

高平均功率调 Q 准连续 Nd :YAG 激光器*

薄 勇† 耿爱丛 毕 勇 孙志培 杨晓东 李瑞宁 崔大复 许祖彦

(中国科学院物理研究所凝聚态物理国家实验室,北京 100080)

(2004 年 11 月 18 日收到,2005 年 3 月 22 日收到修改稿)

通过选用低掺杂浓度的 Nd :YAG 晶体棒、热近非稳腔优化设计、双棒串接热致双折射补偿技术以及双 Q 开关正交放置结构,在 LD 抽运功率 1116W 时,实现调 Q 准连续全固态 Nd :YAG 激光器 1064nm 输出,平均功率达 258W,光束质量 $M^2 \sim 15.5$,重复频率为 10kHz,脉冲宽度为 64ns,峰值功率达 0.4GW,光光转换效率达 23.1%.

关键词: Nd :YAG 激光器, 准连续波, 激光二极管抽运, 固体激光器

PACC: 4255R, 4260B

1. 引 言

激光二极管(LD)抽运的固体激光器称为全固态激光器(DPL). DPL 具有功率大、效率高、体积小、重量轻、寿命长、可靠性高、电驱动、无污染等优点,近年来在国内外发展迅速. 连续 LD 抽运的大功率 DPL 可以通过调 Q 输出高重复频率、高峰值功率、高平均功率的准连续激光. 高平均功率的调 Q 准连续 DPL 可用于材料加工^[1]、非线性变频^[2]、可调谐激光器抽运源^[3]、激光测距与激光雷达^[4]等领域.

目前,产生高平均功率、高光束质量调 Q 准连续 DPL 输出的激光晶体主要有两种:Nd :YAG 和 Yb :YAG^[5]. 与 Nd :YAG 相比,在相同的 LD 抽运功率下 Yb :YAG 的热效应要小约 1/3,但是三能级的 Yb 离子要求高功率密度抽运与高效率冷却,并且价格较高^[6]. 利用 Nd :YAG 晶体产生高平均功率、高光束质量调 Q 准连续 DPL 输出的方法主要有两种:一种是振荡+放大系统^[7],另一种是圆棒振荡^[8]或板条振荡系统^[9]. 前者是利用 LD 抽运的板条或圆棒放大器,对高光束质量的振荡级输出进行放大,这可以在基本保持振荡级输出光束质量的基础上,提高输出功率,从而获得更高亮度的激光输出,不足之处是激光器系统比较复杂,造价比较昂贵. 后者是通过激光抽运模块设计、谐振腔优化、高效冷却技术以及腔

内光束质量控制等手段,同时获得高平均功率与高光束质量激光输出,并具有结构简单、性价比高等优点,因而受到人们的重视. 其中,利用双棒串接激光振荡系统实现补偿 Nd :YAG 晶体的热致双折射效应,是提高光束质量的重要途径之一. 2000 年, Konno 等人利用双棒 Nd :YAG 晶体串接振荡系统获得平均功率约 148W 的 1064nm 调 Q 准连续输出^[10]. 2004 年, Jiang 等人利用双棒 Nd :YAG 晶体串接振荡系统获得平均功率约 240W 的 1064nm 调 Q 准连续输出,光束质量 $M^2 \sim 18$ ^[11].

本文采用的是 Nd :YAG 晶体双棒串接振荡系统方案,为了同时获得高平均功率与高光束质量的调 Q 准连续 DPL 输出,我们采取了以下三种光束质量控制技术:一是利用低掺杂浓度的 Nd :YAG 晶体实现较均匀的抽运增益分布;二是利用热近非稳腔理论^[12]优化设计平-平腔结构获得大基模体积的激光运转;三是利用双棒串接加 90°旋光片结构^[13]来补偿 Nd :YAG 晶体的热致双折射效应;并且为了使 Q 开关完全关断激光器的抽运增益,还设计了大功率双 Q 开关正交放置的结构. 最终获得调 Q 准连续 1064nm 输出平均功率达 258W,光束质量 $M^2 \sim 15.5$,重复频率为 10kHz,脉冲宽度为 64ns,峰值功率达 0.4GW,光光转换效率达 23.1%. 据我们所知,这是所报道的双棒 Nd :YAG 激光器调 Q 准连续最高平均功率输出.

* 中科院知识创新工程方向性项目,国家 863 重点项目基金(批准号:2002AA311120 和 2002AA311040),北京市科委科研基金(批准号: H020420060060110)资助的课题.

† E-mail: boyong@aphy.iphys.ac.cn

2. 实验及分析

实验所使用的调 Q 准连续 Nd :YAG 激光器包括两个激光头、一个 90°石英旋光片、两个声光 Q 开关和两个端镜 (M_1 和 M_2),如图 1 所示.其中,两个激光头相同,皆为 LD 列阵五维侧面抽运结构,每阵列包括 6 个额定输出功率为 20W 的连续 LD,使每

个激光头总抽运功率可达 600W.激光头中所使用的 Nd :YAG 晶体棒尺寸为 $\varnothing 4\text{mm} \times 116\text{mm}$.在两个全同的激光头中间插入 90°石英旋光片来补偿 Nd :YAG 晶体的热致双折射效应.将两个正交的声光 Q 开关分别放置在两个激光头两侧,Q 开关的射频驱动功率为 100W,有效孔径为 5mm,可以完全关断激光抽运增益. M_1 为对 1064 nm 全反射平面镜, M_2 为对 1064nm 部分输出耦合平面镜.

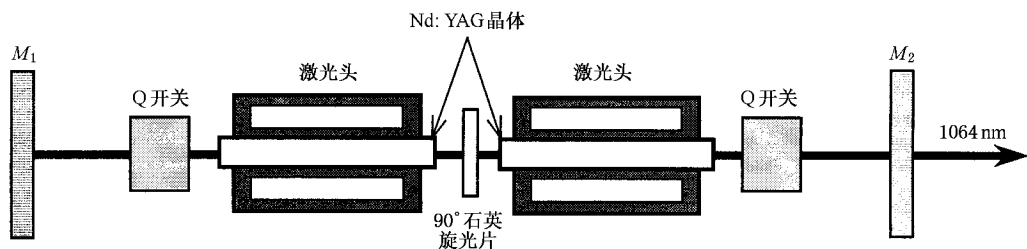


图 1 准连续全固态激光器示意图

实验中,首先分别选用 Nd 离子掺杂浓度为 0.6% 与 1.0% 的 Nd :YAG 棒装在 LD 侧抽运激光头中并放在平-平短腔中,在输出耦合镜透过率为 30% 时,测量了单个激光头 1064nm 连续波输出功率随 LD 抽运功率的变化曲线,如图 2(a) 所示.然后,利用非稳腔法^[14]分别测量了这两种掺杂浓度的 Nd :YAG 棒热透镜焦距随 LD 抽运功率的变化曲线,如图 2(b) 所示.从图中可以看出,它们的输出功率基本相同,但掺杂浓度为 0.6% 的 Nd :YAG 棒热透镜焦距较长.例如,当 LD 抽运功率为 550W 时,掺杂

浓度为 1.0% 的 Nd :YAG 棒热透镜焦距为 200 mm,而掺杂浓度为 0.6% 的 Nd :YAG 棒热透镜焦距为 224mm.这是由于采用较低掺杂浓度的 Nd :YAG 棒可以获得更均匀的抽运增益分布,从而减小了 Nd :YAG 棒的热效应,包括热透镜效应、热致双折射效应与热退偏等效应.因此,使用掺杂浓度较低的 Nd :YAG 棒,可以在保持输出功率基本不变的基础上获得更高的光束质量.在本文后面所描述的实验中,均采用掺杂浓度 0.6% 的 Nd :YAG 棒.

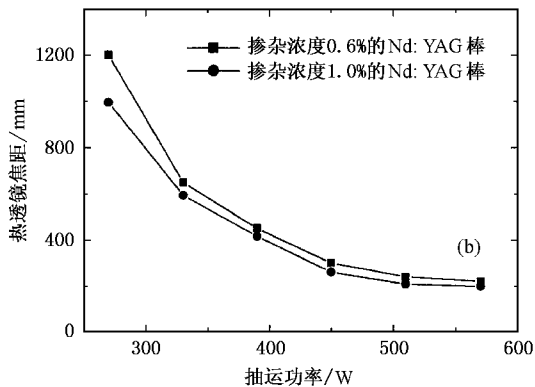
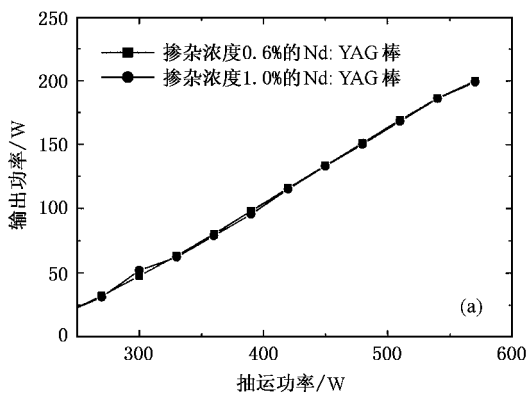


图 2 不同掺杂浓度的 Nd :YAG 棒对激光头特性的影响 (a) 不同浓度激光棒的单个激光头短腔输出功率曲线 (b) 不同浓度激光棒的单个激光头热透镜焦距曲线

通常 DPL 运行在热稳区的中心,这样可以使激光器输出对于温度波动不敏感.然而 DPL 工作在热

稳区中心时,激光晶体棒中的基模体积较小,使输出功率较低,并且高阶横模的衍射损耗也较小,从而易

于产生高阶横模,影响光束质量.因此,我们通过研究 LD 抽运功率与 DPL 热稳区的关系,设计了如图 1 所示的平-平腔结构 DPL,并使其运行在热稳区的边缘,即采用热近非稳腔运行模式.此时 Nd :YAG 棒中的基模体积较大,高阶横模的损耗也较大,有利于激光在低横模运转,这样可在高平均功率输出时亦保持较高的光束质量.由于平-平腔结构 DPL 的谐振腔左右对称,两个激光棒中的基模光斑尺寸是相等的,图 3 给出了其中一只 Nd :YAG 棒中切向与径向偏振光束基模光斑半径 ω_0 随 LD 抽运功率的变化曲线.其中,Nd :YAG 棒中的基模半径与热透镜焦距的关系是通过 ABCD 传输矩阵计算得到的^[15].从图 3 可以看出,当 LD 抽运功率增大到接近其设计最大抽运功率(~ 1116 W)时,DPL 运行在热稳区边缘,此时 Nd :YAG 棒中的切向偏振光束基模半径比在热稳区中心时 Nd :YAG 棒中的切向偏振光束基模半径要大得多,因此可以获得更高平均功率与更高光束质量的激光输出.而且由于采用控温精度较高的水循环冷却器,可以将 LD 与 Nd :YAG 晶体棒的温度控制在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$,因此即使 DPL 运行在热稳区的边缘附近,也可以保证输出功率的稳定性.

的相位差正好可以相互补偿,从而减小衍射损耗,提高输出功率与光束质量.图 4 给出了热近非稳腔条件下,输出耦合平面镜透过率为 30%,使用与未使用 90° 旋光片时,1064nm Nd :YAG 调 Q 准连续激光输出特性曲线.其中,输出功率曲线在 LD 抽运功率为 870W—950W 时增长很缓慢,这是由于径向偏振光从稳态变成了非稳态如图 3 所示,使径向偏振光输出功率下降造成的^[16].从图 4 中可以看出,当不插入 90° 旋光片时,调 Q 准连续 1064nm 输出最大平均功率只有 205W,而当插入 90° 旋光片进行热致双折射补偿后,调 Q 准连续输出最大平均功率达 258W.此时,Q 开关重复频率为 10kHz,脉冲宽度为 64ns,脉冲形状如图 5 所示.由此可求得光光转换效率为 23.1%,电光转换效率为 10.5%.利用刀口扫描法测量近场激光光斑半径 ω 约为 1.4mm,远场发散角 θ 约为 7.5mrad,则可求得光束质量 $M^2 = \pi \cdot \omega \theta / 2\lambda \sim 15.5$.

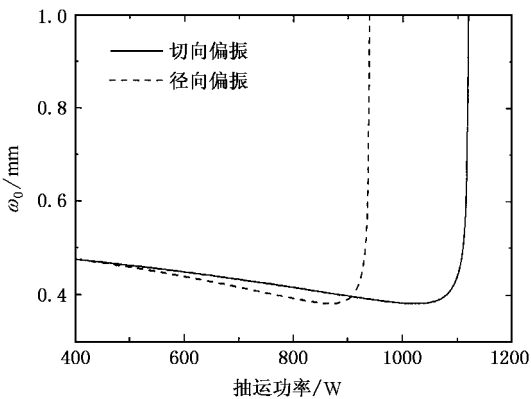


图 3 激光棒中径向与切向偏振光束基模光斑半径 ω_0 与 LD 抽运功率的关系

在准连续 DPL 中,可以通过在两个全同的激光头中间插入 90° 石英旋光片方法来补偿 Nd :YAG 晶体棒的热致双折射效应.当激光通过一个 Nd :YAG 棒后,由于热致双折射效应,在棒的径向与切向的偏振光会产生不同的相位延迟,而经过 90° 旋光片后,径向与切向的偏振光互换了方向,在通过第二个 Nd :YAG 棒时,原来的径向偏振光经历的是切向相位延迟,而原来的切向偏振光经历的是径向相位延迟.如果两个激光头完全相同,则径向与切向偏振光

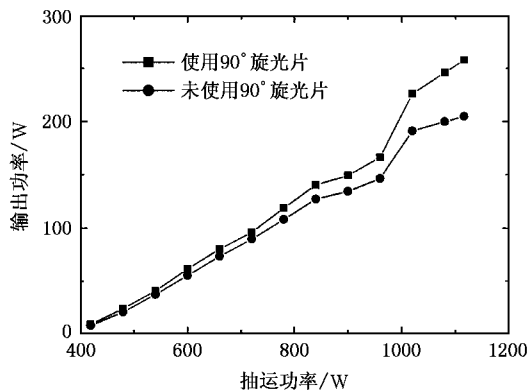


图 4 使用与未使用 90° 旋光片时准连续 1064nm 输出特性曲线

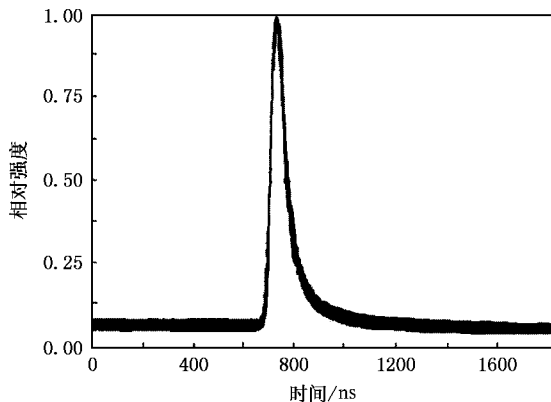


图 5 输出功率 258W 时准连续 Q 脉冲形状

3. 结 论

本文通过选用低掺杂浓度的 Nd:YAG 晶体棒、热近非稳腔优化设计、双棒串接热致双折射补偿技术以及双 Q 开关正交放置结构,实现 DPL 调 Q 准连

续 1064nm 输出平均功率达 258W,光束质量 $M^2 \sim 15.5$,重复频率为 10kHz,脉冲宽度为 64ns,峰值功率达 0.4GW,光光转换效率达 23.1%,据我们所知,这是所报道的双棒 Nd:YAG 激光器调 Q 准连续输出最高平均功率.

-
- [1] Seguchi M, Fujikawa S, Kojima T, Furuta K, Takenaka Y, Nishimae J 2003 *SPIE* **5063** 432
- [2] Yi J, Moon H J, Lee J 2004 *Appl. Opt.* **43** 3732
- [3] Li H Q, Zhang H B, Bao Z, Zhang J, Sun Z P, Kong Y P, Bi Y, Lin X C, Yao A Y, Wang G L, Hou W, Li R N, Cui D F, Xu Z Y 2004 *Opt. Commun.* **232** 411
- [4] Hu W T, Zhou F Z, Chen Y Z, Shen X H, Jing Z H 1994 *Acta Opt. Sin.* **14** 1281 (in Chinese) [胡文涛、周复正、陈有明、沈小华、姜中宏 1994 光学学报 **14** 1281]
- [5] Honea E C, Beach R J, Mitchell S C, Skidmore J A, Emanuel M A, Sutton S B, Payne S A 2000 *Opt. Lett.* **25** 805
- [6] Huang L L, Hong Z, Fang D W 2001 *Chin. Phys.* **10** 827
- [7] StPierre R J, Holleman G W, Valley M, Injeyan H, Berg J G, Harpole G M, Hilyard R C, Mitchell M, Weber M E, Zamel J, Engler T, Hall D, Tinti R, Machan J 1997 *IEEE J. Select. Topics Quantum Electronics* **3** 64
- [8] Hitz B 2004 *Photonics Spectra* **38** 20
- [9] Armandillo E, Norrie C, Cosentino A, Laporta P, Wazen P, Maine P 1997 *Opt. Lett.* **22** 1168
- [10] Konno S, Kojima T, Fujikawa S, Yasui K 2000 *Opt. Lett.* **25** 105
- [11] Jiang D S, Zhao H, Wang J J, Zhou S H 2004 *Chinese Journal of Lasers* **31** 8
- [12] Feng Y, Bi Y, Xu Z Y, Zhang G Y 2003 *SPIE* **4969** 227
- [13] Beach R J, Honea E C, Sutton S B, Bibeau C M, Skidmore J A, Emanuel M A, Payne S A, Avizoni P V s, Monroe R S, Harris D G 2000 *SPIE* **3889** 246
- [14] Lancaster D G, Dawes J M 1998 *Optics and Laser Technology* **30** 103
- [15] Yasui K 1996 *Appl. Opt.* **35** 2566
- [16] Hodgson N, Weber H 1990 *Opt. Quantum Electron* **22** 39

High average power Q-switched quasi-continue-wave Nd :YAG laser^{*}

Bo Yong[†] Geng Ai-Cong Bi Yong Sun Zhi-Pei Yang Xiao-Dong Li Rui-Ning Cui Da-Fu Xu Zu-Yan
(*Beijing National Laboratory for Condensed Matter Physics , Institute of Physics , Chinese Academy of Sciences , Beijing 100080 , China*)

(Received 18 November 2004 ; revised manuscript received 22 March 2005)

Abstract

A high-average-power and high-beam-quality diode-side-pumped solid-state Q-switched laser was developed by use of low concentration Nd :YAG crystals with thermally near-unstable resonator design and two-rod birefringence compensation technology. Two orthogonal acousto-optic Q-switches were used to sustain fully holding of the pump gain. The 1064 nm quasi-continuous-wave average output power of 258 W at pump power of 1116 W was achieved with the beam quality factor $M^2 \sim 15.5$ at a repetition rate of 10 kHz and a pulse width of 64 ns , corresponding to a peak power of 0.4GW and an optical-to-optical conversion efficiency of 23.1% .

Keywords : Nd :YAG laser , quasi-continue-wave , diode-pumped , solid-state laser

PACC : 4255R , 4260B

^{*} Project supported by the Pilot Project of Knowledge Innovation Programme of the Chinese Academy of Sciences , 863 Key Program Foundation of China (Grant Nos. 2002AA311120 and 2002AA311040) , and the Council for Science and Technology of Beijing (Grant No. H020420060060110) .

[†] E-mail : boyong@aphy. iphy. ac. cn