

文章编号: 0258-7025(2006)07-0949-04

石英波片相位延迟随温度的变化行为

穆廷魁, 李国华, 宋连科

(曲阜师范大学激光研究所, 山东 曲阜 273165)

摘要 介绍了波片的相位延迟量随温度的变化行为, 并提出一种测量相位延迟量的方法。由于温度的变化会对波片的相位延迟量产生影响, 从而影响波片的使用精确度, 为减小此影响, 提高波片在不同温度下的使用精确度, 需要对波片的特性进行分析。理论和数值地分析了石英波片的温度特性, 得到石英波片的折射率温度系数和热膨胀系数的关系及折射率温度系数与波长的关系, 为正确设计和使用波片提供参数选择依据。一块厚约 1.8 mm 的波片, 对应波长 632.8 nm, 温度每升高 1 °C, 其延迟量约减少 1°。针对石英波片在不同温度下使用时的不足之处, 提出一种测量方法(即电光调制法)用来测量波片的相位延迟量, 当信号电压控制在 ±700 V 时, 其延迟测量精度可控制在 1% 以内。

关键词 偏振光学; 相位延迟变化; 温度效应理论; 石英波片

中图分类号 O 436.3 **文献标识码** A

Study on Retardation Variation Behavior of Quartz Wave-plate Follows Temperature

MU Ting-kui, LI Guo-hua, SONG Lian-ke

(Laser Institute, Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China)

Abstract The variation behavior of phase retardation of wave-plate with temperature was introduced, and the electro-optic modulation method was put forward to measure the phase retardation. The variation of temperature has an effect on the phase retardation, thus influencing the useful precision of wave-plate. In order to reduce this negative effect and improve the precision under different temperature conditions, the properties of the wave-plate should be analyzed. The temperature properties were analyzed theoretically and mathematically, then relationship between coefficient of thermal expansion and temperature coefficient of refractive index was obtained. The relationship between temperature coefficient of refractive index and wavelength offered theoretical basis and parameter choice basis for correctly using and designing wave-plate, respectively. The retardation would reduce 1° when the temperature increased 1 °C for the wave-plate with thickness of 1.8 mm and wavelength of 632.8 nm. According to the application shortage of wave-plate in different temperatures, the electro-optic modulation method was presented to measure the phase retardation, if the voltage was controlled within the range of ±700 V, the precision of measuring would be within 1%.

Key words polarization optics; phase retardation variation; temperature-effect theory; quartz wave-plate

1 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相互转换及偏振面的旋转等, 在激光技术、应用光学、

偏光技术中都有非常重要的应用, 几乎所有应用偏光器件的地方都离不开相位延迟片。石英晶体^[1]是制作波片的主要原料之一, 它本身的特性决定了其多被做成多级片, 当级数增加时厚度就增大, 其相位延迟量受温度变化的影响也将增大。曾有资料做过

收稿日期: 2005-09-26; 收到修改稿日期: 2006-01-07

作者简介: 穆廷魁(1982—), 男, 安徽淮北人, 曲阜师范大学激光研究所硕士研究生, 主要从事偏光检测和非线性光谱学方面的研究。E-mail: tkmu2000@163.com

导师简介: 李国华(1937—), 男, 山东人, 曲阜师范大学激光研究所所长, 教授, 主要从事偏光器件设计和光学检测方面的研究。E-mail: ghli@163169.net

波片的相位延迟测量^[2~6]工作研究,但都没有考虑温度的影响,而且在复合消色差波片的研究中^[7,8]也未引进温度理论,这样会影响波片的使用精确度,在设计和使用波片时应考虑温度效应和其他方面的影响,对其他方面的效应已有资料^[9~11]报道过。本文根据石英晶体的特性分析石英波片延迟量随温度的变化行为,利用推导出的晶体折射率温度系数和线膨胀系数来反映相位延迟的变化。文中提出一种精确的测量方法(即电光调制法)来测量波片的相位延迟量。

2 基本理论

2.1 波片理论

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^[1],但其延迟量对环境温度、波长及入射角的变化比较敏感^[9,10]。多级波片的延迟相位级数从几个到上百个,从延迟效果上看与零级波片没有多大区别,但随着波片级数的增加,受温度变化的影响也越来越显著。我们将从波片的延迟公式出发推导其受温度的影响,延迟量表示为^[1]

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

式中 $(n_e - n_o)$ 为材料的双折射率, h 为波片的厚度, N 为波片级数。如果把置于光路中的波片绕平行于波片光轴的轴(或绕垂直于光轴的轴)转动,都会引起延迟量的变化,如果绕平行于波片光轴的轴转动时延迟量增加,则绕垂直于光轴的轴转动时波片的延迟量就会变小。波片的这一特点给使用带来一定的好处,用旋转波片的方法可以对因温度变化等其他原因产生的误差进行校正。

2.2 温度效应理论

通过对延迟量进行微商能比较清晰地展现温度对它的影响,延迟量的变化将由材料的折射率温度系数和热膨胀系数来表现。可以将(1)式改写为

$$\delta = knh, \quad (2)$$

式中 $k = 2\pi/\lambda$, $n = (n_e - n_o)$ 为石英的双折射率。当温度发生变化时会产生热膨胀,双折射率也会发生变化,延迟量随温度的变化为

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{d(knh)}{dt} = knh \left(\frac{1}{h} \frac{dh}{dt} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} \right), \quad (3)$$

温度变化对延迟量影响的大小可用温度系数 γ 来定义,由(3)式知

$$\gamma = \frac{1}{\delta} \frac{d\delta}{dt} = \left(\frac{1}{h} \frac{dh}{dt} + \frac{1}{n} \frac{dn}{dt} \right), \quad (4)$$

由于波片入射端面是平行于光轴设计的,可令垂直光轴方向波片的线膨胀系数为 $\chi = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt}$,将它代入

(4)式,则有

$$\gamma = \chi + \frac{1}{n} \frac{dn}{dt}, \quad (5)$$

由此可看出(4)式不仅反映了材料的温度系数和热膨胀系数对延迟相位的影响,而且还反映了波片厚度的影响。由于不同晶体的温度系数不同,同一种晶体在不同温度下的温度系数也不相同,因此即使是温度微小的变化也会对波片的延迟量产生比较明显的影响。

由(1)式,同样也可以得到温度发生变化时,波片级数 N 值的变化量为(忽略二阶项)

$$(\Delta N)\lambda = \pm [\Delta h(n_e - n_o) + h(\Delta n_e - \Delta n_o)], \quad (6)$$

则有 $\chi = \frac{1}{h} \frac{dh}{dt} = \frac{\Delta h}{h}$,将它代入(6)式有

$$\Delta N = \pm N \left(\chi + \frac{\Delta n_e - \Delta n_o}{n_e - n_o} \right), \quad (7)$$

从(7)式可以看出随波片级数(即厚度)的增加,温度变化对延迟相位的影响会越来越显著。在设计波片时如果参照这一现象进行优化设计,可以提高波片的精确度。

3 延迟量随温度的变化行为

因为不同材料的折射率温度系数和热膨胀系数存在的差别很大,所以引起的波片相位变化也各有不同。用石英晶体设计波片时,为了确保延迟相位的精度,材料的精确度必须达到 10^{-5} 以上。当波长为632.8 nm时,石英双折射率温度系数近似为 $d(n_e - n_o)/dt = -1.0 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 左右,现在将这个数值代入(7)式,并取 $n_e - n_o = 9.05 \times 10^{-3}$, $\chi = 13.41 \times 10^{-6}$,则单位温度延迟相位变化量为 $\Delta N \approx \pm 9.83 \times 10^{-5} N$,当取 N 为一常规设计值23.25,则 $\Delta N \approx \pm 2.07 \times 10^{-3}$,约相当于 0.78° ,它反映的是波长为632.8 nm的第23级1/4波片对应的单位温度相位变化情况。图1为石英晶体双折射率的温度系数与波长的关系曲线。

由图1可以推知当温度升高时,波片的相位延迟反而减小,且随着波长的增大,相位变化趋势缓慢;该曲线还反映了不同的波长下,波片受温度影响下的延迟量的改变趋势。经过计算可知以波长541.5 nm设计的石英波片, $N = 23.5$ 时,温度每升

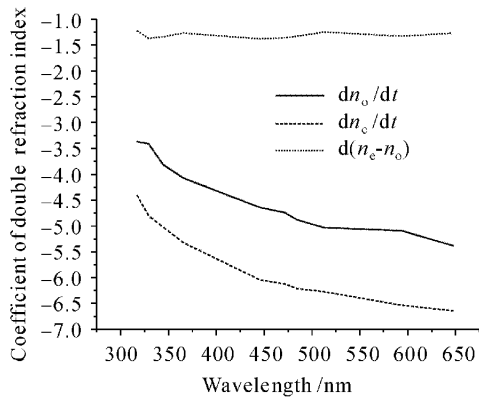


图 1 石英波片双折射率的温度系数与波长的关系

Fig. 1 Relation between temperature coefficient of double refraction index and wavelength in the quartz wave-plate

高 1 °C，相位约减小 1°；对 1083 nm 波长，相位只减小了 0.5°。

4 测量延迟量的电光调制法

由于温度变化引起的延迟量的改变非常敏感，就需要一种能补偿温度变化引起的延迟量改变的方法，在尝试多种方法后^[3~5]，应用电光调制法来进行测量可以减小温度的影响。图 2 中从左到右各个器件依次是激光器 L，起偏器 P₁，电光晶体 E，波片 W，检偏器 P₂，探测器 D，调制电压 V_D。激光束经 P₁ 起偏后进入电光晶体 E，穿过波片 W 后经过检偏器 P₂ (P₁, P₂ 的透射电矢量正交) 到达探测器 D。图 3 中的 N₁, N₂ 表示 P₁, P₂ 的透射电矢量方向，z 代表 E 的感应主轴和被测波片 W 的一个光学主轴方向，它与 N₁ 夹角为 45°。

设透过 P₁ 的电矢量为 $E_A = A \cos \omega t$ ，经过 E，W 后，o, e 光电矢量分别为

$$E_{Ao} = A \sin 45^\circ \cos \omega t, \quad (8)$$

$$E_{Ae} = A \cos 45^\circ \cos(\omega t + \delta_E), \quad (9)$$

式中 $\delta_E = \pi V_D / V_\pi \pm \delta$, V_π 为 E 的半波电压, δ 为待测延迟量, \pm 号与 W 的取向有关。当两束光发生干涉

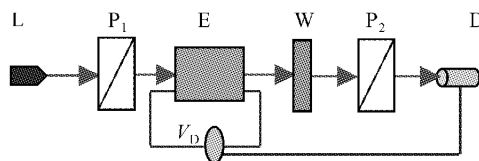


图 2 电光调制法测量原理图

Fig. 2 Schematic diagram of the electro-optic modulation method

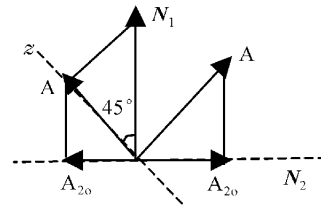


图 3 光的振幅分布

Fig. 3 Amplitude distribution of light

时，有两种主要情况：

1) 当 $\delta_E = 0$ 时，干涉极小，P₂ 输出为零，则 $\delta = \pm \pi V_D / V_\pi$ ；

2) 当 $\delta_E = \pi$ 时，干涉极大，P₂ 输出为极大 I_{max} ，则 $\delta = \pm \pi V_D / V_\pi + \pi$ 。

由 1) 可计算出 δ ，并由快慢轴的取向确定出延迟级。为了去除杂散光和环境变化造成的输出最小值的不稳，一般在直流电压 V_D 上加一频率为 f 的交流调制信号 $V_0 \cos(2\pi ft)$ ，只有当 $\delta = 0$ 或 π 时，才有倍频信号输出，正因如此才为准确地选择 V_D 提供很大方便。该系统的测量误差源于 V_D 的涨落，P₁, P₂ 的调整机械误差和环境温度变化的影响。对于 LiNO₃ 晶体，当 V_D 控制在 ± 700 V，延迟测量精度可控制在 1% 以内。

5 结 论

温度的微小变化对石英多级片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不同所致。由延迟量随温度变化的规律，可以采用如下补偿措施：使用温度低于测量温度时，测量时修正量取负，使用温度高于测量温度时，测量时修正量取正。采用电光调制法测量延迟相位时只需调整电光晶体的电压来改变入射光相位，使补偿波片达到零相位或 π 相位，并通过对所加电压的计量处理得到波片的精确相位延迟值，对电光晶体的半波电压在不同测试环境下实时定标，以此消除温度引起的系统误差。当单位波片的相位延迟量受温度的影响给予正确估计和补偿以后，本文研究的方法与理论对延迟器件精确设计和定标复合波片提供了有价值的参考。

参 考 文 献

1 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

- 2 Wang Zhengping, Li Qingbo, Tan Qiao *et al.*. Method of measuring practical retardance value and judging the fast or slow axis of quarter-wave plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(4):523~528
王政平,李庆波,谭巧等. 测量1/4波片实际相移量并判定快慢轴的方法[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4):523~528
- 3 Wang Wei, Li Guohua, Wu Fuquan *et al.*. A new method of measuring wave plate phase delay and fast axis azimuth [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(12):1121~1123
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):1121~1123
- 4 Cheng Xiaotian, Li Yinzhu, Liu Cheng *et al.*. Method for measuring the retardation of a wave plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(7):651~654
程笑天,李银柱,刘诚等. 波片位相延迟的测量方法[J]. *中国激光*, 2003, **30**(7):651~654
- 5 Hao Dianzhong, Li Guohua, Wu Fuquan. Intelligentized measurement of optical phase retardation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(10):1411~1414
郝殿中,李国华,吴福全. 光相位延迟器延迟量的智能化测量[J]. *中国激光*, 2005, **32**(10):1411~1414
- 6 Yun Maojin, Li Guohua. Phase retardation measurement with $\lambda/4$ wave-plate [J]. *Laser Technique*, 2001, **25**(5):328~330
云茂金,李国华. 晶体相位延迟测量的 $\lambda/4$ 波片及理论研究[J]. *激光技术*, 2001, **25**(5):328~330
- 7 Zheng Chunhong, Song Lianke, Liang Rongrao. Optimizational design scheme for three in one composite achromatic $\lambda/4$ wave-plate [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(6):662~664
郑春红,宋连科,梁荣饶. 三元复合式消色差 $\lambda/4$ 波片的优化设计[J]. *中国激光*, 2004, **31**(6):662~664
- 8 Song Lianke, Li Guohua. Design of the three-element combination achromatic retarder made of mica and quartz [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2000, **11**(1):51~53
宋连科,李国华. 云母、石英晶体三元组合式消色差延迟器设计[J]. *光电子•激光*, 2000, **11**(1):51~53
- 9 Song Lianke, Wang Zuochen. Discussion on the relations between band width limitation of waveplates and retardation thickness [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2000, **11**(2):170~172
宋连科,王佐臣. 波片带宽容限与延迟厚度关系探讨[J]. *光电子•激光*, 2000, **11**(2):170~172
- 10 Wu Fuquan, Wang Guanghui, Li Guohua. Compound effects of two $\lambda/4$ retarders [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1998, **9**(5):399~400
吴福全,王光辉,李国华. 双相位延迟片的复合效应[J]. *光电子•激光*, 1998, **9**(5):399~400
- 11 Li Hua, Song Lianke, Li Guohua. Orientation effect on phase retardation of compound binary zero-order waveplate [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12):1438~1441
李华,宋连科,李国华. 二元复合波片延迟相位方位效应探讨[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12):1438~1441