

用晶体斜劈方法测量石英波片相位延迟的温度特性

许灿华 徐启峰 谢楠*

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

摘要 介绍了一种基于晶体斜劈的偏振光相位延迟量的精密测量方法,并将该方法用于测量零级和多级石英波片相位延迟量的温度特性。该测量方法不受光源功率波动的影响,相位测量精度可以达到 0.05° 。相比于传统的测量方法,晶体斜劈方法在相位测量过程中无需调节光学元件,可以实时地测量相位变化,而且该方法可用于任意光学元件引入相位延迟的精确测量,或推广到不同的光学波段。

关键词 物理光学;相位延迟量;单发测量;晶体斜劈

中图分类号 O439 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0212004

Using Crystal Wedge to Measure Temperature Dependence of Quartz Wave Plates' Phase Retardation

Xu Canhua Xu Qifeng Xie Nan

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350108, China)

Abstract An accurate measurement method of the polarized light's phase retardation based on the crystal wedge is introduced, and is applied to measure the phase retardation's temperature dependence of the zero- and multiple-order quartz wave plates. The measured results are insensitive to the power fluctuation of the light source, and the accuracy of the phase measurement can reach 0.05° . Compared to the traditional phase measurement, there is no adjustment of any optical components during the crystal wedge's experiments, the on-line phase detection can be realized. This method can be used at the phase retardation measurement of any optical components, or at the various optical wavelengths.

Key words physical optics; phase retardation; on-line measurement; crystal wedge

OCIS codes 120.5050; 120.6810; 230.5440

1 引言

波片作为相位延迟器件在偏振光控制中得到广泛的应用,是现代光学中激光技术、偏振光技术、应用光学等领域的关键器件^[1]。根据实际应用需要目前存在的波片类型很多,其中石英波片由于具有加工容易、光学性能良好和透射谱宽等特点而应用最广。根据总延迟量的不同,石英波片可分为多级波片和零级波片。例如 $1/4$ 波片的延时量可以表示为 $2\pi \cdot N + \pi/2$, N 代表波片的级数。而零级波片又可以分为有效厚度只有几十微米的真零级波片和较厚的胶合零级波片。后者采用两片快慢轴交错叠放的石英晶体胶合在一起而实现零级波片的功能。波片的相位延迟

在本质上是由光学材料的双折射特性引入的,因而波片材料的厚度以及折射率随温度的变化将带来相位延迟量的温度效应。在众多的波片应用领域如偏振态检测、光学传感、光通讯^[2-4]等都存在较大的环境温度变化,因此对波片温度特性的研究对于提高光学系统稳定性和探索温度补偿方案等方面都存在重要的意义。

由于石英波片相位延迟量随温度的变化非常微小,近年来国内才有关于多级石英波片温度效应的实验研究^[5-6]。而对于胶合零级以及真零级石英波片温度特性的研究,则需要更高测试精度的实验方法,目前还没有相关的报导。已有的波片延时量测

收稿日期: 2013-08-19; 收到修改稿日期: 2013-10-11

基金项目: 国家自然科学基金(51177016)、福州大学人才引进科研启动经费(022499)

作者简介: 许灿华(1978—),男,博士,讲师,主要从事光学电压电流传感方面的研究。E-mail: canhua_xu@siom.ac.cn

* 通信联系人。E-mail: xien551@gmail.com

量方法有:偏光干涉法^[7]、自校准椭圆偏测试法^[8]、采用光弹调制技术^[9]以及结合样品摆动和相位调制的方法^[10]等。这些方法通常需要旋转光学元件或者采用调制技术,并通过记录光功率来实现相位测量,不仅测试过程容易受到光源功率波动的影响,而且需要较长的测试时间无法进行实时测量。本文采用晶体劈与偏振光成像的方法测量相位延迟,可以在简单的光路中实现相位延迟量的单发测量,满足实时测量的需求。而且测试结果对光源功率波动不敏感,不需要信号调制设备。实验中采用该方法对多级、真零级和胶合零级的三种 1/4 波片的温度特性进行测量,相位测试的精度可以达到 0.05°。实验结果表明在 30 °C~90 °C 的温度范围内,这三种波片的相位延迟量随温度的变化呈现准线性关系,变化率分别为 0.17°/°C、0.024°/°C 和 0.007°/°C。

2 实验装置和测量原理

采用晶体劈测量波片相位延迟量的实验装置如图 1 所示,P 为单向偏振片。功率为 30 mW 的 808 nm 单横模激光二极管(LD)光源经过扩束后光斑直径为 10 mm,通过第一片偏振片后其偏振在竖直方向。1/4 波片的快慢轴与竖直方向呈 45° 放置,实验中利用 TEC 温控设备对波片进行温度控制。石英晶体劈的劈角放置在水平方向上,其快慢轴与波片的快慢轴方向一致。光束通过晶体劈后在光斑的不同水平位置上引入不同的光程差,最后通过第二片通光方向水平放置的偏振片后到达纸屏形成图样,用 1280 pixel×1024 pixel 的工业 CCD 相机采集并用 Labview 软件进行数据处理。

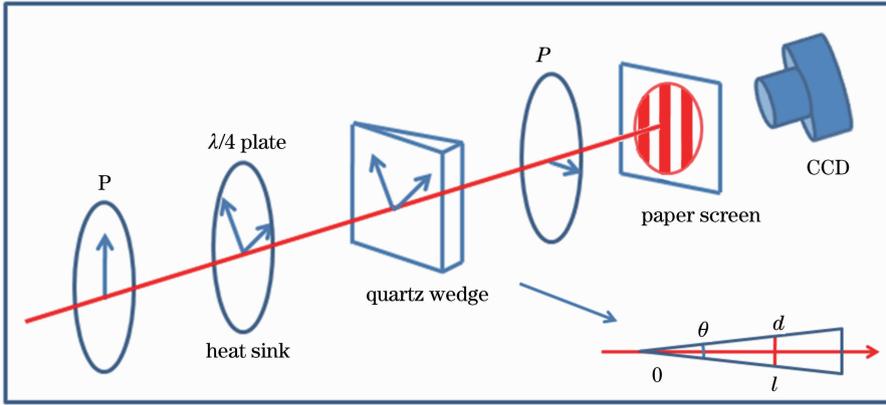


图 1 用晶体劈方法测量波片相位延迟的实验装置图,右下角的插图是俯视图中晶体劈厚度与位置的关系

Fig.1 Experimental setup of wave plate phase retardation measurement based on crystal wedge, the insert on the lower right corner illustrates the relation between thickness and position of the quartz wedge in top view

图 1 右下角的插图给出了俯视图中晶体劈厚度与位置的关系。假设晶体劈的顶点为坐标原则厚度为: $d=l\tan\theta$,其中 d 为晶体劈厚度, l 为晶体劈长度, θ 为晶体劈的顶角,即劈角。由晶体劈引入的在快慢轴方向的光程差与厚度有关:

$$\delta_c(l) = (n_e - n_o) \cdot d = (n_e - n_o) \tan \theta \cdot l, \quad (1)$$

式中 n_o 和 n_e 分别是石英晶体 o 光和 e 光的折射率。上述光程差为一个波长时对应的 l 称为全波行程:

$$l_\lambda = \frac{\lambda}{(n_e - n_o) \tan \theta}. \quad (2)$$

实验中所用的晶体劈劈角为 1°,在 808 nm 波长处,石英晶体的 n_o 为 1.544, n_e 为 1.553,则可以计算出全波行程为 5.142 mm。以波片快慢轴的方向作为 x 轴和 y 轴的取向,到第 2 片偏振片之前,整个器件的偏振光矩阵可表示为

$$\begin{bmatrix} A_x \\ A_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\left[i\frac{2\pi}{\lambda}\delta_c(l)\right] \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp[i\Delta\varphi_{\lambda/4}(T)] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\pi/4) \\ \sin(\pi/4) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中 $\Delta\varphi_{\lambda/4}(T)$ 是 1/4 波片引入的相位延迟量。经过第二偏振片后得到的光强是

$$I(l, T) = |A_x \cos(\pi/4) - A_y \sin(\pi/4)|^2 = 1/2 + \cos[\Delta\varphi(l, T)]/2, \quad (4)$$

式中

$$\Delta\varphi(l, T) = \frac{2\pi}{\lambda}\delta_c(l) + \Delta\varphi_{\lambda/4}(T). \quad (5)$$

从上面的推导可以看出来,纸屏上光斑的强度与 1/4 波片引入的相位延迟以及晶体劈不同位置上引入的相位差有关。当 $\Delta\varphi(l, T)$ 为相位 $\pi/2$ 的偶数

倍时,光强最大;为 $\pi/2$ 的奇数倍时,光强为零。最终在纸屏上会形成垂直方向的亮暗交错条纹,条纹的周期就是(2)式的全波行程的一半。而由 $1/4$ 波片引入的相位延迟表现在条纹的整体横向平移上。在未插入波片时对系统的条纹位置进行定位,加入波片后通过 CCD 测量条纹的移动量 ΔL ,则可以推导出波片引入的相位差为

$$\Delta\varphi_{\lambda/4} = \frac{\Delta L}{l_{\lambda}} \cdot 2\pi. \quad (6)$$

3 实验结果和讨论

实验采用的光源为带温控的 808 nm 单横模稳频 LD 光源,波长稳定性为 ± 0.02 nm,功率 30 mW 稳定性为 $\pm 1\%$ 。所用的石英晶体的劈角为 1° ,晶体劈的尺寸为 $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,放置方向如图 1 所示。实验样品的多级波片是 8 级 $1/4$ 石英波片、真零级和胶合零级 $1/4$ 石英波片。真零级波片的石英晶体厚度约为 $55\ \mu\text{m}$,带有 2 mm 石英玻璃

衬底。胶合零级波片由光轴呈 90° 放置的两片厚度分别为 0.5224 mm 和 0.4997 mm 的石英晶体胶合而成。

实验中 CCD 相机采集到的图像如图 2(a) 所示,出现等间距的亮暗条纹。条纹间距与晶体劈的倾角以及实际光路中光斑的放大率相关。两个条纹之间对应于相位的 180° 变化。为了消除光路中灰尘、杂质等带来的光强不均匀的影响,对图 2(a) 的光斑强度进行纵向积分,得到图 2(b) 的曲线,其中横坐标对应于图 2(a) 的横向的像素数值。在数据处理时 Labview 程序是对曲线的波谷进行定位,因而可以得到相邻暗条纹之间的间距对应于约 250 pixel。为了进一步增加相位测量的精度,将实验采集的光斑进一步放大,使得 CCD 相机得到的光斑仅包含两个暗纹,如图 3(a) 所示。图 3(b) 为对应的纵向光强积分,得到的曲线中两个波谷之间间隔了 722 pixel,对应的相位变化为 180° 。在实验中改变

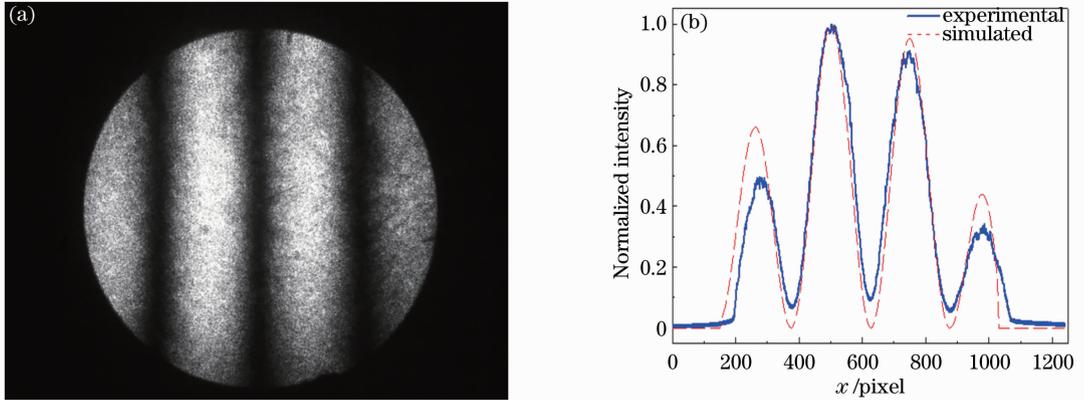


图 2 (a) CCD 相机采集到的含暗纹的实验光斑; (b) 光斑的纵向积分

Fig. 2 (a) Experimental spot with dark lines on CCD camera; (b) optical intensity integration along the vertical direction

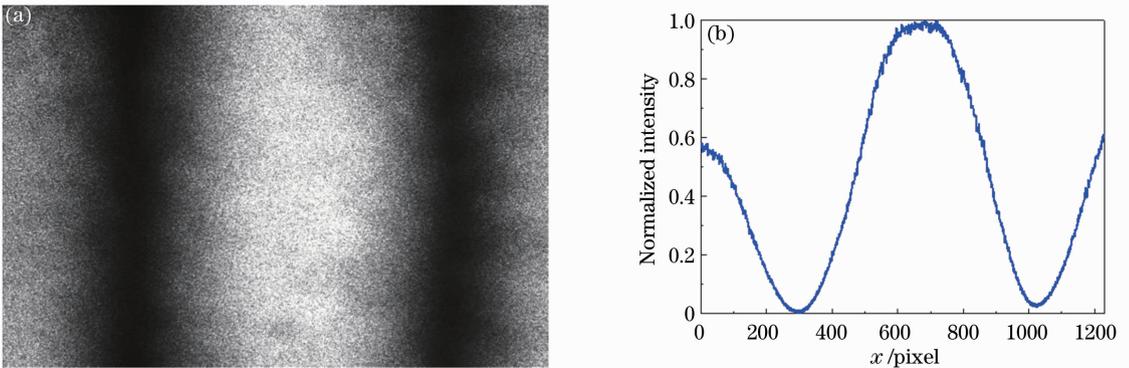


图 3 (a) 放大后的暗条纹及其 (b) 光强积分

Fig. 3 (a) Amplified dark lines and (b) optical intensity integration

波片的温度即可以改变偏振光的相位延迟量,从而使暗纹发生移动,通过测量暗纹移动量就可以得到相位的变化值。

实验中先将光源的偏振方向调节到与零级波片的快慢轴呈 45° 夹角,从而在两个偏振方向上引入 90° 相位延迟。对波片进行温控,温度从 $30^\circ\text{C}\sim 90^\circ\text{C}$ 变化,对应得到的波片引入的相位漂移量如图 4 所示。从图中可以看出,三种波片的相移都与温度变化呈准线性关系。温度从 30°C 变化到 90°C , 8 级、真零级以及胶合零级的 $1/4$ 波片相位变化分别为 10.1° 、 1.4° 和 0.3° 。线性拟合的结果显示相位随温度的变化率分别为: $0.17^\circ/\text{C}$ 、 $0.024^\circ/\text{C}$ 和 $0.007^\circ/\text{C}$ 。多级波片相位延迟的温度变化率较大是由于其晶体厚度(约 1 mm)比零级波片(有效厚度约 $55\ \mu\text{m}$)大很多。而胶合零级波片的温度特性比真零级波片好,一方面由于零级波片附带 2 mm 厚的石英玻璃衬底,可能带来附加的延时变化;另外胶合零级波片由温度特性相互补偿的两部分晶体组成,具有更好的温度稳定性。这在文献[11]中已有所分析。

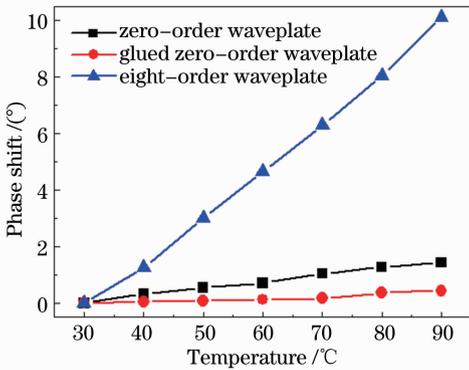


图 4 三种 $1/4$ 石英波片相移随温度变化的比较
Fig. 4 Comparison of the temperature dependence of three $1/4$ quartz wave plates

4 相位测量精度分析

采用晶体劈方法测量相位延迟不受光源功率波动的影响,从而可以得到较高的测试精度。由于实验测量的是波片在温度变化时相位延迟的相对变化值,所以由光路调节偏差等带来的相位延迟量绝对值的微小偏差的影响可以不予考虑。在严格光路调整后,影响测量结果的主要因素有光源的波长变化、晶体劈的温度变化以及光路振动的影响。实验中采用稳频率光源,其波长波动为 $\pm 0.02\text{ nm}$,由(2)式可以计算出波长波动引入的相位测量相对误差约为 2.5×10^{-5} ,可以忽略。实验室温度变化影响到晶体

劈材料的折射率、厚度和劈角的变化,这将引入较大的误差。通过石英材料的膨胀率和折射率的温度系数等可计算出如果环境温度变化 10°C ,在测试结果中引入的相对误差为 1.5×10^{-4} 。实验过程中用空调保持环境温度的变化小于 2°C ,则这部分影响也可以忽略。由于采取对暗纹位置的定位进行测量,实验结果对光路的振动比较敏感,需要尽量将光路缩短并且固定在共同的光学平台上以保证测试的精度。在没有改变实验参数的条件下,图 3(a)中的暗条纹积分后对应的像素位置的变化量为 0.2 pixel 。并且在实验中无论采用升温或降温的方式,在同样的温度下获得的实验结果的误差也在相同的范围内,具有很好的可重复性。由于图 3(b)中暗纹间距为 722 pixel ,对应于 180° 相位,则可以计算出相位的测量精度为 8.7×10^{-4} ,对应于 0.05° ,比文献[10]采用摆动样品方法的测试精度(0.17°)提高了近 3 倍,与文献[12]中采用双迈克耳孙干涉仪和数据采集系统测量的波片延时量的精度相当。而且该方法可以通过放大光斑、增加暗条纹的间距或者采用高分辨率的 CCD 相机采集图像来进一步提高测试精度。

5 结 论

使用晶体斜劈对偏振光的待测相位延时进行再调制,通过单向偏振片时可以得到一个与待测相位线性相关的含亮暗条纹的光斑。对该条纹的位置进行测量即可以得到待测偏振光的相位延时。由于该测试方法的测试结果不受光源功率波动的影响,其测试精度主要受制于 CCD 相机的分辨率,因而其相位测试的精度可达 8.7×10^{-4} ,对应于 0.05° ,因此具有很高的测试精度。而且在测试过程中无需调节光学器件,也不需要额外的调制设备,可以极大简化光路并且实现在线测量。相比于传统的相位测量方法,晶体斜劈方法不仅可用于光学器件的静态相位测量,并且在需要研究相位快速变化的化学、生物和光学传感等领域中将有重大的应用前景。

参 考 文 献

- Shintani Ryuichi, Fan Aiyi, Kang Changhe. Polarized Light [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1994. 1-18.
新谷隆一, 范爱英, 康昌鹤. 偏振光[M]. 北京: 原子能出版社, 1994. 1-18.
- Tang Feilong, Li Zhongliang, Bu Yang, *et al.*. Method of improving measurement accuracy of Stokes parameters [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0408006.
汤飞龙, 李中梁, 步 扬, 等. 一种提高偏振光斯托克斯参量测

- 量精度的方法[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0408006.
- 3 Pan Feng, Xiao Xia, Xu Yan, *et al.*. Optical AC voltage sensor based on two Bi₄Ge₃O₁₂ crystals [J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2012, 61(4): 1125—1129.
 - 4 Takanori Okoshi. Polarization state control schemes for heterodyne or homodyne optical fiber communications [J]. J Lightwave Technol, 1985, 3(6): 1232—1237.
 - 5 Mu Tingkui, Li Guohua, Song Lianke. Study on retardation variation behavior of quartz wave-plate follows temperature [J]. Chinese J Lasers, 2006, 33(7): 949—952.
穆廷魁, 李国华, 宋连科. 石英波片相位延迟随温度的变化行为[J]. 中国激光, 2006, 33(7): 949—952.
 - 6 Kong Qingdian, Song Lianke, Kong Lihua. Study about the temperature effect of the retardation of quartz wave-plates [J]. Laser Technology, 2008, 32(4): 374—376.
孔庆典, 宋连科, 孔丽华. 石英波片延迟量的温度效应研究[J]. 激光技术, 2008, 32(4): 374—376.
 - 7 Zhao Pei, Wu Fuquan, Hao Dianzhong, *et al.*. Measurement of the delay of the quarter wave plate by phase modulated ellipsometry [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(3): 379—382.
赵培, 吴福全, 郝殿中, 等. 1/4波片延迟量的相位调制椭圆偏测量法[J]. 光学学报, 2006, 26(3): 379—382.
 - 8 Hou Junfeng, Yu Jia, Wang Dongguang, *et al.*. Phase retardation measurement of wave plates based on the self-calibration method [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(4): 0408007.
侯俊峰, 于佳, 王东光, 等. 自校准法测量波片相位延迟[J]. 中国激光, 2012, 39(4): 0408007.
 - 9 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.
 - 10 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.
 - 11 P D Hale, G W Day. Stability of birefringent linear retarders (waveplates) [J]. Appl Opt, 1988, 27(24): 5146—5153.
 - 12 Kent B Rochford, C M Wang. Accurate interferometric retardance measurements [J]. Appl Opt, 1997, 36(25): 6473—6479.

栏目编辑：何卓铭