

全固态 424 nm 蓝光激光器

王金艳¹, 李奇¹, 陈曦^{1*}, 郑权^{1,2}, 李世杰¹, 陈磊¹, 张毅博¹, 黄洋¹

¹长春新产业光电技术有限公司, 吉林 长春 130103;

²中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033

摘要 设计了激光二极管抽运的 424 nm 腔内和频蓝光激光器。该激光器采用复合 V 型腔结构, 利用 I 类临界相位匹配的三硼酸锂 (LiB₃O₅, LBO) 晶体对掺镱钇铝石榴石 (Yb: YAG) 晶体的 1030 nm 激光和掺镨氟化钇锂 (Pr: YLF) 晶体的 720 nm 激光进行腔内和频。当 Yb: YAG 晶体的抽运功率为 5 W, Pr: YLF 晶体的抽运功率为 3.1 W 时, 实现了 18 mW 连续运转 424 nm 蓝光激光的稳定输出, 光-光转换效率为 0.2%, 水平及竖直方向的光束质量因子分别为 1.62 和 1.50。

关键词 激光器; 二极管抽运激光器; 全固态激光器; 蓝光激光器; 和频; 424 nm 激光

中图分类号 TN248.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.131401

All-Solid-State 424 nm Blue Laser

Wang Jinyan¹, Li Qi¹, Chen Xi^{1*}, Zheng Quan^{1,2}, Li Shijie¹,

Chen Lei¹, Zhang Yibo¹, Huang Yang¹

¹Changchun New Industries Optoelectronics Tech. Co., Ltd., Changchun, Jilin 130103, China;

²Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract A diode-pumped 424 nm blue laser is designed based on intra-cavity sum-frequency mixing. A type-I phase-matched LBO crystal is used to combine a 1030 nm Yb:YAG laser and a 720 nm Pr:YLF laser via sum-frequency mixing with a complex V-shaped cavity. An 18 mW, 424 nm laser is obtained by setting the pump powers of the Yb:YAG and Pr:YLF crystals to 5 W and 3.1 W, respectively. In this way, an all-solid-state 424 nm blue laser with a stable output is realized with an optical-to-optical conversion efficiency of 0.2%. The beam quality factors are approximately 1.62 and 1.50 in the horizontal and vertical directions, respectively.

Key words lasers; diode-pumped laser; solid-state laser; blue laser; sum-frequency; 424 nm laser

OCIS codes 140.3480; 140.3580; 140.7300

1 引言

可见光波段的全固态激光器可应用于生物医疗、激光存储和通信等领域。其中蓝光激光在这些领域的特殊应用和优势受到广泛关注^[1], 其主要应用领域有生命科学、分子生物学、神经化学、免疫学、环境科学以及食品学等, 亦可辅助进行药物分析、兴奋剂检测和毒品监管等。例如, 细胞色素和食品色素柠檬黄的吸收峰位于 424 nm 处, 故 424 nm 蓝光

可用于细胞色素和食品色素柠檬黄含量的检测。

目前, 获得蓝光激光的主要途径有半导体激光器(LD)、全固态激光器和四波混频等。四波混频可以实现激光频率上转换, 但由于碱金属吸收 2 个光子后, 从基态跃迁到高能级, 自发辐射过程时间长, 导致蓝光出光效率低^[2-3]。而此波段的半导体激光器成本高, 且一些应用领域对激光单色性和光束质量要求高, 因此, 全固态激光是理想的选择。非线性频率变换是获得高光束质量蓝光最好的方法。2002

收稿日期: 2019-01-03; 修回日期: 2019-01-07; 录用日期: 2019-01-21

基金项目: 长春市“双十工程”(16SS18)

* E-mail: chenxi@cnilaser.com

年,中国科学院福建物质结构研究所利用自和频,获得了 48 μW 的 459 nm 蓝光^[4];Kovacich 等^[5]利用 813 nm LD 与 1064 nm 激光进行和频,获得了 70 mW 的 461 nm 蓝光;2011 年,Sun 等^[6]利用 II 类相位匹配磷酸钛氧钾(KTP)晶体对 Nd:LuVO₄ 和 Yb:YAG 进行和频,获得了 179 mW 的 485 nm 蓝光,转换效率达到 3%。目前,尚未见 424 nm 和频全固态蓝光激光器的报道。

本文利用三硼酸锂(LBO)非线性晶体腔内和频,产生 424 nm 全固态蓝光激光,获得了 18 mW 高光束质量的 424 nm 激光。

2 实验结构设计

2.1 增益介质的选择

根据量子理论,和频过程可以视为频率为 ω_1 、 ω_2 的 2 个光子湮灭,同时产生频率为 ω_3 的光子。因此由能量守恒定律可得

$$\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = \hbar\omega_3, \quad (1)$$

式中:约化普朗克常数 $\hbar = h/(2\pi)$, h 为普朗克常数。由动量守恒定律可得

$$\hbar\mathbf{k}_1 + \hbar\mathbf{k}_2 = \hbar\mathbf{k}_3, \quad (2)$$

式中: \mathbf{k}_1 、 \mathbf{k}_2 为基频光的波矢; \mathbf{k}_3 为所产生光子的波矢。

采用波长表示时,则有

$$\frac{1}{\lambda_3} = \frac{1}{\lambda_1} + \frac{1}{\lambda_2}, \quad (3)$$

即波长为 λ_1 、 λ_2 的基频光通过非线性晶体的非线性效应产生波长为 λ_3 的和频光。因此,选用波长为 1030 nm 和 720 nm 的基频光,选用非线性系数较大且走离角较小的 LBO 晶体。

1030 nm 为 Yb:YAG 晶体的一个发射光谱,Yb:YAG 晶体存在 2 个吸收峰,分别为 938 nm 和 968 nm。938 nm 处的吸收谱较宽,对抽运源的波长要求不严格,受激吸收截面积为 $7.2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$,为 968 nm 吸收系数的 1.7 倍。而 938 nm 的吸收谱恰好与 InGaAs 激光二极管的发射谱匹配,因此,通常将 938 nm 的二极管作为 Yb:YAG 激光器的抽运源,从而可以显著提高激光发射效率。Yb:YAG 晶体的发射谱范围为 950~1060 nm,中心波长 1030 nm 处存在严重的自吸收效应,而在 1048 nm 附近,虽然发射强度较低,但是自吸收效应小,因此容易与 1030 nm 形成模式竞争。为了获得 1030 nm 激光输出,必须尽量减小 1030 nm 处的自吸收损耗,并抑制 1048 nm 激光的振荡^[7-8]。晶体的自吸

收还与温度有关,在保证晶体表面不结露的前提下,应尽量降低晶体控制温度;在晶体方面,可以通过减小 Yb³⁺ 离子的掺杂浓度和晶体长度来减少自吸收;另一方面,为了使 1030 nm 得到最大的增益,可以采用在腔镜镀透射膜的方式抑制其他波长的振荡。

720 nm 为 Pr:YLF 晶体的一个发射峰,Pr³⁺ 离子主要有 6 条发射谱线,分别为 479,523,607,640,698,720 nm^[9-10],在 640 nm 的发射截面最大,为 $2.23 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$;720 nm 处的发射截面为 $1.78 \times 10^{-19} \text{ cm}^2$;Pr:YLF 的吸收峰位于 444 nm^[11]。在腔镜膜系设计时,应尽量避免出现 640 nm 处的增益超过 720 nm 而形成振荡^[12-13]。

2.2 蓝光激光器实验装置

激光器谐振腔采用复合腔型,2 个子腔采用 V 型折叠腔,可充分利用谐振腔内的高功率密度,提高非线性晶体的转换效率。子腔的折叠腔结构可以使和频晶体位于基频光的束腰位置,腔内的大部分和频光从输出镜输出腔外,从而减少对 2 个子谐振腔的影响。由于 Yb:YAG 与 Pr:YLF 晶体的热效应及抽运源光斑不同,在考虑抽运源光斑与谐振腔模式匹配,激光晶体的热透镜效应以及稳腔条件的前提下,充分设计复合谐振腔。

实验装置如图 1 所示,抽运源 LD1 和 LD2 输出波长分别为 938 nm 和 444 nm。透镜 1 和透镜 2 分别将 2 个 LD 输出的抽运光聚焦到晶体中。Yb:YAG 晶体(C1)的长度为 1.5 mm,镱离子掺杂浓度为 3%,靠近抽运源的一端镀 1030 nm 高反膜(HR)和 940 nm 抗反膜(AR),另一端镀 1030 nm 抗反膜;Pr:YLF 晶体(C2)的长度为 5 mm,镨离子掺杂粒子数分数为 0.5%,抽运端镀 444 nm 抗反膜和 720 nm 高反膜,另一端镀 720 nm 抗反膜;LBO 非线性晶体采用 I 类临界相

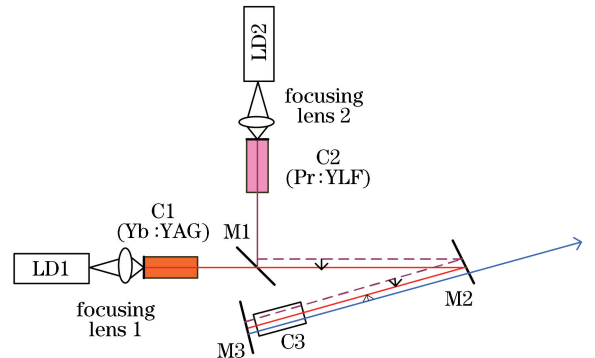


图 1 实验装置图

Fig. 1 Experimental setup

位匹配,波矢方向与光轴方向的夹角为 $\theta=90^\circ$,波矢量在 XOY 面上的投影与 X 轴的夹角为 $\varphi=26^\circ$;M1为 45° 平面合光镜,对 720 nm 激光高反,对 1030 nm 激光高透;M2、M3对2种基频光波长高反,同时M3为和频光高反镜,M2为和频光输出镜^[14]。C1全反面与M2、M3组成的谐振腔I,C2全反面与M1、M2、M3组成的谐振腔II。由于M1为平面镜,C1的全反面与M2组成子腔I的第1支臂,C2的全反面与M1、M2组成子腔II的第1支臂。两个子腔共用第2支臂,即由M2、M3组成。谐振腔I的第1支臂长为 68 mm ,谐振腔II

的第1支臂长为 55 mm ,共用第2支臂长为 30 mm 时,LBO晶体位于2个子谐振腔的束腰处,保证了蓝光激光的转换效率。C1、C2、LBO置于铜卡具中,由半导体制冷器(TEC)分别控制温度,C1的温度设置为 18°C 。

图2给出了反射镜M3的膜系透过率曲线, 640 nm 处的透过率约为 99% , 1048 nm 处的透过率约为 35% ,腔镜较大的透射损耗足够抑制此波长的振荡,避免了对谐振腔的影响,保证了 1030 nm 和 720 nm 基频光的高增益,提高了和频过程的转换效率。

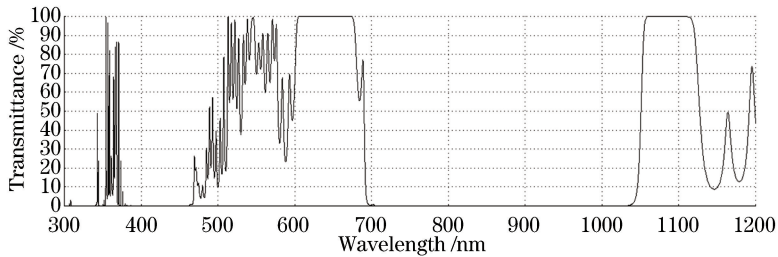


图2 透过率曲线图

Fig. 2 Transmittance curve

3 结果与分析

增加注入增益介质的抽运功率,调节谐振腔镜及LBO角度,获得蓝光激光输出。利用光谱仪测量输出激光光谱,结果如图3所示,蓝光中心波长为 424.16 nm 。

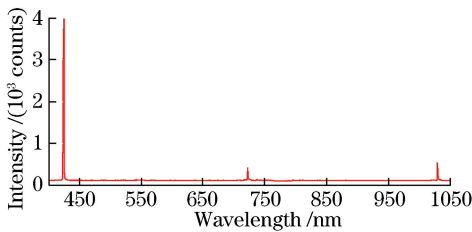


图3 蓝光输出光谱

Fig. 3 Output spectrum of blue laser

在测量光谱时,测到了 720 nm 激光,但是没有测到 640 nm 和 1048 nm 光谱线,这是因为输出镜对基频光具有极小的透过率,而 640 nm 和 1048 nm 两个波长没有起振,镜片镀膜达到了预期的效果。为了保证测量的 424 nm 激光功率的准确性,使用对 424 nm 光透射且对长波反射的滤光片,经滤光片后测量 424 nm 的输出功率。

根据(1)式可知,一个 1030 nm 的光子与一个 720 nm 的光子产生 424 nm 的光子, 1030 nm 与 720 nm 基频光的功率比为 $1:1.43$;激光晶体的热

效应与抽运光斑大小和抽运功率有关,导致提高抽运功率的过程中复合腔内模体积变化,在保持LD1的功率为高于阈值的某一数值时,增加LD2的功率,输出功率随着注入功率的增加而增加,随后出现饱和,即2个晶体注入抽运功率存在一组最佳的匹配值,使得和频的转化效率最高。图4给出了最高输出功率与总抽运功率之间的关系。

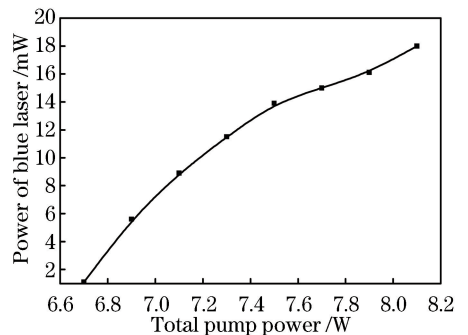


图4 424 nm 输出功率与LD总抽运功率的关系

Fig. 4 424 nm output power versus LD total pump power

Yb:YAG、Pr:YLF晶体的阈值抽运功率分别为 4.3 W 和 2.4 W 。当LD1输出功率为 5 W ,LD2功率为 3.1 W ,即图4所示的总功率为 8.1 W 时,获得最高输出功率为 18 mW 的 424 nm 蓝色激光,4 h平均功率不稳定性为 2.81% 。

利用相机式轮廓分析仪(SP620U, OphirSpiricon Inc., 美国)测得的光斑成像如图5所示。图5(a)为二维空间分布,图5(b)、(c)分别为水平和垂直方向的强度分布,横坐标 X 和 Y 分别表示水平和垂直方向的

位置,光斑分布呈高斯型,椭圆度为 0.824。利用 M^2 光斑测量系统测得的水平及垂直方向光束质量因子 M^2 分别为 1.62 和 1.50, 折叠腔腔镜的子午面和弧矢面产生的像散导致两个方向光斑不一致。

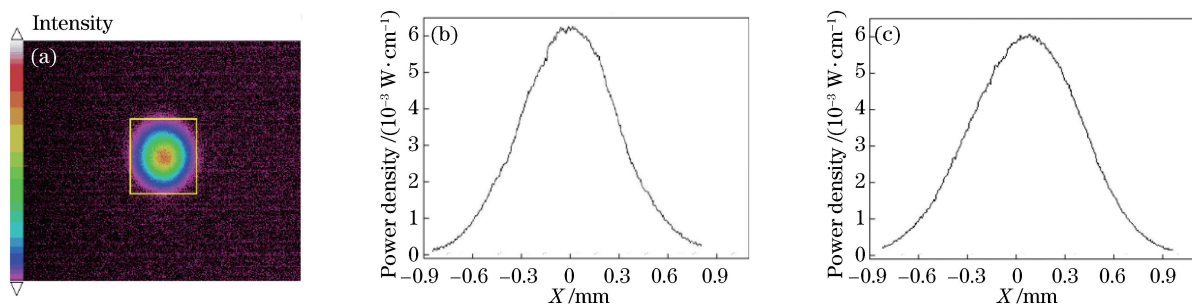


图5 光斑分布图。(a)二维光斑强度分布;(b)水平方向强度分布;(c)垂直方向强度分布

Fig. 5 Distribution of light spot. (a) Intensity distribution of two-dimensional light spot; (b) horizontal intensity distribution; (c) vertical intensity distribution

实验中蓝光激光的光-光转换效率为 0.2%, 制约 424 nm 蓝光转换效率的因素有: Pr:YLF 晶体具有偏振吸收特性, 抽运激光二极管的偏振比以及抽运光的偏振方向与晶体偏振的吻合程度对 720 nm 基频光功率的影响很大; Yb:YAG 晶体在室温下的自吸收效应导致 1030 nm 基频光的产生效率低; Yb:YAG 晶体不具有偏振性, 导致经过 I 类相位匹配 LBO 的和频转换效率低。随着新型晶体生长技术的发展, 探索新的替代晶体, 配合改进实验装置, 有可能进一步提高 424 nm 蓝光的功率水平。

4 结 论

报道了一种 424 nm 全固态蓝光激光器。分析了产生基频光的 Yb:YAG 和 Pr:YLF 两种增益介质的特性, 针对 1030 nm 和 720 nm 两种基频光的特性, 分别设计了谐振腔的腔镜镀膜, 达到了选择基频光波长的目的; 采用复合的折叠腔结构, 利用 I 类相位匹配的 LBO 晶体对两基频光进行和频, 获得了 424 nm 的蓝光激光, 当抽运源总功率为 8.1 W 时, 最高输出功率为 18 mW; 得到了输入与输出功率的曲线关系, 测量了光斑分布、光束质量等参数以及功率稳定性。利用复合腔腔内和频的方法实现了 424 nm 全固态激光输出, 该激光器具有结构紧凑、效率高、光束质量好的特点, 易于实现产品化。

参 考 文 献

[1] Mahn M, Ron S, Yizhar O. Viral vector-based techniques for optogenetic modulation *in vivo* [M] // Brambilla R. Viral vector approaches in neurobiology

and brain diseases. *Neuromethods*: Humana Press, 2013, 82: 289-310.

- [2] Xu C, Tan R Q, Li Z Y, *et al.* 2.8 W linearly polarized output of rubidium vapor laser with diode pumping [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(1): 0102009.
徐程, 谭荣清, 李志永, 等. 半导体抽运铷蒸气输出 2.8 W 线偏振铷激光 [J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0102009.
- [3] Tan Y N, Li Y M, Gong F Q, *et al.* 420 nm alkali blue laser based on two-photon absorption [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(10): 1002011.
谭彦楠, 李义民, 公发全, 等. 双光子吸收 420 nm 碱金属蒸气蓝光激光器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1002011.
- [4] Huang M L, Chen Y J, Chen X Y, *et al.* A CW blue laser emission by self-sum-frequency-mixing in $\text{Nd}^{3+}:\text{GdAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal [J]. *Optics Communications*, 2002, 208(1/2/3): 163-166.
- [5] Kovacich R P, Courtilot I, Quessada A, *et al.* Sum frequency generation of high power blue laser light for cooling of neutral strontium atoms [C] // *Summaries of Papers Presented at the Lasers and Electro-Optic*, May 24-24, 2002, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE, 2002: 224.
- [6] Sun G C, Lee Y D. Compact CW 485-nm laser based on sum-frequency mixing of diode pumped $\text{Nd}:\text{LuVO}_4$ -Yb:YAG lasers [J]. *Laser Physics*, 2011, 21(7): 1176-1179.
- [7] Zhuang F J, Li X, Lin Z Y. Theoretical and experimental investigation of dual-wavelength continuous-wave Yb:YAG laser [J]. *Acta Photonica*

- Sinica, 2017, 46(2): 0214002.
- 庄凤江, 李享, 林志阳. 双波长 Yb:YAG 连续激光理论及实验研究 [J]. 光子学报, 2017, 46(2): 0214002.
- [8] Koerner J, Vorholt C, Liebetrau H, *et al.* Measurement of temperature-dependent absorption and emission spectra of Yb:YAG, Yb:LuAG, and Yb:CaF₂ between 20 °C and 200 °C and predictions on their influence on laser performance[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2012, 29(9): 2493-2502.
- [9] Luo S Y, Yan X G, Cui Q, *et al.* Power scaling of blue-diode-pumped Pr:YLF lasers at 523.0, 604.1, 606.9, 639.4, 697.8 and 720.9 nm [J]. Optics Communications, 2016, 380: 357-360.
- [10] Gün T, Metz P, Huber G. Power scaling of laser diode pumped Pr³⁺:LiYF₄ CW lasers: efficient laser operation at 522.6 nm, 545.9 nm, 607.2 nm, and 639.5 nm [J]. Optics Letters, 2011, 36(6): 1002-1004.
- [11] Cornacchia F, di Lieto A, Tonelli M, *et al.* Efficient visible laser emission of GaN laser diode pumped Pr-doped fluoride scheelite crystals [J]. Optics Express, 2008, 16(20): 15932-15941.
- [12] Niu N, Qu D P, Dou W, *et al.* 348.9 nm intracavity frequency-doubling ultraviolet laser in blue laser diode pumped Pr:YLF crystal [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(12): 1201003.
牛娜, 曲大鹏, 窦微, 等. 蓝光二极管抽运掺镨氟化钪晶体腔内倍频 348.9 nm 紫外激光器 [J]. 中国激光, 2018, 45(12): 1201003.
- [13] Ostroumov V, Seelert W, Hunziker L, *et al.* UV generation by intracavity frequency doubling of an OPS-pumped Pr:YLF laser with 500 mW of CW power at 360 nm [J]. Proceedings of SPIE, 2007, 6451: 645103.
- [14] Wang Y N, Zheng Q, Yao Y, *et al.* Intracavity sum-frequency diode side-pumped all-solid-state generation yellow laser at 589 nm with an output power of 20.5 W [J]. Applied Optics, 2013, 52(9): 1876-1880.