

LD 泵浦全固态连续 Nd:LuVO₄-LBO 533 nm 绿光激光器

阮仁秋,李永亮,倪天怡,张天乙,温彬
(长春理工大学光电工程学院,吉林 长春 130022)

摘要:报道了采用 888 nm 的激光二极管(LD)泵浦 Nd:LuVO₄ 晶体得到 1066 nm 的激光输出,其中 Nd:LuVO₄ 晶体对应能级跃迁为⁴F_{3/2}→⁴I_{11/2}。在注入抽运功率为 18.3 W 时,可获得 11.2 W 的近红外激光输出;然后采用非线性晶体 LiB₃O₅(LBO)进行腔内倍频,获得了 533 nm 的绿激光输出,输出功率为 4.2 W,其光-光转换效率为 23%,4 h 功率稳定度优于 ±3.7%。

关键词:激光;LD 泵浦;腔内倍频;Nd:LuVO₄

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2012.11.011

All-solid-state CW Nd:LuVO₄-LBO 533 nm laser pumped by LD

RUAN Ren-qiu, LI Yong-liang, NI Tian-yi, ZHANG Tian-yi, WEN Bin

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: It's reported an efficient laser at 1066 nm which is generated by ⁴F_{3/2} to ⁴I_{11/2} transition of Nd:LuVO₄ with a pump laser at 888 nm. Continuous wave (CW) with 11.2 W output power at 1066 nm is obtained under a pump power of 18.3 W. Moreover intracavity frequency doubling with LiB₃O₅ (LBO) nonlinear crystal yields 4.2 W green light at 533 nm. The optical to optical efficiency is 23.0%. The power stability in 4 hours is better than ±3.7%.

Key words: laser; LD pumping; intracavity doubling; Nd:LuVO₄

1 引言

掺 Nd³⁺ 离子的钒酸盐晶体的主要特点是具有很高的吸收系数以及较大的受激发射横截面。我们知道最具有代表性的是 Nd:YVO₄ 晶体,已经被广泛地用于研究领域和相关固体激光器中^[1-2]。另一种钒酸盐晶体是 Nd:GdVO₄,已经被证实其热导率比 Nd:YVO₄ 高^[3-4]。另一种引起了广泛关注的钒酸盐晶体 Nd:LuVO₄,它的吸收系数以及受激发射截面比 Nd:YVO₄ 和 Nd:GdVO₄ 大,但是 Nd:LuVO₄ 晶体的破坏阈值较高^[5-8]。近年来,一些文章报道了以 Nd:LuVO₄ 作为激光增益介质产生了 1.06 μm, 1.34 μm 和 0.9 μm 的激光输出^[4,9-10]。文中指出,泵浦光是使处于较高的⁴F_{3/2}能级的 Nd³⁺ 离子跃迁,而不是⁴F_{5/2}能级。若是⁴F_{5/2}能级跃迁将导致量子缺陷而使泵浦效率降低,同时由于产生热效应而直接影响激光的光束质量^[11-12],而且由于离子没有被全部激发,其产生的激光光束质量更具有局限性。我

们采用了一种更有效的泵浦方式,即泵浦光直接作用于 Nd³⁺ 离子的⁴F_{3/2}能级的吸收谱线,从而实现更高的粒子数反转分布,提高了激光的发射效率。以前的理论中,关于用 888 nm 的激光二极管(LD)泵浦 Nd:LuVO₄ 激光器的报道较少,近年来才有了相关报道^[13-16]。本文以波长为 888 nm 的激光二极管泵浦 Nd:LuVO₄ 从而获得波长为 1066 nm 的基频光输出,其最大输出功率为 11.2 W,再采用 LBO 晶体进行 I 类临界相位匹配,获得了波长为 533 nm 的连续绿光激光输出,其输出功率达到了 4.2 W。

2 实验原理

实验原理如图 1 所示,图 1(a)为所产生的波长为 1066 nm 的基频光,泵浦源采用的是芯径为

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 61108029)资助。

作者简介:阮仁秋(1985-),硕士研究生,主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: ruanpeng1799@sina.com

收稿日期:2012-04-01

400 μm 、数值孔径为 0.22 的光纤耦合二极管激光器,其产生的泵浦光波长为 888 nm,最大功率为 20 W。如图 1 所示,组成系统中的两块耦合透镜的作用是将泵浦源发出的光更好地耦合到工作物质 Nd:LuVO₄ 晶体上。其中图 1(a) 中实现基频光输出, M_1 与 M_2 的距离为 56 mm; 图 1(b) 中实现了倍频光输出, M_1 与 M_3 的距离为 67 mm, M_3 与 M_4 的距离为 28 mm。

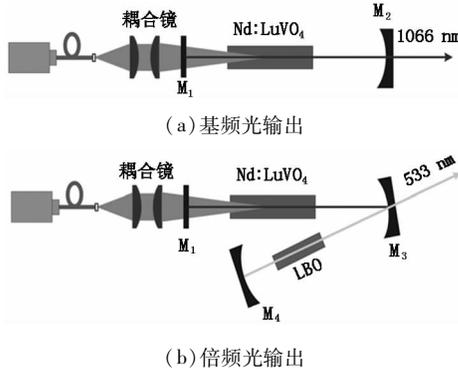


图 1 实验原理图

Fig. 1 schematic diagrams of the experiment

在实验中所用的工作物质 Nd:LuVO₄ 晶体为长条状,其尺寸为 4 mm × 4 mm × 12 mm,且 Nd³⁺ 离子的掺杂百分比为 0.5%。Nd:LuVO₄ 晶体棒的两端面均镀有对 1066 nm 的增透膜,将晶体棒的侧表面裹上铝箔并固定在紫铜热沉块上,其目的是防止 Nd:LuVO₄ 晶体由于热效应而产生形变。为紫铜制冷的冷却水温保持在 15 $^{\circ}\text{C}$,激光器的发光效率此温度下最大。如图 1 所示,平面镜 M_1 的作用是对波长为 888 nm 的光高透而对波长为 1066 nm 的光高反。凹面镜 M_2 的作用是使激光耦合输出,其凹面的半径为 200 mm,其对 1066 nm 激光的透过率为 10.3%。实验中,533 nm 的绿光输出原理如图 1(b) 所示,其中 1066 nm 的基频光的产生方法和图 1(a) 中的完全一致。凹面镜 M_3 的作用是使激光耦合输出,其对 1066 nm 的光高反,对 533 nm 的光高透。 M_4 则是对 1066 nm 和 533 nm 的光均是高反。用非线性晶体 LBO 进行 I 类临界相位匹配,匹配角为 $\theta = 90^{\circ}$, $\varphi = 11.2^{\circ}$, LBO 晶体的尺寸为 2 mm × 2 mm × 10 mm,对其同样采取与工作物质 Nd:LuVO₄ 晶体一样的冷却方法。

3 实验结果分析

图 2 所示为输出功率与泵浦功率对比图,当泵浦功率达到 18.3 W 时,1066 nm 连续激光输出功率达到了 11.2 W。从图中可知,激光振荡输出的阈值为 2.1 W,在泵浦功率为 18.3 W 时光-光转换效率

达到了 61.2%。图 3 所示是用高分辨率光谱仪探测到的输出功率为 11.2 W 时的 1066 nm 基频光的光谱图。

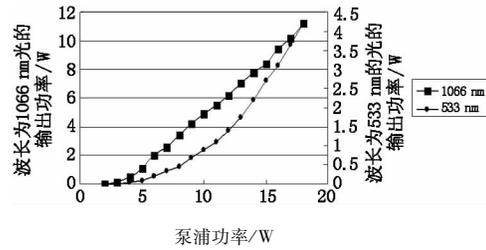


图 2 波长为 1066 nm 和 533 nm 的光输出功率和泵浦功率对比图

Fig. 2 output powers at 1066 and 533 nm versus pump power at 888 nm

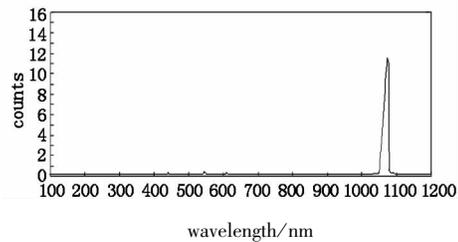


图 3 1066 nm 激光谱线图

Fig. 3 the laser spectrum line of 1066 nm laser

图 2 中还可以看出,泵浦功率为 18.3 W 时可获得输出功率为 4.2 W 的连续倍频 533 nm 的绿激光输出。用功率计对激光的稳定性做了如下实验,用功率计接收激光器输出的光,激光器连续运行 4 h 后,得出输出功率稳定度优于 3.7%。图 4 所示为 533 nm 激光的光束质量分析图,最大输出功率进的光束质量因子 $M^2 = 1.3$ 。以上反映了激光器输出的激光稳定性高和光束质量好。

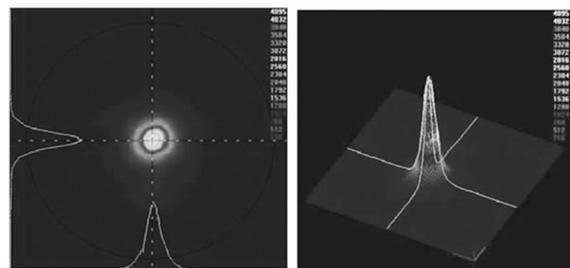


图 4 533 nm 激光光束质量图

Fig. 4 beam quality of the 533 nm emission

4 结论

采用 888 nm 的激光二极管泵浦 Nd:LuVO₄ 晶体,当泵浦功率为 18.3 W 时得到了 11.2 W 的连续 1066 nm 基频光激光输出,再利用非线性光学晶体 LBO 腔内倍频获得了波长为 533 nm 的绿激光输出,输出功率为 4.2 W,且输出功率稳定,光束质量好。

实验结果表明:以 Nd:LuVO₄ 作为激光增益介质进行腔内倍频是获得 533 nm 激光的高效方法。还可以通过优化输出镜的透过率和改善激光谐振腔参数来进一步改进上述得到的输出结果。近来有文章报道,如果使用其他非线性晶体,如 KTP 或铌酸钾(KNbO₃)等晶体,将会进一步增加二次谐波的输出功率^[17-18]。本文所利用的非线性光学晶体腔内倍频技术为新波长全固态激光器的发展提供了一个新的方向。

参考文献:

- [1] Li Yongliang, Lü Yanfei, Zhang Yulan. All-solid-state continuous-wave doubly resonant all-intracavity sum-frequency mixing yellow-green laser at 554.9 nm[J]. *Laser & Infrared*, 2009, 39(6): 588-590. (in Chinese)
李永亮, 吕彦飞, 张玉兰. 全固态复合内腔和频 554.9 nm 连续波黄-绿光激光器[J]. *激光与红外*, 2009, 39(6): 588-590.
- [2] Lü Yanfei, Tan Huiming, Gao Lanlan, et al. LBO type-I critical phase-matched intracavity sum-frequency mixing 593.5 nm laser [J]. *Laser & Infrared*, 2005, 35(1): 45-47. (in Chinese)
吕彦飞, 檀慧明, 高兰兰, 等. LBO I类临界相位匹配内腔和频 593.5 nm 激光器[J]. *激光与红外*, 2005, 35(1): 45-47.
- [3] Sun Ling, Li Pingxue, Yang Wenshi. All-solid-state quasi-continuous-wave Nd:YAG/LBO green laser through harmonic generation [J]. *Laser & Infrared*, 2011, 41(4): 398-401. (in Chinese)
孙玲, 李平雪, 杨文是. 全固态准连续 Nd:YAG/LBO 绿光激光器[J]. *激光与红外*, 2011, 41(4): 398-401.
- [4] Xu Fanghua, Wang Zhengping, et al. Research on the LD pumped Nd:LuVO₄ micro-chip laser performance [J]. *Journal of Physics*, 2007, 56(7): 3950-3954. (in Chinese)
徐方华, 王正平, 张怀金, 等. LD 抽运 Nd:LuVO₄ 微片激光器性能研究[J]. *物理学报*, 2007, 56(7): 3950-3954.
- [5] Xu Ming. Research on series of Nd_xLu_{1-x}VO₄ laser crystal's growth and properties [D]. Ji'nan: Shandong University, 2011, 4. (in Chinese)
徐民. Nd_xLu_{1-x}VO₄ 系列激光晶体的生长及其性能研究[D]. 济南: 山东大学, 2011, 4.
- [6] Ma J L, Xiong B, Guo L, et al. Low heat and high efficiency Nd:GdVO₄ laser pumped by 913 nm [J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 7(8): 579-582.
- [7] Liu Fengqin. Research on Nd:LuVO₄ crystal characteristics and all-solid-state laser [D]. Ji'nan: Shandong University, 2007, 4. (in Chinese)
刘凤芹. Nd:LuVO₄ 晶体特性及其全固态激光器研究[D]. 济南: 山东大学, 2007, 4.
- [8] Liu F Q, He J L, Sun S Q, et al. LD-pumped Nd:GdVO₄ raman laser at 1166 nm with LiIO₃ crystal [J]. *Laser Phys Lett*, 2011, 8(8): 579-582.
- [9] Chen D Y, Li X D, Zhang Y, et al. Research on diffusion-bonding composite YVO₄/Nd:GdVO₄ crystal [J]. *Laser Phys Lett*, 2011, 8(1): 46-49.
- [10] Tan Huiming, Zheng Qaun, Chen Yingxin, et al. Double-frequency 671 nm laser with type-I critical phase-matching LBO [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2002, 29(4): 289-292. (in Chinese)
檀慧明, 郑权, 陈颖新, 等. LBO I类临界相位匹配倍频 671 nm 激光器[J]. *中国激光*, 2002, 29(4): 289-292.
- [11] Yao Jianquan. Nonlinear optics frequency conversion and laser tuning technology [M]. Beijing: Science Press, 1995. (in Chinese)
姚建铨. 非线性光学频率变换及激光调谐技术[M]. 北京: 科学出版社, 1995.
- [12] Yao Jianquan, Xu Degang. All-solid-state laser and nonlinear optical frequency conversion technology [M]. Beijing: Science Press, 2007. (in Chinese)
姚建铨, 徐德刚. 全固态激光及非线性光学频率变换技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [13] R Zhou, B G Zhang, X Ding, et al. Continuous-wave operation at 1386 nm in a diode-end-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. *Optics Express*, 2005, 13(15): 5818-5824.
- [14] F Q Jia, Q H Xue, Q Zheng. All-Solid-State 556 nm yellow laser by LBO intracavity frequency doubling [J]. *Chinese Journal Lasers*, 2005, 32(8): 1017-1021.
- [15] Lu Y F, Xia J, Yin X D, et al. 1085 nm Nd:YVO₄ laser intracavity pumped at 914 nm and sum-frequency mixing to reach cyan laser at 496 nm [J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 7(1): 11-13.
- [16] Lu Y F, Sun G C, Fu X H, et al. Diode-pumped Nd:YVO₄/BiBO blue laser at 440 nm [J]. *Laser Phys Lett*, 2010, 7(7): 495-497.
- [17] F Q Liu, H R Xia, Z C Ling, et al. Diode-pumped Q-switched intracavity frequency-doubled Nd:LuVO₄/KTP green laser [J]. *Laser Physics*, 2008, 8(18): 954-957.
- [18] Liu Fengqin, Xia Hairui, Xu Jianqiang. Research on Nd:LuVO₄ crystal laser characteristics [C]//Chinese Optical Society 2006 Congress Abstracts, 2006, (9): 332-333. (in Chinese)
刘凤芹, 夏海瑞, 徐建强. Nd:LuVO₄ 晶体的激光器特性研究[C]//中国光学学会 2006 年学术大会论文摘要集, 2006, (9): 332-333.