

文章编号: 1001-3806(2016)03-0358-05

温度不敏感型石英光滤波器的研究

高艾琳¹, 王鑫², 盛荔², 王梦樱², 陶音², 孔勇^{2*}, 韩华²

(1. 上海海洋大学 工程学院, 上海 201306; 2. 上海工程技术大学 电子电气工程学院, 上海 201620)

摘要: 为了解决石英光滤波输出随温度敏感的问题, 利用温度的变化对石英双折射率和旋光率具有相反变化趋势的原理, 提出了一种由石英双折射滤波器和石英旋光滤波器组合而成的新型温度不敏感型的滤波器, 采用数值分析和实验研究的方法研究了温度对该新型石英滤波器透射中心波长的影响。结果表明, 该新型石英滤波器在一定温度范围内是不灵敏的。这为石英滤波波长温度不敏感的应用提供了一种自适应温度补偿的方法。

关键词: 光学器件; 温度; 滤波器; 旋光**中图分类号:** TN253 **文献标志码:** A **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2016.03.012

Research of new temperature-insensitive quartz filters

GAO Ailin¹, WANG Xin², SHENG Li², WANG Mengying², TAO Yin², KONG Yong², HAN Hua²

(1. College of Engineering Science and Technology, Shanghai Ocean University, Shanghai 201306, China; 2. College of Electronic and Electrical Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

Abstract: In order to solve the problem of being sensitive to temperature for output light of a quartz optical filter, based on the principle that the value of quartz birefringence and quartz rotation had opposite trend with the change of temperature, a new temperature insensitive quartz filter was presented combining a quartz birefringent filter with a quartz rotation filter. By numerical analysis and experimental methods, the impact of temperature on output center wavelength of the new type quartz filter was studied. The results show that new quartz filter is insensitive to temperature in a certain range. The new quartz filter provides adaptive temperature compensation for the insensitive temperature quartz filter.

Key words: optical devices; temperature; filter; rotation

引 言

通常传统型的双折射光滤波器有两种: Lyot^[1-3] 和 Solc 型光滤波器^[4-5]。和其它种类的光滤波器相比, 双折射光滤波器具有较容易调谐到所需要的波长、低插入损耗和宽的视场角等优点。因此双折射滤波器在激光调谐^[6-7]、天文^[8-10]、密集波分复^[11-12] 用等领域得到广泛的使用。最近, YE, YIN 等人报道^[13-16] 了一个基于旋光色散效应新型的偏振相干的光谱滤波器, 其与传统晶体型的 Lyot 和 Solc 滤波器相比, 它不仅可以通过机械调节, 还可以进一步通过加电来调节(如果具有有源器件比如液晶偏振旋光器时), 而且它不需要额外的消色差的延迟器。

基金项目: 上海市教育委员会创新项目理科重点资助项目(14ZZ156); 上海工程技术大学“十二五”内涵建设资助项目(nhky-2014-12)

作者简介: 高艾琳(1991-), 女, 硕士研究生, 从事电机设计和光电子技术的研究。

* 通讯联系人。E-mail: ky7757@aliyun.com

收稿日期: 2015-03-12; 收到修改稿日期: 2015-05-18

双折射滤波器工作在固定的传输波长光谱是很重要的, 例如, 在有关日光观测的仪器的应用中, 随温度变化引起的中心波长的变化是不能接受的^[10]。温度对石英双折射滤波器输出特性的分析已经有人研究^[17-18], 但是对于温度对石英旋光滤波器输出特性的分析至今还未见有人报道。另外, 有关补偿温度对石英双折射滤波器中心波长影响的基本方法是温度反馈控制法^[19]、选取不同双折射率补偿法^[20]、旋转石英波片补偿法^[21]等。温度反馈方法中温度控制的方法设备较复杂, 选取不同双折射率补偿法对于一些特殊的晶体较难选取到合适且匹配的补偿双折射率的晶体, 旋转石英波片补偿法要通过旋转石英波片来补偿温度所引起的波长的变化, 装置不利于紧凑化。

在本文中, 作者提出了一种新型的石英温度不敏感型的滤波器, 它是由石英双折射滤波器和旋光滤波器组合而成, 基于温度的变化对石英双折射率和旋光率的数值具有相反变化趋势的原理, 通过数值分析和实验的方法详细地研究了该滤波器的温度稳定性的输出特性, 这为石英滤波波长温度稳定性的应用提供了一种自适应温度补偿的方法。

1 理论和数值模拟

1.1 石英旋光滤波理论

如图1中的装置中,一个旋光色散偏振滤波器由 Glan 棱镜 P_1, P_2 和石英波片 L_1 组成。两个偏振棱镜起偏方向均与 x 轴的方位角平行,石英的光轴垂直于它的表面, T 是对石英旋光滤波器所施加的温度。

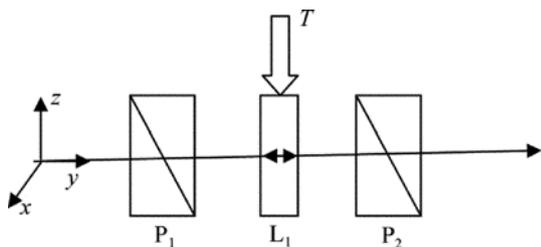


Fig. 1 A schematic of a quartz rotation filter

P_1, P_2 和 L_1 的 Muller 矩阵为^[22]:

$$M_{P_1} = M_{P_2} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$M_{L_1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta & \sin 2\theta & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta & \cos 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, θ 表示石英晶体的旋光角^[23]:

$$\theta = \alpha d_1 \quad (3)$$

式中, d_1 表示与石英晶体光轴方向即和入射光平行方向的厚度,单位为 mm; α 表示石英晶体的旋光系数,单位为 $(^\circ)/\text{mm}$,它的数值与入射光波长、物质的组成、温度^[24]等有关。

随着温度和波长的变化,石英晶体的旋光系数可由下式表示^[24]:

$$\alpha = A + \frac{B}{\lambda^2 - C} - D\lambda^2 \quad (4)$$

式中, $A, B, C,$ 和 D 是随温度变化的系数, λ 为入射光的波长,单位为 nm。 $A = -311.87457 - 2.75492T - 0.35441T^2 + 0.01061T^3 - 7.99432 \times 10^{-5}T^4$, $B = 1.76092 \times 10^8 + 5.31675 \times 10^5T + 7.1668 \times 10^4T^2 - 2.090 \times 10^3T^3 + 15.35985T^4$, $C = 1.04049 \times 10^5 - 130.6369T - 22.26345T^2 + 0.62473T^3 - 0.00442T^4$, $D = -1.57039 \times 10^{-4} - 3.42124 \times 10^{-6}T - 4.1859 \times 10^{-7}T^2 + 1.2732 \times 10^{-8}T^3 - 9.75758 \times 10^{-11}T^4$ 。在 $-10^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$ 和 $470\text{nm} \sim 600\text{nm}$ 范围内,由(3)式和(4)式可以给出一定温度和波长下的石英晶体的旋光率。

沿光轴方向石英晶体的线膨胀系数为 $\gamma = 7.97 \times 10^{-6}^\circ\text{C}^{-1}$,当外界温度变化时,应考虑到其厚度的变

化。即:

$$d_1 = d' + \gamma\Delta T \quad (5)$$

式中, d' 表示 20°C 时石英旋光器的厚度,如果入射光为自然光 I_0 ,它的 Stokes 参量为:

$$S_0 = I_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

经过一级石英旋光滤波器后,出射光的 Stokes 参量为:

$$S_1 = M_{P_2} M_{L_1} M_{P_1} S_0 = \frac{I_0 \cos^2[\alpha(\lambda) d_1]}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

这里忽略光在各器件上的吸收或散射等损耗,从 P_1 出射的光强 $I = I_0/2$,那么透射光强 $I_t = I \cos^2[\alpha(\lambda, T) d_1]$,相应的透射率 t_1 为:

$$t_1 = \cos^2[\alpha(\lambda, T) d_1] \quad (8)$$

1.2 石英双折射滤波理论

如图2所示的装置中,一个单级 Lyot 双折射滤波器由 Glan 棱镜 P_1, P_2 和石英波片 L_2 组成。两个偏振棱镜起偏方向与 x 轴所成的方位角均为 45° , L_2 石英的光轴平行于 z 轴。

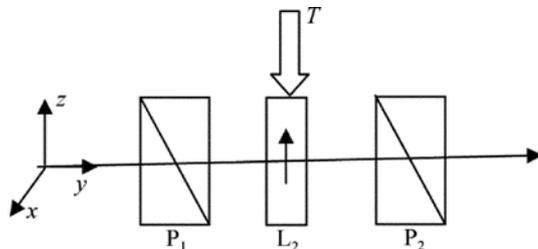


Fig. 2 Schematics of a quartz birefringent filter

石英的色散双折射率为^[25]:

$$10^3 \times \Delta n = 8.86410 + 0.107057\lambda^{-2} + 0.0019893\lambda^{-4} - 0.17175\lambda^2 - 10^{-3}T(1 + T/900)(1.01 + 0.2\lambda^2) \quad (9)$$

式中, λ 的单位是 μm 。石英晶体垂直于光轴方向即平行于入射光方向的线膨胀系数 $\gamma' = 1.337 \times 10^{-5}^\circ\text{C}^{-1}$,当外界温度变化时,应考虑到石英厚度随温度变化的情况:

$$d_2 = d''[1 + 1.337 \times 10^{-5}(T - T_0)] \quad (10)$$

式中, T_0 选取为 20°C , d'' 是对应 20°C 时双折射型石英的厚度。则 P_1 出射的透射率为:

$$t_2 = \cos^2\left[\frac{\pi}{\lambda} n(\lambda, T) d_2\right] \quad (11)$$

1.3 石英双折射和旋光滤波的组合理论

作者提出了一种新型的石英双折射和旋光滤波器的组合式石英滤波器结构,如图3所示。

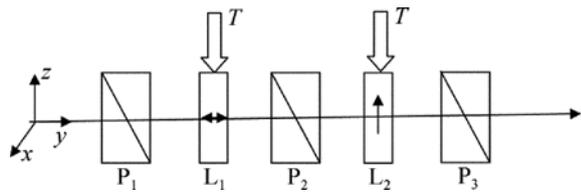


Fig. 3 Structure of a quartz birefringent and quartz rotation filter

如图 3 的装置中,1 个石英双折射和旋光滤波器组合的新型石英滤波器由 Glan 棱镜 P_1, P_2, P_3 和石英波片 L_1, L_2 组成。3 个偏振棱镜与 x 轴所成的方位角均为 45° , L_1 和 L_2 石英的光轴分别垂直和平行于它的表面。图 3 的输出光的透射率为:

$$t = t_1 \times t_2 = \cos^2[\alpha(\lambda, T)d_1] \times \cos^2\left[\frac{\pi}{\lambda}n(\lambda, T)d_2\right] \quad (12)$$

接下来将通过以下的数值模拟和实验的研究来证实该新型石英滤波器的输出中心波长和温度是不敏感的。

1.4 石英旋光滤波模拟

图 4 数值模拟中所采用的石英旋光滤波器的厚度,也就是平行于光轴方向的厚度为 5mm,图中实线和虚线分别为温度为 20°C 和 60°C 时石英旋光滤波器输出的滤波光谱曲线。

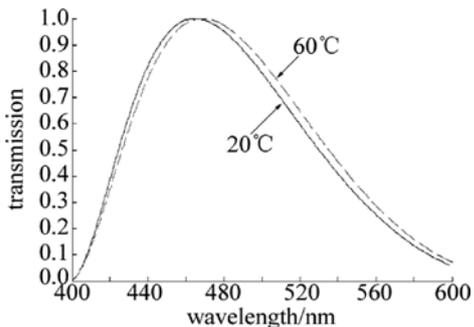


Fig. 4 Spectrum of a quartz rotation filter at different temperatures

图 4 中滤波的透射率均为 1,这是因为模拟中没有考虑石英滤波器对光的吸收和散射等对光引起的损耗等因素。从图 4 中可以看到,随温度的增加,滤波的中心波长向长波长移动。温度导致石英旋光率的增加是因为石英晶体发生热膨胀,内部原子距离增大从而导致螺距变大。根据螺旋理论,螺距变大,旋光率随之增大,从而导致了随温度的变化石英旋光滤波器的光谱输出将发生变化。

但是图 4 中短波长处变化不明显,这是因为作者采用的公式是针对 $470\text{nm} \sim 600\text{nm}$ 的拟合公式,而数值模拟短波长处超过了这个范围,所以导致的结果和实际是不符合的,这一点将在实验中进一步说明。

1.5 石英双折射滤波模拟

图 5 数值模拟中所采用的石英双折射滤波器的厚度,也就是垂直于光轴方向的厚度为 0.6mm,图中实

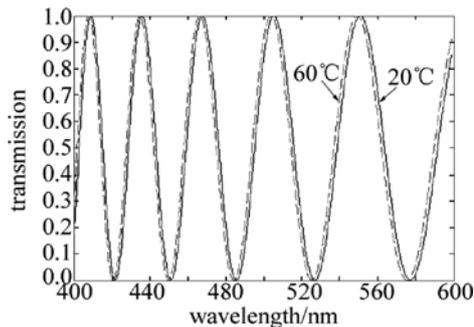


Fig. 5 Spectrum of quartz birefringence filter at different temperatures 线和虚线分别为温度为 20°C 和 60°C 时石英双折射滤波器输出的滤波光谱曲线。

图 5 中滤波的透射率也均为 1,这也是因为模拟中没有考虑石英滤波器对光的吸收和散射。从图 5 中可以看到,随温度的增加,滤波的中心波长向短波长移动,这是因为随温度的升高导致石英双折射率下降所引起的。

1.6 石英双折射和旋光滤波的组合模拟

图 6 中实线和虚线分别是温度为 20°C 和 60°C 时的滤波曲线,从图 6 中可以看出,作者所提出的这种组合石英滤波器,其滤波曲线随温度的变化确实不敏感,输出的中心波长基本没有发生变化,但是随温度的变化,输出透射率有所变化,这主要是因为石英旋光和双折射滤波器的输出光谱随温度不同变化趋势的叠加效应造成的。

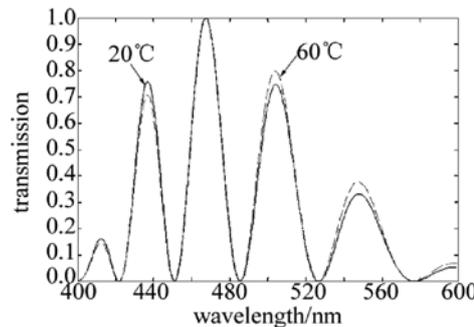
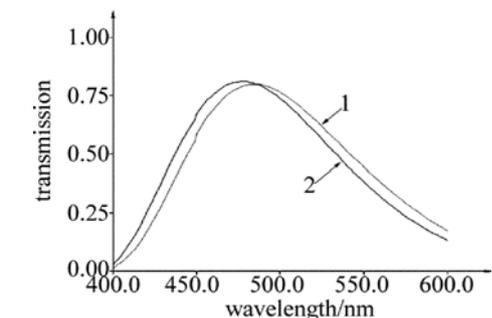


Fig. 6 Spectrum of a quartz birefringence filter combined with quartz rotation filter at different temperatures at 20°C and 60°C

2 实验结果及讨论

图 7 和图 8 的石英厚度分别对应的是平行于光轴和垂直于光轴方向的厚度,图 7、图 8 和图 9 分别是温度为 20°C (曲线 2) 和 60°C (曲线 1) 时石英旋光滤波器、石英双折射滤波器以及石英双折射和旋光组合滤波器随温度变化的实验滤波曲线。实验中所采用的石英厚度的参量与模拟中的是一致的,所使用的分光光度计是国产的 V-1600,输出波长从 350nm 到 1100nm 变化,扫描波长分辨率为 1nm 。

Fig. 7 Spectrum of a quartz rotation filter at different temperatures in the



experiment (thickness is 5 mm)

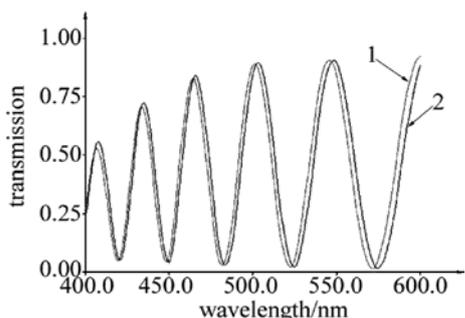


Fig. 8 Spectrum of a quartz birefringence filter at different temperatures in the experiment (thickness is 0.6 mm)

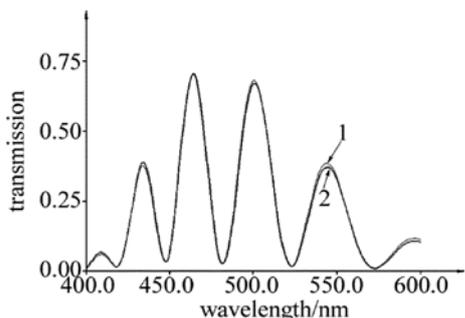


Fig. 9 Spectrum of a quartz birefringent and rotation filter at different temperatures in the experiment

从图7和图8中可以看出,石英旋光滤波器随温度的变化,中心波长滤波曲线的确向长波长移动,石英双折射滤波器随温度的变化,中心波长滤波曲线的确向短波长移动,这和以上理论分析的结果是一致的,但是考虑到石英滤波器的插入损耗,石英旋光滤波器和石英双折射滤波器的透射率都是低于1的,另外可以看到,不论是石英旋光滤波器还是石英双折射滤波器,随温度的升高,透射率都发生了降低,这主要是因为随温度的升高,滤波器的吸收系数增加所导致的。另外,石英旋光滤波器短波长处随温度的变化向长波长方向的移动也很明显,这和模拟分析中图4中的结果是不一样的,正如上面所提到的,这主要是描述石英旋光滤波器的拟合公式是针对470nm~600nm所导致的。

从图9中可以看到,作者所提出的这种石英旋光

和双折射滤波器组合的石英滤波器的滤波曲线随温度的变化并不敏感,这和模拟的结果是完全一致的。利用这种方法可以对石英旋光和双折射滤波器的厚度进行合理的设计,从而可以得到特定中心波长输出和特定输出带宽的随温度不敏感的组合式石英滤波器。与以往提出的温度不敏感石英滤波结构相比,本结构具有不需要温控设备、不需要寻找特殊的双折射率晶体、结构紧凑等优点,是一种较好的温度补偿自适应的技术。

3 结论

提出了一种新型的石英温度不敏感型滤波器,它是由石英双折射滤波器和旋光滤波器组合而成,基于温度的变化对石英双折射率和旋光率具有相反变化趋势的原理,通过数值分析和实验的方法详细地研究了温度对该新型石英滤波器透射中心波长的影响,理论和实验研究的结论都说明该新型石英滤波器和温度是不灵敏的。该研究在激光滤波的温度稳定输出中有一定的应用价值。

参考文献

- [1] EVANS J W. The birefringent filter[J]. Journal of Optical Society of America, 1949, 39(3): 229-237.
- [2] AHARON O, ABDULHALIM I. Liquid crystal Lyot tunable filter with extended free spectral range[J]. Optics Express, 2009, 17(14): 11426-11433.
- [3] PENG D Y, SONG L K, LI K T, et al. Measurement of birefringence of liquid crystal with polarized light interference method[J]. Laser Technology, 2014, 38(3): 422-424 (in Chinese).
- [4] EVANS J W. Solc birefringent filter[J]. Journal of Optical Society of America, 1958, 48(3): 142-143.
- [5] SOLC I. Birefringent chain filters[J]. Journal of Optical Society of America, 1965, 55(6): 621-625.
- [6] WANG X, YAO J. Transmitted and tuning characteristics of birefringent filters[J]. Applied Optics, 1992, 31(22): 4505-4508.
- [7] WACOGNE B, GOEDGEBUER J, ONOKHOV A, et al. Wavelength tuning of a semiconductor laser using nematic liquid crystals[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, 29(4): 1015-1017.
- [8] HOBBS J. Tunable liquid-crystal filter helps study stellar emission[J]. Laser Focus World, 1993, 29(1): 29-30.
- [9] MILLER P J. Tunable narrowband birefringent filters for astronomical imaging[J]. Proceedings of the SPIE, 1990, 1235: 466-473.
- [10] KOPP G A, DERKS M J, ELMORE D F, et al. Tunable liquid-crystal filter for solar imaging at the He I 1083nm line[J]. Applied Optics, 1997, 36(1): 291-296.
- [11] ZHANG J, LIU L R, ZHOU Y. Optimum design of a novel electro-optically tunable birefringent interleaver filter[J]. Journal of Optics, 2004, A6(11): 1052-1057.
- [12] LUO Zh X, WAN Zh J. Design and tolerance analysis of optical interleaver based on retardant crystals[J]. Optik, 2011, 122(2): 133-135.
- [13] YE C. Wavelength-tunable spectral filters based on the optical rotatory dispersion effect[J]. Applied Optics, 2003, 42(22): 4505-

- 4513.
- [14] YE C. A liquid crystal band-pass filter based on the optical rotatory dispersion effect[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(20): 4007-4012.
- [15] YE C. Low-loss tunable filter based on optical rotator dispersion [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(6): 1162-1168.
- [16] YIN Y X, WU F Q, SONG L K, *et al.* A novel low-loss quartz optical filter [J]. *Laser Technology*, 2010, 34(6): 798-801 (in Chinese).
- [17] CAO Zh L, XUAN L, HU L F, *et al.* Temperature effect on the diffraction efficiency of the liquid crystal spatial light modulator[J]. *Optics Communications*, 2006, 267(1): 69-73.
- [18] LIN Y Q, FENG S M. Temperature effect on threshold voltage and optical property of twisted nematic liquid crystal with applied different voltages[J]. *Optik*, 2010, 121(18): 1693-1697.
- [19] WULLERT J R, PATEL J S. Optical communications over a wide temperature range using a tunable liquid-crystal filter [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 1993, 5(2): 257-259.
- [20] XUAN W J, WANG D G. Error analysis and performance optimization of birefringent filter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(1): 52-59 (in Chinese).
- [21] KIMURA T, SARUWATARI M. Temperature compensation of birefringent optical filters[J]. *Proceedings of the IEEE*, 1971, 59(8): 1273-1274.
- [22] YAN J X, WEI G H, HA L Zh, *et al.* *Matrix optics*[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1995: 178-189 (in Chinese).
- [23] LIAO Y B. *Polarized optics*[M]. Beijing: Science Press, 2003: 133-135 (in Chinese).
- [24] SU F F, WU F Q. The research of thermal effect on the rotatory power of quartz[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, 25(5): 670-672 (in Chinese).
- [25] ENNOS A E, OPPERMAN K W. Birefringence of nature quartz [J]. *Applied Optics*, 1966, 5(1): 170-172.

《激光技术》编辑部

版权所有 ©