

文章编号: 0258-7025(2007)11-1553-04

基于基频分量消光的 1/4 波片快轴标定方法

杨 坤^{1,3}, 曾爱军², 王向朝¹, 王 华^{1,3}

(¹ 中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海 201800
² 上海恒益光学精密机械有限公司, 上海 201800; ³ 中国科学院研究生院, 北京 100039)

摘要 提出了一种基于基频分量消光的波片快轴标定方法, 并利用琼斯矩阵对其标定原理进行了分析。激光器、起偏器、相位调制器、待标定 1/4 波片、检偏器和光电探测器构成标定光路, 起偏器、检偏器的透光轴与相位调制器的振动轴分别成 +45° 和 0° 夹角。准直激光束依次经过起偏器、相位调制器、待标定 1/4 波片和检偏器, 由光电探测器接收。理论分析表明该标定方法标定精度主要取决于检偏器的定位误差。实验验证了该标定方法的有效性, 1/4 波片快轴标定结果的最大偏差为 0.043°, 标准差为 0.012°, 标定精度为 0.05°。

关键词 测量与计量; 偏振; 1/4 波片; 快轴; 相位调制器; 琼斯矩阵

中图分类号 O 436.3 **文献标识码** A

Fast Axis Calibration of Quarter-Wave Plate by Fundamental Component Extinction

YANG Kun^{1,3}, ZENG Ai-jun², WANG Xiang-zhao¹, WANG Hua^{1,3}

(¹ Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² Shanghai Hengyi Optics & Fine Mechanics Co., Ltd, Shanghai 201800, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract A method to calibrate the fast axis of a quarter-wave plate by nulling the fundamental component was proposed and the calibration principle was analyzed. The optical calibration system is composed of a laser, a polarizer, the quarter-wave plate to be calibrated, a phase modulator, an analyzer and an opto-electronic detector. The azimuths of the transmission axes of the polarizer and the analyzer with respect to the major oscillation direction of the phase modulator are +45° and 0°, respectively. A collimated laser beam passes through the polarizer, the phase modulator, the quarter-wave plate and the analyzer in turn, and then is detected by the opto-electronic detector. The theoretical analyse shows that the calibration precision depends on the azimuth error of the analyzer. The feasibility of the method was verified by experiments. The maximum deviation of the calibrated fast axis azimuth of the quarter-wave plate is 0.043°, the root-mean-square error is 0.012°, and the calibration precision is 0.05°.

Key words measurement and metrology; polarization; quarter-wave plate; fast axis; phase modulator; Jones matrix

1 引 言

1/4 波片是一种常用的光学元件, 可对光的偏振态进行调制, 被广泛应用于偏光测量领域。通常情况下所能提供的 1/4 波片并未标定波片的快慢轴, 而在偏光测量中, 1/4 波片快轴的方向经常会影

响测量结果, 所以在测量前需要精确标定 1/4 波片的快慢轴。标定波片快慢轴的方法有不少^[1~7]。在这些方法中, 塔顿检验法^[1]只能测定云母波片; 直角棱镜法^[3]需利用其他方法确定待标定波片的主轴位置, 然后再判断该主轴是快轴还是慢轴; 菲涅耳菱体

收稿日期: 2006-11-22; 收到修改稿日期: 2007-05-17

基金项目: 国家自然科学基金 (60578051)、上海市青年科技启明星计划 (06QB14047) 和上海市科委国际合作计划项目 (051107085) 资助课题。

作者简介: 杨 坤 (1980—), 男, 河南人, 博士研究生, 主要从事偏光检测技术的研究。E-mail: yyyk2002@163.com

导师简介: 王向朝 (1957—), 男, 辽宁人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为信息光电子技术。E-mail: wxz26267@siom.ac.cn

法^[4]和光强极大值法^[2]对光源的稳定性和探测器的灵敏度等要求较高;外差干涉法^[5,6]结构复杂、数据处理速度较慢;二次谐波极值法^[7]需确定探测光强的二次谐波分量的极值位置,由于二次谐波分量在极值时对波片方位角的导数为零,所以灵敏度不高。

本课题组曾以光弹调制器作为相位调制器,利用直流分量和二次谐波分量对已标定快轴的1/4波片的相位延迟量进行了精确测量^[8]。而本文以光弹调制器作为相位调制器,利用基频分量,提出了一种标定1/4波片快慢轴的新方法。利用相位调制器对入射光进行调制,光电探测器对调制后的光强信号进行探测,经锁相放大器得到基频分量,通过数据采集卡输入计算机。由探测的基频分量为零的位置标定出1/4波片的主轴,然后将波片逆时针旋转45°,由该位置时基频分量的正负符号确定该主轴是快轴还是慢轴。由于探测光强的基频分量为零时对波片方位角的导数最大,所以具有较高的灵敏度。

2 标定原理

标定1/4波片快慢轴的光路如图1所示。准直激光束依次经过起偏器、相位调制器、待标定1/4波片、检偏器后由光电探测器接收。光源为带有准直透镜的激光器。待标定波片位于相位调制器和检偏器之间。相位调制器为光弹调制器,其振动轴位于水平方向,检偏器的透光轴与光弹调制器的振动轴平行,起偏器的透光轴与水平方向成45°(角的定义为:以光弹调制器的方向为基准,即水平方向为0°,面对光束传播方向逆时针为正,顺时针为负,下同),设待标定1/4波片快轴的方位角为 θ 。

建立如图1所示的坐标系, z 轴方向为光束前进方向, x 轴方向和 y 轴方向分别为光弹调制器的振动轴方向和与其垂直的方向。设起偏器透射光束的光场的振幅为 E_0 ,则检偏器的出射光场的振幅 E

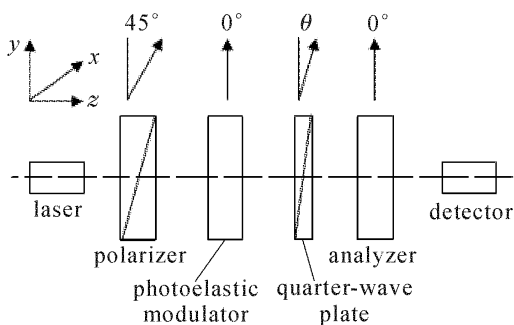


图1 1/4波片快慢轴标定光路

Fig. 1 Optical system for calibrating fast axis or slow axis of a quarter-wave plate

可由琼斯矩阵表示为

$$E = (1 \ 0)R(A)C(\theta)MR(-P)\begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}E_0, \quad (1)$$

式中 R 为旋转矩阵,

$$R(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ -\sin\alpha & \cos\alpha \end{pmatrix}, \quad (2)$$

α 为 A 或 $-P$, A 和 P 分别为检偏器和起偏器的方位角,大小分别为 0° 和 45° ; $C(\theta)$ 为待标定1/4波片在方位角 θ 下的琼斯矩阵

$$C(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \frac{\delta}{2} + i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta & i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta \\ i \sin \frac{\delta}{2} \sin 2\theta & \cos \frac{\delta}{2} - i \sin \frac{\delta}{2} \cos 2\theta \end{pmatrix}, \quad (3)$$

δ 为待标定1/4波片的相位延迟量; M 为光弹调制器在其振动轴方向与水平方向平行时的琼斯矩阵

$$M = \begin{pmatrix} \cos \frac{\Delta}{2} + i \sin \frac{\Delta}{2} & 0 \\ 0 & \cos \frac{\Delta}{2} - i \sin \frac{\Delta}{2} \end{pmatrix}, \quad (4)$$

Δ 为光弹调制器的相位延迟量。

因此投射到光电探测器上的光强分布为

$$I = EE^* = \frac{I_0}{2} \times \left(1 + \sin\delta \sin 2\theta \sin\Delta + \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin 4\theta \cos\Delta \right), \quad (5)$$

式中 $I_0 = E_0^2$ 为激光器出射光束的初始光强,*为复共轭符号。

如果光弹调制器的峰值延迟量为 Δ_0 ,调制频率为 ω ,时间为 t ,则光弹调制器的相位延迟量^[9]

$$\Delta = \Delta_0 \sin\omega t, \quad (6)$$

对(6)式进行展开,可得

$$\begin{aligned} \sin\Delta &= 2J_1(\Delta_0)\sin\omega t + 2J_3(\Delta_0)\sin 3\omega t + \dots, \\ \cos\Delta &= J_0(\Delta_0) + 2J_2(\Delta_0)\cos 2\omega t + \\ & 2J_4(\Delta_0)\cos 4\omega t + \dots, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 $J_k(\Delta_0)$, $k=0,1,2,\dots$ 为 Δ_0 的 k 阶贝塞尔函数。

将(7)式代入(5)式,可得

$$\begin{aligned} I &= \frac{I_0}{2} \left[1 + \sin^2 \frac{\delta}{2} \sin 4\theta J_0(\Delta_0) + \right. \\ & 2\sin\delta \sin 2\theta J_1(\Delta_0) \sin\omega t + \\ & \left. 2\sin^2 \frac{\delta}{2} \sin 4\theta J_2(\Delta_0) \cos 2\omega t + \dots \right], \quad (8) \end{aligned}$$

由(8)式可知,探测光强中包含直流分量、基频分量、二次谐波分量和高次谐波分量。光电探测器输出的电信号经放大电路和滤波电路后分为直流分量与交

流分量,利用锁相放大电路可以从交流分量中分离出基频分量,其表达式为

$$V_{1f} = M_{ac} \eta I_0 \sin \delta \sin 2\theta J_1(\Delta_0), \quad (9)$$

式中 M_{ac} 为基频分量的电路增益, η 为光电转换系数。

在(9)式中,基频分量的电路增益设置为 1,光弹调制器的峰值延迟量设置为 2.405,此时 $J_0(\Delta_0) = 0, J_1(\Delta_0) = 0.5191$,波片为 $\lambda/4, \sin \delta \approx 1$,所以只有 $\theta = 0^\circ$ (即水平方向为快轴) 或 $\theta = 90^\circ$ (即水平方向为慢轴) 时,基频分量为 0。旋转被测 1/4 波片,当基频分量为 0 时,可标定水平方向为波片的主轴方向。然后将待标定波片逆时针旋转 45° ,如果该主轴为快轴, $\sin[2 \times (0^\circ + 45^\circ)] > 0$,则 $V_{1f} > 0$,如果该主轴为慢轴, $\sin[2 \times (90^\circ + 45^\circ)] < 0$,则 $V_{1f} < 0$ 。从而可根据波片旋转 45° 后基频分量的正负符号,判断该主轴是快轴还是慢轴。

由(9)式可知,基频分量是 1/4 波片延迟量的正弦函数,在波片的工作波长下,对于零级波片, $\delta \approx 90^\circ$,对于多级波片, $\delta \approx N \times 360^\circ + 90^\circ$ (N 为波片级数)。两种情况下的 $\sin \delta$ 均大于零,对基频分量的正负符号没有影响,所以该标定方法对零级波片和多级波片都是适用的。需要注意的是在标定波片的快轴时,所使用的光源输出波长需要与波片的工作波长相一致。

由(9)式可以看出,基频分量是波片方位角 θ 的函数。基频分量为零时,该基频分量对 θ 的一阶导数最大,所以该标定方法具有较高的灵敏度。

该标定方法由于用探测光强基频分量消光法来标定波片快轴,光源光强的波动、背景光和起偏器消光不理想等对标定结果没有影响,所以标定结果的误差源主要为偏振元件方位角的定位误差。

设起偏器和检偏器的方位角误差分别为 δP 和 δA ,则(1)式需变为

$$\mathbf{E} = (1 \quad 0) \mathbf{R}(A + \delta A) \mathbf{C}(\theta) \mathbf{M} \times \mathbf{R}(-P - \delta P) \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} E_0, \quad (10)$$

从而可得到起偏器和检偏器存在定位误差时的基频分量

$$V_{1f} = M_{ac} \eta I_0 \sin \delta \sin 2(\theta - \delta A) \times \sin 2(45^\circ + \delta P) J_1(\Delta_0), \quad (11)$$

由(11)式可知,利用基频分量消光法来标定波片快轴,其标定误差只与检偏器的定位误差有关,而与起偏器的定位误差无关,且由检偏器定位误差引起的标定误差等于检偏器的定位误差。

3 实 验

实验光路如图 1 所示。光源为带准直透镜的氩氦激光器,波长为 632.8 nm。起偏器和检偏器均为格兰-泰勒棱镜,其消光比小于 10^{-5} 。被测 1/4 波片为 400~1100 nm 波段内消色差的 1/4 波片。起偏器、检偏器和被测 1/4 波片分别置于旋转台上,旋转台的最小刻度为 0.1° ,分辨率为 0.002° 。光弹调制器为 Hinds 公司 PEM-90 系列的 I/FS50 型光弹调制器,其峰值延迟量可以利用配套的控制器的调整。光弹调制器的调制频率为 50 kHz,其光谱使用范围为 170~2600 nm。光电探测器为光电二极管,利用信号调理器对光电二极管输出的电信号进行前置放大、滤波和主放大后,分离出直流分量和交流分量。交流分量经锁相放大器后得到基频分量,经过数据采集卡输入计算机。

开启光弹调制器使其处于调制状态,暂不在光路中放入待标定 1/4 波片,旋转检偏器和起偏器。使起偏器的透光轴与光弹调制器的振动轴成 $+45^\circ$,检偏器的透光轴与光弹调制器的振动轴平行^[10],然后将待标定 1/4 波片按图 1 放入光路中。

实验中将光弹调制器的峰值延迟量调整为零,从零开始逐渐增加到 2.405。先标定好 1/4 波片的参考轴(该参考轴是任意选取的),将该参考轴的方位角定为 0° 。逆时针旋转待标定波片,观察基频分量,由基频分量为 0 确定主轴位置,然后将波片逆时针旋转 45° ,由基频分量的符号即可确定该轴是快轴还是慢轴。在相同的实验条件对波片的快轴进行多次标定,实验结果如表 1 所示。

表 1 相同实验条件下的多次标定结果

Table 1 Calibration results in the same experimental conditions

Calibration number	Azimuth of fast axis / ($^\circ$)	Calibration number	Azimuth of fast axis / ($^\circ$)
1	17.271	6	17.271
2	17.257	7	17.286
3	17.286	8	17.271
4	17.279	9	17.300
5	17.286	10	17.286

由表 1 可知,在相同的实验条件下,所标定的 1/4 波片快轴方位角的平均值为 17.278° ,最大偏差为 0.043° ,标准差为 0.012° 。

由于探测光强的基频分量为 0 时其导数为最大,所以该标定方法具有较高的灵敏度。图 2 是 1/4

波片方位角在基频分量消光位置附近上下变化 1° 时基频分量随波片方位角变化的曲线图,对应了本文所采用的标定方法的灵敏度。由图 2 可知,波片的方位角在消光位置变化 0.05° 时,探测光强的基频分量变化超过 29 mV,说明本文所采用的标定方法具有较高的灵敏度。

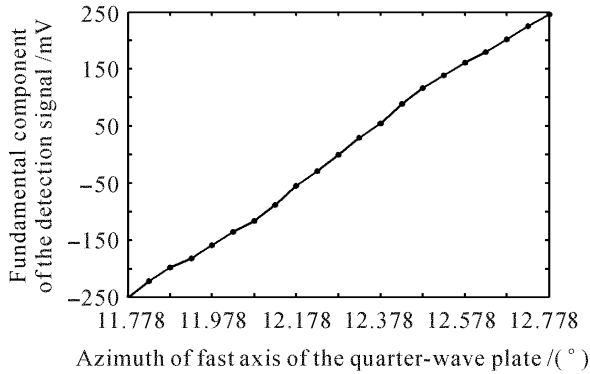


图 2 标定实验的灵敏度

Fig. 2 Sensitivity of calibration experiment

固定起偏器于 45° ,以 0.1° 的步长角在 $-0.5^\circ \sim 0.5^\circ$ 的范围内旋转检偏器,在检偏器的不同位置得到的快轴方位角如表 2 所示。

表 2 检偏器位于不同方位角下的标定结果

Table 2 Calibration results for different azimuths of the analyzer

Azimuth of analyzer /($^\circ$)	Azimuth of fast axis /($^\circ$)	Azimuth of analyzer /($^\circ$)	Azimuth of fast axis /($^\circ$)
-0.5	16.764	0.1	17.378
-0.4	16.864	0.2	17.485
-0.3	16.971	0.3	17.578
-0.2	17.071	0.4	17.692
-0.1	17.185	0.5	17.799

将检偏器各方位角下得到的 $1/4$ 波片快轴方位角减去检偏器的方位角,所得的结果与所标定的快轴方位角平均值的标准差是 0.035° ,验证了误差分析的结果,即由检偏器定位误差引起的标定误差等于检偏器的定位误差。由于检偏器的定位误差小于 0.05° ^[10],所以在本文实验条件下的标定精度为 0.05° 。

4 结 论

提出了一种标定 $1/4$ 波片快慢轴的新方法。利用基频分量消光标定波片的快慢轴,光源光强的波动、背景光和起偏器消光不理想等对标定结果均没有影响。理论分析表明该标定方法测量精度主要取决于检偏器的定位误差。实验验证了该标定方法的有效性, $1/4$ 波片快轴标定结果的最大偏差为 0.043° ,标准差为 0.012° ,标定精度为 0.05° 。

参 考 文 献

- Li Jingzhen. Handbook of Optics [M]. First edition. Xi'an: Shaanxi Scientific & Technical Publishers, 1986. 585
李景镇. 光学手册[M]. 第一版. 西安:陕西科学技术出版社, 1986. 585
- Wang Wei, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. A new method of measuring wave plate phase delay and fast axis azimuth [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
- Zhengping Wang, Qingbo Li, Qiao Tan *et al.*. Method of measuring practical retardance and judging the fast or slow axis of a quarter-wave plate [J]. *Measurement*, 2006, **39**:729~735
- Wang Jiming, Li Guohua. 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. 菲涅尔菱体在确定 $1/4$ 波片快慢轴中的应用 [J]. 光学技术, 2002, **28**(3):245~246
- 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
- Wen-Chuan Kuo, Kuo-Yu Liao, Gwo-Jen Jan *et al.*. Simultaneous measurement of phase retardance and fast-axis angle of phase retardation plate [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2005, **44**(2):1095~1100
- Theodore C. Oakberg. Measurement of waveplate retardation using a photoelastic modulator [C]. *SPIE*, 1997, **3121**:19~22
- 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
- Meng-Wei Wang, Yu-Faye Chao, Keh-Chyang Leou *et al.*. Calibrations of phase modulation amplitude of photoelastic modulator [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(2):827~832
- Yu-Faye Chao, Charn-Kuo Wang. Direct determination of azimuth angles in photoelastic modulator system [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1998, **37**(6A):3558~3562