

文章编号: 1001-3806(2010)01-0102-03

## 改善石英晶体旋光滤波器次极大的优化设计

尹延学, 吴福全\*, 王庆, 郭丽娇

(曲阜师范大学 激光研究所, 曲阜 273165)

**摘要:** 为了改善滤波光谱的次极大, 提高透过滤波片观察像的衬度, 设计了减小次极大光强的石英晶体旋光滤波结构, 并从理论上分析了滤波特性。以3级石英晶体旋光滤波器为例, 由分析可知, 在第3级之后增加1级与第1级或第2级相同的结构, 均有效地减小了次极大的光强; 比较发现, 增加1级第2级的结构效果较好。结果表明, 此设计对改善石英晶旋光滤波器次极大应用于观测光谱中提供了理论依据。

**关键词:** 光学器件; 偏振光学; 光学滤波器; 偏振; 石英晶体; 旋光色散

**中图分类号:** O436.3 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2010.01.029

## Optimal design of sideband energy of a rotatory quartz filter

YIN Yan-xue, WU Fu-quan, WANG Qing, GUO Li-jiao

(Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

**Abstract:** In order to reduce sideband spectral energy and improve image lining of a quartz filter, a novel filter structure was designed and its characteristics were analyzed theoretically. Taking a three-level quartz filter for example, its sideband energy can be reduced efficiently by adding the same structure as the first or second level after the third level. Comparatively speaking, it is better to add a structure the same as the second level. The outcome provides academic gist to reduce sideband energy in spectral observation.

**Key words:** optical devices; polarization optics; optical filter; polarization; quartz crystal; optical rotatory dispersion

### 引言

光学滤波器是能按照需要改变入射光的光谱强度分布, 在连续光谱中透过一定宽度的光谱带或在线性光谱中用来提取某些辐射的波长选择器件<sup>[1-2]</sup>。滤波器最初在天文学中用来观测太阳光谱。随着激光技术的发展, 滤波器也被广泛地用于激光滤波、波长信号分离、机载水文测试、遥感、光纤通信等领域<sup>[1]</sup>。滤波器的种类很多, 根据不同的滤波原理可分为: 选择吸收滤波器, 多光束干涉(薄膜)滤波器, 色散滤波器, 双折射滤波器<sup>[1]</sup>等等。2003年芬兰欧鲁大学的YE报道了一种利用旋光色散特性研制而成的新型可调谐光学滤波器<sup>[3-4]</sup>, 它是将  $n$  个厚度比分别为 1:2:4:8:… 的旋光器依次放置  $n+1$  个方位角成比例的偏振片之间构成的。通过研究多级石英晶体旋光光学滤波器的滤波特性<sup>[5-8]</sup>发现, 中央最大值被一些次极大所包围, 这些次极大稍微降低了透过滤波片观察像的衬度, 这便涉及到如何减小这些次极大的问题。作者以3级石英旋光

滤波器为原有结构, 在第3级之后增加1级, 并研究增加之后对次极大强度的减小作用。

### 1 原理

3级石英晶体旋光滤波器的结构<sup>[5]</sup>及建立主轴坐标系如图1所示。 $P_1, P_2, P_3, P_4$  为平行放置的偏光

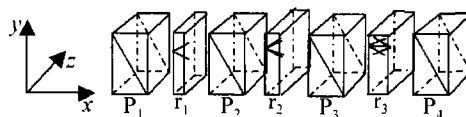


Fig. 1 Light path of the three-level quartz optical filter  
且透振方向相同,  $r_1, r_2, r_3$  为由光轴垂直于通光表面的石英晶体加工而成的平行平板, 厚度比为1:2:4。各器件的 Muller 矩阵为:

$$M_{P_1} = M_{P_2} = M_{P_3} = M_{P_4} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

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

式中,  $\theta$  为石英晶体的旋光角:

作者简介: 尹延学(1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光偏光技术、偏光器件方面的研究工作。

\* 通讯联系人。E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn

收稿日期: 2008-10-30; 收到修改稿日期: 2008-12-17

$$\theta_i = \alpha(\lambda) \cdot d_i, (i = 1, 2, 3) \quad (3)$$

式中,  $d_i$  为石英晶体光轴方向的厚度, 单位是 mm, 且  $d_2 = 2d_1, d_3 = 4d_1$ ;  $\alpha(\lambda)$  为石英晶体的旋光系数, 单位是  $^\circ/\text{mm}$ 。  $\alpha$  的取值与波长、物质的性质、温度等因素有关。 常温下, 石英晶体的旋光系数与波长的关系由下式给出:

$$\alpha(\lambda) = \frac{9.5639}{\lambda^2 - 0.0127493} - \frac{2.3113}{\lambda^2 - 0.000974} - 0.1905 \quad (4)$$

式中,  $\lambda$  为入射光的波长, 单位是  $\mu\text{m}$ 。

若入射光为自然光, 其 Stokes 参量为:

$$S_0 = I_0' \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中,  $I_0'$  为入射自然光光强, 经过 3 级石英晶体旋光光学滤波器后出射的 Stokes 参量为:

$$S_1 = M_{P_4} M_{r_3} M_{P_3} M_{r_2} M_{P_2} M_{r_1} M_{P_1} S_0 = \frac{I_0'}{2} \cos^2[\alpha(\lambda)d_1] \times \begin{bmatrix} 1 \\ \cos^2 2[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 4[\alpha(\lambda)d_1] \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

若忽略光在各器件上的损失, 且令从  $P_1$  出射的光为  $I_0$  ( $I_0 = I_0'/2$ ), 则与相对从  $P_1$  的出射光强其透射比为:

$$T = \cos^2[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 2[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 4[\alpha(\lambda)d_1] \quad (7)$$

当  $d_1$  确定以后, (7) 式中的透射比就只与入射光波长有关。 图 2 是取  $d_1 = 6.666\text{mm}$  时, 由 (7) 式拟合的 3 级石英晶体旋光滤波器透射比随波长的变化曲线。 由图中

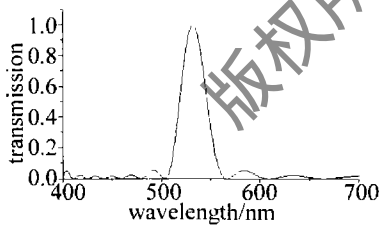


Fig.2 Theoretical transmission curve of the three-level quartz optical filter ( $d_1:d_2:d_3 = 1:2:4$ )

曲线可以看出, 在透射主峰的两侧分布着一些次极大。 下面就减小次极大光强进行优化设计的研究。

## 2 改进结构

通过对厚度比为非整数倍和整数倍的多种 3 级旋光滤波器的分析<sup>[11]</sup>发现, 旋光晶体的厚度比有整数倍和半整数倍两种<sup>[12]</sup>, 本文中的优化设计是基于厚度比为整数倍的原有的结构。

### 2.1 厚度比为 2 的 3 级石英旋光滤波器优化设计

厚度比为 2 的 3 级石英晶体旋光滤波器的优化改进设计如图 3 所示, 与图 1 的区别在于在  $P_4$  之后增加

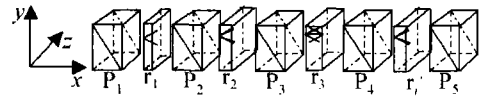


Fig.3 Light path of the three-level quartz optical filter with the optimum design structure

了 1 只石英旋光器  $r_1'$  ( $r_1'$  同于  $r_1, r_2'$  同于  $r_2$ ) 和 1 只偏光镜  $P_5$ 。 其 Muller 矩阵为:

$$M_{r_1'} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta_i & \sin 2\theta_i & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta_i & \cos 2\theta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中,  $\theta_i = \alpha(\lambda)d_i, i = 1, 2$ 。 则出射后的 Stokes 参量为:

$$S_1' = \frac{I_0'}{2} \cos^2[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 2[\alpha(\lambda)d_1] \times \begin{bmatrix} 1 \\ \cos^2 4[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 i[\alpha(\lambda)d_1] \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\text{透射比为: } T = \cos^2[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 2[\alpha(\lambda)d_1] \times \cos^2 4[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 i[\alpha(\lambda)d_1] \quad (10)$$

由 (10) 式拟合的理论曲线如图 4 所示。

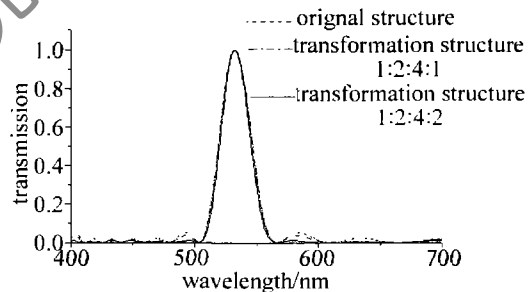


Fig.4 Theoretical transmission curve of the three-level quartz optical filter with the optimum design structure ( $d_1:d_2:d_3 = 1:2:4$ )

从图 4 中曲线可以明显看出: 与原有结构比较, 光通过改进的优化设计后, 主极大没有受到任何影响, 而次极大的强度得到了有效的降低, 并且加  $d_2$  的改造结构明显比加  $d_1$  的改造结构效果要好。

### 2.2 厚度比为 4 的 3 级石英旋光滤波器优化设计

厚度比为 4 的 3 级石英旋光滤波器的优化设计见图 5。 与前面类似的分析可得未改进结构的透射比为:

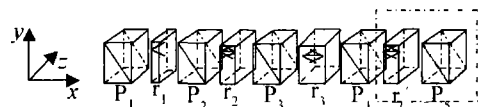


Fig.5 Light path of the three-level quartz optical filter with the optimum design structure ( $d_1:d_2:d_3 = 1:4:16$ )

$$T_3 = \cos^2[\alpha(\lambda)d_1] \times \cos^2 4[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 16[\alpha(\lambda)d_1] \quad (11)$$

优化改进结构后(虚框)透射比为:

$$T_3 = \cos^2[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 4[\alpha(\lambda)d_1] \times \cos^2 16[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 i[\alpha(\lambda)d_1], (i = 1, 4) \quad (12)$$

由(11)式、(12)式拟合的理论曲线如图6所示。

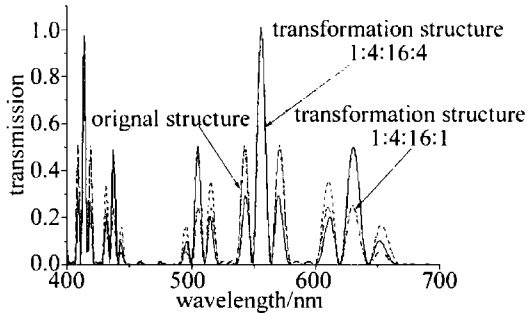


Fig. 6 Theoretical transmission curve of the three-level quartz optical filter with the optimum design structure( $d_1:d_2:d_3 = 1:4:16$ )

由图6中曲线可以看出:改进结构的厚度比为4的多级石英旋光滤波器,较之原有结构也降低了次极大的强度;并且与厚度比为2的多级石英旋光滤波器相比,其通带半峰全宽有了明显的减小。

### 2.3 改善后结构的传输损耗

由于改善结构中增加了光学元件,光的传输损耗也会随之而增加,从而使亮度有所减小。滤波器所用的偏光镜多为格兰-泰勒棱镜,由于在应用中是用  $n = 1.53$  的光学胶将各器件胶合在一起,所以滤波器两端的偏光镜透过率约为 0.88,中间的约为 0.92,其它器件的反射损耗可以忽略,计算表明:原有结构的透过率约为 65.55%,改进结构的透过率约为 60.30%。

## 3 结论

对于3级石英晶体旋光滤波器,在第3级之后增加1级与第1级或第2级相同的结构,在不改变主透

射峰自由光谱范围和通带半峰全宽的情况下,能有效地减小透射峰两侧次极大的光强;比较而言,增加1级第2级的结构效果更好。

### 参考文献

- [1] FRANCON M. Optical filters for radiations separation [M]. Beijing: Science Press, 1986: 53-85 (in Chinese).
- [2] YAN J X, WEI G H, HA L Zh, *et al.* Matrix optics [M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1995: 186-192 (in Chinese).
- [3] CHUN Y. Wavelength-tunable spectral filter based on the optical rotatory dispersion effect [J]. Appl Opt, 2003, 42(22): 4505-4513.
- [4] CHUN Y. Liquid-crystal bandpass filter based on the optical rotatory dispersion effect [J]. Appl Opt, 2004, 43(20): 4007-4010.
- [5] ZHANG Sh, WU F Q, WU W D. Characteristics of multistage quartz optical filter based on the optical rotatory dispersion effect [J]. Physics Science, 2008, 57(8): 5020-5026.
- [6] ZHANG Sh, WU F Q, WU W D, *et al.* Quartz optical filter for wavelength selection of frequency-doubled laser based on optical rotatory dispersion effect [J]. Chinese Optics Letters, 2007, 5(12): 717-719.
- [7] ZHANG Sh, WU F Q, HAO D Zh, *et al.* A spectrometer method for determining thickness of quartz plate along the crystal axis [J]. Acta Optica Sinica, 2007, 27(11): 2082-2086 (in Chinese).
- [8] ZHANG Sh, WU F Q, WANG T, *et al.* The analysis of the optical design for extra cavity frequency-doubled laser based on the optical rotatory dispersion Effect [J]. Journal of Qufu Normal University (Natural Science), 2007, 33(4): 52-54 (in Chinese).
- [9] REN Sh F, WU F Q, ZHAO P, *et al.* Ternary parallel beam splitter combined of iceland and glass [J]. Laser Technology, 2006, 30(3): 300-316 (in Chinese).
- [10] MA J L, LI G H. Optimum thickness of air gap of air-spaced polarizing prism [J]. Laser Technology, 2005, 29(1): 72-73 (in Chinese).
- [11] LIANG Zh X, LI G H, SHAO W D. Study of the thickness ratio the birefringent filter [J]. Chinese Journal of lasers, 2000, 27(5): 601-605 (in Chinese).
- [12] LIANG W, LIANG Zh X, ZHANG Ch Q. Study on computer aided design of lyot filter [J]. Journal of Ji'nan University, 2003, 17(2): 157-159 (in Chinese).