

文章编号: 1001-3806(2012)02-0258-04

连续偏光干涉法测量波片宽波段延迟量变化

王喜宝¹, 宋连科^{1*}, 朱化凤², 郝殿中¹, 蔡君古¹

(1. 曲阜师范大学 激光研究所 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 曲阜 273165; 2. 中国石油大学(华东) 物理科学与技术学院, 青岛 266555)

摘要: 为了测量石英波片宽光谱下相位延迟量, 根据连续偏光干涉原理, 提出了一种新的测量方法, 并给出了相应波长的延迟量数据处理办法。采用岛津 UV-3101PC 分光光度计双光路比对测量方法, 增加了采集数据的稳定可靠性, 获得了已知厚度的石英波片 300nm~800nm 波段的连续偏光干涉谱, 进行了理论分析和实验验证, 获得了波片的宽光谱相位延迟量数据。结果表明, 实验曲线和理论曲线吻合较好, 测量平均误差不大于 2°。这一结果对研究波片延迟量色散性质以及工艺进程的引导有重要实际意义。

关键词: 测量与计量; 物理光学; 相位延迟; 偏光干涉; 波片

中图分类号: O436.3 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.02.029

Measurement of wide-band phase retardation variation of wave-plates by means of continuous polarization interference method

WANG Xi-bao¹, SONG Lian-ke¹, ZHU Hua-feng², HAO Dian-zhong¹, CAI Jun-gu¹

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2. College of Physics Science and Technology, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266555, China)

Abstract: In order to measure the wide-band phase retardation variation of quartz wave-plates, a new method was proposed based on the principle of continuous polarization interference, and the data processing method for the corresponding retardation variation of each wavelength was given. In the method, relative measurement was carried out with the Shimadzu UV-3101PC spectrophotometer to increase the stable reliability of the data collection, and the continuous polarization interference spectrum of the quartz wave-plate in known thickness at 300nm~800nm wave band was obtained. Then theoretical analysis and experimental verification were carried out. The results show that the experimental curve and theoretical curve fit well, and the measurement of the average error is less than 2°. It has important practical significance for study on the retardation dispersion properties of the wave-plates and the guidance of the technical process.

Key words: measurement and metrology; physical optics; phase retardation; polarization interference; wave-plate

引言

波片作为一种光偏振态调制器件, 广泛地应用于信息技术中^[1]。石英单轴晶体物化性能稳定、机械强度高、透射谱宽、抗损伤阈值高, 是制作波片的首选材料之一, 由其制作的波片统称为石英波片。石英波片的主要光学技术参量是相位延迟量, 它与测量光源波长有直接关系, 目前对特定波长下的延迟量测量有多种办法, 如补偿法、电光调制法、光学外差法、 $\lambda/4$ 波片

法等^[2-5], 虽然这些方法的原理不同, 实现的难易程度和系统复杂程度相差较大, 但基本能够满足单波长测量的需要。资料显示石英波片延迟量的宽光谱测量一直是个难点, 以前的研究人员也曾对双折射材料的连续偏光干涉谱进行了探讨^[6-9], 主要是针对双折射材料双折射率及偏光干涉谱聚敛特性的研究, 也有作者提出了连续偏光干涉谱法测量波片延迟量的理论方案, 但没能给出测量范围内器件的任意波长处的相位延迟量的实验值。本文中通过对石英波片的偏光干涉谱的测量分析, 而且结合器件结构特性, 可以获得宽光谱范围内的器件光相位的延迟信息, 由此提出了一种新的测量分析方法。新的测量分析实验证明, 偏光干涉谱对于表征石英波片技术参量具有精确、直观、简单的优点, 特别适合指导石英波片的加工检测和器件的选择

基金项目: 山东省自然科学基金资助项目(Y2008A34)

作者简介: 王喜宝(1987-), 男, 硕士研究生, 主要从事偏光物理学与器件设计方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: lksong@mail.qfnu.edu.cn

收稿日期: 2011-07-26; 收到修改稿日期: 2011-08-26

使用,具有非常重要的实际意义。

1 连续偏光干涉法的测量原理

将光轴平行于表面的双折射晶片 W 放置在透振方向互相平行的两高消光比偏振棱镜之间,晶片的光轴方向相对第一棱镜 P_1 透振方向成 θ 角,如图 1 所示。线偏光经过晶片后分成的寻常光 o 光和非寻常光 e 光具有了固定的相位差,满足了光的干涉条件^[6]。由第二棱镜 P_2 出射的光强 I 为:

$$I = I_0 [1 - \sin^2 2\theta \sin^2(\delta/2)] \quad (1)$$

式中 I_0 为初始光的光强,是经过第一偏振器后的光强 δ 为 o 光和 e 光之间的相位差, δ 的大小取决于晶体材料的双折射率 Δn 和晶片的厚度 d 乘积以及光波波长 λ , 即:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n d \quad (2)$$

由(1)式和(2)式可知,当 θ 、 d 为确定值时,输出光强由 Δn 和 λ 决定;当 λ 改变时,双折射率 Δn 和光强也随之改变。

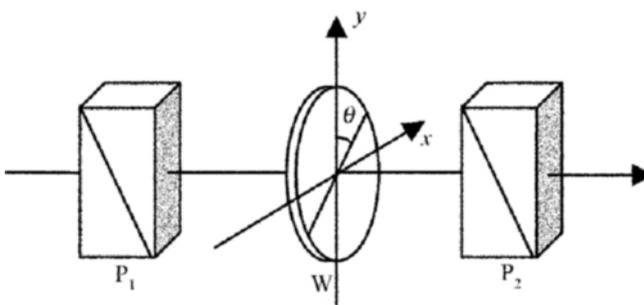


Fig. 1 Principle diagram of polarization interference measurement

根据(1)式,晶片的延迟量可以由下式表示:

$$\delta(\lambda) = 2 \arcsin \left[\frac{1 - T(\lambda)}{|\sin 2\theta|} \right]^{1/2} \quad (3)$$

式中, $T(\lambda)$ 是晶片的光轴与偏振器的透振方向成 θ 的角度时的透射比。由(3)式可知,在测得了晶片透射比随波长的变化曲线后,也就不难得到晶片所对应各波长下的相位延迟量,这就是测量石英波片宽波段内相位延迟变化的基本原理。

测量的过程中,为避免在整个光谱的范围内,仪器光源、光栅多次切换和光路吸收对测量结果的影响,为了提高 I_0 的稳定性,在数据测量时采用工作光路和参考光路的双光路方式,如图 2 所示。 P_1 和 P_3 分别为起偏器和检偏器, W 为波片样品,此为测试光路。参考光路中放置了一只与 P_1 规格型号相同的偏振器 P_2 ,其作用主要是尽量消除起偏器光谱吸收对测量的影响,其次是保证测试光路和参考光路有一个相同的偏振态,尽量消除了探测器 D_1 和 D_2 对入射光敏感性的影响,消除测量系统误差。

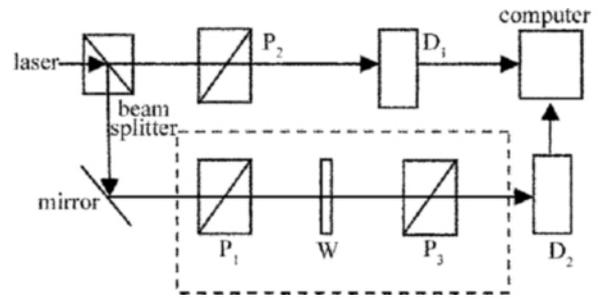


Fig. 2 Schematic diagram of continuous polarization interference measuring system

波片的光轴与偏振器 P_1 透振方向的夹角 θ 对连续偏光干涉谱的作用是只影响其峰值的幅度,根据(1)式和(2)式,给出样品厚度 $d = 857 \mu\text{m}$ ^[6] 的波片,在波长 620nm 处($\Delta n = 0.00906$)的输出光强 I 随 θ 的变化情况如图 3 所示。如果 θ 取值 45° ,得到的光强是最小的,在进行实验数据处理时最为有利,但在实验中不必严格保持 45° ,只要使得光强的变化足够大,能得到良好的连续偏光干涉曲线即可。

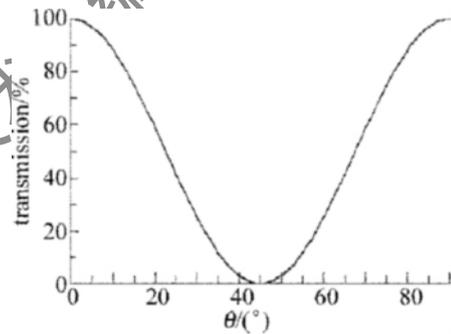


Fig. 3 Theoretical calculations of transmission changing with θ

放入石英波片后,样品的吸收和反射会使得偏光干涉系统测得的透射比峰值不严格为 1,这样在通过(3)式处理所得的测量数据时精确度就有问题,根据透射比与相位延迟量的对应关系^[7]:在某些分立的波长处,最大透射比为 T_{\max} ,称这些波长为峰波长,其对应的延迟量为 $2k\pi$ (k 为任意整数);在另一些分立的波长处,最小透射比为 T_{\min} ,称这些波长为谷波长,所对应的延迟量为 $(2k+1)\pi$;透射比值为 $(T_{\max} - T_{\min}) / 2$ 所对应的波长称为中值波长,所对应的延迟量为 $(2k+1)\pi/2$ 。鉴于此,根据(1)式得:

$$I_{\max} - I_{\min} = I_0 - I_0(1 - \sin^2 2\theta) = I_0 \sin^2 2\theta \quad (4)$$

$$I_{\max} - I = I_0 - I_0(1 - \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2}) = I_0 \sin^2 2\theta \sin^2 \frac{\delta}{2} \quad (5)$$

联立(4)式和(5)式,整理得到:

$$\delta = 2 \arcsin \left[\frac{I_{\max} - I}{I_{\max} - I_{\min}} \right]^{1/2} \quad (6)$$

由(6)式发现,数据处理中不需要考虑样品引起的光损失,即系统最大透射比也不需要为 1,只要系统测定最大值和最小值后,就可以得到其它位置处的延迟量,

亦即 2π 以内的有效相位延迟量;另外,由于本文中研究的不是旋光现象,所以对有效延迟量的符号也进行了忽略,但可以从后面的图中得出。

2 连续偏光干涉谱及数据分析

利用岛津 UV-3101PC 分光光度计测量系统,根据偏光干涉谱的聚敛特性^[8],为了提高区分度,设置分光光度计狭缝为 0.8nm,波长的间隔为 0.2nm,控制环境温度在 25℃ 时,对厚度 647 μm 石英波片进行常用波段 300nm~800nm 的连续扫描测量,所得连续偏光干涉谱见图 4。

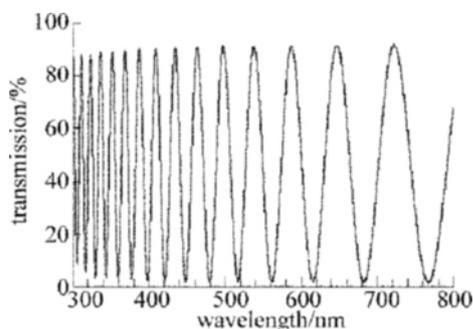


Fig. 4 Experimental polarization interference spectrum of quartz wave-plates

根据(6)式,对图4中的数据结果进行处理,得到了该波片的相位延迟量随着波长的变化曲线,如图5所示。

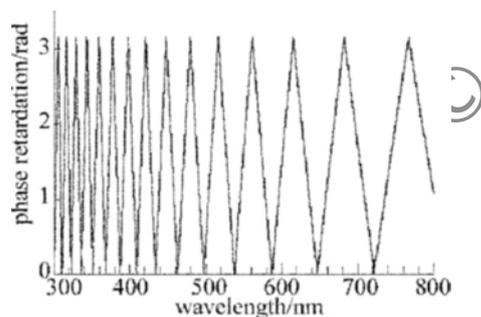


Fig. 5 Phase retardation curve according to polarization interference spectrum

理论上讲,在恒定温度下引起波片延迟量改变的因素主要是晶体双折射率的色散变化,如果清楚这一因素的影响,也不难得出波片相位延迟量的理论结果;经过实践检验,下面的石英晶体的双折射率色散公式^[10]更接近实际:

$$10^3 \Delta n(\lambda) = 8.86410 + 0.107057\lambda^{-2} + 0.0019893\lambda^{-4} - 0.17175\lambda^2 - 10^{-3} \Gamma(1 + \Gamma/900)(1.01 + 0.2\lambda^2) \quad (7)$$

式中,波长 λ 的单位为 μm ,温度 Γ 单位为 $^\circ\text{C}$ 。利用(7)式和(2)式,计算 647 μm 厚波片样品延迟量随波长的变化理论曲线,见图6。为了进一步了解实际测量结果与理论结果的符合程度,将图5和图6的相位延迟量做差,将形成的误差图像显示在图7中。

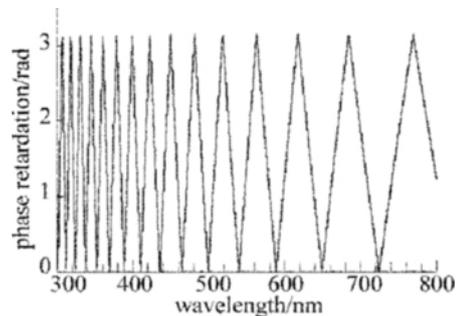


Fig. 6 Theoretical phase retardation

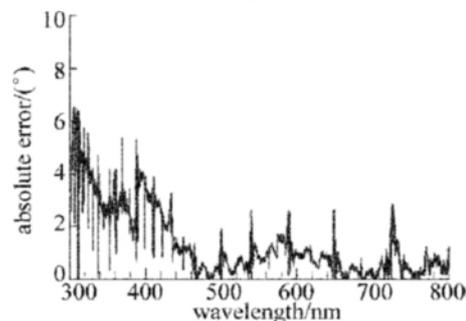


Fig. 7 Difference between experimental phase retardation and theoretical one

比较图5和图6可以看出,在分光光度计狭缝为 0.8nm,波长的间隔为 0.2nm 的情况下,实验测量所得到的曲线和理论曲线是基本符合的,相位延迟量极值点的位置基本在相同的波长处,但是仍然有一定的误差存在。为了更好地表示出这种误差,将图5和图6中表示相位延迟量的单位由 rad 转换为 $^\circ$,用图7明确地显示了绝对误差。

图7中 400nm~800nm 的波段内实验结果都是很好的,大多数波段的误差都在 1° 内,部分点的误差在 2° 内,只有个别点的误差较大,这些误差较大的点大多在相位延迟量的极小值处。在 300nm~400nm 短波长的区域误差较大,这与测量中分光光度计狭缝及波长取点间隔设置相对此区域较大有关。此结果与相关文献^[11]中的数据相比较,测量的结果还是非常准确的,尤其在较长波段的范围内准确度比较高,短波区的误差较大。

经过分析,认为误差主要来自下面几个方面:(1)用来获得石英理论双折射率所采用的(7)式是一个拟合公式,并不能无误差地反映出石英晶体双折射率随波长的变化;(2)在通过(2)式获取理论曲线时采用的波片的厚度有误差;(3)在测量过程中不能保证图1所示的波片 W 与入射光保持严格垂直,波片“多级”现象加剧了某些点的偏差;(4)短波区误差较大原因是:根据参考文献[8],在测量短波长区域时,设置越小的波长间隔和出射狭缝,连续偏光干涉谱的聚敛性弱,容易区分,本实验的误差会更小。但是,设置过小的波长间隔和出射狭缝宽度会影响长波区的谱线质量

而影响测量精度。实验中为了验证所提方法的有效性,仅选取了常见波段(300nm~800nm),并设置了较优的波长间隔和出射狭缝进行测量,但并不影响该方法对更宽波段的有效性。

3 结 论

对石英波片延迟量的宽光谱测量提出了一种行之有效的方法,并且在300nm~800nm波段范围内进行了实验验证。综合试验结果可以看出,实验与理论符合得较好,测量的平均误差 2° ,这对研究波片延迟量色散性质以及波片加工过程中工艺进程的引导有重要意义。该方法同样适应于其它波片的测量,只要设置好分光光度计的波长间隔和出射狭缝宽度,就能测得良好的连续偏光干涉谱,且会得到精确的波片相位延迟量。

参 考 文 献

- [1] WANG N, LI G H, ZHANG D W. A simple way of determining the phasic delay angle of wave-plate[J]. Journal of Qufu Normal University 2001 27(1): 47-49(in Chinese).
- [2] 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(in Chinese).
- [3] ZHAO P, WU F Q, HAO D Zh, *et al.* Measurement of the delay of the quarter wave-plate by phase modulated ellipsometry [J]. Acta Optica Sinica 2006 26(3): 379-382(in Chinese).
- [4] YU L L, JING F L, SEN Y L. Polariscopes for simultaneous measurement of principle axis and the phase retardation by use of two phase locked extractions [J]. Applied Optics 2004 43(34): 6248-6254.
- [5] XU W D, LI X Sh. A new method for measuring the phase delay of wave-plate [J]. Acta Optica Sinica 1994 14(10): 1096-1101(in Chinese).
- [6] SONG L K, LI G H, DAI Z X. Continuous birefringence measurement in 0.29 μm to 2.5 μm range by polarization interfering [J]. Journal of Optoelectronics • Laser 1996 7(6): 356-360(in Chinese).
- [7] FENG W W, LIN L H, CHEN L G. Polarized light interference spectrum of quartz wave-plate [J]. Acta Optica Sinica 2007 27(6): 1044-1048(in Chinese).
- [8] ZHOU W P, SONG L K, XU Y Q. Polarization interference spectrums gather characteristic in ultraviolet area of quartz [J]. Journal of Optoelectronics • Laser 2007 18(4): 501-503(in Chinese).
- [9] KONG D F, SONG L K, HAO D Zh, *et al.* Analysis of transmission spectrogram of quartz rotary crystal at normal temperature [J]. Laser Technology 2011 35(1): 106-108(in Chinese).
- [10] ENNOS A E, OPPERMAN K W. Birefringence of nature quartz [J]. Applied Optics 1966 5(1): 170.
- [11] LI J Zh. Handbook of optics [M]. Xi'an: Shaanxi Science Technology Publishing House 1986: 1304(in Chinese).

(上接第257页)

场均匀分布的因素。模拟结果显示:耦合夹角在0.4rad~0.9rad范围时,Y合波器输入光强分布比较均匀,基本维持在1:1范围;耦合夹角为0.6rad时,输入光场相互隔离,附加损耗低至0.45dB,传输效率接近90%。本文中的仿真结果在微纳光子集成及微纳米光波导中具有很重要的意义,且飞秒激光能够突破衍射极限,制作损耗小的微纳米光波导越来越受到人们的关注,飞秒激光直写光合波器的相关实验是进一步的工作。

参 考 文 献

- [1] HE F, CHENG Y. Femtosecond laser micromachining: frontier in laser precision micromachining [J]. Chinese Journal of Lasers 2007 34(5): 595-622(in Chinese).
- [2] GATTASS R R, MAZUR E. Femtosecond laser micromachining in transparent materials [J]. Nature Photonics 2008 2(4): 219-225.
- [3] DAVIS K M, MIURA K, SUGIMOTO N, *et al.* Writing waveguides in glass with a femtosecond laser [J]. Optics Letters 1996 21(21): 1729-1731.

- [4] HOMOELLE D, WIELANDY S, GAETA A, *et al.* Infrared photosensitivity in silica glasses exposed to femtosecond laser pulses [J]. Optics Letters 1999, 24(18): 1311-1313.
- [5] JEE S J, WOO J S, SOHN I B, *et al.* Application of femtosecond pulsed laser for optical devices [J]. Proceedings of SPIE 2004 5662: 185-189.
- [6] YANG W, CORBARI C, KAZANSKY P G, *et al.* Low loss photonic components in high index bismuth borate glass by femtosecond laser direct writing [J]. Optics Express, 2008, 16(20): 16215-16226.
- [7] MARCATILI E A J, MILLER S E. Improved relations describing directional control in electromagnetic wave guidance [J]. Bell System Technical Journal, 1969, 48(1): 2161-2188.
- [8] SUN G Ch, ZHOU Z G, YANG Y J, *et al.* Design of new type S-shaped optical waveguide low-loss bending path [J]. Laser Technology 2010 34(5): 690-693(in Chinese).
- [9] GAO R X, ZHENG J, QU Sh L, *et al.* Photowritten waveguides and gratings inside the fused silica glasses by femtosecond laser pulses [J]. Laser Journal, 2008, 29(4): 12-13 (in Chinese).
- [10] SALIMINIA A, NGUYEN N, NADEAU M C, *et al.* Writing optical waveguides in fused silica using 1kHz femtosecond infrared pulses [J]. Journal of Applied Physics 2003 93(7): 3724.