

文章编号 1004-924X(2018)06-1314-08

## 弹光调制测椭偏参量的数字锁相数据处理

王 爽<sup>1,2</sup>, 韩 燮<sup>1</sup>, 李 晓<sup>2,3</sup>, 王志斌<sup>2\*</sup>, 景 宁<sup>2</sup>, 陈友华<sup>2</sup>, 陈媛媛<sup>2</sup>

(1. 中北大学 大数据学院, 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 电气与控制工程学院, 山西 太原 030051)

**摘要:** 为了实现椭偏参量  $\psi$  和  $\Delta$  的高速、高灵敏测量, 建立了一种测量成本低、重复性好和便于工业化集成的椭偏测量方案。本文对弹光调制型椭偏参量测量系统进行了原理分析, 针对弹光调制器的工作模式及调制光信号特点, 设计了基于现场可编程门阵列的数字锁相数据处理方案。现场可编程门阵列提供弹光调制器工作的信号源, 并控制 AD 采样; 同时产生正弦和余弦参考序列, 并完成直流项、一倍频项和二倍频项的同相分量和正交分量的提取, 进而求解出椭偏参量。利用搭建的试验系统对  $\text{SiO}_2$  薄膜厚度为 3.753 nm 的硅片样品进行了实验分析。实验结果表明, 采样时间为 20 ms 时, 椭偏参量  $\psi$  和  $\Delta$  的平均值分别为  $9.622^\circ$  和  $168.692^\circ$ , 标准偏差分别为  $0.005^\circ$  和  $0.008^\circ$ ; 采样时间设置为 200 ms 时, 椭偏参量测量平均值与 20 ms 的非常接近, 标准偏差减小, 并且都在  $0.001^\circ$  量级, 揭示了本系统具有较高的灵敏度和较好的重复性。

**关键词:** 椭偏参量; 椭偏仪; 弹光调制器; 数字锁相数据处理

**中图分类号:** O436.3; TH744.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20182606.1314

## Digital phase-locked data processing for ellipsometric parameter measurements based on photoelastic modulation

WANG Shuang<sup>1,2</sup>, HAN Xie<sup>1</sup>, LI Xiao<sup>2,3</sup>, WANG Zhi-bin<sup>2\*</sup>,  
JING Ning<sup>2</sup>, CHEN You-hua<sup>2</sup>, CHEN Yuan-yuan<sup>2</sup>

(1. School of Data Science, 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. School of Electrical and Control Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

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

**Abstract:** A system based on photoelastic modulation was analyzed in principle to realize high-speed, high-sensitivity measurements of ellipsometric parameters ( $\psi$  and  $\Delta$ ), thereby establishing a low-cost ellipsometric measurement scheme characterized by good repeatability and easy integration. On the basis of the Photoelastic Modulator (PEM) working mode and characteristics of modulated optical signals, a digital phase-locked data-processing scheme, based on Field-programmable Gate Array (FP-

**收稿日期:** 2017-11-13; **修订日期:** 2018-01-08.

**基金项目:** 国家国际科技合作专项项目 (No. 2013DFR10150); 国家自然科学基金资助项目 (Nos. 61672473, 61505179, 61605176); 山西省应用基础研究项目 (No. 201701D221126)

GA) was designed. FPGA provides a signal source to drive PEM and controls Analog to Digital (AD) sampling. Meanwhile, sine and cosine reference sequences were generated, and the DC term as well as in-phase and quadrature components of the first and second harmonics were extracted. Subsequently, values of ellipsometric parameters are solved. The proposed system was used to analyze an SiO<sub>2</sub> film sample measuring 3.753 nm thick placed on a silicon wafer. Experimental results yielded average values of the ellipsometric parameters  $\psi$  and  $\Delta$  to be 9.622 and 168.692, respectively, with corresponding standard deviations of 0.005° and 0.008°, respectively. The sampling time is set to 20 ms. When the sampling time is increased to 200 ms, corresponding average values of ellipsometric parameters did not demonstrate much change from those observed in the 20 ms case; corresponding standard deviations were observed to be much smaller assuming values of the order of 0.001° for both parameters. These results confirmed high sensitivity and good repeatability of the proposed system.

**Key words:** ellipsometric parameters; ellipsometry; photoelastic modulation; digital phase-locked data processing

## 1 引 言

薄膜光学的研究在半导体器件研制、成像显示、新材料开发和生物医学传感等领域具有重要的应用意义<sup>[1-5]</sup>。椭偏测量技术是薄膜光学研究最常用手段,能够同时测量椭偏参量  $\psi$  和  $\Delta$ ,进而提供待测样品的丰富信息<sup>[6-7]</sup>。在常用椭偏仪中,薄膜样品的物理参数,如折射率、消光系数和膜的厚度,可以根据菲涅耳方程,并利用已测量的椭偏参量  $\psi$  和  $\Delta$  求解确定<sup>[8]</sup>。

现阶段研制的椭偏仪主要分为旋转偏振器件型和相位调制型两大类<sup>[9]</sup>。旋转偏振器件型椭偏仪需机械旋转偏振片、波片或补偿器等,结构简单、成本相对较低。但旋转光学元件不可避免地造成检测光束漂移,降低了测量的重复性和精度,并且测量速率一般较慢。相位调制型椭偏仪一般基于液晶相位延迟器或弹光调制器(Photoelastic Modulator, PEM)设计。特别地,PEM 具有光谱范围宽、通光孔径大、调制频率高、调制纯度及稳定性好等优点,基于 PEM 的相位调制型椭偏仪具有原位检测,灵敏度高,测量速度快等应用优势<sup>[10-11]</sup>。但现有 PEM 相位调制型椭偏仪一般采用商业锁相放大器及 NI 采集卡实现数据处理,不仅增加了仪器成本,而且不利于 PEM 工作控制及整体系统的工业化、自动化集成设计。

目前,椭偏测量技术因具有宽光谱测量、无需机械调节和快速操控等优点而受到越来越广泛的研究。本文根据 PEM 工作原理及其偏振光调制

信号特点,将 PEM 及数字锁相技术应用于椭偏参量测量系统设计。PEM 的工作控制及测量数据的处理在现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)中完成。本文对该新型椭偏测量技术及其数字锁相数据处理原理进行了理论分析,并搭建了相应的试验系统对薄膜样品进行了测试分析。该技术方案有望实现快速、重复性好、灵敏度高、低成本、无需机械调节和便于工业化集成的椭偏参量测量。

## 2 原 理

### 2.1 光学系统设计

弹光调制型椭偏参量测量系统的设计原理如图 1 所示。检测光源经过起偏器入射到待测薄膜样品,经样品反射后带有被测信息的光被 PEM 调制,调制光经过检偏器,最后入射到光电探测器。起偏器和检偏器的透光轴分别设置为 45° 和 -45°,PEM 调制快轴调节到 0° 位置。系统控制及数据处理模块均与电脑连接。

标准椭偏仪能够直接测量得到薄膜样品的两个椭偏参量( $\psi, \Delta$ ),  $\psi(0 \leq \psi \leq 90^\circ)$  和  $\Delta(-180^\circ \leq \Delta \leq 180^\circ)$  分别表示经样品反射偏振光的  $p$  偏振分量和  $s$  偏振分量的幅值比和相位差,并且满足  $\frac{r_p}{r_s} = \tan \psi e^{i\Delta}$ , 其中  $r_p$  和  $r_s$  分别表示  $p$  偏振分量和  $s$  偏振分量的反射系数<sup>[7]</sup>。图 1 所示椭偏参量测量系统运用 Stokes 矢量和 Muller 矩阵描述是十分简便的,根据文献[11]、[12]和[13],结合

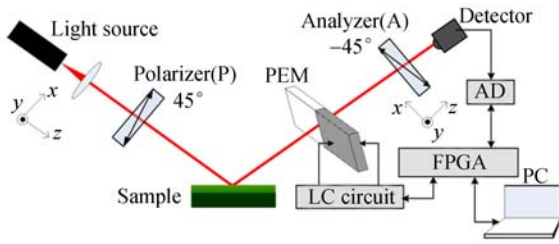


图 1 弹光调制型椭圆偏参量测量系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of photoelastic modulation ellipsometric parameter measuring system

PEM 偏振光调制的特点, 探测器能够探测到 Stokes 矢量的第一个分量, 即总光强为:

$$I_{\text{out}} = \frac{I_0}{4} [1 - \sin 2\psi \cos \Delta \cos(\delta_0 \sin 2\pi ft) + \sin 2\psi \sin \Delta \sin(\delta_0 \sin 2\pi ft)], \quad (1)$$

其中:  $\delta_0$  是 PEM 的相位调制幅值,  $f$  为 PEM 谐振频率。将式 (1) 中  $\cos(\delta_0 \sin 2\pi ft)$  和  $\sin(\delta_0 \sin 2\pi ft)$  利用贝塞尔级数展开<sup>[14]</sup>:

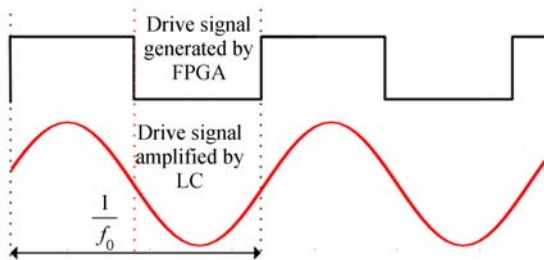
$$I_{\text{out}} = \frac{I_0}{4} (1 - \sin 2\psi \cos \Delta (J_0(\delta_0) + 2 \sum J_{2m}(\delta_0) \cdot \cos 4m\pi ft) + \sin 2\psi \cdot \sin \Delta (2 \sum J_{2m-1}(\delta_0) \cdot \sin(2m-1)2\pi ft)), \quad (2)$$

式中:  $m$  为正整数,  $m=1, 2, \dots$ ,  $J_0$  为 0 阶贝塞尔函数级数,  $J_{2m-1}$  和  $J_{2m}$  分别为  $2m-1$  阶和  $2m$  阶贝塞尔级数。

## 2.2 PEM 控制及数字锁相数据处理

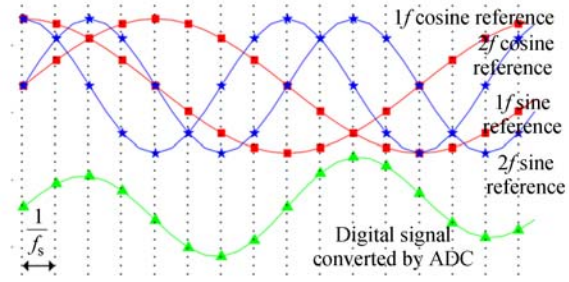
2.1 所述椭圆测量系统, 驱动信号由 FPGA 产生, 经 LC 谐振电路放大后驱动 PEM 工作。同时 FPGA 控制 AD 的采样频率, 经 AD 转换后的信号直流项和倍频项在 FPGA 中完成提取, 其原理如图 2 所示。

数字锁相数据处理原理如图 2(b) 所示, 设 AD 的采样频率为  $f_s$ , 则一个周期内对一倍频信号的采样点数为  $N = f_s / f_0$  ( $N \geq 3$ )。因此  $q$  个周



(a) 驱动信号

(a) Driving signal



(b) 数字锁相原理

(b) Principle of digital phase lock

图 2 基于 FPGA 的 PEM 控制及数字锁相数据处理原理图  
Fig. 2 Control of PEM and digital phase lock based on FPGA

期内对输入信号进行采样, 得到总的信号采样点数为  $M = N \times q$ 。对输入信号进行 AD 转换后获得的数字信号序列为:

$$I_{(k)} = K \frac{I_0}{4} [(1 - \sin 2\psi \cos \Delta (J_0(\delta_0) + 2 \sum J_{2m}(\delta_0) \cos 4m\pi \frac{k}{N}) + \sin 2\psi \sin \Delta \cdot (2 \sum J_{2m-1}(\delta_0) \sin(2m-1)2\pi \frac{k}{N})], \quad (3)$$

式中:  $k=0, 1, \dots, M-1$ ;  $m$  为正整数,  $m=1, 2, 3, \dots$ ;  $K$  是与探测器的光电转换及 AD 转换相关的系数。对于式 (3) 的数字信号序列, 直接累加求和便可得到直流项:

$$V_{\text{DC}} = \frac{KM}{4} I_0 [1 - \sin 2\psi \cos \Delta J_0(\delta_0)]. \quad (4)$$

数字信号序列  $I_{(k)}$  与 FPGA 内部产生的正弦参考序列  $R_{s(k)} = B \sin(\frac{2\pi k}{N})$  相乘, 并累加求和可得锁相的同相分量:

$$S = \sum_{k=0}^{M-1} I_{(k)} R_{s(k)} = KBM \frac{I_0 J_1(\delta_0) \sin 2\psi \sin \Delta \cos \varphi}{4}, \quad (5)$$

其中:  $B$  为参考序列幅值,  $\varphi$  为调制信号的一倍频信号与 FPGA 内部产生的一倍频参考信号之间的相位延迟。同理, 数字信号序列  $I_{(k)}$  和余弦参考序列  $R_{c(k)} = B \cos(\frac{2\pi k}{N})$  相乘, 再累加求和可得锁相的正交分量:

$$C = \sum_{k=0}^{M-1} I_{(k)} R_{c(k)} = KBM \frac{I_0 J_1(\delta_0) \sin 2\psi \sin \Delta \sin \varphi}{4}. \quad (6)$$

(6)

结合式(5)和式(6)求得一倍频项的值为:

$$V_{1f} = 2 \sqrt{S^2 + C^2} = KBM \frac{I_0 J_1(\delta_0) \sin 2\psi \sin \Delta}{2} \quad (7)$$

同理,数字信号序列  $I_{(k)}$  与 FPGA 内产生的二倍频正余弦参考序列  $R'_{s(k)} = B \sin(\frac{4\pi k}{N})$  和  $R'_{c(k)} = B \cos(\frac{4\pi k}{N})$  相乘,再累加求和可得二倍频信号对应的同相分量  $S'$  和正交分量  $C'$ ,便可以求解得到二倍频项的值为:

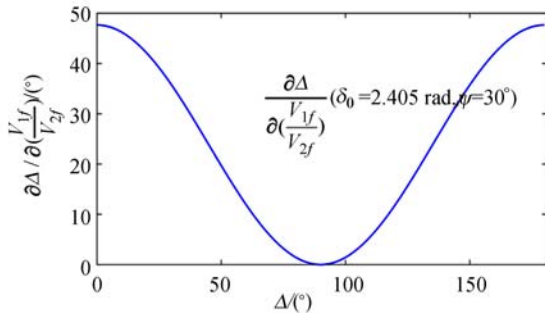
$$V_{2f} = 2 \sqrt{S'^2 + C'^2} = KBM \frac{I_0 J_2(\delta_0) \sin 2\psi \cos \Delta}{2} \quad (8)$$

其中一倍频项和二倍频项的正负号可通过同相分量和正交分量来判断。由式(4)、式(7)和式(8)可知,全部椭偏参量可以利用锁相输出的直流项、一倍频项和二倍频项数据求解得出:

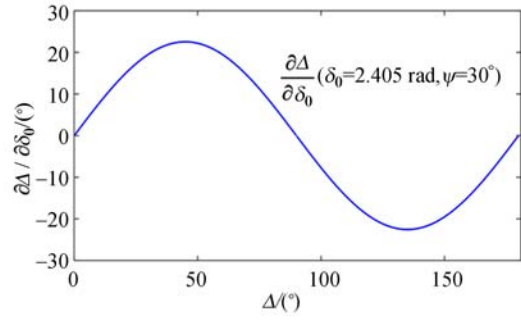
$$\begin{cases} \Delta = \arctan \frac{V_{1f} J_2(\delta_0)}{V_{2f} J_1(\delta_0)} \\ \psi = \frac{1}{2} \arcsin \frac{A}{(AJ_0(\delta_0) + 2J_2(\delta_0)) \cos \Delta} \end{cases}, \quad (9)$$

其中  $A = \frac{V_{2f}}{BV_{DC}}$ 。FPGA 数字锁相放大器输出的一倍频项数据、二倍频数据与直流项数据一一对应,能够有效消除检测光源的光强不稳定性对测量造成的影响,并且 FPGA 是并行处理数据,所有数据运行都是同步的。此外,参考信号与调制信号同频,保证了数据处理的速度和精度。

根据式(9)还可进一步估计  $V_{DC}$ 、 $V_{1f}$ 、 $V_{2f}$  和  $\delta_0$  的误差对测量结果的影响。设参考序列幅值  $B=1$ ,选取  $\delta_0 = 2.405 \text{ rad}$ ,  $\psi = 30^\circ$  和  $\Delta = 180^\circ$  为例,计算出椭偏参量关于  $V_{DC}$ 、 $V_{1f}$ 、 $V_{2f}$  和  $\delta_0$  的偏导数。椭偏参量  $\Delta$  的偏导数如图 3 所示。

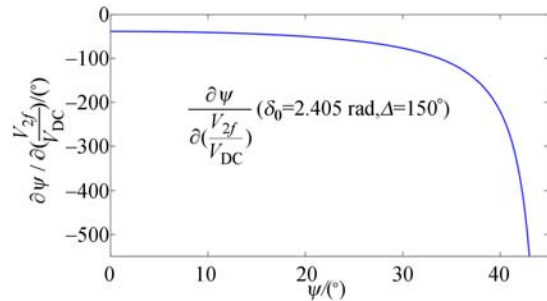


(a)  $V_{1f}/V_{2f}$  偏差的影响  
(a) Influence of inaccuracy of  $V_{1f}/V_{2f}$



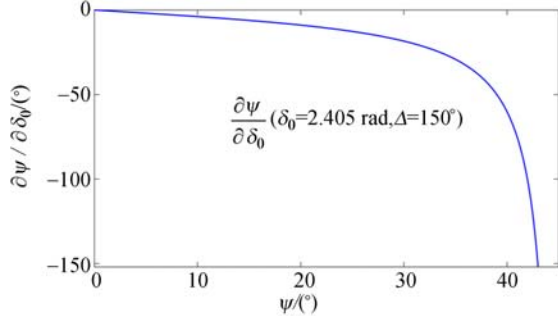
(b)  $\delta_0$  偏差的影响  
(b) Influence of inaccuracy of  $\delta_0$   
图 3  $\Delta$  偏导数  
Fig. 3 Partial derivatives of  $\Delta$

由图 3 可以看出,对于  $\Delta$  的不同取值,  $V_{1f}$ 、 $V_{2f}$  和  $\delta_0$  偏差对其造成的测量误差既不是常量,也不是线性变化的。当  $\Delta$  在  $0^\circ$  或  $180^\circ$  附近时,  $V_{1f}$  和  $V_{2f}$  的测量偏差能够引起  $\Delta$  较大的测量误差;而  $\delta_0$  的偏差对  $\Delta$  的测量结果影响较小。当  $\Delta$  在  $90^\circ$  附近时,  $V_{1f}$ 、 $V_{2f}$  和  $\delta_0$  的偏差对  $\Delta$  的测量结果影响都较小。当  $\Delta$  在  $45^\circ$  或  $135^\circ$  附近时,  $\Delta$  的测量结果受  $\delta_0$  的偏差影响最严重。同理,还能够计算得到椭偏参量  $\psi$  的偏导数,如图 4 所示。 $\psi$  的



(a)  $V_{2f}/V_{DC}$  偏差的影响

(a) Influence of inaccuracy of  $V_{2f}/V_{DC}$



(b)  $\delta_0$  偏差的影响

(b) Influence of inaccuracy of  $\delta_0$

图 4  $\psi$  偏导数

Fig. 4 Partial derivatives of  $\psi$

误差对  $V_{DC}$ 、 $V_{2f}$  和  $\delta_0$  偏差也是非线性变化的,并且  $\psi=45^\circ$  是其偏导数的奇点。显然,当  $\psi$  接近  $45^\circ$  时,对于  $\psi$  的准确测量是十分困难的,因为对  $V_{DC}$ 、 $V_{2f}$  和  $\delta_0$  较小的测量偏差都将对  $\psi$  的结果产生较大的误差。

### 3 实验

为了验证本方案的可行性,按照原理图 1 搭建了基于 PEM 的椭偏参量测量系统,光源选用波长为 632.8 nm 的 He-Ne 激光;起偏器和检偏器均为格兰泰勒偏振器;PEM 选用通光晶体为熔融石英的八角对称状结构 PEM,谐振频率为 49.90 kHz;探测器为 Thorlabs 公司的硅基跨阻放大光电探测器 PDA10A。采用 Altera FPGA 芯片提供 PEM 驱动信号的同时,控制 12 位高精度 AD 的时钟采样频率,并产生参考信号  $R_{s(k)}$ 、 $R_{c(k)}$ 、 $R'_{s(k)}$  和  $R'_{c(k)}$  序列,参考信号序列与数字信号序列相乘,最终完成数字锁相获取倍频项数据。数据处理(驱动和测量)模块结构如图 5 所示。

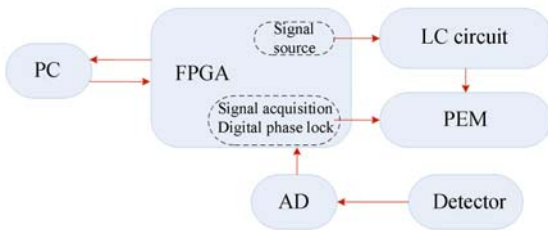


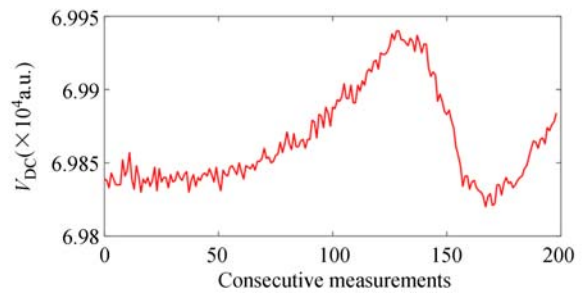
图 5 数据处理(驱动和测量)模块结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of data processing module (PEM driving & measurements)

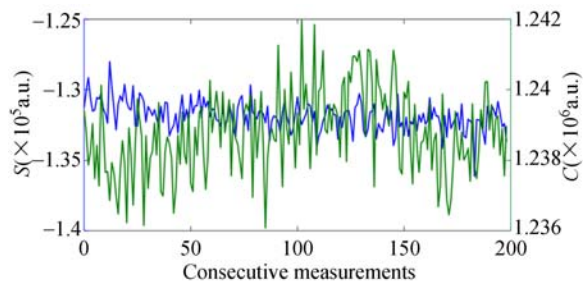
如图 5 所示,PC 端建立与 FPGA 的通信,通过上位机可视化输入调节 PEM 的工作频率及驱动电压幅值,进而调节 PEM 的相位幅值,并接收 FPGA 完成的锁相数据  $V_{DC}$ 、 $V_{1f}$  和  $V_{2f}$ 。结合式(9)求解测量的椭偏参量  $\psi$  和  $\Delta$ ,最后进行存储或显示。

测试样品选用边长为 5 cm 的镀制有  $\text{SiO}_2$  薄膜的方形硅(Si)片。采用北京量拓公司的光谱椭偏仪(ESS01)测量得到  $\text{SiO}_2$  薄膜的膜层厚度为  $(3.753 \pm 0.5) \text{ nm}$ 。

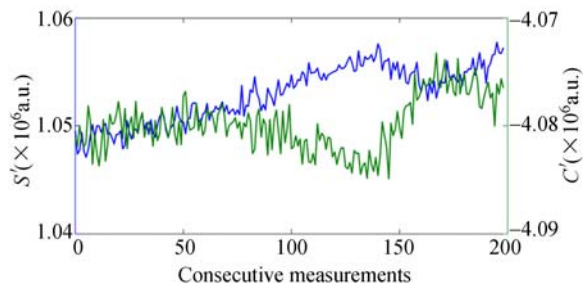
将该薄膜样品置入本文设计的 PEM 调制椭偏参量测量系统中,检测激光以  $70^\circ$  入射角入



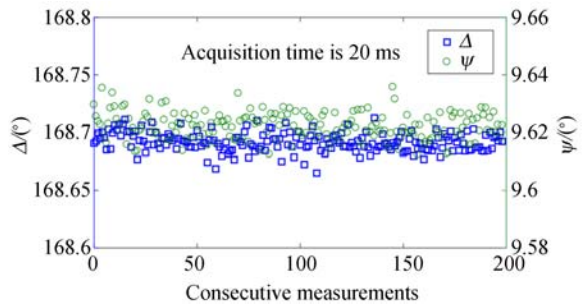
(a) 直流项  $V_{DC}$   
(a) DC term  $V_{DC}$



(b) S 和 C 分量  
(b) Components of S and C



(c)  $S'$  和  $C'$  分量  
(c) Components of  $S'$  and  $C'$



(d) 椭偏参量  
(d) Ellipsometric parameters

图 6 积分时间为 20 ms 时的实验结果

Fig. 6 Experimental results with acquisition time set to 20 ms

射薄膜样品。对 PEM 施加驱动频率为 49.90 kHz,驱动电压峰峰值为  $V_{pp}=254.4$  V 的高压正弦驱动信号,PEM 的相位调制幅值  $\delta_0=2.134$  rad,且贝塞尔级数  $J_0(2.134)=0.147$ , $J_1(2.134)=0.565$ , $J_2(2.134)=0.382$ 。将 AD 的采样频率设置为  $f_s=3.2$  MHz,参考序列幅值  $B$  取 512。首先,将采样周期  $q$  设置为  $10^3$ ,即对应的采样时间为 20 ms,并记录约 200 次测量数据及结果,如图 6 所示。

由图 6 可以看出,经 AD 转换后的数字信号序列在 FPGA 中实现并行处理,能够同时求解得到直流项  $V_{DC}$ ,一倍频项的同相分量  $S$  和正交分量  $C$ ,二倍频项的同相分量  $S'$  和正交分量  $C'$ 。将图 6(a)、(b) 和 (c) 中的数据结合式 (7) 和式 (8),带入式 (9) 中求解得到椭偏参量,图 6(d) 显示椭偏参量的多次测量结果。激光检测光源光强的微小波动对测量造成的干扰能够得以消除。这里还将采样周期  $q$  设置为  $10^4$  个,即对应的采样时间为 200 ms,椭偏参量测量结果如图 7 所示。

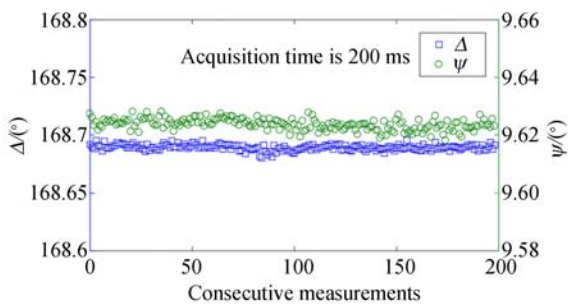


图 7 积分时间为 200 ms 时的椭偏参量

Fig. 7 Ellipsometric parameters with acquisition time set to 200 ms

对比图 6 和图 7 可以看出,采样时间为 200 ms 时的测量数据比 20 ms 的波动小,将上述两个采样时间测量的椭偏参量平均值及标准偏差记录入表 1 中。

表 1 椭偏参量的测量结果

Tab. 1 Results of ellipsometric parameters

Acquisition time/ms	$\Delta/(\circ)$		$\psi/(\circ)$	
	Mean value	Standard deviation	Mean value	Standard deviation
20	168.692	0.008	9.622	0.005
200	168.689	0.003	9.624	0.002

根据表 1 可知,不同采样时间测量的椭偏参量平均值几乎没有差别;采样时间越长,测量结果的标准偏差越小。

## 4 讨 论

基于 PEM 的椭偏测量方案中,PEM 工作控制及数据处理在 FPGA 中实现;调制光信号经 AD 转换后的数字序列在 FPGA 中并行处理,能够同时测量多个倍频信号,除直流项、一倍频项和二倍频项外,还可以利用数字锁相测量三倍频项和四倍频项,并用于求解椭偏参量或者监控系统的工作状态,而且系统测量的积分时间可以根据实际应用情况进行调节。为了获得更加可靠的测量结果,需通过提高 AD 的精度来减小倍频项数据的测量误差,提高  $\delta_0$  的定标精度和减小各光学元件的方位角误差来尽可能地减小椭偏参量的测量误差。

由 2.1 节分析还可知,运用单个 PEM 的椭偏测量系统能够得到的椭偏参量  $\psi$  和  $\Delta$  的范围分别为  $(0, 45^\circ)$  和  $(-180^\circ, 180^\circ)$ ,适合测量一些膜层较薄的薄膜样品,待测薄膜样品厚度一般不超过检测激光波长的  $1/4$ 。采用两个 PEM 差频调制能够实现全范围椭偏参量的测量<sup>[15]</sup>,本方案提出的 PEM 工作控制及数据处理技术同样可应用于双弹光椭偏测量系统。此外,受限于较慢的光谱测量速度,现阶段 PEM 椭偏仪多采用激光椭偏仪。本文方案能够为光谱型 PEM 椭偏测量技术的发展提供有利的技术支持。

## 5 结 论

本文分析了运用单个 PEM 的椭偏参量测量原理,并针对 PEM 工作模式和调制光信号的特点,设计了基于 FPGA 的数字锁相数据处理方案。FPGA 提供 PEM 工作的信号源,并控制 AD 采样,同时实现调制信号倍频数据的提取。按照弹光调制测量椭偏参量的原理方案搭建了试验系

统,并利用该试验系统对镀制有 SiO<sub>2</sub> 薄膜的硅片样品进行了实验分析。实验结果表明,采样时间分别为 20 ms 和 200 ms 时,椭圆参量测量平均值非常接近,标准偏差都在 0.001°量级,揭示了本系统具有较高的灵敏度和较好的重复性,采用

FPGA 数字锁相技术能够实现弹光调制高速、高灵敏、低成本的椭圆参量测量。此外,本文所述技术方案还具有无需机械调节、工作稳定、测量速率快、测量时间可灵活调节和测量系统利于工业自动化集成等应用优势。

#### 参考文献:

- [1] RODENHAUSEN K B J, SCHMIDT D, KASPUTIS T, *et al.*. Generalized ellipsometry in-situ quantification of organic adsorbate attachment within slanted columnar thin films[J]. *Optics Express*, 2012, 20(5): 5419.
- [2] BATTIE Y, BROCH L, NACIRI A E, *et al.*. Diameter dependence of the optoelectronic properties of single walled carbon nanotubes determined by ellipsometry[J]. *Carbon*, 2015, 83:32-39.
- [3] WEI P K, MOIRANGTHEM R S, CHANG Y C. Ellipsometry study on gold-nanoparticle-coated gold thin film for biosensing application[J]. *Biomedical Optics Express*, 2011, 2(9):2569-2576.
- [4] MAZIEWSKI A, PISTORA J, POSTAVA K, *et al.*. Null ellipsometer with phase modulation[J]. *Optics Express*, 2004, 12(24):6040-5.
- [5] 李芳,王杰,王丹阳,等. 利用调制式椭圆仪测量薄膜电光系数[J]. *红外与毫米波学报*, 2005(1): 31-33.
- LI F, WANG J, WANG D Y, *et al.*. Measurement of the electric-optic index of thin films by using modulated ellipsometry[J]. *J. Infrared Millim. Waves*, 2005(1):31-33. (in Chinese)
- [6] 廖延彪. 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)
- [7] TOMPKINS H, IRENE E A. *Handbook of Ellipsometry* [M]. William Andrew, 2005.
- [8] FUJIWARA H. *Spectroscopic Ellipsometry: Principles and Applications* [M]. John Wiley & Sons, 2007.
- [9] GARCIAAUREL E, DE M A, GASTON J P, *et al.*. Application of spectroscopic ellipsometry and Mueller ellipsometry to optical characterization[J]. *Applied Spectroscopy*, 2013, 67(1):1-21.
- [10] 王志斌,李克武,张瑞,等. 基于铌酸锂制作光弹调制器用压电驱动器[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(1):63-69.
- WANG ZH B, LI K W, ZHANG R, *et al.*. Fabrication of piezoelectric actuator for photoelastic modulator based on lithium niobate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 63-69 (in Chinese)
- [11] 李克武,王黎明,王志斌,等. 弹光和电光级联的组合相位调制型椭圆测量术[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(4): 690-697.
- LI K W, WANG L M, WANG ZH B, *et al.*. Phase-modulated ellipsometric technology combined photo-elastic modulation with electro-optic modulation[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(4): 1227-1232. (in Chinese)
- [12] 王爽,王志斌,李晓,等. 弹光调制高灵敏测量晶体电光系数[J]. *光学学报*, 2017, 37(3):327-332.
- WANG SH, WANG ZH B, LI X, *et al.*. High sensitive measurement of the crystal electro-optic coefficient based on the photo-elastic modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 327-332. (in Chinese)
- [13] SATOZONO H. Elimination of artifacts derived from the residual birefringence of a phase modulator for circular dichroism by retardation domain analysis. [J]. *Optics Letters*, 2015, 40(7):1161.
- [14] 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): 289-294.
- 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): 289-294. (in Chinese)

[15] JELLISON G E, MODINE F A. Two-modulator generalized ellipsometry: experiment and calibration[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(31):8184.

#### 作者简介:



王爽(1990—),女,河北唐山人,博士研究生,主要从事光电检测设备设计及系统建模仿真方面的研究。E-mail: s1507038@st.nuc.edu.cn

#### 导师简介:



韩 燮(1964—),女,山西太原人,教授,博士生导师,现为中北大学大数据学院院长、山西省计算机学会副理事长,主要从事虚拟仿真与可视化技术及智能信息处理方面的研究。E-mail: hanxie@nuc.edu.cn

#### 通讯作者:



王志斌(1966—),男,山西长治人,教授,硕士生导师,现为中北大学山西省光电信息与仪器工程技术研究中心主任,主要从事光谱成像技术及遥感遥测方面的研究。E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn