

1/4 波片相位延迟分布的动态测量*

左芬^{1,2}, 陈磊¹, 徐晨¹

(1 南京理工大学 电光学院, 南京 210094)

(2 江苏淮阴师范学院, 江苏 淮安 223001)

摘 要:通过密勒矩阵和斯托克斯参量法对一种 1/4 波片的相位延迟分布的测量模型进行了推导, 并设计出一种空间分光移相器, 取代一般测量系统中的检偏器, 使得系统能于瞬间同时采集四幅具有 90°移相步长的干涉图, 避免了环境振动对测量的影响, 从而可以对 1/4 波片的相位延迟分布进行动态在线测量. 对一个实际标称波长 632.8 nm 的 1/4 波片进行了测量, 结果显示其平均延迟量为 149.36 nm, 且接近 75% 部分其相位延迟误差在 5 nm 之内, 显示出较好的延迟均匀性.

关键词:波片; 相位延迟; 移相技术; 动态测量

中图分类号: O432.2; TN20

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2008)11-2296-4

0 引言

波片是基于晶体双折射特性的偏振光学器件, 也称相位延迟器, 在现代光学测量以及各种偏振光技术等领域具有非常广泛的应用^[1-2]. 其中 1/4 波片的应用非常广泛, 而作为波片最重要的技术参量, 相位延迟的测量包括其分布一直受到相关研究工作者的关注^[3]. 一般来讲, 波片的相位延迟与波片的厚度、材料的均匀性和应力双折射等因素有关, 而在目前关于波片的相位延迟测量方法主要有光学补偿法^[4]、移相法^[5-6]以及电光晶体调制法^[7]等, 其中移相法由于其简单的原理和较高的测量准确度, 得到了广泛的推广应用. 但是已有的各种移相测量方法除了需要知道被测量波片的快慢轴方向以外, 还存在着另一个重要的缺点, 即只能分时采集三幅以上的具有一定移相步长的移相图, 这样在采集过程中不可避免地受到各种环境振动和空气扰动的影响, 从而影响移相的准确度进而影响测量结果. 因此现有的移相法大部分只能对于波片进行各种静态的测量, 而无法应用到关于波片质量的动态在线检测中.

在研究如何对晶体双折射进行动态测量中, Yonetama 等提出了几种从单一图像分析光测弹性条纹的方法, 采用光粘弹性学方程来分析与时间有关的问题, 但是这种方法却无法实时得到整个分析测量的结果^[8]; 另外一种思路为空间移相法, 即在空间不同位置上于同一时刻采集多幅移相干涉图, 如 E. A. Patterson 等研制的自动偏振光测弹性仪^[9]、A. Asundi 等研制的动态移相光测弹性法^[10]以及 S. Yonetama 等的基于微偏振阵列的同步移相光测

弹性法^[11]等, 这些方法一般具有复杂的光路结构, 同时在几幅图之间存在光强不匹配问题, 而 S. Yonetama 等的基于微偏振阵列的同步移相光测弹性法虽然不存在光强匹配问题, 但是实现起来技术难度较大.

针对上述研究背景, 本文在四步移相干涉法的基础上, 采用一种自制的分光移相器, 不需要预先知道波片的快慢轴方向的情况下, 于瞬间同时采集四幅具有不同移相量的干涉图, 并运用相应的算法, 实时得出被测波片的相位延迟量分布. 整个系统结构简单, 测量过程方便, 且很好地解决了上述光强匹配问题.

1 测量原理

测量的原理光路如图 1. 由光源发出的线偏振光垂直经过一块透振方向为竖直 y 方向的起偏器 P_1 , 然后经过一快轴方向与 P_1 的透振方向成 45° 的标准 1/4 波片 G 后形成圆偏振光, 该圆偏振光垂直入射到待测 1/4 波片 G_T 的表面, 经过其调制以后, 再经过一块透振方向与水平 x 方向成 α 角的检偏器 P_2 并由 CCD 接收.

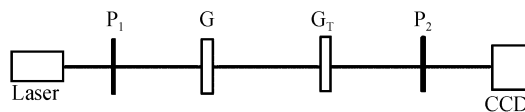


图 1 1/4 波片相位延迟测量
Fig. 1 The sketch map of the retardation measurement of a quarter-wave plate

对整个测量原理运用斯托克斯矢量和密勒矩阵表示法推导如下^[12]:

设经过标准 1/4 波片后形成的圆偏光斯托克斯矢量可表示为

* 江苏省“六大人才高峰”(06-E-030)资助

Tel: 025-84315427 Email: weile_ni@163.com

收稿日期: 2007-06-10

$$I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix},$$

而快轴与 x 轴夹角为 θ 、位相延迟 δ 的一般待测波片矩阵可表示为

$$G'_T = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos^2 2\theta + \sin^2 2\theta \cos \delta & \sin 2\theta \cos 2\theta (1 - \cos \delta) & -\sin 2\theta \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta \cos 2\theta (1 - \cos \delta) & \sin^2 2\theta + \cos^2 2\theta \cos \delta & \cos 2\theta \sin \delta \\ 0 & \sin 2\theta \sin \delta & -\cos 2\theta \sin \delta & \cos \delta \end{pmatrix}$$

透光轴与 x 轴夹角为 α 的检偏器的密勒矩阵为

$$P'_2 = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & \cos 2\alpha & \sin 2\alpha & 0 \\ \cos 2\alpha & \cos^2 2\alpha & \sin 2\alpha \cos 2\alpha & 0 \\ \sin 2\alpha & \cos 2\alpha \sin 2\alpha & \sin^2 2\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

则经过检偏器后的出射光的斯托克斯矢量可以由式(1)推出

$$T = P'_2 G'_T I_0 \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{I_0}{2} \begin{pmatrix} 1 - \cos 2\alpha \sin 2\theta \sin \delta + \sin 2\alpha \cos 2\theta \sin \delta \\ \cos 2\alpha - \cos^2 2\alpha \sin 2\theta \sin \delta + \sin 2\alpha \cos 2\alpha \cos 2\theta \sin \delta \\ \sin 2\alpha - \sin 2\alpha \cos 2\alpha \sin 2\theta \sin \delta + \sin^2 2\alpha \cos 2\theta \sin \delta \\ 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

根据斯托克斯矢量定义

$$S_0 = \langle | E_x^2 | \rangle + \langle | E_y^2 | \rangle \quad (2)$$

则可知出射光矢量第一行的式子即为探测器 CCD 检测到的光强

$$I = \frac{I_0}{2} (1 - \cos 2\alpha \sin 2\theta \sin \delta + \sin 2\alpha \cos 2\theta \sin \delta) = \frac{I_0}{2} [1 - \sin \delta \sin 2(\theta - \alpha)] \quad (3)$$

因此当 α 取以下特殊角时,有

$$\alpha = 0 \text{ 时, } I_1 = \frac{I_0}{2} [1 - \sin \delta \sin 2\theta] \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{4} \text{ 时, } I_2 = \frac{I_0}{2} [1 + \sin \delta \cos 2\theta] \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} \text{ 时, } I_3 = \frac{I_0}{2} [1 + \sin \delta \sin 2\theta] \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{3\pi}{4} \text{ 时, } I_4 = \frac{I_0}{2} [1 - \sin \delta \cos 2\theta] \quad (7)$$

由式(4)~(7)可得到

$$\tan 2\theta = \frac{I_3 - I_1}{I_2 - I_4} \quad (8)$$

$$\sin \delta = \frac{I_3 - I_1}{(I_3 + I_1) \sin 2\theta} = \frac{I_2 - I_4}{(I_2 + I_4) \cos 2\theta} \quad (9)$$

或

$$\delta = \arcsin \sqrt{\left[\frac{I_3 - I_1}{I_3 + I_1} \right]^2 + \left[\frac{I_2 - I_4}{I_2 + I_4} \right]^2} \quad (10)$$

因此可以根据式(10)得到被测 1/4 波片的各点相位延迟分布,同时可以进一步根据式(8)得出其各点的快慢轴方向分布。

2 动态测量系统描述

将图 1 中的检偏器以一个自制的分光移相器代替,该分光移相器的结构如图 2,由二维正交光栅、一组成像透镜组、特制的空间滤波器和偏振阵列组成。对于二维正交光栅,其 $(\pm m, \pm n)$ 四个衍射级理论上具有相同的衍射效率,因此通过空间滤波器仅选取二维正交光栅的 $(\pm 1, \pm 1)$ 级衍射光作为测试光路,这样既保证了实验所需要的光强大小,同时也保证了光强之间的相互匹配;偏振阵列由四片透振方向依次相差 45° 的偏振片组成,这样根据上述测量原理,在每部分中分别引入了 $0^\circ, 90^\circ, 180^\circ$ 和 270° 的相移,然后由同一 CCD 同时采集这四幅经过不同相移量的图形;CCD 选取低照度高解析黑白摄像机 MTV-1881EX,电子快门时间最短可调节为 $1/10\ 000\ \text{s}$,这样可以根据不同的测量环境选择相应的电子快门时间,于瞬间同时“冻结”四幅移相图。将这些移相图输入 PC 机后,运用自编的软件,即可以实时地获得被测 1/4 波片的相位延迟分布。

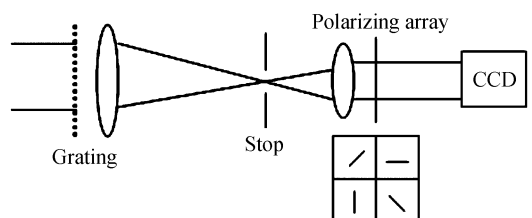


图 2 分光移相器的结构
Fig. 2 Sketch map for the structure of splitting phase-shifter

3 对一个实际的 1/4 波片进行检测和分析

运用上述空间分光移相结构对一个标称波长为 632.8 nm 的 1/4 波片进行相位延迟分布测量. 为了保证测量被测 1/4 波片所需要的圆偏振光场的质量, 以 Zygo GPI xp 型干涉仪出射的圆偏振光作为光源, 光源波长为 632.8 nm. 让该圆偏振光直接垂直照射到待测 1/4 波片表面, 通过图 2 的空间分光移相器, 在 CCD 的靶面上同时形成四幅具有 90° 移相步长的干涉图, 在对这些图进行了空间一致性校准后, 运用式(10)即可得到被测量波片的相位延迟分布图.

图 3 为对于该 1/4 波片的测量结果, 图 3(a)为一组空间移相干涉图, 图 3(b)为经过文中算法运行后的相位延迟分布, 经过计算, 其平均延迟量为 149.36 nm. 为了更加直观地显示其相位延迟的分布情况, 对该分布进行了误差的像素统计, 如图 4, 横坐标表示实际的相位延迟量与理论 1/4 波片的延迟量 158.2 nm 相比的误差, 纵坐标表示误差在一定范围内的像素总量占所有的有效像素量的百分比. 结果表明, 接近 75% 的测量结果误差在 5 nm 以内, 显示出较好的延迟均匀性. 而结果产生的误差主要表现在两个方面, 即相位延迟量的大小以及分

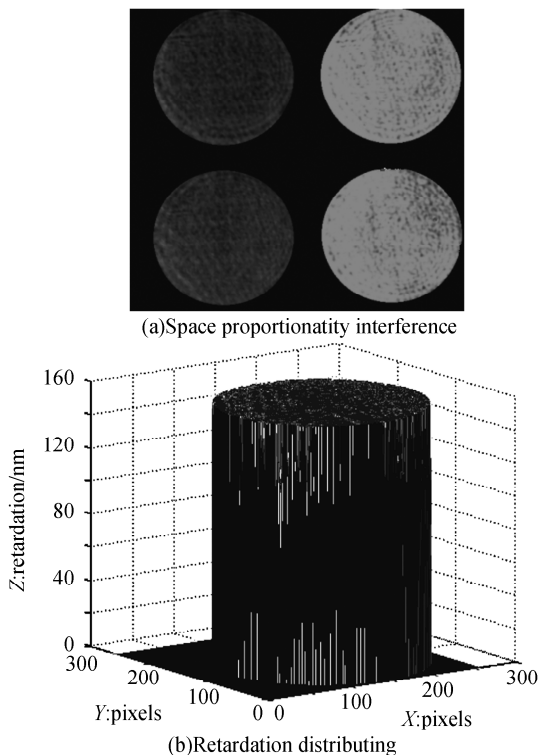


图 3 一组空间移相干涉图及其得到的被测波片的相位延迟分布

Fig. 3 Testing result for the retardation distributing of a quarter wave-plate

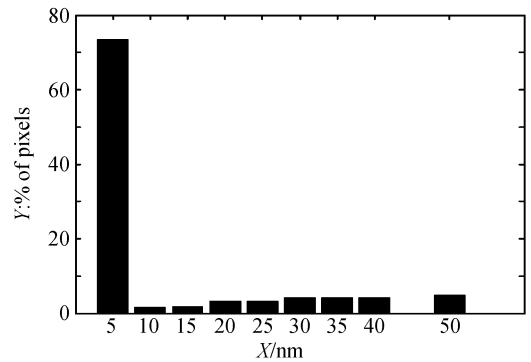


图 4 相位分布测量误差的像素统计

Fig. 4 Pixel Statistics of the testing result for the quarter wave plate

布, 影响前者的主要因素为移相器的移相效果和光学元件均匀性以及 CCD 感光元件的性能等, 这是因为干涉图是经过不同的空间路径形成的; 产生后者误差的主要原因在于运用文中算法前所采用的干涉图空间一致性分割算法误差, 四幅移相干涉图的空间一致性误差将会成倍地扩大结果误差的分布面积.

4 结论

本文在移相法测量波片相位延迟量的基础上, 采用了一种自制的空间分光移相器取代原理图中的检偏器, 从而可以于瞬间同时采集具有固定移相间隔的四幅干涉图, 通过空间一致性校准和算法程序, 可以实时得到被测量 1/4 波片的相位延迟分布. 由于采用了空间移相的方法, 对于环境的振动和空气的扰动能进行有效地防御和抵抗, 因此本方案可以用于对 1/4 波片相位延迟分布的动态在线检测.

参考文献

- [1] LIAO Yan-biao. Polarization optics [M]. Beijing: Science Press, 2003; 211-215.
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003; 211-215.
- [2] LI Gang, WANG Fei, YU Xin, *et al.* The research of increasing AO Q-switch's ability of switching in Nd : YAG laser by quarter-waveplate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2006, **35**(4): 490-493.
李港, 王菲, 于欣, 等. 波片提高声光 Q 开关关断 Nd : YAG 激光能力研究[J]. 光子学报, 2006, **35**(4): 490-493.
- [3] WANG Zheng-ping, LI Qing-bo, TAN Qiao, *et al.* Method to enhance the accuracy of retardance measurement of a quarter-wave plate[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(4): 628-631.
王政平, 李庆波, 谭巧, 等. 一种提高 1/4 波片相移测量准确度的方法[J]. 光子学报, 2005, **34**(4): 628-631.
- [4] XUE Qing-wen, LI Guo-hua. Measurement wave-plate retardation using compound composition method [J]. *Laser Journal*, 1996, **17**(2): 84-85.
薛庆文, 李国华. 复合补偿法测量波片的相位延迟[J]. 激光杂志, 1996, **17**(2): 84-85.
- [5] YAN Ming, GAO Zhi-shan. Phase shifting method for measuring the phase retardation of wave plates[J]. *Journal of*

- Photoelectronics • Laser*, 2005, **16**(2):183-187.
- 严明,高志山. 移相法测量波片的相位延迟量[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(2):183-187.
- [6] D'ACQUISTO L, PETRUCCI G, ZUCCARELLO B. Full field automated Evaluation of the quarter wave plate retardation by phase stepping technique [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2002, **37**:389-340.
- [7] HU Jian-ming, ZENG Ai-jun, WANG Xiang-zhao. 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.
- [8] YONEYAMA S, SHIMIZU M, GOTOH J, *et al.* Photoelastic analysis with a single tricolor image[J]. *Opt Lasers Eng*, 1998, **29**(6):423-435.
- [9] HOBBS J W, GREENE R J, PATTERSON E A. A Novel instrument for transient photoelasticity [J]. *Experimental Mechanics*, 2003, **43**(4):403-409.
- [10] ASUNDI A, TONG L, BOAY C F. Dynamic phase-shifting photoelasticity[J]. *Appl Opt*, 2001, **40**(22):3654-3658.
- [11] YONEYAMA S, KIKUTA H, MORIWAK K I. Simultaneous observation of phase-stepped photoelastic fringes using a pixilated microretarder array[J]. *Optical Engineering*, 2006, **45**(8):083604.
- [12] SHINTANI R, FAN Ai-ying, KANG Chang-He. Polarized light[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1994:60-69.
- 新谷隆一,范爱英,康昌鹤. 偏振光[M]. 北京:原子能出版社, 1994:60-69.

Dynamic Phase-shifting Interferometry for Full Field Retardation Distributing of Quarter Wave Plate

ZUO Fen^{1,2}, CHEN Lei¹, XU Chen¹

(1 School of Photoelectric Technology, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

(2 HuaiYin Teacher's College, Huaian, Jiangsu 223001, China)

Received date: 2007-06-10

Abstract: The measurement model for the retardation distributing of the quarter wave plate was introduced by Muller matrix and Stokes parameter. And four patterns with phase shifting of 90° in turn were caught simultaneously by an especial spatial splitting phase-shifter. Therefore, the introduced system has anti-vibration performance and the dynamic testing on line may be performed. An actual measurement of a quarter wave plate which wavelength is 632.8 nm was given out finally. Its averaging retardation was 149.36 nm, and there is about 75% of the testing area whose retardation error is less than 5 nm. So it had fine retardation uniformity.

Key words: Wave plate; Phase retardation; Phase-shifting technique; Dynamic testing



ZUO Fen received her B. S degree in the physics department of Nanjing Normal University, in 1996. Then she joined Huaiyin Teacher's College. Now she is a lecturer. She is pursuing Ph. D. degree in optical engineering at Nanjing University of Science and Technology. Her research interests focus on optical testing and laser applications.