

复合式补偿器的温度效应

宋致堂¹ 李国华¹ 彭捍东¹ 孔凡美¹ 孔庆典^{1,2}

(¹ 曲阜师范大学激光研究所, 山东 曲阜 273165; ² 曲阜师范大学附属中学, 山东 曲阜 273165)

摘要 石英晶体有着较大的温度膨胀系数, 因而温度变化会引起石英晶体制作器件的使用误差。为了减小这种误差, 研究了二元复合式补偿器相位延迟随温度的变化情况。结果表明, 温度变化越大, 波片级数越大, 补偿相位受到的影响也越大; 理论计算表明, 补偿相位在一定的温度范围内与起偏镜转动的角度成线性关系。实验结果与理论结果相一致。该研究结果对于复合补偿器在不同环境下的正确使用有一定的参考价值。

关键词 偏振光学; 补偿器; 延迟量; 温度

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092906.1626

Temperature Effect of Composite Compensator

Song Zhitang¹ Li Guohua¹ Peng Handong¹ Kong Fanmei¹ Kong Qingdian^{1,2}

(¹ Institute of Laser Research of Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)
(² The Attached Middle School of Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)

Abstract Quartz crystal has a bigish temperature expansion coefficient, therefore temperature variation will cause use errors for quartz crystal devices. In order to reduce this error, we study the relation between composite compensator's phase retardation and temperature variation. The results show that the bigger the temperature change is and the order of wave plate, the bigger the influence on the phase retardation is. The phase retardation and the rotation angle of the polarizer exhibit a linear relation in definite temperature range. The calculated result is well in agreement with experiments. Our results provide a useful referrece for the proper employment of composite compensator under different situations.

Key words polarized optics; compensator; retardation; temperature

1 引言

复合式补偿器^[1~3]是偏光技术中重要的光学元件,它可以在一定范围内实现延迟量的连续调节,在激光技术、应用光学、光学调制中都有非常重要的应用。但是,其在使用的过程中不可避免地要受到外场的影响,其中温度场更是无法避免的。大多文献对波片相位延迟的测量方法做了报道^[4~9],对单元波片的温度影响也有报道^[10,11],但在复合补偿器的研究中未引进温度理论,这将影响复合波片的使用精度。因此,对其延迟量温度效应的研究是很必要的。石英晶体研制的复合式补偿器的测试表明,二元复合波片具有良好的消色差性能,具有较高的调整

精度,是一种比较理想的新型补偿器^[12]。本文通过研究温度对复合式补偿器的影响因素,可以采取一定的措施来减小温度带来的影响以提高其使用精度。

2 延迟量随温度的变化关系

光轴平行于晶体表面的波片延迟量满足如下关系^[13]:

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

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。

收稿日期: 2008-08-29; 收到修改稿日期: 2008-11-27

作者简介: 宋致堂(1979—),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。

E-mail: songzhitang2006@163.com

导师简介: 李国华(1937—),男,教授,博士生导师,主要从事偏光器件的设计和光学检测方面的研究。

E-mail: ghli@163169.net

当系统温度发生变化时,由于存在热胀冷缩,不仅波片的厚度要发生变化,而且双折射率也随之发生变化。

晶体石英的热膨胀系数满足如下关系^[14]:

$$\alpha = A \times 10^{-6} + B \times 10^{-8} T + C \times 10^{-11} T^2, \quad (2)$$

其中 A 是具有温度倒数的量纲, B 和 C 分别是具有温度平方和立方倒数的单位。在 $273 \sim 353$ K 的温度范围内, $A=13.37, B=C=0$ 。代入(2)式可得石英垂直于光轴方向的厚度满足如下关系:

$$d' = d[1 + 1.337 \times 10^{-5} (T' - T)], \quad (3)$$

d 为温度为 T 时波片的厚度, d' 为温度为 T' 时的厚度。

双折射率随温度的变化情况,要比厚度随温度的变化情况复杂,它与使用波长有关,对于不同的波长,折射率是不同的,以 632.8 nm 为例进行计算。对于石英晶体满足^[14]

$$\begin{cases} \frac{dn_o}{dT} = -5.47 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}, \\ \frac{dn_e}{dT} = -6.51 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (4)$$

由此可见,随温度的升高,其折射率是不断减小的。则对应于 23°C (296 K),任意温度 T' 下的双折射率应满足如下关系:

$$n'_e - n'_o = 0.00906 - (T' - 296) \times 1.04 \times 10^{-6}, \quad (5)$$

将(3)、(5)式代入(1)式整理可得 632.8 nm 波片在温度 T' 下的延迟量为

$$\delta' = 2\pi N [1 - 1.01420 \times 10^{-4} (T' - 296) - 1.53475 \times 10^{-9} (T' - 296)^2], \quad (6)$$

结合(1)、(6)式可以得出,温度变化越大(相对于 296 K)、波片级数越大,波片延迟量的改变就越大,延迟量与温度近似满足线性关系。

3 温度对复合式补偿器的影响

根据复合波片理论,设 δ_1 、 δ_2 分别为两波片的延迟量,两快轴的夹角为 α ,入射线偏光的振动方向与第一波片的快轴的夹角为 θ ,则该复合波片的延迟量 δ 满足^[15]

$$\tan \delta = -\frac{(\sin \delta_1 \cos \delta_2 + \cos \delta_1 \sin \delta_2 \cos 2\alpha) \sin 2\theta - \sin 2\alpha \cos 2\theta \sin \delta_2}{(\sin \delta_1 \sin \delta_2 - \cos \delta_1 \cos \delta_2 \cos 2\alpha) \sin 2\theta + \sin 2\alpha \cos 2\theta \cos \delta_2}, \quad (7)$$

可见 δ 是 α 和 θ 的函数。令 $\alpha=45^\circ$,若第一波片为 $\lambda/4$ 波片,第二波片为 $\lambda/2$ 波片,计算可知,总延迟量 δ 与 θ 满足如下关系:

$$\delta = 2\pi - 2\theta. \quad (8)$$

通过不断调节 θ 的值,就可以得到不同的 δ 。但是当温度发生变化时, δ_1 、 δ_2 均要发生变化。显然,(8)式条件不成立,但通过(7)式可以在理论上分析判断出 δ 与 θ 之间的关系。由(6)式可得复合波片中第一波片和第二波片的延迟量随温度的变化关系为

$$\begin{cases} \delta_1(T, n) = 2\pi \left(n + \frac{1}{4}\right) [1 - 1.01420 \times 10^{-4} (T - 296) - 1.53475 \times 10^{-9} (T - 296)^2], \\ \delta_2(T, n) = 2\pi \left(n + \frac{1}{2}\right) [1 - 1.01420 \times 10^{-4} (T - 296) - 1.53475 \times 10^{-9} (T - 296)^2], \end{cases} \quad (9)$$

其中 n 为波片的级数。为研究方便起见,假设两波片均为同一级数。将(9)式代入(7)式,并取 $\alpha=45^\circ$,可得

$$\delta(T, n, \theta) = \text{atctan} \left[-\frac{\sin \delta_1(T, n) \cos \delta_2(T, n) \sin 2\theta - \cos 2\theta \sin \delta_2(T, n)}{\sin \delta_1(T, n) \sin \delta_2(T, n) \sin 2\theta + \cos 2\theta \cos \delta_2(T, n)} \right], \quad (10)$$

可见,复合波片的延迟量 δ 与温度 T 、波片级数 n 、和旋转角 θ 有关。

结合(9)(10)两式,可得补偿器的延迟量 δ 与旋转角 θ 、温度 T 和波片级数 n 满足如图 1 所示变化情况。

图 1(a)为 23 级复合补偿器延迟量随旋转角的变化情况,图 1(b)为 10 级复合补偿器延迟量随旋转角的变化情况,图 1(c)为 23 级复合补偿器延迟

量随温度的变化情况,图 1(d)为复合补偿器随波片级数的变化情况。由图 1(a)、(b)可以看到,当温度发生变化时, δ 与 θ 成线性关系,相同级数的波片,温度升高时其延迟量是减小的,温度变化越大,延迟量变化的幅度越大;也可以看出波片级数越大,延迟量变化的幅度也越大;图 1(c)精确地给出了在旋转角和波片级数一定时延迟量随温度的变化情况,可以看出延迟量随温度的升高而减小,而且基本上成

线性关系,其线性度在 0.99 以上;由图 1(d)可知,在温度为 323 K 时延迟量随波片级数的增大是减小的,其变化关系基本也呈线性关系,线性度在 0.99 以上。总之,复合波片延迟量随温度的增大而减小,温度变化越大,波片级数越大,延迟量的变化也就越大。因此,在制作两元复合式补偿器的时候,应该尽量选用级数较小的波片;同时,当温度发生变化时,

可以通过计算适当调节 θ 的大小,以对 δ 加以补偿。如常温下,当 $\theta = \pi/2$ 时, $\delta = \pi$,但当 $T = 283$ K 时,为保证 δ 仍为 π ,应使 $\theta \approx 1.343$,这比 $\pi/2$ 要小约 0.17。而现在步进电机控制的精度可以达到秒的量级,完全可以满足调节的要求。

为便于对比,给出了 589.3 nm 波长相位补偿器的延迟量随夹角 θ 的变化情况,如图 2 所示。

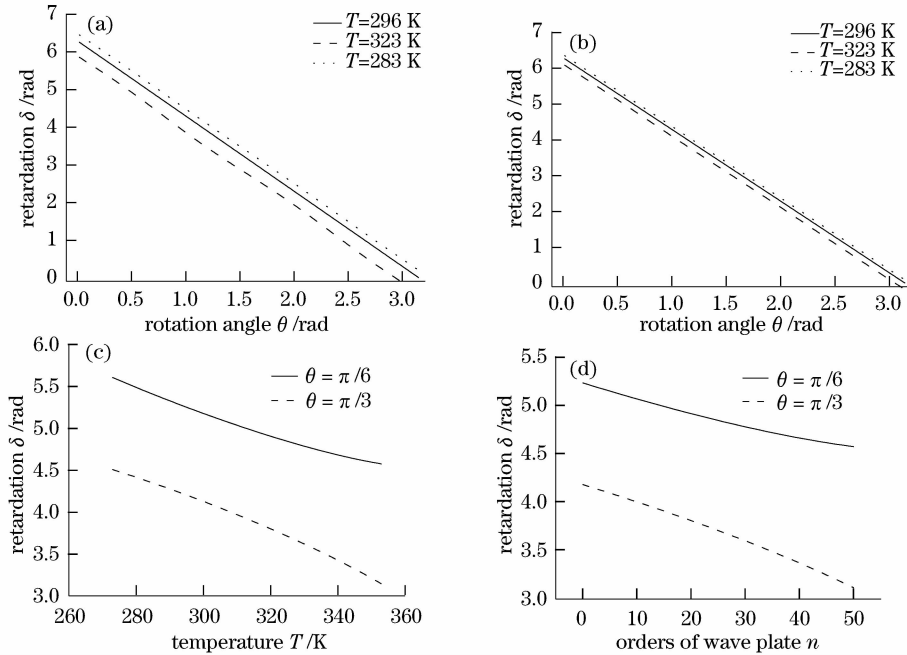


图 1 延迟量 δ 与旋转角 θ 、温度 T 和波片级数 n 的关系($\lambda = 632.8$ nm)(a) δ 与 θ 的关系($n = 23$) (b) δ 与 θ 的关系($n = 10$) (c) δ 与 T 的关系($n = 23$) (d) δ 与 n 的关系($T = 323$ K)

Fig. 1 Among θ , T , n and ($\lambda = 632.8$ nm) (a) between δ and θ ($n = 23$) (b) between δ and θ ($n = 10$) (c) between δ and T ($n = 23$) (d) between δ and n ($T = 323$ K)

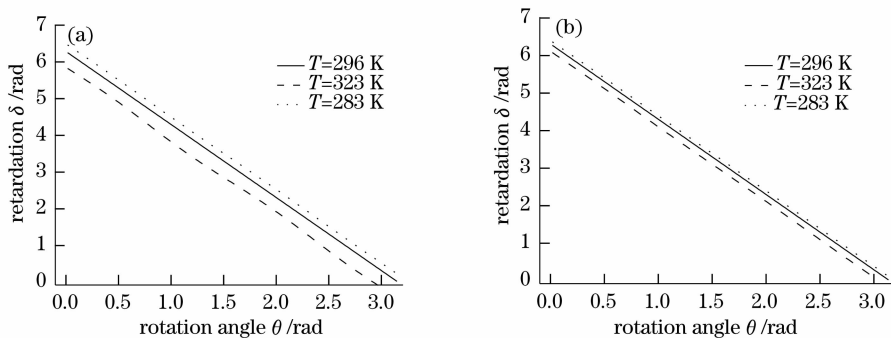


图 2 δ 与 θ 的关系($\lambda = 589.3$ nm)。(a) 23 级波片 (b) 10 级波片

Fig. 2 Relation between δ and θ ($\lambda = 589.3$ nm). (a) 23th-order wave plate (b) 10th-order wave plate

分别对比图 1(a)和图 2(a)、图 1(b)和图 2(b)可知,对于由同一级数的波片组合成的补偿器而言,温度发生相同的变化时,长波长波片组成的补偿器受到的影响要小。这是因为对同一级的波片而言,波长越长,其波片的双折射率越小,延迟量受温度的影响也越小^[10,11]。

由计算可知,温度为 323 K 时 θ_2 和 δ_2 近似满足: $\delta_2 = 5.8983 - 2.0124\theta_2$ 。表 1 是通过旋转 θ 测量得到的不同温度下的延迟量。

其中第一行为要求的延迟量值,第二行为 296 K 下计算得到的为获得此延迟量所需要的 θ 值,记为 θ_1 ;第三行为 323 K 下计算得到的为获得此延

迟量所需要的 θ 值, 记为 θ_2 。

表 1 不同温度及角度下测得的延迟量 /rad

Table 1 Retardation under different temperatures and angles /rad

δ	1.000	2.000	3.000	4.000
θ_1 (296 K)	2.635	2.143	1.641	1.134
θ_2 (323 K)	2.426	1.954	1.431	0.925

由表 1 可以看出, 当温度发生变化时, 可以从理论上计算得出 δ 和 θ 的关系, 当温度升高 27° 时 (相对于 296 K), 要得到相同的延迟量, 旋转角度要减小 0.2 rad 左右。通过适当调整 θ 的大小, 可以弥补温度变化带来的延迟偏差。因此, 当温度发生任意变化时, 均可以由此来弥补延迟偏差。这为复合式补偿器的精确使用提供了参考。

4 实验测量

本实验的实验装置如下图 3 所示。其中 S 为波长为 633 nm 的氦氖激光器; 在氦氖激光器后加上起偏器 P_1 和 $\lambda/4$ 波片的组合, 将光源由部分偏振光调制成为圆偏振光, 以消除该光源主偏振面旋转产生的影响。起偏器 P_2 和检偏器 P_3 为两个固定在步进电机上的 Glan-Taylor 棱镜; P_c 为待测复合式补偿器, 置于温控装置 T 中, 使复合式补偿器的两波片快轴的夹角固定为 45° , 由步进电机 B_2 带动其旋转; G 为探测器; P 为计算机控制系统。

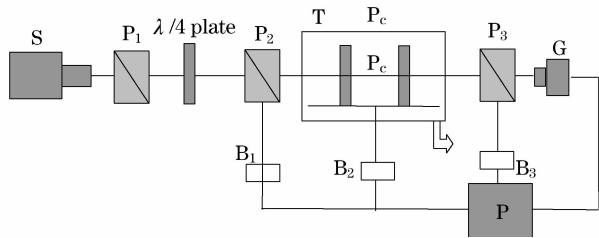


图 3 实验装置图

Fig. 3 Schematic diagram of experimental setup

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 45° , 则延迟为^[16]:

$$\delta = 2 \arcsin \sqrt{(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})}, \quad (11)$$

其中 I_{\max} 、 I_{\min} 分别为测得的最大光强值与最小光强值。

图 4 所示为 23 级 632.8 nm 波长相位补偿器在 323 K 时延迟量与旋转角度之间关系的理论值与实验值, 图 5 为 23 级 632.8 nm 波长相位补偿器在旋转角 $\theta = \pi/3$ 时延迟量与温度之间关系的理论值与实验值。可以看出, 实验值与理论值基本符合。

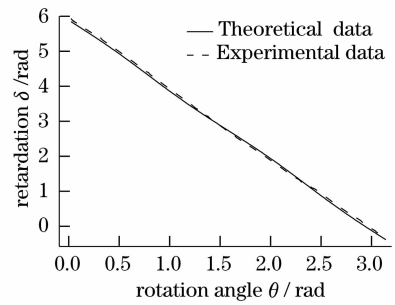


图 4 23 级 632.8 nm 补偿器在 323 K 时 δ 与 θ 的关系
Fig. 4 Between δ and θ at 323 K (632.8 nm, 23 orders)

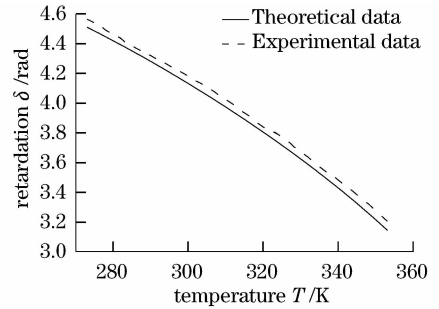


图 5 23 级 632.8 nm 补偿器 δ 与 T 的关系 ($\theta = \pi/3$)
Fig. 5 Relation between δ and T at $\theta = \pi/3$ (632.8 nm, 23rd-order compensator)

实验中误差是由多种因素造成的, 主要原因有:

- 1) 偏光棱镜 P_1 、 P_2 的夹角并不能严格地做到 45° , 必然存在误差;
- 2) 光源起伏, 使用稳压电源可控制在 2%;
- 3) 偏光器件的消光比不是十分理想带来一定的误差;
- 4) 入射光不完全垂直待测波片表面也会产生一定的误差。

5 结 论

温度的微小变化对石英复合补偿器的延迟都会产生一定的影响, 这是由石英材料 o, e 光折射率的温度线膨胀系数和波片的厚度不同所致。研究表明, 复合式补偿器的延迟量随温度的增大而减小, 当温度变化越大, 波片级数越大时, 复合式补偿器的相位受到的影响也越大。在温度为 $273 \sim 353$ K 的范围内补偿相位与旋转角度成线性关系。可以根据补偿器的特点, 通过计算适当改变这一角度以提高补偿相位的精确度。对于不同波长不同级数波片组成的补偿器而言, 其调节的程度是不同的, 要通过计算来确定。但是若要求调节的范围很大, 则温度发生变化时仅靠补偿器本身难以满足调节的要求。这时可以通过叠加补偿进行调制以满足这一要求, 如在补偿器后面加一电光晶体, 通过对电光晶体电压的调整来改变出射光相位, 通过对所加调制电压的计

量处理得到不同的延迟相位值。

参 考 文 献

- 1 Li Guohua, Su Meikai, Song Lianke. Linear composite plate compensator[J]. *Chinese J. Laser*, 1992, **19**(1):40~42
李国华, 苏美开, 宋连科. 线性复合补偿器[J]. *中国激光*, 1992, **19**(1):40~42
- 2 Su Meikai. Achromatic composite plate compensator [J]. *Optoelectronic • Laser*, 1990, **1**(1):48~52
苏美开. 消色差复合片补偿器[J]. *光电子 • 激光*, 1990, **1**(1):48~52
- 3 Yun Maojin, Li Guohua, Wang Mei. Three-in-one composite achromatic $\lambda/4$ wave-plate[J]. *Optoelectronics • Laser*, 2001, **12**(6):562~564
云茂金, 李国华, 王 梅. 三元复合式消色差 $\lambda/4$ 波片[J]. *光电子 • 激光*, 2001, **12**(6):562~564
- 4 Bo Feng, Zhu Jianqiang, Kang Jun. Precise measurement and factors analysis for phase retardation of wave plate[J]. *Chinese J. Laser*, 2007, **34**(6):851~856
薄 锋, 朱健强, 康 俊. 波片相位延迟的精确测量及影响因素分析[J]. *中国激光*, 2007, **34**(6):851~856
- 5 Sun Yingzi, Wang Dongguang, Zhang Zhiyong. On the intensity method for measuring waveplate phase decay[J]. *Astronomical Research & Technology*, 2008, **5**(1):74~82
孙英姿, 王东光, 张志勇. 波片相位延迟的光强测量法研究[J]. *天文研究与技术*, 2008, **5**(1):74~82
- 6 Xu Wengdong, Li Xishan. A new method for measuring phasedelay of wave plate[J]. *Acta Optica Sinica*, 1994, **14**(10):1096~1101
徐文东, 李锡善. 波片相位延迟量精密测量新方法[J]. *光学学报*, 1994, **14**(10):1096~1101
- 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 Jorg Schirmer, Theodor Schmidt-Kaler. Liquid crystal phase retarder with broad spectral range[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **176**:313~317.
- 9 Zhao Tingsheng, Li Guohua. A new method to measure the optical-axis azimuth of quarter-wave plate in light path accurately [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3):487~491
赵廷生, 李国华. 精确确定光路中四分之一波片光轴方位的新方法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3):487~491
- 10 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
- 11 Song Lianke, Li Guohua, Dai Zuoxiao *et al.*. Effect of temperature on phase delay of wave plates[J]. *Optoelectronics • Laser*, 1997, **8**(6):454~457
宋连科, 李国华, 代作晓 等. 波片延迟相位温度效应研究[J]. *光电子 • 激光*, 1997, **8**(6):454~457.
- 12 Xue Dong, Li Guohua, Hao Dianzhong. Achromatic analysis of the two-in-one composite $1/4$ wave-plate[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(2):184~192
薛 冬, 李国华, 郝殿中. 复合消色差 $1/4$ 波片的再研究[J]. *激光技术*, 2004, **28**(2):184~192
- 13 Jiang Minhua. *Crystal Physics* [M]. Jinan: Shandong Science and Technique Press, 1980. 315~351
蒋民华著. 晶体物理[M]. 济南: 山东科技出版社, 1980. 315~351
- 14 Li Jingzhen. *Handbook of Optics* [M]. Xian: Shaanxi Science and Technique Press, 1986, 1337
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986, 1337
- 15 Li Guohua, Su Meikai, Song Lianke. The study of composite retardation plate[J]. *Journal of Qufu Normal University*, 1990, **16**(3):54
李国华, 苏美开, 宋连科. 复合延迟片研究[J]. *曲阜师范大学学报*, 1990, **16**(3):54
- 16 Wang Wei, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. A new method for measuring wave plate phase delay and fast axis azimuth [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12):1221~1223
王 伟, 李国华, 吴福全 等. 测量波片延迟量和快轴方位的新方法[J]. *中国激光*, 2003, **30**(12):1221~1223