

# 10 kW 级固体板条激光放大器设计与实验研究

高清松 胡 浩 裴正平 童立新 周唐建 唐 淳

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 针对传导冷却和端面抽运的激光增益模块特点,设计了一台 10 kW 级高功率全固态板条激光放大器实验装置。分析了激光注入功率密度和入射角度等参数对激光放大器提取效率的影响。实验测试了注入功率密度与激光增益模块光-光转换效率的关系,实验结果与理论分析基本吻合。激光放大器实验装置的种子源通过一级预放大器 and 两级主放大器放大后获得了高功率和高光束质量的激光输出,激光放大器输出功率达为 11.3 kW,光束质量 7.56 倍衍射极限,出光时间 110 s,光-光转换效率达 30%。

**关键词** 激光器;全固态;激光放大器;板条;Nd:YAG 晶体

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0202001

## Design and Experiment Study of All-Solid Slab Laser Amplifier with Laser Power of 10 kW

Gao Qingsong Hu Hao Pei Zhengping Tong Lixin Zhou Tangjian Tang Chun

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** For the conduction cooled end-pumped zig-zag slab module, a novel 10 kW high power laser amplifier setup of the all-solid slab laser has been designed. The laser extractive efficiency of the amplifier with various laser power densities and various incidence angles is simulated with a laser amplifier model. The optical-optical conversion efficiency of the laser amplifier is measured in the experiment. The experimental result agrees well with the simulation. A seed laser is amplified in a pre-amplifier stage and two amplifier stages all-solid-state amplifier system with high power and high beam quality to a output power of 11.3 kW, with the beam quality 7.56 times diffraction limit and the runtime over 110 seconds. The optics-optics conversion efficiency is 30%.

**Key words** lasers; all-solid-state; laser amplifier; slab; Nd:YAG crystal

**OCIS codes** 140.3480; 140.3580; 140.3280

### 1 引 言

采用激光二极管抽运的固体激光器,具有效率高、光束质量好、工作稳定、体积小和质量轻等优点,尤其它是一种电激励激光器,使用成本和维护的复杂性较低,在工业加工、医疗卫生、科学研究等领域的应用前景非常广阔。传统的高能固体激光器采用棒状激光介质,激光介质热效应严重,输出光束质量较差。为了克服热效应的影响,科研人员提出了多种激光介质构型的固体激光器,如板条、薄片和光纤等方案<sup>[1]</sup>。其中板条激光器沿“之”字型光路传输的激光可以消除一阶热聚焦和热致双折射效应,能够获得较好的光束质量和较高的输出功率。2001 年,

科研人员结合薄板条大面积传导冷却和端面抽运技术提出了传导冷却端面抽运板条激光器方案<sup>[2]</sup>。2005 年, Northrop Grumman 公司采用 4 个板条激光增益模块双程放大和自适应光学主动控制后实现了单路功率 15 kW、光束质量(BQ)1.5 倍衍射极限的激光输出<sup>[3]</sup>,且稳定运转 22 min 后光束质量无明显下降。2009 年, Northrop Grumman 公司的板条固体激光器<sup>[4]</sup>采用 7 个 15 kW 的放大模块相干合成,获得 BQ 优于 3、激光功率 105 kW 激光输出,由此可以证明板条激光器具有作为高功率激光器的潜力。

近几年国内已经有许多学者对高功率固体板条激光器进行了深入的理论分析和实验研究,如胡浩

收稿日期: 2011-09-20; 收到修改稿日期: 2011-10-20

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(60890201)资助课题。

作者简介: 高清松(1972—),男,研究员,主要从事高功率激光二极管抽运固体激光技术方面的研究。

E-mail: gaoqs123@tom.com

等<sup>[5]</sup>报道了千瓦级二极管激光侧面抽运 Nd:YAG 板条激光器;王超等<sup>[6]</sup>报道了输出功率 11 kW 的高功率固体板条激光器介质热分析;刘亮等<sup>[7]</sup>报道了传导冷却端面抽运板条放大器波前畸变的数值研究。然而由于存在激光增益模块的波前畸变较大和激光放大器提取效率低等问题,难于获得高质量和高效激光输出。本文详细介绍了高功率固体板条激光放大器的设计,分析了影响激光放大器提取效率和光束质量的因素。实验结果表明,采用多级放大、级间像传递以及光束变换技术后激光放大器输出功率达到 11.3 kW,光束质量达到 7.56 倍衍射极限。

## 2 实验装置及理论分析

高功率连续固体板条激光放大器实验装置如

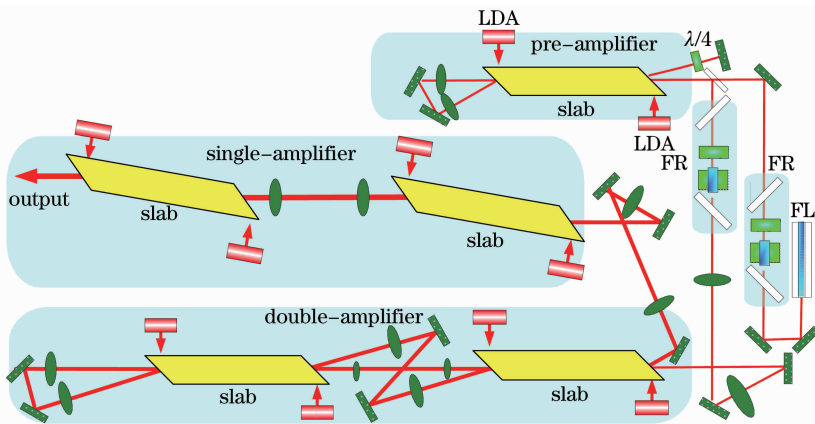


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Scheme of the experimental setup

### 2.1 激光增益模块提取效率

激光增益模块的提取效率与固体板条激光器的光-光转换效率息息相关,提高激光增益模块的提取效率能有效提高激光器的输出功率,减少激光器的质量功率比。另一方面,提高激光增益模块的提取效率还会减少增益介质的放大自发辐射(ASE)效应,改善激光器的光束质量,获得高亮度激光输出。

当连续激光放大器注入功率密度小时,处于小信号放大,增益倍数高,但提取效率低;随着注入功率密度增强,虽然增益倍数减小,但能有效提取功率,效率较高;进一步增加注入功率密度,当增益系数和损耗系数相等时,提取效率为零。连续激光放大器的功率是逐级被放大的,注入功率密度也是逐步提高的,但注入功率密度达到一定值后,板条端面膜层的损伤几率增加。连续激光增益模块的提取效率与注入功率密度之间的关系模拟计算结果如图 2 所示。当注入功率密度为 6.7 kW/cm<sup>2</sup> 时,提取效率

图 1 所示,激光放大器由单横模光纤激光器(FL)、四程预放大器、双程主放大器和单程主放大器组成。种子源为单横模光纤激光器,输出功率为 1.5 W,光束质量  $M^2$  小于 1.2。种子源经法拉第旋转器(FR)激光隔离后进入四程预放大器,采用激光偏振和入射角度实现四程放大。四程放大器输出激光经激光隔离和光束整形后进入双程主放大器和单程主放大器,主放大器均由两个激光增益模块组成。由于双程主放大器输出功率较高,注入功率密度已达到 1 倍饱和光强以上,单程主放大器可以实现很高的提取效率。激光增益模块采用激光二极管阵列(LDA)双端对称抽运 Nd:YAG 板条的方式,薄板条大面与铜微通道热沉之间采用焊接方式,确保有效地传导冷却。

达到 70%;当注入通量为 11.4 kW/cm<sup>2</sup> 时,提取效率能达到 80%。激光放大器的光-光转换效率为模块的储能效率与提取效率的乘积,连续激光放大器的光-光转换效率与注入功率密度的关系如图 3 所示,将理论计算与实验结果进行了对比,基本吻合,如注入通量为 7.05 kW/cm<sup>2</sup> 时,理论光-光转换效率

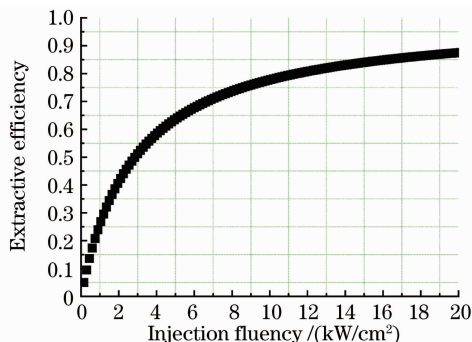


图 2 提取效率与注入激光功率密度的关系

Fig. 2 Extractive efficiency versus laser power density

为 39.4%，实验实测值为 38.5%，基本吻合。理论分析和实验结果均表明，连续激光放大器要获得高的光-光转换效率，必须提高注入功率密度。

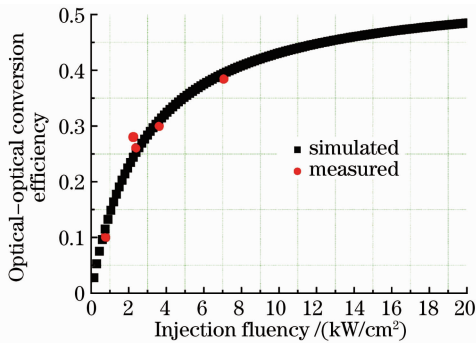


图 3 光-光转换效率与注入激光功率密度的关系  
Fig. 3 Optical-optical conversion efficiency versus laser power density

激光板条在满足全反射条件下存在多个离散的人射角度，对某一特定入射角度而言，总在增益区内存在“盲区”。由于“盲区”的存在，一方面是填充因子小于 1 导致提取效率降低；另一方面“盲区”吸收的抽运能量来提取导致局部自发辐射严重。采用以不同角度入射的双程激光放大，“盲区”会大大减少甚至没有。另外入射角度越小，“盲区”也越小。

### 2.2 光束传输

板条激光介质在宽度和厚度方向尺寸不一致，对于像散非对称光束的级间传输，设计了一套特殊的成像扩束器。成像扩束器一方面满足级间增益介质口径匹配要求，以获得较高的激光耦合效率；另一方面要抑制光束传输过程中菲涅耳数较小引起的衍射调制。扩束器由两片柱透镜和一片球透镜组成，两片柱透镜正交放置分别对板条的两个方向起作用，经实验验证，获得了较高的级间耦合效率，并有效抑制了衍射调制。由于柱透镜加工难度大，透射波前较大，扩束器采用组合设计和整体装配后，获得了较低的透射波前值。激光放大器级间和激光增益模块之间均采用 4f 像传递设计，实现高的激光耦合效率和激光增益模块口径匹配率。

### 3 实验结果及讨论

激光放大器选用的种子源为低功率单横模光纤激光器，输出功率仅 1.5 W，注入四程预放大器的功率密度很低。为提高预放大器的提取效率，采用角度选通和偏振选通相结合的方式实现四程激光放大。四程预放大器输出激光功率 240 W，放大倍率 160 倍，光束质量为  $M^2 = 3.5$ 。

双程主放大器的注入功率密度较低，为提高增益模块的提取效率，采用两个激光增益模块串接进行放大，激光入射角度分别为 45°和 32°，双程主放大器的输出功率为 3.3 kW。单程主放大器激光入射角度为 27°，由于注入激光功率密度较高，能有效提取激光增益模块的功率，且有效地抑制了增益模块的放大自发辐射，激光增益模块的提取效率与模拟计算比较吻合。激光功率采用未镀膜的楔形片采样测试，测得激光放大器在 110 s 内的平均功率为 11.3 kW，输出功率不稳定性为 3.1%，如图 4 所示。激光放大器实验装置光-光转换效率为 30%。

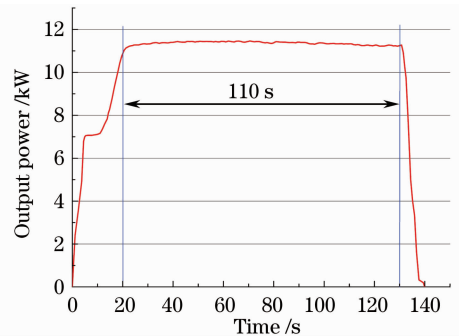


图 4 放大器输出功率与时间的关系

Fig. 4 Amplifier output power versus time

将激光放大器输出激光经过扩束整形后进行了激光光束质量测试和近场分布测试，用光束质量测试仪测得激光光束质量为 7.56 倍衍射极限，如图 5 所示，测试时长为 100 s。测试了激光的远场和近场分布，如图 6, 7 所示，激光分布较均匀，未出现明显的强点。

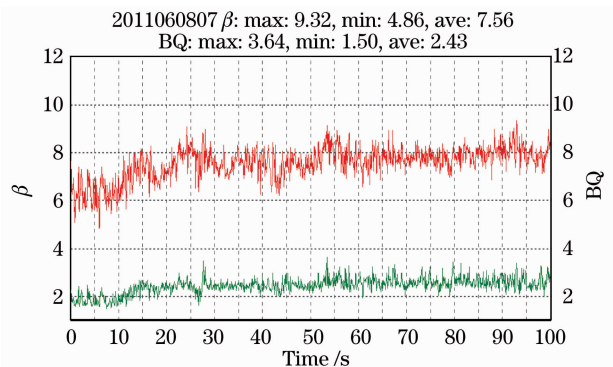


图 5 激光光束质量测试结果

Fig. 5 Result of far-field of laser beam

激光放大器的光-光转换效率达到 30%，通过进一步优化激光放大器设计以及改善激光增益模块性能，可以预期能够将激光放大器的光-光转换效率提高到 35%。为分析激光放大器的光束质量，分别测得 x 方向光束质量约 3.8 倍衍射极限，y 方向光

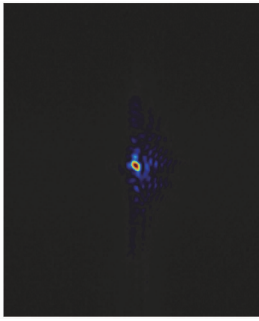


图 6 激光远场光斑分布

Fig. 6 Far-field intensity distribution of the laser amplifier

束质量为 7 倍衍射极限,这是由板条激光器自身光路传输特性所决定的, $x$  方向光路为“之”字形,在传输过程中对激光畸变得到较好的补偿。激光放大器经过近 20 h 的长时间运行,初步验证了高功率激光板条放大器的稳定性。

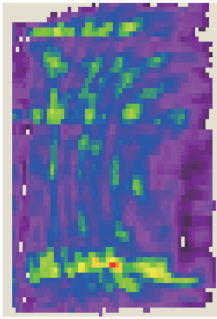


图 7 激光近场光斑分布

Fig. 7 Near-field intensity distribution of the laser amplifier

## 4 结 论

通过对高功率激光板条放大器设计及实验研

究,连续激光放大器在 10 kW 级的光束质量得到明显改善,初步考核了激光板条放大器的稳定性。激光放大器实验装置获得了 11.3 kW 的 1064 nm 激光输出,出光时间达到 110 s,光束质量达到 7.56 倍衍射极限。通过优化激光放大器设计和提高激光增益模块的性能,可以进一步提高激光放大器的性能。

## 参 考 文 献

- 1 Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1605~1618  
周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1605~1618
- 2 Gregory D. Goodno, Stephen Palese, Joseph Harkenrider *et al.*. Yb: YAG power oscillator with high brightness and linear polarization[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **26**(21): 1672~1674
- 3 G. Goodno, H. Komine, S. McNaught *et al.*. Multi-kW near-diffraction-limited single-frequency Nd: YAG laser [C]. Conference on Lasers and Electro-Optics Europe, 2005
- 4 Northrop grumman corporation. Photorelease-northrop Grumman scales new heights in electric laser power, achieves 100 kilowatts from a solid-state laser[EB/OL]. California; Redoudo Beach, 2009
- 5 Hu Hao, Jiang Jianfeng, Lei Jun *et al.*. Diode laser side pumped kW-class Nd: YAG slab laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(1): 30~33  
胡 浩, 蒋建锋, 雷 军等. 千瓦级二极管激光侧面抽运 Nd: YAG 板条激光器[J]. *中国激光*, 2010, **37**(1): 30~33
- 6 Wang Chao, Tang Xiaojun, Xu Liuqing *et al.*. Investigation on thermal effect of high power slab laser with 11 kW[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2807~2809  
王 超, 唐晓军, 徐臻婧等. 输出功率 11 kW 的高功率固体板条激光器介质热分析[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2807~2809
- 7 Liu Liang, Guo Shaofeng, Lu Qisheng *et al.*. Thermal distortion analysis for conduction cooled end-pumped slab[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(7): 987~992  
刘 亮, 郭少锋, 陆启生等. 传导冷却端面泵浦板条放大器波前畸变数值研究[J]. *强激光与粒子束*, 2009, **21**(7): 987~992

栏目编辑: 宋梅梅