Lyot 型双折射滤波片在DF 化学激光器中的应用研究

杨 珍,任晓明,赵海涛,刘现魁,王 杰,郭建增

(中国船舶重工集团公司第七一八研究所,河北 邯郸 056027)

摘 要: 综合考虑调制深度、调谐率、自由光谱范围、走离角等各项因素,设计了一组 Lyot 型双折射滤波片,由三块厚度相同的白宝石晶体构成,每个滤波片厚度为 9 mm,三块滤波片同光轴方向平行放置。为减小光在滤波片表面的反射损耗,光以布儒斯特角入射透过滤波片组。通过设计光轴与晶体表面的夹角为 63°,绕其面法线旋转滤波片组,可以实现从 3.6~4.3 μm 不同波长的可调谐输出。考虑到滤波片的加工误差和入射角度的调节偏差,分别对不同光轴倾角和入射角度进行了计算,可以通过旋转双折射滤波片组实现输出波长的校正。Lyot 型双折射滤波片插入损耗小,使用简单,操作方便,有较好的调谐和选频作用,对于研究 DF 化学激光器众多谱线中的单支或者多支有着十分重要的意义。

关键词: DF 化学激光器; 双折射滤波片; 选频; DF 光谱

中图分类号: TN248.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0905006

Application of Lyot birefringent filters in DF chemical laser

Yang Zhen, Ren Xiaoming, Zhao Haitao, Liu Xiankui, Wang Jie, Guo Jianzeng

(The 718th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Handan 056027, China)

Abstract: Considering the effect of modulation depth, tuning rate, free spectral range, walk-off angle, a type of birefringent filters (BRFs) was designed, which consisted of the same three sapphire crystals plates. The birefringent filters′ thickness was 9 mm. They were placed parallelly with the same axis. In order to reduce the reflection loss of the surface, light incidented through BRFs at Brewster′s angle. According to design the tilt angle between optic axis to the surface of the plate which was 63°, tuning was accomplished by rotating the plates as a whole about an axis perpendicular to the surface; finally the spectrum from 3.6 to 4.3 μm can be output. Considering the mismachining tolerance of BRFs and the deviation of incident angle adjustment, the calculation was accomplished from different tilt angle and incident angle respectively, the output wavelength correction can be realized by rotating the plates. BRFs are low-cost and easy to use. Besides, they have a good function of tuning and selecting the different frequency. It′s useful to study the characters of DF chemical lasers′ spectrum.

Key words: DF chemical laser; birefringent filters; spectrum-selecting; DF spectrum

收稿日期: 2019-05-08; **修订日期:** 2019-06-03

基金项目: 国家高技术发展计划(51326010201)

作者简介: 杨珍(1990-),女,助理工程师,硕士,主要从事化学激光器方面的研究。Email:zyang@tju.edu.cn

导师简介: 郭建增(1965-),男,研究员,博士,主要从事化学激光器方面的研究。Email:Guojianzeng@126.com

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

0 引 言

燃烧驱动的连续波 DF 化学激光器输出功率高、光束质量好、热沉积少，输出波长覆盖了3.5~4.3 μm 范围，具有良好的大气传输特性，可以被广泛的应用于研究分子光谱学、医疗、国防中，尤其在红外对抗有着得天独厚的优势[1-2]。DF 化学激光器波长丰富，理论上达 20 多条谱线，是目前为止能够实现高功率、高光束质量的中红外优质光源，因此研究 DF 化学激光器的光谱特性对于激光器的设计和优化有着重要的指导意义[3-4]。为了能够获得单根或者几根谱线输出，需要在腔内插入选频元件，对其波长进行选择。常用的光学选频元件有光栅、棱镜、F-P 标准具、双折射滤波片等[5-6]。王红岩等人使用光栅色散谐振腔对放电驱动的 DF 激光器的谱线特性进行了测量，但是光栅受中红外波段的限制，单位刻槽数难以提高[3]。若要提高分辨率，实现单波长输出，需要使用大面积的光栅，其加工困难，价格昂贵。棱镜选频调谐范围大，制造简单，使用方便，但是需使用色散系数高、吸收系数小的中红外材料，并且存在局部加热效应，会导致光束质量下降，在高功率激光器的使用上受到制约[1]。F-P 标准具光谱分辨率高，可以用于精细调谐，获取较窄线宽的输出谱线，但是其加工精度和调节精度要求比较高。双折射滤波片具有损伤阈值高、插入损耗小、调谐范围宽、使用方便等优点，并且在布儒斯特角下使用还可以提高光束的偏振度。文中设计了一组 Lyot 型双折射滤波片，由三块厚度相同的白宝石晶体构成，每个滤波片厚度为 9 mm，三块滤波片以布儒斯特角同光轴方向平行放置。通过优化滤波片的厚度和光轴与表面的夹角，微调入射角度，绕其面法线旋转滤波片，可以实现从 3.6~4.3 μm 范围内单支或多支谱线输出。

1 双折射滤波片的工作原理

DF 化学激光器通过从超音速流动的增益介质中提取能量，其输出功率与增益区模块的规模成正比。该类型激光器通常采用非稳腔结构，以获取较大的基模体积和较好的光束质量。如图 1(a)所示，采用 Z 型折叠正支共焦非稳腔结构，腔内以布儒斯特角插入双折射滤波片进行选频，图 1(b)为双折射滤波片内光线传输图。理论上，DF 化学激光器可以输出的光谱成分达 20 多根，但实际中由于增益区模块、谐振腔、原料气配比的不同，实际输出光谱略有差异。图 2 为某装置非稳腔 DF 激光器光谱实测图，仅能观察到振动能级 3-2、2-1、1-0 跃迁的三个输出谱带，其中 2P9、2P10、2P11、2P12、3P10、3P11 跃迁谱线增益比较高，1P10、1P11、3P9、3P12、3P13 的跃迁谱线增益比较低。

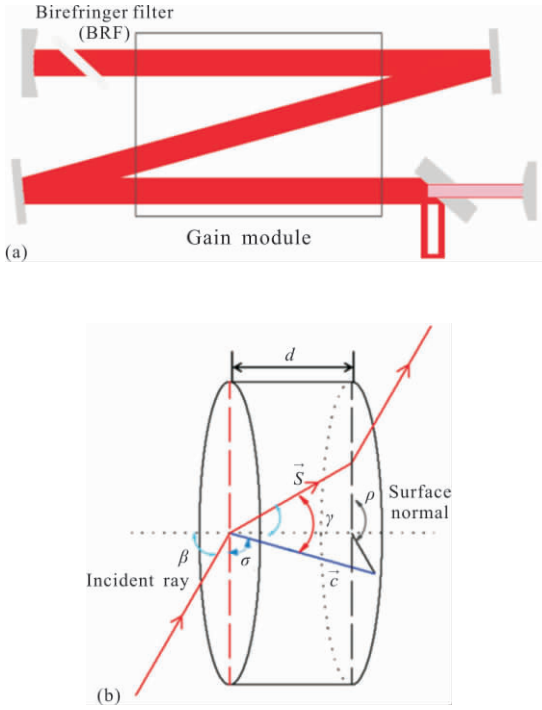


图 1 (a)DF 化学激光器谐振腔,以布儒斯特角插入双折射滤波片；(b)双折射滤波片光线传输图，其中 σ 为光轴和晶体表面的夹角，$\vec{C}$为光轴方向；$\vec{S}$为光线传输方向；β 为入射角；ρ 为滤波片的转角；d 为滤波片厚度

Fig.1 (a)DF chemical laser resonator containing a birefringent filter inserted a Brewster′s angle;(b) light beam incident on the birefringent filter at Brewster′s angle. σ angle is between the optic axis and the surface of the plate; $\vec{C}$ is optic axis; $\vec{S}$ is the direction of beam propagation; β is incident angle; ρ is rotation angle of the plate; d is thickness of the plate

白宝石晶体具有中红外特性极好，透过率高，吸收系数小，容易加工，色散系数比较大等优点，可以用于制作中红外波段双折射滤波片[7]。通过色散公式(1)计算其在 3.6~4.3 μm 范围内的 Δn 变化为 0.006 7~0.007 3，如图 3 所示[7]。

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

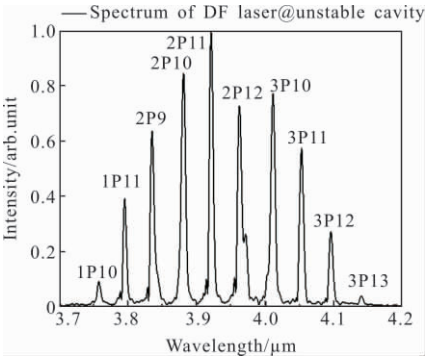


图 2 非稳腔 DF 激光器光谱实测图

Fig.2 Actual measuring spectrum of DF laser with the unstable cavity

$$n^2=1+\frac{A_1\lambda^2}{\lambda^2-B_1}+\frac{A_2\lambda^2}{\lambda^2-B_2}+\frac{A_3\lambda^2}{\lambda^2-B_3} \tag{1}$$

如图 1(b)所示，光以布儒斯特角入射透过双折射滤波片，由于白宝石晶体的双折射效应，透射光分为寻常光 o 光和非寻常光 e 光，两束光的折射率不同，因此在经过双折射滤波片时存在一定的相位差 ϕ，从而导致光的透过率不同，达到选频的目的。使用琼斯矩阵对整个过程进行计算，满足如下方程[4-5]：

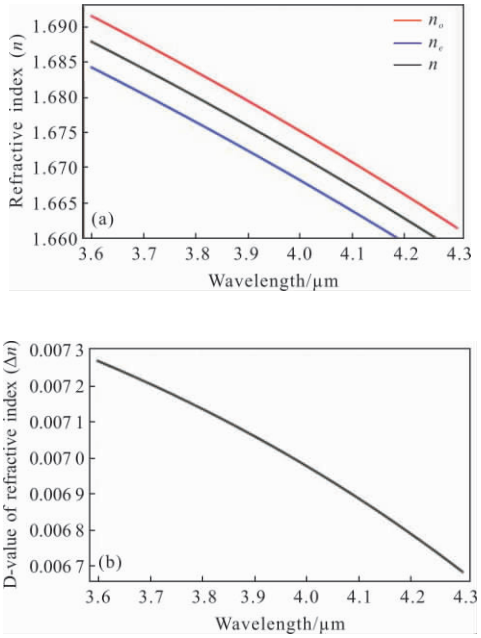


图 3 (a)白宝石晶体 o 光和 e 光折射率以及平均折射率曲线；(b)白宝石晶体 o 光和 e 光折射率差曲线

Fig.3 (a) Refractive index of n_o/n_e and $(n_o+n_e)/2$; (b) difference of n_o and n_e

$$M_{\mathrm{BRFs}}=\begin{pmatrix}\cos^2(\theta)+\sin^2(\theta)\exp(i\phi) & q\cos(\theta)\sin(\theta)[\exp(i\phi)-1]\\ q\cos(\theta)\sin(\theta)[\exp(i\phi)-1] & q^2[\cos^2(\theta)+\sin^2(\theta)\exp(i\phi)]\end{pmatrix} \tag{2}$$

$$\phi=\frac{2\pi d(n_e-n_o)\sin^2(\gamma)}{\lambda\cos(\beta)} \tag{3}$$

$$\cos(\theta)=\frac{1}{\sin(\gamma)\sin(\beta)}[\cos(\rho)\cos(\sigma)-\cos(\gamma)\cos(\beta)] \tag{4}$$

式中：$q=\frac{2n}{1+n^2}$，q 为光经过前表面时，TE 偏振方向光的振幅传输系数；n 为白宝石晶体 o 光和 e 光的平均折射率；θ 为晶体折射率椭球中 TM 偏振方向光和晶体寻常光折射率轴 n_o 的夹角[8-9]。

对公式(2)进行简化，并求解 $M_{\mathrm{BRFs}}\vec{E}=t\vec{E}$，$T=|t|^2$，得到双折射滤波片的透过率[6-7]：

$$T=\left|\frac{(1+q^2)\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)+i(q^2-1)\cos(2\theta)\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}{2}\pm\sqrt{\frac{(1+q^2)\cos\left(\frac{\phi}{2}\right)+i(q^2-1)\cos(2\theta)\sin\left(\frac{\phi}{2}\right)}{2}-q^2}\right|^2 \tag{5}$$

综上讨论，设计合适的晶体厚度 d 和光轴与表面的夹角 σ，绕其面法线旋转双折射滤波片，改变其转角 ρ，即可以实现不同波长的光的透过率 T 变化，达到选频的目的。综合考虑自由光谱范围(Free Spectral Range，FSR)、调制深度 (Modulation Depth，MD)、调谐率 (Tuning Rate，TR)、走离角(Walk-off angle，WOE) 来优化晶体厚度 d 和光轴与表面夹角 σ，使得设计的双折射滤波片既有大的调制深度，又有足够的调谐范围来满足使用条件[10-11]。

$$\mathrm{FSR}=\frac{\lambda^2\sin(\beta)}{d\Delta n\sin^2(\gamma)} \tag{6}$$

$$\mathrm{MD}=4\cos^2(\theta)\sin^2(\theta) \tag{7}$$

$$\mathrm{TR}=\frac{\lambda\sin(2\gamma)\partial\gamma}{\sin^2(2\gamma)\partial\rho} \tag{8}$$

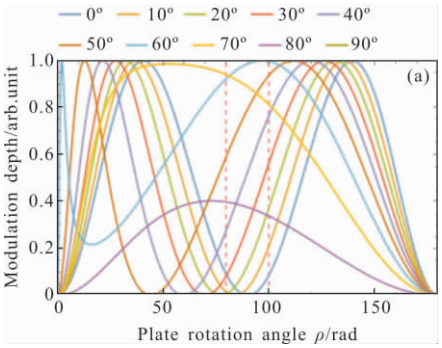
$$\mathrm{WOF}=\frac{\Delta n}{n_o}\frac{\sin(\gamma)}{\sin(\beta)}\sqrt{|\sin(\gamma)\cos(\beta)\sin(\xi)|+[2\cos(\gamma)+\sin(\gamma)\cos(\beta)\cos(\xi)]^2} \tag{9}$$

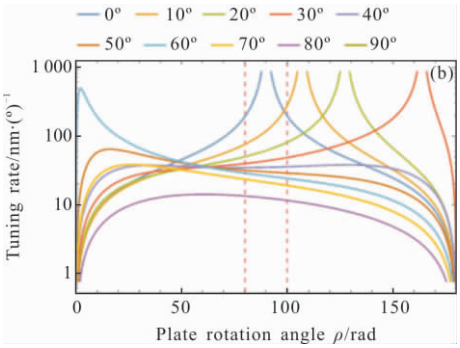
(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

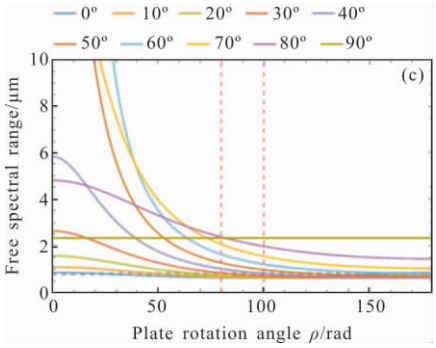
其中，$\cos(\xi)=\dfrac{\sin(\beta)\cos(\sigma)\cos(\rho)-\cos(\beta)\sin(\sigma)}{\sin(\gamma)}$。

2 双折射滤波片的仿真计算

DF 化学激光器的光谱范围为 3.5~4.3 μm，不同规模装置和反应配方的光谱略有差别，以图 2 实测氮稀释剂配方下光谱为例设计双折射滤波片，调谐范围需满足 3.6~4.3 μm，其中心波长为 3.9 μm，该激光器光谱 $\Delta\lambda_{DF}\approx0.8$ μm，根据 $m=\lambda/\Delta\lambda$，m 为整数，因此取 $m=4$。光以布儒斯特角入射透过双折射滤波片，因此入射角 $\beta=59°$。综合考虑调制深度、调谐率、自由光谱范围、走离角等各项因素(如图 4 所示)，光轴与表面的夹角定为 $\sigma=63°$。根据 $d=\dfrac{m\lambda\sin(\beta)}{\Delta n\sin^2(\gamma)}$，对其厚度进行优化(图 5)，因此基片的厚度 $d_0=4.5$ mm。







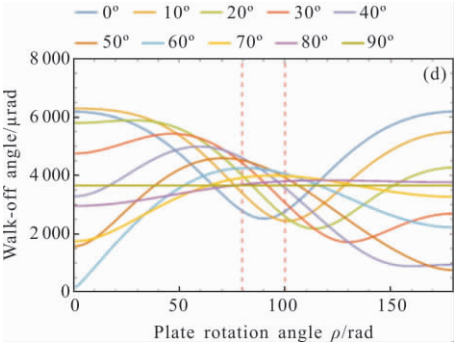


图 4 不同光轴角度 σ 下(a)调制深度和转角(ρ)的变化曲线，(b)调谐率和转动角度的变化曲线，(c)自由光谱范围和转动角度的变化曲线，(d)走离角和转动角度的变化曲线

Fig.4 (a) Calculated variation of modulation depth as a function of plate rotation angle (ρ) with different σ, (b) calculated variation of tunig rate as a function of plate rotation angle (ρ) with different σ, (c) calculated variation of free spectral range as a function of plate rotation angle (ρ) with different σ, (d) calculated variation of walk-off angle as a function of plate rotation angle (ρ) with different σ

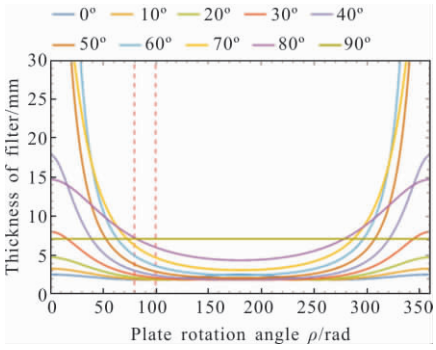


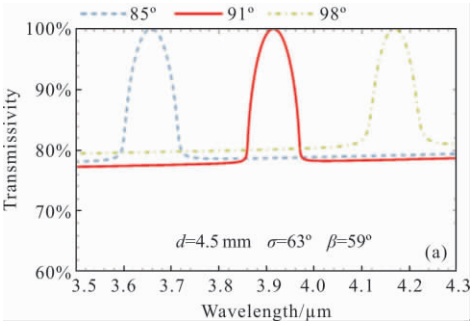
图 5 不同光轴角度 σ 下，滤波片厚度随转角的变化曲线

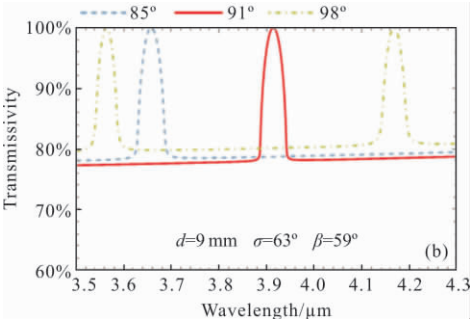
Fig.5 Calculated variation of filter's thickness as a function of filter rotation angle with different σ

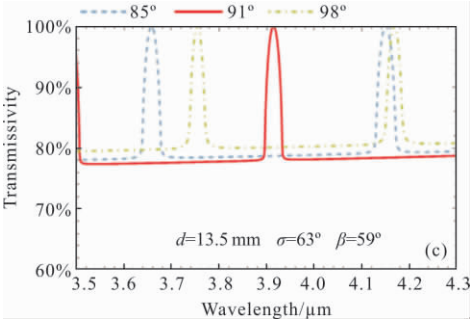
通过设计的光轴与表面的夹角 σ 和基片厚度 d_0，计算了几种不同厚度的滤波片透过率曲线，其厚度为基片厚度的整数倍，如图 6 所示。随着滤波片厚度的增加，透射带的带宽逐渐减小，相邻透射峰的间隔减小，在输出光谱的范围内会出现多个透射峰，因此需要设计合适的滤波片厚度，使得在 DF 的输出光谱范围内仅有一个透射峰且透射带带宽小于 DF 激光器相邻谱线间隔，实现单频输出的目的。此外，单个滤波片最高只能将其他谱线的透过率抑制在

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

80%以下，若要在增益系数比较大的激光器中获得单频输出，需要使用多个双折射滤波片，因此设计了一组双折射滤波片。滤波片组由三块厚度均为 9 mm 的白宝石晶体构成，三块滤波片同光轴方向平行放置，透过率曲线如图 7 所示[12-13]。双折射滤波片组的透过率曲线透射带的半高全宽为~20 nm，小于图 2 中两根谱线的间距 40 nm，可以达到选单频的目的。通过旋转双折射滤波片，透射带发生偏移，对其他谱线的抑制会减弱，其他谱线的透过率由 46%变化到 52%。对于典型的 DF 激光器输出光谱而言，如图 2 所示，2P9、2P10、2P11、2P12、3P10、3P11 跃迁谱线增益比较高，1P10、1P11、3P9、3P12、3P13 的跃迁谱线增益比较低。当选择 1~0 能级谱线和 3P9、3P12、3P13 的跃迁谱线时，需要在腔内辅助其他措施来抑制 DF 激光器增益系数比较大的谱线。







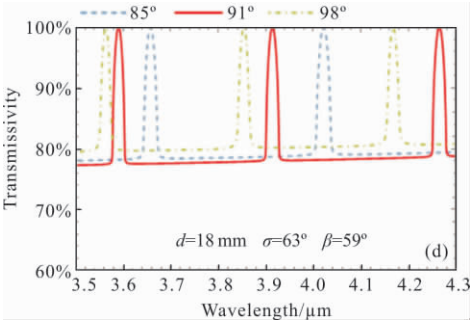


图 6 不同转角和滤波片厚度下波长的透过率曲线

Fig.6 Calculated transmissivity curves of different rotation angles and filter's thickness as a function of wavelength

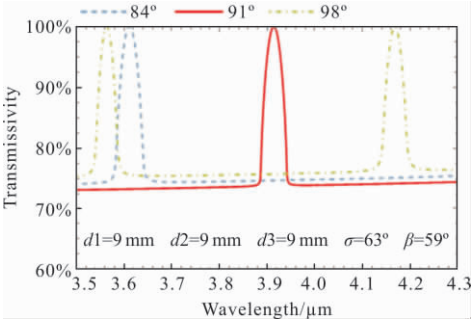
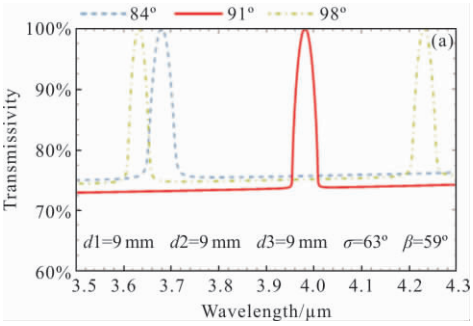


图 7 不同波长时滤波片厚度比为 1:1:1.5 的透过率曲线

Fig.7 Calculated transmissivity curves of filter's thickness rate 1:1:1.5 as a function of wavelength

实际使用过程中，双折射滤波片由于材料的加工误差和入射角度的调节偏差会导致中心波长发生漂移。如图 8 所示，当光轴倾角发生 1°的加工误差时，透射带峰值漂移~65 nm，转动双折射滤波片可以校正输出波长的飘移。但是当双折射滤波片组光轴倾角不一致时，会导致透过率曲线的调制深度变差，透射带带宽增加，影响双折射滤波片的选频效果，因此在装配双折射滤波片组时，需要预先进行标定，对其进行校正。如图 9 所示，当入射角度发生 1°的调节



(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

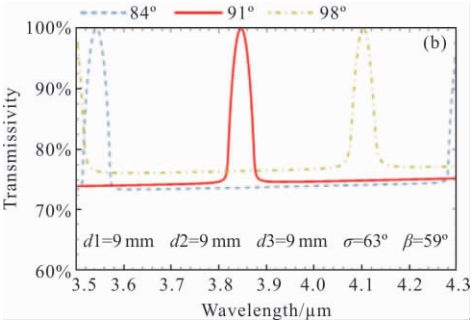


图 8 不同光轴倾角波长下的双折射滤波片的透过率曲线

Fig.8 Calculated transmissivity curves of birefringent filters under different tilted angles and optical axis and wavelength

偏差时，透射带峰值漂移~100 nm，厚度加工误差可以等效为入射角的变化。综合以上分析，透射带的峰值漂移小于滤波片的调谐范围，当出现加工误差和调节偏差比较小时，可以通过旋转双折射滤波片实现输出波长的校正，同时可以通过微调入射角度扩大双折射滤波片的调谐范围。

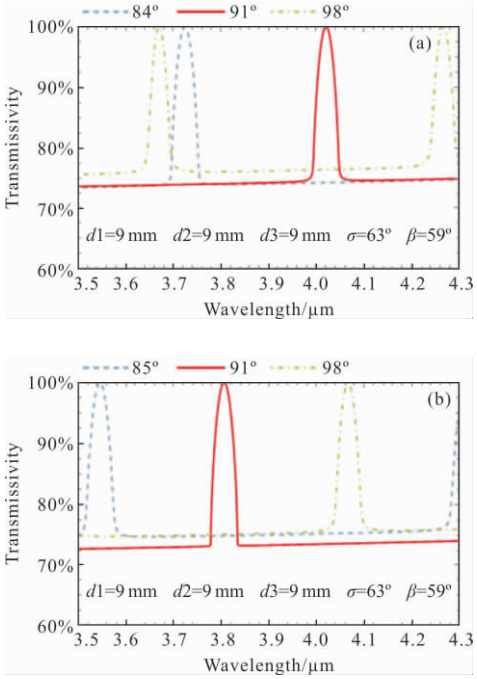


图 9 不同入射角、波长下的双折射滤波片的透过率曲线

Fig.9 Calculated transmissivity curves of different incident angle and wavelength

3 结 论

文中设计了一组 Lyot 型双折射滤波片，其中心波长为 3.9 μm，由三块厚度相同的白宝石晶体组成，单个滤波片厚度为 9 mm，三块滤波片同光轴方向平行放置。为减小光在滤波片表面的反射损耗，光以布儒斯特角入射透过双折射滤波片。经过仿真和计算，综合考虑自由光谱范围、调制深度、调谐率、走离角等因素的影响，设计了合适的滤波片厚度和光轴与晶体表面的夹角，绕其面法线旋转滤波片约 14°，实现从 3.6~4.3 μm 高调制深度输出。考虑到滤波片的加工误差和入射角度的调节偏差，分别对光轴倾角和入射角度偏差 1°的情况进行了计算，双折射滤波片的透射带峰值会发生飘移，可以通过转动双折射滤波片校正输出波长的偏移。双折射滤波片属于透射式选频元件，当高功率密度激光经过双折射滤波片后会产生热效应，因此在实际使用中需要加入合适的热管理机制来减小镜片的变形。同时课题组还提出使用一级振荡二级放大的谐振腔来实现高功率 DF 激光器单频激光输出，既减小了双折射滤波片上的功率密度，又获得了高的输出功率。实际使用中，为了实现高功率 DF 激光器单频输出，经常会采用多种选频手段来共同选频，降低单一选频方式的难度。Lyot 型双折射滤波片插入损耗小，使用简单，操作方便，有较好的调谐和选频作用，对于研究 DF 激光器众多谱线中的单支或者多支有着十分重要的意义，在高功率 DF 激光器的选频研究中有着很好的应用前景。

参考文献：

[1] Gross R W F, Bott J F. Handbook of Chemical Lasers[M]. Beijing: Science Press, 1987. (in Chinese)
格罗斯 RWF, 博特 J F. 化学激光手册[M]. 北京：科学出版社，1987.

[2] Li Liucheng, Duo Liping, Wang Yuanhu, et al. Cavity enhanced absorption spectroscopy measurements for chemical lasers [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2017, 46(2): 0239003. (in Chinese)
李留成，多丽萍，王元虎，等. 用于化学激光器的腔增强吸收光谱测量[J]. 红外与激光工程，2017, 46(2): 0239003.

[3] Wang Hongyan, Yuan Shengfu, Li Qiang, et al. A discharge driven continuous wave single line DF/HF chemical laser for atmospheric absorption measurement [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2008, 35(7): 997-1000. (in Chinese)
王红岩，袁圣付，李强，等. 用于大气吸收测量的小型电激励连续波 DF/HF 选线化学激光器 [J]. 中国激光，2008, 35(7): 997-1000.

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[4] Wang Hongyan, Zhang Xuanzhe Li Qiang, et al. Efficient nitrogen diluted discharge-driven continuous wave HF/DF chemical lasers [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2011, 19(2): 304-309. (in Chinese)
王红岩, 张煊喆, 李强, 等. 氮稀释剂高效电激励连续波 HF/DF 化学激光器[J]. 光学 精密工程, 2011, 19(2): 304-309.

[5] Chen Hui, Xia Yuanqin, Lu Zhenzhong, et al. Broadband tunable output of Ti:sapphire laser s by using BF [J]. ***Infrared and Laser Engineering***, 2008, 35(7): 461-463. (in Chinese)
陈辉, 夏元钦, 鲁振中, 等. 利用 BF 实现钛宝石激光器宽带可调谐激光输出 [J]. 红外与激光工程, 2008, 35(7): 461-463.

[6] Wang Yalong, Wang Qing, Li Wenjing, et al. Study on methods for ultra-wideband tunable all-solid-state single-frequency lasers[J]. ***Optical Technique***, 2018, 44(1): 88-93. (in Chinese)
王亚龙, 王庆, 李文静, 等. 超宽带可调谐全固态单频激光器的方法研究[J]. 光学技术, 2018, 44(1): 88-93.

[7] 李景镇. 光学手册[M]. 西安: 陕西科学技术出版牡, 1986: 685-693.

[8] Evans J W. The birefringent filter[J]. ***Journal of the Optical Society of America A***, 1949, 39(3): 229-242.

[9] Bloom A L. Modes of a laser resonator containing tilted birefringent plates [J]. ***Journal of the Optical Society of America A***, 1974, 64(4): 447-452.

[10] Zhu S. Birefringent filter with tilted optic axis for tuning dye lasers: theory and design [J]. ***Applied Optics***, 1990, 29(3): 410-415.

[11] Demrrbas U. Off-surface optic axis birefringent filters for smooth tuning of broadband lasers[J]. ***Applied Optics***, 2017, 56(28): 7815-7825.

[12] Preuss D R, Gole J L. Three-stage birefringent filter tuning smoothly over the visible region: theoretical treatment and experimental design[J]. ***Applied Optics***, 1980, 19(5): 702-710.

[13] Liang Zhixia, Li Guohua, Shao Weidong, et al. Study of the optimal thickness ratio of the birefringent filter [J]. ***Chinese Journal of Lasers***, 2000, 27(7): 601-605. (in Chinese)
梁志霞, 李国华, 邵卫东, 等. 双折射滤光片最佳厚度比的研究[J]. 中国激光, 2000, 27(7): 601-605

(C)1994-2020 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net