

Nd:YVO₄ 声光调 Q 腔内倍频 457 nm 蓝光激光器

高 静 于 欣 陈 飞 李 旭 东 张 震 闫 仁 鹏 于 俊 华 王 月 珠

(哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 脉冲蓝光激光器在水下探测、水下通信和遥感方面有着重要的应用前景。根据高斯光束传输的 ABCD 矩阵, 设计了对热效应不灵敏的 Z 型谐振腔。利用 808 nm 激光二极管(LD)端面抽运 Nd:YVO₄ 晶棒, 在室温下实现了 $4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ 准三能级激光谱线跃迁。通过声光调 Q 和 LBO 腔内倍频, 获得了稳定的高重复频率、高峰值功率 457 nm 蓝光激光输出。当抽运功率为 30 W 时, 在重复频率为 10 kHz 下, 获得最大单脉冲能量为 56 μ J, 脉冲宽度为 217 ns, 峰值功率达 258 W; 在重复频率为 20 kHz 下, 获得最大平均功率为 760 mW, 脉冲宽度为 261 ns, 峰值功率为 146 W。在最大平均输出功率下测量了脉冲 457 nm 蓝光激光器的功率稳定性, 20 min 之内其最大不稳定性小于 2%。

关键词 激光器; 457 nm 蓝光激光器; 声光调 Q; Nd:YVO₄ 晶体

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS200828s1.0009

457 nm Blue Laser Generation by Intracavity Frequency Doubling of Acousto-Optically Q-Switched Nd:YVO₄ Laser

Gao Jing Yu Xin Chen Fei Li Xudong Zhang Zhen Yan Renpeng
Yu Junhua Wang Yuezhu

(National Key Laboratory of Tunable Laser Technology, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract Pulsed blue laser has important applications in underwater detection, underwater communication and remote sensing. According to the ABCD matrix of Gaussian beam's propagation, a Z-type cavity insensitive to thermal lens effect is designed. By use of 808 nm laser diode (LD), the $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ quasi-three-level transition in Nd:YVO₄ crystal is realized at room temperature. Stable pulsed 457 nm blue laser with high repetition rate and high peak power is demonstrated by acousto-optically Q-switching and intracavity frequency doubling. When the incident pump power is 30 W, the maximum single pulse energy of 56 μ J, pulse duration of 217 ns and peak power of 258 W are achieved at 10 kHz; the maximum average power of 760 mW, pulse duration of 261 ns and peak power of 146 W are obtained at 20 kHz. The fluctuation of the blue laser power is less than 2.0% within the given 20 min at the maximum output power.

Key words lasers; blue laser at 457 nm; acousto-optically Q-switched; Nd:YVO₄ crystal

1 引 言

1987 年, T. Y. Fan 等^[1]建立了准三能级激光器的再吸收理论模型, 并利用 808 nm 激光二极管(LD)抽运 Nd:YAG 棒, 首次在室温下实现了 946 nm 激光输出, 为准三能级激光器的研究奠定了基础。同年, 在他们工作的基础上, Risk 等^[2]采用几乎相同的方式获得了 946 nm 激光输出, 并通过 LiIO₃ 晶体腔内

倍频, 成功得到 100 μ W 的 473 nm 蓝光激光输出, 这是世界上第一台激光二极管(LD)抽运的全固态蓝光激光器。由于连续运转的蓝光激光在高密度光存储、激光彩显、拉曼光谱、高分辨率印刷等领域, 脉冲式的蓝光激光在水下探测、水下通信和遥感等领域都存在广阔的潜在应用, 故 LD 抽运的全固态蓝光激光器已经受到越来越多的关注。

基金项目: 黑龙江省科技攻关项目(GC06A116)和哈尔滨工业大学优秀团队支持计划资助课题。

作者简介: 高 静(1982—), 男, 博士研究生, 主要从事固体激光技术与光电子器件等方面的研究。

E-mail: owengaojing@126.com

导师简介: 王月珠(1942—), 女, 教授, 主要从事固体激光器和光参变振荡器等方面的研究。E-mail: juyl@hit.edu.cn

由于 Nd^{3+} 的 ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ 跃迁产生 $0.9 \mu\text{m}$ 波段的激光,通过倍频可以转换至蓝光谱区,故在蓝光激光器的激光介质方面,大多选择掺钕(Nd^{3+})的固体激光介质, $\text{Nd}:\text{YAG}$ 、 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 和 $\text{Nd}:\text{GdVO}_4$ 晶体便是其中的典型代表^[3,4]。其中 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 具有大的吸收和发射截面,线偏振光输出以及良好的晶体质量等优点^[5,6],近年来已经受到了国际上越来越多的关注,并在固体激光产品所选用的激光晶体中占据了相当的份额。2000年,P. Zeller 等^[7]利用 808 nm LD 抽运复合 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体,在输入功率为 20 W 时,得到 914 nm 连续激光输出 3 W,斜率效率为 22.8%。2002年,刘伟仁等^[8]利用 2 W 的 808 nm LD 端面抽运 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$,并通过 LBO 腔内倍频,获得了 12 mW 的 457 nm 深蓝连续激光。2006年,Q. H. Xue 等^[9]在 808 nm LD 抽运功率为 30 W 时,获得最大 4.6 W 的 457 nm 连续蓝光激光输出。另外,在 2004年,T. J. Kane 等^[10]通过被动调 Q 方式,在重复频率为 2.6 MHz 时获得了平均功率为 55 mW 的 914 nm 脉冲激光输出;并通过主振荡功率放大(MOPA)和 LBO 腔外倍频,产生了 3 W 的 457 nm 蓝光激光输出。

本文通过设计对热效应不灵敏的 Z 型谐振腔,利用 808 nm LD 端面抽运 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶棒,通过声光调 Q 和 LBO 非线性晶体腔内倍频,成功实现了脉冲 457 nm 蓝光激光的高重复频率、高峰值功率输出。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示。其中 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶棒的尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,沿 a 轴切割, Nd^{3+} 掺杂的原子数分数为 0.2%,较低浓度有利于降低由于激光下能级的粒子数布居造成的再吸收损耗^[1]。晶棒采用 0.05 mm 厚的铝箔包裹,置于循环水制冷机制冷的紫铜热沉中,水温控制在 $13 \pm 0.2 \text{ }^\circ\text{C}$ 。晶棒两端镀有对 914 nm ($T > 99.8\%$) 和抽运光 808 nm ($T > 99\%$) 的高透膜,另外为了抑制 1064 nm 和 1342 nm 寄生振荡,膜系还对 1064 nm ($R < 2\%$) 和 1342 nm ($R < 10\%$) 谱线抗反。晶棒紧贴 M_1 放置。LD 为美国 Advanced Photonic Systems 公司生产的光纤耦合 808 nm 半导体激光器,最大输出功率为 50 W,光纤芯径 $400 \mu\text{m}$,数值孔径 $NA = 0.22$ 。抽运光经过由非球面透镜组构成的耦合系统,以束腰半径 $\omega_p = 200 \mu\text{m}$ 聚焦至晶体中。前腔镜 M_1 所镀膜系对 914 nm ($R > 99.8\%$) 高反,对抽运光 808 nm

($T > 90\%$) 高透。折叠镜 M_2 ($R = 200 \text{ mm}$) 和 M_3 ($R = 100 \text{ mm}$) 镀有对 914 nm ($R > 99.8\%$) 高反和对 457 nm ($T > 95\%$) 高透的膜系。同时 M_1 , M_2 和 M_3 还镀有对 1064 nm ($T > 90\%$)、1342 nm ($T > 90\%$) 的增透膜,以最大程度地降低寄生振荡的影响。输出镜 M_4 为平面镜,对 914 nm ($R > 99.9\%$) 和 457 nm ($R > 99.9\%$) 高反。为了提高谐振腔的稳定性,谐振腔总的几何腔长约为 574 mm。声光 Q 开关由 Gooch & Housego 公司生产,材料为石英晶体。最大射频功率为 15 W,超声波中心频率为 40.68 MHz,衍射效率大于 80%,调制频率 1 ~ 100 kHz 连续可调。尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ 的 LBO 倍频晶体采用 I 类临界相位匹配,切割角 ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 21.9^\circ$)。为了减小损耗,两端镀有对 914 nm 和 457 nm 的高透膜。LBO 采用 TEC 精确制冷,实验中温度严格控制在 $14 \pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$ 。为了提高倍频效率,倍频晶体紧贴 M_4 放置。实验中的平均输出功率 \bar{P} 由相干公司生产的 Fieldmate 50 W 探测,脉冲宽度 Δt 由 DET210/M 型 Si 光探测器探测, TDS3032B 示波器(美国 Tektronix 公司)显示脉冲波形。

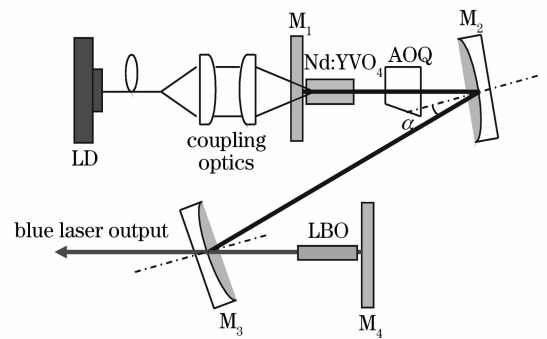


图 1 内腔倍频声光 Q 开关蓝光激光产生实验装置图
Fig. 1 Experimental setup for blue laser generation by intracavity frequency doubling of acousto-optically Q-switched $\text{Nd}:\text{YVO}_4$

在谐振腔的设计中,由于腔的各臂足够长,这样可以使得折叠角 ($\alpha = 8^\circ$) 尽量小,从而大大降低由于像散对倍频造成的影响。将 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 激光晶体中的热效应等效为一个焦距为 f_T 的薄透镜,在此近似下,根据高斯光束传输的 ABCD 矩阵,辅以 Matlab 程序计算,优化各臂的长度,当三个臂的长度分别为 114 mm, 400 mm 和 60 mm 时,模拟得到了如图 2 所示的结果。从图 2 可以看出,914 nm 振荡光在 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体中的光斑半径 ω_1 和在 LBO 中的光斑半径 ω_{02} 在子午面 (tangential) 和弧

矢面(sagittal)内差别很小,说明由于折叠角造成的像散并不严重。此外, ω_1 和 ω_{02} 随着热透镜焦距 f_T 的变化也不大。在 f_T 从 1000 mm 降低至 50 mm 的过程中, ω_1 和 ω_{02} 几乎是常数(仅仅有 10% 左右

的变化)。因此,这一谐振腔的模式和稳定性对热效应不灵敏,从而可以保证激光器的高功率抽运。值得一提的是,基频光在 LBO 非线性晶体中的光斑半径约为 $\omega_{02} = 42 \mu\text{m}$,有利于获得良好的倍频效果。

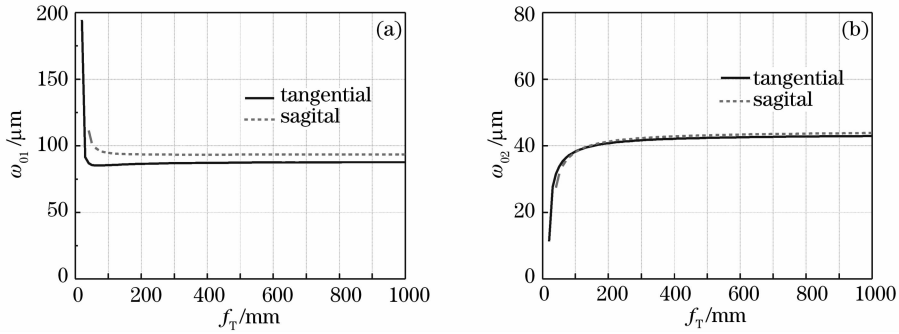


图 2 振荡光在 Nd:YVO₄ 晶体(a)和 LBO 晶体(b)中子午面和弧矢面内的光斑半径随热透镜焦距的变化曲线
Fig. 2 Laser spot radius in the tangential and sagittal planes of the Nd:YVO₄ (a) and LBO (b) crystal versus focal length of the thermal lens

3 实验结果及分析

由于 M_1, M_2 和 M_3 都对 1064 nm 和 1342 nm 激光谱线镀制了透射率很高的增透膜,使得它们在谐振腔内的单程增益非常低,属于准三能级跃迁的 914 nm 激光谱线在模式竞争中占据了绝对优势。实验中将腔镜 M_4 用一个对 914 nm 透射率为 4% 的输出镜取代,使用 Ocean Optics 公司生产的 HR4000 型光纤光谱仪(分辨力为 0.08 nm)测量了输出激光光谱,发现仅有 914 nm 激光谱线,属于四能级系统跃迁的 1064 nm 和 1342 nm 谱线被完全抑制。放上腔镜 M_4 ,有明显的深蓝激光从 M_3 一端输出。图 3 显示了 457 nm 蓝光激光在不同重复频率下的平均功率随着抽运功率的变化曲线。可以看出蓝光激光器的阈值功率 $P_{th} = 14 \text{ W}$,较高的阈值是由

于抽运源较差的光谱分布和 Nd:YVO₄ 晶体较低的吸收效率(约 56%)造成的。在不同脉冲重复频率 f 下,阈值功率几乎没有变化。随着抽运功率的升高,蓝光输出功率呈非线性增长。当抽运功率达到 30 W 时,在 $f = 10 \text{ kHz}$ 和 $f = 20 \text{ kHz}$ 下,457 nm 蓝光激光的平均输出功率 \bar{P} 分别为 560 mW 和 760 mW,相应的单脉冲能量 E 分别为 $56 \mu\text{J}$ 和 $38 \mu\text{J}$ 。

图 4 显示了不同重复频率下 457 nm 蓝光激光的脉冲宽度随着抽运功率的变化曲线。可以看出总的趋势是随着抽运功率的增大,脉冲宽度减小,变化率由阈值功率附近的急速下降到后来的逐渐缓慢。当抽运功率达到 30 W 时,在 $f = 10 \text{ kHz}$ 和 $f = 20 \text{ kHz}$ 下,457 nm 蓝光激光的脉冲宽度 Δt 分别为 217 ns 和 261 ns,相应的峰值功率 P_M 分别为 258 W 和 146 W。图 5 和图 6 分别为此时在 $f = 20 \text{ kHz}$ 下

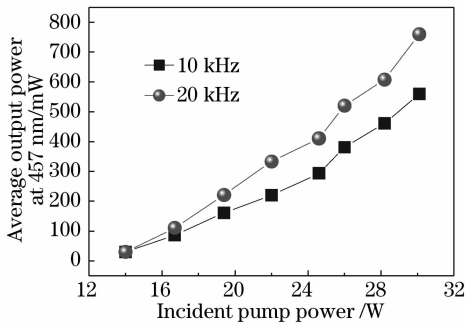


图 3 不同重复频率下 457nm 蓝光激光平均功率随抽运功率的变化曲线

Fig. 3 Average blue laser output power at 457 nm varying with the incident pump power for different repetition rate

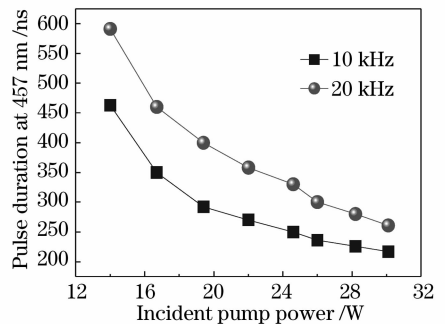


图 4 不同重复频率下 457nm 蓝光激光脉冲宽度随抽运功率的变化曲线

Fig. 4 Pulse duration at 457 nm varying with the incident pump power for different repetition rate

蓝光激光器典型的单脉冲波形和脉冲序列图。可以看出此时形成了非常稳定的脉冲序列,而且没有出现漏脉冲和双脉冲现象。

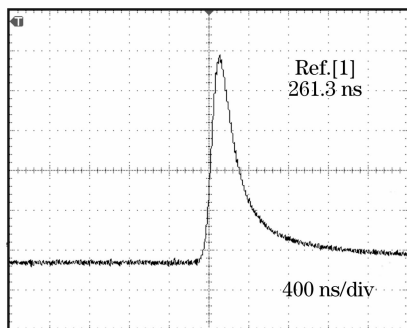


图 5 平均输出功率 760 mW 时蓝光脉冲波形图
Fig. 5 Pulse profile of blue laser when the average output power is 760 mW

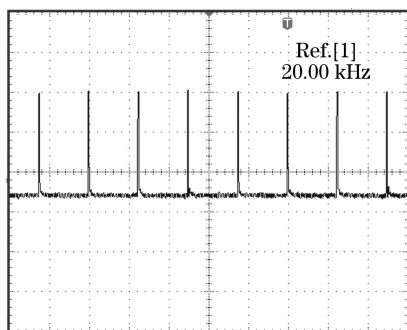


图 6 平均输出功率 760 mW 时的蓝光脉冲序列
Fig. 6 Pulse train of blue laser when the average output power is 760 mW

在重复频率为 $f=20$ kHz, 457 nm 蓝光平均输出功率 $\bar{P}=760$ mW 时,对激光器的输出功率稳定性进行了测量。在随机选取的连续 20 min 内,蓝光激光器平均功率随着时间的变化如图 7 所示。经过计算得到其最大不稳定性小于 2%,说明没有明显的所谓“蓝光问题^[11]”出现。之所以能够有良好的稳

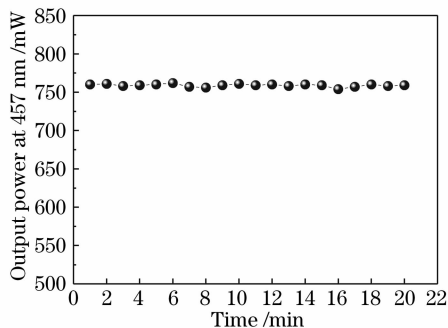


图 7 最大蓝光输出功率下的功率随时间变化
Fig. 7 Blue laser output power versus time at the maximum output power

定性,一方面源于对 LBO 倍频晶体的工作温度的精确控制,另一方面是由于 Nd:YVO₄ 单轴晶体和 LBO 非线性晶体对腔内纵模的选择效应^[12]造成的。

4 结 论

报道了 LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 声光调 Q 腔内倍频 457 nm 蓝光激光器。根据高斯光束传输的 ABCD 矩阵,经过 Matlab 编程,优化谐振腔参量,设计出了对热效应不灵敏的 Z 型腔,提高了谐振腔的稳定性和倍频效率。采用低掺杂 (0.2%)、长度短 (5 mm) 的 Nd:YVO₄ 晶棒,降低了再吸收损耗;并通过对多面腔镜的膜系控制,降低了属于四能级系统跃迁的 1064 nm、1342 nm 谱线的增益,在室温下成功实现了 914 nm 准三能级系统激光器的脉冲运转。在腔内插入 10 mm 长的 LBO 非线性晶体,获得了 457 nm 脉冲深蓝激光输出。当抽运功率为 30 W 时,在重复频率 $f=10$ kHz 下,获得最大单脉冲能量 $E=56$ μ J,峰值功率达 $P_M=258$ W;在重复频率 $f=20$ kHz 下,获得最大平均功率 $\bar{P}=760$ mW,峰值功率为 $P_M=146$ W。在 $\bar{P}=760$ mW 时测量了脉冲 457 nm 蓝光激光器的功率稳定性,20 min 之内最大不稳定性小于 2%。高稳定性、高重复频率、高峰值功率 457 nm 深蓝激光的获得将在水下探测和通信方面产生重要的应用。

参 考 文 献

- 1 T. Y. Fan, R. L. Byer. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1987, **23**(5): 605~612
- 2 W. P. Risk, W. Lenth. Room-temperature CW 946 nm Nd:YAG laser pumped by laser-diode arrays and intracavity frequency doubling to 473 nm [J]. *Opt. Lett.*, 1987, **12**(12): 993~995
- 3 Y. Lü, X. Zhang, Z. Yao *et al.*. 6. 2-W deep blue light generation by intracavity frequency-doubled Nd:GdVO₄ using BiBO [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(7): 407~408
- 4 Guo Mingxiu, Li Jindong, Fu Wenqiang *et al.*. Kilowatts laser-diode pumped solid-state heat capacity slab laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2): 280~286
郭明秀,李劲东,付文强等. 千瓦级激光二极管抽运固体热容板条激光器 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(2): 280~286
- 5 Li Haifeng, Zhou Rui, Zhao Pu *et al.*. 1386 nm continuous wave output from laser diode end pumped 1386 nm Nd:YVO₄ laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(7): 1069~1072
李海峰,周睿,赵璞等. 激光二极管端面抽运 Nd:YVO₄ 实现 1386 nm 连续波激光输出 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(7): 1069~1072
- 6 Tao Li, Zhuang Zhuo, Xiaomin Li *et al.*. Study on optical characteristics of Nd:YVO₄/YVO₄ composite crystal [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **3**(7): 175~177
- 7 P. Zeller, P. Peuser. Efficient, multiwatt, continuous-wave laser operation on the $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ transitions of Nd:YVO₄ and

- Nd:YAG[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(1): 34~36
- 8 Liu Weiren, Huo Yujing, He Shufang. Diode-pumped all solid state 457 nm deep blue laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(8): 980~982
- 刘伟仁,霍玉晶,何淑芳. 激光二极管抽运的全固体 457 nm 深蓝激光器[J]. *光学学报*, 2002, **22**(8): 980~982
- 9 Q. H. Xue, Q. Zheng, Y. K. Bu *et al.*. High-power efficient diode-pumped Nd:YVO₄/LiB₃O₅ 457 nm blue laser with 4.6 W of output power[J]. *Opt. Lett.*, 2006, **31**(8): 1070~1072
- 10 T. J. Kane, G. Keaton, M. A. Arbore *et al.*. 3-Watt blue source based on 914-nm Nd:YVO₄ passively-Q-switched laser amplified in cladding-pumped Nd: fiber[C]. *Proc. Advanced Solid State Photonics*, Santa Fe, NM, USA, 2004. MD7
- 11 Baer T. Large-amplitude fluctuations due to longitudinal mode coupling in diode-pumped intracavity-doubled Nd:YAG lasers[J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1986, **3**(9): 1175~1180
- 12 F. Jia, Q. Xue, Q. Zheng *et al.*. 5.3 W deep-blue light generation by intra-cavity frequency doubling of Nd:GdVO₄[J]. *Appl. Phys. B*, 2006, **83**(2): 245~247