

考虑静态双折射和圆二色性的弹光调制器偏振特性

李克武^{1,2,3} 王黎明^{2,3} 王志斌^{1,2,3} 张瑞^{1,2,3} 李 晓² 张敏娟^{1,2,3}

¹中北大学电子测试技术重点实验室, 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中北大学信息与通信工程学院, 山西 太原 030051

摘要 为了进一步理解弹光调制器(PEM)的静态双折射和圆二色性,深入研究了PEM偏振特性。运用Muller矩阵分别描述弹光调制、静态双折射和圆二色性的偏振特性,建立了同时考虑静态双折射和圆二色性的PEM偏振特性模型;对该模型进行理论分析和仿真分析;搭建实验装置并进行了偏振调制实验。实验结果表明理论分析正确合理,PEM的偏振特性应为微小静态双折射、弹光调制和微弱圆二色性效应的组合。此外,还精细测量了其中一个PEM样品的圆二色性值为 2.755×10^{-2} ,静态双折射的相位延迟值 $b = 5.73 \times 10^{-2}$ rad和方向角 $\alpha = 3.96^\circ$ 。较全面地给出了PEM偏振特性的一般Muller矩阵描述,扩充了弹光偏振调制方面的知识。

关键词 物理光学;偏振特性;弹光调制器;静态双折射;圆二色性

中图分类号 0436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0326001

Polarization Characteristic of a Photo-Elastic Modulator with Static Birefringence and Circular Dichroism

Li Kewu^{1,2,3} Wang Liming^{2,3} Wang Zhibin^{1,2,3} Zhang Rui^{1,2,3} Li Xiao² Zhang Minjuan^{1,2,3}

¹Key Laboratory of Electronic Measurement Technology, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

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

³School of Information and Communication Engineering, North University of China, Taiyuan, Shanxi 030051, China

Abstract In order to understand the static birefringence and the circular dichroism of a photo-elastic modulator (PEM), an intensive study about the polarization characteristics of PEM is done. First of all, Muller matrices are used to describe the polarization characteristics of the photo-elastic modulation, the static birefringence and the circular dichroism. The general polarization modulation model of PEM is built. Then, the principle of the modulation model is studied, theory and simulation are analyzed. Finally, experimental apparatus is established and the polarization modulation experiment is carried out. The results show that the theory model built is reasonable and correct, the polarization modulation characteristic of PEM should be the combination of the small static birefringence, the photo-elastic modulation and the circular dichroism. Moreover, preliminary measurement for one example of PEMs shows that the circular dichroism is 2.755×10^{-2} , the phase retardation of static birefringence is $b = 5.73 \times 10^{-2}$ rad and its direction angle is $\alpha = 3.96^\circ$. This study gives the general Mueller matrix form of a photo-elastic modulator, and expands the knowledge of the photo-elastic polarization modulation.

Key words physical optics; polarization characteristic; photo-elastic modulator; static birefringence; circular

收稿日期: 2015-09-15; 收到修改稿日期: 2015-10-14

基金项目: 国家国际科技合作专项项目(2013DFR10150, 2012DFA10680)、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: 王志斌(1966—),男,博士,教授,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(通信联系人)

dichroism

OCIS codes 260.5430; 130.4110; 120.5710

1 引 言

弹光调制器(PEM)是一种基于弹光效应的光学偏振态调制器件^[1],包括光学组件和驱动控制器两部分,其中光学组件主要由压电驱动器和通光晶体组成。PEM具有两个十分重要的特性:1)通光晶体为各向同性晶体,通常选用熔融石英、氟化钙和硒化锌等;2)PEM为谐振调制器件,压电驱动器沿长度方向的基频振动,耦合进入通光晶体后形成应力驻波,使通光晶体折射率随之变化而达到对入射光偏振态调制的目的,PEM的谐振频率一般为几十千赫兹。PEM上述两个特性使得PEM具有较宽的光谱窗口、较大的通光面积和孔径、较高的调制纯度和调制效率、较好的调制稳定性^[2]。鉴于这些优点,PEM已被广泛应用于光谱测量和偏振分析领域^[3-6]。

特别地,PEM较高的调制纯度和调制效率,使得PEM在圆二色性,旋光和线性双折射等领域实现了较其他调制器件及方法更精确和更灵敏的测量。日本JASCO公司以弹光调制器为核心器件研制了一系列高灵敏度的圆二色光谱仪。1998年,Baoliang Wang^[7]运用PEM首次实现了灵敏度为0.001°(对应延迟量约0.002 nm对于633 nm检测激光)的旋光测量和灵敏度为0.001 nm的线性双折射测量。然而,对PEM通光晶体的研磨抛光加工和对PEM光学组件的固定支撑不可避免地引入了静态双折射,并且静态双折射在通光晶体中的分布通常是不均匀的。2009年,Hinds公司^[8]详细地报道了一系列PEM产品的静态双折射,大小均控制在0.1~3 nm,比0.001°的旋光测量灵敏度和0.001 nm的线性双折射测量灵敏度均大两个数量级。因而,PEM运用于高精度和高灵敏度的测量领域时,必须将静态双折射加以考虑,尽量减小或避免静态双折射对测量造成影响。而对于考虑静态双折射的PEM偏振特性方面的研究工作报道还较少。1990年,J Badoz等^[9]详细阐述了光在弹光调制器中的传播,并且实验证明弹光调制器中的静态双折射和弹光调制是非共线的。2010年,Y F Chao等^[10]发现弹光调制会伴随微弱的圆二色性效应,并测量了其大小。此外,早在1987年J Schellman^[11]就广泛讨论了伴随线性双折射产生的圆二色性。最近在应用弹光调制来研究旋光时发现,起偏器和检偏器与PEM调制快轴分别成0°和45°,或起偏器和检偏器与PEM调制快轴分别成45°和0°的两种系统都会产生较大的奇数倍频的调制信号而偶数倍频信号几乎为0。单独采用J Badoz或Y F Chao的理论都不能解释这些实验现象。

为了进一步深入理解PEM的偏振特性,把J Badoz和Y F Chao的理论结合,将PEM的偏振调制视为微小静态双折射,弹光调制和微弱圆二色性效应的组合,很好地解释了上述实验现象。本文运用Muller矩阵来描述PEM的弹光调制、静态双折射和圆二色性,推导得出考虑静态双折射和圆二色性的PEM偏振调制的一般穆勒矩阵描述,并精细测量了其中一个PEM样品的静态双折射和圆二色性。

2 考虑静态双折射和圆二色性的PEM偏振特性描述

对于利用PEM的光学系统,运用斯托克斯参量来描述入射光和出射光,并用Muller矩阵来描述光学元件的偏振传输特性,能够使分析比较直观简便。通常,取PEM的调制快轴的方向角为0°,PEM的弹光调制用Muller矩阵可表述为^[7]

$$M_{\text{PEM}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta & \sin \delta \\ 0 & 0 & -\sin \delta & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

其中, $\delta = \delta_0 \sin(2\pi f_0 t)$, δ_0 为弹光调制的调制幅值, f_0 为PEM的谐振频率。

PEM的通光晶体材料一般选用各向同性晶体,入射光通过时不会发生双折射。但通光晶体需要研磨和抛光加工,并且制备好的PEM光学组件需固定支撑,这些都会造成PEM通光晶体中应力分布不均匀,从而导致双折射,通常称这种双折射为PEM的静态双折射或剩余双折射。同其他线性双折射一样,PEM静态双折射的偏振特性可以用Muller矩阵表述为^[13]

$$M_b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\alpha + \sin^2 2\alpha \cdot \cos b & \cos 2\alpha \cdot \sin 2\alpha \cdot (1 - \cos b) & -\sin 2\alpha \cdot \sin b \\ 0 & \cos 2\alpha \cdot \sin 2\alpha \cdot (1 - \cos b) & \sin^2 2\alpha + \cos^2 2\alpha \cdot \cos b & \cos 2\alpha \cdot \sin b \\ 0 & \sin 2\alpha \cdot \sin b & -\cos 2\alpha \cdot \sin b & \cos b \end{bmatrix}, \quad (2)$$

其中, α 为 PEM 剩余双折射快轴与 PEM 调制快轴的夹角, b 为剩余双折射的相位延迟值。由于通光晶体中应力的不均匀分布, 一般通光面上不同位置的 α 和 b 是不同的。

实际上, PEM 是一种基于双折射效应研制的偏振调制器件, 其弹光调制可视为周期性变化的线性双折射。因此, PEM 中的线性双折射包括静态和动态两部分。根据文献[10-11], 伴随线性双折射将会有微弱的圆二色性效应产生, 其 Muller 矩阵表述为

$$M_{cd} = \begin{bmatrix} \cosh(s_{cd}) & 0 & 0 & \sinh(s_{cd}) \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ \sinh(s_{cd}) & 0 & 0 & \cosh(s_{cd}) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

其中, $s_{cd} = \ln 10(A_- - A_+)/2$ 代表圆二色性衰减, A_- 和 A_+ 分别为左旋和右旋圆偏振光的吸收率。

综上, 将 PEM 的静态双折射, 弹光调制和圆二色性效应结合。将考虑静态双折射和圆二色性的 PEM 偏振特性用 Muller 矩阵 M 表述为

$$M = M_{cd} M_{PEM} M_b, \quad (4)$$

将(1)~(3)式代入(4)式, 对于微小的静态双折射 $\sin b \approx b$, $\cos b \approx 1$ 和微弱的圆二色性 $\sinh(s_{cd}) \approx s_{cd}$, $\cosh(s_{cd}) \approx 1$, 因此整理得到

$$M = \begin{bmatrix} 1 & \sin 2\alpha \cdot b \cdot s_{cd} \cdot \cos \delta & -s_{cd} \cdot \sin \delta - \cos 2\alpha \cdot b \cdot s_{cd} \cdot \cos \delta & s_{cd} \cdot \cos \delta - \cos 2\alpha \cdot b \cdot s_{cd} \cdot \sin \delta \\ 0 & 1 & 0 & -\sin 2\alpha \cdot b \\ 0 & \sin 2\alpha \cdot b \cdot \sin \delta & \cos \delta - \cos 2\alpha \cdot b \cdot \sin \delta & \sin \delta + \cos 2\alpha \cdot b \cdot \cos \delta \\ s_{cd} & \sin 2\alpha \cdot b \cdot \cos \delta & -\sin \delta - \cos 2\alpha \cdot b \cdot \cos \delta & \cos \delta - \cos 2\alpha \cdot b \cdot \sin \delta \end{bmatrix}. \quad (5)$$

3 PEM 偏振特性验证分析

为了验证 PEM 偏振特性的 Muller 矩阵一般表达式, 设计如下偏振特性分析实验, 实验原理如图 1 所示。

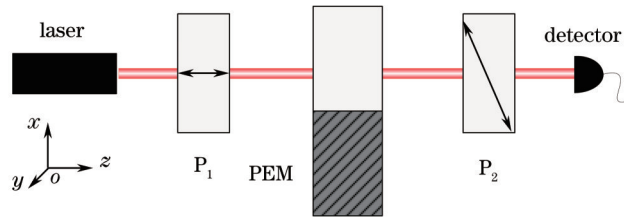


图 1 验证实验原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the verification experiment

激光依次通过起偏器 P_1 和 PEM, 经检偏器 P_2 出射后被光电探测器探测。取偏振片的偏振轴方向和 PEM 弹光调制的快轴方向夹角为 ϕ_i , 对于 P_1 和 P_2 , i 分别取 1 和 2, 偏振片的 Muller 矩阵表示为

$$M_{P_i} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & \cos 2\phi_i & \sin 2\phi_i & 0 \\ \cos 2\phi_i & \cos^2 2\phi_i & \cos 2\phi_i \cdot \sin 2\phi_i & 0 \\ \sin 2\phi_i & \cos 2\phi_i \cdot \sin 2\phi_i & \sin^2 2\phi_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

设激光光源为竖直方向的线偏振光, 则入射光斯托克斯参量为

$$S_{in} = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

其中, I_0 为激光光源强度。忽略激光通过系统时的损失, 则经检偏器后的出射光斯托克斯参量为

$$S_{out} = M_{P_2} M M_{P_1} S_{in}, \quad (8)$$

将(5)~(7)式代入(8)式,令 $\phi_1 = 0^\circ$, $\phi_2 = 45^\circ$ 和 $\phi_1 = 45^\circ$, $\phi_2 = 0^\circ$ 两种情况下,分别求解得到达探测器的归一化光强分别为

$$I_I = 1 + \sin 2\alpha \cdot b \cdot (\sin \delta - s_{CD} \cdot \cos \delta), \quad (9)$$

$$I_{II} = 1 - s_{CD} \cdot \sin \delta - \cos 2\alpha \cdot b \cdot s_{CD} \cdot \cos \delta, \quad (10)$$

上述两式,利用第一类贝塞尔级数展开可得

$$I_I = 1 - \sin 2\alpha \cdot b \left\{ 2 \sum_{2k-1} J_{2k-1}(\delta_0) \sin[(2k-1)2\pi f_0 t] + 2s_{CD} \left[J_0(\delta_0) + \sum_{2k} J_{2k}(\delta_0) \cos(4k\pi f_0 t) \right] \right\}, \quad (11)$$

$$I_{II} = 1 - 2s_{CD} \sum_{2k-1} J_{2k-1}(\delta_0) \sin[(2k-1)2\pi f_0 t] + 2 \cos 2\alpha \cdot b \cdot s_{CD} \left[J_0(\delta_0) + \sum_{2k} J_{2k}(\delta_0) \cos(4k\pi f_0 t) \right], \quad (12)$$

其中, k 为正整数, J_0 为 0 阶贝塞尔级数, J_{2k-1} 为 $2k-1$ 阶贝塞尔级数, J_{2k} 为 $2k$ 阶贝塞尔级数。上述两式表明,两种情况均会出现奇数倍频调制信号,而偶数倍频信号很小,几乎为 0。将直流信号和交流信号分别提取出,并取 $\delta_0 = 2.405 \text{ rad}$ 使 $J_0 = 0$, 结合(10)式和(12)式表示的第 II 类情况,可求解得

$$s_{CD} = -\frac{V_{1f(II)}}{2J_{1(\delta_0=2.405 \text{ rad})} \cdot V_{DC(II)}}, \quad (13)$$

$$\cos 2\alpha \cdot b = -\frac{V_{2f(II)}}{2s_{CD} \cdot J_{2(\delta_0=2.405 \text{ rad})} \cdot V_{DC(II)}}, \quad (14)$$

其中, $V_{DC(II)}$ 、 $V_{1f(II)}$ 和 $V_{2f(II)}$ 分别表示情况 II 对应的直流项、一倍频项和二倍频项值。由(9)式和(11)式表示的第 I 类情况,可求解得

$$\sin 2\alpha \cdot b = \frac{V_{2f(I)}}{2J_{2(\delta_0=2.405 \text{ rad})} \cdot V_{DC(I)}}, \quad (15)$$

其中, $V_{DC(I)}$ 和 $V_{2f(I)}$ 分别表示情况 I 对应的直流项和一倍频项值。并且令 $R_I = \frac{V_{2f(I)}}{2J_{2(\delta_0=2.405 \text{ rad})} \cdot V_{DC(I)}}$ 和

$R_{II} = \frac{V_{2f(II)}}{2s_{CD} \cdot J_{2(\delta_0=2.405 \text{ rad})} \cdot V_{DC(II)}}$, 静态双折射值和方向角可进一步表述为

$$\begin{cases} b = \arcsin(R_I^2 + R_{II}^2)^{1/2} \\ \alpha = \frac{1}{2} \arctan\left(\frac{R_I}{R_{II}}\right) \end{cases}. \quad (16)$$

不妨设剩余双折射延迟量为 $b = \frac{2\pi}{632.8} \times 0.3 \approx 3 \times 10^{-3} \text{ rad}$, 夹角为 $\alpha = 25^\circ$, 圆二色性值 $s_{CD} = 0.001$ 。PEM 谐振频率为 $f_0 = 50 \text{ kHz}$, δ_0 取 3.04 rad 使得第二阶贝塞尔系数 $J_2(\delta_0)$ 取最大值, 代入(11)式和(12)式, 利用 MATLAB 软件编程仿真可得如图 2 所示结果。

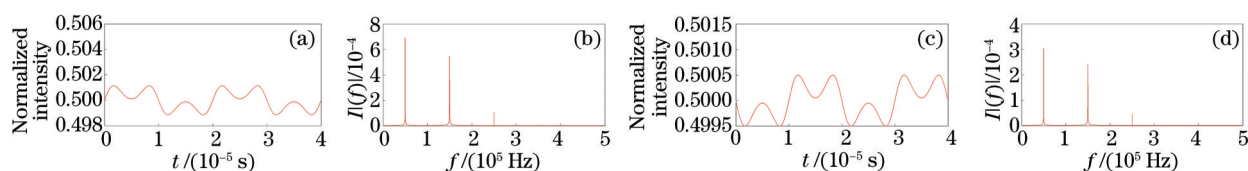


图 2 (a) 交流信号(I); (b) 频谱图(I); (c) 交流信号(II); (d) 频谱图(II)

Fig.2 (a) AC signals(I); (b) frequency spectrogram(I); (c) AC signals(II); (d) frequency spectrogram(II)

由图 2 的仿真结果可以看出,起偏器和检偏器与 PEM 调制快轴分别成 0° 和 45° , 或起偏器和检偏器与 PEM 调制快轴分别成 45° 和 0° 的两种系统交流信号中 PEM 弹光调制的奇数倍频信号占主要成分。这是只考虑静态双折射或只考虑伴随 PEM 的圆二色性效应都不能解释的。此外,静态双折射,圆二色性和 PEM 弹光调制幅值取其他值时,也能得到图 2 类似的仿真结果,只不过各奇数倍频信号的幅值不一样。

4 实验及讨论

根据原理图1,搭建了如图3所示的实验装置图。除检测光路外,还引入了参考光路,并在参考光路中插入一个偏振片用于调节参考光的强度。利用差分平衡探测技术,当参考光强调节与检测光强相等时,差分输出交流信号。

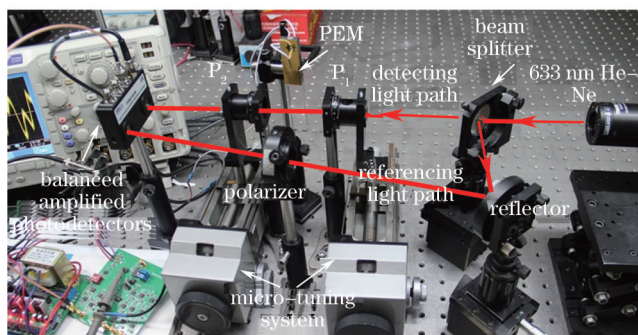


图3 实验装置图

Fig.3 Experimental apparatus

激光光源选用Thorlabs公司生产的HRS015稳定氦氖激光; P_1 和 P_2 均为格兰泰勒偏振棱镜,消光比优于100000:1,并且设计了 P_1 和 P_2 的微调装置,偏振轴角度调节灵敏度约 8.3×10^{-6} rad^[4];探测器为Thorlabs公司的大面积平衡光电探测器PDB210A。差分平衡探测输出的交流信号,经前置放大器放大100倍后输入示波器显示波形,并由数据采集和存储系统(NI PXIe-1062Q)以10M/s的速率采集,并作同步傅里叶变换频谱分析显示输出。

实验过程中,分别测试了单压电石英驱动的长棒状PEM和双压电石英驱动的八角对称结构PEM,均观察到相同的实验现象。以单压电石英驱动的长棒状PEM为例具体说明,该PEM通光晶体为熔融石英晶体,谐振频率为49.916kHz。首先,将 P_1 和 P_2 的偏振轴分别粗略地调节到 0° 和 45° ,并对PEM施加调制幅值 $\delta_0 = 3.04$ rad的高压驱动。然后,微调 P_1 直至数据采集和存储系统的同步频谱分析显示的二倍频信号接近于0。实际上,当二倍频信号为0时,说明 P_1 的偏振轴方向与PEM弹光调制快轴方向一致。此时,示波器显示的波形图如图4(a)所示,数据采集和存储系统的同步频谱图如图4(b)所示。

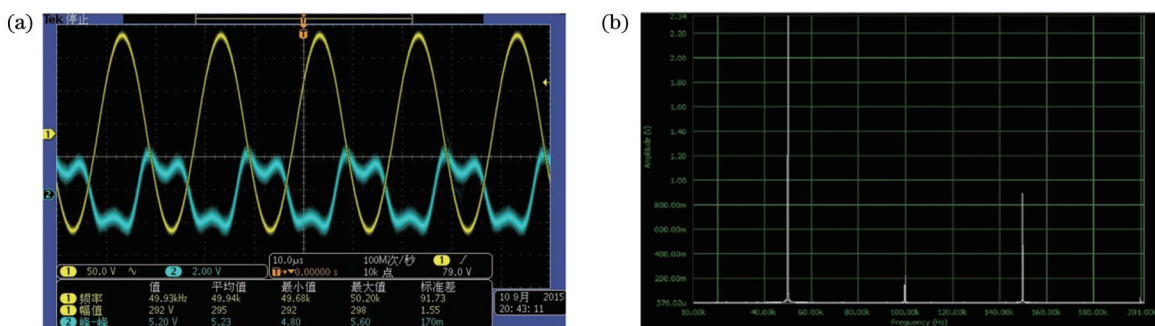


图4 (a) $P_1=0^\circ$ 信号波形图; (b) 信号频谱图

Fig.4 (a) Signal waveform chart of $P_1=0^\circ$; (b) signal spectrum

图4(a)中通道1为PEM高压驱动信号,驱动电压峰峰值为292V;通道2为经前置放大器放大后的调制光信号,图4(b)为该信号傅里叶变换后的频谱图。显示的实验结果与(11)式表示的结果及仿真实验吻合得很好。还将 P_1 和 P_2 的偏振轴分别粗略地调节到 45° 和 0° ,微调 P_2 得到如图5所示的波形图。

图5显示的实验结果与图4类似,只不过图5的奇数倍频信号幅值稍小。但与(12)式表示的结果及仿真实验吻合得很好。此外,观察了 P_1 和 P_2 都不与PEM调制快轴平行的其他情况,实验结果发现二倍频信号占主要成分。上述实验结果说明,同时考虑静态双折射和圆二色性的PEM偏振特性满足(4)式建立的理论模型。为了能够精细测量得到该PEM样品的微弱圆二色性和静态双折射,将PEM的调制电压峰峰值调节到

217V, 对应 $\delta_0 = 2.405 \text{ rad}$, 使 $J_0(\delta_0) = 0$; 平衡光电探测器差分输出的交流信号直接输入数字锁相放大器 (AM-ETEK7270) 进行倍频项数据的提取。 P_1 和 P_2 调节到 I 和 II 两类情况时, 锁相放大器提取的倍频数据经 NI 采集卡采集输出, 如图 6 所示。

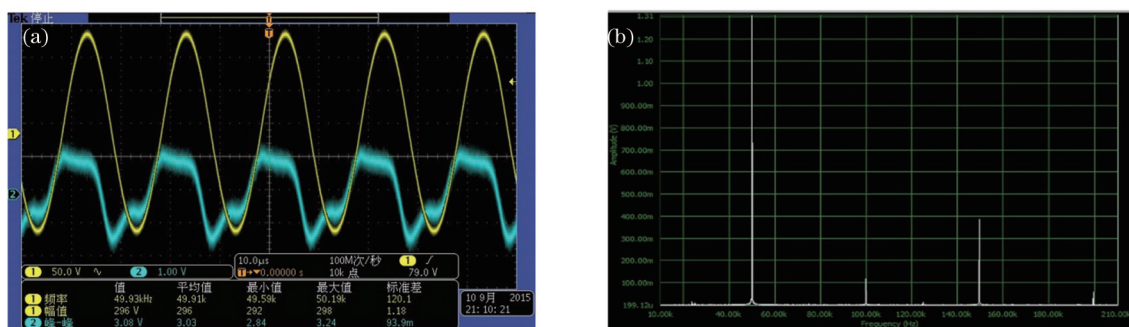


图 5 (a) $P_2=0^\circ$ 信号波形图; (b) 信号频谱图

Fig.5 (a) Signal waveform chart of $P_2=0^\circ$; (b) signal spectrum

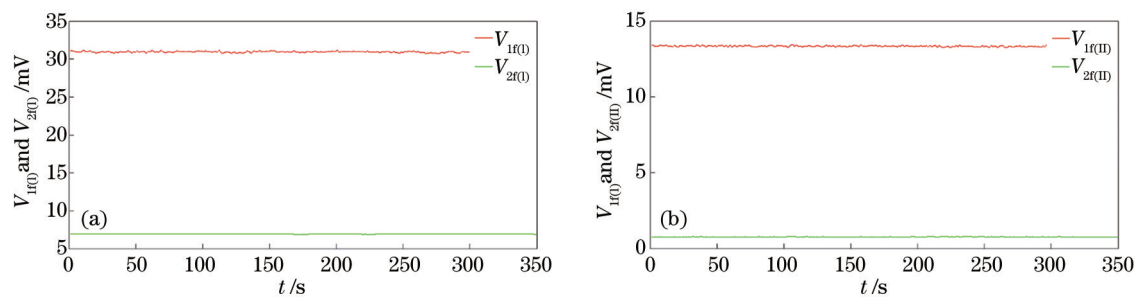


图 6 一倍频和二倍频锁相数据。 (a) $P_1 \sim 0$; (b) $P_2 \sim 0$

Fig.6 First and second harmonic terms. (a) $P_1 \sim 0$; (b) $P_2 \sim 0$

NI 采集卡的采率设置为 1Hz。由图 6 锁相输出数据可以看出实验系统工作稳定。将图 6 的数据整理, 并连同平衡光电探测器输出的直流项电压记录到表 1 中。

表 1 倍频项和直流项数据

Table 1 Harmonic terms and DC term

		Mean value /mV	Standard deviation σ /mV	DC term V_{DC} /mV
$P_1 \sim 0$ (condition I)	$V_{1(t)}$	30.926	0.093	1010
	$V_{2(t)}$	6.892	0.012	
$P_2 \sim 0$ (condition II)	$V_{1(t)}$	13.331	0.040	560
	$V_{2(t)}$	0.756	0.005	

由(13)式, 求解得到 $S_{CD} = 2.755 \times 10^{-2}$, 其标准偏差为 $\sigma_{CD} = 8 \times 10^{-5}$ 。由(14)~(16)式, 求解得到静态双折射的相位延迟值 $b = 5.73 \times 10^{-2} \text{ rad}$, 其标准偏差为 $\sigma_b = 4 \times 10^{-4} \text{ rad}$, 并求解得到方向角为 $\alpha = 3.96^\circ$, 其标准偏差为 $\sigma_\alpha = 0.98^\circ$ 。

实际上, 对于 PEM 在加工设计, 还可以通过研磨和抛光过程使通光晶体受力尽量均匀, 调节 PEM 的固定支撑将 PEM 的静态双折射和圆二色性降低; 当 PEM 用于测量旋光, 线性双折射和圆二色性等参量, 当待测参量值远大于 PEM 自身的静态双折射和圆二色性值时, PEM 的偏振特性可以退化为(1)式的标准型来描述; 此外, 对于高精度和高灵敏的测量需求, 根据上文的分析, 可以设计合适的光学元件偏振轴, 使待测参量尽量出现在 PEM 调制的偶数倍频项中来减小或消除 PEM 自身静态双折射和圆二色性造成的测量误差。

5 结 论

研究了考虑圆二色性和静态双折射的 PEM 偏振特性。通过仿真分析与实验结合, 证明理论模型合理, PEM 的偏振调制可以视为微小静态双折射, 弹光调制和微弱圆二色性效应的组合, 其一般 Muller 矩阵 M 可

以描述为 $M = M_{CD} M_{PEM} M_b$ 。精细测量得到其中一个 PEM 样品的圆二色性值 $S_{CD} = 2.755 \times 10^{-2}$, 其标准偏差为 $\sigma_{CD} = 8 \times 10^{-5}$, 静态双折射的相位延迟值 $b = 5.73 \times 10^{-2}$ rad, 其标准偏差为 $\sigma_b = 4 \times 10^{-4}$ rad 和方向角为 $\alpha = 3.96^\circ$, 其标准偏差为 $\sigma_\alpha = 0.98^\circ$ 。研究较为全面地给出了 PEM 偏振特性的表述形式, 扩充了 PEM 偏振调制方面的知识。下一步工作主要是研究 PEM 圆二色性和静态双折射两种效应对线性双折射, 光学旋光和 Muller 矩阵分析等系统可能造成的影响。

参 考 文 献

- 1 J C Kemp. Piezo-optical birefringence modulators: new use for a long-known effect[J]. J Opt Soc Am, 1969, 59(8): 950-954.
- 2 Aijun Zeng, Fanyue Li, Linglin Zhu, *et al.*. Simultaneous measurement of retardance and fast axis angle of a quarter-wave plate using one photoelastic modulator[J]. Appl Opt, 2011, 50(22): 4347-4352.
- 3 Oriol Arteaga, John Freudental, Bart Kahr, *et al.*. Mueller matrix polarimetry with four photoelastic modulators: theory and calibration[J]. Appl Opt, 2012, 51(28): 6805-6816.
- 4 Li Kewu, Wang Zhibin, Chen Youhua, *et al.*. High sensitive measurement of optical rotation based on photo-elastic modulation[J]. Acta Physica Sinica, 2015, 64(18): 0184206.
李克武, 王志斌, 陈友华, 等. 基于弹光调制的高灵敏旋光测量[J]. 物理学报, 2015, 64(18): 0184206.
- 5 Yanwei Liu, Grenville A Jones, Yong Peng, *et al.*. Generalized theory and application of Stokes parameter measurements made with a single photoelastic modulator[J]. J Appl Phys, 2006, 100(6): 063537.
- 6 Wang Zhibin, Li Kewu, Zhang Rui, *et al.*. Fabrication of piezoelectric actuator for photo-elastic modulator based on lithium niobate[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(1): 63-69.
王志斌, 李克武, 张 瑞, 等. 基于铌酸锂制作弹光调制器用压电驱动器[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(1): 63-69.
- 7 Baoliang Wang. Measurement of circular and linear birefringence using the photoelastic modulator[C]. SPIE, 1999, 3535, 294-312.
- 8 Baoliang Wang, Emily Hinds, Erica Krivoy. Basic optical properties of the photoelastic modulator part II: residual birefringence in the optical element[C]. SPIE, 2009, 7461(6): 746110.
- 9 J Badoz, M P Silverman, J C Canit. Wave propagation through a medium with static and dynamic birefringence: theory of the photoelastic modulator[J]. J Opt Soc Am. A, 1990, 7(4): 672-682.
- 10 Y F Chao, P L Lin. Artifactual circular dichroism effect in a photoelastic modulator[J]. Opt Comm, 2010, 283(23): 4582-4585.
- 11 John Schellman, Hans Peter Jensen. Optical spectroscopy of oriented molecules[J]. Chem Rev, 1987, 87(6): 1359-1399.
- 12 Lu Yaxiong. Matris Optics[M]. Dalian: Dalian University of Technology Press, 1989: 356-357.
卢亚雄. 矩阵光学[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 1989: 356-357.
- 13 Liao Yanbiao. Polarization Optics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 52.
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 52.

栏目编辑: 史 敏