

文章编号: 1001-3806(2008)04-0374-03

石英波片延迟量的温度效应研究

孔庆典¹, 宋连科^{1*}, 孔丽华²

(1. 曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165; 2 曲阜师范大学 物理工程学院, 曲阜 273165)

摘要: 波片的精度会受到温度的影响。为了研究石英波片的延迟量随温度的变化关系, 以减小温度变化带来的误差, 采用理论分析的方法, 得出了石英波片在不同环境下使用时, 延迟量精度的影响因素, 同时对波片在不同环境下使用时的误差进行了分析。结果表明, 随温度的升高, 波片延迟量规律性的减小。研究结果对于波片在不同环境下的正确使用有一定的参考价值。

关键词: 光学器件; 温度效应; 理论分析; 波片

中图分类号: O436.3 **文献标识码:** A

Study about the temperature effect of the retardation of quartz wave-plates

KONG Qing-dian¹, SONG Lian-ke¹, KONG Li-hua²

(1. Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165 China; 2. College of Physics and Engineering Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract The precision of wave-plate is often influenced by temperature. In order to get the relationship between the retardation of quartz wave-plate and temperature so as to reduce the error generated by temperature, the factors affecting the retardation of the wave-plate were theoretically analyzed. At the same time, the error was analyzed under different conditions. The result shows that the retardation of the wave-plate reduces with the increase of temperature. The result is useful for the wave-plate properly used at different temperature.

Key words optical device; temperature effect; theoretical analysis; wave-plate

引 言

相位延迟器是偏光器件的重要组成部分, 它与偏光器件组合起来, 能够实现各种偏振态之间的转换及偏振面的旋转等, 在激光技术、应用光学、偏光技术、现代光通讯技术和太阳磁场观测等领域都有重要的应用。石英晶体^[1]是制作波片的主要材料之一, 但是当级数增加时其厚度就增大, 其相位延迟量受温度的影响也将增大。HAO, WANG 等人对波片相位延迟的测量方法做了报道^[2-7], 但对温度的影响考虑较少, 这将影响波片的使用精度。因此, 对波片延迟量温度效应的研究是很必要的。

1 延迟量变化的理论分析

石英波片具有面形好、二向色性小、透射区宽、结构牢固等优点, 但由于工艺因素, 其产品是以多级方式体现的, 使得延迟量对环境温度、波长及入射角的变化比较敏

感^[8-9]。多级波片的延迟相位级数可以从几十个多至上百个, 从延迟的物理效果上看与零级波片没有多大区别, 但当温度改变时, 级数越大, 受温度变化的影响越明显。

对于光轴平行于晶体表面的波片而言, 其延迟量满足如下关系:

$$\delta = \pm \frac{2\pi d(n_o - n_e)}{\lambda} = 2\pi N \quad (1)$$

式中, d 为波片厚度, λ 为入射光线的波长, n_o 和 n_e 分别为 o 光和 e 光的折射率, N 为波长的分数, 表示波片的相位延迟, 其整数部分就是多级片的级数。

当系统温度发生变化时, 波片的厚度和双折射率均要发生变化。

1.1 波片厚度随温度的变化关系

由光学手册可知^[10], 在 273K ~ 353K 的温度范围内, 石英垂直于光轴方向的厚度满足:

$$d' = d[1 + 1.337 \times 10^{-5}(T' - T)] \quad (2)$$

式中, d 和 d' 分别是温度为 T 和 T' 时波片的厚度。

1.2 双折射率随温度的变化关系

对于不同的波长, 折射率是不同的, 对于 589.3nm 的石英晶体满足^[10]:

$$\begin{cases} dn_o/dT = -5.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \\ dn_e/dT = -6.42 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1} \end{cases} \quad (3)$$

作者简介: 孔庆典 (1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事激光偏光技术、偏光器件方面的研究工作。

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

收稿日期: 2007-04-29; 收到修改稿日期: 2007-08-09

可见, 随温度的升高, 其折射率是不断减小的。在 23°C (296K) 时, $n_o = 1.54424$, $n_e = 1.55335$ 则对应于任意温度 T' 其双折射率应满足如下关系:

$$n_e' - n_o' = 0.00911 - (T' - 296) \times 1.12 \times 10^{-6} \quad (4)$$

1.3 延迟量随温度的变化关系

将 (2) 式、(4) 式代入 (1) 式可得 589.3nm 波片在温度 T' 下的延迟量为:

$$\delta' = 2\pi d' (n_e' - n_o') / \lambda = 2\pi d [1 + 1.337 \times 10^{-5} (T' - 296)] \times [0.00911 - (T' - 296) \times 1.12 \times 10^{-6}] / 589.3 \quad (5)$$

则石英波片在 T' 时的延迟变化量为:

$$\Delta\delta = \delta' - \delta \quad (6)$$

则有: $\Delta N = \Delta\delta / 2\pi$ 。结合以上各式可得:

$$\Delta N = N [1.09572 \times 10^{-4} (T' - 296) - 1.64373 \times 10^{-9} (T' - 296)^2] \quad (7)$$

可见, 温度的改变越大, 波片越厚, 即 N 越大, 则延迟量的改变越大。这为设计波片提供了一定的参考。

由 (5) 式可得 23 级 $\lambda/4$ 石英波片 (589.3nm) 的延迟量随温度的变化关系, 见图 1。

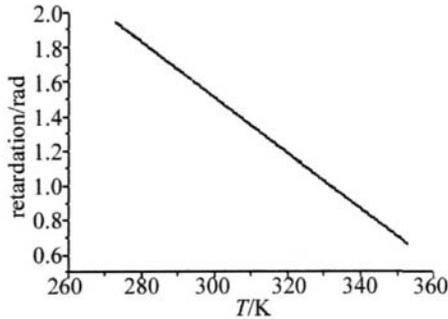


Fig 1 Relation between 23-level $\lambda/4$ quartz waveplate and temperature

可见, 随着温度的升高, 波片延迟量是不断减小的。计算可知, 对于 589.3nm 的 23 级 $\lambda/4$ 石英波片, 温度每升高 1K, 其延迟量约减小 0.016 rad, 而对于 30 级 $\lambda/4$ 石英波片而言, 温度每升高 1K, 其延迟量约减小 0.021 rad, 对于 632.8nm 的 23 级 $\lambda/4$ 石英波片而言, 温度每升高 1K, 其延迟量约减小 0.014 rad。

2 延迟量的测试

测量系统的光学原理如图 2 所示。其中, P_1 , P_2

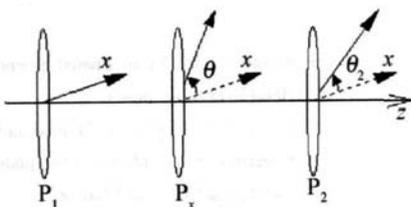


Fig 2 Figure of experiment theory

分别为起偏器、检偏器。取 P_1 的主轴方向为 x 轴, 入射光的传播方向为 z 轴, P_2 的主轴方向与 P_1 的主轴方

向成 θ_2 角, 待测波片 P_x 与 x 轴的夹角为 θ 。取 $\theta_2 = 45^\circ$, 则波片延迟量为^[11]:

$$\delta = 2 \arcsin \sqrt{(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})} \quad (8)$$

式中, I_{\max} , I_{\min} 分别为测得的最大与最小光强值。

实验装置如图 3 所示。其中, S 为光源; Z 为斩波

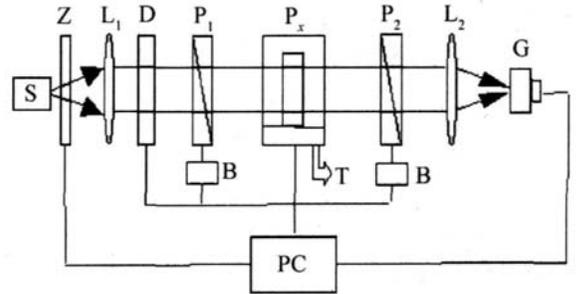


Fig 3 Figure of experiment devices

器; L_1 , L_2 为同规格的凸透镜; D 为单色仪; P_1 , P_2 为同规格的偏光镜; P_x 为待测波片, 置于温控装置 T 中; G 为光电探测器; B 为步进电机; PC 为计算机控制系统。

为提高接收系统灵敏度, 在光路中加入斩波器, 使光强成为交变信号, 计算机控制系统具有锁相放大器和数字电表的功能, 将完成光强的读取分析工作。

3 实验中的误差分析

3.1 光源系统

3.1.1 光源波动带来的误差 $\Delta\delta'$ 设光源强度的相对波动值为 $\Delta I/I$, 其相对误差为:

$$\frac{\Delta\delta'}{\delta'} = \frac{2}{\delta'} \arcsin \sqrt{\frac{\sin^2(\delta'/2) - \Delta I/I}{1 - (\Delta I/I) \sin^2(\delta'/2)}} - 1 \quad (9)$$

3.1.2 带宽 $\Delta\lambda$ 带来的误差 $\Delta\delta_2'$ 当存在一定带宽 $\Delta\lambda$ 时, 波片的相位延迟相对误差为:

$$\frac{\Delta\delta_2'}{\delta'} = \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \ln \frac{\lambda + \Delta\lambda/2}{\lambda - \Delta\lambda/2} - 1 \quad (10)$$

3.2 偏振光学元件

3.2.1 偏振元件的角度误差 两偏振器透光轴夹角不准确带来了误差 $\Delta\delta_3'$ 。在 P_1 , P_2 夹角 45° 附近区域, 其夹角误差对接收光强的最大值和最小值的影响相同, 设误差角为 $\Delta\theta_2$, 其相对误差为:

$$\frac{\Delta\delta_3'}{\delta'} = \frac{2}{\delta'} \arcsin \sqrt{\frac{\sin^2(\delta'/2)}{1 - \Delta\theta_2 \cos^2(\delta'/2)}} - 1 \quad (11)$$

3.2.2 偏振元件的光学缺陷 (1) 起偏器 P_1 的消光比不够理想带来的误差为 $\Delta\delta_4'$ 。设起偏器 P_1 的消光比为 α , 其带来的误差为:

$$\frac{2}{\delta'} \arcsin \sqrt{\frac{\sin^2(\delta'/2)}{(\alpha - 1)^2 - (\alpha^2 - 2\alpha) \sin^2(\delta'/2)}} - 1 \quad (12)$$

(2)检偏器 P_2 的消光比不够理想时也会带来误差。由 (8)式可知,此误差对结果无影响,故不考虑。

3.2.3 待测波片表面不完全垂直入射光路产生的误差 $\Delta\delta_3'$ 当入射角很小时^[3],波片延迟误差是随入射方位角而变化的。如果把置于光路中的波片绕平行于光轴的轴转动时延迟量增加,则绕垂直于光轴的轴转动时就会变小,难以逐一计算。在本光路中,按最大入射角为 1° 考虑,其误差为:

$$\Delta\delta_3'/\delta' = 0.006\% \quad (13)$$

3.3 几何光学系统

准直系统造成的光束偏离误差 $\Delta\delta_4'$ 类似于待测波片不完全垂直光路产生的误差,取相同值:

$$\Delta\delta_4'/\delta' = 0.006\% \quad (14)$$

3.4 其它误差

由于相位延迟是由光强的比值计算得出,因此,斩波器、单色仪、准直系统、会聚透镜等元件的吸收以及探测器的接收效率对结果没有影响。

3.5 综合误差计算

综合各种误差因素,若以均方差作为测量精度的评价标准,则其对测量精度的影响为:

$$\frac{\Delta\delta'}{\delta'} = \sqrt{\left(\frac{\Delta\delta_1}{\delta'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta_2}{\delta'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta_3}{\delta'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta_4}{\delta'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta_5}{\delta'}\right)^2 + \left(\frac{\Delta\delta_6}{\delta'}\right)^2} \quad (15)$$

在实验中,棱镜消光比为 $\alpha = 10^{-5}$,单色仪的最大带宽 $\Delta\lambda = 5.4\text{nm}$,光强波动相对值 $\Delta I/I = 0.2\%$,两偏振器夹角误差 $\Delta\theta_2 = 2.9 \times 10^{-4}\text{rad}$,测试波长取为 589.3nm ,

将 (9)式 ~ (14)式代入 (15)式,可得到系统延迟误差随温度的变化情况,如图 4 所示。

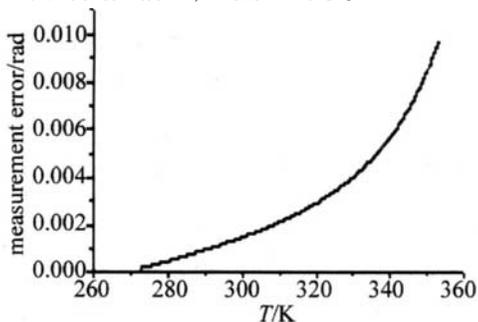


Fig. 4 Relation between retardation error and temperature

可见,随温度的升高,波片延迟量测量精度减小,亦即温度越高所带来的测量误差越大。由此,可以在

一定的误差允许范围内适当调节温度,以达到精确使用的目的。

4 小 结

分析可知,温度对延迟量的影响是不可忽视的,在使用波片时,一方面要设法提高延迟量精度,另一方面,也要注意减小环境变化引起的延迟误差。电光调制补偿测量波片延迟量是通过调整电光晶体电压来改变入射光相位,达到补偿波片相位到零相位或 π 相位,并通过对所加调制电压的计量处理得到波片的延迟量值。当用户温度与测量温度不一致时,可以根据以上的分析采取相应的补偿措施。

本文中主要以 589.3nm 的 23 级 $\lambda/4$ 石英波片为例,分析了其延迟量随温度的变化关系,结果表明,温度每升高 1K ,其延迟量约减小 0.016rad 同时对其延迟量在不同温度下测量时的误差进行了分析,得出了延迟误差与温度的变化关系。研究结果对于波片在不同环境中的正确使用有一定的参考价值。

参 考 文 献

- [1] JIANG M H. Crystal physics [M]. Jinan: Shandong Science and Technique Press, 1980: 315-351 (in Chinese).
- [2] HAO D Zh, LI G H, WU F Q. Intelligentized measurement of optical phase retardation [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(10): 1411-1414 (in Chinese).
- [3] YUN M J, LI G H. Phase retardation measurement with $\lambda/4$ wave plate [J]. Laser Technology, 2001, 25(5): 328-330 (in Chinese).
- [4] CHENG X T, LI Y Z, LIU C, et al. Method for measuring the retardation of a wave plate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2003, 30(7): 651-654 (in Chinese).
- [5] LOY L, LIN J F, LEE S Y. Polariscope for simultaneous measurement of the principal axis and the phase retardation by use of two phase locked extractions [J]. Appl Opt, 2004, 43(34): 6248-6254.
- [6] WANG Z P, LI Q B, TAN Q, et al. Method of measuring practical retardance value and judging the fast or slow axis of quarter wave plate [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(4): 523-528 (in Chinese).
- [7] 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).
- [8] SONG L K, WANG Z C. Discussion on the relations between bandwidth limitation of wave plates and retardation thickness [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 2000, 11(2): 170-172 (in Chinese).
- [9] WU F Q, WANG G H, LI G H. Compound effects of two $\lambda/4$ retarders [J]. Journal of Optoelectronics • Laser, 1998, 9(5): 399-400 (in Chinese).
- [10] LI J Zh. Handbook of optics [M]. Xi'an: Shanxi Science and Technique Press, 1986: 1304-1337 (in Chinese).
- [11] SUN Y Zh, WANG D G, ZHANG H Q, et al. Method and precision analysis for measuring retardation of infrared wave plate [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(5): 685-688 (in Chinese).