

锁波长 914 nm 半导体激光器共振抽运 Nd:YVO₄/LBO 声光调 Q 绿光激光器

李斌^{1,2*}, 孙冰^{2,3}, 苗银萍¹

¹天津理工大学电气电子工程学院, 天津 300384;

²天津梅曼激光技术有限公司, 天津 300111;

³天津大学精密仪器与光电子工程学院激光与光电子研究所, 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072

摘要 报道了一种锁波长 914 nm 共振抽运的 Nd:YVO₄/LBO 腔内倍频的绿光激光器, 利用锁波长 914 nm 的半导体激光器作为抽运源, 极大地提高了抽运的均匀性和抽运效率, 降低了激光器的热效应, 从而获得了高光束质量的 532 nm 激光输出。当抽运功率为 18 W, 调制频率为 130 kHz 时, 获得了最高输出功率为 6.7 W 的绿光, 入射抽运光的光-光转换效率为 37.2%, 对应的吸收抽运光的光-光转换效率为 60%。

关键词 激光器; 锁波长; 共振抽运; Nd:YVO₄ 晶体; 倍频; 532 nm

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1001004

Wavelength-Locked 914-nm Laser Diode in-Band Pumped Nd:YVO₄/LBO Acousto-Optic Q-Switched Green Laser

Li Bin^{1,2*}, Sun Bing^{2,3}, Miao Yinping¹

¹School of Electrical and Electronic Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

²Tianjin Maiman Laser Technology Co., Ltd., Tianjin 300111, China;

³Key Laboratory of Opto-Electronics Information Science and Technology, Ministry of Education, College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering, Institute of Laser and Opto-Electronics, Tianjin University, Tianjin 300072, China

Abstract Herein, we report an efficient wavelength-locked 914-nm laser diode in-band pumped intracavity frequency doubling green laser. In our experiment, a wavelength-locked 914-nm laser diode is used as the pumping source to realize good pump uniformity and efficiency and substantially reduce the thermal effect of the laser. A 532-nm laser output with high beam quality is obtained. At a pump power of 18 W and a repetition rate of 130 kHz, the maximum power output of 6.7 W for green laser is obtained. For this pumping power, the conversion efficiency is 37.2%, which corresponds to a conversion efficiency of 60% for absorbed pumping.

Key words lasers; locked wavelength; in-band pumping; Nd:YVO₄ crystal; frequency doubling; 532 nm

OCIS codes 140.3460; 140.3480; 140.3515; 140.3540; 140.3580

1 引 言

热效应是阻碍固体激光器性能进一步提升的最主要因素之一, 严重的热效应会导致激光器的光束质量恶化、出现热饱和, 甚至使晶体产生热破裂^[1]。近年来人们不断寻找降低激光器热效应的方法, 目

前最有效的方法是共振抽运技术, 共振抽运 (in-band pumping) 是采用特定波长的抽运光将基态原子直接抽运到激光上能级, 而不是将原子先抽运到更高的激发态然后再通过无辐射跃迁弛豫到激光上能级的抽运方式。共振抽运方式消除了由激发态至激光上能级的无辐射跃迁过程, 能够有效降低抽运

收稿日期: 2019-04-15; 修回日期: 2019-05-15; 录用日期: 2019-06-05

基金项目: 国家自然科学基金(11674242)

* E-mail: hawkbaby@163.com

光和振荡光之间的量子亏损,从而减少产生的热量,同时提高量子效率,它可以从根本上解决激光器的热效应,从而使激光器的各个性能指标得到有效改善。对于 Nd:YVO₄ 激光器,共振抽运主要集中在 880, 888, 914 nm 三个抽运波长上^[2-7],理论和实验结果证明,利用共振抽运技术可以获得高功率、高光束质量的激光输出,但共振抽运技术仍然存在很多的缺点:1)晶体对这些波长抽运光的吸收率比较低,尤其对 914 nm 激光的吸收率更低,这不利于总体光-光转换效率的提高;2)Nd:YVO₄ 晶体对这些波长的吸收线宽都很窄,而半导体激光器的发射谱会随着温度的变化而发生飘移,这不利于激光器适应环境温度的变化。为了克服这些缺点,采用波长锁定共振抽运技术,有效地克服了共振抽运的缺点,进一步发挥了共振抽运的优势。所谓的锁波长共振抽运技术就是利用体布拉格光栅(VBG)对抽运源的发射波长进行锁定,使其发射波长趋于稳定,从而外界环境温度的变化对其发射谱的影响很小,同时,抽运源的发射谱宽变得更窄,可准确地与工作物质的吸收谱相对应。综合以上各方面,锁波长共振抽运技术相比于普通的共振抽运技术具有明显的优势。

目前,对于 914 nm 共振抽运技术的研究并不多,且基本都是采用非锁波长的半导体激光器或 914 nm 固体激光器作为抽运源。2009 年,Sangla 等^[8]报道了利用 914 nm 抽运 Nd:YVO₄ 晶体激光器,当吸收的抽运光功率为 14.8 W 时,获得了 11.5 W 的 1064 nm 激光输出,对应的吸收抽运光的光-光转换效率为 78.7%,斜率效率为 80.7%。2013 年,陈檬等^[9]利用 914 nm 半导体激光器作为再生放大器的抽运源,降低了热负荷,实现了高性能的再生放大器,并将单脉冲能量为 1 nJ、脉冲宽度为 5.7 ps、频率为 42.7 MHz 的种子光进行再生放大,最终获得脉冲重复频率为 100 kHz、平均功率为 21.2 W 的再生放大输出。丁欣等^[10]利用端面抽运的 914 nm 固体激光器作为抽运源对 Nd:YVO₄ 进行抽运,采用 20 mm 长、掺杂浓度(Nd 的原子数分数)为 2%的 Nd:YVO₄ 晶体作为增益介质,在 6.9 W 注入抽运功率下获得了输出功率为 3.92 W 的 1064 nm 波长激光,相应的光-光转换效率为 56.9%。2016 年,Waritanant 等^[11]利用 914 nm 半导体激光器抽运 Nd:YVO₄ 晶体实现锁模激光输出,获得了平均功率为 6.7 W、脉冲重复频率为 87 MHz 的锁模激光输出,相应的吸收抽运光的斜率效率为 77.1%,光-光转换效率为 60.7%。以上研究都是采

用非锁波长的普通半导体激光器或固体激光器作为抽运源,且都是针对基频光的研究。对于采用普通的半导体激光器作为抽运源的情况,由于半导体激光器的发射谱线宽度较宽,且发射波长会随温度的变化发生飘移,因此 Nd:YVO₄ 晶体对 914 nm 抽运光的吸收效率很低,导致总体的光-光转换效率并不高,远低于传统 808 nm 抽运方式,但采用 914 nm 固体激光器作为抽运源又增加了系统的复杂性和成本。

为了克服 914 nm 共振抽运的缺点,发挥 914 nm 共振抽运技术的优势,本文将锁波长 914 nm 共振抽运技术应用到 Nd:YVO₄ 腔内倍频激光器中,采用的抽运源为 913.9 nm 的锁波长光纤耦合输出的半导体激光器,其发射线宽为 0.3 nm,采用声光 Q 开关作为调制器,I 类临界相位匹配的 LBO 作为倍频晶体,以实现高重复频率、高光束质量的 532 nm 激光输出。当入射光的抽运功率为 18 W,调制频率为 130 kHz 时,获得了最高输出功率为 6.7 W 的 532 nm 绿光,总体光-光转换效率为 37.2%,相应的吸收抽运光的光-光转换效率为 60%,脉冲宽度为 52 ns。本文采用的抽运方式所获得的总体光-光转换效率与传统的 808 nm 抽运方式相当,并且可以有效降低激光器的热效应,提高输出激光的光束质量。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,抽运源为 914 nm 锁定光纤耦合输出的半导体激光器,其最大的输出功率为 20 W,线宽为 0.3 nm,如此窄的线宽可以很好地与晶体的吸收带宽匹配,弥补了共振抽运吸收带窄的缺点,并且该抽运源具有很好的温度稳定性,当热沉温度在 10~40 °C 范围内发生变化时,其发射的中心波长仅移动了 0.6 nm,线宽基本保持不变,这使得利用该半导体激光器作为抽运源的系统具有极高的温度稳定性。传输光纤直径为 400 μm,数值孔径为 0.22,coupler 为光学耦合系统,经过耦合系统后抽运光斑直径约为 700 μm;M1 镀有 1064 nm 高反膜,激光晶体的尺寸为 3 mm×3 mm×20 mm,Nd 的掺杂浓度(原子数分数,下同)为 1%,晶体用铝箔包裹后放在紫铜热沉中。M2 镀有 914 nm 增透膜和 1064 nm 高反膜,M3 镀有 532 nm 增透膜和 1064 nm 高反膜,M4 镀有 1064 nm 和 532 nm 高反膜;AO 为声光 Q 开关,其超声波频率为 80 MHz,射频功率为 20 W,双面镀有 1064 nm 增透膜;LBO 的尺寸为 3 mm×3 mm×15 mm,采

用的是 I 类临界相位匹配方式,为了满足相位匹配条件, LBO 晶体的相位匹配角 $\theta = 90^\circ$, $\varphi = 11.2^\circ$, 将其放在高精度温控盒中,控温精度为 $\pm 0.03^\circ\text{C}$, 两端镀有 1064 nm 和 532 nm 的增透膜。M1 到

Nd:YVO₄ 右端面的距离为 100 mm, M2 到 Nd:YVO₄ 左端面的距离为 20 mm, M2 到 M3 的距离为 80 mm, M3 到 M4 的距离为 40 mm, M1、M2、M3、M4 均为平镜。

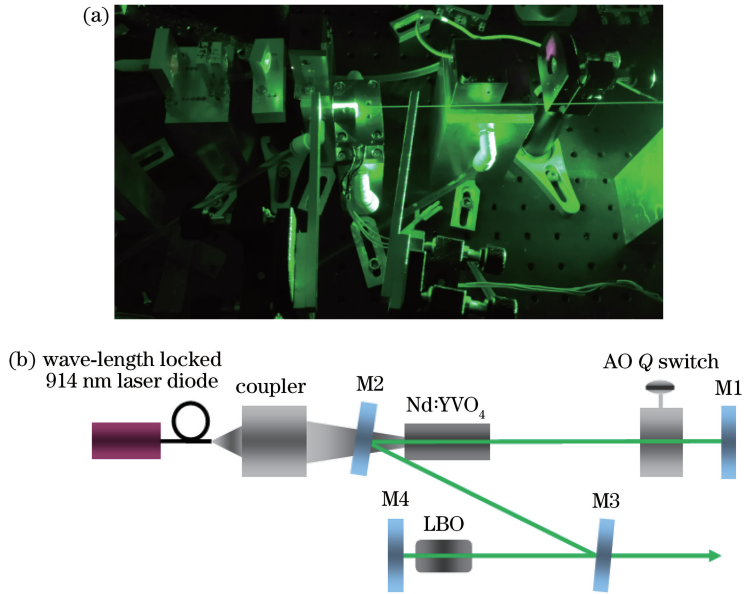


图 1 波长锁定 914 nm 激光二极管共振抽运 Nd:YVO₄/LBO 绿光激光器实验装置及光路图。(a) 实验装置图; (b) 光路图
Fig. 1 Experimental setup and light path of wavelength-locked 914 nm laser diode in-band pumped Nd:YVO₄/LBO green laser. (a) Experimental setup; (b) light path

图 2 所示为谐振腔内的光斑大小分布情况。可以看到: Nd:YVO₄ 晶体的基模光斑直径为 624 μm , 与 700 μm 的抽运光的模式匹配较好; 较大的抽运光斑可以进一步降低热效应, 同时降低高掺杂 Nd:YVO₄ 晶体的上转换效应。

激光输出功率与入射抽运功率的关系。从图 3 可以看出: 当抽运功率为 18 W, 调制频率为 130 kHz 时, 可以获得最高输出功率为 6.7 W 的 532 nm 激光, 对应的入射抽运光的光-光转换效率为 37.2%, 对应的吸收抽运光的光-光转换效率为 60%; 当调制频率为 170 kHz 时, 获得了输出功率为 5.7 W 的绿光, 对应的入射抽运光的光-光转换效率为 31.7%; 当频率由 130 kHz 逐渐降低时, 输出功率和转换效率也会逐渐降低, 当调制频率分别为 90, 50, 20 kHz 时, 分别获得了最高输出功率为 5.8, 5.2, 3.2 W 的激光, 对应的光-光转换效率分别为 32.2%, 26% 和 17.7%。由此可知, 锁波长 914 nm 抽运的 Nd:YVO₄ 腔内倍频激光器在高重复频率下可以获得较高的转换效率, 对于重复频率比较低的情况, 尤其在重复频率为 20 kHz 时, 输出功率会随着抽运功率的增加而产生类似的热饱和效应, 在抽运功率超过 14 W 后, 输出功率的斜率明显减小, 这主要是因为高掺杂浓度晶体在低频运转时上转换现象比较严重。上转换率可以写为 $\gamma \Delta n^2$, 其中 γ 为上转换系数, Δn 为反转粒子数密度^[12-16], 从这个关系式可以看出, 上转换率与反转粒子数密度的二次方成正比, 尤其在采用高掺杂浓度晶体低频运转且抽运功率较

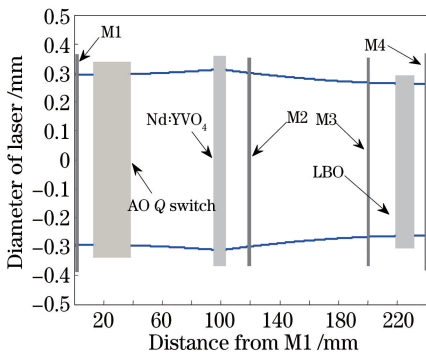


图 2 腔内光斑分布情况
Fig. 2 Spot distribution in the cavity

3 实验结果分析

首先测试了 Nd:YVO₄ 晶体对抽运光的吸收率, 当晶体热沉温度为 25 $^\circ\text{C}$ 时, 掺杂浓度为 1%、长为 20 mm 的 Nd:YVO₄ 晶体对 914 nm 抽运光的吸收率为 62%, 图 3 给出了不同调制频率下, 532 nm

高时,反转粒子数密度较高,上转换和荧光猝灭效应进一步增强,从而使光-光转换效率明显降低。

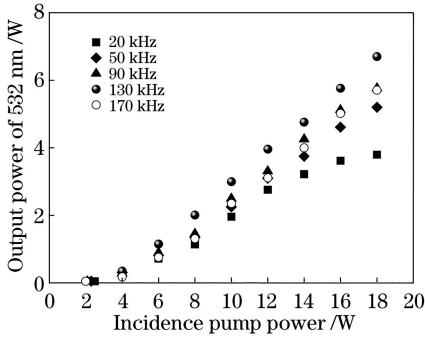


图 3 不同重复频率下输出功率与抽运功率的关系
Fig. 3 Relationship between output power and pump power at different repetition rates

图 4 所示为 18 W 抽运功率下,输出功率、光-光转换效率(对应于吸收抽运功率)与重复频率的关系。从实验结果可以看出:当重复频率在 40~130 kHz 范围内逐渐增加时,激光器输出功率也增加,光-光转换效率也在缓慢增加,当重复频率为 130 kHz 时,有最大的输出功率,为 6.7 W;当重复频率在 130~170 kHz 范围内逐渐增大时,输出功率呈下降趋势,当重复频率为 170 kHz 时,输出功率下降到 5.7 W。以上两个过程中输出功率及光-光转换效率都呈缓慢变化趋势,但当重复频率由 30 kHz 下降到 15 kHz 时,输出功率和光-光转换效率都急剧下降。实验结果表明,所设计的 914 nm 共振抽运高掺杂 Nd:YVO₄ 激光器更适合在高重复频率下运转,当重复频率过低时,高掺杂晶体具有较短的上能级寿命和较高的上转换系数,导致产生的自发辐射效应较强,上转换损耗较大。

实验测得脉冲频率为 130 kHz 时的脉冲宽度

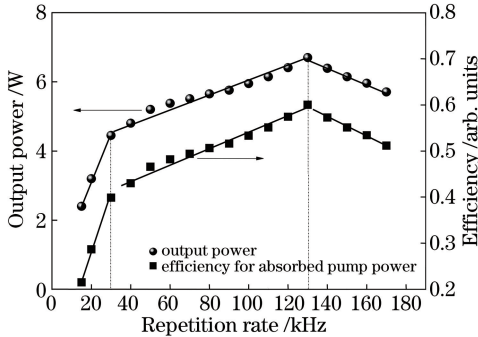


图 4 抽运功率为 18 W 时输出功率和光-光转换效率与重复频率的关系

Fig. 4 Relationship among output power, optical-optical conversion efficiency, and repetition rate when pump power is 18 W

为 52 ns,对应的峰值功率为 1 kW。采用 90/10 刀口法(即分别取激光光斑能量为 90%、10%的位置对光斑大小进行测量)对激光的光束质量进行测量,得到绿光的光束质量因子在 X 方向和 Y 方向分别为 1.3 和 1.2,测量结果如图 5 所示。之所以能够获得比较好的光束质量输出,主要是因为:1)利用 914 nm 抽运减少了量子亏损产生的热,从而降低了热透镜效应,提高了光束质量;2)合理的模式匹配也是能够获得较高的光束质量的重要原因。

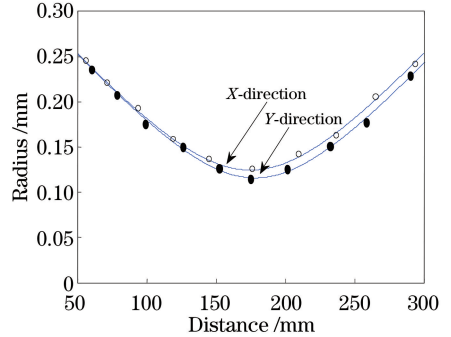


图 5 光束质量因子测量结果

Fig. 5 Measurement result of beam quality factor

4 结 论

将锁波长 914 nm 共振抽运技术应用到声光调 Q 的腔内倍频激光器中,采用 Nd:YVO₄ 晶体作为增益介质,I 类临界相位匹配的 LBO 作为倍频晶体,实现了高重复频率、高光束质量的 532 nm 激光输出。该激光器在高重复频率条件下工作时具有很好的性能,当重复频率较低时(小于 30 kHz),由于 Nd:YVO₄ 的掺杂浓度较高,在高功率抽运时上转换及自发辐射现象比较严重,光-光转换效率明显下降。当抽运功率为 18 W,重复频率为 130 kHz 时,获得了最高输出功率为 6.7 W 的倍频光,对应的入射抽运光的光-光转换效率为 37.2%,对应的吸收抽运光的光-光转换效率为 60%,其转换效率与传统 808 nm 抽运方式相当,具有很好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] Zhao J T, Feng G Y, Yang H M, *et al.* Analysis of thermal effect and its influence on output power of thin disk laser[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(8): 084208.
赵建涛, 冯国英, 杨火木, 等. 薄片激光器热效应及其对输出功率的影响[J]. 物理学报, 2012, 61(8): 084208.
- [2] Lavi R, Jackel S. Thermally boosted pumping of

- neodymium lasers [J]. *Applied Optics*, 2000, 39 (18): 3093-3098.
- [3] Sato Y, Taira T, Pavel N, *et al.* Laser operation with near quantum-defect slope efficiency in Nd:YVO₄ under direct pumping into the emitting level [J]. *Applied Physics Letters*, 2003, 82 (6): 844-846.
- [4] McDonagh L, Wallenstein R, Knappe R, *et al.* High-efficiency 60 W TEM₀₀ Nd:YVO₄ oscillator pumped at 888 nm [J]. *Optics Letters*, 2006, 31 (22): 3297-3299.
- [5] Zhu P, Li D J, Hu P X, *et al.* High efficiency 165 W near-diffraction-limited Nd:YVO₄ slab oscillator pumped at 880 nm [J]. *Optics Letters*, 2008, 33 (17): 1930-1932.
- [6] Ding X, Yin S J, Shi C P, *et al.* High efficiency 1342 nm Nd:YVO₄ laser in-band pumped at 914 nm [J]. *Optics Express*, 2011, 19(15): 14315-14320.
- [7] Hong H L, Huang L, Liu Q, *et al.* Compact high-power, TEM₀₀ acousto-optics Q-switched Nd:YVO₄ oscillator pumped at 888 nm [J]. *Applied Optics*, 2012, 51(3): 323-327.
- [8] Sangla D, Castaing M, Balembois F, *et al.* Highly efficient Nd:YVO₄ laser by direct in-band diode pumping at 914 nm [J]. *Optics Letters*, 2009, 34 (14): 2159-2161.
- [9] Chen M, Chang L, Yang C, *et al.* 100 kHz Nd:YVO₄ picosecond regenerative amplifier end-pumped by 914 nm laser diode [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(6): 0602010.
陈檬, 常亮, 杨超, 等. 914 nm LD 端面抽运 Nd:YVO₄ 100 kHz 皮秒再生放大器 [J]. 2013, 40(6): 0602010.
- [10] Ding X, Zhang H Y, Sheng Q, *et al.* High efficiency Nd:YVO₄ laser in-band pumped from high Stark level of ground state at 914 nm [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, 40(7): 0702008.
丁欣, 张海永, 盛泉, 等. 914 nm 基态高斯塔克能级共振抽运的高效率 Nd:YVO₄ 激光器 [J]. *中国激光*, 2013, 40(7): 0702008.
- [11] Waritanant T, Major A. High efficiency passively mode-locked Nd:YVO₄ laser with direct in-band pumping at 914 nm [C] // Conference on Lasers and Electro-Optics, June 5-10, 2016, San Jose, California, United States. Washington, D.C.: OSA, 2016: SM4M.2.
- [12] Ostroumov V, Jensen T, Meyn J P, *et al.* Study of luminescence concentration quenching and energy transfer upconversion in Nd-doped LaSc₃(BO₃)₄ and GdVO₄ laser crystals [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1998, 15(3): 1052-1060.
- [13] Meilhac L, Pauliat G, Roosen G. Determination of the energy diffusion and of the Auger upconversion constants in a Nd:YVO₄ standing-wave laser [J]. *Optics Communications*, 2002, 203: 341-347.
- [14] Guy S, Bonner C L, Shepherd D P, *et al.* High-inversion densities in Nd:YAG: upconversion and bleaching [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, 34(5): 900-909.
- [15] Chen Y F, Liao C C, Lan Y P, *et al.* Determination of the Auger upconversion rate in fiber-coupled diode end-pumped Nd:YAG and Nd:YVO₄ crystals [J]. *Applied Physics B*, 2000, 70(4): 487-490.
- [16] Délen X, Balembois F, Musset O, *et al.* Characteristics of laser operation at 1064 nm in Nd:YVO₄ under diode pumping at 808 and 914 nm [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2011, 28 (1): 52-57.