

一种快速同时测量波片相位延迟量和快轴方位角的方法

袁凯华, 邓剑勋, 刘超, 黄佐华

华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510006

摘要 基于 Mueller 矩阵和斯托克斯矢量的测量原理及方法, 实现了对波片相位延迟量和快轴方位角的快速同时测量。激光通过偏振片和标准 1/4 波片后产生标准的右旋圆偏振光入射待测波片, 用斯托克斯测量仪记录通过样品后激光的斯托克斯矢量, 同时得到待测波片的相位延迟量和快轴方位角; 分析了标准 1/4 波片的参数误差及系统稳定性对测量结果的影响。利用该实验系统测量得到的波片相位延迟量和快轴方位角的平均标准差分别为 $\pm 0.05^\circ$ 和 $\pm 0.03^\circ$, 同时, 得到了云母波片及石英波片的参数与温度的实验关系。所提方法具有测量过程简单、精确度高及可以对未知各向异性材料相位延迟量及其等效快轴方位角进行实时测量等特点。

关键词 测量; 相位延迟量; 快轴方位角; 波片; 斯托克斯矢量

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.021202

A Fast and Simultaneous Method for Measuring Wave Plate Phase Retardation and Fast Axis Azimuth

Yuan Kaihua, Deng Jianxun, Liu Chao, Huang Zuohua

*School of Physics and Telecommunication Engineering, South China Normal University,
Guangzhou, Guangdong 510006, China*

Abstract Based on the measurement principle and the method of Mueller matrix and Stokes vector, the phase retardation and fast axis azimuth of wave plate are measured rapidly and simultaneously. After the laser passing through the polarizer and the standard 1/4 wave plate, the standard right rotation circular polarized light is produced and then passes through the wave plate sample. The Stokes vector of the laser after passing through the sample is recorded by the Stokes polarimeter, and the phase retardation and fast axis azimuth are obtained simultaneously. The influences of standard 1/4 wave plate parameter error and system stability on measurement results are analyzed. By using this experimental system, the average standard deviations of the phase retardation and fast axis azimuth of wave plate are $\pm 0.05^\circ$ and $\pm 0.03^\circ$, respectively. The experimental relationship between the parameters of mica wave plate and quartz wave plate and temperature is also obtained. The proposed method has the characteristics of simple measurement process, high precision and real-time measurement of phase retardation and equivalent fast axis azimuth of unknown anisotropic material.

Key words measurement; phase retardation; fast axis azimuth; wave plate; Stokes vector

OCIS codes 120.5050; 120.2130; 310.5448

1 引言

由于波片、液晶和电光晶体等各向异性器件及

材料可以改变入射光的偏振状态, 因此被广泛地应用于光学精密仪器测量、生物光学及光通信等领域。相位延迟量和快轴方位角是波片的两个重要参数,

收稿日期: 2017-09-04; 收到修改稿日期: 2017-09-14

基金项目: 广州市科学研究专项资助项目(2014J4100130)

作者简介: 袁凯华(1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事光电技术与系统等方面的研究。E-mail: 809014372@qq.com

导师简介: 黄佐华(1961—), 男, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电技术与系统和光信息处理等方面的研究。

E-mail: zuohuah@sncu.edu.cn(通信联系人)

快速同时测量波片的相位延迟量和快轴方位角具有实际应用的意义。

目前,测量波片相位延迟量的方法主要有:旋光调制法^[1]、半阴法^[2]、迈克耳孙干涉法^[3-5]、消光法^[6]、机械旋转调制法^[7-8]及光弹调制法^[9-11]等。但是这些方法中大部分都只能测量波片的相位延迟量,而不能同时测量波片的快轴方位角^[12-13];有些方法只能测量 1/4 波片和 1/2 波片的快轴方位角^[14-16];有些方法虽然可以同时测量波片的相位延迟量和快轴方位角^[4,17-18],但是需要转动样品,而不能对波片的相位延迟量和快轴方位角进行实时测量。

Mueller 矩阵和斯托克斯矢量在光电检测技术领域有很多应用^[19-21]。本文基于 Mueller 矩阵和斯托克斯矢量的测量原理及方法,实现了对波片的相位延迟量及其快轴方位角的同时快速测量。该测量系统具有容易搭建、操作简单和精确度高等优点,同时可以实现对未知各向异性材料相位延迟量及其等效快轴方位角的实时测量。

2 测量原理

斯托克斯矢量 $\mathbf{S} = [S_0, S_1, S_2, S_3]^T$ 可以用来描述部分偏振光 and 全偏振光,而且任何光学元件都可以由 Mueller 矩阵来表示。当已知斯托克斯矢量的偏振光透过样品后,得到一个包含样品特性信息的新斯托克斯矢量:

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} S'_0 \\ S'_1 \\ S'_2 \\ S'_3 \end{bmatrix}_{\text{out}} = \mathbf{M}_{\text{sample}} \mathbf{S}_{\text{in}} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} & m_{13} & m_{14} \\ m_{21} & m_{22} & m_{23} & m_{24} \\ m_{31} & m_{32} & m_{33} & m_{34} \\ m_{41} & m_{42} & m_{43} & m_{44} \end{bmatrix}_{\text{sample}} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}_{\text{in}}, \quad (1)$$

式中 $\mathbf{M}_{\text{sample}}$ 为样品的 Mueller 矩阵, \mathbf{S}_{in} 为已知的斯托克斯矢量。

波片的 Mueller 矩阵可表示为

$$\mathbf{M}(\theta_s, \eta_s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta_s + \sin^2 2\theta_s \cos \eta_s & \sin 2\theta_s \cos 2\theta_s (1 - \cos \eta_s) & -\sin 2\theta_s \sin \eta_s \\ 0 & \sin 2\theta_s \cos 2\theta_s (1 - \cos \eta_s) & \sin^2 2\theta_s + \cos^2 2\theta_s \cos \eta_s & \cos 2\theta_s \sin \eta_s \\ 0 & \sin 2\theta_s \sin \eta_s & -\cos 2\theta_s \sin \eta_s & \cos \eta_s \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中 θ_s 为波片的快轴方位角, η_s 为波片的相位延迟量。

为了实现对波片的相位延迟量及其快轴方位角的同时测量,用右旋圆偏振光入射样品,其斯托克斯矢量可表示为

$$\mathbf{S}_{\text{RHC}} = [1, 0, 0, 1]^T, \quad (3)$$

将(2)、(3)式代入(1)式可得到:

$$\mathbf{S}_{\text{RHCout}} = \begin{bmatrix} 1 \\ -\sin 2\theta_s \sin \eta_s \\ \cos 2\theta_s \sin \eta_s \\ \cos \eta_s \end{bmatrix}, \quad (4)$$

由(4)式可以很容易得到波片的 η_s 和 θ'_s 分别为

$$\eta_s = \arccos [S_{\text{RHCout}}(S'_3)], \quad (5)$$

$$\theta'_s = \frac{1}{2} \arctan \left[-\frac{S_{\text{RHCout}}(S'_1)}{S_{\text{RHCout}}(S'_2)} \right], \quad (6)$$

式中 θ'_s 为代入 $S_{\text{RHCout}}(S'_1)$ 和 $S_{\text{RHCout}}(S'_2)$ 数值的计算值。将测量得到的 $S_{\text{RHCout}}(S'_3)$ 代入(5)式可得到波片的 η_s ; 将测量得到的 $S_{\text{RHCout}}(S'_1)$ 和 $S_{\text{RHCout}}(S'_2)$ 代入(6)式并通过如下 4 种判断可得到波片的实际

快轴方位角 θ_s : 1) $S_{\text{RHCout}}(S'_1) \leq 0, S_{\text{RHCout}}(S'_2) > 0, \theta_s = \theta'_s$; 2) $S_{\text{RHCout}}(S'_1) < 0, S_{\text{RHCout}}(S'_2) \leq 0, \theta_s = \theta'_s + 90^\circ$; 3) $S_{\text{RHCout}}(S'_1) \geq 0, S_{\text{RHCout}}(S'_2) < 0, \theta_s = \theta'_s + 90^\circ$; 4) $S_{\text{RHCout}}(S'_1) > 0, S_{\text{RHCout}}(S'_2) \geq 0, \theta_s = \theta'_s + 180^\circ$ 。可见,只要利用斯托克斯测量仪测量通过波片样品后的斯托克斯矢量,就可以快速计算得到波片的相位延迟量及其快轴方位角。同样,利用左旋偏振光入射时也可得到类似的结果。

3 实验及分析

3.1 实验光路

为了验证所提方法的正确性,搭建了如图 1 所示的实验测量光路系统。从 He-Ne 激光器发出 632.0 nm 的激光经偏振片 P 后变为方位角为 0° 的线偏振光,再经过方位角为 45° 的标准 1/4 波片 Q 后,得到右旋圆偏振光入射波片样品 C。带有样品信息的偏振光斯托克斯矢量由斯托克斯测量仪 (PMI-VIS 型,美国 Meadowlark Optics 公司) 进行检测。将斯托克斯测量仪测量的结果代入(5)、(6)式,

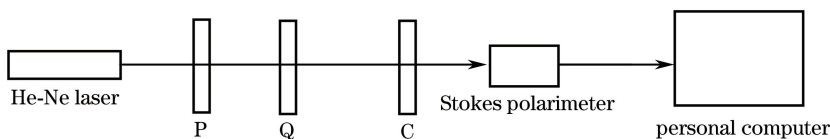


图1 实验光路原理图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental optical path

可同时得到待测波片的快轴方位角和相位延迟量。

3.2 测量稳定性和重复性验证

为了证明测量系统的稳定性和重复性,对同一块1/4石英波片进行多次测量。首先,对样品测量50 min,每5 min记录一次数据以验证系统的稳定性,测量结果如图2(a)所示。波片相位延迟量和快轴方位角的平均值分别为88.25°和

173.94°,其标准差分别为 $\pm 0.05^\circ$ 和 $\pm 0.03^\circ$,可见测量系统具有很好的稳定性。然后,重复放置并对同一样品测量10次以验证系统的重复性,测量结果如图2(b)所示。波片相位延迟量和快轴方位角的平均值分别为88.21°和173.78°,其标准差分别为 $\pm 0.07^\circ$ 和 $\pm 0.16^\circ$,可见该系统表现出良好的重复性。

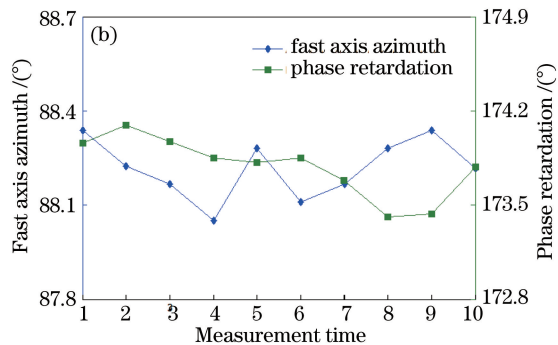
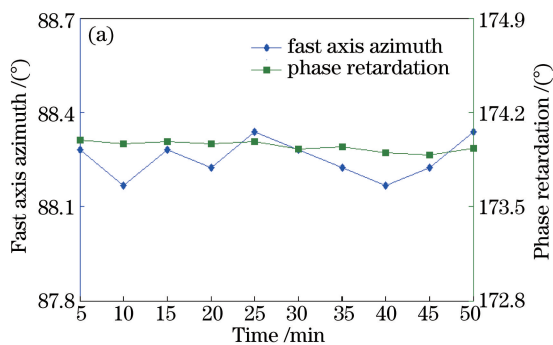


图2 测量结果。(a)波片稳定性;(b)波片重复性

Fig. 2 Measurement results. (a) Wave plate stability; (b) wave plate repeatability

3.3 测量准确性验证

为了证实该系统的准确性,以1/4石英波片为待测样品,其快轴方位角以 10° 为步进,从 0° 旋转到 180° ,实验结果如图3所示。可以发现用斯托克斯矢量原理测量相位延迟量的平均绝对误差为 $\pm 1.88^\circ$,快轴方位角的平均绝对误差为 $\pm 1.48^\circ$ 。

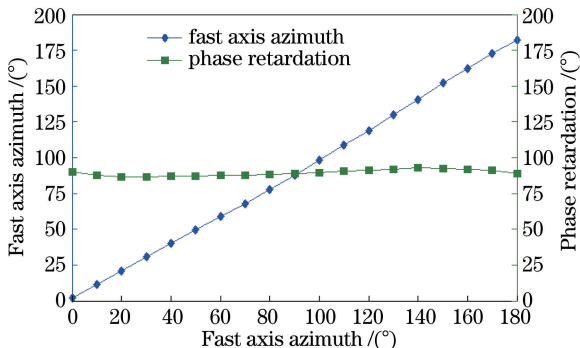


图3 1/4波片测量结果

Fig. 3 Measurement results of 1/4 wave plate

利用该系统对具有不同相位延迟量的云母波片进行测量,结果如表1所示,其中参考值为消光式椭圆仪^[6]测量得到的结果。可见测量值的平均绝对误

差为 $\pm 0.89^\circ$,误差主要是由于波片的不均匀及测量点不完全重合所致。

表1 对具有不同相位延迟量波片的测量结果
Table 1 Measurement results of wave plates with different phase retardations

Measured value / (°)	Reference value / (°)
64.76	65.80
88.56	88.81
107.27	106.27
114.83	113.47
141.44	140.60

上述实验表明基于斯托克斯矢量的测量方法同时测量波片的快轴方位角和相位延迟量是可行的。

3.4 波片相位延迟量和快轴方位角随温度的变化

波片受温度影响所产生的相位延迟量和快轴方位角的改变会对输出偏振光的状态造成重要影响。利用该系统可以对波片在不同温度下的相位延迟量和快轴方位角进行实时监测。用电吹风分别对1/4云母波片和1/4多级石英波片从 25°C 加热到 80°C ,其相位延迟量和快轴方位角随温度变化的实

验曲线如图4所示。由图4(a)可知,1/4云母波片的相位延迟量和快轴方位角随温度的升高呈下降趋势,相位延迟量的最大值为90.29°、最小值为87.42°,快轴方位角的最大值为74.57°、最小值为72.85°;由图4(b)可知,1/4多级石英波片的相位延迟量随温

度的升高呈下降趋势,相位延迟量的最大值为92.36°、最小值为69.18°,快轴方位角随温度的升高无明显变化趋势,其最大值为34.60°、最小值为29.47°。可知1/4多级石英波片的相位延迟量和快轴方位角更易受温度影响。

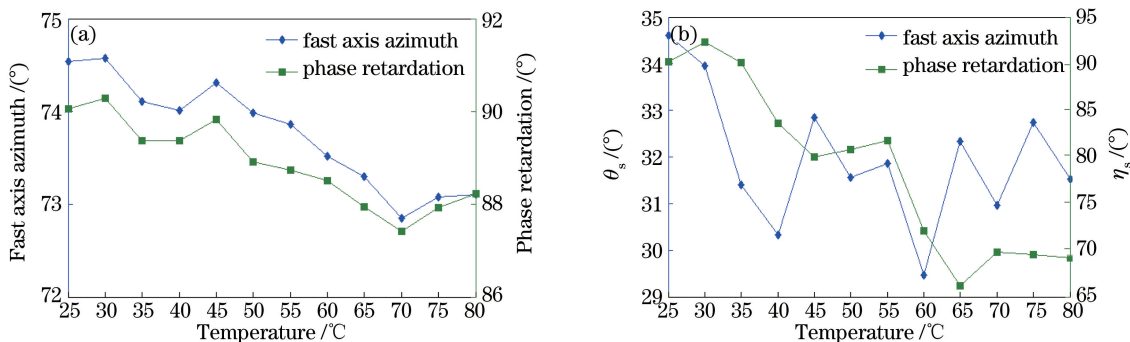


图4 波片相位延迟量和快轴方位角与温度的关系。(a) 1/4云母波片;(b) 1/4多级石英波片

Fig. 4 Relationship between the phase retardation, fast axis azimuth of the wave plate and temperature.

(a) 1/4 mica wave plate; (b) 1/4 multistage quartz wave plate

4 影响测量准确度及重复性误差的分析

由于波片加工的精度限制,标准1/4波片存在相位延迟量误差,实验中波片的放置位置也会导致快轴方位角的偏差。由理论分析可知,标准1/4波

片相位延迟量及其快轴方位角的偏差直接影响到标准右旋圆偏振光的输出,间接引起测量波片准确度的误差。设标准1/4波片的快轴方位角 θ 的偏差和相位延迟量 η 的偏差分别为 $\delta\theta$ 和 $\delta\eta$,则光透过标准1/4波片后的斯托克斯矢量可表示为

$$\mathbf{S} + \delta\mathbf{S} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2x + \sin^2 2x \cos y & \sin 2x \cos 2x (1 - \cos y) & -\sin 2x \sin y \\ 0 & \sin 2x \cos 2x (1 - \cos y) & \sin^2 2x + \cos^2 2x \cos y & \cos 2x \sin y \\ 0 & \sin 2x \sin y & -\cos 2x \sin y & \cos y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \cos^2 2x + \sin^2 2x \cos y \\ \sin 2x \cos 2x (1 - \cos y) \\ \sin 2x \sin y \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中 $x = \theta + \delta\theta$, $y = \eta + \delta\eta$,将(2)、(7)式代入(1)式得:

$$\mathbf{S}_{\text{out}} = \begin{bmatrix} 1 \\ AD + BE - \sin 2\theta_s \sin \eta_s F \\ BD + CE + \cos 2\theta_s \sin \eta_s F \\ \sin 2\theta_s \sin \eta_s D - \cos 2\theta_s \sin \eta_s E + \cos \eta_s F \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中 $A = \cos^2 2\theta_s + \sin^2 2\theta_s \cos \eta_s$, $B = \sin 2\theta_s \cos 2\theta_s (1 - \cos \eta_s)$, $C = \sin^2 2\theta_s + \cos^2 2\theta_s \cos \eta_s$, $D = \cos^2 2(\theta + \delta\theta) + \sin^2 2(\theta + \delta\theta) \cos(\eta + \delta\eta)$, $E = \sin 2(\theta + \delta\theta) \cos 2(\theta + \delta\theta) [1 - \cos(\eta + \delta\eta)]$, $F = \sin 2(\theta + \delta\theta) \sin(\eta + \delta\eta)$ 。

对比(4)~(6)式和(8)式可知,当标准1/4波片的快轴方位角及相位延迟量存在偏差时,会对待测波片的相位延迟量和快轴方位角的测量引入误差。

4.1 标准波片参数偏差对待测波片的相位延迟量测量的影响

用Matlab软件分析待测波片快轴方位角和相位延迟量的变化,标准1/4波片的参数偏差对待测波片测量结果的影响如图5所示。

图5(a)、(b)分别为标准1/4波片的快轴方位角为45°、相位延迟量偏差为 $\pm 1^\circ$ (偏离90°)及相位延迟量为90°、快轴方位角偏差为 $\pm 1^\circ$ (偏离45°)时引起的待测波片相位延迟量的绝对误差。由图5(a)可知当

待测波片的相位延迟量不变时,待测波片相位延迟量的绝对误差随着待测波片快轴方位角的增加在 $0^\circ \sim 90^\circ$ 范围内先增大后减小,在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 范围内也是先

增大后减小,并且在 $0^\circ, 90^\circ$ 和 180° 时绝对误差为 0° ,在 45° 和 135° 时绝对误差最大,为 $\pm 1^\circ$;当快轴方位角不变时,待测波片相位延迟量的绝对误差几乎不随待

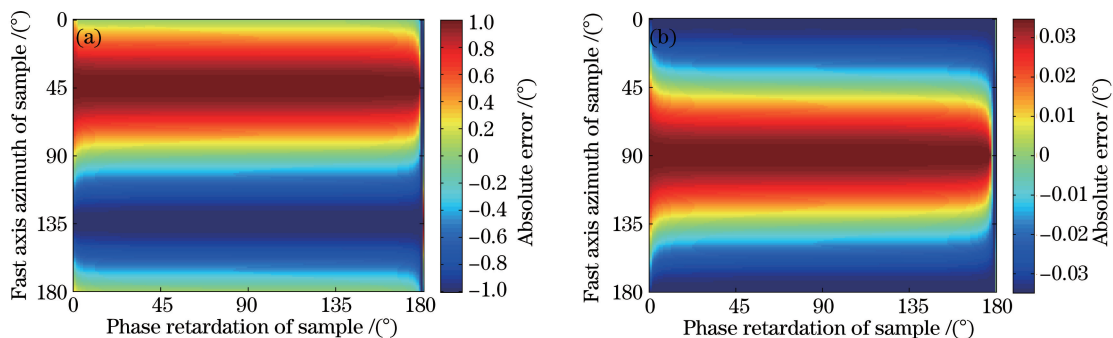


图5 标准1/4波片参数偏差引起的待测波片相位延迟量的绝对误差。(a) $\theta=45^\circ, \delta\eta=\pm 1^\circ$; (b) $\eta=90^\circ, \delta\theta=\pm 1^\circ$

Fig. 5 Absolute errors of phase retardation of wave plate sample caused by the parameter deviation of the standard 1/4 wave plate. (a) $\theta=45^\circ, \delta\eta=\pm 1^\circ$; (b) $\eta=90^\circ, \delta\theta=\pm 1^\circ$

测波片相位延迟的增加而改变。

由图5(b)可知标准1/4波片的快轴方位角的偏差对波片的相位延迟量的测量影响不大。

4.2 标准1/4波片参数偏差对待测波片快轴方位角测量的影响

图6(a)、(b)分别为标准1/4波片的快轴方位角为 45° 、相位延迟量偏差为 $\pm 0.5^\circ$ (偏离 90°)及相

位延迟量为 90° 、快轴方位角偏差为 $\pm 0.5^\circ$ (偏离 45°)时引起的待测波片快轴方位角测量绝对误差。分析图6可知,标准1/4波片的相位延迟量及其快轴方位角的偏差对大部分相位延迟量的波片快轴方位角的测量影响不大,但当波片的相位延迟量为 0° 和 180° 时,对其快轴方位角的测量绝对误差较大,这是在测量实验中要注意的。

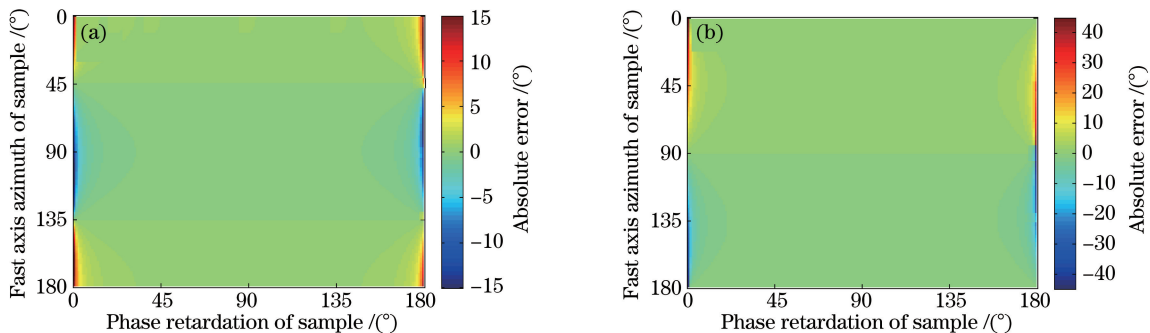


图6 标准1/4波片参数偏差引起的待测波片快轴方位角测量绝对误差。(a) $\theta=45^\circ, \delta\eta=\pm 0.5^\circ$; (b) $\eta=90^\circ, \delta\theta=\pm 0.5^\circ$

Fig. 6 Absolute errors of fast axis azimuth measurement of wave plate sample caused by the parameter deviation of the standard 1/4 wave plate. (a) $\theta=45^\circ, \delta\eta=\pm 0.5^\circ$; (b) $\eta=90^\circ, \delta\theta=\pm 0.5^\circ$

4.3 斯托克斯参量测量误差对待测波片测量结果的影响

实验测量斯托克斯参量的误差主要由光源的不稳定、斯托克斯测量仪自身的精度及外界的震动等因素引起。设测量得到的斯托克斯矢量误差分别为 $\delta S_{\text{RHCout}}(S'_1)$ 、 $\delta S_{\text{RHCout}}(S'_2)$ 和 $\delta S_{\text{RHCout}}(S'_3)$,由(5)、(6)式可得待测波片相位延迟量的误差 $\delta\eta_s$ 和快轴方位角的误差 $\delta\theta'_s$ 分别为

$$\delta\eta_s = -\frac{1}{\sqrt{1 - S_{\text{RHCout}}'^2(S_3)}} \delta S_{\text{RHCout}}(S'_3), \quad (9)$$

$$\delta\theta'_s = \frac{1}{2} \left[\frac{S_{\text{RHCout}}(S'_1)}{S_{\text{RHCout}}^2(S'_1) + S_{\text{RHCout}}^2(S'_2)} \delta S_{\text{RHCout}}(S'_2) - \frac{S_{\text{RHCout}}(S'_2)}{S_{\text{RHCout}}^2(S'_1) + S_{\text{RHCout}}^2(S'_2)} \delta S_{\text{RHCout}}(S'_1) \right]. \quad (10)$$

利用实验数据计算得 $S_{\text{RHCout}}(S'_1)$ 、 $S_{\text{RHCout}}(S'_2)$ 和 $S_{\text{RHCout}}(S'_3)$ 的误差均为 ± 0.001 ,代入(9)、(10)式得到1/4波片样品相位延迟量和快轴方位角的误差分别约为 $\pm 0.05^\circ$ 和 $\pm 0.03^\circ$ 。

5 结 论

基于 Mueller 矩阵和斯托克斯矢量测量的方法,实现了对波片相位延迟量和快轴方位角的同时测量。以 1/4 波片为例,测量得到的相位延迟量和快轴方位角的标准差分别为 $\pm 0.05^\circ$ 和 $\pm 0.03^\circ$ 。分析了标准 1/4 波片参数偏差和斯托克斯矢量测量误差对待测波片相位延迟量和快轴方位角测量结果的影响。该测量系统没有任何转动装置,可对波片进行实时测量。

参 考 文 献

- [1] Xu W D, Li X S. 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.
- [2] Xue Q W, Li G H. Half-shade method for measuring the phase retardation of quarter-wave plate [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 1998, 9(2): 150-151.
薛庆文, 李国华. 半阴法测量 $\lambda/4$ 波片的相位延迟[J]. *光电子 • 激光*, 1998, 9(2): 150-151.
- [3] Rochford K B, Wang C M. Accurate interferometric retardance measurements[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(25): 6473-6479.
- [4] Ren H L, Wang J Y, Lou L R, *et al.* Measuring phase retardation and fast axis azimuth of a wave plate using Michelson interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2008, 35(2): 249-253.
任洪亮, 王久扬, 楼立人, 等. 利用迈克耳孙干涉仪测量波片相位延迟量和快轴方向[J]. *中国激光*, 2008, 35(2): 249-253.
- [5] Wang J, Chen L, Wu Q Y, *et al.* Retardation measurement of wave plates using white-light Michelson interferometer [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2011, 38(5): 0508001.
王军, 陈磊, 吴泉英, 等. 一种基于白光迈克耳孙干涉仪波片延迟量的测量方法[J]. *中国激光*, 2011, 38(5): 0508001.
- [6] Zhao Z T, Lin T X, Huang Z H, *et al.* The accurate measurement of phase retardation of the wave plate by a null ellipsometer[J]. *Laser Journal*, 2012, 33(3): 8-9.
赵振堂, 林天夏, 黄佐华, 等. 利用消光式椭偏仪精确测量波片相位延迟量[J]. *激光杂志*, 2012, 33(3): 8-9.
- [7] Willians P A, Rose A H, Wang C M. Rotating-polarizer polarimeter for accurate retardance measurement[J]. *Applied Optics*, 1997, 36(25): 6466-6472.
- [8] den Boer J H W G, Kroesen G M W, de Hoog F J. Spectroscopic rotating compensator ellipsometry in the infrared: retarder design and measurement [J]. *Measurement Science and Technology*, 1997, 8(5): 484-492.
- [9] Oakberg T. Measurement of waveplate retardation using a photoelastic modulator [C]. *SPIE*, 1997, 3121: 19-22.
- [10] Wang B, Oakberg T C. A new instrument for measuring both the magnitude and angle of low level linear birefringence [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(10): 3847-3854.
- [11] Hu J M, Zeng A J, Wang X Z. 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] Gu Y H, Zhang Y, Jiao X, *et al.* Measurement for retardation of wave plates using the relative angle method[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(9): 0908002.
谷耀辉, 张燕, 焦翔, 等. 相对角度法测量波片相位延迟量[J]. *中国激光*, 2013, 40(9): 0908002.
- [13] Tan Q, Xu Q F, Xie N. New method for retardance measurement of a quarter-wave plate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(7): 212-216.
谭巧, 徐启峰, 谢楠. 一种测量波片相位延迟量的新方法[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(7): 212-216.
- [14] Zhang D W, Wu F Q, Sun H J. Systematic way of measuring optic parameters of mica wave plate by spectrophotometer[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2002, 13(7): 757-758.
张大伟, 吴福全, 孙浩杰. 云母波片属性的分光光度计标定法[J]. *光电子 • 激光*, 2002, 13(7): 757-758.
- [15] Wang J M, Li G H. Application of Fresnel rhomb in for the optic axis of 1/4 wave plate [J]. *Optical Technique*, 2002, 28(3): 245-246.
王吉明, 李国华. 菲涅尔棱体在确定 1/4 波片快慢轴中的应用[J]. *光学技术*, 2002, 28(3): 245-246.
- [16] Zhao T S, Li G H. A new method to measure the optical-axis azimuth of quarter-wave plate in light

- path accurately [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(3): 487-491.
- 赵廷生, 李国华. 精确确定光路中四分之一波片光轴方位的新方法 [J]. *光学学报*, 2008, 28(3): 487-491.
- [17] Zhang X, Wu F Q, Wang H L, *et al.* Simultaneous measurement of phase retardation and optic axis of wave plates [J]. *Optoelectronics Letters*, 2007, 3(1): 65-68.
- [18] Wang W, Li G H, Wu F Q, *et al.* A new method of measuring wave plate phase delay and fast axis azimuth [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2003, 30(12): 1121-1123.
- 王伟, 李国华, 吴福全, 等. 测量波片延迟量和快轴方位的新方法 [J]. *中国激光*, 2003, 30(12): 1121-1123.
- [19] Hu S, Gao T C, Li H, *et al.* Analysis on impact of atmospheric refraction on radiative transfer process at visible and infrared band [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(6): 0601005.
- 胡帅, 高太长, 李浩, 等. 大气折射对可见近红外波段辐射传输的影响分析 [J]. *光学学报*, 2016, 36(6): 0601005.
- [20] Zhang D, Hao S Q, Zhao Q S, *et al.* Atmospheric laser communication based on depolarization ratio detection [J]. *Acta Optica Sinica*, 2016, 36(11): 1106008.
- 张岱, 郝士琦, 赵青松, 等. 基于退偏振比探测的大气激光通信 [J]. *光学学报*, 2016, 36(11): 1106008.
- [21] Li J H, Zheng M, Zhang X B, *et al.* Study on calibration and error compensation of Mueller matrix imaging polarimeter [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 021202.
- 李建慧, 郑猛, 张雪冰, 等. Mueller 矩阵成像偏振仪的误差标定和补偿研究 [J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 021202.