

## LD 端面泵浦 946 nm/473 nm 连续 Nd:YAG/LBO 激光器

马依拉木·木斯得克<sup>1,2</sup>, 姚建铨<sup>1,2</sup>, 王 鹏<sup>1,2</sup>

- (1. 天津大学 精密仪器与光电子工程学院 精光与光电子研究所, 天津 300072;  
2. 光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

**摘 要:** 对 Nd:YAG 946 nm 和 473 nm 激光器特性进行了实验研究。采用二极管端面泵浦平-平腔实验结构, 使用键合 Nd:YAG 晶体作为激光增益介质, 在入射泵浦功率 31.8 W 时, 得到最高 11 W 的连续波 946 nm 激光输出, 光-光转换效率 34.6%, 斜率效率 35.4%, 光束质量  $M^2$  达到 7.53, 半小时内功率不稳定性小于 0.4%。采用 I 类临界相位匹配 LBO 晶体对 946 nm 激光进行内腔倍频, 获得了 0.887 W 的连续波 473 nm 蓝光输出, 光-光转换效率 5.87%。实验结果表明: 所设计的端面泵浦连续激光器具有很强的实用价值。

**关键词:** 连续波; 高功率; 端面泵浦; 946 nm; 内腔倍频

**中图分类号:** TN248      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1007-2276(2013)11-2931-04

## Laser diode-end-pumped Nd:YAG/LBO laser operating at 946 nm/473 nm

Mayilamu Musideke<sup>1,2</sup>, Yao Jianquan<sup>1,2</sup>, Wang Peng<sup>1,2</sup>

- (1. Institute of Laser & Optoelectronics, College of Precision and Opto-Electronic Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 2. Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science (Ministry of Education), Tianjin University, Tianjin 300072 China)

**Abstract:** The properties of Nd:YAG 946 nm and 473 nm laser were studied. By using Nd:YAG composite as laser gain medium, 11 W continuous-wave (CW) laser output at 946 nm was obtained under the incident pump power of 31.8 W, corresponding optical efficiency and slope efficiency were 34.6% and 35.4%, respectively. The  $M^2$  factor was 7.53 and the power stability was better than 0.4% with 0.5 h. After intra-cavity frequency-doubled by an LBO crystal which was cut for critical type I phase matching, 0.887 W CW output power at 473 nm was obtained, corresponding to an optical efficiency of 5.87%. Experimental results prove that the end pumped CW laser has important practical value.

**Key words:** CW; high power; diode-end-pumped; 946 nm; intracavity frequency-doubling

收稿日期: 2013-03-05; 修订日期: 2013-04-11

基金项目: 国家 863 项目(2011AA03020)

作者简介: 马依拉木·木斯得克(1983-), 女, 博士生, 主要从事激光器与光子晶体光纤传感器研究。Email: mahiralaser@163.com

导师简介: 姚建铨(1939-), 男, 中科院院士, 教授, 博士生导师, 主要从事光电子方面的研究。Email: jqyao@tju.edu.cn

## 0 引言

全固态激光器具有体积小、效率高、光束质量好、稳定性好等优点,随着激光技术的发展,在工业、医疗和科研等领域的应用越来越广泛<sup>[1-2]</sup>。高功率的全固态蓝光激光器在高密度光存储、激光显示、光谱学、生物医学、水下通讯、微量气体探测和高分辨率打印等诸多领域的应用十分广泛,而使其成为近年来的研究热点。利用 LD 泵浦 Nd:YAG 晶体实现 946 nm 激光运转并用倍频技术来获得 473 nm 蓝激光是当前获得蓝激光的手段之一。

1987 年, Fan<sup>[3]</sup>和 Byer<sup>[4]</sup>采用 LD 端面泵浦 Nd:YAG 晶体首次实现了室温条件下 946 nm 激光运转,随后,人们开展了大量的研究工作以提高 946 nm 激光的输出功率和效率<sup>[5-7]</sup>。2000 年, Zeller 等人采用 LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub>、Nd:YAG 晶体,分别得到 3.0 W 914.5 nm 及 5.35 W 946 nm 激光输出,倍频后得到 1.5 W 473 nm 蓝光输出<sup>[8]</sup>。2005 年, R. Zhou 等人利用传统 Nd:YAG 晶体和离子扩散键合 Nd:YAG 晶体,分别实现了 8.3 W<sup>[9]</sup>和 15.2 W<sup>[10]</sup>的连续 946 nm 激光输出,2008 年,李义民等人利用 LD 泵浦腔内倍频技术,采用两个 2 W LD 耦合作为泵浦源及 Nd:YAG 材料作为激光晶体,在利用 LBO 材料作为倍频晶体的情况下,获得了输出功率为 195 mW 的 473 nm 蓝光激光运转<sup>[11]</sup>。2009 年,王红梅等人利用周期性极化 LiTaO<sub>3</sub>(PPLT)晶体腔外倍频得到 66 mW 连续 473 nm 蓝光,光-光转换效率为 14.2%<sup>[12]</sup>。2010 年, Wang 等人利用 LD 端面泵浦 Nd:YAG 晶体,采用 PPKTP 材料作为腔内倍频晶体,获得了输出功率为 1 W 的 473 nm 蓝光,蓝光稳定性小于 1.8%<sup>[13]</sup>。

文中采用 LD 端面泵浦离子扩散键合 Nd:YAG 晶体获得了高功率高稳定的连续 946 nm 激光输出。在泵浦功率 31.8 W 时,获得功率为 11 W 的 946 nm 激光输出,光-光转换效率为 34.6%,斜率效率为 35.4%。利用 I 类临界相位匹配的 LBO 晶体作为内腔倍频晶体,在 15.11 W 泵浦功率下获得了 0.887 W 的连续 473 nm 蓝光输出,光-光转换效率为 5.87%。

## 1 LD 端面泵浦 946 nm Nd:YAG 激光器实验

实验采用平凹直通腔结构,如图 1 所示。为了减

小常规 Nd:YAG 棒端面弯曲产生的热透镜效应,实验中采用了离子扩散键合的 Nd:YAG 晶体,尺寸为  $\Phi 3 \times 12$  mm,中间掺杂部分长度为 4 mm,掺杂浓度为 1.1%。整个晶体棒被通水冷却的铜质热沉紧紧包裹,在 Nd:YAG 棒和热沉之间加钎箔以保持较好的热传导。Nd:YAG 棒的一端镀 808 nm 增透(AR, T=90%)、946 nm 和 473 nm 高反(HR, R>99.8%)介质膜。此外,为了抑制 1 064 nm 波长寄生振荡,还镀有 1 064 nm 部分透射(PT, T=41.5%)膜。输出镜为 r=70 mm 的平凹镜,对 946 nm 和 1 064 nm 的透射率分别为 5%和大于 50%。谐振腔的长度 L 为 20 mm。泵浦源为德国 LIMO 公司生产的高亮度光纤耦合输出的 808 nm LD 模块,最大输出功率 50 W,光纤芯径 400  $\mu$ m,数值孔径 0.22。

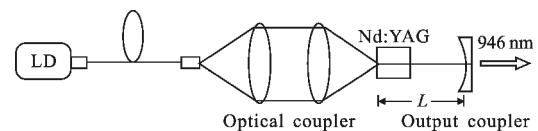


图 1 高功率、高效率 946 nm Nd:YAG 激光器实验装置

Fig.1 Experiment device of high power, high efficiency 946 nm Nd:YAG laser

实验中,首先利用谐振腔稳定法对不同泵浦功率下的热透镜焦距进行了测量<sup>[14]</sup>。图 2 给出了当  $T_{\text{Nd:YAG}}=8$  °C 时的热透镜焦距的测量结果,从图可以看到,热透镜焦距随着泵浦功率的增加而逐渐减小。当注入的泵浦功率最大到 25.6 W 时,热透镜焦距为 29 mm。

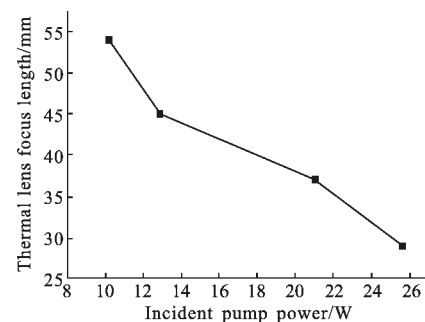


图 2 热透镜焦距与泵浦功率关系曲线

Fig.2 Thermal lens focus length versus pump power

进一步,测量了不同 Nd:YAG 冷却温度时,连续 946 nm 的输出功率曲线,结果如图 3 所示。随着冷却温度的降低,由于再吸收损耗的减小,946 nm 激光输

输出功率有所升高。当  $T=8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $18\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 在 32 W 泵浦功率下, 获得的最高输出功率分别为 10.52 W, 10.1 W, 9.59 W。尤其是当  $T=3\text{ }^{\circ}\text{C}$  时, 获得了 11 W 的 946 nm 激光输出, 光-光转换效率为 34.6%, 斜率效率为 35.4%。

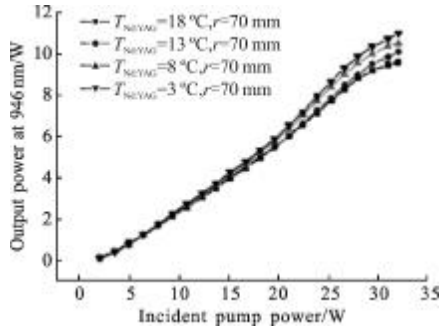


图 3 不同冷却温度下连续 946 nm 激光输出功率曲线  
Fig.3 Output powers of 946 nm laser under different cooling temperatures

采用刀片法对不同激光输出功率下的光束衍射倍率因子 ( $M^2$ ) 进行了测量, 结果如图 4 所示。从图中可以看出, 随着激光输出功率的提高, 光束质量  $M^2$  因子逐渐增大, 在最大激光输出功率时,  $M^2$  因子达到 7.53。

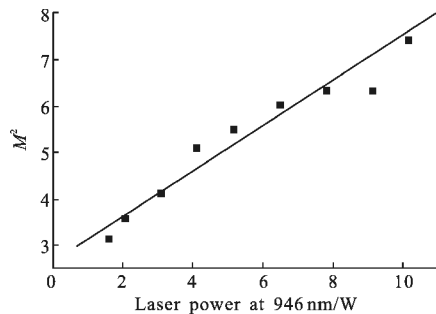


图 4 温度为 3 °C 时测得的 946 nm 激光的  $M^2$   
Fig.4  $M^2$  value of 946 nm laser at temperature of 3 °C

图 5 为 946 nm 激光输出功率为 11 W 时的稳定

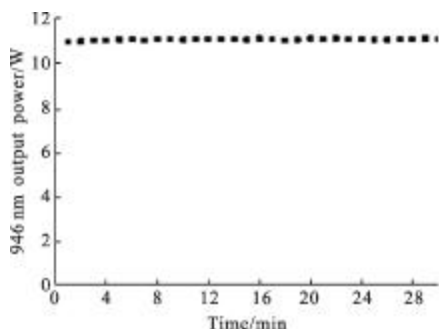


图 5 输出功率 11 W 时的输出功率稳定性曲线  
Fig.5 Power stability of laser at output power of about 11 W

性曲线, 每隔 1 min 从功率计上读取一个数据, 共测量 30 组数。30 min 内, 输出功率非常稳定, 不稳定度小于 0.4%。

$$\Delta \bar{p}/\bar{p} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}{n} \right]^{1/2} \cdot \frac{1}{\bar{p}} \approx 0.3\% < 0.4\% (n=30)$$

## 2 473 nm LBO 腔内倍频实验

实验中, 进一步采用腔内倍频 946 nm 激光实现 473 nm 蓝激光输出, 实验装置如图 6 所示。谐振腔为平凹直通腔, 倍频晶体采用 I 类临界相位匹配 LBO ( $\theta=90^{\circ}$ ,  $\varphi=19.4^{\circ}$ ), 尺寸为  $2\text{ mm} \times 2\text{ mm} \times 14\text{ mm}$ 。输出镜曲率半径为 50 mm, 对 946 nm 高反 ( $R>99.8\%$ )、对 473 nm 高透 ( $T>96\%$ )。由于 LBO 晶体的允许温度较小, 需采用半导体制冷器精确控制晶体的匹配温度, 以提高倍频效率; 在实验装置中, 激光二极管、Nd:YAG 晶体及 LBO 晶体采用统一优化以控制其最佳温度。

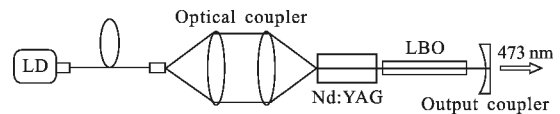


图 6 大功率内腔倍频蓝光激光器实验装置  
Fig.6 Experimental device of high power intracavity frequency doubling blue laser

Nd:YAG 晶体和 LBO 晶体的温度分别设置为  $13\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $20.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。腔长分别为 33 mm、35 mm、37 mm、39 mm 和 41 mm 时, 473 nm 蓝光输出功率曲线如图 7 所示。当腔长为 37 mm、注入泵浦功率为 15.11 W 时, 获得了最高为 0.887 W 的连续 473 nm 蓝光输出, 光-光转换效率为 5.87%。当腔长  $L=33\text{ mm}$ ,  $L=35\text{ mm}$ ,  $L=39\text{ mm}$ ,  $L=41\text{ mm}$  时获得分别为 0.865 W, 0.702 W, 0.885 W, 0.86 W 连续 473 nm 蓝光输出。

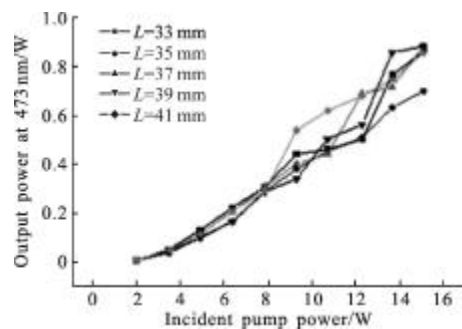


图 7 不同腔长时连续 473 nm 蓝光的输出功率曲线  
Fig.7 Output power of 473 nm blue laser under different cavity lengths

图 8 为 473 nm 蓝激光输出功率为 0.887 W 时的稳定性曲线,每隔 1 min 从功率计上读取一个数据,共测量 60 组数。1 h 内,输出功率非常稳定,不稳定性小于 0.9%。

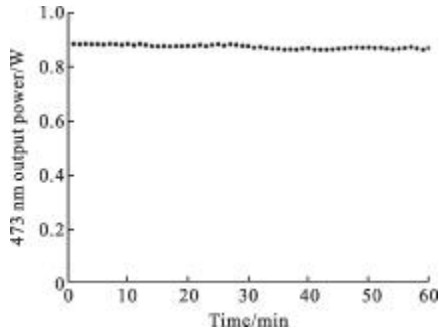


图 8 输出功率为 0.887 W 时的功率稳定性

Fig.8 Stability curve of the output power at 0.887 W

### 3 结论

文中使用 Nd:YAG 和 LBO 晶体进行了高功率高稳定 LD 端面泵浦连续 946 nm 激光和腔内倍频蓝光激光输出的实验研究。在泵浦功率为 31.8 W 时,获得了 11 W 的 946 nm 激光输出,光-光转换效率为 34.6%,斜率效率为 35.4%。使用 I 类临界相位匹配 LBO 晶体做为倍频晶体,在 15.11 W 的泵浦功率下获得了 0.887 W 的 473 nm 蓝光输出,光-光转换效率为 5.87%,激光输出的稳定性好,不稳定性小于 0.9%。

### 参考文献:

- [1] Li Yongliang, Zeng Youhong, Jiang Huilin, et al. LD-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> all solid-state RTP type II matched 543 nm laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1023-1025. (in Chinese)  
李永亮, 曾右洪, 姜会林, 等. LD 泵浦 Nd:YVO<sub>4</sub> 全固态 RTP II 类匹配 543 nm 激光器[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1023-1025.
- [2] Li Long, Liu Xiaojian, Nie Jianping, et al. Thermal effect of intra-cavity frequency doubling KTP crystal in all-solid-state multi-mode green laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 830-834. (in Chinese)  
李隆, 刘小建, 聂建萍, 等. 全固态多模绿光激光器腔内倍频 KTP 晶体热效应 [J]. *红外与激光工程*, 2011, 40(5): 830-834.
- [3] Fan T Y, Byer R L. Modeling and CW operation of a quasi-three-level 946 nm Nd:YAG laser [J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1987, 23(5): 605-612.
- [4] Risk W P, Length W. Room-temperature, continuous-wave, 946-nm Nd:YAG laser pumped by laser-diode arrays and intracavity frequency doubling to 473 nm [J]. *Opt Lett*, 1987, 12: 993.
- [5] Czeranowsky C, Heumann E, Huber G. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG -BIBO laser with 2.8-W output power at 473 nm [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(6): 432-434.
- [6] Kellner T, Heine F, Huber G. Efficient laser performance of Nd:YAG at 946 nm and intracavity frequency doubling with LiJO<sub>3</sub>,  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, and LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub> [J]. *Appl Phys B*, 1997, 65: 789-792.
- [7] Czeranowsky C, Heumann E, Huber G. All-solid-state continuous-wave frequency-doubled Nd:YAG -BIBO laser with 2.8-W output power at 473 nm [J]. *Opt Lett*, 2003, 28(6): 432-434.
- [8] Zelle P, Peuser P. Efficient, multiwatt, continuous-wave laser operation on the <sup>4</sup>F<sub>3/2</sub>-<sup>4</sup>I<sub>9/2</sub> transitions of Nd:YVO<sub>4</sub> and Nd:YAG [J]. *Opt Lett*, 2000, 25(1): 34-37.
- [9] Zhou R, Zhang T L, Li E B, et al. 8.3 W diode-end-pumped continuous-wave Nd:YAG laser operating at 946 nm [J]. *Opt Express*, 2005, 13(25): 10115-10119.
- [10] Zhou R, Li E B, Li H F, et al. Continuous-wave, 15.2-W diode-end-pumped Nd:YAG laser operating at 946 nm [J]. *Opt Lett*, 2006, 31(12): 1869-1871.
- [11] Li Yimin, Tan Huiming, Fu Xihong, et al. LD pumped intracavity frequency doubling 473 nm Nd:YAG/LBO laser with low noise operation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2008, 16(1): 11-15. (in Chinese)  
李义民, 檀慧明, 付喜宏, 等. LD 泵浦腔内倍频 Nd:YAG/LBO 蓝光 473 nm 激光器的低噪声运转 [J]. *光学精密工程*, 2008, 16(1): 11-15.
- [12] Wang Hongmei. Property of LD pumped Nd:YAG PPLT extra-cavity frequency-doubling 473 nm laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(5): 873-876. (in Chinese)  
王红梅. 二极管泵浦 Nd:YAG PPLT 腔外倍频 473 nm 激光特性 [J]. *红外与激光工程*, 2009, 38(5): 873-876.
- [13] Wang Yaoting, Liu Jianli, Liu Qin, et al. Stable continuous-wave single-frequency Nd:YAG blue laser at 473 nm considering the influence of the energy-transfer upconversion [J]. *Optics Express*, 2010, 18(12): 12044-12051.
- [14] Zhang Baigang, Yao Jianquan, Xu Degang, et al. A new method to measure the ultrashort thermal focal length of high-power solid-state laser, high-power lasers and applications II [C]//SPIE, 2002, 4914: 455-458.