

文章编号: 1001-3806(2015)03-0329-04

## 入射角度不敏感型石英光双折射滤波器

高丹, 盛荔, 金元, 吴轲, 王梦樱, 陶音, 孔勇, 韩华

(上海工程技术大学 资产管理及保障处, 上海 201620)

**摘要:** 为了实现石英光滤波器中心波长随角度变化不敏感的目的, 利用石英光滤波器绕着平行于或垂直于石英光轴的方向旋转时, 石英光滤波器输出中心波长漂移方向不同的原理, 提出了一个新型的两级改进型的 Lyot 石英光滤波器滤波的方法, 并进行了相关理论分析和实验验证。结果表明, 当入射角小于 18° 时, 这个新型的光滤波器的中心输出波长的确对入射角度的变化不敏感。该结论与相关的实验结果是相符合的。

**关键词:** 光学器件; 石英晶体; 双折射; 光学滤波器

**中图分类号:** O436.3      **文献标志码:** A      **doi:** 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.03.010

### Quartz birefringent optical filters insensitive to incident angles

GAO Dan, SHENG Li, JIN Qi, WU Ke, WANG Mengying, TAO Yin, KONG Yong, HAN Hua

(Asset Management and Security, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China)

**Abstract:** In order to achieve a quartz filter insensitive to incident angles, based on the principle that the shifting direction of output central wavelength of a quartz birefringent optical filter is different when the filter rotate around an axis parallel and perpendicular to the quartz optical axis, a new type of two-stage modified Lyot quartz filter was presented. After theoretical analysis and experimental verification, the results show that the central wavelength of this new type filter is actually insensitive to the incident angles less than 18°. The conclusion is in good agreement with the experiment results.

**Key words:** optical devices; quartz crystal; birefringence; optical filter

### 引言

Lyot<sup>[1]</sup> 和 Solc 型滤波器<sup>[2]</sup> 是两种传统型的双折射光滤波器, 它们和其它种类的光滤波器相比, 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, 双折射滤波器在光谱成像<sup>[3]</sup>、激光调谐<sup>[4-5]</sup>、遥感<sup>[6-7]</sup>、天文<sup>[8-10]</sup>、密集波分复用等领域得到广泛的应用<sup>[11-12]</sup>。

对于双折射滤波器, 在固定的传输波长光谱进行工作是很重要的。例如, 在有关太阳光观测的仪器中, 偏离轴入射时光滤波产生了传输函数的变形, 就是不能接受的<sup>[10]</sup>。在倾斜入射角下传输的双折射滤波特性已经被很多人所研究<sup>[13-16]</sup>, 但几乎没有看到关于在斜入射角入射时如何保持滤波器固定的中心波长输出的报道。本文中, 作者分析了这方面的工作, 实验和理论结果都表明, 所设计的这种新型的光滤波器的中心输出波长对入射角的变化的是不敏感的。

### 1 数值模拟和理论分析

图 1 中所示的元件包括 Glan 棱镜 P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> 和石英波片 L<sub>1</sub>。P<sub>1</sub> 偏振面和石英光轴或 z 轴的所成方位角是 45°, 和 P<sub>2</sub> 是一样的。石英光轴和 z 轴是平行的。当图 1 中装置 1 围绕垂直于石英光轴的轴方向旋转 i 角度后就变成了图 2 中的装置 2, 对于这种情况, 石英滤波器的双折射率和输出光强的公式由下式所描述<sup>[14-15]</sup>:

$$\delta_1 = \frac{2\pi d}{\lambda} \left[ \left( \sqrt{(n_o^2 - n_e^2)^2 \sin^2 i / n_o^4 + \frac{n_o^2 n_e^2}{n_o^2 - \sin^2 i}} \right) - \frac{n_o^2}{\sqrt{n_o^2 - \sin^2 i}} - \frac{(n_e - n_o) \sin^2 i}{n_o \sqrt{n_o^2 - \sin^2 i}} \right] \quad (1)$$

$$T = \cos^2 \frac{\delta_1}{2} \quad (2)$$

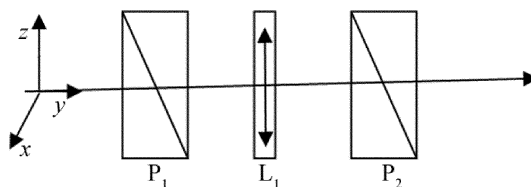


Fig. 1 Construction diagram of setup 1

作者简介: 高丹 (1981-), 男, 助理研究员, 从事计算机技术的研究。

E-mail: gd@sues.edu.cn

收稿日期: 2014-05-09; 收到修改稿日期: 2014-06-23

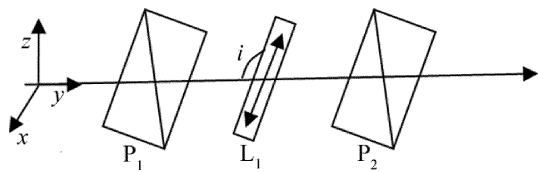


Fig. 2 Construction diagram of setup 2

式中,  $\lambda$  是真空中入射光的波长,  $\delta_1$  是光程差,  $i$  是入射角,  $n_e$  和  $n_o$  分别是石英波片的非寻常光和寻常光的折射率,  $d$  是石英厚度,  $T$  是透射率。

图3中所示的元件包括 Glan 棱镜  $P_1, P_2$  和石英波片  $L_1$ 。  $P_1$  偏振面和石英光轴或  $z$  轴的所成方位角是  $135^\circ$ , 和  $P_2$  是一样的。石英光轴和  $x$  轴是平行的。当图3中装置3围绕平行于石英光轴的轴方向旋转  $i$  角度后就变成了图4中的装置4, 对于这种情况石英滤波器的双折射率和输出光强的公式由下式所描述<sup>[14-15]</sup>:

$$\delta_2 = \frac{2\pi d}{\lambda} (\sqrt{n_e^2 - \sin^2 i} - \sqrt{n_o^2 - \sin^2 i}) \quad (3)$$

$$T = \cos^2 \frac{\delta_2}{2} \quad (4)$$

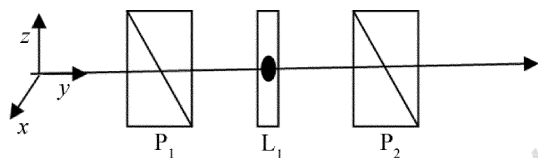


Fig. 3 Construction diagram of setup 3

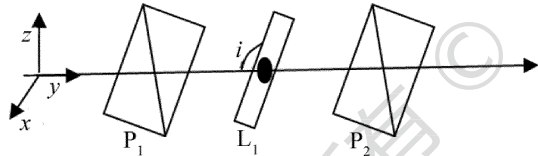


Fig. 4 Construction diagram of setup 4

作者所用模拟的石英参量如下:  $n_e, n_o$  和  $d$  分别为 1.57, 1.561, 0.6mm。图5中的3条曲线, 中间的那条中心波长在 600nm 的曲线是装置1和装置3的透射曲线, 也就是说如果装置1或装置3不发生旋转, 装置1和装置3的透射曲线是同一个。中心波长在 610nm 和 590nm 的分别是装置2和装置4中旋转角度  $i = 18^\circ$  时的透射曲线, 即和装置1或装置3相比较, 装置2

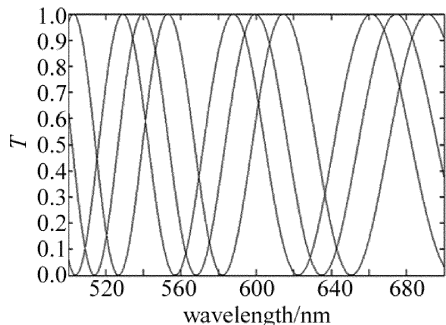


Fig. 5 Transmission spectrum of setup 1 ~ setup 4

和装置4的中心波长分别向波长长的方向和短的方向发生了漂移。因此联合装置2和装置4提出了一个新的滤波器, 按作者假设的结果, 它输出的中心波长将对入射角不敏感。

图6中装置6的透射公式为:

$$T = \cos^2 \frac{\delta_1}{2} \cos^2 \frac{\delta_2}{2} \quad (5)$$

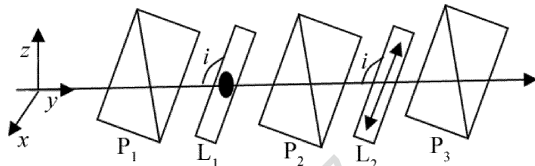


Fig. 6 Construction diagram of two-stage Lyot filter combined with setup 2 and setup 4

图7中中心波长透射率较高的曲线和较低的曲线分别是装置6中  $i = 0^\circ$  和  $i = 18^\circ$  的透射曲线, 发现当入射角的倾斜角度变化时虽然透射率下降了, 但是中心波长的位置基本没有变化, 这就表明了装置6输出的中心波长的确对入射角是不敏感的。

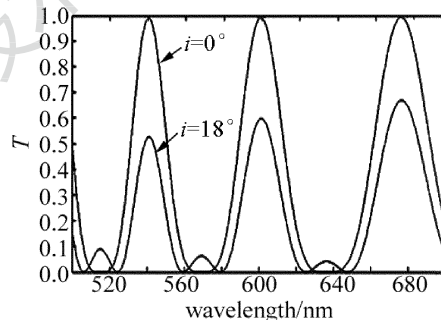


Fig. 7 Transmission spectrum of setup 6 for  $i = 0^\circ$  and  $i = 18^\circ$

## 2 实验结果和讨论

实验中所用的石英参量和模拟用的参量是相同的。作者使用的分光光度计是国产的, 型号是 V-1600PC, 具备 1nm 的扫描步长, 300nm 到 1100nm 的扫描范围。从图8和图9中发现, 实验结果和数值模拟的结果(见图5、图7)是完全一致的(图8中的曲线1、曲线2和曲线3分别对应图4、图1和图2中装置的透射曲线;图9中的曲线1和曲线2分别对应当装置6的偏转角为  $0^\circ$  和  $18^\circ$  的情况)。这也验证了作者的假设。但是对于图10(图10中的曲线1和曲线2分别对应当装置6的偏转角为  $0^\circ$  和  $45^\circ$  的情况), 当入射角发生  $45^\circ$  的变化时, 中心波长的位置发生了变化(值得一提的是 Glan 棱镜的半视场角为  $20^\circ$  左右<sup>[14]</sup>, 在这里不考虑 Glan 棱镜倾斜对滤波带来的影响, 只考虑了当石英波片发生  $45^\circ$  旋转时对滤波带来的影响), 这是因为随着入射角度的进一步提高, 装置2中的某一级滤波曲线和装置4中的下一级滤波曲线的相互作用就

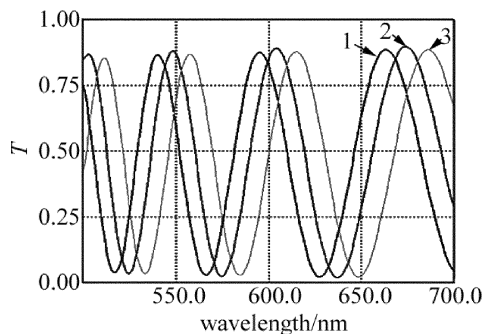


Fig. 8 Experiment result of transmission spectrum of setup 1 ~ setup 4

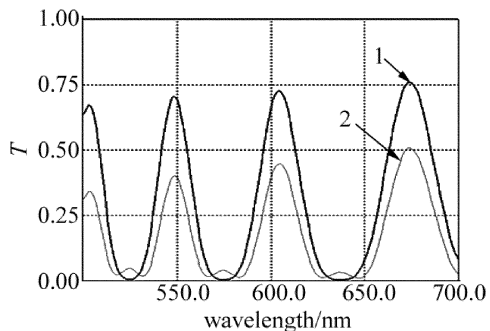


Fig. 9 Experiment result of transmission spectrum of setup 6 for  $i = 0^\circ$  and  $i = 18^\circ$

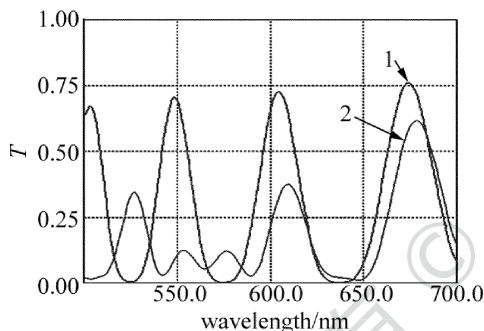


Fig. 10 Experiment result of transmission spectrum of setup 6 for  $i = 0^\circ$  and  $i = 45^\circ$

将比装置 2 中和装置 4 中的同级滤波曲线要明显得多。更进一步地发现,图 7 或图 9 中的旁带光谱随入射角度的变化越来越明显,这就是上面实验现象出现的原因。因此保持该装置 6 的倾斜角度小于  $18^\circ$  是很重要的,可以避免中心波长发生漂移过大的现象。

对于另一种情况(见图 11、图 12),描述的公式分别和图 4 和图 2 是相同的<sup>[14-15]</sup>。当入射角不发生和发生改变时,图 13 中的透射曲线将和图 6 是相同的,作

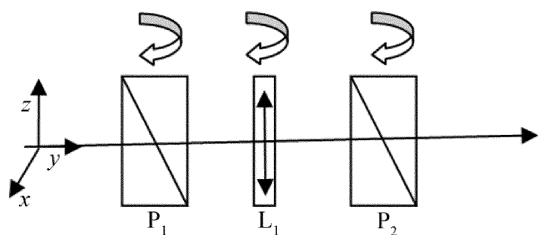


Fig. 11 Construction diagram of Fig. 1 rotated around the axis parallel to the quartz optical axis with angle  $i$

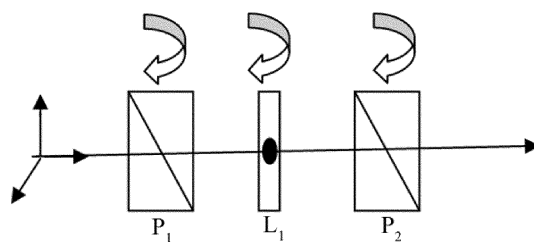


Fig. 12 Construction diagram of Fig. 3 rotated around the axis vertical to the quartz optical axis with angle  $i$

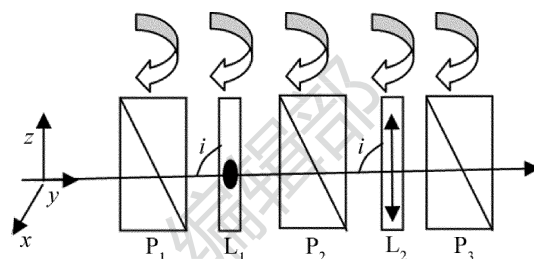


Fig. 13 Construction diagram of two-stage Lyot filter combined with Fig. 11 and Fig. 12

者也通过实验证明了这一点。总之,不论装置 13 还是装置 6,所输出的中心波长的透射和入射角都是不敏感的。

### 3 结 论

提出了一个新型的两级改进型的 Lyot 滤波器,它由两个光轴互相垂直的波片和 3 个相间隔的方位角互成一定角度的 Glan 棱镜组成,如图 6 和图 13 所示。所有 Glan 棱镜的方位角都是平行的,和第 1 个以及第 2 个石英波片的方位角分别成  $45^\circ$  和  $135^\circ$ ,实验和理论结果表明,无论这种新型的滤波器围绕垂直或平行于石英光轴的轴发生转动,并且当入射角小于  $18^\circ$  时输出的中心波长对入射角都是不敏感的,这个结论将在光谱成像、激光调谐、天文学等中心波长不随角度变化的设计中得到应用。

### 参 考 文 献

- [1] AHARON O, ABDULHALIM I. Liquid crystal Lyot tunable filter with extended free spectral range[J]. Optics Express, 2009, 17(14): 11426-11433.
- [2] YANG G W, ZHENG Zh R, LI H F, et al. Research on Solc liquid crystal tunable filter[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1783-1787 (in Chinese).
- [3] TSUMURA N, SATO H, HASEGAWA T, et al. Limitation of color samples for spectral estimation from sensor responses in fine art painting[J]. Optical Review, 1999, 6(1): 57-61.
- [4] WANG X, YAO J. Transmitted and tuning characteristics of birefringent filters[J]. Applied Optics, 1992, 31(22): 4505-4508.
- [5] WACOGNE B, GOEDGEBURER 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.
- [6] GREEN R O, SARTURE C M, CHOVI T C J, *et al.* AVIRIS: a new approach to earth remote sensing[J]. *Optics and Photonics News*, 1995, 6(1):30-33.
- [7] ROCK B N, VOGELMANN J E, WILLIAMS D L, *et al.* Remote detection of forest damage[J]. *Bioscience*, 1986, 36(7):439-445.
- [8] HOBBS J. Tunable liquid-crystal filter helps study stellar emission[J]. *Laser Focus World*, 1993, 29(12):29-30.
- [9] MILLER P. 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] PENG D Y, SONG L K. Measurement of birefringence of liquid crystal with polarized light interference method[J]. *Laser Technology*, 2014, 38(3):422-424 (in Chinese).
- [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] LIEN A. Extended Jones matrix representation for the twisted nematic liquid-crystal display at oblique incidence[J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 57(26):2767-2768.
- [14] ZHU X. Explicit Jones transformation matrix for a tilted birefringent plate with its optic axis parallel to the plate surface[J]. *Applied Optics*, 1994, 33(16):3502-3505.
- [15] ZHANG W Q. New phase shift formulas and stability of waveplate in oblique incident beam[J]. *Optics Communication*, 2000, 176(1):9-15.
- [16] ZHOU Y, LIU L R, ZHANG J, *et al.* Nearly-off-axis transmissivity of Solc birefringent filters[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 2003, A20(4):733-740.

《激光技术》编辑部

版权所有 ©