

文章编号: 1000-7032(2023)04-0673-05

## 全固态高功率准连续板条激光器

张兴虎<sup>1</sup>, 涂 玮<sup>1,2</sup>, 陈柏众<sup>1</sup>, 邹 跃<sup>1,2</sup>, 丁小康<sup>1</sup>, 牟学峰<sup>1</sup>, 许 昌<sup>1,2\*</sup>

(1. 同方中科超光科技有限公司, 北京 102200; 2. 中国科学院 理化技术研究所, 北京 100190)

**摘要:** 报道了一种高功率准连续运转的全固态 Nd:YAG 激光器。采用 Nd:YAG 晶体板条作为增益介质, 平凹腔型作为振荡腔, 激光沿 Zigzag 光路在板条内传播。当抽运功率为 9 kW 时, 振荡可获得平均功率为 3 420 W 的激光输出, 重复频率为 1 kHz, 激光脉宽为 80  $\mu$ s, 单脉冲能量为 3.42 J, 经过校正后的光束质量  $\beta$  为 4.1 倍衍射极限。

**关键词:** 激光器; 准连续激光器; 高功率; Nd:YAG

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20220352

## High Power Quasi-continuous-wave Solid-state Slab

ZHANG Xinghu<sup>1</sup>, TU Wei<sup>1,2</sup>, CHEN Baizhong<sup>1</sup>, ZOU Yue<sup>1,2</sup>,

DING Xiaokang<sup>1</sup>, MOU Xuefeng<sup>1</sup>, XU Chang<sup>1,2\*</sup>

(1. Tongfang Zhongke Chaoguang Technology Co., Ltd, Beijing 102200, China;

2. Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

\* Corresponding Author, E-mail: xuchang@mail.ipc.ac.cn

**Abstract:** An all-solid-state quasi-continuous-wave (QCW) Nd:YAG slab laser with a high power was demonstrated. A Nd:YAG slab crystal is adopted for gain medium, a plane-concave cavity is set up, and the laser beam travels along a Zigzag path in the slab. An average output power of 3 420 W is obtained at a pump power of 9 kW, corresponding to a repetition rate of 1 kHz. The pulse width is 80  $\mu$ s with a pulse energy of 3.42 J, and the laser beam quality with AO system  $\beta$  is 4.1 times of the diffraction limit.

**Key words:** lasers; quasi-continuous lasers; high power; Nd:YAG

## 1 引 言

高功率准连续全固态激光器<sup>[1-2]</sup>可广泛应用于先进制造、激光医疗、前沿科学、国家安全等领域<sup>[3-6]</sup>。特别地,高功率全固态激光在核设施管道的厚管焊接、放射环境下核设施的退役拆除、核污染器件的表面去污、高放废液的玻璃固化处理等核工业领域展现出较大的应用前景<sup>[7]</sup>。近年来,作为泵浦光源的高峰值功率、高占空比准连续半导体激光器(QCW-LD)技术不断进步,逐步推动了高功率准连续全固态激光的快速发展<sup>[8-11]</sup>。

高功率半导体泵浦全固态激光器增益晶体所采用的几何结构,一般为传统的棒状和近年来应用较多、发展较快的板条状。在传统的棒状固体激光器中,晶体本身的几何形状结构和水冷模式决定了该类激光器在泵浦功率提高的同时,其增益晶体径向出现明显的温度梯度,导致晶体内部产生较严重的热透镜、热致双折射等热光效应。进而造成激光器输出激光的光束质量严重下降,极大地限制了高功率高光束质量激光输出。板条激光器是从几何结构及冷却方式上改善增益介质的热效应。其主要特点有:板条状激光增益介质

收稿日期: 2022-09-26; 修订日期: 2022-10-22

基金项目: 中核集团青年英才项目(CG202108YF16)

Supported by CNNC Youth Talent Project(CG202108YF16)

具有的大冷却表面积和只存在于厚度方向上的温度梯度和热应力分布,与厚度方向垂直的非通光方向,无温度梯度分布。由此可以明显降低热退偏效应和热致双折射效应,进而降低对光束质量的影响;同等体积和生热条件下,板条晶体的散热性能一般比棒状晶体好,并且通过在板条厚度方向Z形光路运转,可有效降低热光畸变,获得更好的光束质量;此外,利用板条两个相互平行的大面上的全内反射可使谐振光束在晶体上下大面内以预先设计的角度来回折叠反射,沿所谓的 Zigzag 光路向前传播<sup>[12-16]</sup>,这可以在很大程度上消除板条厚度方向温度梯度造成的热畸变效应,并且充分提取增益晶体上能级存储能量。板条激光器有多种泵浦耦合及谐振结构<sup>[17-21]</sup>,其中基于激光束在晶体内的全内反射原理研制的大侧面泵浦 Zigzag 板条结构在高功率准连续激光器中应用最广也最为成功。

本文研制出一种高功率准连续全固态 Nd:YAG 板条激光器,在泵浦平均功率为 9 kW 时,振荡输出平均功率最大 3 420 W 红外激光,对应的重复频率为 1 kHz,输出激光脉宽为 80  $\mu$ s。其功率为目前脉宽百微秒以下国内先进水平。

## 2 实 验

高功率 LD 面阵发射的泵浦激光经过光束匀化后,从板条晶体的大面注入并被充分吸收。激光在板条晶体内的两个大面之间来回反射,并在两个腔镜之间形成谐振,经由耦合输出镜 M2 输出。

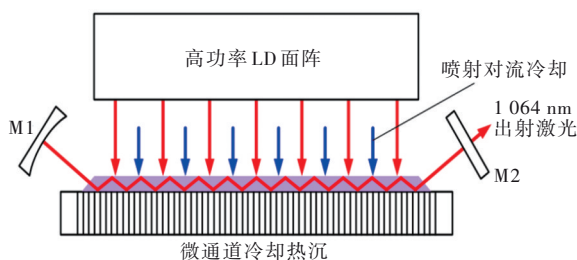


图 1 实验光路示意图

Fig.1 Schematic of experimental configuration

图 2 为该板条激光模块结构示意图。板条激光模块包括 Nd:YAG 晶体板条、高功率 LD 面阵、泵浦光束整形匀化器件、板条微通道冷却热沉和整体固定组件。

晶体方面,横截面为梯形,掺杂浓度为 0.9% 的 Nd:YAG 板条晶体通过下大面焊接在微通道冷

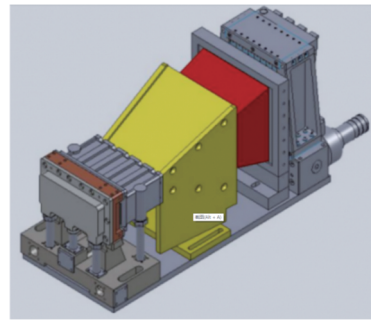


图 2 板条激光模块结构示意图

Fig.2 Schematic of slab module configuration

却热沉上,Zigzag 板条晶体的周期数为 9.5 个,板条晶体内激光的物理长度为 109 mm,因此等效总腔长为 199 mm。板条晶体的下大面尺寸为 96 mm $\times$ 30 mm,上大面尺寸为 92 mm $\times$ 30 mm。兼顾泵浦吸收效率和较小热效应,我们选定板条厚度为 3 mm<sup>[8]</sup>。板条上下两个大面均精细打磨抛光,上大面镀有针对泵浦波长 808 nm 的高透膜,下大面则镀有泵浦光高反膜,以此让泵浦激光来回两次通过板条晶体从而保证高效吸收。两个通光面与下大面之间夹角为 55°,这种设计能够实现激光在晶体内恰好振荡 9.5 个周期,板条交叠率高达 86%,此时死区较少,能够实现高效的泵浦光与振荡光模式的交叠,从而更有效地实现板条晶体内泵浦光功率的提取,有效提高泵浦效率。为了降低 1 064 nm 激光的损耗,两个通光面和剩余的两个侧面镀有针对波长 1 064 nm 的增透膜。此外,我们还对板条截面的热梯度分布和应力分布进行仿真计算,结果如图 3 所示。

泵浦方面,本系统中的 LD 泵浦阵列模块为自

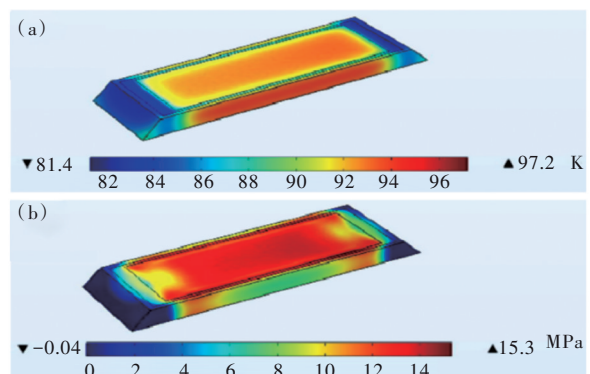


图 3 板条截面的热梯度分布和应力分布。(a)热梯度分布;(b)应力分布。

Fig.3 Thermal gradient distribution and stress distribution of strip section. (a)Thermal gradient distribution. (b) Stress distribution.

研模块,采用了 $8\times 8$ 的Bar条阵列,单Bar的输出平均功率为150 W,高功率LD二维面阵安装在激光模块侧面,发射的泵浦激光束经过光束整形后从Nd:YAG板条的大面经窗口和冷却水入射到激光晶体中。激光在激光晶体中Z字形传播,这种传播方式可以减弱沿着泵浦光传播方向的温度梯度所产生的热光效应。为了保证板条激光介质的吸收效率,LD面阵中选取的所有Bar条具有较为接近的中心发射波长,并采用高精度水冷机来控制热沉内流动的蒸馏水温度,使得LD面阵输出中心波长为808 nm。整个LD面阵可在1 kHz下输出约9 000 W左右的功率。此外,为了保证增益分布的均匀性和对称性,我们对LD泵浦光进行了整形和匀化,入射到板条晶体上的光斑尺寸约为 $86\text{ mm}\times 27\text{ mm}$ ,匀化后的光强分布如图4所示。经过理论计算,激光模块可吸收约85%以上的泵浦光能量。

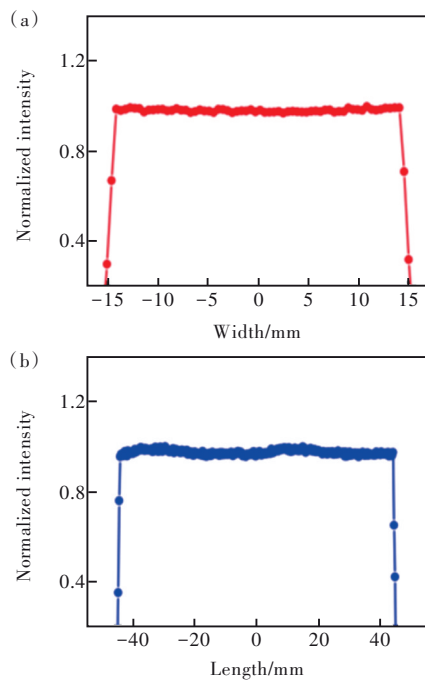


图4 归一化泵浦光强度沿板条晶体宽度方向(a)和长度方向(b)分布图

Fig.4 Distribution of normalized pump light intensity at width direction(a) and length direction(b)

冷却方面,板条的上大面采用喷射对流冷却,下大面采用传导冷却。选择这种非对称冷却方式的原因有两个:一方面是为了使泵浦辐射有效地传递到Nd:YAG板条;另一方面,喷射式冷却能够有效地增加换热能力,减少热效应对光束质量的影响。本文中微通道水冷设计中,微通道流道宽

度为0.7 mm,微通道翅片厚度为1 mm。该设计能够有效消除板条泵浦过程中产生的废热,提高激光器效率,防止热致损伤及晶体断裂。温控精度和使用时设置的具体温度分别为 $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

腔镜M1为凹面镜,曲率半径为500 mm,镀有1 064 nm的高反膜;腔镜M2为平面输出镜,耦合输出率为60%。M1和M2距离板条晶体端面的距离分别为50 mm和40 mm。激光在板条内沿之字形路径传播,并在M1和M2构成的平凹腔内振荡,最后输出。

### 3 结果与讨论

相比于连续抽运,准连续抽运可以有效降低激光晶体内的热效应,从而提高输出激光的光束质量,故本文采用重复频率1 kHz的准连续抽运方式,泵浦脉宽为 $80\text{ }\mu\text{s}$ 。我们用OPHIR公司的激光功率计(OPHIR NOVAII/10K-W-V1)监测激光的输出功率,测量的输出功率曲线如图5所示。振荡输出阈值约为850 W,而当抽运功率为9 kW时,可得到最高平均功率为3 420 W的激光输出,实验结果与理论计算值基本吻合(黑色散点图为实验结果,红色直线为计算结果)。从图中可以看出,在抽运光功率增加到9 kW的整个过程中,光光效率基本不变,没有饱和现象。图5插图显示了满功率下的近场光斑图,光斑尺寸为 $28\text{ mm}\times 2.4\text{ mm}$ 。

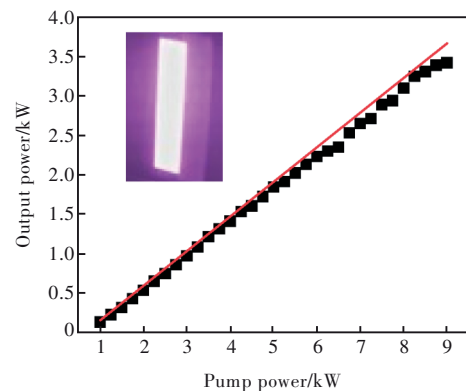


图5 功率输出曲线,插图:满功率下的输出近场光斑。  
Fig.5 Laser output power *versus* incident pump power. Inset: the picture of near field spot at full output power.

实验中用到一个高速光电探头(Thorlabs Inc. DET200)和一台4G带宽的数字示波器(Tektronix DPO70404)来测量输出激光的时域特性,所得结果如图6所示,激光的重复频率为1 kHz,脉冲宽度为 $80\text{ }\mu\text{s}$ 。可以看出子激光器输出脉冲稳

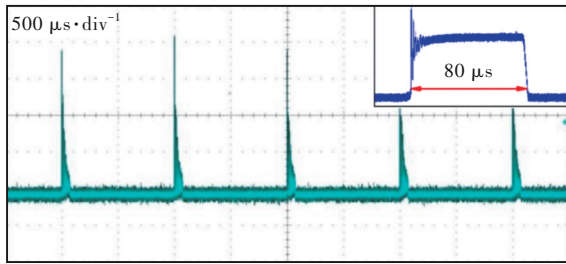


图6 输出激光时域特性图,插图:单个脉冲的脉冲宽度。  
Fig.6 Temporal characteristics of output laser. Insert: pulse width of single pulse.

定,脉冲间无频率漂移。经过校正模块后,我们用  $f=750\text{ mm}$  的透镜将激光聚焦,并用 CCD 在焦点前后测量多组光斑大小,拟合得到束腰直径,计算出  $\beta$  值。在最高输出功率状态下,计算得到光束质量  $\beta$  为 4.1 倍衍射极限,其中光斑远场分布图如图 7 所示。

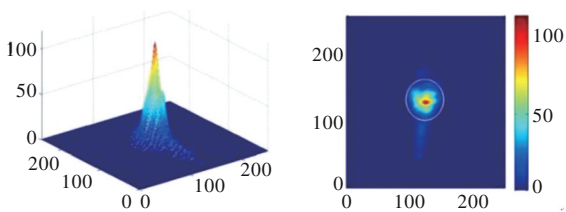


图7 输出功率 3 420 W 时的远场光斑分布图  
Fig.7 Far-field laser spot at an output power of 3 420 W

实验中我们监测了最高输出功率状态下连续运转 30 min 的功率波动,不稳定性小于 1%,如图 8 所示。

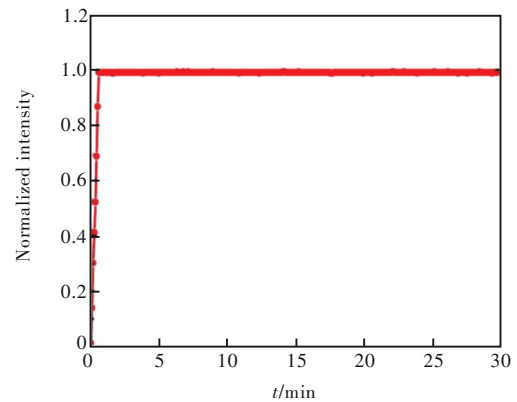


图8 连续运转 30 min 的功率波动曲线

Fig.8 Measurement of output power over 30 min

## 4 结 论

本文采用晶体板条方案研制了一台高功率准连续运转的全固态 Nd:YAG 激光器。在抽运功率为 9 kW 时获得了 3 420 W 的平均功率输出,重复频率为 1 kHz,单脉冲能量为 3.42 J,脉宽为 80  $\mu\text{s}$ ,经过校正模块后的光束质量为 4.1 倍衍射极限。该激光器在核设施管道的厚管焊接、放射环境下核设施的退役拆除、核污染器件的表面去污、高放废液的玻璃固化处理等核工业领域具有广泛的应用前景。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220352>.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 冯忠耀,李成荣,李修,等. 激光二极管侧抽运双棒串接连续 Nd:YAG 高功率绿光激光器 [J]. 光学学报, 2008, 28(8): 1543-1546.  
FENG Z Y, LI C R, LI X, *et al.* Laser-diode side-pumped two rods quasi-continuous-wave Nd:YAG green laser [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2008, 28(8): 1543-1546. (in Chinese)
- [ 2 ] 刘亮,崔俊伟,李文景,等. LD 泵浦的准连续输出双包层掺镱光纤激光器 [J]. 中国光学, 2012, 5(6): 663-670.  
LIU L, CUI J W, LI W J, *et al.* Yb<sup>3+</sup>-doped double-clad quasi-continuous wave fiber laser pumped by laser diode [J]. *Chin. Opt.*, 2012, 5(6): 663-670. (in Chinese)
- [ 3 ] 彭钦军,薄勇,杨晓冬,等. 2 277 W 全固态热容激光器 [J]. 中国激光, 2005, 32(11): 1477.  
PENG Q J, BO Y, YANG X D, *et al.* 2 277 W all solid state heat capacity laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, 32(11): 1477. (in Chinese)
- [ 4 ] XU Y T, XU J L, CUI Q J, *et al.* High efficiency multi-kW diode-side-pumped Nd:YAG laser with reduced thermal effect [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2010, 27(2): 024201-1-3.
- [ 5 ] 李鹏举,潘登,刘顺利. 长焦深连续立方相位板的飞秒激光加工与性能测试 [J]. 光学精密工程, 2022, 30(17): 2088-2093.  
LI P J, PAN D, LIU S L. Continuous cubic phase plate with long depth of focus fabricated by femtosecond laser and its optical performance [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2022, 30(17): 2088-2093. (in Chinese)

- [ 6 ] 胡林亭, 李佩军, 姚志军. 提高外场重频激光光斑测量距离的研究 [J]. 液晶与显示, 2016, 31(12): 1137-1142.  
HU L T, LI P J, YAO Z J. Improvement of the measuring distance of repetitive-frequency laser spot in field [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2016, 31(12): 1137-1142. (in Chinese)
- [ 7 ] 从征. 激光使核辐射变黑的光学元件脱色 [J]. 激光与光电子学进展, 1981, 18(12): 39.  
CONG Z. Laser discoloration of optical components that blacken nuclear radiation [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 1981, 18(12): 39. (in Chinese)
- [ 8 ] GOLLA D, BODE M, KNOKE S, *et al.* 62 W cw TEM00 Nd:YAG laser side-pumped by fiber-coupled diode lasers [J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21(3): 210-212.
- [ 9 ] GOODNO G D, KOMINE H, MCNAUGHT S J, *et al.* 19 kW phase-locked MOPA laser array [C]. *Proceedings of Advanced Solid-state Photonics 2006, Incline Village, 2006*: paper MA2.
- [ 10 ] REDMOND S, MCNAUGHT S J, ZAMEL J, *et al.* 15 kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser [C]. *Proceedings of 2007 Conference on Lasers and Electro-optics, Baltimore, 2007*: 1-2.
- [ 11 ] MCNAUGHT S J, KOMINE H, WEISS S B, *et al.* 100 kW coherently combined slab MOPAs [C]. *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-optics 2009, Baltimore, 2009*: CThA1.
- [ 12 ] GOODNO G D, KOMINE H, MCNAUGHT S J, *et al.* Coherent combination of high-power, zigzag slab lasers [J]. *Opt. Lett.*, 2006, 31(9): 1247-1249.
- [ 13 ] CHEN Y, LIU W, BO Y, *et al.* High-efficiency high-power QCW diode-side-pumped zigzag Nd:YAG ceramic slab laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2013, 111(1): 111-116.
- [ 14 ] CHEN J C, LI J, XU J L, *et al.* 4 350 W quasi-continuous-wave operation of a diode face-pumped ceramic Nd:YAG slab laser [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2014, 63: 50-53.
- [ 15 ] REED M K, KOZLOVSKY W J, BYER R L, *et al.* Diode-laser-array-pumped neodymium slab oscillators [J]. *Opt. Lett.*, 1988, 13(3): 204-206.
- [ 16 ] BERNARD J E, ALCOCK A J. High-efficiency diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab laser [J]. *Opt. Lett.*, 1993, 18(12): 968-970.
- [ 17 ] KIRIYAMA H, YAMAKAWA K, NAGAI T, *et al.* 360-W average power operation with a single-stage diode-pumped Nd:YAG amplifier at a 1 kHz repetition rate [J]. *Opt. Lett.*, 2003, 28(18): 1671-1673.
- [ 18 ] TEI K, KATO M, NIWA Y, *et al.* Diode-pumped 250 W zigzag slab Nd:YAG oscillator-amplifier system [J]. *Opt. Lett.*, 1998, 23(7): 514-516.
- [ 19 ] LONG Q L, GAO Y, MAO Y F, *et al.* Study of a high-power Tm:YAP slab laser operated at 1.94  $\mu\text{m}$  [J]. *J. Russ. Laser Res.*, 2021, 42(4): 468-472.
- [ 20 ] MI S Y, LI J H, WEI D S, *et al.* 105 W continuous-wave diode-pumped Tm:YAP slab laser with high beam quality [J]. *Opt. Laser Technol.*, 2021, 138: 106847.
- [ 21 ] DUAN X M, SHEN Y J, GAO J, *et al.* Active Q-switching operation of slab Ho:SYSO laser wing-pumped by fiber coupled laser diodes [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(8): 11455-11461.



张兴虎(1976-),男,内蒙古通辽人,博士研究生,2006年于清华大学获得硕士学位,主要从事高能激光技术的研究。

E-mail: zhangxinghu\_01@126.com



许昌(1989-),男,湖北仙桃人,博士,高级工程师,硕士生导师,2017年于哈尔滨工业大学获得博士学位,主要从事高能激光技术的研究。

E-mail: xuchang@mail.ipc.ac.cn