.86 kHz。探测器选用 Thorlabs 公司的硅基跨阻放大光电探测器 PDA10A, 并设计制作了低通滤波电路, 选用 AMETEK7270 锁相放大器完成信号倍频项的提取。直流项和锁相放大器输出的倍频项数据均由 NI 采集卡输入计算机, 经计算机解调出椭偏测量结果。

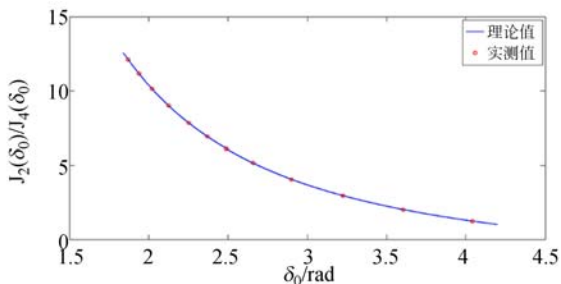
### 3.1 PEM 相位调制幅值与调制电压关系定标

由式(12)和式(13)可知, 椭圆参量的测量精度与 PEM 的相位调制幅值  $\delta_0$  直接相关。实际上, PEM 相位调制幅值  $\delta_0$  是由调制电压峰峰值  $V_{pp}$  决定的。因此, 精确定标 PEM 的调制电压和相位调制幅值之间的关系是十分必要的, 这里采用多倍频项比值法。将起偏器的偏振轴调节到  $0^\circ$ , 入射光臂不经过测量样品, 出射光臂中去掉电光调制器, 并调节入射光臂与出射光臂共轴重合, 观察二倍项和四倍频项的比值。根据文献[15]可得:

$$\frac{V'_{2f}}{V'_{4f}} = \frac{J_2(\delta_0)}{J_4(\delta_0)}. \quad (19)$$

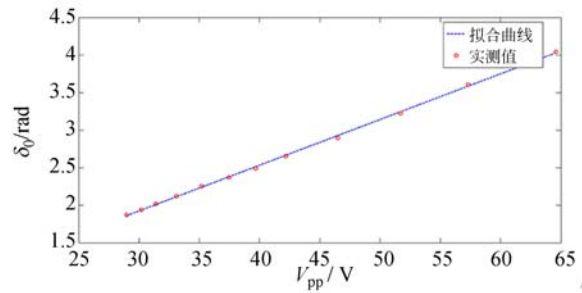
选取相位调制幅值  $\delta_0$  鉴于  $1.84 \sim 4.20$  rad 对 PEM 定标, 当  $\delta_0 = 1.84$  rad 时,  $J_1(\delta_0)$  取最大值; 当  $\delta_0 = 4.20$  rad 时,  $J_3(\delta_0)$  取最大值。本文自行设计 PEM 的 LC 高压驱动电路, 调制电压的调节精度为  $0.1$  V。从  $0$  逐渐增加调制电压, 观察锁相放大器输出的二倍频项和四倍频项, 当调制  $V_{pp} = 32.1$  V 时, 二倍频项第一次出现最大值, 此时  $\delta_0 = 2.05$  rad,  $J_2(\delta_0)$  最大。在该调制电压附近选取 12 组数据进行定标, 依据式(19), 锁相放大器输出的二倍项和四倍频项比值的测量值与理论值如图 2(a) 所示。通过图 2(a) 得到定标数据  $V_{pp}$  所对应的  $\delta_0$ , 并拟合得到  $V_{pp}$  与  $\delta_0$  的定标曲线, 如图 2(b) 所示。

由图 2(a) 可知,  $\frac{J_2(\delta_0)}{J_4(\delta_0)}$  的实测值与理论值吻合得很好。从图 2(b) 可以看出,  $V_{pp}$  与  $\delta_0$  呈很好的线性关系, 并且当  $V_{pp} = 39.7$  V 时,  $\delta_0$  的实测值 ( $2.488$  rad) 和拟合值 ( $2.512$  rad) 之间的最大相对偏差为  $0.95\%$ 。根据定标结果, 调制电压峰峰值  $V_{pp} = 37.9$  时,  $\delta_0 = 2.405$  rad。



(a)  $\frac{V'_{2f}}{V'_{4f}} = \frac{J_2(\delta_0)}{J_4(\delta_0)}$  定标图

(a) Calibration of  $\frac{J_2(\delta_0)}{J_4(\delta_0)}$



(b)  $V_{pp}$  与  $\delta_0$  关系定标图

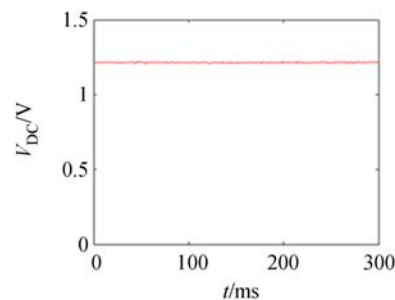
(b) Calibration of  $V_{pp}$

图 2 定标结果

Fig. 2 Calibration results

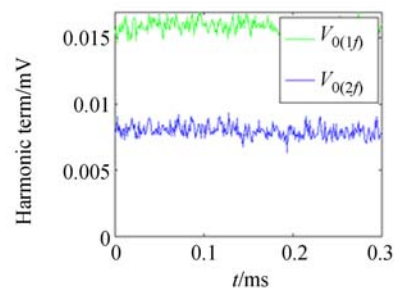
### 3.2 系统定标及实验

对所搭建的实验系统进行校准也是十分必要的。调节入射光臂不经过测量样品, 与出射光臂共轴重合, EOM 工作在状态 I。根据图 2(b) 设置  $V_{pp} = 37.9$  V, 使  $\delta_0 = 2.405$  rad,  $J_0(\delta_0) = 0$ 。NI 采集卡的采集频率设置为  $1$  kHz, 采集经低通滤波后的直流项和锁相放大器输出的倍频项数据, 结果如图 3 所示。



(a) 直流项

(a) DC term



(b) 倍频项

(b) The first and second harmonic terms

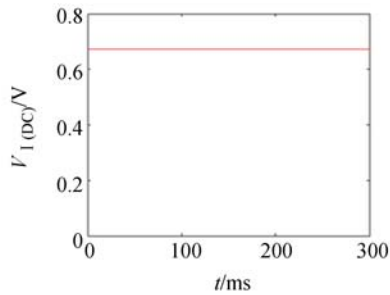
图 3 NI 采集卡的采集数据

Fig. 3 Data output from NI acquisition card

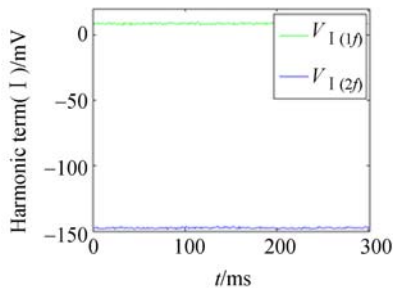
根据图 3(a)可知,激光光强稳定,其平均值为  $V_{0(DC)}=1\ 213.502\ \text{mV}$ 。根据图 3(b)可知,无待测样品时,一倍频  $V_{0(1f)}=0.016\ \text{mV}$ ,二倍频项  $V_{0(2f)}=0.008\ \text{mV}$ ,均不为 0。这主要是由 EOM 和 PEM 的微小剩余双折射造成的,两个倍频项的值不仅与剩余双折射有关,还与入射光强成正比。在测量过程中,该值可视为系统初始偏移值,数据处理时需要消除。

为了验证本方案的可行性,并进一步确定系统的测量精度。实验中采用研磨抛光的石英玻璃基片作为测量样品,其折射率  $n=1.46$ 。PEM 调制电压幅值设置为  $V_{pp}=37.9\ \text{V}$ ,测量入射角为  $80,70,60$  和  $50^\circ$  的 5 组数据,设置 NI 采集卡的采集频率为  $1\ \text{kHz}$ 。采集到的数据如图 4 所示,以入射角为例进行说明。

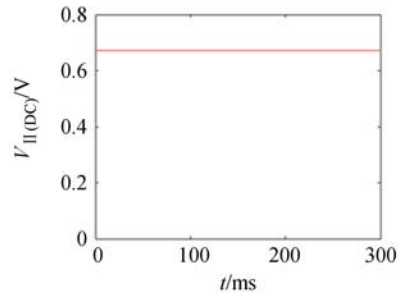
由图 4 可以看出,两种工作状态的直流项值几乎相同,并且直流项数据波动很小。对采集到的数据进行平均值和标准偏差的计算,并消除由于 EOM 和 PEM 剩余双折射引入的系统初始偏移值。对其它 3 组入射角的数据也进行同样的数据采集和处理,并整理记入数据表 1 和表 2 中。



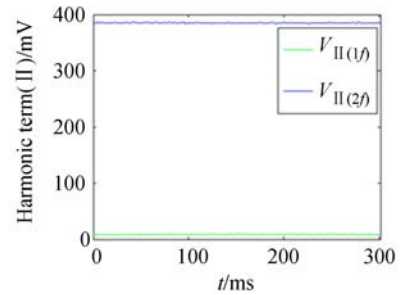
(a)状态 I 的直流项  
(a) DC term of condition I



(b)状态 I 的倍频项  
(b) The first and second harmonics of condition I



(c)状态 II 的直流项  
(c) DC term of condition II



(d)状态 II 的倍频项  
(d) The first and second harmonics of condition II

图 4 实验结果

Fig. 4 Testing results

表 1 不同入射角下状态 I 数据

Tab.1 Data for condition I at different incident angles

入射角 / $^\circ$	$V_{I(DC)}$ /mV	$V_{I(1f)}$ /mV		$V_{I(2f)}$ /mV	
		平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
80	672.701	-0.007	0.001	-152.322	0.044
70	195.790	0.005	0.002	-86.953	0.025
60	97.083	0.005	0.001	-57.607	0.015
50	58.205	-0.003	0.001	-33.831	0.010

表 2 不同入射角下状态 II 的数据

Tab.2 Data for condition II at different incident angles

入射角 / $^\circ$	状态 II				
	$V_{II(DC)}$ /mV	$V_{II(1f)}$ /mV		$V_{II(2f)}$ /mV	
		平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
80	671.940	0.002	0.001	381.124	0.052
70	197.026	0.003	0.002	82.645	0.038
60	97.003	0.002	0.001	14.011	0.005
50	58.313	-0.001	0.002	-10.901	0.003

从表 1 和表 2 可以看出,两种工作状态对应的一倍频项几乎为 0,二倍频项非 0,依据文章第 2 节分析可知,椭圆参量  $\Delta$  取 0 或  $\pi$ 。将表中的数据带入式(17)和式(18),计算 4 组不同入射角对应的椭圆参量及其测量偏差,结果如表 3 所示。

表 3 椭圆参量的测量结果

Tab. 3 Results of ellipsometric parameters measurement (°)

入射角	椭圆参量 $\Psi$		椭圆参量 $\Delta$	
	测量值	偏差	测量值	偏差
80	34.12	0.01	0.00	0.28
70	21.67	0.01	0.00	0.13
60	6.84	0.02	0.00	0.81
50	8.92	0.08	180.00	0.81

对于折射率为  $n=1.46$  的石英玻璃基片,根据文献[16],利用菲涅尔公式求解得到反射光的椭圆参量随入射角度的变化关系,如图 5 所示。图 5 还包含了椭圆参量测量值。

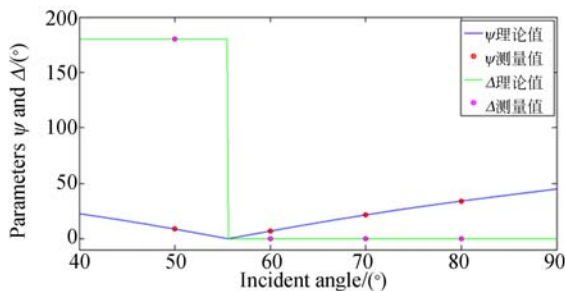


图 5 石英基片反射光的椭圆参量

Fig. 5 Ellipsometric parameters of reflective light on quartz glass substrate

根据图 5,椭圆参量的测量值与理论值的差值均大于计算偏差值,这主要是由于入射角精度只能控制在  $0.1^\circ$  附近;当入射角为  $50^\circ$  时,  $\Psi$  存在最大偏差  $\delta_\Psi = 8.92 - 8.70 = 0.22^\circ$ 。对于石英玻璃反射样品,椭圆参量  $\Delta$  具有较准确的测量值,由此证明系统定标能够有效消除 EOM 和 PEM 剩余双折射造成的测量误差。

#### 参考文献:

[1] 廖廷彪. 偏振光学[M]. 北京:科学出版社,2003.  
LIAO Y B. *Polarization Optics*[M]. Beijing: Science Press,2003. (in Chinese)

## 4 讨论

PEM 型椭圆仪对于 PEM 的相位调制幅值的精确定标是十分必要的,采用多倍频项比值的定标方法能够消除 PEM 剩余双折射和快轴方位角误差对定标造成的影响。相位调制幅值  $\delta_0$  介于  $1.84 \sim 4.20$  rad,实现了精度较高的定标,定标精度优于  $1 - 0.955\% = 99.05\%$ 。定标结果显示,调制电压峰峰值  $V_{pp}$  与相位调制幅值  $\delta_0$  呈很好的线性关系。

本文中实验光源采用激光。将光源换为复色光源,并搭配相应的分光系统便可实现宽光谱的椭圆测量。对于透射型待测样品,出射光臂接收经样品折射的出射光,其他操作与反射型样品相同。此外,本测量方案无需机械调节,数据采集和处理均在 ms 时间量级;并且取得倍频项对应的数字锁相过程还可以在 PEM 高压驱动模块的 FPGA 中完成,充分利用调制信号与 FPGA 提供的参考信号同源的优势,不仅能够保证测量精度,还能够降低成本,利于工业化集成。

## 5 结论

本文提出了一种弹光和电光级联的组合相位调制型椭圆测量技术。采用单个 PEM、单个 EOM、单个信号探测通道,通过 EOM 的两个工作状态切换,结合数字锁相信号处理技术实现了椭圆参量  $\varphi$  和  $\Delta$  的全范围高精度探测。按照该新型椭圆测量技术原理搭建了试验系统,对 PEM 进行了调制电压峰峰值和相位调制幅值的定标。然后采用系统初始偏移值的系统校准方法,有效地消除了 EOM 和 PEM 自身剩余双折射引入的测量误差。最后,利用搭建的实验系统对石英玻璃反射样品进行了定标。实验结果表明,定标精度为  $99.05\%$ ,该椭圆测量技术具有宽光谱测量、无需机械调节、工作稳定、重复度高、测量速率快、成本相对较低和利于工业自动化集成等优势。

[2] POSTAVA K, MAZIEWSKI A, YAMAGUCHI T, *et al.*. Null ellipsometer with phase modulation [J]. *Optics Express*,2004,12(24):6040-6045.  
[3] ZHU J L, LIU S Y, JIANG H, *et al.*. Improved

- deep-etched multilayer grating reconstruction by considering etching anisotropy and abnormal errors in optical scatterometry[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(4): 471-474.
- [4] ARTEAGA O, FREUDENTHAL J, WANG B L, *et al.*. Muller matrix polarimetry with four photoelastic modulators: theory and calibration[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(28): 6805-6816.
- [5] TAKESHI N, MASANORI H. Measurement of complex optical constants of highly doped Si wafer using terahertz ellipsometry[J]. *Applied Physics Letters*, 2001, 79(24): 3917-3919.
- [6] DRUDE P. Ueber die Gesetze der Reflexion und Brechung des Lichtes an der Grenze absorbirender Krystalle[J]. *Annalen der Physik*, 1887, 268(12): 584-625. (in German)
- [7] 李克武,王志斌,陈友华,等. 基于弹光调制的高灵敏度旋光测量[J]. *物理学报*, 2015, 64(18): 184206.  
LI K W, WANG ZH B, CHEN Y H, *et al.*. High sensitive measurement of optical rotation based on photo-elastic modulation [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2015, 64(18): 184206. (in Chinese)
- [8] ZENG A J, LI F Y, ZHU L L, *et al.*. Simultaneous measurement of retardance and fast axis angle of a quarter-wave plate using one photoelastic modulator[J]. *Applied Optics*, 2011, 50(22): 4347-4352.
- [9] JASPERSON S N, SCHNATTERLY S E. An improved method for high reflectivity ellipsometry based on a new polarization modulation technique[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1969, 40(6): 761-767.
- [10] CAUREL E G, MARTINO A D, LI Y, *et al.*. Application of spectroscopic ellipsometry and Muller ellipsometry to optical characterization[J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(1): 1-21.
- [11] JELLISON G E, MODINE F A. Two-modulator generalized ellipsometry: theory[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(31): 8190-8197.
- [12] 李克武,王志斌,张瑞,等. 沿光轴通光的 LiNbO<sub>3</sub> 的横向电光调制特性[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(5): 1227-1232.  
LI K W, WANG ZH B, ZHANG R, *et al.*. LiNbO<sub>3</sub> transverse electro-optical modulation characteristics for light pass along optical axis [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(5): 1227-1232. (in Chinese)
- [13] De MARTINO A, GARCIA-CAUREL E, LAUDE B, *et al.*. General methods for optimized design and calibration Muller polarimeters [J]. *Thin Solid Films*, 2004, 455: 112-119.
- [14] LI C. Stepped polarization states: Representation and its applications to optical sensing and measurement[J]. *Optics Communications*, 2008, 281(8): 2033-2039.
- [15] WANG M W, CHAO Y F, LEOU K C, *et al.*. Calibration of phase modulation amplitude of photoelastic modulator[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004, 43(2): 827-832.
- [16] FUJIWARA H. *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Application* [M]. New York: John Wiley & Sons Ltd., 2007: 147-148.

#### 作者简介:



李克武(1990—),男,云南文山人,博士研究生,2013年于中北大学获得学士学位,主要从事光子晶体光学器件设计及光谱偏振成像技术方面的研究。E-mail: kewuli1990@gmail.com

#### 导师简介:



王黎明(1974—),男,山西长治人,教授,博士生导师,现为信息探测与处理山西省重点实验室常务副主任,主要从事电子技术、多维信号处理与重建、X射线图像处理、无损检测技术、无线通信等方面的研究。E-mail: wlm@nuc.edu.cn