

# 千瓦级端面抽运板条激光器技术研究

李 密 胡 浩 李建民 李德明 赵 娜 邬映臣 蒋建锋 雷 军 吕文强 石 勇

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 开展了激光二极管端面抽运 Nd:YAG 板条激光器的实验研究, 根据板条激光介质的特点, 通过选择倒像谐振腔, 有效地避免了激光光束偏离板条端面和输出功率不稳定的情况。在抽运功率 3330 W 时, 获得了平均功率超过 1000 W 的准连续激光输出, 斜率效率达到 42.2%, 输出功率的稳定性优于 1.5%。实验还测量了激光光束质量并进行了相应的理论分析。

**关键词** 激光器; 板条激光器; 端面抽运; 倒像谐振腔; 斜率效率

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.s102001

## Technology Research on Kilowatt Slab Laser with End-Pumping

Li Mi Hu Hao Li Jianmin Li Deming Zhao Na Wu Yingcheng

Jiang Jianfeng Lei Jun Lü Wenqiang Shi Yong

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

**Abstract** The Nd:YAG slab laser with laser diode array end-pumping experiment has been developed. According to the characteristic of slab medium, the slab laser with image-inverting resonator (IIR) avoids effectively the beam excursion to the slab end and the instability on laser power. It obtains the quasi-continuous laser output with the average power higher than 1000 W when the pump power is 3330 W, the slope efficiency is 42.2%, the stability of the output power is better than 1.5%. The beam quality of laser is measured and the relevant academic analysis is done.

**Key words** lasers; slab laser; end-pumped; image-inverting resonator; slope efficiency

**OCIS codes** 140.2010; 140.3410; 140.3425; 140.3530; 140.3580; 140.6810

## 1 引 言

在高平均功率固体激光器的发展过程中, 热效应一直是限制激光器功率提高和光束质量(BQ)改善的重要因素。为了减小热效应对激光输出的不利影响, 科技人员对激光材料、工作模式和几何形状等方面进行了大量研究, 发展了许多新技术, 推动了高平均功率固体激光技术的迅速发展<sup>[1~4]</sup>。其中, 传导冷却端面抽运板条(CCEPS)模块在热管理方面的优势十分明显: 诺·格公司以 4 个 CCEPS 模块组成一个放大链路, 每一个链路的输出功率可以达到 15 kW, BQ 优于 2 倍衍射极限<sup>[5]</sup>, 并通过 7 路光束相干合成, 从而获得 105 kW 的激光输出, 电光效率达 19%, BQ 优于 3 倍衍射极限, 连续工作时间超过 300 s。

在国内 CCEPS 模块主要用于激光功率放大, 而较少用于谐振腔振荡输出。2008 年胡浩等<sup>[6]</sup>通过激光二极管(LD)侧面抽运 Nd:YAG 板条(103 mm×30 mm×5 mm)获得了 1012 W 的准连续激光输出。本文开展了 CCEPS 激光器实验研究, 通过谐振腔获得了平均功率 1086 W 的准连续激光输出, 斜率效率达 42.2%, 输出功率稳定性优于 1.5%, 实验测得板条厚度方向的 BQ 为 3 倍衍射极限, 板条宽度方向的 BQ 为 42 倍衍射极限。

## 2 实验装置

实验用 CCEPS 模块尺寸为 50 cm×30 cm×18cm, YAG 板条尺寸为 150.2 mm×20 mm×2.5 mm, 板条端面切角为 45°, 掺杂原子数分数为

收稿日期: 2011-07-20; 收到修改稿日期: 2011-08-29

作者简介: 李 密(1981—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: limi@tsinghua.org.cn

0.1%，在入射角  $35.2^\circ$  时板条周期长度为 10.01 mm。在实验研究中，选择平凹谐振腔实现激光输出。由于板条的厚度只有 2.5 mm，随着 LD 抽运功率的增加，热效应逐渐加剧，光束各部分在通过板条时的光程有一定差异。光束在离开板条端面并经过腔镜反射回板条端面时，部分光偏离板条端面，输出功率十分不稳定，板条端面温度急剧上升，极易导致板条端面损坏。因此，避免由热效应引起的光束偏离导致输出功率不稳定和板条端面温度急剧上升的情况十分必要。通过对多种光学谐振腔的比较（如交叉柱面棱镜腔和球面-柱面镜腔等<sup>[7,8]</sup>），最终选择了倒像

谐振腔（IIR）。

IIR 的结构如下：在板条的两端，正交地放置两个柱透镜，两柱透镜  $F_1$  和  $F_2$  的焦距分别为  $f_x$  和  $f_y$ （ $x$  轴为板条厚度方向， $y$  轴为板条宽度方向）。板条端面分别位于两个柱透镜的焦点，而腔镜位于柱透镜的另一焦点附近。光束从离开板条端面依次通过柱透镜-腔镜-柱透镜并返回到板条端面时，光束刚好倒立而大小不变。因此，光束的光程差关于光轴是对称的，而且光束在往返通过板条时还可以消除倾斜效应，光束将不会偏离板条端面<sup>[9]</sup>，如图 1 所示。

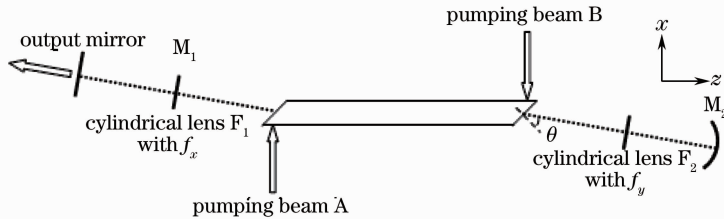


图 1 倒像谐振腔示意图

Fig. 1 Sketch map of image-inverting resonator

图 2 为端面抽运板条激光器实验装置，CCEPS 模块放置在一个长方形柜子里。板条通过钢焊无应力地安装在两个微通道热沉中间。板条吸收抽运光形成的废热通过热沉传导到冷却液，并通过冷却液的流动将热量带走，实现板条冷却和连续工作。谐振腔按照图 1 搭建。输出镜为平面镜，透射率为 50%，全反镜为曲率半径  $R_2 = 5$  m 的凹镜。选择激

光光轴与板条端面法线的夹角  $\theta = 35.2^\circ$ ，则光束正好在板条内传输 15 个周期，光束从板条端面出射时不会发生分裂。选择柱透镜  $f_x$  和  $f_y$  均为 172 mm，板条端面分别位于  $F_1$  和  $F_2$  的焦点，输出镜距离柱透镜  $f_x$  大约为 170 mm，全反镜距离柱透镜  $f_y$  大约为 170 mm，谐振腔的总长（几何长度）大约为 84 cm，谐振腔内光程总长度大约为 100 cm。



图 2 端面抽运板条激光器实验装置

Fig. 2 Experiment setup of slab laser with end-pumping

### 3 实验结果及分析

在抽运光作用下，Nd:YAG 晶体出现粒子数反转而形成增益，当增益超过损耗时即可实现激光振荡输出。实验用抽运源为 LD 阵列，输出中心波长为 805.15 nm（90 A，25 °C），输出半峰全宽（FWHM）为 2.5 nm，冷却水温上升 1 °C，输出波长

增加约 0.3 nm。在谐振腔参数和抽运脉宽一定的条件下，激光平均功率与抽运强度呈现正相关性，并且与抽运频率成正比。已知 Nd:YAG 晶体的荧光寿命为 230 μs，抽运脉宽远远大于荧光寿命可以提高效率，故选择抽运光脉宽为 10 ms。实验测得抽运光斑在板条端面的大小约为 20.2 mm × 2.0 mm，

远场强度分布均匀性为 93.2%。实验测量了不同驱动电流和两种抽运频率(10 Hz 和 60 Hz)时的平均输出功率曲线,如图 3 所示。由图 3 可见,在同样大小的驱动电流下,抽运频率为 60 Hz 时的输出功率是抽运频率为 10 Hz 时输出功率的 6 倍以上(6.6~7.6 倍)。这是因为在较高的占空比下,LD 的发射波长更接近于 Nd:YAG 板条的吸收峰,板条对抽运光的吸收更加充分和有效。

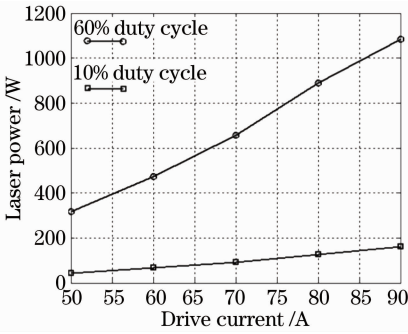


图 3 不同驱动电流下的输出功率

Fig. 3 Output power at different drive currents

在驱动电流增大到 90 A 时,LD 抽运功率达到 3330 W,此时的平均输出功率达到 1086 W,斜率效率达 42.2%。通过红外热像仪监测板条端面温度,实验测量了平均输出功率的时间曲线,如图 4 所示。通过数据整理得知 10 min 内输出功率的稳定性优于 1.5%均方根(RMS)。

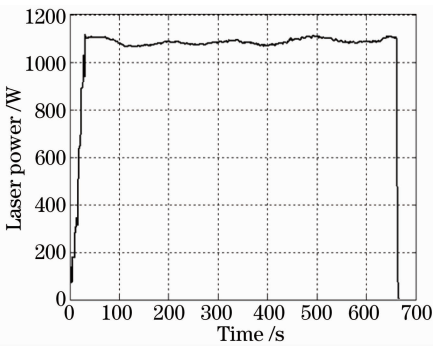


图 4 输出功率的时间曲线

Fig. 4 Time curve of output power

根据光线传输的矩阵理论和谐振腔参数,可以求出谐振腔的稳定性。除静态参数外,在加载时板条宽度方向上的温度梯度还导致了热透镜效应,随着抽运功率的增加,热透镜效应也变得越明显,热焦距相应地变短。在抽运功率为 3330 W 时的热透镜焦距大约为 3.12 m。

若以腔镜 M 的位置为参考面,计算从 M<sub>1</sub> 到 M<sub>2</sub> 之间的单程传输矩阵<sup>[10]</sup>:

$$M = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix}, \quad (1)$$

从而有  $G_1^* = A - B/R_1, G_2^* = D - B/R_2$ ,  $R_1, R_2$  分别为 M<sub>1</sub> 和 M<sub>2</sub> 的曲率半径,代入谐振腔参数可得到谐振腔稳定图如图 5 所示。

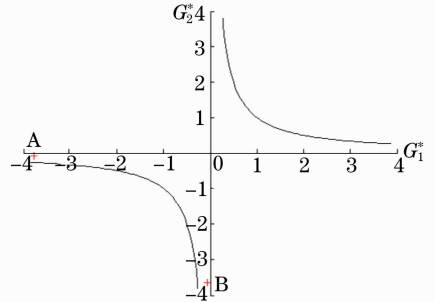


图 5 谐振腔稳定图

Fig. 5 Stability map of resonator

在板条厚度方向上,谐振腔在稳定图中的位置为 A( $G_1 = -3.77, G_2 = -0.03$ );在板条宽度方向上,谐振腔在稳定图中的位置为 B( $G_1 = -0.06, G_2 = -3.66$ ),可见该谐振腔在两个方向上均为稳定腔。在板条厚度方向,抽运体积与谐振腔基模匹配良好,同时“之”字形光路消除了厚度方向的热畸变,因而厚度方向的 BQ 较好。同时,根据谐振腔参数计算出在厚度方向上的菲涅耳数为 2.4,宽度方向的菲涅耳数为 112,可见板条激光器在宽度方向的选模能力非常弱,无法抑制高阶模,因此在宽度方向的 BQ 较差。在工作电流为 90 A 时,通过测量激光焦斑的光强分布(图 6)得到激光在两个方向上的 BQ 为  $\beta_{depth} = 3, \beta_{width} = 42$ ,与理论预期吻合。

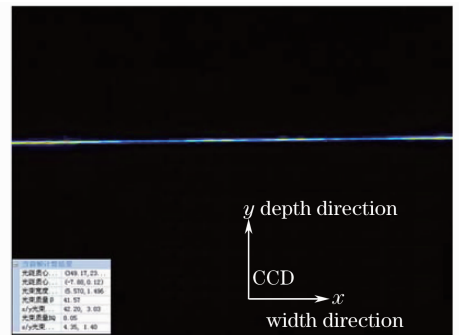


图 6 激光强度空间分布图

Fig. 6 Space distribution of laser intensity

## 4 结 论

开展了 LD 端面抽运 Nd:YAG 板条激光器的实验研究,并分析了板条激光器中输出功率不稳定和端面温度急剧上升的原因。通过选择 IIR,实现了稳定

的准连续激光输出。在抽运功率 3330 W 时获得了平均功率 1086 W 的准连续激光输出,斜率效率达到 42.2%,功率稳定性优于 1.5%。该激光器的体积较小,输出稳定,可用于工业加工(如材料加工、切割、热处理)、科学研究和军事应用等多个领域。

## 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 He Kunna, Wei Zhiyi, Zhang Zhiguo *et al.*. Overview on laser diode pumped solid-state laser with direct pumping scheme[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1679~1685  
何坤娜, 魏志义, 张治国 等. 全固态激光直接抽运技术的发展和研究现状[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1679~1685
- 3 Tian Changqing, Xu Hongbo, Cao Hongzhang *et al.*. Cooling technology for high-power solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1686~1692  
田长青, 徐洪波, 曹宏章 等. 高功率固体激光器冷却技术[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1686~1692
- 4 Liu Huan, Gong Mali, Gao Song. Progress in corner-pumped all-solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1693~1699  
刘 欢, 巩马理, 高 松. 角抽运全固态激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1693~1699
- 5 J. Marmo, H. Injeyan, H. Komine *et al.*. Joint high power solid state laser program advancements at northrop grumman [C]. *SPIE*, 2009, **7195**, 719507
- 6 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
- 7 Zhang Lingling, Meng Junqing, Huang Yan *et al.*. Recent advances in high-power solid slab lasers [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2005, **42**(4): 33~36  
张玲玲, 孟俊清, 黄 燕 等. 高功率板条激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(4): 33~36
- 8 Zhang Hengli, Yan Ying, Liu Yang *et al.*. Laser diode stack end-pumped Nd: YVO<sub>4</sub> slab laser with hybrid resonator at 1064 nm and 1342 nm[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(11): 2766~2768  
张恒利, 闫 莹, 刘 洋 等. 激光二极管阵列端面抽运混合腔 Nd: YVO<sub>4</sub> 板条 1064 nm 和 1342 nm 激光特性研究[J]. *中国激光*, 2010, **37**(11): 2766~2768
- 9 Gregory D. Goodno, Stephen Palese, Joseph Harkenrider *et al.*. Yb: YAG power oscillator with high brightness and linear polarization[J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1672~1674
- 10 Nie Jinsong. Study of resonator's stability influenced by thermal lens effect[J]. *Laser Journal*, 2011, **32**(1): 4~5  
聂劲松. 热透镜效应对谐振腔稳定性影响研究[J]. *激光杂志*, 2011, **32**(1): 4~5

栏目编辑: 宋梅梅