

LD 侧面抽运 Nd:YVO₄ 532 nm 准连续绿光激光器崔建丰^{1,2}, 王迪¹, 张亚男¹, 高涛^{1*}, 岱钦², 姚俊²¹鞍山紫玉激光科技有限公司, 辽宁鞍山 114000;²沈阳理工大学理学院, 辽宁沈阳 110159

摘要 报道了 LD 侧面抽运 Nd:YVO₄ 532 nm 准连续绿光激光器。为了获得高功率的 532 nm 绿光输出,通过采用声光调 Q 技术和 LD 侧面抽运 Nd:YVO₄ 技术来获得高功率线偏振的 1064 nm 激光输出。采用 I 类相位匹配三硼酸锂(LBO)晶体腔内倍频,实现高功率 532 nm 激光输出。在电源输出电流为 30 A、声光调 Q 的调制频率为 20 kHz 的工作条件下,获得平均输出功率为 33 W 的线偏振 1064 nm 基频光,通过 LBO 晶体倍频获得平均输出功率为 23.5 W 的 532 nm 绿光。1064 nm 基频光到 532 nm 绿光的光-光转换效率达 71.2%,脉冲宽度为 44.3 ns,偏振比为 254:1。

关键词 激光器; 绿光激光器; LD 侧面抽运; Nd:YVO₄ 晶体

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP54.041402

LD Side-Pumped Nd:YVO₄ 532 nm Quasi-Continuous Green LaserCui Jianfeng^{1,2}, Wang Di¹, Zhang Ya'nan¹, Gao Tao¹, Dai Qin², Yao Jun²¹Anshan ZY Laser technology Co., Ltd, Anshan, Liaoning 114000, China;²School of Science, Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning 110159, China

Abstract The LD side-pumped Nd:YVO₄ 532 nm quasi-continuous green laser is reported. The acousto-optic Q-switched operation and the laser diode side-pumped Nd:YVO₄ laser are used to get high-power linearly polarized 1064 nm laser output. High-power 532 nm green laser output is achieved by type I phase-matched LiB₃O₅ (LBO) as second harmonic generation crystal. An average output power of 23.5 W at 532 nm is obtained under the condition of input current of 30 A, the repetition rate of 20 kHz and the 1064 nm fundamental wave of 33 W. The optical-optical conversion efficiency is up to 71.2%. The pulse width is 44.3 ns and the polarization ratio is 254:1.

Key words lasers; green laser; LD side-pumped; Nd:YVO₄ crystal

OCIS codes 140.3480; 140.3515; 140.3580

1 引言

全固态绿光激光器具有光子能量高、水中传输距离远、相对于人眼敏感等优点,广泛应用于激光医学、激光雷达、海底形貌探测、激光炫目、激光致盲武器等领域^[1-4],因此研制开发高性能的绿光激光器已成为激光行业竞相追逐的目标。

现阶段主要通过倍频晶体磷酸氧钛钾(KTP)、三硼酸锂(LBO)晶体倍频或者周期极化铌酸锂(PPLN)对 Nd:YAG、Nd:YVO₄ 等晶体的 1.06 μm 波段谱线进行倍频,实现连续绿光激光输出^[5-6],并结合调 Q 技术,实现高功率高重复频率或者低重复频率高单脉冲能量的 532 nm 绿光激光输出^[7-11]。与 Nd:YAG 晶体

收稿日期: 2016-12-02; **收到修改稿日期:** 2016-12-09

基金项目: 科技部科技型中小企业技术创新基金(C262100678)、辽宁省科技计划项目(2014220040)、沈阳市科技计划项目(F16-210-6-00)

作者简介: 崔建丰(1977—),男,博士,高级工程师,主要从事高功率、大能量固体激光器及变频技术、皮秒激光器、亚纳秒激光器及激光加工系统等方面的研究。E-mail: cuijf@163.com

* **通信联系人.** E-mail: gaotao_laser@163.com

相比, Nd:YVO₄晶体在 808 nm 抽运带宽约为 Nd:YAG 晶体的5倍,受激发射截面是 Nd:YAG 晶体的3倍,且其为双轴晶体无需起偏器件就可以实现线偏振激光输出,有利于频率变换时偏振匹配,更适合获得高效高功率高偏振比的 1064 nm 激光输出,理论上可获得更高的倍频效率。常用的绿光倍频主要有端面抽运和侧面抽运两种技术路线,端面抽运可获得更高的光束质量,2008 年, Liu 等^[12]通过端面抽运主振荡功率放大(MOPA)结构结合腔外倍频已实现 100 W 以上基模调 Q 绿光输出,但其多级结构比较复杂。LD 侧面抽运 Nd:YAG 虽然可实现数百瓦的多模调 Q 绿光输出^[13-14],但考虑到 Nd:YAG 自身的热退偏问题、热畸变特性、高重复频率下脉冲稳定性差等,故探讨和尝试采用 LD 侧面抽运 Nd:YVO₄晶体来实现高功率的线偏振基频光和倍频光输出,无疑具有相当的现实指导意义和前瞻性,而当下这方面研究报道也很少,分析主要是现阶段晶体生长技术限制了 Nd:YVO₄晶体棒长度,难以达到满足激光实验所需的大尺寸,但随着技术的发展,LD 侧面抽运 Nd:YVO₄或许将是高能量高功率 532 nm 绿光发展的必然方向,LD 侧面抽运 Nd:YVO₄技术将引领激光行业的高端发展。

本文采用 LD 侧面抽运 Nd:YVO₄晶体,声光调 Q 方式,获得高功率 1064 nm 基频光,经腔内 LBO 晶体倍频,实现重复频率为 20 kHz,功率为 23.5 W 的线偏振 532 nm 绿光,光-光转化效率达 71.2%,脉冲宽度为 44.3 ns,偏振比为 254:1。

2 实验装置

LD 侧面抽运 Nd:YVO₄ 532 nm 准连续绿光激光器,结构如图 1 所示。腔镜 M_1 、 M_2 、 M_3 组成谐振腔,谐振腔采用简单紧凑的 V 型结构,腔长约为 540 mm。LD 侧面抽运结构如图 2 所示,三列互相呈 120° 旋转对称放置的激光二极管对中心处的 Nd:YVO₄ 晶体棒连续抽运,每个热沉上安装两个最高功率为 30 W 的激光二极管,每列激光二极管线阵最大输出为 60 W,输出激光中心波长为 808 nm。Nd:YVO₄ 晶体中的 Nd³⁺ 离子的掺杂原子分数为 0.5%,晶体尺寸为 $\Phi 3 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$ 。晶体两个通光面均镀 1064 nm 增透膜。使用外部的闭合温控循环水对半导体模块及 Nd:YVO₄ 进行冷却,保证模块在工作温度范围内稳定运行。平面镜 M_1 镀 1064 nm 高反膜($R > 99.5\%$),平面镜 M_2 镀 1064 nm 和 532 nm 高反膜($R > 99.5\%$),平面镜 M_3 为绿光输出镜,镀有 1064 nm 高反膜($R > 99.5\%$)和 532 nm 高透膜($T > 95\%$), M_4 为入射角 45° 的分光镜,镀有 1064 nm 高透膜和 532 nm 高反膜,滤掉出射激光中残留的少量 1064 nm 基频光。腔内插入声光 Q 开关(I-QS027-4S4G-U5-ST1,古奇公司,英国),射频功率为 100 W 的声光驱动电源驱动,重复频率为 20 kHz。倍频晶体 LBO 靠近腔镜 M_2 放置,尺寸为 5 mm × 5 mm × 25 mm,采用 I 类临界相位匹配,切割角度 $\theta = 90^\circ$, $\Phi = 11.2^\circ$,晶体两通光面均镀有 1064 nm、532 nm 的增透膜,以降低损耗。采用温控系统对其进行控温,控温精度为 $\pm 0.1^\circ \text{C}$ 。

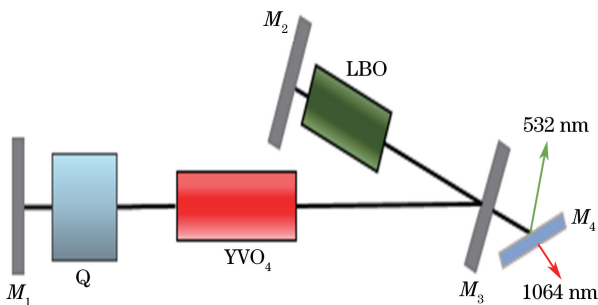


图 1 532 nm 激光器实验结构示意图

Fig. 1 Schematic of 532 nm laser experimental setup

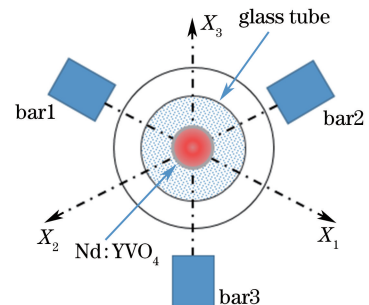


图 2 LD 侧面抽运耦合示意图

Fig. 2 Sketch map of LD-side-pump coupling

3 实验结果与分析

采用图 1 所示的实验装置,在重复频率为 20 kHz 时,分别对 1064 nm 基频光和 532 nm 绿光的功率输出特性进行了测量。

首先在图 1 中不加入 LBO 倍频晶体,将全反镜 M_2 换成 1064 nm 透过率为 30% 的输出镜, M_3 换成

1064 nm 和 532 nm 高反镜,采用激光功率计(PM150-50,Coherent 公司,美国)测量了 1064 nm 基频光输出功率。然后将 LBO 倍频晶体至于腔内, M_2 换成高反镜, M_3 换回 532 nm 输出镜,测量了绿光的输出功率,如图 3 所示。从图中可以看出,随着 LD 注入电流的增加,1064 nm 基频光和 532 nm 绿光功率增加,LD 注入电流最大为 30 A 时,1064 nm 基频光和 532 nm 绿光功率分别为 33 W 和 23.5 W,有效倍频效率达到 71.2%。

此时采用 DET10A 型探测器(Thorlabs 公司,美国)和 Wavepro7200A 型存储示波器(2 GHz Oscilloscope,LeCory 公司,美国)测量了激光脉冲宽度,脉冲宽度为 44.3 ns,如图 4 所示。并且测试了此时绿光的偏振比约为 254:1。

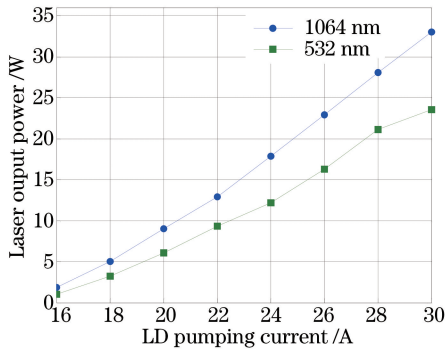


图 3 激光输出功率与注入电流的关系

Fig. 3 Laser output power versus pumping current

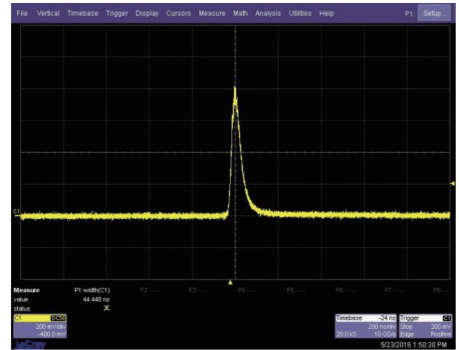


图 4 532 nm 激光单脉冲形状

Fig. 4 Single pulse shape of 532 nm laser

当 LD 注入电流为 30 A 时,测试了不同重复频率下 532 nm 绿光的输出功率和脉冲宽度,如图 5 所示。随着重复频率的增加,532 nm 绿光脉宽增加,功率下降,这是由于重复频率的增加使得激光单脉冲储能时间降低,反转粒子数与阈值反转粒子数的比值下降,从而影响激光脉冲的上升沿时间,使得脉冲宽度变宽,1064 nm 基频光峰值功率下降,导致倍频效率下降,绿光功率下降。

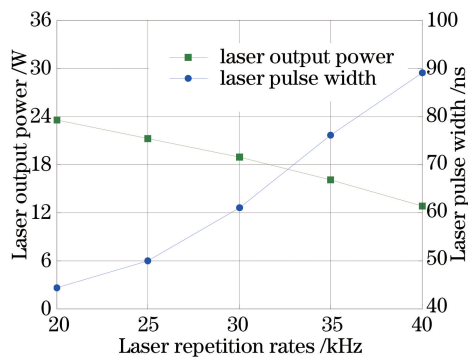


图 5 不同重复频率下 532 nm 激光输出功率与脉宽曲线

Fig. 5 Output power and pulse width of 532 nm laser at different repetition rates

4 结 论

采用 LD 侧面抽运 Nd:YVO₄ 晶体,声光调 Q 技术和腔内倍频技术,实现了高功率准连续 532 nm 绿光激光输出。在电源电流输出 30 A,声光调 Q 的调制频率为 20 kHz 的工作条件下,获得功率为 23.5 W 的 532 nm 绿光输出,脉冲宽度为 44.3 ns,偏振比为 254:1,研制的 532 nm 绿光激光器采用简单的 V 型腔,结构简单紧凑,易于安装调试。LD 侧面抽运 Nd:YVO₄ 技术是获得高功率 532 nm 绿光的有效方法,采用该技术的绿光激光器适用性好,便于集成化,小型化,产品化,采用 LD 侧面抽运 Nd:YVO₄ 的技术限制随着激光行业关键技术的不断完善与突破也将逐步消除,LD 侧面抽运 Nd:YVO₄ 晶体来实现高功率的线偏振基频光和倍频光输出,将会具有较大的竞争力。

参 考 文 献

- [1] Zhang Mingtao, Zhang Jianzhong, Zhang Jianguo, *et al.* Chaotic modulation lidar for underwater ranging[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(5): 051402.
张明涛, 张建忠, 张建国, 等. 面向水下测距的混沌调制激光雷达[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(5): 051402.
- [2] Bo Guangyu, Liu Dong, Wu Decheng, *et al.* Two-wavelength lidar for observation of aerosol optical and hygroscopic properties in fog and haze days[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(1): 0113001.
伯广宇, 刘东, 吴德成, 等. 双波长激光雷达探测典型雾霾气溶胶的光学和吸湿性质[J]. *中国激光*, 2014, 41(1): 0113001.
- [3] Liang jie, Kang Hongxiang, Shen Benjian, *et al.* Development of a high power green laser therapeutic equipment for hyperplasia of prostate[J]. *Chinese Journal of Medical Instrumentation*, 2015, 39(5): 338-340.
梁洁, 康宏向, 沈本剑, 等. 高功率绿激光前列腺增生治疗仪的研制[J]. *中国医疗器械杂志*, 2015, 39(5): 338-340.
- [4] Yang Zaifu, Wang Jiarui, Qian Huanwen. Biological foundation and technical development of disabling laser weapons [J]. *Military Medical Sciences*, 2014, 38(3): 220-223.
杨在富, 王嘉睿, 钱焕文. 激光失能生物学原理与激光失能武器技术[J]. *军事医学*, 2014, 38(3): 220-223.
- [5] Gui Shixin, Chang Jianhua, Yan Na, *et al.* A compact and highly efficient intracavity frequency-doubled green laser based on periodically poled Lithium niobate[J]. *Chinese J Lasers*, 2015, 42(11): 1102002.
桂诗信, 常建华, 严娜, 等. 一种基于铌酸锂晶体的高效紧凑腔内倍频绿光激光器[J]. *中国激光*, 2015, 42(11): 1102002.
- [6] Xu Xiafei, Lu Yanhua, Zhang Lei, *et al.* 8.7 W cw, single frequency green laser based on extra-cavity frequency doubling[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(11): 1101010.
许夏飞, 鲁燕华, 张雷, 等. 外腔谐振倍频 8.7 W 连续、单频、波长可调绿光激光技术研究[J]. *中国激光*, 2016, 43(11): 1101010.
- [7] Dai Qin, Cui Jianfeng, Mao Youming, *et al.* Passively q-switched narrow-pulse high-energy all solid-state lasers-pumped by LD pulse[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(7): 2066-2069.
岱钦, 崔建丰, 毛有明, 等. LD 脉冲泵浦被动调 Q 窄脉冲大能量全固态激光器[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(7): 2066-2069.
- [8] Tang Chun, Gao Qingsong, Tong Lixin, *et al.* 160 W diode pumped E-O Q-switched master oscillator power amplifier green laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2005, 32(11): 1455-1458.
唐淳, 高清松, 童立新, 等. 160 W 激光二极管抽运电光调 Q 主振荡功率放大器绿光激光器[J]. *中国激光*, 2005, 32(11): 1455-1458.
- [9] Wang Xu, Sun Zhe, Cheng Guanghua. High repetition rate and short pulse width electro-optic Q-switched Nd:YVO₄ laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2016, 43(6): 0601007.
王旭, 孙哲, 程光华. 高重复频率窄脉宽电光调 Q Nd:YVO₄ 激光器[J]. *中国激光*, 2016, 43(6): 0601007.
- [10] Ma Yunfeng, Yu Jin, Niu Gang, *et al.* 25 W high repetition rate picosecond green laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2011, 38(12): 1202010.
麻云凤, 余锦, 牛岗, 等. 高重复频率 25 W 皮秒绿光激光器[J]. *中国激光*, 2011, 38(12): 1202010.
- [11] Shen Zhaoguo, Tang Gangfeng, Dong Tao, *et al.* LD pumped Nd:YAG high energy slab laser[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(2): 187-190.
沈兆国, 唐刚峰, 董涛, 等. 高能量 LD 泵浦 Nd:YAG 板条激光器[J]. *激光与红外*, 2016, 46(2): 187-190.
- [12] Liu Q, Yan X, Gong M, *et al.* 103 W high beam quality green laser with an extra-cavity second harmonic generation [J]. *Optics Express*, 2008, 16(19): 14335-14340.
- [13] Xiong Jingping, Li Jiaqiang, An Zhenjie, *et al.* 310W all-solid-state quasi-continuous-wave Nd:YAG green laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(s1): s114002.
熊景平, 李嘉强, 安振杰, 等. 310 W 全固态准连续 Nd:YAG 绿光激光器[J]. *光学学报*, 2013, 33(s1): s114002.
- [14] Allee E S, Pang H Y, Hodgson N. Q-switched diode-pumped Nd:YAG rod laser with output power of 420 W at 532 nm and 160 W at 355 nm[J]. *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering*, 2009, 7193(1): 28.