

# 与快轴方向无关的 $\lambda/8$ 波片相位延迟量实时测量方法

朱玲琳<sup>1,2</sup> 曾爱军<sup>1</sup> 李凡月<sup>1,2</sup> 黄惠杰<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械研究所信息光学与光电技术实验室, 上海 201800)

<sup>2</sup> 中国科学院研究生院, 北京 100049

**摘要** 提出了一种与快轴方向无关的  $\lambda/8$  波片(EWP)相位延迟量实时测量方法。准直激光束经过圆起偏器(CP)和被测  $\lambda/8$  波片后形成测量光束,测量光束由二维正交光栅(2DOG)分束形成 4 束衍射子光束,它们经过检偏器阵列(AA)后由光电探测器阵列(PA)接收,利用探测到的 4 个光强信号可以实时测量被测  $\lambda/8$  波片的相位延迟量,且测量结果不受激光器光强波动的影响。实验中,标称值为  $45^\circ$ 、精度为  $\lambda/300$  的被测  $\lambda/8$  波片在不同快轴方向上的相位延迟量的测量平均值及其标准差分别为  $45.1^\circ$  和  $0.4^\circ$ 。相位延迟量的测量平均值、标准差与被测  $\lambda/8$  波片的相位延迟量标称值、精度相符,很好地验证了该方法的有效性。

**关键词** 测量;偏振; $\lambda/8$  波片;相位延迟量;快轴

中图分类号 O436.3; TN247

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201138.0508002

## Real-Time Measurement Method for Retardation of Eighth Waveplate Independent of Fast Axis

Zhu Linglin<sup>1,2</sup> Zeng Aijun<sup>1</sup> Li Fanyue<sup>1,2</sup> Huang Huijie<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Laboratory of Information Optics and Opto-Electronic Technology, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup> Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** A real-time measurement method for retardation of eighth waveplate (EWP) independent of fast axis is presented. The collimated beam passes through the circular polarizer (CP) and the EWP to form a measuring beam. The beam is split to four diffractive beams by a two-dimensional orthogonal grating (2DOG). They are detected by a photodetector array (PA) after passing through a polarizer array (AA). The four light intensity signals can be used to achieve real-time measurement of retardation of EWP. The result is not affected by the fluctuation of the intensity of the laser. In experiments, an EWP whose nominal value of retardation is  $45^\circ$  with accuracy of  $\lambda/300$  is measured. The mean and standard deviation of measurement results for retardation in different directions of the fast axis are  $45.1^\circ$  and  $0.4^\circ$ . They coincide with the nominal value and accuracy of the retardation, respectively. The usefulness of this method is verified.

**Key words** measurement; polarization; eighth waveplate; retardation; fast axis

**OCIS codes** 120.5050; 310.5448; 120.5410

## 1 引言

$\lambda/8$  波片(EWP)广泛应用在非线性光学系统<sup>[1]</sup>、光时复用系统<sup>[2]</sup>、光学传感器<sup>[3]</sup>、特殊干涉仪<sup>[4]</sup>和同步移相器<sup>[5,6]</sup>等方面。 $\lambda/8$  波片通常被置

于反射光路中使两次经过它的线偏振光转换成圆偏振光,也可以将两块  $\lambda/8$  波片的组合置于透射光路中来改变光的偏振态。相位延迟量是  $\lambda/8$  波片的一个重要参数,其容易受温度等因素的影响产生误

收稿日期: 2011-01-04; 收到修改稿日期: 2011-02-21

基金项目: 国家自然科学基金(60808018)资助课题。

作者简介: 朱玲琳(1986—),女,硕士研究生,主要从事光电检测技术方面的研究。E-mail: lingling41@126.com

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

E-mail: aijunzeng@siom.ac.cn(通信联系人)

差<sup>[7]</sup>而严重影响  $\lambda/8$  波片的使用效果,因此对  $\lambda/8$  波片相位延迟量的精确测量是非常必要的。

目前  $\lambda/8$  波片相位延迟量的测量方法主要有旋转偏振器件法<sup>[8, 9]</sup>、直角棱镜法<sup>[10]</sup>、外差干涉法<sup>[11]</sup>、迈克耳孙干涉仪法<sup>[12]</sup>和光弹调制法<sup>[13~15]</sup>等。这些方法都不能实时测量  $\lambda/8$  波片的相位延迟量,且测量过程中对激光器光强的稳定性要求高。外差干涉法的操作繁琐,测量速度较慢。直角棱镜法和光弹调制法需要先确定被测  $\lambda/8$  波片的主轴(快轴或慢轴)或快轴方向。本文提出了一种与快轴方向无关的  $\lambda/8$  波片相位延迟量实时测量方法。该方法采用二维正交光栅将圆偏振光通过被测  $\lambda/8$  波片后形成的测量光束进行衍射分束,4 个光强相等的子光束被聚焦到不同透振方向的检偏器上获得 4 个光强信号,利用这 4 个光强信号可实时测量被测  $\lambda/8$  波片的相位延迟量。

## 2 原 理

与快轴方向无关的  $\lambda/8$  波片相位延迟量实时测量方法的光路如图 1 所示。从激光器出射的准直激光束依次经过圆起偏器(CP)、被测  $\lambda/8$  波片、二维正交光栅(2DOG)、聚焦透镜(FL)和检偏器阵列(AA)后由光电探测器阵列(PA)所接收。准直激光束经过 CP 后成为圆偏振光,圆偏振光经过被测  $\lambda/8$  波片产生相位延迟而形成测量光束。测量光束由 2DOG 进行衍射分束,形成 4 束光强相等的衍射子光束。衍射子光束由 FL 会聚到 AA 上而形成 4 个光强信号,这 4 个光强信号由 PA 接收。AA 包含的 4 个检偏器的透振方向依次相差  $45^\circ$ ,则 4 个 PA 接收依次移相  $90^\circ$  的光强信号。控制与处理单元(CPU)对 PA 产生的 4 个电信号进行采集和处理即可实时测量被测  $\lambda/8$  波片的相位延迟量。

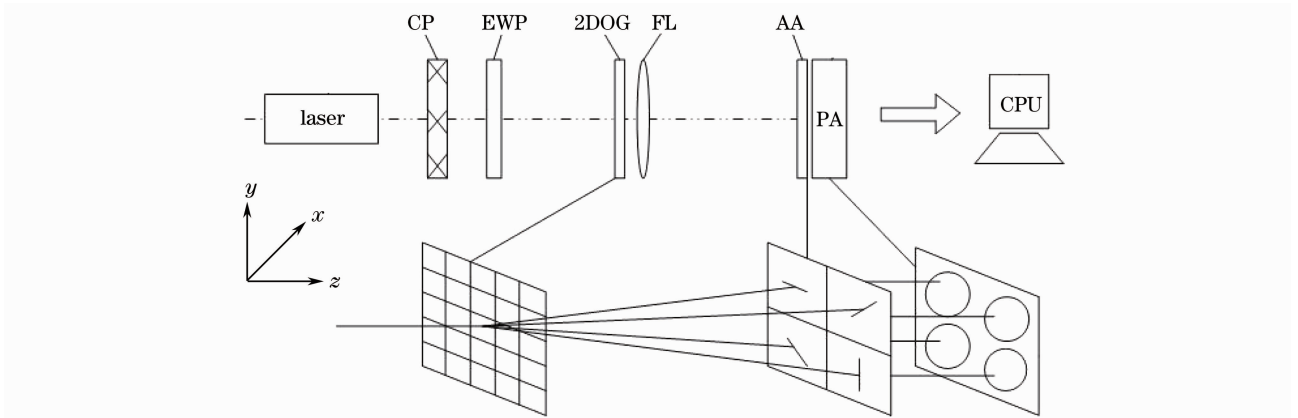


图 1 与快轴方向无关的  $\lambda/8$  波片相位延迟量实时测量光路图

Fig. 1 Schematic diagram of real-time measurement for retardation of one-eighth wave plate regardless of direction of fast axis

建立如图 1 所示的坐标系,  $z$  轴沿着光束传播的方向,  $x$  轴垂直纸面向里。准直激光束经过 CP 后成为圆偏振光,圆偏振光的光矢量  $\mathbf{E}$  可以用琼斯矢量表示为

$$\mathbf{E} = \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $E_0$  为圆偏振光的振幅。被测  $\lambda/8$  波片的琼斯矩阵<sup>[16]</sup>为

$$\mathbf{G}_{\lambda/8} = \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} - i \sin \frac{\delta}{2} \cos(2\theta) & -i \sin \frac{\delta}{2} \sin(2\theta) \\ -i \sin \frac{\delta}{2} \sin(2\theta) & \cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \cos(2\theta) \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中  $\theta$  为被测  $\lambda/8$  波片快轴与  $x$  轴的夹角,  $\delta$  为被测  $\lambda/8$  波片的相位延迟量。AA 中的检偏器的琼斯矩阵<sup>[16]</sup>可以统一表示为

$$\mathbf{G}_A = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \frac{1}{2} \sin(2\alpha) \\ \frac{1}{2} \sin(2\alpha) & \sin^2 \alpha \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中  $\alpha$  为检偏器透振方向和  $x$  轴的夹角。

经过被测  $\lambda/8$  波片后形成的测量光束由二维正交光栅衍射分束,4 束衍射子光束由聚焦透镜会聚到检偏器阵列上,透过检偏器阵列形成的 4 束偏振干涉光的琼斯矢量  $\mathbf{S}$  可以统一表示为

$$\mathbf{S} = \mathbf{G}_A \mathbf{G}_{\lambda/8} \mathbf{E} = \begin{bmatrix} \cos^2 \alpha & \frac{1}{2} \sin(2\alpha) \\ \frac{1}{2} \sin(2\alpha) & \sin^2 \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \frac{\delta}{2} - i \sin \frac{\delta}{2} \cos(2\theta) & -i \sin \frac{\delta}{2} \sin(2\theta) \\ -i \sin \frac{\delta}{2} \sin(2\theta) & \cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \cos(2\theta) \end{bmatrix} \frac{E_0}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 \\ -i \end{bmatrix}, \quad (4)$$

所以光强

$$I = \mathbf{S} \mathbf{S}^* = \frac{E_0^2}{2} [1 - \cos(2\alpha) \sin(2\theta) \sin \delta + \sin(2\alpha) \cos(2\theta) \sin \delta]. \quad (5)$$

4个检偏器的透振方向与 $x$ 轴的夹角 $\alpha$ 分别为 $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ 和 $135^\circ$ ,则4个光电探测器探测到的光强分别为

$$I_{0^\circ} = \frac{E_0^2}{2} [1 - \sin \delta \sin(2\theta)], \quad (6)$$

$$I_{45^\circ} = \frac{E_0^2}{2} [1 + \sin \delta \cos(2\theta)], \quad (7)$$

$$I_{90^\circ} = \frac{E_0^2}{2} [1 + \sin \delta \sin(2\theta)], \quad (8)$$

$$I_{135^\circ} = \frac{E_0^2}{2} [1 - \sin \delta \cos(2\theta)]. \quad (9)$$

由于被测 $\lambda/8$ 波片的相位延迟量接近 $45^\circ$ ,所以(6)~(9)式中的 $\sin \delta$ 总是正值。由(6)~(9)式可以计算出被测 $\lambda/8$ 波片的相位延迟量为

$$\delta = \arcsin \left[ \sqrt{\left( \frac{I_{90^\circ} - I_{0^\circ}}{I_{90^\circ} + I_{0^\circ}} \right)^2 + \left( \frac{I_{45^\circ} - I_{135^\circ}}{I_{45^\circ} + I_{135^\circ}} \right)^2} \right]. \quad (10)$$

由推导过程可以看出,该方法与被测 $\lambda/8$ 波片的快轴方向无关,且计算过程中已将光源光强消去,故测量结果不受激光器光强波动的影响。在该方法中,通过透振方向不同的检偏器的光强在同一时刻内被光电探测器接收,实时处理其探测信号可以实现相位延迟量的实时测量。

### 3 实验

用于 $\lambda/8$ 波片相位延迟量实时测量的实验光路如图1所示。光源采用带有准直镜组的半导体激光器,其波长为633 nm。CP由格兰-泰勒棱镜和 $\lambda/4$ 波片组成,格兰-泰勒棱镜的消光比优于 $10^{-5}$ , $\lambda/4$ 波片为零级石英波片,其相位延迟量精度为 $\lambda/300$ 。被测 $\lambda/8$ 波片为零级石英波片,它的相位延迟量标称值为 $45^\circ$ ,其精度为 $\lambda/300$ 。2DOG的栅线密度为200 line/mm。AA包含4个偏振片,其透振方向依次相差 $45^\circ$ ,消光比均为 $10^{-2}$ 。PA由4个光电二极管组成,光电二极管采用日本滨松公司S1223型PIN二极管。CPU由数据采集卡和控制软件组成,数据采集卡为凌华科技公司的4通道采集板卡,控

制软件为LabView编程的软件。被测 $\lambda/8$ 波片置于由步进电机驱动的旋转盘上,步进电机由控制与处理单元控制,旋转盘的最小旋转角度为 $1''$ 。

实验过程中首先利用消光法调整好光路中格兰-泰勒棱镜、AA的透振方向和 $\lambda/4$ 波片的快轴方向,然后运用LabView编程控制 $\lambda/8$ 波片的旋转和测量数据的采集。单次相位延迟量测量过程中,采集和处理的时间为 $10 \mu\text{s}$ 。实验中将 $\lambda/8$ 波片旋转 $360^\circ$ ,每隔 $3^\circ$ 测量一次相位延迟量。在不同旋转角度 $\theta$ 即不同快轴方向上的相位延迟量 $\delta$ 的测量结果如图2所示,其测量平均值为 $45.1^\circ$ ,与该 $\lambda/8$ 波片的标称值相符。在不同快轴方向上的测量值的标准差为 $0.4^\circ$ ,与标称值的精度 $\lambda/300$ 相当。可见相位延迟量的测量结果与快轴方向无关。在图2所示的测量结果中,最大测量值与最小测量值相差 $1.5^\circ$ ,这主要是由AA中4个偏振片的透振方向误差引起的,若可以对偏振片的透振方向做更精确的调整,则可以进一步减小测量误差。

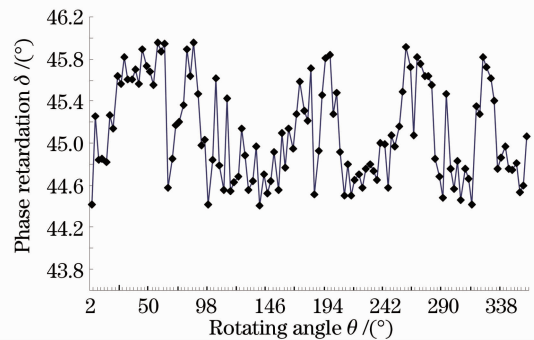


图2 实验结果

Fig. 2 Experimental result

### 4 结论

提出了一种与快轴方向无关的 $\lambda/8$ 波片相位延迟量实时测量方法,该方法无需旋转测量光路中的偏振器件,运用二维正交光栅和检偏器阵列同时获得4个不同的信号,实现了实时测量。该方法的测量结果与被测 $\lambda/8$ 波片的快轴无关。在计算 $\lambda/8$ 波

片相位延迟量过程中消去了光源光强,故该方法不受激光器光强波动的影响。实验结果很好地验证了该方法的有效性。

参 考 文 献

- 1 M. Pesch, E. G. Westhoff, T. Ackemann *et al.*. Observation of a discrete family of dissipative solitons in a nonlinear optical system[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2005, **95**(14): 143906
- 2 V. J. Fowler, S. H. Maybar. Optical time multiplexing system [P]. US Patent, 3363103, 1968
- 3 Yoshiaki Ida. Optical sensing equipment [P]. US Patent, 4644153, 1987
- 4 Michael John Downs. Michelson interferometer using matched wedge-shaped beam splitter and compensator[P]. US Patent, 5847828, 1998
- 5 James C. Wyant. Advances in interferometric metrology [C]. *SPIE*, 2002, **4927**: 154~162
- 6 Zuo Fen, Chen Lei. Development of anti-vibration technology in simultaneous phase-shifting interferometry [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, **43**(11): 43~48  
左 芬, 陈 磊. 同步移相抗振光干涉测量技术研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2006, **43**(11): 43~48
- 7 Song Zhitang, Li Guohua, Peng Handong *et al.*. Temperature effect of composite compensator[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1626~1230  
宋致堂, 李国华, 彭捍东 等. 复合式补偿器的温度效应[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1626~1230
- 8 P. A. Williams, A. H. Rose, C. M. Wang. Rotating-polarizer polarimeter for accurate retardance measurement [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(25): 6466~6472
- 9 Wang Wei, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. New method for measuring retardation and fast axis of wave plate[J]. *Chinese J. 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
- 10 Wang Zhengping, Li Qingbo, Tan Qiao *et al.*. Method of measuring practical retardance value and judging the fast or slow axis of quarter-wave plate[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4): 523~528  
王政平, 李庆波, 谭 巧 等. 测量 $\lambda/4$ 波片实际相移量并判定快慢轴的方法[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 523~528
- 11 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
- 12 Ren Hongliang, Wang Jiuyang, Lou Liren *et al.*. Measuring phase retardation and fast axis azimuth of a wave plate using Michelson interferometer[J]. *Chinese J. 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
- 13 Baoliang Wang, Theodore C. Oakerg. A new instrument for measuring both the magnitude and angle of low level linear birefringence [J]. *Rev. Sci. Instr.*, 1999, **70**(10): 3847~3854
- 14 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
- 15 Li Fanyue, Han Jie, Zeng Aijun *et al.*. Method for measuring retardation by swinging quarter-wave plate with phase modulator [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0208003  
李凡月, 韩 杰, 曾爱军 等. 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[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0208003
- 16 Yu Daoyin, Tan Hengying. *Engineering Optics* [M]. Beijing: China Machine Press, 2000. 442~443  
郁道银, 谈恒英. *工程光学* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. 442~443