

基于相位调制和样品摆动的1/4波片 相位延迟量测量方法

李凡月^{1,2} 韩 杰^{1,2} 曾爱军^{1,2} 黄惠杰¹

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800)

² 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 提出一种基于相位调制和样品摆动的1/4波片相位延迟量测量方法。准直激光束依次通过起偏器、相位调制器、待测1/4波片和检偏器由光电探测器所接收,光信号被转换成电信号后经过放大、滤波以进行数据处理。利用待测1/4波片的摆动可以计算得到与快轴方位角无关的归一化二次谐波分量,在无需知道1/4波片快轴方位角的情况下得到其相位延迟量。实验中对一块石英1/4波片进行了测量,实验结果与现有快轴方向确定条件下的光弹调制测量方法的测量结果一致,某一快轴方位角上多次测量的重复性为 0.13° ,不同快轴方位角上多次测量的再现性为 0.17° 。

关键词 测量;偏振;1/4波片;相位延迟量;相位调制器

中图分类号 O436.3;TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.0208003

Method for Measuring Retardation by Swinging Quarter-Wave Plate with Phase Modulator

Li Fanyue^{1,2} Han Jie^{1,2} Zeng Aijun^{1,2} Huang Huijie¹

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

² Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

Abstract A method based on phase modulator is presented to measure retardation of the quarter-wave plate by swinging it without the information of its fast axis direction. In this method, collimated laser beam goes through a polarizer, a phase modulator, the quarter-wave plate to be measured, and an analyzer, and finally incident upon the detector. Its electric signal is amplified and filtered for data processing. The retardation can be attained by swinging the quarter-wave plate, without the precondition of the knowledge of fast axis direction. In experiments, a quartz quarter-wave plate is measured, and its repetitiveness is 0.13° and the reproducibility is 0.17° . Our result is consistent with the one got by the method on the photoelastic modulator when the azimuth of the fast axis is 0° .

Key words measurement; polarization; quarter-wave plate; retardation; phase modulation

OCIS codes 120.5050; 310.5448; 120.5060

1 引 言

1/4波片是一种常见的偏振器件,广泛地应用于干涉测量、激光技术、生物光学等领域^[1~6]。能否准确确定1/4波片相位延迟量将会严重影响光学系统性能的好坏。理想的1/4波片在使用时对透过它的正交偏振分量产生 $\pi/2$ 的相位延迟量,然而由于所

用材料、工艺过程或使用环境的影响,使得它实际产生的相位延迟量偏离其理论值,故在使用前都要求精确测量其相位延迟量。

测量1/4波片相位延迟量的方法主要有补偿法^[7]、旋转偏振片法^[8]、外差干涉法^[9]、光弹调制法^[10,11]、机械-光学旋光法^[12]和相移法^[13]等,在这些

收稿日期:2010-07-15;收到修改稿日期:2010-09-20

基金项目:国家自然科学基金(60808018)资助课题。

作者简介:李凡月(1985—),男,硕士研究生,主要从事光电检测技术等方面的研究。E-mail: lifanyue@siom.ac.cn

导师简介:曾爱军(1975—),男,副研究员,主要从事精密光电检测技术与偏振光应用技术等方面的研究。

E-mail: aijunzeng@siom.ac.cn

测量方法中光弹调制法具有高的测量精度。对于光弹调制法而言,需要确定1/4波片的快轴方位角,测量过程中调整1/4波片使其快轴方向与光弹调制器的调制轴平行,利用光弹调制器对相位延迟量进行调制,使得测量光束的光强随时间变化,其各次谐波分量仅仅是待测1/4波片相位延迟量的函数,即可以精确测得1/4波片的相位延迟量^[14]。但是确定待测波片的快轴方位角本身就是一项比较困难的任务,而且确定快轴方位角带来的误差必将会降低波片延迟量测量的准确性。本文基于光弹调制法,提出将1/4波片在任意方位角绕测量点摆动45°,分别测得摆动前后二次谐波分量的振幅,利用这两次探测的结果可以在不确定1/4波片快轴方位角的情况下得到其相位延迟量。

2 测量原理

基于相位调制和样品摆动的1/4波片相位延迟量测量光路如图1所示,依次包括激光器(L)、起偏器(P)、相位调制器(PM)、待测1/4波片(QWP)、检偏器(A)和光电探测器(PD)。起偏器和检偏器的

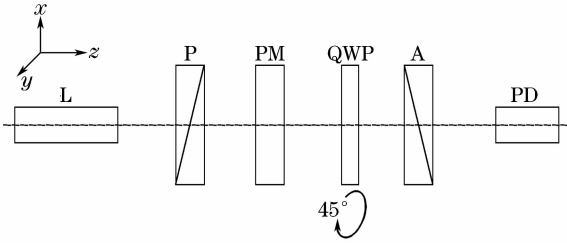


图1 1/4波片的相位延迟量测量光路

Fig. 1 Optical system for measuring retardation of a quarter-wave plate

透振方向相互垂直。相位调制器的振动轴方向与起偏器和检偏器的透振方向的夹角分别为 $\pm 45^\circ$ 。从激光器出射的准直激光束通过起偏器后形成线偏振光,该光束由相位调制器进行相位调制,调制光束经过待测1/4波片和检偏器后由光电探测器接收并转换成电信号。由于相位调制器对测量光束的偏振态进行调制,其测量光强的各次谐波分量的幅值是待测1/4波片的相位延迟量和快轴方位角的函数。将待测1/4波片摆动 45° 后获得另一个测量光强,利用这两个测量光强进行处理可以得到与快轴方位角无关的归一化二次谐波分量,在无需知道1/4波片快轴的情况下得到其相位延迟量。

从激光器出射的激光经过起偏器后形成的线偏振光用 Stokes 矢量表示为^[14]

$$\mathbf{S}_P = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中 I_0 为线偏振光的光强。

相位调制器可以看成相位延迟量变化的波片,其相位延迟量按正弦规律变化,可以表示为

$$\delta_{PM} = a_0 \sin(\omega t), \quad (2)$$

式中 a_0 为峰值相位延迟量, ω 为调制频率, t 为时间。相位调制器用 Mueller 矩阵表示为^[15]

$$\mathbf{M}_{PM} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \delta_{PM} & -\sin \delta_{PM} \\ 0 & 0 & \sin \delta_{PM} & \cos \delta_{PM} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

令待测1/4波片相位延迟量为 δ ,其 Mueller 矩阵表示为

$$\mathbf{M}_{QWP} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2(2\theta) + \cos \delta \sin^2(2\theta) & (1 - \cos \delta) \cos(2\theta) \sin(2\theta) & \sin \delta \sin(2\theta) \\ 0 & (1 - \cos \delta) \cos(2\theta) \sin(2\theta) & \sin^2(2\theta) + \cos \delta \cos^2(2\theta) & -\sin \delta \cos(2\theta) \\ 0 & -\sin \delta \sin(2\theta) & \sin \delta \cos(2\theta) & \cos \delta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

式中 θ 为待测1/4波片的方位角。

检偏器的透振方向与起偏器的透振方向相互垂直,其 Mueller 矩阵可以表示为

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

从检偏器出射的偏振光的 Stokes 矢量可以表示为

$$\mathbf{S}_A = \mathbf{M}_A \mathbf{M}_{QWP} \mathbf{M}_{PM} \mathbf{S}_P = \frac{g I_0}{2} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

式中 g 为光路中光强损失系数,

$$S_0 = 1 - \cos \delta_{\text{PM}} \cdot [\sin^2(2\theta) + \cos \delta \cos^2(2\theta)] + \sin \delta_{\text{PM}} \sin \delta \cos(2\theta). \quad (7)$$

由于光电探测器只接收 Stokes 矢量中的第一项,即光电探测器上探测到的光强为

$$I = \frac{gI_0}{2} \{1 - \cos \delta_{\text{PM}} \cdot [\sin^2(2\theta) + \cos \delta \cos^2(2\theta)] + \sin \delta_{\text{PM}} \sin \delta \cos(2\theta)\}, \quad (8)$$

将(2)式代入(8)式并展开可以得到^[10]

$$I = \frac{gI_0}{2} \{1 - J_0(a_0) [\sin^2(2\theta) + \cos \delta \cos^2(2\theta)] + 2J_1(a_0) \cos(\omega t) \sin \delta \cos(2\theta) - 2J_2(a_0) \cos(2\omega t) \cdot [\sin^2(2\theta) + \cos \delta \cos^2(2\theta)] + \dots\}, \quad (9)$$

式中 $J_0(a_0)$, $J_1(a_0)$ 和 $J_2(a_0)$ 分别为零阶、一阶、二阶贝塞尔函数。可见光电探测器探测到的光强包含直流分量、基频分量、二次谐波分量及其他高次谐波分量。

光电探测器输出的电信号经过放大和滤波后输出直流分量与交流分量,利用锁相放大电路可以从交流分量中分离出二次谐波分量。直流分量 V_{DC} 和二次谐波分量 V_{2f} 可以表示为

$$V_{\text{DC}}(\delta | \theta) = \rho k_{\text{DC}} \frac{gI_0}{2} \{1 - J_0(a_0) [\sin^2(2\theta) + \cos \delta \cos^2(2\theta)]\}, \quad (10)$$

$$V_{2f}(\delta | \theta) = \rho k_{\text{AC}} gI_0 J_2(a_0) [\sin^2(2\theta) + \cos \delta \cos^2(2\theta)], \quad (11)$$

式中 ρ 为光电转换系数, k_{DC} 和 k_{AC} 分别为直流分量、二次谐波分量的电路增益。

通常情况下将相位调制器的峰值延迟量设置为 2.405, 即 $J_0(a_0) = 0$, 可以使得直流分量与待测 1/4 波片无关, 它表示为

$$V_{\text{DC}}(\delta | \theta) = \rho k_{\text{DC}} \frac{gI_0}{2}, \quad (12)$$

用(12)式对二次谐波分量(11)式进行归一化可以得到

$$\frac{V_{2f}(\delta | \theta)}{V_{\text{DC}}(\delta | \theta)} = 2 \frac{k_{\text{AC}}}{k_{\text{DC}}} J_2(2.405) [\sin^2(2\theta) + \cos \delta \cos^2(2\theta)], \quad (13)$$

(13) 式中 k_{AC} 和 k_{DC} 是与电路有关的系数, $J_2(2.405)$ 为定值, 若利用(13)式来计算待测 1/4 波片的相位延迟量, 则需要确定其快轴方位角。若在确定待测 1/4 波片的快轴方位角后利用(13)式来计算相位延迟量, 即为现有光弹调制法等技术采用测量原理, 通常情况下使调整待测 1/4 波片的快轴方位角为零^[11]。

为了在不知道待测 1/4 波片快轴方位角情况下得到其相位延迟量, 利用待测 1/4 波片的摆动可以计算得到与快轴方位角无关的归一化二次谐波分量。将待测 1/4 波片从当前位置绕光轴摆动 45° , 则(13)式变为

$$\frac{V_{2f}(\delta | \theta + 45^\circ)}{V_{\text{DC}}(\delta | \theta + 45^\circ)} = 2 \frac{k_{\text{AC}}}{k_{\text{DC}}} J_2(2.405) [\cos^2(2\theta) + \cos \delta \sin^2(2\theta)], \quad (14)$$

将(13), (14)式相加可得

$$\frac{V_{2f}(\delta)}{V_{\text{DC}}(\delta)} = \frac{V_{2f}(\delta | \theta)}{V_{\text{DC}}(\delta | \theta)} + \frac{V_{2f}(\delta | \theta + 45^\circ)}{V_{\text{DC}}(\delta | \theta + 45^\circ)} = 2 \frac{k_{\text{AC}}}{k_{\text{DC}}} J_2(2.405) (1 + \cos \delta), \quad (15)$$

(15) 式中的归一化二次谐波分量与待测 1/4 波片的快轴方位角无关, 仅仅是其相位延迟量的余弦函数。因此在不确定待测 1/4 波片快轴方位角的情况下只需要获得待测 1/4 波片摆动 45° 前后的两次测量光强, 即可利用(15)式计算出待测 1/4 波片的相位延迟量。

在利用(15)式求解相位延迟量 δ 时, 还需要确定 k_{AC} , k_{DC} 两个系数, 它们的测量误差显然会影响测量结果。为了消除 k_{AC} , k_{DC} 这两个系数的测量误差影响, 可以利用光路中无待测波片时的探测信号进行

计算得到, 即令 $\delta = 0$ 使(13)式变成

$$\frac{V_{2f}(0)}{V_{\text{DC}}(0)} = 2 \frac{k_{\text{AC}}}{k_{\text{DC}}} J_2(2.405), \quad (16)$$

用(15), (16)式相除可以得到

$$\frac{\frac{V_{2f}(\delta | \theta)}{V_{\text{DC}}(\delta | \theta)} + \frac{V_{2f}(\delta | \theta + 45^\circ)}{V_{\text{DC}}(\delta | \theta + 45^\circ)}}{\frac{V_{2f}(0)}{V_{\text{DC}}(0)}} = 1 + \cos \delta, \quad (17)$$

(17) 式仅仅是待测 1/4 波片的相位延迟量的函数, 故利用(17)式可以得到待测 1/4 波片的相位延迟量为

$$\delta = \arccos \left[\frac{\frac{V_{2f}(\delta | \theta)}{V_{DC}(\delta | \theta)} + \frac{V_{2f}(\delta | \theta + 45^\circ)}{V_{DC}(\delta | \theta + 45^\circ)}}{\frac{V_{2f}(0)}{V_{DC}(0)}} - 1 \right] \quad (18)$$

上述方法在待测1/4波片摆动 45°前后利用归一化二次谐波分量求解相位延迟量,其优点在于无需确定快轴方位角,且与信号处理电路系数无关。

3 实 验

基于相位调制和样品摆动的1/4波片相位延迟量测量实验装置如图 2 所示,主要包括激光器(L)、光衰减器(AT)、起偏器(P)、相位调制器(PM)、待测1/4波片(QWP)、检偏器(A)和光电探测器(PD)。激光器是带准直透镜的半导体激光器,波长为 634 nm,输出功率为 5 mW。光衰减器放在起偏器之前用来控制初始光强的 大小。起偏器为 格兰-泰勒棱镜,其消光比优于 10⁻⁵。相位调制器为基于透明光学材料光弹效应的光弹调制器,它具有调制精度高、无机械振动、入射角孔径大、调制频率稳定、驱动电压低、功率消耗小、适用波段宽等一系列优点^[9]。实验中的光弹调制器为 Hinds 公司 PEM-90 系列的 I/FS50 型,调制频率为 50 kHz,光谱使用范围为 170~2600 nm,峰值延迟量可由其配套的控制 器(C)进行调整。光弹调制器的峰值延迟量的标定精 确^[16~18]可以达到 0.001 rad,故光弹调制器的相位 调制误差对1/4波片的相位延迟量测量结果的影响 可以忽略。待测1/4波片为石英材料的1/4波片,其 相位延迟量标称偏差为 λ/100(λ = 632.8 nm),其快 轴方向由生产厂家在外壳边缘做出了标记,待测1/4 波片置于步进角度为 1"的电动旋转台上,其转过

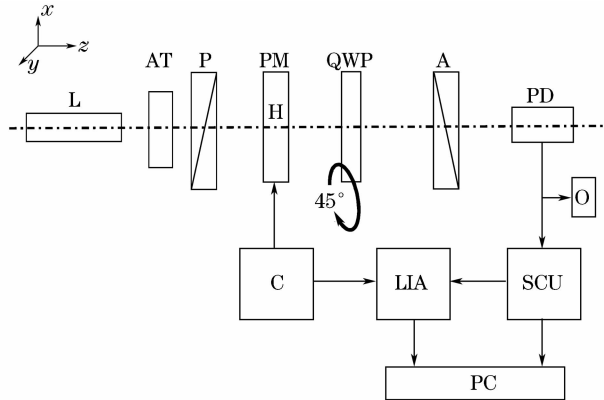


图 2 1/4波片相位延迟量测量实验装置

Fig. 2 Experimental layout for measuring retardation of a quarter-wave plate

45°的定位误差小于 10",所以波片转动 45°的定位误差对测量结果的影响可以忽略不计。检偏器为消光比为 10⁻²的偏振片,检偏器和起偏器置于最小读数为 0.05°的旋转台上。光电探测器为光电二极管。

激光器出射的光束依次经过光衰减器、起偏器、光弹调制器、待测1/4波片、检偏器后被光电探测器接收,光电探测器输出的电信号由信号调理器(SCU,Hinds 公司产品,型号为 SCU-90)进行前置放大、滤波和主放大后,分离出直流分量和交流分量。直流分量直接由多通道数据采集卡输入计算机(PC)。交流分量经锁相放大器(LIA)后得到二次谐波分量(100 kHz的参考信号由光弹调制器的控制器提供),该二次谐波分量由数据采集卡输入计算机。同时光电探测器输出的电信号用示波器(O)进行监视。

启动激光器、光弹调制器控制器、信号调理器和锁相放大器等实验器件与设备。光弹调制器的峰值延迟量设为 2.405。

调整检偏器的透振方向与光弹调制器的振动方向成 45°夹角:在光路中无待测1/4波片时,旋转检偏器使在示波器上显示的信号只有直流分量,再将检偏器旋转 45°。调制起偏器的透振方向与检偏器的透振方向垂直:关闭光弹调制器,旋转起偏器使在示波器上显示的信号为零。无待测1/4波片时获取光路中的探测信号:开启光弹调制器,采集直流分量和二次谐波分量。

采用快轴确定条件下的光弹调制方法^[12]测量待测1/4波片的相位延迟量:将待测1/4波片放入测量光路中,利用波片外壳边缘上的快轴标记使其与光弹调制器的振动轴方向平行,利用文献^[12]的方法测量出相位延迟量为 91.32°,该结果可以作为待测1/4波片相位延迟量的真值。

在某一快轴方向上利用该方法测量待测1/4波片的相位延迟量:以任意角度转动待测1/4波片,在某一快轴方向上采集直流和二次谐波分量;紧接着将待测1/4波片顺时针摆动 45°,再采集直流和二次谐波分量;结合无待测1/4波片时采集的直流分量和二次谐波分量,利用(18)式计算出待测1/4波片的相位延迟量。将待测1/4波片逆时针摆动 45°,重复上述测量过程得到多组测量结果如表 1 所示,利用表 1 的数据可以计算出相位延迟量的平均值为 91.40°,重复性为 0.13°。可见该方法的测量结果与文献^[9]所述方法的测量结果之间的差异为 0.08°,且具有高的重复测量精度。

表1 相位延迟量的重复性测量结果

Table 1 Experimental results for the same fast axis direction

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Phase delay / (°)	91.38	91.30	91.22	91.29	91.53	91.58	91.44	91.25	91.56	91.49

表2 相位延迟量的再现性测量结果

Table 2 Experimental results for different fast axis directions

Number	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Phase delay / (°)	91.13	91.38	91.28	91.64	91.56	91.22	91.49	91.15	91.57	91.30

在不同快轴方向上利用该方法测量待测1/4波片的相位延迟量:从某一快轴方向开始,依次将待测1/4波片转动 36° ,在10个不同快轴方向上测量相位延迟量的结果如表2所示。利用表2的数据可以计算出相位延迟量的平均值为 91.37° ,改变快轴方位角参数下的再现性为 0.17° 。可见不同快轴方向上的测量结果与文献[12]所述方法的测量结果一致而具有高的再现性。

4 结 论

提出了一种基于相位调制和样品摆动的1/4波片相位延迟量测量方法。该方法利用待测1/4波片摆动 45° 前后的探测信号计算其相位延迟量,实现了1/4波片快轴方位角不确定的情况下测量出相位延迟量。同时,光弹调制器进行高频相位调制,有效地抑制了光电探测器的频率噪声。利用直流分量对二次谐波分量进行归一化,消除了光源光强波动的影响。引入了无待测波片时的探测信号,消除了电路系数测量误差的影响。所述方法的测量结果与目前高精度光弹调制法的测量结果一致,重复性为 0.13° ,再现性为 0.17° 。

参 考 文 献

- 1 H. Kim, Y. H. Lee. Unique measurement of the parameters of a twisted-nematic liquid-crystal display [J]. *Appl. Opt.*, 2005, **44**(9):1642~1649
- 2 T. Okoshi. Polarization-state control schemes for heterodyne or homodyne optical fiber communications [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1985, **3**(6):1232~1237
- 3 F. Geiger, R. Stolle, G. Marowsky *et al.*. Single-valued determination of second-order nonlinear susceptibilities by quarter-wave-plate rotation [J]. *Appl. Phys. B: Laser and Optics*, 1995, **61**(2):135~141
- 4 Kong Meimei, Gao Zhishan, Chen Lei *et al.*. Cyclic radial shearing interferometry based on polarization phase-shifting technique [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1):127~131
孔梅梅,高志山,陈磊等.基于偏振移相的环路径向剪切干涉[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1):127~131
- 5 Wang Lijuan, Liu Liren, Luan Zhu *et al.*. Phase shifting Jamin lateral shearing interferometer [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5):1156~1159
王利娟,刘立人,栾竹等.相移雅满横向剪切干涉仪[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5):1156~1159

- 6 Tang Yi, Kang Zhihui, Jiang Liyun *et al.*. Tunable Yb³⁺ doped fiber ring laser based on the principle of polarization filter [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(4):934~938
唐毅,康智慧,姜立运等.基于偏振滤波原理的宽可调谐掺环Yb³⁺光纤激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(4):934~938
- 7 H. G. Jerrard. Optical compensators for measurement of elliptical polarization [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1948, **38**(1):35~59
- 8 D. H. Goldstein. Mueller matrix dual-rotating retarder polarimeter [J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(31):6676~6683
- 9 Ming-Horong Chiu, Cheng-Der Chen, Der-Chin Su. Method for determining the fast axis and phase retardance of a wave plate [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1996, **13**(9):1924~1929
- 10 Hu Jianming, Zeng Aijun, Wang Xiangzhao. New method for measuring retardation of quarter-wave plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(5):659~662
胡建明,曾爱军,王向朝.精确测量1/4波片相位延迟量的新方法[J]. *中国激光*, 2006, **33**(5):659~662
- 11 Hu Jianming, Zeng Aijun, Wang Xiangzhao. Method to measure phase retardation of wave plate based on photoelastic modulation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(11):1681~1686
胡建明,曾爱军,王向朝.基于光弹调制技术的波片相位延迟量测量方法[J]. *光学学报*, 2006, **26**(11):1681~1686
- 12 Xu Wendong, Li Xishan. A new method for measuring phase delay of wave plate [J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(10):1096~1101
徐文东,李锡善.波片相位延迟量精密测量新方法[J]. *光学学报*, 1994, **14**(10):1096~1101
- 13 Yan Ming, Gao Zhishan. Phase shifting method for measuring the phase retardation of wave plates [J]. *J. Photoelectronics & Laser*, 2005, **16**(2):183~187
严明,高志山.相移法测量波片的相位延迟量[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(2):183~187
- 14 H. C. van de Hulst. Light Scattering by Small Particles [M]. New York: Dover Publications, Inc., 1981. 42
- 15 E. Collett. The Mueller Matrix for Rotated Polarizing Components, in *Polarized Light: Fundamentals and Applications* [M]. New York: Marcel Dekker, 2003. 79~86
- 16 Song Song, Wang Xiangzhao, Wang Xuefeng *et al.*. A laser diode interferometer with a feedback control system for real-time micro-vibration measurements [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(5):402~406
宋松,王向朝,王学峰等.半导体激光微小振动实时反馈式干涉测量仪[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5):402~406
- 17 Zeng Aijun, Wang Xiangzhao, Li Dailin *et al.*. A new method to calibrate accurately a photoelastic modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(6):799~802
曾爱军,王向朝,李代林等.精确标定光弹调制器的新方法[J]. *光学学报*, 2005, **25**(6):799~802
- 18 R. A. Cline, W. B. Westerveld, J. S. Risley. A new method for measuring the retardation of a photoelastic modulator using single photon counting techniques [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1993, **64**(5):1169~1174