

# 弹光调制和电光调制联合测剩余双折射

李克武<sup>1,2,3</sup> 王黎明<sup>2,3</sup> 王志斌<sup>1,2,3\*</sup> 张瑞<sup>1,2,3</sup> 李晓<sup>2</sup> 王爽<sup>2</sup>

<sup>1</sup>中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

<sup>2</sup>山西省光电信息与仪器工程技术研究中心, 山西 太原 030051

<sup>3</sup>中北大学电子测试技术重点实验室, 山西 太原 030051

**摘要** 为了实现高速、高精度、高灵敏度、操作方便可控、稳定性好和成本较低的剩余双折射值和快轴方向角的同时测量,采用弹光调制器(PEM)和电光调制器(EOM)组合,并运用探测器探测信号和锁相放大器锁相输出一倍频项数据。直流(DC)项和倍频项数据在计算机中求解得到双折射值和方向,实现了双折射值和方向的单弹光单通道同时测量。对该新方案原理进行了分析,并搭建了实验系统。采用初始值偏移的方法对系统进行了校准,并运用该系统对 Berek 偏振补偿器样品进行了实验分析。实验结果表明,系统校准有效地消除了 PEM 和 EOM 的自身剩余双折射引入的测量误差;本文方案对剩余双折射值的测量精度和重复度分别优于 99.16% 和 0.0082 rad,剩余双折射的快轴方向角测量重复度为 0.06°。本文方案具有工作稳定、重复度高、测量速率快、成本相对较低和系统利于工业自动化集成等应用优势。

**关键词** 物理光学;弹光调制;电光调制;剩余双折射

**中图分类号** O436 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/CJL201643.0508003

## Measurement of Residual Birefringence Combined Photo-Elastic Modulation with Electro-Optic Modulation

Li Kewu<sup>1,2,3</sup> Wang Liming<sup>1,2</sup> Wang Zhibin<sup>1,2,3</sup> Zhang Rui<sup>1,2,3</sup> Li Xiao<sup>2</sup> Wang Shuang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

<sup>2</sup>Engineering and Technology Research Center of Shanxi Province for Opt-Electrical Information and Instrument, Taiyuan, Shanxi 030051, China

<sup>3</sup>Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

**Abstract** In order to measure the residual birefringence and direction angle of fast axis simultaneously, with the advantage of high speed, high precision, high sensitivity, easy operation, good stability and low cost, the photo-elastic modulator (PEM) and electro-optic modulator (EOM) are combined, and the detector is used to detect signals and the locked-in amplifier is used to achieve the first harmonic term. Value and direction of birefringence are solved out by the direct current (DC) term and the first term in the computer, so the simultaneous measurement of value and direction of birefringence in a single photo-elastic modulation channel are realized. The principle of the new scheme is analyzed, and the experimental system is set up. The system is calibrated by the method of instrument offset, and the experimental analysis of a Berek polarization compensator is carried out. Experimental results show that the system calibration can effectively eliminate the measurement error maybe introduced by PEM and EOM themselves. The measuring accuracy and repeatability rate of residual birefringence for this scheme are

**收稿日期:** 2015-11-29; **收到修改稿日期:** 2015-12-30

**基金项目:** 国家国际科技合作专项项目(2013DFR10150)、国家自然科学基金(61471325, 61127015, 61505180)

**作者简介:** 李克武(1990—),男,博士研究生,主要从事偏振调制及偏振成像光谱技术方面的研究。

E-mail: kewuli1990@gmail.com

**导师简介:** 王黎明(1974—),男,博士,教授,主要从事多维信号处理与重建及无损检测技术等方面的研究。

E-mail: wanglm20@163.com

\* **通信联系人.** E-mail: wangzhibin@nuc.edu.cn

better than 99.16% and 0.0082 rad, respectively. The measuring repeatability of direction angle of fast axis is 0.06°. This scheme has the advantages of stable operation, high repeatability rate, fast measurement speed, low cost, and conducive to industrial automation integration and so on.

**Key words** physical optics; photo-elastic modulation; electro-optic modulation; residual birefringence

**OCIS codes** 260.5430; 260.1440; 120.5050

## 1 引 言

双折射是各向异性材料固有的光学性质,其显著特征为入射光通过时产生两个传播速度(或折射率)不相同的偏振分量<sup>[1]</sup>。然而,各向同性材料,例如光学玻璃、熔融石英、氟化钙和单晶锗等,在外力或加工残余应力作用下也会发生双折射现象,这样的双折射称之为剩余双折射,通常用两个分量的相位差来表征其大小,用传播速度快(或折射率小)的分量的振动方向来表征其方向。剩余双折射一般非常微小,但对其精确测量不仅可以详细地了解材料的弹性性质,还可以监控器件在加工、装调和固定过程中造成的应力分布不均匀。特别地,微纳加工、超分辨成像和半导体工业等领域对光学器件和光学材料的需求越来越严苛<sup>[2-5]</sup>,因此,对剩余双折射实现高速、高灵敏和高精度测量,并将光学器件和材料中的剩余双折射监控在较低水平是十分有意义的。

对剩余双折射的测试分析,现阶段主要有偏振光干涉和偏振光调制两种方法。偏振光干涉方法是将样品置于正交的偏振片之间来观测偏振光干涉图的方法,该方法操作简单、成本较低、现象直观,但测量灵敏度相对较低。为了弥补传统偏光干涉方法的不足,声光调制、法拉第磁光调制和弹光调制等偏振光调制方法逐渐被应用于双折射检测。鉴于弹光调制具有宽光谱窗口、大通光口径、高调制频率和调制纯度等优势<sup>[6]</sup>,现阶段多采用弹光调制方法。自1975年Modine第一次把弹光调制技术运用于双折射测量以来<sup>[7]</sup>,已经相继发展了单弹光单探测系统,单弹光双探测系统和双弹光单测系统<sup>[8-10]</sup>。单弹光单探测系统能够一次测量出快轴方向已知的双折射值,若快轴方向未知,则需旋转样品或检偏器经过两次测量得到样品双折射值和快轴方向。单弹光双探测系统能够同时测量出双折射值和快轴方向,但需两个探测器和两个锁相放大器,并且检测光路经分光器件分光到两个探测器时偏振方向会发生改变,难以控制,因而降低了双折射探测精度。双弹光单探测系统能够精确测量双折射值和快轴方向,但需两个调制频率相差的弹光调制器和两个锁相放大器,测量操作复杂,成本昂贵。

为了克服上述缺陷,实现高速、高精度、高灵敏度、操作方便可控、稳定性好和成本较低的剩余双折射值和快轴方向的同时测量,本文采用弹光调制器(PEM)和电光调制器<sup>[11]</sup>(EOM)组合,并运用探测器探测信号和锁相放大器锁相输出倍频项数据。直流项和倍频项数据在计算机(PC)中求解得到双折射的值和方向,实现了双折射的值和方向的单弹光单通道的同时测量。对本文方案的原理进行了分析,搭建实验系统,测试了双折射样品,并对实验结果进行了分析讨论。

## 2 测量原理

设计了如图1所示的微小双折射测量光学系统。检测激光依次通过起偏器(P<sub>1</sub>)、PEM、待测样品和

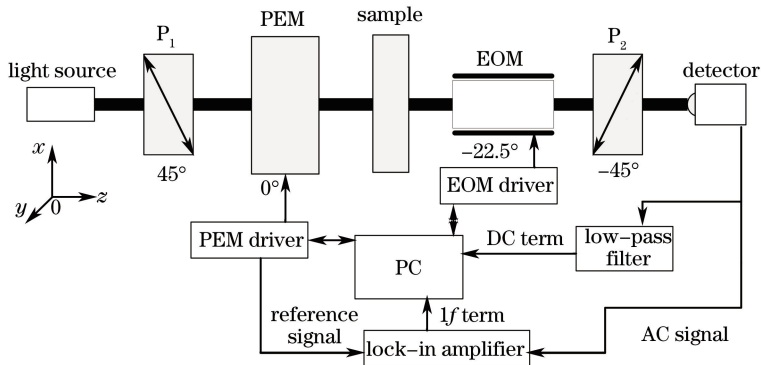


图1 微小双折射测量系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram for micro birefringence measurement system

EOM,最后经检偏器( $P_2$ )出射并被探测器探测。探测器将调制光信号转换为电信号输出,经低通滤波后输出直流(DC)项,交流(AC)信号经锁相放大器锁相输出倍频项。

首先,将 PEM 调制快轴调节与  $x$  轴方向重合,起偏器和检偏器相对 PEM 分别成  $45^\circ$ 和 $-45^\circ$ ,EOM 调制快轴相对 PEM 成 $-22.5^\circ$ 。上述系统运用斯托克斯参量和 Muller 矩阵分析较为方便。通过起偏器后的人射光斯托克斯参量为

$$\mathbf{S}_{\text{in}} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $I_0$  为检测激光通过起偏器后的总强度。对于调制快轴与  $x$  轴重合的 PEM,其偏振调制特性可用 Muller 矩阵表示为<sup>[9]</sup>

$$\mathbf{M}_{\text{PEM}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos(\delta_{\text{PEM}}) & \sin(\delta_{\text{PEM}}) \\ 0 & 0 & -\sin(\delta_{\text{PEM}}) & \cos(\delta_{\text{PEM}}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中  $\delta_{\text{PEM}} = \delta_0 \sin(\omega t)$ , $\delta_0$  为 PEM 的相位调制幅值, $\omega$  为 PEM 的调制圆频率。

剩余双折射的大小通常用入射光的两个偏振分量之间的相位延迟(或延迟量)表示<sup>[12]</sup>,

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} CL(\sigma_1 - \sigma_2), \quad \text{or} \quad \Delta = CL(\sigma_1 - \sigma_2), \quad (3)$$

式中  $\sigma_1$  和  $\sigma_2$  为两个主轴方向上的应力, $C$  为材料的相对弹光系数, $L$  为材料通光厚度。通常用传播速度快(或折射率小)的分量的偏振方向来表征其方向,记剩余双折射的快轴方向相对  $x$  轴夹角为  $\theta$ ,同其他线性双折射一样,剩余双折射的 Muller 矩阵表述为<sup>[13]</sup>

$$\mathbf{M}_{\text{S}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta) + \sin^2(2\theta)\cos\beta & \cos(2\theta)\sin(2\theta)[1 - \cos\beta] & -\sin(2\theta)\sin\beta \\ 0 & \cos(2\theta)\sin(2\theta)[1 - \cos\beta] & \sin^2(2\theta) + \cos^2(2\theta)\cos\beta & \cos(2\theta)\sin\beta \\ 0 & \sin(2\theta)\sin\beta & -\cos(2\theta)\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix}. \quad (4)$$

对于 EOM,选用沿晶片光轴  $z$  方向通光,在晶片  $y$  方向上施加电场的铌酸锂横向体电光调制器。该类型 EOM,未施加电场  $V=0$  时,入射光通过电光调制器不发生调制;施加半波电压  $V=V_\pi$  后,调制快轴沿晶片  $y$  方向,并使入射光的两个偏振分量产生  $\pi$  的相位延迟。实际上,施加固定电压的电光调制也属于线性双折射,其 Muller 矩阵一般表达式与(4)式具有相同的型。因此,本文系统 EOM 的两种工作状态,用 Muller 矩阵分别描述为

(I) 未施加电场  $V=0$  时,

$$\mathbf{M}_{\text{EOM}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

(II) 施加半波电压  $V=V_\pi$  时,

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

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,经检偏器后出射光斯托克斯参量为

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \mathbf{M}_{\text{A}} \mathbf{M}_{\text{EOM}} \mathbf{M}_{\text{S}} \mathbf{M}_{\text{PEM}} \mathbf{S}_{\text{in}}, \quad (7)$$

将(1)~(6)式和检偏器的 Muller 矩阵

$$\mathbf{M}_A = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

代入(7)式,并将 EOM 的两种工作状态加以考虑,则探测器探测到的光强为

$$\begin{cases} I_{\perp} = \frac{I_0}{2} \{1 + \cos(2\theta) \sin \beta \sin(\delta_{\text{PEM}}) - \cos(\delta_{\text{PEM}}) [\cos \beta \cos^2(2\theta) + \sin^2(2\theta)]\} \\ I_{\parallel} = \frac{I_0}{2} \{1 + \sin(2\theta) \sin \beta \sin(\delta_{\text{PEM}}) - \cos(\delta_{\text{PEM}}) [\cos \beta - 1] \cos(2\theta) \sin(2\theta)\} \end{cases}, \quad (9)$$

式中  $I_{\perp}$  为 EOM 不施加调制电压时探测器探测到的光强,  $I_{\parallel}$  为 EOM 施加半波电压时探测器探测到的光强。将上式中的  $\sin(\delta_{\text{PEM}}) = \sin[\delta_0 \sin(\omega t)]$  和  $\cos(\delta_{\text{PEM}}) = \cos[\delta_0 \sin(\omega t)]$  利用第一类贝塞尔级数展开得<sup>[14]</sup>

$$\sin(\delta_{\text{PEM}}) = \sum_{2k-1} 2J_{2k-1}(\delta_0) \sin[(2k-1)\omega t], \quad (10)$$

$$\cos(\delta_{\text{PEM}}) = J_0(\delta_0) + \sum_{2k} 2J_{2k}(\delta_0) \cos[(2k)\omega t], \quad (11)$$

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。将上述(10)、(11)式代入(9)式,并省略 3 阶以上的高阶贝塞尔级数得

$$\begin{cases} I_{\perp} = \frac{I_0}{2} \{1 + 2J_1(\delta_0) \cos(2\theta) \sin \beta \sin(\omega t) - [J_0(\delta_0) + 2J_2(\delta_0) \cos(2\omega t)] [\cos \beta \cos^2(2\theta) + \sin^2(2\theta)]\} \\ I_{\parallel} = \frac{I_0}{2} \{1 + 2J_1(\delta_0) \sin(2\theta) \sin \beta \sin(\omega t) - [J_0(\delta_0) + 2J_2(\delta_0) \cos(2\omega t)] [\cos \beta - 1] \cos(2\theta) \sin(2\theta)\} \end{cases}, \quad (12)$$

通常将 PEM 的相位调制幅值设置为  $\delta_0 = 2.405$  rad 使  $J_0(2.405) = 0$ , 则两种情况下探测器输出的直流项

$$V_{\text{Idc}} = V_{\parallel \text{dc}} = \frac{K_1 I_0}{2}, \quad (13)$$

式中  $K_1$  是与探测器光电转换有关的常数。针对(12)式,研究两个工作状态的一倍频信号,交流信号经锁相放大器锁相输出一倍频项为

$$\begin{cases} V_{\perp}(1f) = \frac{\sqrt{2}}{2} K_1 I_0 J_1(2.405) \cos(2\theta) \sin \beta \\ V_{\parallel}(1f) = \frac{\sqrt{2}}{2} K_1 I_0 J_1(2.405) \sin(2\theta) \sin \beta \end{cases}, \quad (14)$$

式中  $\sqrt{2}/2$  表明锁相输出的是一倍项的等效值而不是幅值。结合(13)式和(14)式,为了求解出剩余双折射的相位延迟和方向,通常用到锁相输出的一倍频项与直流项的比值,并且比值为

$$\begin{cases} R_{\perp} = \frac{V_{\perp}(1f)}{V_{\perp}(\text{dc})} = \sqrt{2} J_1(2.405) \cos(2\theta) \sin \beta \\ R_{\parallel} = \frac{V_{\parallel}(1f)}{V_{\parallel}(\text{dc})} = \sqrt{2} J_1(2.405) \sin(2\theta) \sin \beta \end{cases}, \quad (15)$$

由(15)式可知,双折射相位延迟和快轴方向角可以分别表示为

$$\beta = \sin^{-1} \left[ \frac{1}{\sqrt{2} J_1(2.405)} \sqrt{R_{\perp}^2 + R_{\parallel}^2} \right], \quad (16)$$

$$\theta = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left( \frac{R_{\parallel}}{R_{\perp}} \right), \quad (17)$$

由(16)、(17)式可知,双折射值和快轴夹角的探测是相互独立的,并且能够有效消除检测光源不稳定引起的测量误差;由(16)式可知,对于本文方案设计,双折射的测量幅值不超过  $\pi/2$  (延迟量为 158.2 nm 在检测激光为 632.8 nm),即量程为 0 到  $\pi/2$ 。结合(15)式,便可以确定双折射快轴方向角  $\theta$  量程:1) 当  $R_{\perp} \leq 0, R_{\parallel} \leq 0$  时,

$\theta \in [-90^\circ, -45^\circ]$ ; 2) 当  $R_{\perp} > 0, R_{\parallel} \leq 0$  时,  $\theta \in (-45^\circ, 0^\circ]$ ; 3) 当  $R_{\perp} \geq 0, R_{\parallel} > 0$  时,  $\theta \in (0^\circ, 45^\circ]$ ; (4) 当  $R_{\perp} < 0, R_{\parallel} \geq 0$  时,  $\theta \in (45^\circ, 90^\circ]$ 。

### 3 实验及讨论

按照原理图 1 搭建了实验系统,检测激光选用 632.8 nm 的 He-Ne 激光,起偏器和检偏器均为 Thorlabs 公司生产的格兰泰勒偏振棱镜 GT10,消光比优于  $10^5 : 1$ ; PEM 是自行研制的双压电石英驱动的二角对称状结构 PEM,通光晶体为熔融石英,PEM 谐振频率为 49.92 kHz; EOM 为 Y 切铌酸锂晶片,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  $31.10 \text{ mm} \times 11.45 \text{ mm} \times 4.62 \text{ mm}$ ,针对 632.8 nm 的入射光,测量得到半波电压为  $1132 \text{ V}^{[11]}$ 。探测器为 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;一倍频项采用 AMETEK7270 锁相放大器锁相输出。

#### 3.1 系统定标

为了能够精确测量微小双折射,对系统进行校准是十分必要的。首先,系统不放入测量样品,将 PEM 的相位调制幅值设置为  $\delta_0 = 2.405 \text{ rad}, J_0(\delta_0) = 0$ 。NI 采集卡采率设置为 100 Hz,采集得到 EOM 两种不同的工作状态下,经低通滤波后的直流项和锁相放大器输出的一倍频项数据如图 2 所示。

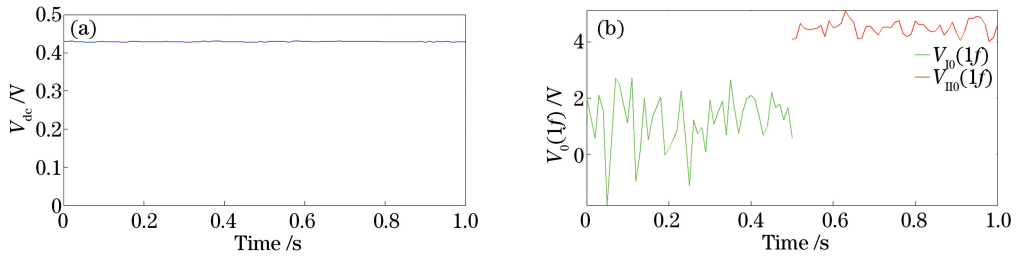


图 2 无待测样品。(a)直流项;(b)一倍频项

Fig. 2 Without sample. (a) DC term; (b) first harmonic term

由图 2(a)可知,激光光强稳定,EOM 两种工作状态下,直流项相同,其平均值为  $\bar{V}_{\text{dc}} = 0.4291 \text{ V}$ 。由图 2(b)可知,前 0.5 s 数据为 EOM 工作在状态 I 的一倍频项,其平均值为  $\bar{V}_{j_0}(1f) = 1.214 \text{ mV}$ ,后 0.5 s 数据为 EOM 工作在状态 II 的一倍频项,其平均值为  $\bar{V}_{j_{10}}(1f) = 4.489 \text{ mV}$ ,无待测样品时,两种状态下一倍频项均不为 0。实际上,这主要是 EOM 和 PEM 的微小剩余双折射造成的,其大小不仅由 EOM 和 PEM 的微小剩余双折射大小决定,还与激光强度有关。由(15)式可知,无待测样品时,状态 I 的一倍频项与直流项的比值为  $R_{j_0} = 1.214/0.4291 \times 10^{-3} = 2.829 \times 10^{-3}$ ,状态 II 的一倍频项与直流项的比值为  $R_{j_{10}} = 4.489/0.4291 \times 10^{-3} = 10.461 \times 10^{-3}$ ,将上述两个非零比值视为系统初始偏移值,实际测量时,一倍频项和直流项的比值都需要减去系统初始偏移值来尽可能减小或消除系统测量误差。

#### 3.2 验证实验

为了进一步验证该方案的可行性,并得出检测精度和重复度。利用 Z 切铌酸锂晶片制作了 Berek 偏振补偿器<sup>[15]</sup>作为待测样品。晶片加工过程中,用 X 射线定向仪将(001)晶面的精度严格控制在  $5'$  的偏差内,研磨抛光加工好的晶片厚度为  $d = 3.55 \text{ mm}$ 。晶片安装在 Thorlabs 公司生产的 PRM1 高精度旋转安装座上,角度旋转精度为  $5'$ 。通光方向沿光轴 Z 轴方向。当补偿器旋转  $\alpha$  角度时,产生对应相位延迟,其原理如图 3

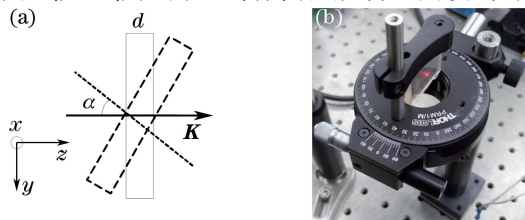


图 3 Berek 偏振补偿器。(a)原理图;(b)实物图

Fig. 3 Berek polarization compensator. (a) Schematic diagram; (b) real figure

所示。

图 3 中,  $\mathbf{K}$  为入射光波矢量。据文献[15],当补偿器旋转  $\alpha$  角度时,Berek 偏振补偿器的相位延迟为

$$\beta' = \frac{2\pi}{\lambda}(n_e - n_o) \frac{\sin^2 \alpha}{\cos \alpha} d, \quad (18)$$

式中  $n_e$  和  $n_o$  为铌酸锂对波长为  $\lambda$  的入射光的两个折射率本征值。针对 632.8 nm 的入射光,两个折射率本征值为  $n_e=2.20$  和  $n_o=2.29$ 。将制作好的铌酸锂 Berek 偏振补偿器从待测样品位置插入检测光路中,PEM 的相位调制幅值设置为  $\delta_0=2.405$  rad。精细旋转补偿器,直至 EOM 两种工作状态对应的一倍频项和直流项的比值与第 3.1 节中系统校准初始值相同,则默认入射光沿补偿器的光轴传播,经补偿器的相位延迟为 0。依次调节补偿器旋转  $20'$ 、 $30'$ 、 $40'$ 、 $50'$ 、 $60'$ 、 $70'$ ,并记录测试数据。如图 4 所示,以补偿器旋转  $20'$  时采集到的数据为例,直流项如图 4(a)所示,EOM 两种工作状态对应一倍频项数据如图 4(b)所示。将图 4(a)和(b)数据代入(15)式,并消除系统初始偏移值,得到一倍频项和直流项的比值如图 4(c)所示。

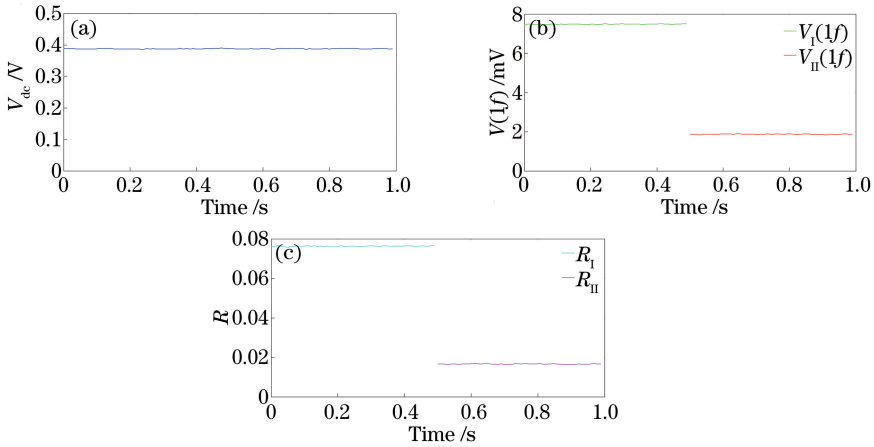


图 4 Berek 补偿器作样品。(a)直流项;(b)一倍频项;(b)一倍频项与直流项的比值

Fig. 4 With Berek polarization compensator. (a) DC term; (b) first-harmonic term; (c) ratio of first-harmonic term and DC term

图 4 中,前 0.5 s EOM 工作在状态 I,后 0.5 s EOM 工作在状态 II。由图 4 可知,加入待测样品后,EOM 两种工作状态下,直流项相同。将补偿器其他几组旋转方位角下的数据均做上图数据处理,并将一倍频项和直流项的比值整理并记入表 1。

表 1 一倍频项和直流项比值

Table 1 Ratio of first-harmonic term and DC term

Position angle of Berek polarization compensator	$R_I$		$R_{II}$	
	Mean value	Standard deviation	Mean value	Standard deviation
$20'$	0.0763	0.00022	0.0166	0.00016
$30'$	0.1724	0.00045	0.0371	0.00032
$40'$	0.2981	0.00084	0.0643	0.00066
$50'$	0.4466	0.00093	0.0969	0.00090
$60'$	0.5918	0.00142	0.1284	0.00120
$70'$	0.6944	0.00153	0.1510	0.00131

将表 1 中数据代入(16)和(17)式求解得到对应的相位延迟和方向角,记录入表 2。

根据表 2 的测量结果,将  $\beta$  测量值和(18)式的理论值作比较,如图 5 所示,测量值与理论值吻合。当补偿器旋转到  $\alpha=20'$  时,测量值为  $\beta=0.1066$  rad,与理论计算值  $\beta'=0.1075$  rad,存在最大相对误差为 0.84%,代表了该系统的测量精度;当补偿器旋转到  $\alpha=70'$  时, $\beta$  测量值存在最大标准偏差  $\sigma_\beta=0.0082$  rad,代表了该系统对相位延迟检测的重复度。补偿器旋转到不同的方位角时,方向角的测量值几乎不发生变化,平均值为  $\bar{\theta}=6.11^\circ$ ,该角度主要是安装 Berek 偏振补偿器的晶体时晶体  $x$  轴和空间坐标轴  $x$  轴之间存在的夹角,方向角的检测重复度为  $\sigma_\theta=0.06^\circ$ 。

表 2 测量结果

Table 2 Measurement results

Position angle of Berek polarization compensator	$\beta$ /rad		$\theta$ /( $^{\circ}$ )	
	Mean value	Standard deviation	Mean value	Standard deviation
20'	0.1066	0.0003	6.14	0.06
30'	0.2426	0.0006	6.07	0.05
40'	0.4284	0.0012	6.09	0.06
50'	0.6719	0.0016	6.12	0.06
60'	0.9700	0.0034	6.12	0.06
70'	1.3171	0.0082	6.14	0.05

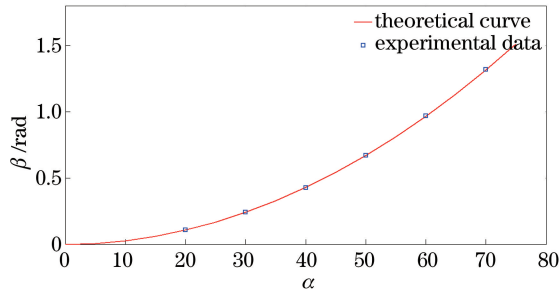


图 5  $\beta$  测量值和理论值

Fig. 5 Theoretical and experimental data of  $\beta$

此外,本文方案还可以在保证测量精度和灵敏度的前提下,适当增大对直流项和倍频项数据的采集率,将测量速率提高到毫秒量级。将 EOM 的两种工作模式切换通过 PEM 控制器输出 TTL 信号触发 EOM 控制器工作实现,TLL 信号周期为 PEM 谐振周期的整数倍(一般取几百倍);NI 采集卡采集到的直流项和倍频项数据在计算机中实现剩余双折射值和方向角的解调、存储和显示,这样便可以实现剩余双折射的快速和自动化检测。

## 4 结 论

提出了一种弹光调制和电光调制联合测剩余双折射的新方案。采用一个 PEM 和一个 EOM 组合、单个探测器探测信号、并通过对 EOM 不施加调制电压和施加半波调制电压的两种工作模式切换,结合数字锁相信号处理技术实现了双折射大小和方向的同时测量。按照该新方案原理搭建了实验系统,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 自身剩余双折射对测量造成的影响。利用搭建的实验系统对 Berek 偏振补偿器样品进行了实验分析,其结果表明该系统对剩余双折射值的测量精度优于 99.16% 和重复度优于 0.0082 rad,剩余双折射的方向角测量重复度为  $\sigma_{\theta}=0.06^{\circ}$ 。本文方案具有无需机械调节、工作稳定、重复度高、测量速率快、成本相对较低和测量系统利于工业自动化集成等优势,可为剩余双折射的测量提供新方法。

## 参 考 文 献

- Liao Yanbiao. Polarization optics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 75.  
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 75.
- Y Zhang, X Jia, P Xiong, *et al.*. Fabrication and enhanced optical absorption of submicrometer pits array on 6H-SiC via two-beam interference of femtosecond laser[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(12): 1203-1206.
- S Jia, J C Vaughan, X Zhuang, *et al.*. Isotropic 3D super-resolution imaging with a self-bending point spread function[J]. Nature Photonics, 2014, 8(1): 302-306.
- Yu Muxin, Zhou Wenchao, Wu Yihui. Mode analysis of unit cell superlens and study on its sub-wavelength imaging performance[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(12): 1210001.  
余慕欣, 周文超, 吴一辉. 单元超透镜模式分析及其亚波长成像特性研究[J]. 光学学报, 2014, 34(12): 1210001.

- 5 Y Haldorai, J Shim. Fabrication of metal oxide-polymer hybrid nanocomposites[J]. *Advances in Polymer Science*, 2015, 267: 249-281.
- 6 Li Kewu, Wang Zhibin, Zhang Rui, *et al.*. High sensitive measurement of optical rotation based on photo-elastic modulation[J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, 64(18): 184206.  
李克武, 王志斌, 张 瑞, 等. 基于弹光调制的高灵敏旋光测量[J]. *物理学报*, 2015, 64(18): 184206.
- 7 F A Modine, R W Major, E Sonder. High frequency modulation method for measuring birefringence[J]. *Appl Opt*, 1975, 14(3): 757-760.
- 8 B Bob Wang. Measurement of circular and linear birefringence in chiral media and optical materials using the photoelastic modulator[J]. *Proc SPIE*, 1999, 3535: 294-302.
- 9 B Wang, T C Oakberg. A new instrument for measuring both the magnitude and angle of low level linear birefringence[J]. *Rev Sci Instrum*, 1999, 70(10): 3847-3854.
- 10 B Wang. Linear birefringence measurement instrument using two photoelastic modulators[J]. *Opt Eng*, 2002, 41(5): 981-987.
- 11 Li Kewu, Wang Zhibin, Zhang Rui, *et al.*. LiNbO<sub>3</sub> transverse electro-optical modulation characteristics for light pass along optical axis[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(5): 1227-1232.  
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.
- 12 H J Peng, S P Wong, Y W Lai, *et al.*. Simplified system based on photoelastic modulation technique for low-level birefringence measurement[J]. *Rev Sci Instrum*, 2003, 74(11): 4745-4749.
- 13 Lu Yaxiong, Lü Baida. *Matrix optics*[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1989: 356-357.  
卢亚雄, 吕百达. *矩阵光学*[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989: 356-357.
- 14 Liang Kunmiao. *Mathematical physics method*[M]. Beijing: High Education Press, 2011: 269.  
梁昆淼. *数学物理方法*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2011: 269.
- 15 Li Kewu, Wang Zhibin, Zhang Rui, *et al.*. Study of birefringence dispersion based on liquid crystal variable retarder[J]. *Chinese J Laser*, 2015, 42(1): 0108001.  
李克武, 王志斌, 张 瑞, 等. 液晶可变延迟器的双折射色散研究[J]. *中国激光*, 2015, 42(1): 0108001.