

# 激光二极管阵列端面抽运高功率板条 激光器技术研究

李 密 胡 浩 李建民 邬映臣 雷 军 吕文强 石 勇 赵 娜

(中国工程物理研究院应用电子学研究所高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 开展了激光二极管阵列(LDA)端面抽运高功率板条激光器的实验研究和理论分析,通过在谐振腔内引入4f成像系统实现了薄板条激光器的稳定输出。在LDA注入功率接近10 kW时,通过平凹腔输出获得了平均功率为3.24 kW的连续激光输出。同时,通过测量激光器稳定输出时激光晶体的饱和增益系数,间接得到了激光谐振腔的等效损耗系数和板条端面衍射损耗等参数,并分析了填充因子对激光器输出功率的影响,实验结果为开展高功率板条激光器的优化设计提供了基础。

**关键词** 激光器;板条激光器;端面抽运;激光谐振腔;增益饱和;损耗系数

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.0514004

## Technology Research on High Power Slab Laser End-Pumped with Laser Diode Arrays

Li Mi Hu Hao Li Jianmin Wu Yingchen Lei Jun Lü Wenqiang  
Shi Yong Zhao Na

(Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, Institute of Applied Electronics,  
China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

**Abstract** The experiment research and academic analysis on high power slab laser end-pumped with laser diode arrays (LDA) are developed, and the steady laser power output of the thin slab laser is achieved in resonator with 4f system. The continuous-wave laser with average power of 3.24 kW is achieved through plano-concave resonator when the injecting power approaches to 10 kW. The loss coefficient of the laser resonator and the diffraction loss of the slab end are obtained indirectly by measuring the saturated gain coefficient of the laser medium when the laser output power is steady. The influence of the overlap factor on the laser power is analyzed, and the experimental results provide the basis for the optimization design to high power slab lasers.

**Key words** lasers; slab laser; end-pumped; laser resonator; gain saturation; loss coefficient

**OCIS codes** 140.3460; 140.2010; 140.3410; 140.3480; 140.3530; 140.3580

## 1 引 言

随着大功率激光器及配套制造系统的不断进步,激光加工技术经过几十年的发展,逐渐形成了激光焊接、切割、打孔、打标和金属零件激光直接成形等多种应用工艺。与传统加工方法相比,激光加工具有最大限度地集中能量、易于操作、高柔性、高效率、高质量和节能环保等优点,目前已在电子、汽车

制造、机械加工、电子工业、航空航天和船舶等工业领域得到广泛应用<sup>[1~4]</sup>,几乎涵盖国民经济的所有领域。在激光工业加工系统中,激光器是激光加工设备的能量来源,要求性能稳定可靠,可长时间正常运行。尤其是随着大功率光纤研制技术的进步,高功率固体激光器输出的激光可以通过光纤耦合传输,可实现多工位、远距离工作,可用于大型钣金和

收稿日期: 2012-11-28; 收到修改稿日期: 2013-01-16

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

E-mail: limi@tsinghua.org.cn

非金属材料的切割、焊接等<sup>[5~7]</sup>,从而大大提高加工速度。

本课题组开展了激光二极管阵列(LDA)端面抽运高功率板条激光器的实验研究和理论分析。通过在谐振腔内加入  $4f$  成像系统,有效地解决了高功率抽运时激光器输出功率不稳定、板条端面容易损坏的问题,实现了连续而稳定的高功率激光输出。通过构建平凹腔,在 LDA 的注入功率将近 10 kW 时获得了 3.24 kW 的连续激光输出,同时还间接地测量了平凹腔的等效损耗系数和板条端面的衍射损耗等参数,为进行激光器输出功率数值模拟和优化设计奠定了基础。

## 2 谐振腔设计

Nd:YAG 晶体的尺寸为  $150.2 \text{ mm} \times 30.0 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm}$ ,端面切角为  $45^\circ$ ,掺杂原子数分数为 0.1%。LDA 抽运光从两端对称注入,实验测得 LDA 在工作电流为 100 A 时的总抽运功率为 10.8 kW,经过抽运耦合系统注入板条的耦合效率大约为 91%,注入板条内部的功率大约为 9.8 kW。因为抽运光不能完全被吸收,实验中通过调节水温控制板条端面出射的抽运光总功率不超过 600 W,因此晶体真正吸收的抽运功率大约为 9.2 kW。根据 Nd 上能级效率计算方法,可以计算出 Nd:YAG 晶体的转换效率为 72%。若不考虑放大自发辐射(ASE)的影响,Nd:YAG 晶体上能级转换的功率大约是 6.6 kW。由于此时激光晶体的小信号增益系数相当高,ASE

效应较强,实际上晶体上能级转换的功率会小于 6.6 kW。此外,ASE 效应还与功率提取状态密切相关,在实现充分功率提取的情况下,ASE 效应将会得到明显的抑制。

对于普通的平凹腔,随着 LDA 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。通过对多种光学谐振腔比较<sup>[8,9]</sup>,最终选择反像谐振腔结构(IIR)。在板条两端正交地放置两个平凸柱透镜  $F_1$  和  $F_2$ ,其焦距  $f$  均为 170 mm。板条的端面分别位于两个柱透镜的焦平面,腔镜  $M_1$  和  $M_2$  分别位于  $F_1$  和  $F_2$  的另一个焦点附近。激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,其光线传输矩阵为

$$M = \begin{bmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 2f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

根据光线传输矩阵可知,激光束刚好反像且大小不变。这样,谐振腔内激光束各部分的光程差关于光轴对称,就可以消除倾斜效应。可见,反像谐振腔具有很好的自稳定能力,能实现稳定的激光振荡输出<sup>[10]</sup>,反像谐振腔的结构如图 1 所示。

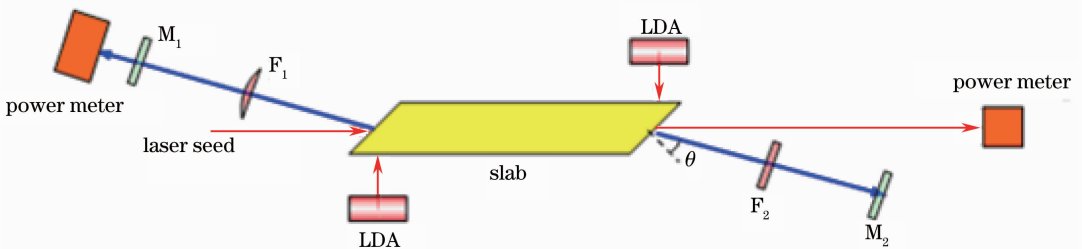


图 1 反像谐振腔示意图

Fig. 1 Sketch of image-inverting resonator

激光束在板条介质中的传输路径如图 2 所示,几何分析表明,激光束在板条端面不发生分裂的条件为<sup>[11]</sup>

$$L = NL_b, \quad (2)$$

式中  $L$  为板条总长度, $N$  和  $L_b$  分别为激光束在板条内部传播的周期数和周期长度, $N$  取正整数。根据几何光学的折射、反射定律,(2)式可以改写成

$$\begin{cases} L = 2tN \tan \beta \\ \beta = \alpha + \gamma \\ \sin \gamma = \frac{1}{n} \sin \theta \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $t$  为板条厚度, $\alpha$  为端面切角, $\gamma$  为折射角, $\theta$  为入射角, $\beta$  为反射角, $n$  是 Nd:YAG 晶体相对于空气的折射率。为了保证激光束在板条内部满足全反射条件,因此要求  $\beta$  大于全反射临界角。因为 Nd:YAG

晶体表面镀有  $\text{SiO}_2$  膜层,通过计算可得全反射临界角为  $52.8^\circ$ 。对于尺寸为  $150.2\text{ mm} \times 30.0\text{ mm} \times 2.5\text{ mm}$  的板条,由(3)式可以计算出一组合适的入射角。激光束以这些入射角进入板条后将不会在板条出射端发生分裂,不同入射角的具体数值如表 1

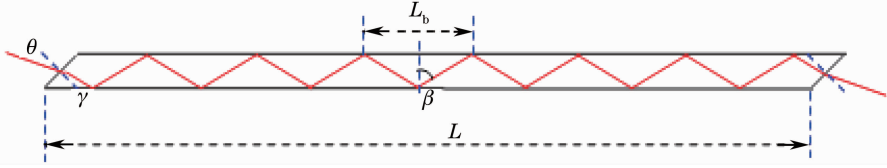


图 2 激光束在板条介质中的传输路径

Fig. 2 Transmission route of laser beam in slab medium

表 1 不同周期数对应的入射角

Table 1 Angles of incidence at different periodicities

N	13	14	15	16	17	18	19	20	21
$\theta / (^\circ)$	42.1	38.5	35.2	32.1	29.1	26.3	23.6	21.0	18.5

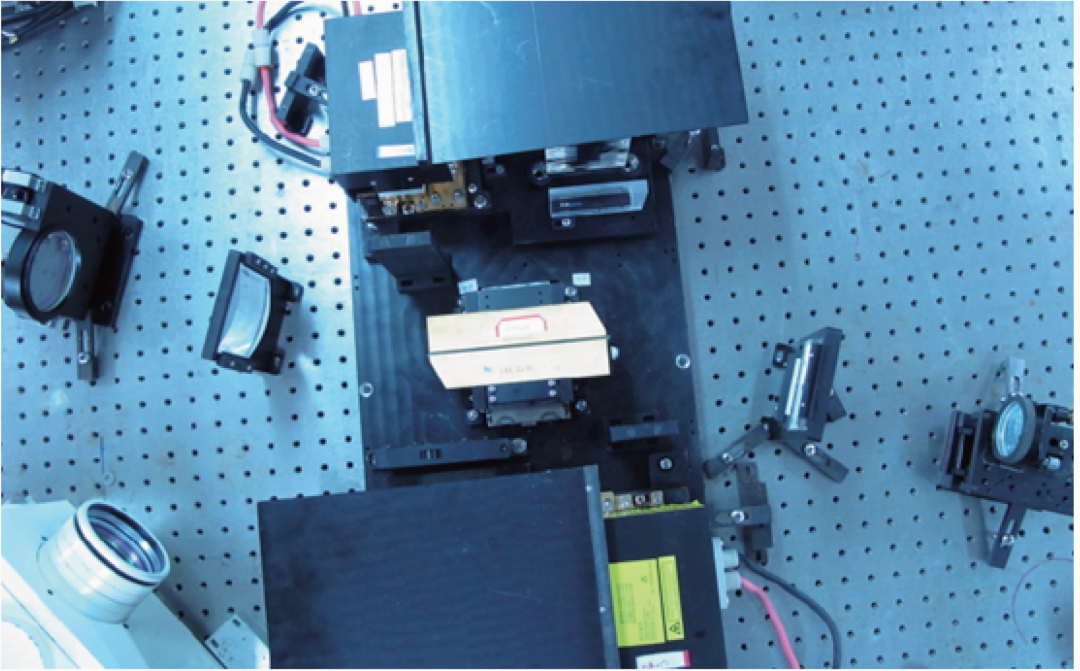


图 3 高功率板条激光器实验装置

Fig. 3 Experimental equipment of high power slab laser

### 3 谐振腔损耗系数测量

谐振腔的损耗系数是谐振腔的主要参数之一。为了测量激光谐振腔的损耗系数,设计了一种间接测量方法,使一束种子光按合适的角度入射到板条端面并从另一端出射到高灵敏度的功率计探头上,在此处分别测量未抽运时种子光的功率  $P_1$  和有激光稳定输出时种子光功率  $P_2$ ,就可以得到此时激光晶体内部的饱和增益系数为

$$g = \ln(P_2/P_1)/d_1, \quad (4)$$

式中  $d_1$  为种子光的增益长度, $g$  为饱和增益系数。当工作电流由 0 增长到 100 A 时,种子光功率从 540 mW 增加到 1057 mW。已知种子光入射角为  $42.1^\circ$ ,推算出种子光在板条内部传输的路径总长度为 164 mm,计算出相应的饱和增益系数为  $0.041\text{ cm}^{-1}$ 。

实际上,非掺杂区域没有增益,而掺杂区的增益略高于上面的计算值,上面的计算结果是掺杂区和非掺杂区域综合等效处理的结果,对计算激光器的

输出功率没有明显影响。

根据对图 2 所示的 Z 形光路的几何分析可知,板条内部光束的填充因子为<sup>[11]</sup>

$$F = \frac{\cos \gamma}{2 \sin \alpha \sin(\alpha + \gamma)}. \quad (5)$$

由于种子光与激光光路不重合,不同折射角对应的填充因子也不同。已知种子光的入射角为 $42.1^\circ$ ,对应的填充因子为 0.72;激光束的入射角为 $26.3^\circ$ 时,对应的填充因子为 0.80,完全未提取区域的面积占总面积的比例为 0.04。由于种子光的路径与激光束不一致,意味着种子光路径中有一部分处于未提取区域,因而其实际放大倍数要大于激光束传输路径上的放大倍数。根据几何光路分析,种子光通过未提取区域的面积占未提取区域面积的 50%左右。在不计 ASE 效应等损耗因素时,激光晶体上能级转换功率  $P$  为 6.6 kW,与小信号增益系数  $g_0$  的关系满足<sup>[12]</sup>

$$g_0 = P/VI_s, \quad (6)$$

式中  $V$  为激光晶体体积,  $I_s$  为激光晶体的饱和光强。对实验中所用的 Nd:YAG 晶体而言,  $I_s = 2.89 \text{ kW/cm}^2$ ,  $V = 11.265 \text{ cm}^3$ , 则由(6)式可得  $g_0 = 0.184 \text{ cm}^{-1}$ 。

根据填充因子推算出激光传输路径的等效增益系数为

$$g_a = (0.041 \text{ cm}^{-1} - 0.04 \times 0.5 \times 0.184 \text{ cm}^{-1}) / (1 - 0.04 \times 0.5) = 0.038 \text{ cm}^{-1}. \quad (7)$$

表 2 不同注入功率下板条激光器的输出功率

Table 2 Laser output powers of slab laser with different injected powers

Injected power /kW	4.9	6.1	7.3	8.6	9.8
Absorbed power /kW	4.2	5.2	6.5	7.9	9.2
Laser power /kW	1.29	1.832	2.308	2.84	3.24

根据谐振腔激光输出功率计算公式<sup>[12]</sup>

$$P = \frac{1-R}{1+R} A I_s \left( \frac{2g_0 l}{\delta_L - \ln R} - 1 \right), \quad (10)$$

式中  $A$  为晶体内部激光束的截面面积;  $\delta_L$  为谐振腔内部损耗总和,其值为 0.5315;  $l$  为谐振腔的几何腔长。根据几何光学和折射定律可以推算出  $A = 30 \text{ mm} \times 2.5 \text{ mm} \times \cos 14.1^\circ / \sin 45^\circ = 103 \text{ mm}^2$ 。在 LDA 工作电流为 100 A 时,激光器输出功率为 3.24 kW,此时谐振腔内的激光光强为  $8.29 \text{ kW/cm}^2$ ,是激光晶体饱和光强( $2.89 \text{ kW/cm}^2$ )的 2.9 倍,可见已经实现功率饱和提取,ASE 效应可以忽略。

根据激光器输出功率计算公式,理论计算得此时激光器的输出功率为 3.56 kW。实际输出功率小

谐振腔的损耗包括激光介质内部的散射和吸收、板条端面传输和衍射损耗、腔内透镜传输损耗以及输出镜的不完全反射(即激光输出)。根据能量守恒定律可知,当激光器在稳定输出时,其饱和增益必然会与上述各种损耗之和相平衡,据此可以计算端面衍射损耗。

实验中,测得板条单程透射率为 96%(不计端面衍射损耗),谐振腔内柱透镜单次透射率约为 99%,板条端面处的衍射损耗  $\delta$  和输出镜的反射率为 45%。激光往返一周时,2 次通过板条、4 次通过柱透镜、4 次在端面处有衍射损耗和 1 次反射,故没有增益时激光往返一周以后强度的衰减比例  $\eta$  为

$$\eta = 0.96^2 \times 0.99^4 \times (1 - \delta)^4 \times 0.45 = 0.3966 \times (1 - \delta)^4. \quad (8)$$

为维持激光稳定输出,激光板条的增益与损耗应当满足:

$$\exp(2g_a d_2) \times 0.3966(1 - \delta)^4 = 1. \quad (9)$$

此时激光增益长度  $d_2$  按入射角为  $26.3^\circ$ (折射角为  $14.1^\circ$ )进行计算,其值大约为 175 mm。由(8)式计算出板条端面衍射损耗高达 9.6%,这是由板条端面太窄以及激光多模振荡输出导致的。

## 4 板条激光器实验结果

实验中分别测量了不同工作电流下板条激光器的输出功率,如表 2 所示。

于理论值的主要原因可能是谐振腔衍射损耗测量不够准确。由于工作电流为 100 A 时谐振腔是多模振荡输出,不同模式的衍射损耗存在差异,模式阶数越高,衍射损耗越大,多个模式之间的竞争导致衍射损耗难以准确测量。通过等效方法测量出的衍射损耗比真实情况略小一些,该等效方法可以用来理论估计多模振荡输出激光器的输出功率。假定谐振腔的损耗保持不变,不同填充因子下的输出功率的数值模拟曲线如图 4 所示。

根据图 4 可知,提高激光束的填充因子可以相应地提高激光器的输出功率。不过提高填充因子时也需要注意到激光晶体内部 Z 形光路传输效率的变化。如果为提高激光束填充因子而导致晶体内部

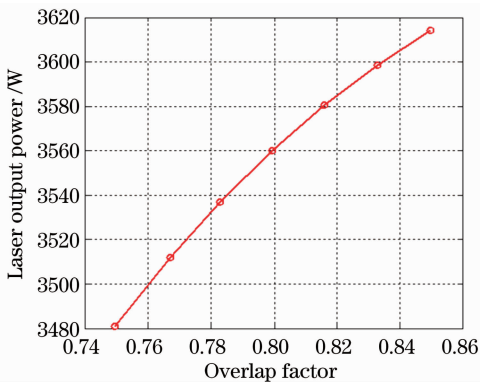


图 4 输出功率随填充因子的变化

Fig. 4 Laser output power versus overlap factor

的激光传输效率下降及谐振腔损耗增加,则激光器的输出功率反而会下降。

## 5 结 论

开展了 LDA 端面抽运高功率板条激光器实验研究和理论分析,通过在谐振腔内部加入  $4f$  成像系统有效解决了高功率抽运时激光功率不稳定、板条端面易损坏的问题,实现了连续而稳定的高功率激光输出。通过构建平凹腔,在注入功率接近 10 kW 时获得了 3.24 kW 连续激光输出,间接地测量了平凹腔的腔内损耗系数和板条端面的衍射损耗等参数,并分析了光束填充因子对激光器输出功率的影响。实验结果对开展高功率板条激光器谐振腔的优化设计、提高高功率板条激光器的工作安全性和实现激光器稳定输出有一定的意义。

## 参 考 文 献

- Zhang Lei, Yao Jinsong, Xing Lina *et al.*. Application of laser processing technology to manufacturing space opto-mechanical structures[J]. *OME Information*, 2011, **28**(11): 8~12  
张 雷, 姚劲松, 邢利娜等. 激光加工技术在空间光机结构制造中的应用[J]. *光机电信息*, 2011, **28**(11): 8~12
- Yu Xianzhao, Zhu Huabing, Feng Xiao *et al.*. CNC laser cutting tool's development and key technologies [J]. *Development & Innovation of Machinery & Electrical Products*, 2011, **24**(3): 176~178  
余先照, 朱华炳, 冯 霄等. 数控激光切割机开发及其关键技术分析[J]. *机电产品开发与创新*, 2011, **24**(3): 176~178

- Chen Canjun, Zhong Rutao, Wang Lianyun. Application of laser processing technology in metallurgy sector [J]. *Wisco Technology*, 2010, **48**(3): 58~61  
程灿军, 钟如涛, 汪连运. 激光加工技术在冶金行业的应用[J]. *武钢技术*, 2010, **48**(3): 58~61
- Chu Qingchen, Yu Gang, Lu Guoquan *et al.*. Two-dimensional numerical investigation for the effects of laser process parameters on hole type during laser drilling[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603001  
褚庆臣, 虞 钢, 卢国权等. 激光打孔工艺参数对孔型影响的二维数值模拟研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603001
- Wang Xuhuang, Yao Jianhua, Zhou Guobin *et al.*. Numerical simulation and experiment of laser cutting liquid crystal display glass substrates[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603003  
汪旭煌, 姚建华, 周国斌等. 液晶玻璃基板激光切割数值模拟与实验[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603003
- Zhang Mingjun, Chen Genyu, Li Shichun *et al.*. Experimental investigation on fiber laser overlap welding of automotive aluminum to galvanized steel [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603010  
张明军, 陈根余, 李时春等. 车用铝合金与镀锌钢光纤激光搭接焊试验研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603010
- Yang Sheng, He Qiong, Wang Ying. Fiber delivery pulsed solid state laser cutting system [J]. *Laser Journal*, 2011, **32**(6): 41~42  
杨 晟, 何 琼, 王 英. 光纤传输脉冲固体激光切割机系统 [J]. *激光杂志*, 2011, **32**(6): 41~42
- Zhang Lingling, Meng Junqing, Huang Yan *et al.*. Recent advances in high-power solid slab lasers [J]. *Laser & Optoelectronic 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
- 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
- D. Goodno Gregory, Stephen Palese, Joseph Harkenrider *et al.*. Yb: YAG power oscillator with high brightness and linear polarization [J]. *Opt. Lett.*, 2001, **26**(21): 1672~1674
- Qi Enyu. Studies on the Resonator of End-Pumped, Conduction-Cooled Zig-Zag Slab Laser [D]. Changsha: The National University of Defense Technology, 2009. 11~16  
齐恩宇. 传导冷却端面泵浦板条式激光器谐振腔技术研究[D]. 长沙: 国防科技大学, 2009. 11~16
- W. Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Sun Wen, Jiang Zewen, Chen Guoxiang Transl.. Beijing: Science Press, 2002. 78~90  
W. 克希耐尔. 固体激光工程[M]. 孙 文, 江泽文, 程国祥译. 北京: 科学出版社, 2002. 78~90

栏目编辑: 张 腾