

文章编号: 0258-7025(2010)05-1198-05

对内腔拉曼黄光激光器谱线提取的 石英晶体双折射滤波器

李树清^{1,2} 吴福全¹ 尹延学¹ 苏富芳¹

(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, 山东 曲阜 273165)

² 济宁学院物理与信息工程系, 山东 曲阜 273155

摘要 针对内腔拉曼黄光激光器谱线中存在拉曼激光的实际情况,在考虑石英晶体的双折射率色散特性的情况下,将石英晶体和偏光棱镜组合设计成一种用于内腔拉曼黄光激光器 590 nm 谱线提取的石英晶体双折射滤波器。利用 Müller 矩阵和斯托克斯参量对双折射滤波器的滤波设计原理进行了分析。以内腔拉曼黄光激光器作为光源,利用 AQ-6315A 型光谱仪对双折射滤波器的滤波效果进行了测试。实验结果表明,滤波后出射光中已显示不出波长 1180 nm 激光的存在,从而保证了倍频激光 590 nm 的纯度。这种双折射滤波器结构简单,操作方便且不变光光的传播方向。

关键词 物理光学;滤波器;双折射;相位延迟;倍频

中图分类号 O436.3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103705.1198

Quartz Crystal Birefringent Filter Used for Intracavity Yellow Raman Laser

Li Shuqing^{1,2} Wu Fuquan¹ Yin Yanxue¹ Su Fufang¹

¹ Shandong Provincial Key Laboratory of Laser Polarization and Information Technology,
Laser Research Institute of Qufu Normal University, Qufu, Shandong 273165, China

² Department of Physics and Information Engineering, Jining University, Qufu, Shandong 273155, China

Abstract Based on the birefringent index dispersion effect, a quartz crystal birefringent filter is constructed with quartz crystal and polarizer for picking up the 590 nm spectral line in an intracavity Raman yellow laser. The operating principle is analyzed by means of Müller matrix and Stokes parameters. The filtering performance is tested by AQ-6315A spectrometer with an intracavity Raman yellow laser as light source. The experimental results show that the 1180 nm spectral line is extracted after filtering, and the purity of 590 nm frequency laser has been ensured. The structure of this birefringent filter is simple and the operation is convenient. At the same time, it does not change the direction of light beam.

Key words physical optics; filter; birefringence; retardation; frequency-doubled

1 引 言

为了得到不同波长的相干辐射以适应各种应用的需要,激光及非线性光学领域内出现了非线性光学频率变换和激光调谐技术两个重要分支。倍频是非

线性光学频率变换中最典型、最基本和应用最广泛的一种技术,产生的倍频光被广泛地应用于数据存储、微加工、大气探测、微电子学、光化学、光生物学及医学等领域。例如内腔拉曼黄光激光器^[1,2]利用受激拉

收稿日期: 2009-09-23; 收到修改稿日期: 2009-11-15

作者简介: 李树清(1979—),女,硕士研究生,讲师,主要从事偏振光学与偏光器件等方面的研究。

E-mail: jnszwlxslsq@163.com

导师简介: 吴福全(1952—),男,教授,博士生导师,主要从事偏光器件物理学方面的研究。

E-mail: fqwu@mail.qfnu.edu.cn(通信联系人)

曼散射效应,对 Nd:YAG 晶体产生 1064 nm 激光进行拉曼转换^[3~5],然后利用倍频晶体进行内腔倍频转换,以获得黄橙波段的激光。但受倍频晶体转换效率^[6]等因素的制约,黄光中会掺杂一定的拉曼激光,因此需要考虑合适的滤波方法。目前针对倍频激光的滤波方法很多^[7,8],如三倍频谐波分离棱镜分光方法、倍频激光薄膜方法以及用于内腔拉曼黄光激光器的石英晶体旋光滤波器等。光学滤波器是在连续光谱中用于透过一定宽度的光谱带或在线状光谱中用于提取某些辐射的波长选择器件^[9,10]。双折射滤光片^[11]在各类滤波器中是既古老又在发展中的一种光学器件。由于其可被设计成大视场角、极窄的带通、良好的抗损伤能力和平滑的可调谐性等光学性能,有着其他滤光片不可替代的作用。1932 年 Lyot 制作了这种单色双折射滤光片,它是晶体的双折射为基础,应用偏振光的干涉原理设计而成的。这是一种最简单的双折射滤波片,在此原理的基础上还可以设计出多种形式的改进型双折射滤波片以达到各种不同的目的。

本文分析了石英晶体双折射滤光片的滤波原理,考虑了其色散方程,并利用石英晶体制成的滤光片和偏振棱镜的组合设计出了一种用于内腔倍频拉曼激光器 590 nm 谱线提取的双折射滤光器,通过实验对其滤波效果进行验证。

2 滤波器设计原理

石英晶体是光学相位延迟器件(波片)常用的晶体材料,尽管它有物化性能稳定、机械强度高优点,但双折射率对光波而言不是一个常量,有较大的色散性。以平行晶体光轴的晶面作为通光面,光在晶体内垂直晶体光轴传播,其双折射率为最大值,它是波片设计时的重要参量,此值是温度、波长的函数^[12,13]。常温下,石英晶体双折射率的色散方程^[14]为

$$\Delta n(\lambda) = 0.01436 - 2.63111 \times 10^{-5} \lambda + 5.62427 \times 10^{-8} \lambda^2 - 6.73725 \times 10^{-11} \lambda^3 + 4.75388 \times 10^{-14} \lambda^4 - 1.96809 \times 10^{-17} \lambda^5 + 4.41564 \times 10^{-21} \lambda^6 - 4.14135 \times 10^{-25} \lambda^7. \quad (1)$$

图 1 给出了石英晶体双折射率随波长的变化曲线。从图 1 中曲线可以直观地看出,随着波长的增加,石英晶体的双折射率减小。石英晶体的双折射率与通光方向厚度共同决定了波片的相位延迟量的大小。用 δ 表示石英波片的相位延迟量,与其双折射率 Δn 和石英片厚度 d 以及光波长 λ 关系为

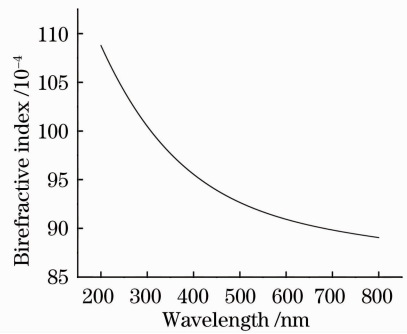


图 1 石英晶体双折射率与波长的关系

Fig. 1 Relationship between the birefractive index of quartz crystal and wavelength

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n(\lambda) d. \quad (2)$$

由(1),(2)式可见,相同振动方向而不同波长的线偏振光通过同一石英晶片时,其相位延迟量不同。正是利用石英晶体双折射率色散对延迟量的影响,设计对内腔拉曼黄光激光器 590 nm 谱线提取的石英晶体双折射滤波器。石英晶体双折射滤波器的结构如图 2 所示。

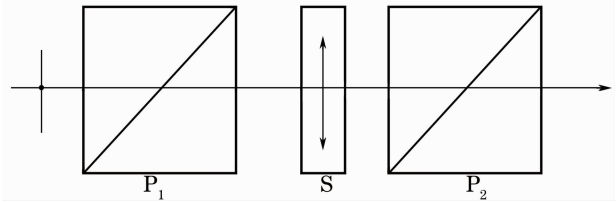


图 2 用于内腔拉曼黄光激光器滤波的石英晶体双折射滤波器结构

Fig. 2 Light path of quartz crystal birefringent filter used for the intracavity Raman yellow laser

图中 P_1, P_2 为偏光镜, S 为由光轴平行于表面的石英晶体加工而成的平行平板。两偏光镜 P_1, P_2 均平行放置且透振方向垂直;石英晶体放在两偏光镜之间,使其光轴方向与两偏光镜的透振方向夹角均为 45° 。由于石英晶体的 $n_e > n_o$,因此快轴方向与光轴方向垂直。

下面利用矩阵光学方法对其透射比进行研究。为了不失一般性,设入射光为光强 I'_0 自然光,入射光的 Stokes 参量为

$$S_0 = I'_0 \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

两偏光镜 P_1, P_2 的 Müller 矩阵为

$$\mathbf{M}_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$\mathbf{M}_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

若石英晶体的相位延迟量为 δ , 则石英晶体的 Müller 矩阵为

$$\mathbf{M}_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \delta & \sin \delta & 0 \\ 0 & -\sin \delta & \cos \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

那么入射光经过双折射滤波器后出射光的 Stokes 参量为

$$\mathbf{S}_1 = \mathbf{M}_2 \mathbf{M}_s \mathbf{M}_1 \mathbf{S}_0 = \frac{1 - \cos \delta}{2} \frac{I'_0}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

若令从 P_1 出射的光强为 I_0 ($I_0 = I'_0/2$), 则(7)式变为

$$\mathbf{S}_1 = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (8)$$

因此石英晶体双折射滤光片的透射光强为

$$I = I_0 \sin^2 \frac{\delta}{2}. \quad (9)$$

于是透射比为

$$T = \sin^2 \frac{\delta}{2}. \quad (10)$$

对于理想的用于内腔拉曼黄光激光器 590 nm 谱线提取的石英晶体双折射滤波器, 应使波长为 $\lambda_1 = 1180$ nm 的激光完全消光, 而 $\lambda_2 = 590$ nm 的激光完全透过。设滤波器对 $\lambda_1 = 1180$ nm 的透射比为 T_1 , 对 $\lambda_2 = 590$ nm 的透射比为 T_2 , 对于理想的滤波器应满足

$$T_1 = \sin^2 \frac{\delta_1}{2} = 0, \quad (11)$$

$$T_2 = \sin^2 \frac{\delta_2}{2} = 1, \quad (12)$$

式中 δ_1, δ_2 分别为石英晶体双折射滤波器对 $\lambda_1 = 1180$ nm 和 $\lambda_2 = 590$ nm 激光的相位延迟量。若使(11), (12) 式成立, 则

$$\delta_1 = 2m_1\pi, \delta_2 = (2m_2 + 1)\pi, \quad (13)$$

式中 $m_1 = 0, 1, 2, \dots$, $m_2 = 1, 2, 3, \dots$, $\delta_2 = 2\pi/(\lambda_2) \times \Delta n(\lambda_2)d$, $\Delta n(\lambda_1), \Delta n(\lambda_2)$ 分别为石英晶体对 1180 和 590 nm 的双折射率; 从而得到石英晶体双折射滤波器中石英晶体的厚度 d 为

$$d = \frac{\lambda_1 m_1}{\Delta n(\lambda_1)} = \frac{\lambda_2 (2m_2 + 1)}{2\Delta n(\lambda_2)}. \quad (14)$$

利用 Mathematica 软件对(14)式进行编程计算, 取 $m_1 = 5, m_2 = 10, \lambda_1 = 1180$ nm, $\lambda_2 = 590$ nm, 由(2)和(14)式计算得到石英晶体的厚度为 0.680261 mm, 其对应的滤波器的滤波理论曲线如图 3 所示。

由图 3 可以看出, 在波长 590 nm 处透射比为 1, 而在波长 1180 nm 处透射比为 0。

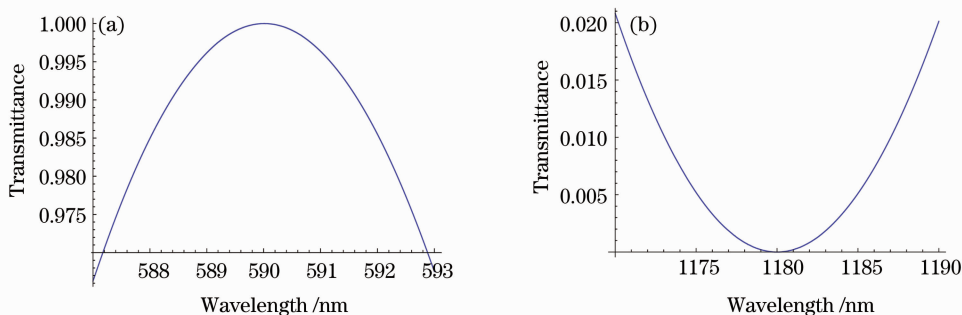


图 3 石英晶体双折射滤波器的理论滤波曲线。(a) 波长为 590 nm; (b) 波长为 1180 nm
Fig. 3 Theory curves of the quartz crystal birefringent filter. (a) 590 nm; (b) 1180 nm

3 实验测试与结果

在实验测试中, 石英晶体 S 的实际厚度为 0.683 mm, 两偏振棱镜 P_1, P_2 的透振方向垂直, 石英晶体 S 的晶体光轴与两偏振片透振方向的夹角均

为 45° , 以此制作了用于内腔拉曼黄光激光器 590 nm 谱线提取的石英晶体双折射滤波器, 并对其滤波效果进行了测试。

测试光路如图 4 所示。图 4 中 1 为内腔拉曼黄

光激光器(激光晶体: Nd:YAG, 拉曼晶体: BaWO₄, 倍频晶体: KTP), 输出波长为 590 nm; 2, 3, 4 的组合为石英晶体双折射滤波器; 5 为探测器; 6 为 AQ-6315A 型光谱仪(分辨率为 1.0 nm)。在没有石英晶体双折射滤波器的情况下光谱仪测出的出射光光谱图如图 5 所示; 将石英晶体双折射滤波器放入光路中(调整光线基本垂直入射), 此时光谱仪测出的出射光光谱图如图 6 所示。

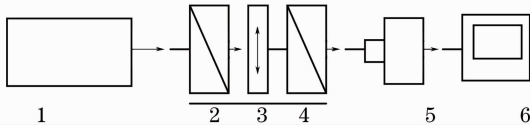


图 4 测试光路

Fig. 4 Tested light path

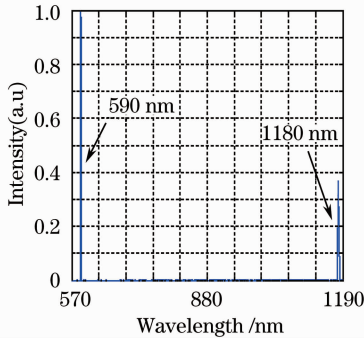


图 5 滤波前出射光的光谱图

Fig. 5 Measured spectrum of the output laser when the light path without the quartz crystal birefringent filter

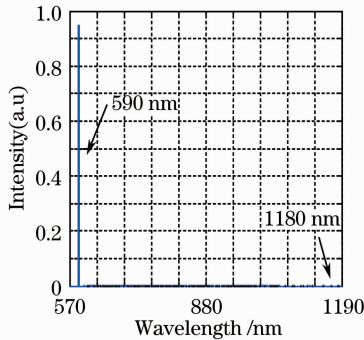


图 6 滤波后出射光的光谱图

Fig. 6 Measured spectrum of the output laser when the quartz crystal birefringent filter is put into the light path

由图 5, 6 可以看出: 滤波前, 出射的倍频激光 590 nm 中仍含有 1180 nm 的基频光; 滤波后, 出射光中已显示不出波长 1180 nm 激光的存在, 从而保证了倍频激光 590 nm 的纯度。AQ-6315A 型光谱仪具有很高的分辨率, 整个实验测试过程都是在其测量参数不变的情况下进行的。为了更清楚地表明滤波效果, 表 1 给出了滤波前后出射光中基频光波

长 1180 nm 和倍频光波长 590 nm 的实验测试数据。表中 P_B 为滤波前的激光输出功率, P_A 为滤波后的激光输出功率。

表 1 出射光的测试数据

Table 1 Test data of the output laser

Wavelength /nm	$P_B/\mu\text{W}$	$P_A/\mu\text{W}$
1180	29.6	2.4×10^{-2}
590	265.7	237

4 结 论

基于石英晶体的双折射率色散特性, 利用石英晶体和偏光棱镜的组合设计了一种用于内腔拉曼黄光激光器 590 nm 谱线提取的双折射滤波器。实验测试结果表明滤波效果良好, 出射光中已测不出波长 1180 nm 激光的存在, 只有波长 590 nm 的倍频激光。这种双折射滤波器结构简单, 操作方便且不改变光的传播方向, 应可以成为用于倍频激光理想的滤波器。

致谢 感谢山东大学信息科学与工程学院张行愚教授在实验测量方面给予的大力支持和帮助。

参 考 文 献

- Jia Peng, Zhang Xingyu, Wang Qingpu *et al.*. Laser diode-pumped Nd:YVO₄ self-stimulated Raman laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(10): 1309~1313
贾 鹏, 张行愚, 王青圃 等. 激光二极管抽运的自拉曼 Nd:YVO₄ 激光器[J]. 中国激光, 2006, **33**(10): 1309~1313
- Shutao Li, Xingyu Zhang, Qingpu Wang *et al.*. Diode-side-pumped intracavity frequency-doubled Nd:YAG/BaWO₄ Raman laser generating average output power of 3.14 W at 590 nm[J]. *Opt. Lett.*, 2007, **32**(20): 2951~2953
- Yao Jianquan. Nonlinear Optics Frequency Conversion and Laser Tuning Technology[M]. Beijing: Science Press, 1995. 381~382
姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调频技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995. 381~382
- Chen Huiting, Lou Qihong, Ye Zhenhuan *et al.*. Solid state Raman lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(7): 55~60, 47
陈慧挺, 楼祺洪, 叶震寰 等. 固体拉曼激光器[J]. 激光与光电子学进展, 2005, **42**(7): 55~60, 47
- Ye Zhenhuan, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Harmonic solid laser pumped multi-wavelength Raman lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8): 904~906
叶震寰, 楼祺洪, 董景星 等. 固体谐波多波长拉曼激光器[J]. 中国激光, 2004, **31**(8): 904~906
- Zhang Huiyun, Zhang Yuping, Zhong Kai *et al.*. Efficient high power diode-side-pumped intracavity-doubled continuous wave green laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(1): 3~5
张会云, 张玉萍, 钟 凯 等. 高效高功率侧面抽运腔内倍频连续绿光激光器[J]. 中国激光, 2008, **35**(1): 3~5
- Zhao Dongfeng, Gu Zhen, Shao Ping *et al.*. Prism based third harmonic splitter[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5): 637~640
赵东峰, 顾 震, 邵 平等. 基于棱镜实现三倍频谱波分离[J].

- 中国激光, 2007, **34**(5): 637~640
- 8 Wu Wendi, Wu Fuquan, Su Fufang *et al.*. Quartz optical filter based on rotatory dispersion effect used for intracavity yellow Raman laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(4): 833~835
吴闻迪, 吴福全, 苏富芳等. 对内腔拉曼黄光激光器谱线提取的石英晶体旋光滤波器[J]. 中国激光, 2009, **36**(4): 833~835
- 9 Chun Ye. Wavelength-tunable spectral filters based on the optical rotatory dispersion effect [J]. *Appl. Opt.*, 2003, **42** (22): 4505~4513
- 10 Chun Ye. Liquid-crystal bandpass filter based on the optical rotatory dispersion effect [J]. *Appl. Opt.*, 2004, **43** (20): 4007~4010
- 11 M. Francon. Optical Filters for Radiations Separation [M]. Beijing: Science Press, 1984. 60~70
- M. 弗朗松. 用于辐射分离的光学滤波片[M]. 北京: 科学出版社, 1984. 60~70
- 12 Li Jingzhen. Optical Guide [M]. Xi'an: Science and Technology Press of Shaanxi, 1986. 1264
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 1986. 1264
- 13 Liao Yanbiao. Polarized Optics [M]. Beijing: Science Press, 2003
廖延彪. 偏振光学[M]. 北京: 科学出版社, 2003
- 14 Song Lianke, Hao Dianzhong. Study of quartz crystal's birefringence dispersion character from ultraviolet band to near infrared band [J]. *Optical Technique*, 2005, **31**(5): 679~683
宋连科, 郝殿中. 石英晶体双折射率紫外至近红外波段色散特性实验的研究[J]. 光学技术, 2005, **31**(5): 679~683

光 学 界 百 科 全 书

——《光学手册》(新版)面世在即

五十年前,随着第一台红宝石激光器的问世,光学进入到一个全新的领域和崭新的发展时代。五十年间,光学界发生了史无前例、翻天覆地的变化,毫不夸张地说,光学已经深入到我们社会生活的每一个角落,影响着所有人的生活。

如今,从事光学研究的学者越来越多,光学专业的学生越来越多,应用光学的行业也越来越多。此时,一本内容丰富全面、涵盖光学领域所有学科的光学百科全书成为相关人士日益迫切的需求。在这种需求下,新版《光学手册》应运而生,经历六年反复酝酿,四年悉心编撰,该书将于近期与广大读者见面。

新版《光学手册》是原《光学手册》(25章,230万字)的修订版。原书出版于1986年,出版后得到了严济慈、王大珩、龚祖同等老一辈科学家的高度评价,称之为填补国内空白,“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”,手册迄今仍是许多光学技术人员案头必备的权威参考书。

但是,在原《光学手册》出版后的25年间,光学理论和技术飞速发展,发生了质的飞跃,完成了从传统光学向现代光学的转变。现代光学包涵传统光学、光电子学和光子学。原书中全部章节内容需要更新,新发展起来的涉及光学的边缘学科需要增添。因此,新版《光学手册》绝非传统意义上的修订,而是一个创新的版本。

“一本有国际影响力的能反映时代脉搏的观念创新的学术性工具书”——这是编者对新版《光学手册》的定位。

新版《光学手册》包含38章、49个光学学科、460万余字,其内容精深到位,基本涵盖了目前光学领域所涉及的所有学科,为光学工作者和非光学科技人员提供了几乎所有光学分科的基本概念、基本原理、基本方法、基本公式和基本数据,翔实而新颖,实用而方便,可谓内容丰富,近乎光学百科全书而更为精深之,实属又一部高水平学术专著。在本书中,诸如电磁光学、纳米光子学、生物光子学、瞬态光学、同步辐射光学、太赫兹波光学、中子光学、非成像光学及自由曲面光学、近场光学和金属表面等离子体光学之类新兴光学学科也将与大家见面。