

文章编号: 1001-3806(2010)06-0798-04

新型低损耗石英旋光滤波器

尹延学¹, 吴福全^{1*}, 宋连科¹, 郝殿中¹, 刘在国²

(1. 曲阜师范大学 激光研究所 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 曲阜 273165; 2. 曲阜师范大学 物理系 山东省激光偏光与信息技术重点实验室, 曲阜 273165)

摘要: 为了提高出射光的透过率, 并且在保持主透射峰不变的情况下, 增加对次极大强度的减小作用, 介绍了一种利用石英晶体旋光作用的新型滤波器, 并从原理上作了分析。此新型滤波器与原有多级滤波器相比, 主要的改进在于减少了所用偏光镜的数目, 以原有3级石英晶体旋光滤波器为例, 将此新型滤波器与原有结构进行了比较, 从理论上分析了在考虑各器件损耗的情况下的滤波特性。并利用分光光度计对新型石英晶体旋光光学滤波器的滤波特性进行了实验研究。结果表明, 此滤波器具有减少出射光损耗的显著效果, 同时具有减小次极大的效果。这一结果对观测光谱是有帮助的。

关键词: 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.1001-3806.2010.06.021

A novel low-loss quartz optical filter

YIN Yan-xue¹, WU Fu-quan¹, SONG Lian-ke¹, HAO Dian-zhong¹, LIU Zai-guo²

(1. Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, Institute of Laser Research, Qufu Normal University, Qufu 273165, China; 2. Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology, Department of Physics, Qufu Normal University, Qufu 273165, China)

Abstract: In order to improve the transmission of the output light and reduce the sideband energy with almost the same main intensity, a novel filter based on optical rotatory dispersion effect was introduced. Starting from its principle, its characteristics were analyzed. Compared with a multistage quartz crystal filter, the primary improvement of the novel filter was to reduce the number of needed polariscopes. Compared with a three-level quartz crystal optical filter, the structure and filtering characteristics of the novel filter were analyzed taking different loss into account. The filtering characteristics were measured with a spectrophotometer. The results show that this novel filter can reduce the loss of the output light and the second sideband energy obviously, which is useful for the observation spectrum.

Key words: 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^[1-2]。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。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、双折射滤波器等等。在参考文献[3]中提到一种多级石英旋光滤

波器, 改善了通带半峰全宽和自由光谱范围, 但在实验中这种滤波器对出射光的损耗太大。2006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低损耗可调谐光学滤波器^[4-6], 但是在现实应用中, 此结构的自由光谱范围和通带半峰全宽不够理想, 且中央最大值被一些次极大包围, 这些次极大降低了透过滤波片观察像的衬度, 这个涉及到如何提高出射光的透过率, 同时减小次极大强度的问题。在实验中, 考虑各器件的损耗, 所用的偏光镜多为格兰-泰勒棱镜, 有相当一部分光在切割面上被空气隙损耗掉, 而由于设计中所用的器件是用胶(胶的折射率近似于晶体的折射率)黏合在一起的, 各表面的损耗可忽略不计, 因此, 在实验中减少所用偏光镜的数目正是低损耗与否的关键。作者设计了一种利用石英晶体旋光作用的新型滤波器, 并与原有多级石英晶体旋光滤波器^[7-10](3级)相比较, 阐述此低损耗滤波器的作用。

作者简介: 尹延学(1983-), 女, 硕士研究生, 主要从事激光技术与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: 2010-01-05; 收到修改稿日期: 2010-04-14

1 原理

3级石英晶体旋光滤波器的原有结构^[3]及建立主轴坐标系如图1(不加虚框部分)所示。P₁, P₂, P₃, P₄

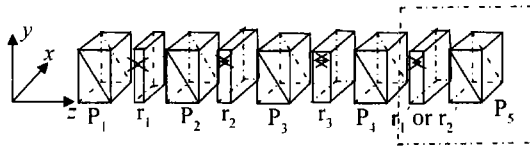


Fig. 1 Light path of the three-level quartz optical filter with the optimization design structure

为平行放置的偏光镜且透振方向相同, r₁, r₂, r₃ 为由光轴垂直于通光表面的右旋石英晶体加工而成的平行平板, 厚度比为1:2:4, 且第1只石英旋光晶体的厚度 d₁ = 6.666mm。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发现, 如果要求滤波器透射光谱的边峰关于主峰对称, 那么旋光滤波片的厚度只有整数倍和半整数倍两种^[11], 本文中的优化设计是基于厚度比为整数倍的原有结构。

厚度比为2的3级石英晶体旋光滤波器的优化改进设计^[12]如图1所示, 与原有结构的区别在于加虚框部分, 在P₄之后增加了一只石英旋光滤波片 r₁' (同于 r₁) 或 r₂' (同于 r₂) 和1只偏光镜 P₅。整个滤波器的透射比为:

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

式中, α(λ)为石英晶体的旋光系数, λ为波长, 由(1)式拟合的理论曲线如图2所示。

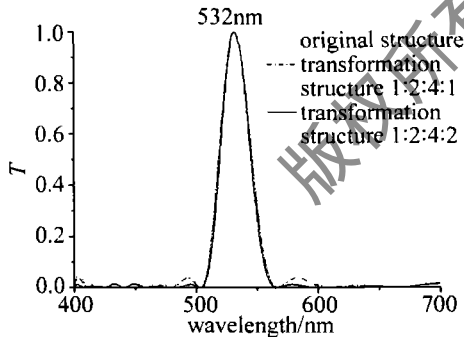


Fig. 2 Theory transmission curves of the three-level quartz optical filter with the optimil design structure (d₁:d₂:d₃ = 1:2:4)

从图2中的曲线可以明显看出: 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 d₂ 的改造结构明显比加 d₁ 的改造结构要好。厚度比为其它整数的石英旋光滤波器也满足此规律。以上分析均是在没有考虑组成滤波器各器件的反射损失的情况下进行的。在作者研制的滤波器中, 各器件之间均是用光学胶 (n = 1.53) 将其组合在一起的。因此各器件之间的反射损失很小, 石英旋光片和波片的透射比镀膜后

可达到99%以上, 故损耗可以忽略。则影响滤波器透射的主要器件是所使用的格兰-泰勒棱镜, 两端的偏光镜的透射比按0.88计, 中间的偏光镜按0.92计。改进结构在减小次极大, 改善通带结构的同时, 由于多增加了一块偏光镜, 使得透射光的亮度降低了。与从P₁出射光强相比较, 拟合的考虑偏光镜透射比的情况下, 石英晶体旋光滤波器透射比随波长的变化曲线见图3。

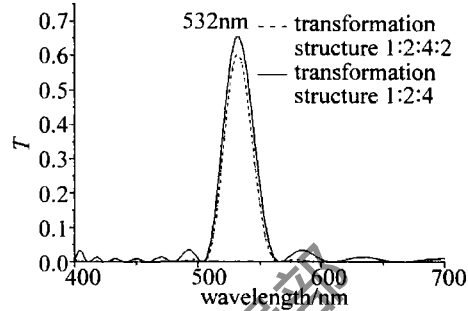


Fig. 3 Theoretical transmission curves of quartz optical filters considered the loss of the devices

2 低损耗改进结构

低损耗改进结构如图4所示, q₁, q₂, q₃, q₄ 为4片

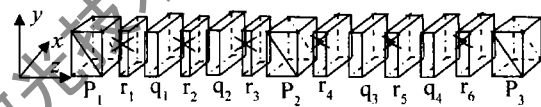


Fig. 4 Improvement low loss structure

λ/4波片(相对于532nm), 其快轴平行于偏光镜的透振方向(y轴方向), 旋光片 r₃, r₆ 为左旋, 其余为右旋。与图1比较可以看出, 图中所用的偏光镜数目少两只, 下面就这一结构滤波情况作分析。

各器件的 Muller 矩阵为:

$$M_{q_i} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}, (i = 1, 2, 3, 4),$$

$$M_{r_1} = M_{r_2} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta_1 & -\sin 2\theta_1 & 0 \\ 0 & \sin 2\theta_1 & \cos 2\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_{r_3} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta_1 & \sin 2\theta_1 & 0 \\ 0 & -\sin 2\theta_1 & \cos 2\theta_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_{r_4} = M_{r_5} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta_2 & -\sin 2\theta_2 & 0 \\ 0 & \sin 2\theta_2 & \cos 2\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$M_{P_0} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos 2\theta_2 & -\sin 2\theta_2 & 0 \\ 0 & \sin 2\theta_2 & \cos 2\theta_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

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

式中, θ 为石英晶体的旋光角:

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

式中, d_i 为石英晶体光轴方向的厚度, 单位是 mm, 且 $d_2 = 2d_1$; $\alpha(\lambda)$ 为石英晶体的旋光系数, 单位是 $^\circ/\text{mm}$ 。 α 的值与波长、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为:

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

式中, λ 为入射光的波长, 单位是 μm 。

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。经过低损耗石英晶体旋光光学滤波器后出射的 Stokes 参量为:

$$S_1 = \frac{I_0'}{2} \cos^2[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 2[\alpha(\lambda)d_1] \times \begin{bmatrix} 1 \\ \cos^2 4[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 2[\alpha(\lambda)d_1] \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

若忽略光在各器件上的损失, 令从 P_1 出射的光为 $I_0 (I_0 = I_0'/2)$, 其透射比为:

$$T' = \frac{\cos^2[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 2[\alpha(\lambda)d_1] \times \cos^2 4[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 2[\alpha(\lambda)d_1]}{\cos^2 4[\alpha(\lambda)d_1] \cos^2 2[\alpha(\lambda)d_1]} \quad (7)$$

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 5 是取 $d_1 = 6.666\text{mm}$, 由 (7) 式拟合的低损耗石英晶体旋光滤波器透射比随波长的变化曲线。

由 (1) 式 ($i=2$ 时) 与 (7) 式完全相同可知, 低损耗改造结构完全可代替原有改造结构, 达到减小次极大的作用。对于这种结构, 仍然忽略各器件之间反射损失, 而只考虑偏光镜透射比, 与前面做相同的处理, 可得实际的滤波器透射比随波长的变化, 如图 6 所示。可以看出, 低损耗改造结构与原改造结构相比较, 出

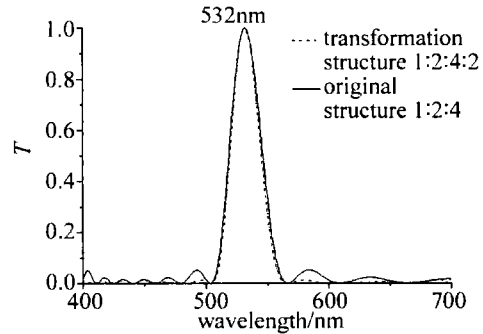


Fig. 5 Theoretical transmission curves of novel quartz optical filters

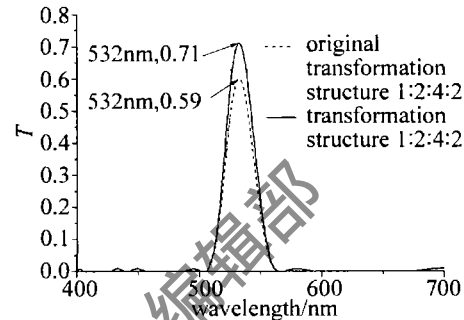


Fig. 6 Theoretical transmission curves of novel quartz optical filters considered the loss of the devices

射光的透过率提高了约 10%, 增加了亮度。其它厚度比为整数的石英旋光滤波器也满足此规律。

3 实验

利用岛津 UV23101PC 分光光度计对新型低损耗石英晶体旋光光学滤波器的滤波效果进行了测试。透射光谱测量装置由光源、分光系统、信号检测系统和数据采集与处理系统组成, 如图 7 所示。在 23 $^\circ\text{C}$ 的温度

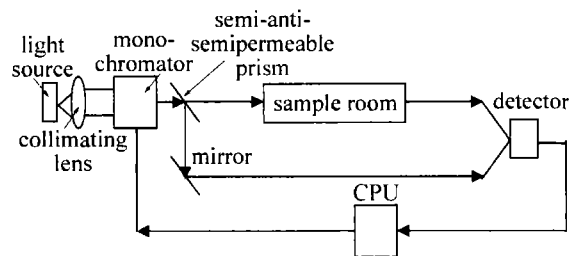


Fig. 7 Schematic diagram of the transmission spectra measurement device
条件下, 滤波器在 400nm ~ 700nm 波长范围内的透射光谱如图 8 所示。

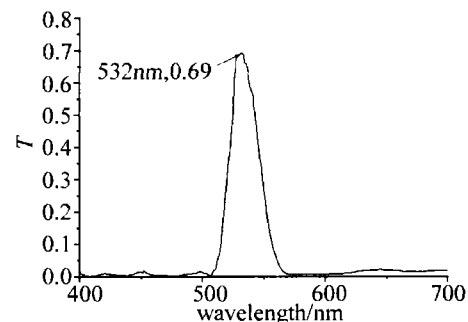


Fig. 8 Experimental transmission curves of novel quartz optical filters considered the loss of the devices ($d_1 = 6.666\text{mm}$)

根据图6和图8的理论和实验透射曲线得出(图1中的结构经计算,损耗太大,实用性不是很好,因此不再对其进行实验验证),中心波长透过率和通带半峰全宽以及次极大的值基本相等,只存在一些微小的差别。可以认为,这种微小差别是由石英晶体的厚度误差以及测量误差造成的。在调制过程中,关键是要光线垂直滤波器入射,将滤波器各器件黏贴后,固定于一平行板上,从而增加滤波器在测量过程中的准确性。实验得到的石英晶体旋光光学滤波器的透射曲线和理论曲线变化规律基本一致,实现了提高光谱透过率的目的。

4 结论

设计了一种利用石英晶体旋光作用的新型滤波器,与原有多级石英晶体旋光光学滤波器(3级)改造结构比较表明:利用理论透射曲线和推导的计算公式得出在保持主透射峰自由光谱范围和通带半峰全宽不变的情况下,考虑各器件损耗的情况,新型低损耗改造结构的出射光透过率远高于原有改造结构的出射光透过率;与参考文献[11]中YE提及的石英晶体旋光滤波器进行比较,不仅改善了主透射峰自由光谱范围和通带半峰全宽,而且减小了次极大光强,有效改善了滤波器的通带结构,从而提高了滤波片观察像的衬度。由于设计中减少了所用偏光镜的数目,则整个滤波器的透射比提高了约10%,并且通过实验进行了验证。由此可见,这种低损耗滤波器具有实际的应用价值。

参 考 文 献

- [1] FRANCON M. Optical filters for radiations separation[M]. Beijing: Science Press, 1984:37-42(in Chinese).
- [2] YAN J X, WEI G H, HA L Zh, *et al.* Matrix optics[M]. Beijing: Ordnance Industry Press, 1995:180-190(in Chinese).
- [3] ZHANG Sh, WU F Q, WU W D. Characteristics of multistage quartz optical filter based on the optical rotatory dispersion effect[J]. Acta Physics Science, 2008, 57(8):5020-5026(in Chinese).
- [4] YE Ch. Wavelength-tunable spectral filter based on the optical rotatory dispersion effect[J]. Appl Opt, 2003, 42(22):4505-4513.
- [5] YE Ch. Liquid-crystal bandpass filter based on the optical rotatory dispersion effect[J]. Appl Opt, 2004, 43(20):4007-4010.
- [6] YE Ch. Low-loss tunable filter based on optical rotatory dispersion [J]. Appl Opt, 2006, 45(6):1162-1168.
- [7] LIANG W, LIANG Zh X, ZHANG Ch Q. Study on computer aided design of lyot filter[J]. Journal of Jinan University, 2003, 17(2): 157-159(in Chinese).
- [8] 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.
- [9] 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).
- [10] 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).
- [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] YIN Y X, WU F Q, WANG Q, *et al.* Optical design of sideband energy of a rotatory quartz filter[J]. Laser Technology, 2010, 34(1): 102-104(in Chinese).

(上接第749页)

参 考 文 献

- [1] ALLEN L, BEIJERSBERGEN M W, SPREEUW R J C, *et al.* Orbital angular momentum of light and the transformation of Laguerre-Gaussian laser modes[J]. Phys Rev, 1992, A45(11): 8185-8189.
- [2] MOLINA-TERRIZA G J, TORRES P, TORNER L. Management of the angular momentum of light: preparation of photons in multidimensional vector states of angular momentum[J]. Phys Rev Lett, 2002, 88(24):257901/1-257901/4.
- [3] ZHANG Y X, TAO Ch K. Wave structure function of light wave propagating in turbulent atmosphere [J]. Laser Technology, 2004, 28(4):337-339(in Chinese).
- [4] PATERSON C. Atmospheric turbulence and orbital angular momentum of singer for optical communication[J]. Phys Rev Lett, 2005, 94(15):153901/1-153901/14.
- [5] PATERSON C. Atmospheric turbulence and free-space optical communication using orbital angular momentum of single photons[J]. Proc SPIE, 2004, 5572:187-198.
- [6] ANGUITA J A, NEIFELD M A, VASIC B V. Turbulence-induced channel crosstalk in an orbital angular momentum-multiplexed free-space optical link [J]. Appl Opt, 2008, 47(13):2414-2429.
- [7] GLENN A T, ROBERT W B. Influence of atmospheric turbulence on the propagation of quantum states of light carrying orbital angular momentum[J]. Opt Lett, 2009, 34(2):142-144.
- [8] AKSENOV V P. Fluctuations of orbital angular momentum of vortex laser-beam in turbulent atmosphere [J]. Proc SPIE, 2005, 5892: 58921Y/1-58921Y/8.
- [9] ZHANG Y X, CANG J. Effects of turbulent aberration on probability distribution of orbital angular momentum for optical communication [J]. Chinese Physics Letters, 2009, 26(7):074220/1-074220/4.
- [10] ANDREWS L C, PHILLIPS R L. Laser beam propagation through random media[M]. Washington: SPIE, 2005:135-178, 478-553.
- [11] NOLL R J. Zernike polynomials and atmospheric turbulence[J]. J O S A, 1996, 66(3):207-211.