

## 角抽运 Nd:YAG 复合板条 946 nm 连续运转激光器\*

刘欢<sup>†</sup> 王巍 巩马理

(清华大学精密仪器与机械学系, 摩擦学国家重点实验室, 激光与光子技术研究室, 北京 100084)

(2012年12月21日收到; 2013年1月31日收到修改稿)

报道了一种适合中小功率输出的全固态激光器的角抽运方法, 抽运光从板条激光器中板条晶体的角部入射, 可获得较高的抽运效率和较好的抽运均匀性. 采用单角抽运方式, 首次进行了角抽运 Nd:YAG 复合板条 946 nm 连续运转激光器的实验研究. 激光腔采用紧凑型平凹直腔结构, 腔长仅为 20 mm. 当注入抽运功率为 50 W 时, 946 nm 激光连续输出功率最高达 5.29 W, 光光转换效率为 10.6%, 斜效率为 12%. 整套激光器结构紧凑, 调谐简单, 成本低, 具有广阔的应用前景.

**关键词:** 角抽运, Nd:YAG 晶体, 连续波, 946 nm 激光

**PACS:** 42.55.Xi, 42.60.Da, 42.60.Gd

**DOI:** 10.7498/aps.62.144205

## 1 引言

角抽运方式是清华大学光子与电子技术研究中心提出的一种抽运方式, 具有自主知识产权<sup>[1-3]</sup>. 近年来, 作者所在研究小组已经成功实现了千瓦级连续输出的二极管角抽运 Yb:YAG 激光器稳定运转<sup>[2]</sup>, 光光转换效率高, 但光束质量不高, 像散比较严重, 这限制了它的应用. 目前, 中小功率输出的全固态基模激光器有着更加广阔的应用前景. 角抽运方式作为一个种新的抽运形式, 既具有端面抽运效率高、激光晶体冷却方法简单的优点, 又具有侧面抽运均匀性高、功率扩展性强的优点<sup>[4-6]</sup>. 因此利用角抽运方式, 开展中小功率全固态激光器的实验研究具有十分重要的应用价值.

在中小功率固体激光器的发展过程中, 通常使用 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 作为增益介质, 两者都实现了较好的激光输出<sup>[7-9]</sup>. Nd:YAG 的主要优点是热机械性能好, 而 Nd:YVO<sub>4</sub> 的主要优点是有效受激发射截面大, 偏振输出, 有利于消除热致双折射带来的影响. 对于角抽运方式, 由于其吸收光程比较长, 因此对掺杂浓度和有效发射截面要求不高. Nd:YVO<sub>4</sub> 的优点得不到充分发挥, 所以在中小

功率角抽运固体激光器增益介质的选择中, 采用 Nd:YAG 材料作为增益介质更为合适. 我们已经成功实现了角抽运 Nd:YAG 复合板条 1064 nm 激光<sup>[10]</sup>, 1319 nm/1338 nm 双波长激光<sup>[11]</sup>, 1.1 μm 多波长激光高效、稳定输出<sup>[12]</sup>.

Nd:YAG 晶体的另外一条非常重要的谱线是 946 nm 谱线<sup>[13-16]</sup>. 相比于 1064 nm 和 1319 nm 等四能级激光系统, 946 nm 是准三能级激光系统, 其受激发射截面小, 再吸收损耗大, 热效应严重, 谐振腔内寄生振荡抑制困难, 因此, 连续输出 946 nm 激光器输出功率的提高非常困难. 1987 年, Fan 和 Byer<sup>[13]</sup> 首次采用 LD 端面抽运 Nd:AYG 晶体, 实现了 946 nm 激光的室温运转. 2001 年, Goldring 等<sup>[14]</sup> 采用离子扩散键合晶体将连续运转 946 nm 激光器输出功率提高到 7.4 W. 2005 年, Zhou 等<sup>[15]</sup> 利用高功率光纤输出半导体激光器端面抽运传统的非离子扩散键合 Nd:YAG 棒和离子扩散键合 Nd:YAG 棒, 成功将连续运转 946 nm 激光器的输出功率提高到 8.3 W 和 15.2 W<sup>[15,16]</sup>.

本文采用角抽运技术, 首次实现了 5.29 W 的连续 946 nm 激光稳定输出, 光光转换效率 10.6%, 斜效率 12%. 整套激光器结构紧凑、简单, 体积小,

\* 高等学校博士学科点专项科研基金新教师类(批准号: 20110002120054)资助的课题.

<sup>†</sup> 通讯作者. E-mail: lh@mail.tsinghua.edu.cn

成本低.

## 2 实验装置

实验装置如图 1 所示, LD bar 的最大连续输出功率为 50 W, 发光面积为  $10 \text{ mm} \times 0.7 \text{ mm}$ , 有一定的发散角, 激光介质角面的尺寸为  $3 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ . 实验中采用由柱面透镜组成的耦合系统对抽运光进行压缩整形, 在快轴方向采用一个焦距为  $12.7 \text{ mm}$  的柱面透镜, 在慢轴方向采用两个焦距为  $30 \text{ mm}$  的柱面透镜, 耦合效率达到 95% 以上. 柱面透镜两面均镀有对抽运光  $808 \text{ nm}$  高透的膜层.

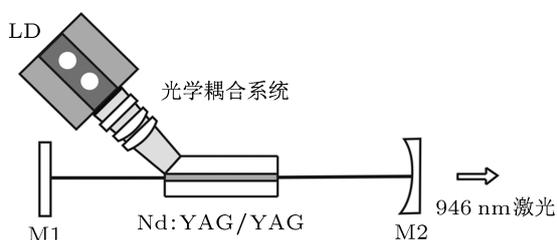


图 1 角抽运 Nd:YAG 复合板条 946 nm 激光连续运转激光器

实验中采用了一块单角 Nd:YAG 复合板条, 掺杂浓度为 1.0 at.%. 掺杂区域的尺寸为  $14 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ , 两条非掺杂区域的尺寸  $14 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm} \times 0.8 \text{ mm}$ , 在复合板条的一角沿  $45^\circ$  切一个倒角作为抽运光的入射面. 板条晶体两端镀有对  $946 \text{ nm}$  高透的膜层, 入射面上镀有对  $808 \text{ nm}$  高透的膜层.  $946 \text{ nm}$  的 Nd:YAG 激光器一般效率不高, 因此热效应比较严重, 为了提高散热效果, 我们在实验中采用板条上下两个大面散热冷却的方法, 在板条上下两个大面上覆盖一层铜片, 并将板条固定在通水的紫铜热沉上, 而且尽可能增加紫铜热沉和 Nd:YAG 板条之间的压力.

为了尽量扩展激光器的稳区范围, 减少晶体热效应对谐振腔的稳定性影响, 采用平凹线性短腔结构, 腔长仅为  $20 \text{ mm}$ . 高反镜 (M1 镜) 为一平镜, 镜面上镀有对  $946 \text{ nm}$  高反 ( $R > 99.5\%$ ), 对  $1064 \text{ nm}$  高透 ( $T > 85\%$ ). 输出镜 (M2 镜) 为一个曲率半径  $50 \text{ mm}$  的平凹镜片, 其凹面镀有对  $946 \text{ nm}$  透过率为 5% 的膜层. 为了抑制  $1064 \text{ nm}$  的寄生振荡, 这个膜层同时对  $1064 \text{ nm}$  透过率大于 90%. 对于准三能级系统来说, 激光下能级的粒子数与激光工作物质的温度有关, 为了尽可能提高  $946 \text{ nm}$  激光的输出功率, 我们将板条晶体的水冷温度降到  $11^\circ \text{C}$ , 这已经是制冷机的最低温度.

## 3 实验结果

图 2 给出了  $946 \text{ nm}$  激光连续输出功率与注入抽运功率之间的关系曲线. 当注入抽运功率为  $50 \text{ W}$  时, 连续输出功率最高为  $5.29 \text{ W}$ , 光光转换效率为 10.6%, 斜效率为 12%. 由图 2 可知, 当抽运功率为 LD 最大输出功率时,  $946 \text{ nm}$  激光连续输出功率未达到饱和, 因此如进一步增加抽运功率, 则输出功率可继续增加. 在  $946 \text{ nm}$  激光输出功率为  $5.29 \text{ W}$  时, 我们利用光谱仪观测了激光器输出光谱, 如图 3 所示. 观测激光器成功实现  $946 \text{ nm}$  单波长振荡, 而  $1064$ ,  $1319$  和  $1338 \text{ nm}$  激光已经被完全抑制. 同时测量了  $946 \text{ nm}$  激光的谱线线宽, 线宽为  $0.22 \text{ nm}$ , 如图 4 所示. 利用光谱仪监测了不同抽运功率时的激光器输出谱线, 均未发现  $1064$ ,  $1319$  和  $1338 \text{ nm}$  的激光振荡. 当  $946 \text{ nm}$  激光输出功率为  $5.29 \text{ W}$  时, 用 Spiricon M2-200 光束质量分析仪测量了

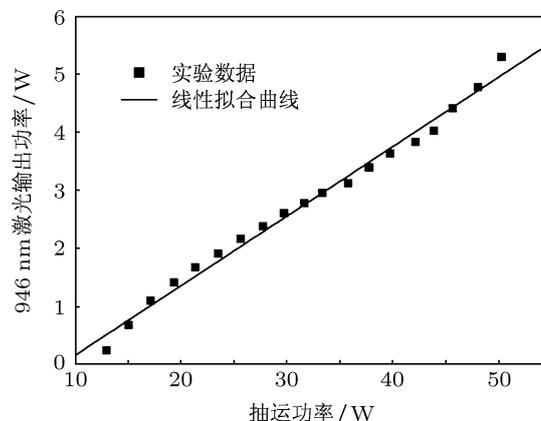


图 2 注入抽运功率与 946 nm 激光连续输出功率的关系

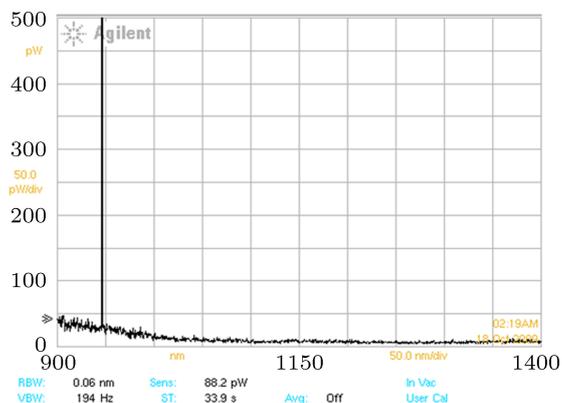


图 3  $946 \text{ nm}$  激光输出功率  $5.29 \text{ W}$  时, 从  $900 \text{ nm}$  到  $1400 \text{ nm}$  的光谱图

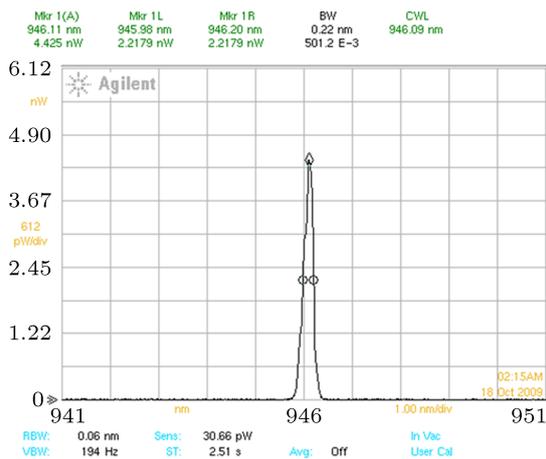


图 4 946 nm 光谱图

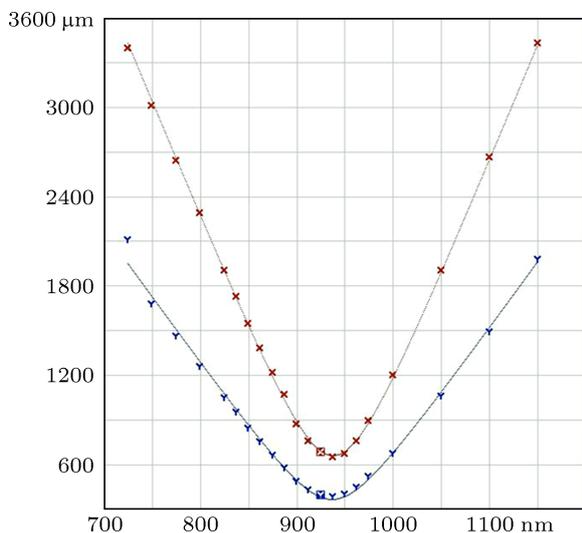


图 5 946 nm 激光输出功率 5.29 W 时光束质量因子测量曲线

946 nm 激光的光束质量因子  $M^2$ . 经过仔细调节, 946 nm 激光的光束质量因子为 7.71 和 2.44, 测量结果如图 5 所示. 束腰宽度在  $x$  和  $y$  方向分别为  $682 \mu\text{m}$  和  $392 \mu\text{m}$ . 当注入抽运功率为 50 W 时, 我们对 946 nm 激光连续输出功率的短期不稳定性进行了实验分析, 每隔 1 min 读取一个输出功率, 在 10 min 内, 输出功率的不稳定度小于 0.5%, 测量结

果如图 6 所示.

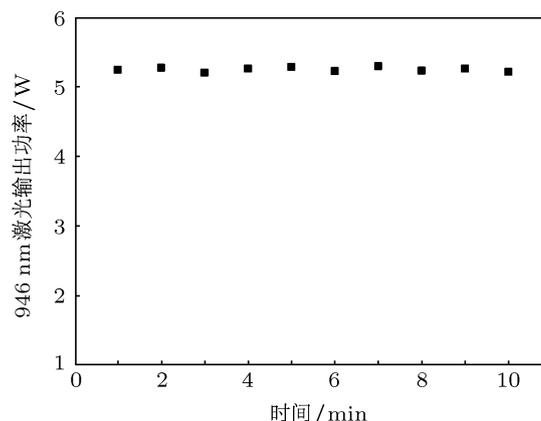


图 6 当抽运功率为 50 W 时, 946 nm 激光连续输出功率的短期不稳定性

## 4 结论

本文采用角抽运技术, 首次进行了角抽运 Nd:YAG/YAG 946 nm 连续运转激光器输出特性的实验研究, 得到了比较理想的实验结果. 连续 946 nm 激光最高输出功率达到 5.29 W, 光光转换效率为 10.6%, 斜效率为 12%. 当 946 nm 激光输出功率为 5.29 W 时, 946 nm 激光的光束质量因子为 7.71 和 2.44. 当注入抽运功率为 50 W 时, 946 nm 激光连续输出功率的短期不稳定性小于 0.5%. 相比于采用传统抽运技术的 946 nm 激光器, 角抽运 Nd:YAG/YAG 946 nm 连续运转激光器结构紧凑、体积小、调谐简单; 另外由于采用 LD bar 条直接抽运, 大大降低了整台激光器的成本. 但是实验中采用短腔结构, 输出光束质量较差. 由于 946 nm 是准三能级激光系统, 增益较低, 本实验输出功率和效率不高. 因此, 下一步考虑设计合理腔型, 采取增加板条晶体掺杂浓度, 减少板条晶体长度, 加强对板条晶体的冷却, 增加抽运功率等措施来实现高功率、高效率、高光束质量 946 nm 连续激光输出.

[1] Gong M, Li C, Liu Q, Chen G, Gong W, Yan P 2004 *Appl. Phys. B* **79** 265  
 [2] Liu Q, Gong M, Lu F, Gong W, Li C, Ma D 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 101113  
 [3] Gong M, Li C, Liu Q, Yan P, Chen G, Zhang H, Cui R 2008 *U. S. Patent* 7, 388, 895 B2  
 [4] Gao S, Liu H, Wang D, Gong M 2009 *Opt. Express* **17** 21837

[5] Liu Q, Gong M, Lu F, Gong W, Li C 2005 *Opt. Lett.* **30** 726  
 [6] Liu Q, Gong M L, Li C, Gong W P, Lu F Y, Chen G 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 721 (in Chinese) [柳强, 巩马理, 李晨, 宫武鹏, 陆富源, 陈刚 2005 物理学报 **54** 721]  
 [7] Chen X Y, Jin G Y, Yu Y J, Liang Z 2009 *Acta Opt. Sin.* **29** 3098 (in Chinese) [陈薪羽, 金光勇, 于永吉, 梁柱 2009 光学学报 **29** 3098]  
 [8] Hu H, Jiang J F, Lei J, Tang C, Tu B, Lü W Q, Zhao N, Wu Y C 2010

- Chin. J. Lasers* **37** 30 (in Chinese) [胡浩, 蒋建锋, 雷军, 唐淳, 涂波, 吕文强, 赵娜, 郭映臣 2010 中国激光 **37** 30]
- [9] Yu X, Chen F, Yan R, Li X, Yu J, Zhang Z 2010 *Chin. Opt. Lett.* **8** 499
- [10] Liu H, Gong M 2010 *Opt. Commun.* **283** 1062
- [11] Liu H, Gong M, Wushouer X, Gao S 2010 *Laser Phys. Lett.* **7** 124
- [12] Liu H, Liu Q, Gong M 2010 *Opt. Express* **18** 19603
- [13] Fan T Y, Byer R L 1987 *IEEE J. Quantum. Electron.* **23** 605
- [14] Goldring A, Abraham M, Bar-Lev A, Epshtein H, Zimmerman Y, Lebiush E, Lavi R 2001 *Advanced Solid-State Lasers, OSA Technical Digest* Seattle, Washington, USA, 28–31 Jan., 2001 p543
- [15] Zhou R, Zhang T L, Li E B, Ding X, Cai Z Q, Zhang B G, Wen W Q, Wang P, Yao J Q 2005 *Opt. Express* **13** 10115
- [16] Zhou R, Li E B, Li H F, Wang P, Yao J Q 2006 *Opt. Lett.* **31** 1869

# Corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab continuous-wave 946 nm laser\*

Liu Huan<sup>†</sup> Wang Wei Gong Ma-Li

(State Key Laboratory of Tribology, Center for Photonics and Electronics, Department of Precision Instruments and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 21 December 2012; revised manuscript received 31 January 2013)

## Abstract

A corner-pumped type is a new pumping type in the diode-pumped solid-state lasers, which has the advantages of high pump efficiency and favorable pump uniformity. Using the single corner-pumped type, an efficient corner-pumped Nd:YAG/YAG composite slab continuous-wave 946 nm laser is demonstrated in this paper. The compact plane-concave linear cavity configuration is adopted and the cavity length is only 20 mm. When the pumping power is 50 W, the maximal output power can reach as high as 5.29 W with an optical-to-optical conversion efficiency of 10.6% and a slope efficiency of 12%. This laser has a compact structure, simple tuning and low cost, which will have a broad application prospect.

**Keywords:** corner-pumped, Nd:YAG crystal, continuous-wave, 946 nm laser

**PACS:** 42.55.Xi, 42.60.Da, 42.60.Gd

**DOI:** 10.7498/aps.62.144205

\* Project supported by the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20110002120054).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: lh@mail.tsinghua.edu.cn