

文章编号: 1001-3806(2006)03-0274-03

波片延迟误差校正的理论与技术

张 剑, 李国华*

(曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 272165)

摘要: 从几何光学的理论出发, 研究波片延迟误差的校正方法。通过研究晶体延迟器件光线入射方向与其延迟量变化的关系, 从理论上导出了光线斜入射到波片时波片相位延迟量变化的计算公式, 从而证明了可以通过绕与波片光轴平行的轴向或绕垂直于波片光轴的轴向转动波片进行波片延迟误差的校正。用消光法和最小光强法分别对 $\lambda/2$ 波片和 $\lambda/4$ 波片进行了延迟误差的校正。结果表明, 波片的延迟误差可以通过转动波片的方法来消除。

关键词: 光学器件; 波片; 延迟量; 常光; 非常光

中图分类号: O734 文献标识码: A

The theory of correcting the retardation deviation of a wave-plate

ZHANG Jian, LI Guo-hua

(Laser Research Institute, Qufu Normal University, Qufu 272165, China)

Abstract The method of correcting the retardation deviation of a wave-plate through geometrical optics is studied. By means of exploring the relation of the orientation of incident light and the change of retardation of the crystal device, the formula for calculating the change of retardation of a wave-plate is derived when the incident light is oblique incident. Thus the retardation deviation can be corrected through rotating the wave-plate on the axis direction parallel to the optical axis or the axis direction vertical to the optical axis. The retardation of a $\lambda/2$ wave-plate and a $\lambda/4$ wave-plate is corrected by means of light extinction method and light minimum method respectively. Thus the deviation of retardation of wave-plate can be corrected by means of rotating.

Key words optical devices; wave-plate; retardation; ordinary light; extraordinary light

引 言

偏光技术应用中的光相位延迟器件常称为波片, 是光(尤其是激光)应用调制技术中最常用的重要光学器件之一。影响波片精度的因素很多, 如设计误差、加工误差、测量误差, 尤其是温度变化的影响等。对于高精度的测量和应用, 偏差必须校正, 尤其是多级波片。环境温度的变化引起的客观误差对延迟量的影响很大, $\Delta V_e = [\alpha + (\Delta n_e - \Delta n_o) / (n_e - n_o)]$ 表示的就是温度变化 1°C 时引起的波片延迟量的变化数值^[1-3]。式中, α 为垂直于光轴方向晶体材料的线膨胀系数; Δn_o 和 Δn_e 是给定波长下 o 光和 e 光折射率随温度的变化量。对于波片厚度为 1.973mm 的 $\lambda/4$ 波片 ($\lambda = 632.8\text{nm}$), 温度每变化 1°C 引起的延迟偏差约为 1° , 波片的使用环境温度如果与波片的加工温度 (20°C 左右) 相差 10°C , 就会引起相位延迟偏差近 10° , 对于只

有 90° 延迟量的 $\lambda/4$ 波片而言, 其偏差超过 11%, 这就完全超出了延迟器件产品的国际标准 5%^[4], 使用前必须对波片的偏差进行校正, 校正的方法是使波片绕平行光轴的轴向或垂直于光轴的轴向转动。

1 原 理

1.1 理论分析

首先, 从理论上讨论晶体波片绕不同的轴向转动, o 光和 e 光位相差的变化情况, 以及 o 光和 e 光的相对位移。

图 1 为厚度为 d 波片晶体光轴垂直纸面、其绕平

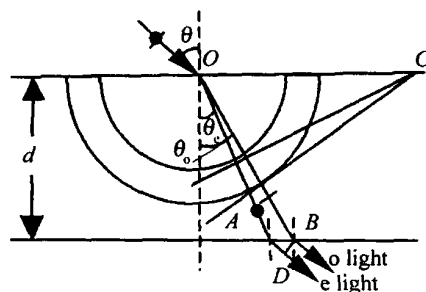


Fig 1 Optical axis vertical to the incident plane

作者简介: 张 剑 (1978-), 男, 硕士研究生, 主要从事偏光测量和偏光器件的设计工作。

* 通讯联系人。E-mail: gh16@163.com

收稿日期: 2005-01-29; 收到修改稿日期: 2005-02-28

行于光轴的轴向转动波片的情况。在此情况下, 光线由空气斜入射到波片, o光和 e光都足满足斯涅耳定律:

$$\sin\theta = \sin\theta_o n_o = \sin\theta_e n_e \quad (1)$$

式中, n_o 和 n_e 为晶体的主折射率。通过计算, 可得 o光、e光的相位差为:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} d \left(\sqrt{n_e^2 - \sin^2\theta} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2\theta} \right) \quad (2)$$

o光和 e光相对位移为:

$$\overline{BD} = \overline{AB} \cos\theta = d \left[\frac{1}{\sqrt{n_o^2 - \sin^2\theta}} - \frac{1}{\sqrt{n_e^2 - \sin^2\theta}} \right] \sin\theta \cos\theta \quad (3)$$

图 2 为光轴平行波片表面, 在 OC 方向的情况, 绕垂直于光轴的轴向转动波片的情况。

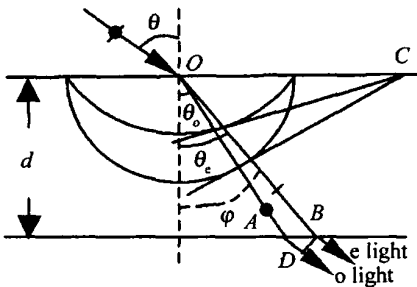


Fig 2 Optical axis parallel to the incident plane

在此情况下, o光仍然满足斯涅耳定律:

$$\sin\theta = \sin\theta_o n_o$$

e光光线与界面法线的夹角为^[5,6]:

$$\tan\theta_{e_s} = \frac{2n_o n_e n_1 \sin\theta}{(n_o^2 - n_e^2) \sin 2\varphi + \frac{2n_o n_e n_1 \sin\theta}{\sqrt{n_o^2 \sin^2\varphi + n_e^2 \cos^2\varphi} - n_1 \sin^2\theta}} \quad (4)$$

式中, φ 为光轴与界面法线方向的夹角, $\varphi = \frac{\pi}{2}$; $n_1 = 1$ 为空气的折射率。因此:

$$\tan\theta_{e_s} = \frac{n_e \sin\theta}{n_o \sqrt{n_o^2 - \sin^2\theta}} \quad (6)$$

通过计算, 可得 o光和 e光的相位差为:

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d(n_e - n_o)}{n_o} \sqrt{n_o^2 - \sin^2\theta} \quad (7)$$

o光和 e光的相对位移为:

$$\overline{BD} = \overline{AB} \cos\theta = \frac{d \sin\theta \cos\theta (n_e - n_o)}{n_o \sqrt{n_o^2 - \sin^2\theta}} \quad (8)$$

1.2 波片延迟量随入射角变化的讨论

以多级石英波片为例, 对波片的延迟量变化量 $\Delta\delta = \delta - \delta_0$ (其中 $\delta_0 = \frac{2\pi}{\lambda} d(n_e - n_o)$) 及 o光和 e光的相对位移进行计算, 取波片厚度 $d = 1.973\text{mm}$, 入射光

波长 $\lambda = 632.8\text{nm}$; $n_o = 1.54264$ $n_e = 1.55170$ 转动角度的取值范围为 $1^\circ \sim 15^\circ$, 计算机作图见图 3~图 6。

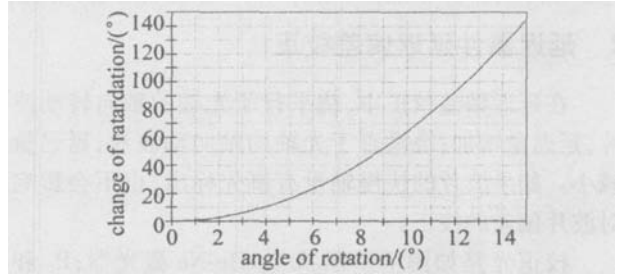


Fig 3 Change of retardation when the waveplate rotating on the axis direction parallel to the optical axis

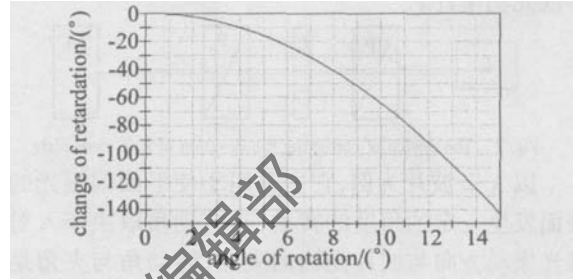


Fig 4 Change of retardation when the waveplate rotating on the axis direction vertical to the optical axis

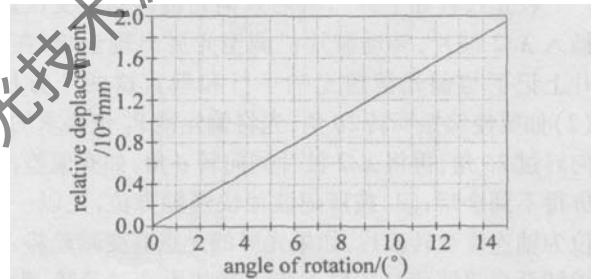


Fig 5 The relative displacement of normal light and extraordinary light when the waveplate rotating on the axis direction parallel to the optical axis

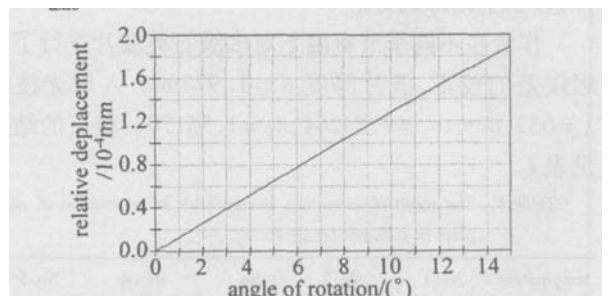


Fig 6 The relative displacement of normal light and extraordinary light when the waveplate rotating on the axis direction vertical to the optical axis

由图 3和图 4可以看出, 绕平行于光轴的轴向转动波片, 其延迟量增加, 绕垂直于光轴的轴向转动波片, 其延迟量减小。绕平行于光轴的轴向转动约 12° , $\lambda/4$ 波片变成了 $\lambda/2$ 波片; 绕垂直于光轴的轴向转动约 12° , $\lambda/4$ 波片变成了全波片。

图 5和图 6为 o光和 e光的相对位移, 即使波片转动到 15° 仍然很小。通常波片延迟量偏差不得超过 10%, 波片 $1^\circ \sim 2^\circ$ 的转动范围就可以使延迟偏差得到

完全的校正^[7]。在波片厚度不大的情况下,不会对出射光产生影响。

2 延迟器件延迟偏差校正

在延迟偏差校正中,绕平行于光轴的轴向转动波片,延迟量增加;绕垂直于光轴的轴向转动波片,延迟量减小。如果波片的快慢轴没有事先标出,也不会影响对波片偏差的校正。

校正光路如图 7 所示: L 为 HeNe 激光器; P₁ 和 P₂ 为 2 只格兰泰 勒棱镜; C 为被校正的波片; M 为光屏或光功率计。

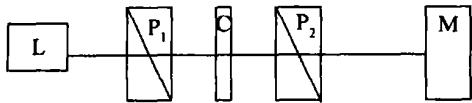


Fig 7 The device of correcting the deviation of half waveplate

以 $\lambda/2$ 波片为例,它主要用于使平面偏振光的偏振面发生一定的角度的转动,其转动角取决于入射偏振光振动方向与波片光轴的夹角,转动角与夹角是二倍角关系^[8]。

校正过程如下: (1)将两只偏光镜调到正交位置,插入 $\lambda/2$ 波片,转动波片仍调至光屏出现全暗,在波片上记下与偏光镜透光轴平行和垂直这两个方位; (2)如要使偏振面转 2θ 角,先将偏光镜 P₂ 按要求的方向转过 2θ 角,再将 $\lambda/2$ 波片同向转 θ 角,如有偏差,光屏得不到全暗; (3)按所记波片快慢轴方位,先以一方位为轴连续微转波片,如果光屏的光点有变暗趋势,继续转至全暗即调好; (4)上步调整如无变暗趋势,先让波片复位,在以与之垂直的方向为轴,仍连续微转波片,转至全暗即调好。

作者在不同季节室温下对多级石英波片进行了延迟误差的校正,波片厚度 $d = 1.973\text{mm}$, 入射光波长 $\lambda = 632.8\text{nm}$; $n_o = 1.54264$ $n_e = 1.55170$ 。校正的结果见表 1。

Table 1 The result of correcting the deviation of retardation of waveplate in different temperature

temperature	No 1	No 2	No 3	No 4	No 5
2C	4.9°	5.5°	6.0°	5.8°	5.2°
7C	5.6°	4.6°	5.4°	5.6°	5.1°
12C	3.6°	4.3°	4.7°	3.9°	4.5°
17C	3.1°	2.6°	3.4°	3.8°	2.9°
22C	0.5°	0.4°	1.0°	0.9°	1.2°
27C	2.8°	2.6°	3.5°	2.7°	3.2°
32C	4.2°	3.5°	4.2°	3.8°	4.8°

对于 $\lambda/4$ 波片,它的功能主要是将平面偏振光变为圆偏振光或椭圆偏振光,在校正时,多是将平面偏振光变为圆偏光。由于这种情况下不会产生全暗,而对光强的微弱变化,人眼的鉴别灵敏度是不高的,所以很难用光屏接受光信号,来鉴别 $\lambda/4$ 波片的延迟误差,须借助光功率计或其它光电转换器件,来显示校正中的光强变化^[9-11]。

3 小 结

从理论分析可以看出,当入射光偏离正入射方向时,对多级石英波片的延迟量要发生变化。本文中只讨论了正晶(石英)波片延迟量随入射倾角的变化,对于负晶可以得到相应的结果,而且可得出结论:对于正负晶体,绕平行于光轴的轴向转动波片,延迟量增加;绕垂直于光轴的轴向转动波片,延迟量减小。可以利用波片延迟量对入射倾角的敏感性对波片使用中的延迟偏差进行校正,并且校正中不需要事先知道波片的光轴。

参 考 文 献

- [1] SONG L K, LI G H, LI Y *et al*. The retardation error of multiple-order waveplate [J]. Journal of Qufu Normal University, 1994, 20(3): 53~56 (in Chinese).
- [2] SONG L K, LIN Ch Ch, LI H *et al*. Impact of discrepant dispersion relations of birefringent indexes on microwaveplate designing [J]. Journal of Qufu Normal University, 2001, 27(2): 44~46 (in Chinese).
- [3] SONG L K, LI G H, DA I Z X *et al*. Effect temperature on phase delay of waveplates [J]. Journal of Optoelectronics & Laser, 1997, 8(6): 454~457 (in Chinese).
- [4] LI G H. Polarization optics and technology experiment [M]. Qufu Qufu Normal University Press, 2000. 18 (in Chinese).
- [5] ZHAO J L. Advanced optics [M]. Beijing National Defence Industry Press, 2003. 106~107 (in Chinese).
- [6] ZHANG W Q. Accurate formulas of phase retardation and polarization aberration for waveplates in oblique incident beam [J]. Acta Optica Sinica, 1997, 17(8): 1121~1123 (in Chinese).
- [7] LI G H, LI J Zh. The relationship of dependence between the retardation of waveplate and the incident angle [J]. Journal of Qufu Normal University, 1988, 14(4): 97~101 (in Chinese).
- [8] HUANG H H. Optical matrix method and Fourier method [M]. Shanghai Tongji University Press, 1991. 23~29 (in Chinese).
- [9] YU Ch R. Determination of the phase delay angle of a waveplate with a quarter waveplate [J]. Laser Technology, 2003, 27(4): 383~384 (in Chinese).
- [10] SU M K, SUN M Sh. Phase retardation measurement for waveplates with a beam-splitting prism [J]. Laser Journal, 1999, 20(6): 16~17 (in Chinese).
- [11] XU W D, LI X Sh. A new method for measuring phase delay of waveplate [J]. Acta Optica Sinica, 1994, 14(10): 1096~1100 (in Chinese).