

文章编号: 0258-7025(2010)07-1669-04

全固态腔内和频 488 nm 连续蓝光激光器

王君光¹ 李永亮² 田迎华³ 吕望¹ 包琳¹ 全慧¹

(¹ 长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022; ² 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)
³ 长春理工大学计算机科学与技术学院, 吉林 长春 130022)

摘要 报道了全固态连续波 488 nm 蓝光激光器, 蓝激光分别由 Nd:YLF₄ (Nd:YLF) 和 Nd:YVO₄ 晶体的 1047 和 914 nm 谱线非线性之和产生, 实验中采用复合腔结构, 利用 LiB₃O₅ (LBO) 晶体 I 类临界相位进行腔内和频, 当总注入抽运功率为 32.2 W (注入到 Nd:YLF 晶体和 Nd:YVO₄ 晶体的抽运功率分别为 13.4 和 18.8 W) 时, 获得 650 mW 的 TEM₀₀ 连续波 488 nm 蓝光激光输出。30 min 功率不稳定性优于 ±2.8%。光束质量因子 $M^2 = 1.3$ 。

关键词 激光器; 全固态; 复合腔; 和频; 蓝光激光器

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103707.1669

All-Solid-State Continuous-Wave All-Intracavity Sum-Frequency Mixing Blue Laser at 488 nm

Wang Junguang¹ Li Yongliang² Tian Yinghua³ Lü Wang¹ Bao Lin¹ Quan Hui¹

¹ School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
² School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China
³ School of Computer Science and Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China

Abstract An all-solid-state coherent radiation at 488 nm by intracavity sum-frequency generation of 914 nm Nd:YVO₄ laser and 1047 nm Nd:YLF₄ (Nd:YLF) laser is reported. Blue laser is obtained by using a double cavity and type-I critical phase matching LiB₃O₅ (LBO) crystal sum-frequency mixing. With total pump power of 32.2 W (13.4 W pump power for Nd:YLF laser and 18.8 W pump power for Nd:YVO₄ laser), TEM₀₀ mode blue laser at 488 nm of 650 mW is obtained at last. The power stability in 30 minutes is better than ±2.8%. The M^2 factor is 1.3.

Key words lasers; all-solid-state; double cavity; sum frequency mixing; blue laser

1 引 言

在可见光谱范围内, 相干光源由于在医疗、生物、通信及天文等方面具有广泛的应用前景, 一直是人们研究的热点。近年来, 为了扩大波长范围, 人们设计了许多新型固态激光器, 例如黄光激光器^[1~6], 最为显著的成就是获得了蓝光激光输出, 可取代氩离子激光器。在可见光谱范围内, 高效率连续波

蓝光激光获得的方法是利用激光二极管腔内抽运, 已经有人实现了高效率的 473 nm 激光器^[7~11]。但是由于目前很少有掺杂激活离子的晶体可以直接发射 976 nm 谱线, 因此很难获得效率较高的 488 nm 蓝激光输出, 2005 年董景星等^[12]利用波导型准相位匹配周期极化反转铌酸锂晶体直接倍频波长为 976 nm 的连续半导体激光二极管, 获得的 488 nm

收稿日期: 2009-11-12; 收到修改稿日期: 2010-01-04

基金项目: “十一五”预研支撑基金项目(62301110109)资助课题。

作者简介: 王君光(1985—), 男, 满族, 硕士研究生, 主要从事半导体激光抽运全固态激光器及非线性光学频率变换技术等方面的研究。E-mail: optlaser@163.com

导师简介: 李永亮(1973—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事激光技术与应用开发及非线性光学频率变换技术等方面的研究。E-mail: liyongliang@cust.edu.cn

蓝光最大输出功率仅为 20 mW。目前,市场上虽然已经有 488 nm 半导体激光器出售,但功率均较低,2008 年日亚公司销售的 488 nm 半导体激光器输出功率仅为 5 mW,而 2008 年王旭葆等^[13]采用 L 型谐振腔获得的 488 nm 倍频蓝光激光器输出功率也只有 25 mW。这根本无法满足人们的需求,于是人们尝试用其他方法来获得 976 nm 谱线的发射源,如二极管激光器^[14]、垂直扩展腔半导体激光器^[15]、光抽运半导体激光器^[16]以及光纤激光器^[17]。另一种获得 488 nm 光源的方法是利用非线性和频来代替二次谐波倍频。具体方法是利用 Nd:GdVO₄ 晶体发射的 912 nm 谱线腔内抽运 Nd:YVO₄ 晶体使其产生 1064 nm 谱线跃迁,再利用 912 和 1064 nm 两条谱线在腔内非线性和频获得 491 nm 蓝光激光器^[18]。由于 Nd:YVO₄ 晶体的 914 nm 谱线对注入抽运光的吸收仅有 2%,因此较低的吸收使这种和频方法受到了限制。另一种和频方法是利用掺钕离子激光晶体内的两条跃迁谱线(⁴F_{3/2}-⁴I_{11/2}和⁴F_{3/2}-⁴I_{9/2})进行和频,例如利用 Nd:YVO₄ 晶体的 1064 和 914 nm 两条谱线和频获得 492 nm 蓝光激光器^[19,20],然而,由

于⁴F_{3/2}-⁴I_{11/2}跃迁辐射的 1064 nm 的发射截面是⁴F_{3/2}-⁴I_{9/2}跃迁辐射的 914 nm 的发射截面的 20 倍,在同一个腔内的同一个激光增益介质内双波长同时运转存在强烈增益竞争,很难实现稳定的双波长运转,因此这时的和频效率很低。

为了避免在同一个增益介质中双波长的竞争,本文采用复合腔结构,利用腔内和频获得 488 nm 蓝光激光器,这样不仅使两条参与和频的基频谱线能获得独立增益,而且可以获得稳定输出的二次谐波。

2 实验方案

实验装置如图 1 所示。整个复合腔由三个光学臂组成,其中两个是独立的,一个是共享分臂。两个独立的光学臂内各自含有激光晶体、准直系统与和束器。和束器镀 914 nm 减反膜 (AR) 和 1047 nm 高反膜 (HR)。共享光学臂包含两个平凹镜 (M3 和 M4)。它们的曲率半径分别为 50 和 200 mm。M4 凹面镀 1047/914/488 nm HR, M3 凹面镀 1047/914 nm HR 和 488 nm AR。

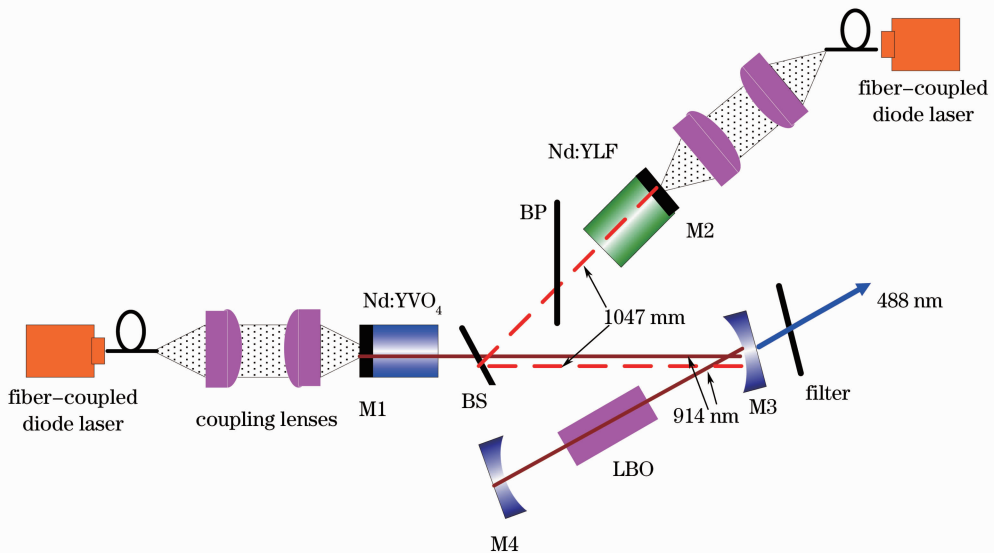


图 1 488 nm 蓝光激光器实验装置图

Fig. 1 Schematic for the intra-cavity sum-frequency mixing blue laser at 488 nm

图中 BP 为偏振片;BS 为分束器;M1 和 M3, M2 和 M3, M3 和 M4 间的距离分别为 79, 85 和 28 mm。实验中所用的两个抽运源均是商用的光纤耦合输出的激光二极管阵列 (LDA),其输出波长分别为 808 nm (Nd:YVO₄ 晶体) 和 806 nm (Nd:YLF 晶体),最大输出功率均为 20 W。光纤芯直径为 400 μm,数值孔径为 0.22。光学耦合系统是由两个完全相同的焦距为 15 mm 的平凸镜组成,其耦合效

率为 92%。由于抽运光斑的光强很大,而且第一块透镜对焦斑的影响很大,因此必须调整好其方位使之瞄准抽运光束。实验中两平凸镜间的距离可以很容易确定。由于像差的原因,平均抽运光斑半径约为 220 μm。在整个实验装置图中,靠近左侧的激光晶体为 a 轴切割的掺钕离子原子数分数为 0.1% 的 Nd:YVO₄ 晶体,长度为 5 mm,靠近抽运一端端面作为谐振腔全反镜 (M1),镀 808 nm AR,914 nm HR,相反面

镀 914 nm HR。输出镜为 M3,曲率半径为 200 mm,其凹面镀 1047/914 nm HR,488 nm AR。图 1 中 M4 的曲率半径为 50 mm,镀 1047/914/488 nm HR。实验中采用掺杂浓度较低且较长激光晶体以减少热透镜焦距和准三能级系统的再吸收损耗,并能保证晶体吸收足够多的抽运光能量。另一块激光晶体是一个 a 轴切割的掺钕离子原子数分数为 1.0%的Nd:YLF晶体,长度为 10 mm。Nd:YLF 晶体靠近抽运一端端面作为谐振腔全反镜(M2),镀 1047 nm HR,806 nmAR,晶体另一端面镀 1047 nm AR。两激光晶体的侧面裹上一层铜箔安装在紫铜热沉上,通过半导体制冷器进行温度控制,使温度保持在 15 °C,这样做可以使激光器产生较少的热量并能保证激光输出功率稳定。非线性 and 频晶体 LiB_3O_5 (LBO),采用 I 类临界相位匹配,其尺寸为 $2\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times 10\text{ mm}$,沿 X-Y 轴的切割角度为 $\theta=90^\circ,\varphi=17.1^\circ$ 。在 LBO 晶体两面镀 1047/914/488 nm 三色增透膜,以减少腔内反射损耗,它由一块紫铜包裹,并固定在半导体制冷器上以达到严格控温的效果,其温度变化稳定在 $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$ 。LBO 晶体被放置在谐振腔的共享光学臂的束腰处,以获得腔内高的激光束功率密度。利用 ABCD 矩阵和稳定腔条件,考虑到 Nd:YLF晶体和 Nd:YVO₄晶体的热效应以及谐振腔的基横模与激光晶体内有效增益体积之间的空间匹配,通过计算机进行数值计算,在实验中含 Nd:YLF 晶体和 Nd:YVO₄晶体的谐振腔的腔长分别取 113 和 107 mm,此时两束基频光在各增益介质内的束腰分别为 $180\text{ }\mu\text{m}$,而在交叠区(即 LBO 晶体处)的光腰相等,为 $60\text{ }\mu\text{m}$,这时候非线性和频晶体处两基频光交叠比较充分,此时和频效率最高。

3 结果与讨论

通过改变一个基频波的抽运功率,测量了488 nm 激光输出功率随注入抽运功率变化的关系,如图 2 所示。图 2(a)为 488 nm 蓝激光输出功率随注入到 Nd:YVO₄晶体的抽运功率的变化。注入 Nd:YLF 晶体的抽运功率被固定为 13.4 W,测得在注入 Nd:YVO₄晶体的抽运功率为 18.8 W 时,488 nm 蓝光最大输出功率为 650 mW。图 2(b)为 488 nm 蓝激光输出功率随注入到 Nd:YLF 晶体的抽运功率的变化。注入 Nd:YVO₄晶体的抽运功率被固定为 18.8 W,测得在注入 Nd:YLF 晶体的抽运功率为 13.4 W 时,488 nm 蓝光最大输出功率为 650 mW,并且在此之前输出功率随注入抽运功率几乎是线性增加的。在这一点之后蓝光的输出功率已经达到饱和。如果想获得更高的蓝光输出功率,则需要增加 Nd:YVO₄晶体的注入功率。

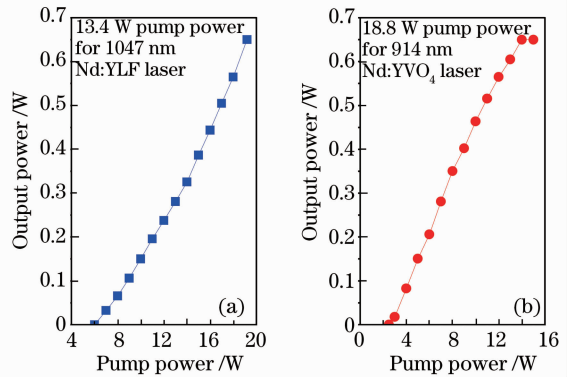


图 2 和频激光器 488 nm 蓝光的注入功率-输出功率特性曲线

Fig. 2 Input-output characteristics of the sum-frequency mixing blue laser at 488 nm

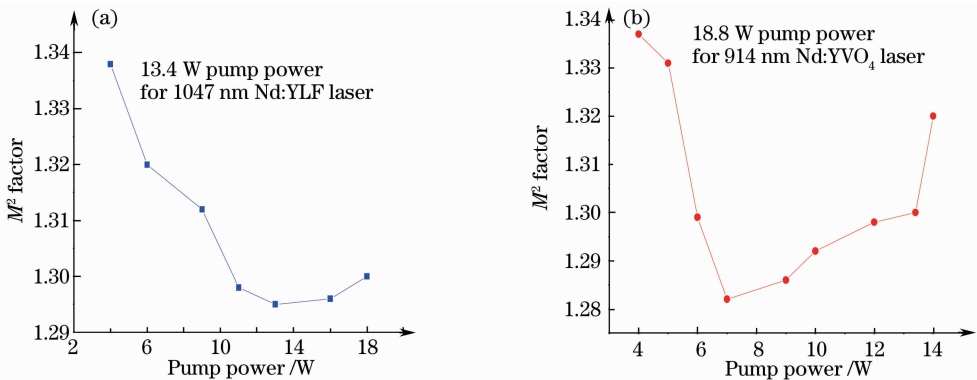


图 3 488 nm 蓝光光束质量

Fig. 3 Beam profile distribution of 488 nm blue laser

图 3 所示为当总的注入抽运功率为 32.2 W(其中 Nd:YLF 晶体的抽运功率为 13.4 W, Nd:YVO₄ 晶体的抽运功率为 18.8 W)时,利用刀口法测量的 488 nm 蓝光光束质量,测量中应用的聚焦透镜的焦距为 15 mm。图 3(a)为当注入到 Nd:YLF 晶体的抽运功率被固定为 13.4 W 时,改变注入到 Nd:YVO₄ 晶体的抽运功率所测得的光束质量因子,当注入功率增加到 18.8 W 时, $M^2 = 1.3$ 。图 3(b)为当注入到 Nd:YVO₄ 晶体的抽运功率被固定为 18.8 W 时,改变注入到 Nd:YLF 晶体的抽运功率所测得的光束质量因子,当注入功率增加到 13.4 W 时, $M^2 = 1.3$ 。且输出功率稳定,30 min 功率不稳定性优于 $\pm 2.8\%$ 。利用刀口法测得 488 nm 蓝光激光器的光束质量因子 $M^2 = 1.3$ 。

4 结 论

采用 LBO 非线性晶体 I 类临界相位非线性和频获得了全固态 488 nm 连续波蓝光激光器,以 Nd:YVO₄ 和 Nd:YLF 晶体作为增益介质,利用两个激光二极管分别抽运,使 Nd:YVO₄ 晶体的 914 nm 和 Nd:YLF 晶体的 1047 nm 两条谱线在复合腔的共享臂内进行和频,获得最大输出功率为 650 mW 连续波蓝光输出,输出光束质量好。实验结果表明,采用复合腔腔内和频是获得 488 nm 蓝色激光的有效方法。

参 考 文 献

- Lü Yanfei, Tan Huiming, Miao Tongqun *et al.*. All-solid-state CW doubly resonant all-intracavity sum-frequency mixing 593 nm laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 729~733
吕彦飞, 檀慧明, 缪同群等. 全固态 593 nm 复合腔连续波和频激光器[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 729~733
- Lü Yanfei, Tan Huiming, Qian Longsheng. Laser diode array pumped Nd:YAG dual wavelength laser with intracavity sum-frequency mixing at 589 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 438~442
吕彦飞, 檀慧明, 钱龙生. 激光二极管阵列抽运 Nd:YAG 腔内双波长运转 589 nm 和频激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(4): 438~442
- Yanfei Lü, Huiming Tan, Longsheng Qian. All-solid-state doubly resonant sum-frequency continuous-wave laser at 555 nm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2006, **4**(1): 25~26
- Yanfei Lü, Xihe Zhang, Zhibai Yao. All-solid-state sum-frequency generation of 1.12 W continuous-wave laser at 588 nm [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(6): 353~354
- Lü Yanfei, Zhang Xihe, Yao Zhibai. All solid-state continuous-wave yellow laser at 583 nm [J]. *Acta Armamentarii*, 2007, **28**(12): 1516~1518
吕彦飞, 张喜和, 姚治海. 全固态连续波 583 nm 黄光激光器[J]. *兵工学报*, 2007, **28**(12): 1516~1518
- Zhang Juncheng, Wang Jiaxian, Su Peilin *et al.*. Theoretical and experimental study of LD pumped Nd:YVO₄ yellow laser with sum-frequency generation [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008,

- 28**(12): 2365~2369
张峻诚, 王加贤, 苏培林等. 激光二极管抽运 Nd:YVO₄ 和频黄光激光器的理论及实验研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2365~2369
- T. Kellner, F. Heine, G. Huber. Efficient laser performance of Nd:YAG at 946 nm and intracavity frequency doubling with LiJO₃, β -BaB₂O₄, and LiB₃O₅ [J]. *Appl. Phys. B.*, 1997, **65**(6): 789~792
- Quan Zheng, Ling Zhao. Efficient blue laser generation at 473 nm by a BIBO crystal [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2004, **36**(6): 449~451
- C. Czeranowsky, E. Heumann, G. Huber. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG/BiBO laser with 2.8-W output power at 473 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(6): 432~434
- Wang Junying, Zheng Quan, Xue Qinghua *et al.*. 1.1 W CW output, all-solid-state blue laser at 473 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5): 523~526
王军营, 郑权, 薛庆华等. 1.1 W 连续输出 473 nm 全固态蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5): 523~526
- Zheng Quan, Zhao Ling, Dong Shengming. High efficient blue laser generation at 473 nm by BIBO crystal [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(9): 1030~1032
郑权, 赵岭, 董胜明. BIBO 晶体腔内倍频高效率 473 nm 蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(9): 1030~1032
- Dong Jingxing, Lou Qihong, Cheng Xusan *et al.*. 480 nm blue laser by direct frequency doubling of laser diode[J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(4): 567~570
董景星, 楼祺洪, 成序三等. 半导体激光直接倍频的 488 nm 蓝光激光器[J]. *光学学报*, 2006, **26**(4): 567~570
- Wang Xubao, Ding Peng, Zuo Tiechuan. Compact continuous-wave blue laser at 488 nm with a LBO crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, **37**(suppl.): 48~50
王旭葆, 丁鹏, 左铁钊. LBO 晶体直接倍频获得 488 nm 激光[J]. *红外与激光工程*, 2008, **37**(suppl.): 48~50
- Ye Zhenhuan, Lou Qihong, Dong Jingxing *et al.*. Compact continuous-wave blue lasers by direct frequency doubling of laser diodes with periodically poled lithium niobate waveguide crystals [J]. *Opt. Lett.*, 2005, **30**(1): 73~74
- E. U. Rafailov, W. Sibbett, A. Mooradian *et al.*. Efficient frequency doubling of a vertical-extended-cavity surface-emitting laser diode by use of a periodically poled KTP crystal [J]. *Opt. Lett.*, 2003, **28**(21): 2091~2093
- E. Schiehlen, M. Golling, P. Unger *et al.*. Diode-pumped semiconductor disk laser with intracavity frequency doubling using lithium triborate (LBO) [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2002, **14**(6): 777~779
- H. Zellmer, P. Riedel, A. Tünnermann. Visible upconversion lasers in praseodymium-ytterbium-doped fibers [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, **69**(5,6): 417~421
- H. Emilie, B. François, G. Patrick *et al.*. 1064 nm Nd:YVO₄ laser intracavity pumped at 912 nm and sum-frequency mixing for an emission at 491 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2008, **33**(14): 1632~1634
- Meng Yuqing, Tan Huiming, Fu Xihong *et al.*. LD pumped Nd:GdVO₄/LBO intracavity sum-frequency 491 nm blue laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1735~1739
孟玉青, 檀慧明, 付喜宏等. LD 抽运 Nd:GdVO₄/LBO 腔内和频 491 nm 蓝光激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1735~1739
- H. Emilie, B. Francois, G. Partick. 491 nm generation by sum-frequency mixing of diode pumped neodymium lasers [J]. *Opt. Express*, 2005, **13**(15): 5653~5661