

940 nm LD 泵浦 Yb : CN 978 nm 激光器及其二次谐波

周玮琦¹,高龙岳¹,张艳华²,王渊博¹,李仕明¹,王斯琦¹,
白冲¹,崔承坤¹,叶秀玲¹,陈永香¹,张力¹,李永亮¹
(1. 长春理工大学光电工程学院,吉林 长春 130022;
2. 长春奥普光电有限公司,吉林 长春 130031)

摘要:报道了半导体泵浦 Yb : CaNb₂O₆ 晶体输出 978 nm 波长的激光器。泵浦模块采用了 940 nm LD,在实现了 Yb : CaNb₂O₆ 薄盘激光器 1.14 W 的连续波输出的基础上,采用 LBO 非线性晶体进行内腔倍频实现了 151 mW 的 489 nm 连续二次谐波输出,在水平和垂直方向上的光束质量因子 M^2 分别为 1.11 和 1.13。

关键词:978 nm;半导体泵浦;薄盘激光器;Yb : CN 晶体

中图分类号:TN248.1 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2016.10.012

978 nm Yb : CaNb₂O₆ laser pumped by 940 nm LD and the second-harmonic generation

ZHOU Wei-qi¹,GAO Long-yue¹,ZHANG Yan-hua²,WANG Yuan-bo¹,LI Shi-ming¹,WANG Si-qi¹,
BAI Chong¹,CUI Cheng-kun¹,YE Xiu-ling¹,CHEN Yong-xiang¹,ZHANG Li¹,LI Yong-liang¹
(1. School of OptoElectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. Changchun UP Optotech Co. Ltd., Changchun 130031, China)

Abstract:The diode-pumped Yb : CaNb₂O₆ laser emitting at 978 nm is reported. The Yb : CaNb₂O₆ thin-disk laser with continuous wave (cw) output power of 1.14 W at 978 nm was realized by using 940nm LD pumping. Based on this, intra-cavity second-harmonic generation (SHG) in cw mode has also been demonstrated with a power of 151 mW at 489 nm by using LiB₃O₅ (LBO) nonlinear crystal. The beam quality factors M^2 are respectively 1.11 and 1.13 in horizontal direction and vertical direction.

Key words:978 nm;diode-pumped;thin-disk laser;Yb : CN crystal

1 引言

可见和近红外光谱范围内的相干连续波光源在医学、光刻技术、通讯、显示和其他方面已经有很多的应用,特别是二极管泵浦固体激光器作为高效、紧凑的光源,通过倍频等非线性技术,可以产生蓝光,绿光和红光,并可得到很高的转换效率^[1-10]。设计新型固体激光器以增加和扩大可用的波长范围,例如黄光^[11],或改善已使用的光源,如 488nm 波长的

蓝光,可用于取代低效率的氩离子激光器^[12]。在可见光范围内的高效连续激光器通常是基于同样的原理:二极管泵浦、腔内倍频。但是目前这种配置不能直接达到 488 nm 以内,因为尚缺乏稀土掺杂的晶体直接发射 976 nm 波长。目前已有文献报道对 976 nm 的其他光源进行了探讨,例如垂直扩展腔表面出射半导体二极管激光器,光泵浦半导体激光器和 Pr、Yb 共掺光纤激光器等^[13-15]。

基金项目:国家自然科学基金(No. 61675035)资助。

作者简介:周玮琦(1991-),女,硕士研究生,研究方向为激光技术及应用。E-mail:lanshuijing1991@163.com

通讯作者:李永亮(1973-),男,教授,博士,硕士生导师,主要研究方向为激光技术及应用,光电测控技术与仪器等。
E-mail:liyongliang@cust.edu.cn

收稿日期:2016-02-01;**修订日期:**2016--

但是由于所得到的激光光束质量不佳,很难获得高效率倍频蓝光。

使用和频方式可以代替简单二次谐波得到 488 nm 波段附近的激光,例如采用 912 nm 的 Nd : GdVO₄ 激光器泵浦 Nd : YVO₄ 晶体输出 1064 nm 的激光,再通过一个非线性晶体对 912 nm 和 1064 nm 激光进行腔内和频,可最终出射 491 nm 蓝光^[16]。由于 912 nm 的入射泵浦光仅 2% 被 Nd : YVO₄ 晶体吸收,因此这种方法效率有限。另一种方法是 Nd : YVO₄ 晶体在 1064 nm 和 914 nm 处进行双波长输出并进行相干和频,实现 492 nm 的蓝色激光^[17]。然而在同一谐振腔内进行单激光介质输出双波长激光的稳定性操作上相当困难,这是由于在 1064 nm 处的有效跃迁和发射截面比 914 nm 处高 20 倍,因此存在增益竞争,导致单一激光晶体运行双波长的操作是效率不高的。

为了有效地生成两个高功率连续波辐射和超短脉冲,基于 Yb 离子掺杂的二极管泵浦固态激光器与 Nd 振荡器相比有相当一些优点。最近,通过倍频 1 μm 发射的激光源可以得到约 0.5 μm 的激光。由于 Yb 掺杂材料具有 1 μm 宽的发射光谱,因此它们是这类光源的良好候选。2011 年, D . Z. Li 等报道了二极管泵浦 Yb : CaNb₂O₆ 产生了 1038 nm 的激光^[18]。2012 年,王爱国等人采用二极管泵浦 Yb : YAG 晶体实现了准三能级连续 1024 nm 薄盘激光器^[19]。同年 J . H. Li 等人报道了二极管泵浦 Yb : CaNb₂O₆ 产生 1003 nm 的激光^[20]。然而, Yb : CaNb₂O₆ 晶体荧光光谱显示在 978 nm、1003 nm 和 1038 nm 有三个中心发射波长,如图 1 所示。

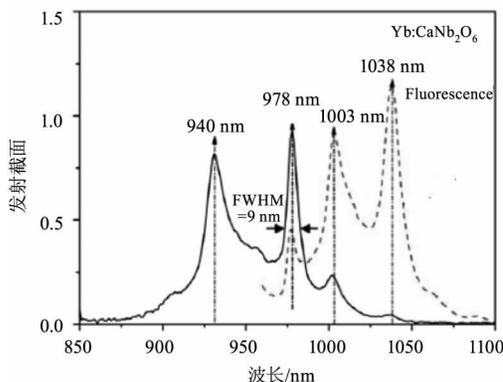


图 1 室温下 Yb : CaNb₂O₆ 晶体的光谱

Fig. 1 Room temperature optical spectra of Yb : CaNb₂O₆ crystal

到目前为止, Yb : CaNb₂O₆ 产生 978 nm 激光尚未见报道。在这篇文章中,报道了二极管激光器泵浦的 Yb : CaNb₂O₆ 晶体输出 978 nm 波长连续波激

光。采用一个有 16 个通道的泵浦模块,可以实现 Yb : CaNb₂O₆ 薄盘激光器 1.14 W 的连续波输出。然后,基于内腔倍频的 Yb : CaNb₂O₆ - LiB₃O₅ (LBO) 实现了 489 nm 的连续波激光。

2 实验装置

激光器的实验装置原理图如图 2 所示。其中 978 nm 的激光器基本实验装置如图 2(a) 所示。采用德国 LIMO 公司的光纤耦合输出的 940 nm LD 泵浦源,最大输出功率为 20 W,发光光谱的宽度 ~2.5 nm。二极管的光纤直径为 400 μm,数值孔径 NA = 0.22。在实验中使用的激光晶体是原子掺杂浓度为 1.5% 的 Yb : CaNb₂O₆,厚度为 0.3 mm。薄盘激光晶体选择前表面镀对于泵浦光和激光波长减反射 (AR) 膜层,后表面对于两种波长高反射 (HR) 膜层。后表面密切接触到一个水冷散热部件上(热沉块),冷却剂温度保持在 15 °C。抛物面镜(焦距 32 mm)和折叠棱镜产生一个 16 路的泵浦光路。镜 M1 曲率半径为 50 mm,它在 978 nm 高反射,在 1003 nm 和 1038 nm 减反,这从根本上抑制了寄生振荡。镜 M2 是一个输出耦合器,在 978 nm 的透射率为 2.8%。

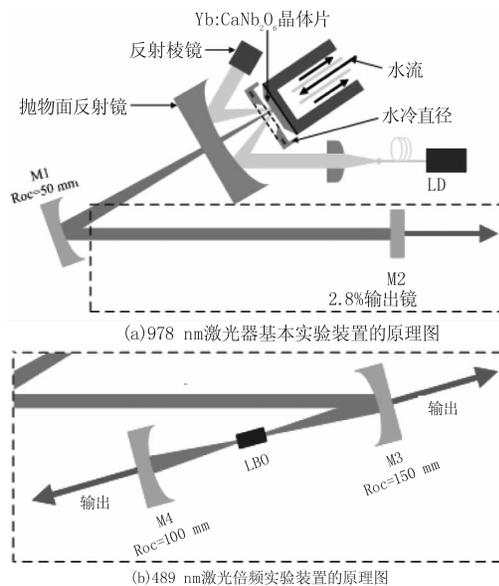


图 2 激光器实验装置原理图

Fig. 2 Schematic diagrams of the laser experimental setup

3 实验结果

输出功率的随入射泵浦功率的增加情况如图 3 所示,测得阈值为 3.8 W。增加泵浦功率可实现输出功率线性增加,斜效率为 7.6%。最高输出功率为 1.14 W,此时入射泵浦功率为 18.8 W,相应的光电转换效率为 6.06%。采用 CCD 相机拍摄的横模输出照片如图 4 所示。图 5 所示为使用光栅光谱仪检测到的 978 nm 的激光发射光谱。

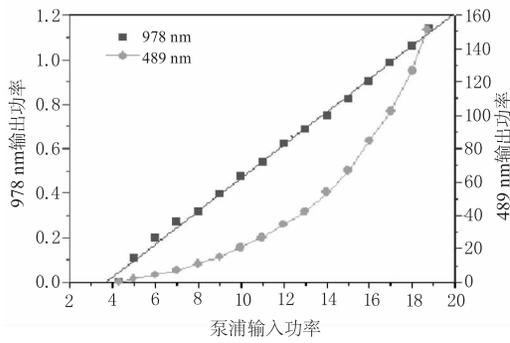


图3 输出功率与入射泵浦功率

Fig. 3 Output power versus incident pump power

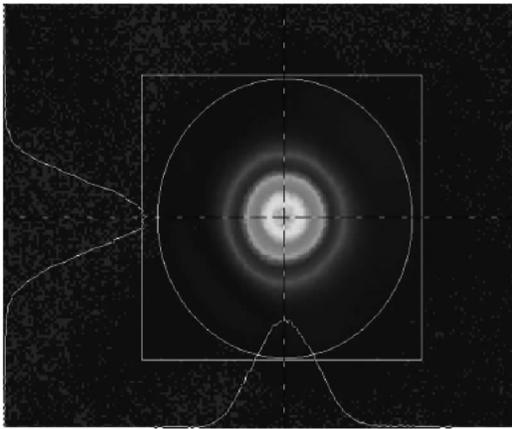


图4 CCD 相机拍摄的横模照片,对应输出功率为 1.14 W

Fig. 4 Typical CCD photo of the transverse mode corresponding to an output power of 1.14 W

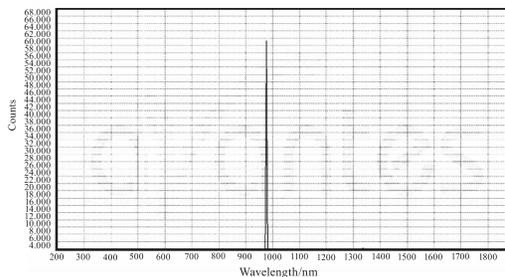
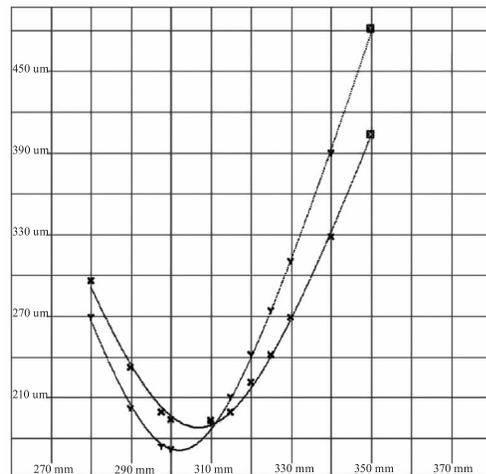


图5 泵浦功率为 18.8 W 时 978 nm 的输出光谱

Fig. 5 Output spectrum at 978 nm when the pump power was 18.8 W

由于获得的 978 nm 激光具有良好的光束性能, 尝试利用其产生二次谐波。为了减少谐振腔损耗并增加二次束腰, 对谐振腔进行了重新设计。所需装置与上述 978 nm 激光装置基本一致。腔内倍频 489 nm 激光实验装置如图 2(b) 所示。平凹镜 M3 端面镀 978 nm HR 和 489 nm、1003 nm、1038 nm AR。平凹镜 M4 镀 978 nm 及 489 nm HR。非线性倍频晶体采用具有高损伤阈值 (18 GW/cm^2) 和小走离角 (约 10.1 mrad) 的 I 类临界相位匹配 LBO 晶体, 沿主平面 XY 轴进行切割 ($\theta = 90^\circ$, $\phi = 17.1^\circ$,

$d_{\text{eff}} = 0.82 \text{ pm/V}$), 尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, LBO 晶体两端面尺寸为 $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 。在实验过程中, LBO 晶体被安装在一个紫铜块上, 通过热电控制器进行主动温度控制。489 nm 激光输出性能如图 3 所示, 输出激光阈值约为 4.3 W。当入射泵浦功率为 18.8 W 时, 获得连续 489 nm 二次谐波的输出功率为 151 mW。在最大输出功率时, 通过 Ophir-Spiricon 公司的 M2-200s-FW 型光束分析仪进行光束质量因子 M^2 的测定。 M^2 因子在 X 轴和 Y 轴分别约为 1.11 和 1.13。 M^2 因子在两个方向上的不对称性是由于 LBO 晶体的走离角而导致。图 6 显示了 CCD 对光束半径和位置的测量, 光束质量因子 M^2 在切线方向和弧矢方向分别为 1.11 和 1.13。通过 Field-Master-GS 型功率计进行了 10 Hz 蓝光稳定性试验。4 h 内输出功率稳定度为 3.55%。

图6 M2-200s-FW 型光束分析仪对 Yb:CaNb₂O₆ 激光器光束质量因子 M^2 的测定Fig. 6 Measured beam quality factor (M^2) of Yb:CaNb₂O₆ laser by the laser beam propagation analyzer M²-200s-FW

4 结论

报道了 Yb:CaNb₂O₆ 晶体输出 978 nm 波长的激光器, 采用长 0.3 mm, 掺镱浓度为 1.5% 的晶体, 在入射泵浦功率为 18.8 W 时实现了 1.14 W 的 978 nm 激光输出功率, 实验表明 LD 泵浦 Yb:CaNb₂O₆ 晶体是实现高功率 978 nm 激光系统的有效方法, 并可以通过倍频技术产生二次谐波, 获得了 151 mW 的 489 nm 的蓝色光源。如果采用更有效的非线性技术和选择更好的非线性晶体, 如 ppKTP 或 KNbO₃, 或许还可以再提高二次谐波的输出功率。

参考文献:

- [1] MA Wei, GAO Lanlan, ZHU Xinyu. Research on 561 nm all-solid-state low-noise laser[J]. Laser & Infrared, 2015,

- 45(10):1206-1210. (in Chinese)
马威,高兰兰,朱心宇. 561nm 全固态低噪声激光器研究[J]. 激光与红外,2015,45(10):1206-1210.
- [2] SU Yanli,LUO Xu,ZHANG Xuehui, et al. Repetition rate continuously tunable microchip laser passively Q-switched by Cr_4^+ :YAG[J]. Infrared and Laser Engineering,2014,43(2):355-358. (in Chinese)
苏艳丽,罗旭,张学辉,等. 重复频率连续可调谐的 Cr_4^+ :YAG 被动调 Q 微片激光器[J]. 红外与激光工程,2014,43(2):355-358.
- [3] F Balembois,M Casting,E Heralut, et al. Low-wavelength emission of Nd-doped lasers [J]. Laser Photonics Rev. 2011,5,659-662.
- [4] SUN Bin,ZHU Mengzhen,TAN Chaoyong, et al. Latest progress of research on adjust-free solid state laser[J]. Infrared and Laser Engineering,2014,43(10):3244-3250. (in Chinese)
孙斌,朱孟真,谭朝勇,等. 免调试激光器研究新进展[J]. 红外与激光工程,2014,43(10):3244-3250.
- [5] X Chen,Y Shao,J L Yuan, et al. All-solid-state Nd:GdVO₄-BiBO blue laser pumping [J]. Laser Phys. Lett., 2013,10,065002.
- [6] J Zhang,X Fu,P Zhai, et al. A diode-pumped Nd:YAlO₃ dual-wavelength yellow light source [J]. Laser Phys., 2013,23,115001.
- [7] D Zhao,J H Liu. An efficient continuous-wave 591 nm light source based on sum-frequency mixing of a diode pumped Nd:GdVO₄ - Nd:CNCG laser [J]. Laser Phys., 2013,23,085010.
- [8] J H Li,X H Liu,J B Wu, et al. Sodium D₂ resonance radiation based on intracavity sum-frequency-mixing laser operation in Nd:GdVO₄ - Nd:YLiF₄ crystals[J]. Laser Phys. Lett., 2013,10,075005.
- [9] H Y Zhu,C W Xu,J Zhang, et al. Double-crystal RbTiOPO₄ for simultaneous 200 kHz Q-switching and second-harmonic generation in a direct-pumped Nd:YVO₄ laser [J]. Laser Phys. Lett., 2013,10,075802.
- [10] YAO Jianquan,ZHANG Zhuo,Xu Degang, et al. A new method for enhancing power stability of all-solid-state green laser with intracavity frequency doubling[J]. Journal of Optoelectronics Laser,2013,9(4):629-633. (in Chinese)
姚建铨,张卓,徐德刚,等. 提高全固态内腔倍频绿光激光器功率稳定性的一种新方法[J]. 光电子·激光, 2013,9(4):629-633.
- [11] LI Yongliang,FU Xinhua,TAO Zonghui, et al. Diode-pumped eye sensitive laser at 554.7 nm based on intracavity sum frequency generation [J]. Laser Phys., 2011,21(5),894-897.
- [12] 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(s3):48-50. (in Chinese)
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(s3):48-50.
- [13] AN Zhenfeng,LIN lin,XU Huiwu, et al. 976nm high efficiency semiconductor lasers [J]. Materials and devices, 2011,36(5):345-347. (in Chinese)
安振峰,林琳,徐会武,等. 976nm 高效率半导体激光器 [J]. 材料与器件,2011,36(5):345-347.
- [14] ZONG Nan,LI Chengming,CHEN Yahui, et al. Research and progress of optically pumped semiconductor vertical-external-cavity surface-emitting lasers [J]. Infrared and Laser Engineering,2007,36(6):785-789. (in Chinese)
宗楠,李成明,陈亚辉,等. 光泵垂直扩展腔面发射半导体激光器的研究进展[J]. 红外与激光工程,2007,36(6):785-789.
- [15] GU Changjiang, CHEN Xiangying, SUN Dunlu, et al. Growth and spectroscopic characterizations of the min-infrared Yb,Er,Eu:YAP laser crystal[J]. Journal of Optoelectronics Laser,2014,25(3):491-495. (in Chinese)
谷长江,陈祥迎,孙敦陆,等. Yb,Er,Eu:YAP 中红外激光晶体的生长与光谱特性[J]. 光电子·激光, 2014,25(3):491-495.
- [16] E Heralut,F Balembois,P Georges, 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(9):1632-1636.
- [17] Y Q Meng,H M Tan,X H Fu, et al. Sum-frequency mixing between two transitions of the neodymium ion in Nd:YVO₄ at 1064 nm and 914 nm [J]. Chin. J. Lasers,2009,36(10):1735-1739.
- [18] D Z Li,X D Xu,C W Xu, et al. Diode-pumped femtosecond Yb:CaNb₂O₆ laser [J]. Opt. Lett., 2011,36(11):3888-3891.
- [19] WANG Aiguo,WANG Junguang,LI Yongliang. Diode-pumped Yb:YAG quasi-three level thin-disk laser with 1024 nm output [J]. Laser & Infrared,2012,42(3):288-291. (in Chinese)
王爱国,王君光,李永亮. 二极管泵浦 Yb:YAG 准三能级 1024 nm 薄盘激光器 [J]. 激光与红外,2012,42(3):288-291.
- [20] J H Li,X H Liu,J B Wu, et al. Efficient diode-end-pumped Yb:CaNb₂O₆ thin-disk laser at 1003 nm and second-harmonic generation for an emission at 501.5 nm [J]. Laser Phys. Lett., 2012,9(3):199-203.