

0.5 μm 波段全固态三波长激光器研究

邵志强¹ 高兰兰¹ 檀慧明² 张辰¹

(¹ 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022
² 中国科学院苏州生物医学工程技术研究所, 江苏 苏州 215163)

摘要 为了提高 Nd:YAG/LBO 腔内倍频 561 nm 黄光激光器输出功率的稳定性, 通过在谐振腔内插入双折射滤波器 (BF) 选择出单一谱线来实现。同时通过 BF 的角度调谐, 分别得到了稳定的 558 nm 和 556 nm 单谱线输出。用 5 W 的激光二极管 (LD) 抽运 Nd:YAG 晶体, 腔内加入 2 mm 厚的双折射滤波器, 先通过 BF 放置角度的调谐获得单一谱线的基频光运转, 再利用 LBO 晶体进行腔内倍频获得稳定的黄光输出。当抽运功率为 5 W 时, 556、558 和 561 nm 激光的最大输出功率分别为 256、189 和 227 mW, 光-光转换效率分别为 5.12%、3.78% 和 4.54%。

关键词 激光器; 561 nm; 谱线竞争; 双折射滤波器; LBO

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0902003

Research on Three-Wavelength Diode Pumped Solid State Laser of 0.5 μm Waveband

Shao Zhiqiang¹ Gao Lanlan¹ Tan Huiming² Zhang Chen¹

(¹ College of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China)
² Suzhou Institute of Biomedical Engineering and Technology, Chinese Academy of Sciences, Suzhou, Jiangsu 215163, China)

Abstract In order to improve the stability of the 561 nm yellow laser output power by the Nd:YAG/LBO intracavity frequency doubling, the birefringence filter (BF) is inserted into cavity. Meanwhile, the 556 nm and 558 nm single line laser outputs are obtained by tuning the alignment angle of the BF. When the pumping power of Nd:YAG crystal is 5 W, and the thickness of BF is 2 mm, the fundamental beam of the single line laser is obtained by tuning the alignment angle of the BF. Then, the yellow laser is obtained by LBO intracavity-frequency-doubling. At the incident pumping power of 5 W, the output power at 556, 558, 561 nm are 256, 189, 227 mW, and the corresponding light-to-light conversion efficiency are 5.12%, 3.78% and 4.54%, respectively.

Key words lasers; 561 nm; line competition; birefringence filter; LBO

OCIS codes 140.7260; 140.3570; 140.2020; 230.5298

1 引言

黄激光具有单色性、准直性和高亮度等特点, 非常适合于光学器官的眼球诊断和治疗。561 nm 黄激光还可用于眼底黄斑部进行眼底光凝治疗。在激光展示、照明、分子生物学等方面都有很广泛的应用^[1]。另外 556 nm 波长的黄激光非常接近人眼最

敏感的波长 (555 nm), 适合用于激光显示和照明, 如: 舞台表演的灯光布置和城市夜景的装饰, 在天文望远镜中替代传统的钠导信号源等。

2005 年, 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所的贾富强等^[2] 获得了 556 nm 激光输出。他们使用 2 W 的激光二极管 (LD) 抽运 Nd:YAG 晶

收稿日期: 2013-03-28; 收到修改稿日期: 2013-04-10

基金项目: 长春市国际科技合作计划项目 (2011101)

作者简介: 邵志强 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要从事全固体激光技术及非线性频率变换技术等方面的研究。

E-mail: 1871502077@qq.com

导师简介: 高兰兰 (1974—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事非线性光学和全固态激光器等方面的研究。

E-mail: gll_75@163.com

体,通过三硼酸锂(LBO)进行腔内倍频,获得了102 mW的黄光输出。2008年,Räikkänen等^[3]使用2.5 W的LD抽运Nd:YAG,利用Cr⁴⁺:YAG被动调Q,然后通过砷酸钛氧钾(KTA)进行腔外倍频,得到单脉冲能量为5 μJ、平均输出功率为55 mW的561 nm激光输出。2009年,Yao等^[4]在抽运功率为10 W时得到了1.2 W的561 nm黄绿光输出。2012年,崔锦江等^[5]同样采用半导体抽运腔内倍频的方法,获得了可满足医疗应用的瓦级全固态561 nm黄绿光激光输出。但是由于Nd:YAG晶体1.1 μm波段的1112、1116、1123 nm谱线都是对应⁴F_{3/2}-⁴I_{11/2}这2个能级间的跃迁,只是其上下能级对应不同的斯塔克分裂子能级,其中1112 nm对应的是R₂-Y₆的跃迁,1116 nm对应的是R₁~Y₅的跃迁,1123 nm对应的是R₁~Y₆的跃迁,由文献^[6]可知,这3条谱线增益接近、竞争激烈,导致基频光,尤其是腔内倍频时倍频光输出稳定性差^[6-8]。

本文利用激光二极管端面抽运Nd:YAG晶体,使用双折射滤波片抑制1123 nm临近基频光谱线振荡,然后利用LBO非线性晶体进行腔内倍频实现561 nm单谱线输出。同时利用双折射滤波器(BF)的角度调谐获得了1112 nm和1116 nm这2条激光谱线的单独运转,再通过LBO腔内倍频,获得了稳定的556 nm和558 nm单谱线黄光输出。

2 实验装置

实验装置如图1所示,激光二极管作为抽运源,最大输出功率为5 W,中心辐射波长为808 nm,抽运光通过一个非球面镜聚焦到增益介质上。LD用热电制冷系统(TEC)控温,使LD发射波长与Nd:YAG晶体的吸收波长吻合。增益介质是Nd掺杂浓度(原子数分数)为1.0%的Nd:YAG晶体,尺寸为3 mm×3 mm×3 mm。Nd:YAG的左表面镀有1123 nm高反膜(反射率R>99.8%)、808 nm和1319 nm的增透膜(透射率T>90%)。Nd:YAG的右表面镀有1123 nm增透膜(T>99%)。该Nd:YAG晶体用一块铜铂包起来,然后固定在一个铜槽上。通过TEC维持晶体的温度在20℃左右。LBO(尺寸为2 mm×2 mm×10 mm)是倍频晶体(I类相位匹配切割,光线在xoz面的投影与z轴的夹角θ=90°,光线和x轴夹角φ=7.5°),镀有1123 nm和561 nm的增透膜以减小基频光和倍频光的插入损耗。BF是一个2 mm厚的没有镀膜的石英晶体,以布儒斯特角放入谐振腔中。OC是一个曲率半径为50 mm的输出耦

合镜,左表面镀有1123 nm的高反膜(R>99.9%)和561、1064 nm的增透膜(T>95%)。谐振腔由工作物质的左端面 and 输出镜共同构成。考虑到谐振腔的稳定性条件0<G<1,并且G因子在0.5附近的谐振腔最稳定,于是实验中选择谐振腔的长度约为25 mm。LD用TEC控温,使LD发射波长与Nd:YAG晶体的吸收波长吻合。

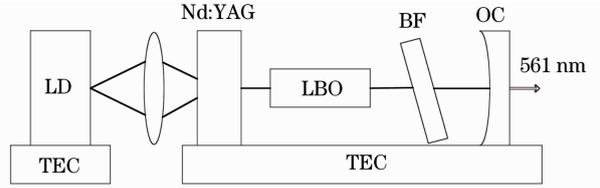


图1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

3 实验结果

实验时,首先调节LD的温控,使得LD的发射峰和Nd:YAG的吸收峰重合,之后调节输出镜的位置和晶体温控,直到红外输出光斑和功率达到最佳状态。实验中,一定抽运功率下获得激光输出以后,在调节谐振腔的位置到最佳过程中,发现当输出激光接近最佳状态的时候,Nd:YAG晶体产生的荧光呈现蓝色,蓝色荧光的产生为激发态吸收所致。在最佳状态时,在谐振腔内插入LBO倍频晶体(不放BF),然后用精度为0.01 nm的HR4000CG-UV-NIR光谱仪测试二次谐波产生(SHG)的光谱特性,如图2所示。

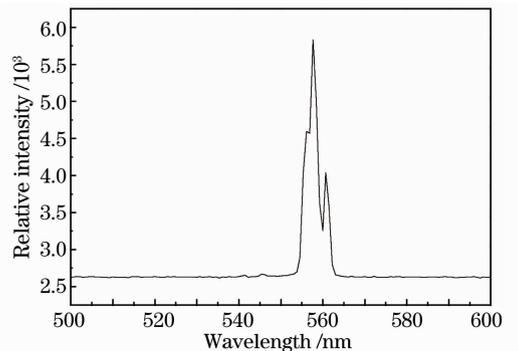


图2 二次谐波光谱分布曲线

Fig. 2 Output spectrum distribution of SHG

结果显示激光器的输出光束含有3条谱线(556、558、561 nm)。由于3条谱线之间存在着较大的谱线竞争,将导致激光器的输出功率起伏很大。多谱线输出以及输出功率的起伏都将限制这类激光器的应用。

为了获得稳定的黄激光输出,把2 mm厚的BF

放入谐振腔中(以布儒斯特角放置),调节它的调谐角到 47.6°(Matlab 软件计算),然后用 HR4000CG-UV-NIR 光谱仪测试 SHG 的输出光谱,得到了如图 3 所示的实验结果。从图 3 中可以看出,实验得到了 561 nm 单谱线输出(线宽小于 1.5 nm)。

考虑到 BF 的选择性损耗原理,当 BF 处于不同的调谐角度时,同样可以滤掉 1123 nm 基频光,使得 1112 nm 和 1116 nm 基频光单独振荡。调整 BF 的角度到 46.6°和 45.9°(Matlab 软件计算),分别得到了 556 nm 和 558 nm 单谱线输出(线宽分别小于 1.5 nm)(如图 4 所示)。

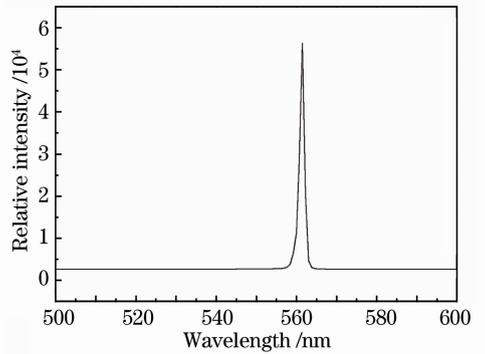


图 3 561 nm 单谱线输出光谱

Fig. 3 Spectrum of the 561 nm single-line output

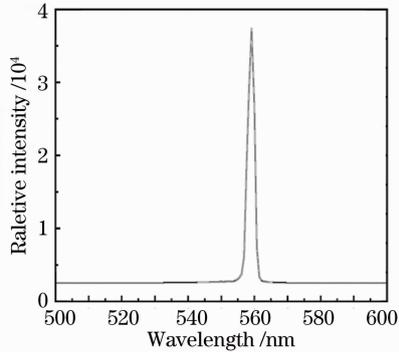
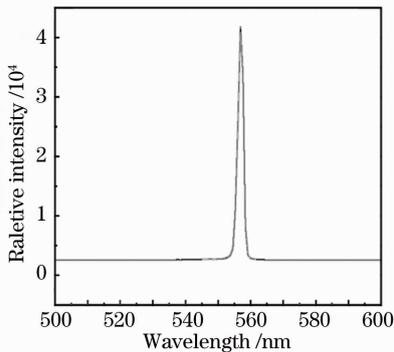


图 4 556 nm 和 558 nm 单谱线输出光谱

Fig. 4 Spectra of 556 nm and 558 nm single-line outputs

用功率计测量输出不同倍频光时,得到输出功率随着抽运功率变化曲线(如图 5 所示)。从图 5 中可以看出,当抽运功率为 5 W 时,556 nm 激光的输出功率最高为 264 mW,这与 1112 nm 谱线的受激发射截面大于 1116 nm 和 1123 nm 谱线的受激发射截面是一致的。同时发现加入 BF 以后,倍频光的输出功率有所降低,但是输出功率稳定性有了很大提高。双折射滤波器的插入,可以选择出单一的基频光谱线,从而避免腔内同时存在 3 条谱线时谱线间的相互竞争,

提高了输出功率的稳定性。测量显示激光器在 8 h 工作过程中输出功率的波动性低于 4%。

4 理论分析

本实验中使用的 BF 是一个 2 mm 厚的石英晶体,光轴和 BF 表面平行。当 BF 以布儒斯特角放置在谐振腔中时,BF 的 2 个表面起偏振器的作用。一束线偏振光(偏振方向平行于入射面)入射到 BF 上,由于石英晶体的双折射效应,折射后分解成 o 光和 e 光,如图 6 所示,B 为平行于晶体表面的直线和晶体边缘的交点,A 为 BF 的调谐角,它们透过 BF

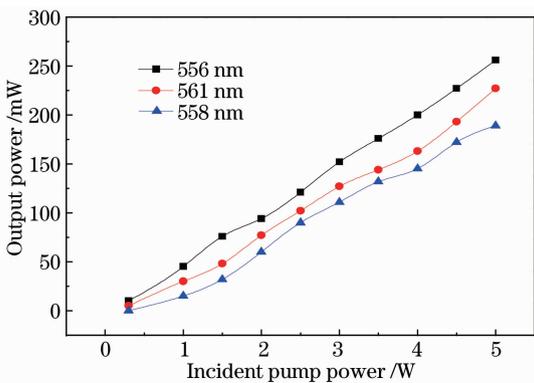


图 5 黄光的输出功率随入射功率的变化

Fig. 5 Output power of the yellow laser versus pump power

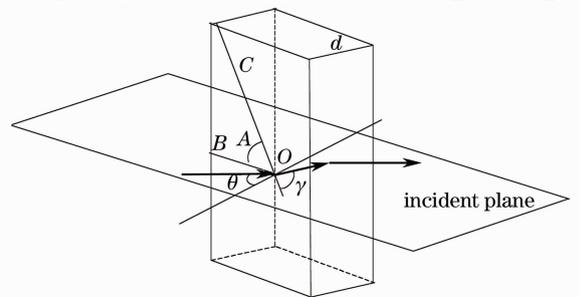


图 6 光束入射到 BF 上示意图

Fig. 6 Schematic diagram of incident light beam upon a BF

时的相位延迟为^[9]

$$\delta = \frac{2\pi d(n_o - n_e) \sin^2 \gamma}{\lambda \sin \theta}, \quad (1)$$

式中 $(n_o - n_e)$ 是o光和e光的折射率差, d 是BF的厚度, γ 为折射光的波矢量和石英晶体光轴 C 的夹角, λ 是入射光波的波长, θ 是入射角(布儒斯特角)。BF的滤波功能建立在其偏振干涉特性基础之上。入射偏振光的强度设为 I_0 ,出射光的强度设为 I ,因此,BF的透射率 T_{BF} 为:

$$T_{BF} = \frac{I}{I_0} = 1 - \sin^2(2\phi) \sin^2(\delta/2), \quad (2)$$

式中 ϕ 是入射面和电位移矢量 D' 或者 D'' 之间的夹角^[6]。根据正单轴晶体的性质和立体解析几何原理,可以得到:

$$\sin \phi = \cot \gamma \frac{|\sin \theta / \cos \alpha - \tan \alpha \cos \gamma|}{[1 - (\sin \theta / \cos \alpha - \tan \alpha \cos \gamma)^2]^{1/2}}, \quad (3)$$

式中 α 是光轴和BF表面之间的夹角,由于本实验使用的BF的光轴和其表面平行。因此 $\alpha=0$,所以

$$\sin \phi = \cot \gamma \tan \theta. \quad (4)$$

把(2)式代入到(4)式中,得到:

$$T_{BF} = 1 - 4 \cot^2 \gamma \tan^2 \theta (1 - \cot^2 \gamma \tan^2 \theta) \sin^2 \left(\frac{\delta}{2} \right). \quad (5)$$

图7所示是用Matlab软件画出的1123、1116和1112 nm的透射率曲线。在这个图形中可以看出,当1123 nm的调谐角为 47.6° 时,透射率为1.000。这时,1112 nm和1116 nm的透射率分别为0.679和0.856[如图7(c)所示],巨大的插入损耗抑制了这2个谱线的振荡。同理,当调谐角为 46.6° 时,BF在1116 nm处的透射率为100%,在1112 nm和1123 nm处的透射率为84.3%和86.5%[如图7(b)所示],只有1116 nm这条谱线可以起振。当调谐角为 45.9° 时,BF在1112 nm处的透射率为1.000,在1116 nm和1123 nm处的透射率为0.886和0.843[如图7(a)所示],只有1112 nm这条谱线可以起振。所以,在当BF处于不同调谐角度时,可以选择性获得相应的激光谱线。

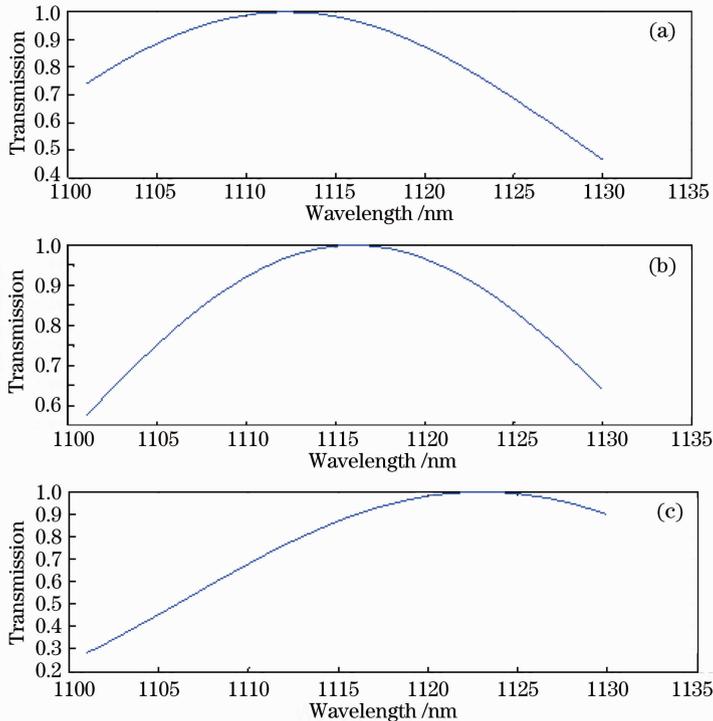


图7 BF在不同调谐角时光谱透射率曲线。(a) 45.9° ; (b) 46.6° ; (c) 47.6°

Fig. 7 Transmission curves of the BF at different tuning angles. (a) 45.9° ; (b) 46.6° ; (c) 47.6°

另外,Nd:YAG激光谱线的增益带宽是0.5~0.6 nm,谐振腔内的纵模间隔是0.014 nm。根据理论计算可知谐振腔内至少有7~8个纵模。尽管BF能用作频率选择器,但是在谐振腔中放入2 mm厚

的BF不可能获得单频输出。所以BF只起到一个谱线选择器的作用,而不是频率选择器。

5 结 论

利用 5 W 的 LD 抽运 Nd:YAG 晶体,用 BF 来选择激光谱线,利用 LBO 非线性晶体进行腔内抽运,通过 BF 调谐角的合理调节,分别实现 561、558 和 556 nm 单谱线输出。在 5 W 的抽运功率下,最大输出功率分别为 227、189 和 256 mW,光-光转换效率分别为 5.12%、3.78% 和 4.54%。BF 的使用不仅将镀膜不能分开的激光谱线进行了选择,同时提高了倍频光的输出稳定性。在下一步的工作中,将重新选择 BF 的厚度,以便尽量压窄线宽,甚至获得这 3 条谱线的单频输出。

参 考 文 献

- 1 He Yanyan, Xia Danqing, Ruan Kai, *et al.*. The research on the all-solid-state 561 nm laser[J]. *Applied Laser*, 2011, 31(4): 327-331.
何艳艳, 夏丹青, 阮凯, 等. 全固态 561 nm 黄激光器的研制[J]. *应用激光*, 2011, 31(4): 327-331.
- 2 Jia Fuqiang, Xue Qinghua, Zheng quan, *et al.*. All-solid-state 556 nm yellow laser by LBO intracavity-frequency-doubling[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(8): 1017-1021.
贾富强, 薛庆华, 郑权, 等. 全固态 LBO 腔内倍频 556 nm 黄光激光器[J]. *中国激光*, 2005, 32(8): 1017-1021.
- 3 E Rääkkänen, O Kimmelma, M Kaivola, *et al.*. Passively Q-switched Nd:YAG/KTA laser at 561 nm[J]. *Opt Commun*, 2008, 281(15): 4088-4091.
- 4 Y Yao, Q Zheng, D P Qu, *et al.*. All-solid-state continuous-wave frequency doubled Nd:YAG/LBO laser with 1.2 W output power at 561 nm[J]. *Laser Physics Letters*, 2010, 7(2): 112-115.
- 5 Cui Jinjiang, Tan Huiming, Wang Fan, *et al.*. High power medical all-solid-state 561 nm yellow laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(1): 01140.
崔锦江, 檀慧明, 王帆, 等. 大功率医用全固态 561 nm 黄光激光器[J]. *激光与光电学进展*, 2012, 49(1): 01140.
- 6 Jia Fuqiang, Xue Qinghua, Zheng Quan, *et al.*. Nd:YAG lasers operated at 1.1 μm and intracavity-doubling [J]. *J Optoelectronics • Laser*, 2005, 16(7): 788-792.
贾富强, 薛庆华, 郑权, 等. 1.1 μm 波段 Nd:YAG 激光运转及其腔内倍频[J]. *光电子 • 激光*, 2005, 16(7): 788-792.
- 7 Zhichao Wang, Qinjun Peng, Yong Bo, *et al.*. 60 W yellow laser at 561 nm by intracavity frequency doubling of a diode-pumped Q-switched Nd:YAG laser[J]. *Opt Commun*, 2012, 285(3): 328-330.
- 8 C Y Li, Y Bo, J L Xu, *et al.*. Simultaneous dual-wavelength oscillation at 1116 and 1123 nm of Nd:YAG laser[J]. *Opt Commun*, 2011, 284(19): 4574-4576.
- 9 Yao Jianquan, Xu Degang. All Solid State Laser and Nonlinear Optical Frequency Conversion Technology[M]. Beijing: Science Press, 2007. 610-623.
姚建铨, 徐德刚. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 科学出版社, 2007. 610-623.

栏目编辑: 宋梅梅