

# 泵浦匀化对 Innoslab 激光放大器光束质量的改善\*

何 涛<sup>1,2,3</sup>, 陈小明<sup>2,3</sup>, 鲁燕华<sup>2,3</sup>, 张 彬<sup>1</sup>, 徐 浏<sup>2,3</sup>, 叶先林<sup>1,2,3</sup>, 许夏飞<sup>2,3</sup>

(1. 四川大学 电子信息学院, 成都 610065; 2. 中国工程物理研究院 应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900;  
3. 中国工程物理研究院 高能激光科学与技术重点实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 针对结构紧凑的部分端面泵浦混合腔板条激光放大器, 研究了泵浦匀化对其输出激光光束质量的改善作用。基于 ZEMAX 仿真软件, 设计并对比分析了直接成像和波导匀化后再成像两种泵浦耦合方式对激光二极管阵列慢轴(晶体宽度)方向光强分布均匀性的影响, 发现波导匀化后泵浦均匀性得到明显提升且激光二极管阵列发光坏点对泵浦成像的影响得以弱化。进一步实验验证了泵浦匀化对 Innoslab 激光放大器性能的改善作用: 波导匀化后慢轴方向泵浦均匀度从 90.6% 提高到 95.4%, 进而使 3 通放大后输出激光光束质量因子  $M^2$  从 2.41 提升到 1.55, 并且有效抑制了多通放大腔内的自激振荡。

**关键词:** Innoslab 激光放大器; 波导匀化; 泵浦均匀度; 光束质量; 自激振荡

中图分类号: TN248.1; O439

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.190277

## Improvement of beam quality by pump homogenization of Innoslab laser amplifier

He Tao<sup>1,2,3</sup>, Chen Xiaoming<sup>2,3</sup>, Lu Yanhua<sup>2,3</sup>, Zhang Bin<sup>1</sup>, Xu Liu<sup>2,3</sup>, Ye Xianlin<sup>1,2,3</sup>, Xu Xiafei<sup>2,3</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. Institute of Applied Electronics, CAEP, Mianyang 621900, China;

3. Key Laboratory of Science and Technology on High Energy Laser, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** The effect of pump homogenization on the beam quality of the output laser is studied for a compact partially end-pumped hybrid-cavity slab laser amplifier, i.e. Innoslab laser amplifier. Using ZEMAX simulation software, two pump coupling modes, direct imaging and homogenization with waveguide were designed, and their effects on the uniformity of light intensity distribution in the slow axis (crystal width) direction of laser diode arrays were compared. It is found that the pump uniformity is significantly improved after the waveguide is homogenized and the influence of the laser diode array luminescence dead pixels on the pump imaging is weakened. Furthermore, the effect of pumping homogenization on the performance of Innoslab laser amplifier is verified by experiments: the uniformity of slow-axis pumping increases from 90.6% to 95.4% after homogenization with waveguide, and the quality of output laser beam  $M^2$  increases from 2.41 to 1.55 after three-pass amplification, and the self-oscillation in the cavity is effectively suppressed.

**Key words:** Innoslab laser amplifier; homogenization with waveguide; pump uniformity; beam quality; self-oscillation

高功率全固态激光器(即半导体激光泵浦固体激光器)由于具有转换效率高、结构紧凑、使用和维护方便等优点,在科研、工业加工和军事等领域有着广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。由于传统固体激光振荡器在高功率运转条件下腔内热负载导致的光束质量退化严重<sup>[3]</sup>,采用主振荡器功率定标放大(MOPA)方式是目前实现高功率激光输出同时保证高光束质量的重要途径,其主要包括光纤、棒状、板条等激光增益放大器构型<sup>[4-5]</sup>。1998年,德国夫琅和费研究所的杜克明博士等人<sup>[6]</sup>提出一种部分端面泵浦混合腔(非稳-稳腔)激光器(即 Innoslab 激光器),实现了连续 31 W 激光输出,非稳腔(晶体宽度)和稳腔(晶体厚度)方向光束质量  $M^2$  因子分别为 1.7 和 1.3。近年来,基于 Innoslab 结构的板条激光放大器成为国内外研究的热点,采用 Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub>, Yb:YAG 等激光增益介质,实现了 ns, ps 和 fs 等

\* 收稿日期: 2019-07-26; 修订日期: 2019-11-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(61705208)

作者简介: 何 涛(1994—),男,硕士研究生,主要从事高功率、高光束质量板条激光器研究; hetaosix@163.com。

通信作者: 许夏飞(1990—),男,硕士,助理研究员,主要从事非线性频率变换技术方面的研究; xrfmxx@sina.com。

脉冲体制下高平均功率、高光束质量激光输出<sup>[7]</sup>。2010年,德国夫琅和费研究所 P. Russbuedt 等人采用两级增益介质为 Yb:YAG 的 Innoslab 放大器串接,实现了 1.1 kW 飞秒激光放大输出,非稳和稳腔方向的光束质量  $M^2$  因子分别为 2.7 和 1.5<sup>[8]</sup>。2012年, Hua Lin 等人设计出以 Nd:YVO<sub>4</sub> 为增益介质的 Innoslab 皮秒激光放大器,实现了分别为 1.12 和 1.09 倍衍射受限的光束质量  $M^2$  因子,脉宽为 8.4 ps,平均功率 105 W 的激光输出<sup>[9]</sup>。2017年, M. Strotkamp 等人采用 Nd:YAG 作为增益介质的两个 Innoslab 板条放大器串接,实现了单脉冲能量为 525 mJ,脉宽为 30 ns,非稳和稳腔方向的光束质量  $M^2$  因子分别为 1.8 和 1.4 的激光输出<sup>[10]</sup>。

Innoslab 激光放大器主要由两个部分组成<sup>[11]</sup>:部分端面泵浦板条晶体和混合腔。其中,部分端面泵浦是指激光二极管(LD)阵列泵浦光被耦合系统整形成一条横截面为长方形的窄细线入射至晶体端面,在晶体中央形成了薄片状的增益层。LD 泵浦阵列的快轴方向对应板条晶体的厚度方向,此方向为稳腔结构,需对泵浦光进行聚焦,光强近高斯分布;LD 泵浦阵列的慢轴方向为板条晶体的宽度方向,该方向是非稳腔结构,需用近乎一维均匀分布的光进行泵浦,以实现高增益、高光束质量的多通放大<sup>[12]</sup>。在 Innoslab 放大器中,泵浦光均匀特性对光束质量改善是至关重要的,文献 [6] 和文献 [13] 分别报道了泵浦(LD 阵列)光直接成像、加波导匀化后再成像至 Innoslab 晶体的两种不同耦合技术,均获得了高光束质量的放大激光输出。然而,在当前已公开的文献中均未有关于泵浦均匀性对输出激光光束质量影响的理论与实验研究结果报道。本文通过理论计算和实验,对比研究了不同泵浦匀化情况下 Innoslab 激光放大器放大激光的光束质量,当泵浦成像光斑均匀性由 90.6% 提高到 95.4% 时,光束质量  $M^2$  因子从 2.41 提升到 1.55,同时还使多通放大腔内的自激振荡得到有效抑制。

## 1 泵浦耦合设计分析

针对尺寸为 10 mm( $y$ ) $\times$ 1.2 mm( $x$ ) $\times$ 12 mm( $z$ ) (宽 $\times$ 厚 $\times$ 长)的 Nd:YAG 板条晶体宽度方向的泵浦光强分布进行设计分析,通过对 10 个巴条(Bar)的 LD 垂直阵列慢轴方向采用直接成像和波导匀化后再成像两种耦合方式实现 10 mm( $y$ ) $\times$ 0.6 mm( $x$ )的窄细线耦合泵浦光束,进而对比了其宽度方向光强均匀特性。

### 1.1 泵浦匀化原理

LD 阵列单个巴条的慢轴方向尺寸为 10 mm,光线发散角为 5°,由 20 个发光点组成。因此,慢轴方向采用直接 1:1 成像,可实现 10 mm 宽泵浦,进而通过各发光点自然混束即可获得较均匀的泵浦光强分布。然而,当巴条中存在发光坏点时,由于自然混束的匀化效果有限,将引起泵浦光强分布出现大的起伏,且自然混束通常在传输距离较远时才能到达要求的均匀度。相较于直接成像中自然混束方式,通过引入光学波导强制混束方式能在较短距离内达到泵浦均匀度要求,且边缘处的光强分布能得到极大改善,实现较尖锐的光束边缘,这一点在自然混束中是无法实现的<sup>[14]</sup>。

基于光学波导泵浦耦合匀化的原理与光束在光纤中传输过程相似,发散的光线通过在波导内部多次全反射来实现混束<sup>[13]</sup>。图 1 为波导匀化原理示意图。点光源  $A$  产生的光线,按一定角度传播一段距离  $L$  到达  $B$  处后光斑直径扩散为  $D$ ,如图 1(a)所示。加入波导后,因为波导的全内反射不改变光线传播的角度,因而在  $B$  处可以近似看作波导将光斑直径为  $D$  的光束分割为与波导截面大小相等的  $n$  份:  $\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_n$ , ( $\sum_{i=1}^n \delta_i = D$ ),将其中每一份  $\delta_i$  进行叠加,达到强制性混和光束的目的(图 1(b))。当  $D/d$  越大( $d$  为波导的厚度),光束被分割的份数  $n$  就越多,得到的光强分布就越均匀;对于同一点光源,  $L/d$  越大,光束匀化的效果越明显,即长宽比越大的波导的泵浦匀化能力越好。对于多个发光点组成的巴条,波导不仅将单个发光点发出的光线进行了混束,而且还能把所有发光点的光束整合在一起进行混束,从而进一步提高泵浦均匀度。

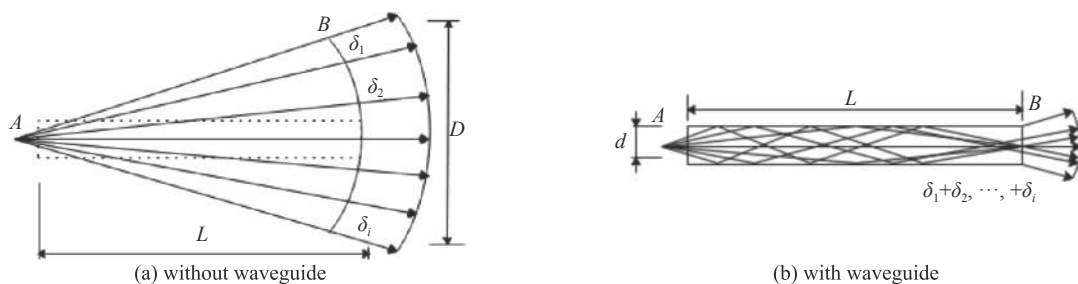


Fig. 1 Schematic diagram of homogenization with waveguide

图 1 波导匀化原理示意图

光强分布均匀度( $U$ )采用均方根值(RMS)计算, 计算式为

$$U = 1 - \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [q_{zi}(x, y, z) - q_z(x, y, z)]^2}{n-1}}}{q_z(x, y, z)} \quad (1)$$

式中:  $q_{zi}(x, y, z)$ 为  $z$  方向第  $i$  个取样点的非相干辐射强度;  $q_z(x, y, z)$ 为  $n$  个取样点的非相干辐射强度平均值。

## 1.2 设计分析

基于 ZEMAX 软件, 本文对比了 10 个巴条的 LD 垂直阵列(设置输入功率为 1 W)慢轴方向采用直接成像和波导匀化后再成像两种泵浦耦合方式在其宽度方向泵浦光强分布特性, 并仿真分析了 LD 阵列巴条存在发光坏点情况对泵浦均匀性的影响。

图 2 为 LD 阵列慢轴方向直接成像泵浦耦合光路结构示意图, 该系统具有简单、易实现的特点。慢轴( $y$ )方向采用柱透镜组  $C_1$  和  $C_3$  实现 1:1 成像, 快轴( $x$ )方向采用柱透镜  $C_2$  会聚。图 3 为利用 ZEMAX 软件优化耦合光路后经光线追迹得到的耦合系统像面处二维光强分布和宽度方向分布曲线。像面处泵浦光束尺寸为 10 mm( $y$ ) $\times$ 0.6 mm( $x$ )的窄细线, 由于种子光在晶体端面的光斑直径约为泵浦光斑厚度的 3/4, 因此在泵浦光斑中心 3/4 宽度、长度 9 mm 内取  $n=300$  个均匀采样点, 计算得光强分布均匀度  $U=85\%$  和峰谷值  $PV=30.36 \text{ W/cm}^2$ , 快轴方向近视为高斯分布。

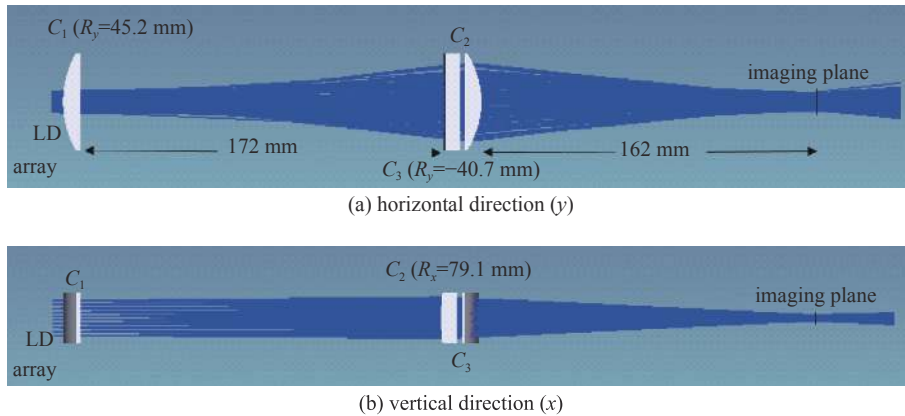


Fig. 2 Optical configuration of the direct-imaging pump

图 2 直接成像泵浦耦合光路结构图

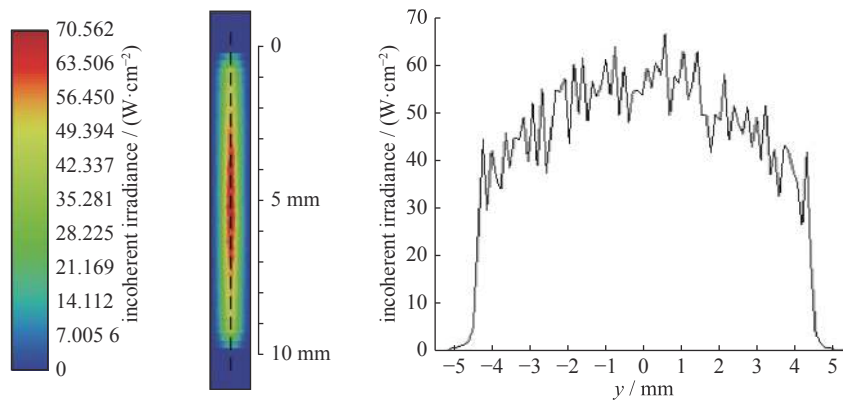


Fig. 3 Intensity distribution of the direct-imaging pump

图 3 直接成像泵浦耦合二维光强分布和宽度方向分布曲线

采用同样方式, 我们优化设计了加入矩形光波导进行泵浦匀化的耦合系统, 如图 4 所示。LD 阵列慢轴方向光束通过相同曲率半径的柱透镜  $C_1$ ,  $C_2$  和  $C_3$  会聚进波导中, 经过波导混束后, 在出射端面得到匀化的泵浦光束, 出射光束经相同曲率半径的柱透镜  $C_4$ ,  $C_5$  和球透镜组  $f$  组成的成像系统整形成 10 mm 长的窄细线。同时球透镜组对快轴方向的准直光束进行会聚, 束腰半径约为 0.3 mm。经优化设计, 矩形波导尺寸为 3.2 mm( $y$ ) $\times$ 12 mm( $x$ ) $\times$ 100 mm( $z$ )。波导匀化后再成像泵浦耦合二维光强分布和宽度方向分布曲线如图 5 所示。利用相同采样方式取均匀采样点  $n=300$  时, 光强分布均匀度  $U=96\%$ ,  $PV=10.07 \text{ W/cm}^2$ 。相比直接成像泵浦耦合方式, 其泵浦均匀性明显提高。

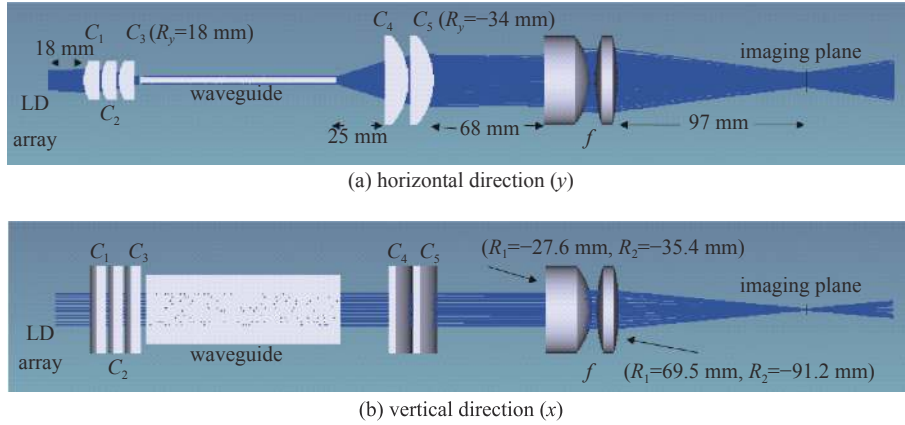


Fig. 4 Optical configuration of the waveguide-homogenization pump  
图 4 波导匀化后再成像泵浦耦合光路结构图

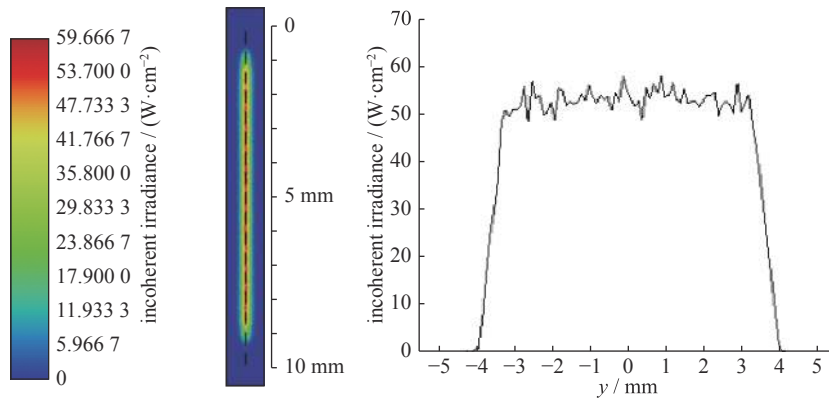


Fig. 5 Intensity distribution of the waveguide-homogenization pump  
图 5 波导匀化后再成像泵浦耦合二维光强分布和宽度方向分布曲线

同时,考虑到实际激光器在长期运行中 LD 泵浦阵列巴条内的发光点存在退化甚至损坏的风险,我们模拟分析了其对泵浦均匀性的影响。假定 LD 阵列 10 个巴条中心的发光点均不发光(即出现坏点)时,模拟得到上述匀化前后两种耦合方式在宽度方向的泵浦光强分布曲线,如图 6 所示。可以看到,直接成像泵浦耦合方式的成像光斑中心出现明显的、由发光坏点引起的光强凹陷,此时,光斑中心长度 9 mm 范围内的泵浦均匀度  $U=80.5\%$ ,  $PV=34.05 \text{ W/cm}^2$ ;而波导匀化泵浦耦合得到的成像光斑宽度方向则较为均匀,对于中心长 8 mm 的泵浦均匀度  $U=93.7\%$ ,  $PV=10.14 \text{ W/cm}^2$ 。由此可见,加入波导可以减小 LD 阵列坏点对泵浦光斑均匀度的影响,提高激光器的长时间运行可靠性和性能稳定性。

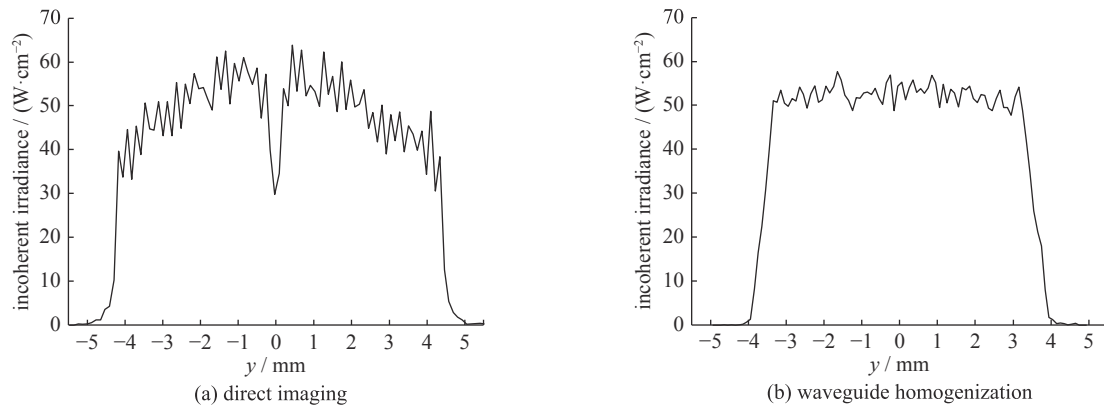


Fig. 6 Intensity distribution curve of the pump in the width direction when the bars of the LD array have a point defect  
图 6 LD 阵列巴条出现发光坏点时,宽度方向泵浦光强分布曲线

## 2 实验结果和对比

采用上述设计的直接成像和波导匀化再成像两种泵浦耦合系统,搭建了 Innoslab 激光放大器以验证其泵浦均



匀性对放大输出性能的影响作用,实验光路结构如图 7 所示,波导匀化泵浦耦合实验装置如图 8 所示。Innoslab 放大光路主要包括 10 个巴条的 LD 泵浦阵列、泵浦耦合系统、Nd:YAG 晶体板条、种子光和多通放大折叠腔。对 Nd:YAG 晶体来说,与 808 nm 相比较,885 nm 波长泵浦时的量子缺陷和热负荷都较小且斜效率更高,Nd:YAG 晶体对 885 nm 波长的吸收线宽约为 2.7 nm,比 808 nm 波长的吸收线宽窄<sup>[15]</sup>。故 LD 阵列采用准连续窄线宽 885 nm 泵浦源,经耦合系统实现双端泵浦。Nd:YAG 晶体尺寸为 10 mm( $y$ ) $\times$ 1.2 mm( $x$ ) $\times$ 12 mm( $z$ ) (宽 $\times$ 厚 $\times$ 长),掺杂浓度为 0.3%。窄线宽 1 064 nm 光纤种子光经整形后注入晶体实现 3 通放大。放大器非稳腔方向是由曲率半径  $R=-1\ 200$  mm 和  $R=600$  mm 的两个柱面镜组成,稳腔方向是平-平腔结构。实验中,LD 阵列泵浦源脉冲重复频率为 500 Hz,脉宽 220  $\mu$ s;光纤种子源产生脉冲重复频率为 500 Hz、脉宽 100  $\mu$ s,  $M^2=1.17$  的种子光,设置种子光和泵浦源的同步延时为 120  $\mu$ s。实验测得泵浦耦合系统耦合效率为 90.6%。855 mW 种子光进入 Innoslab 放大器进行 3 通放大,最高获得 6.7 W 平均功率放大输出。

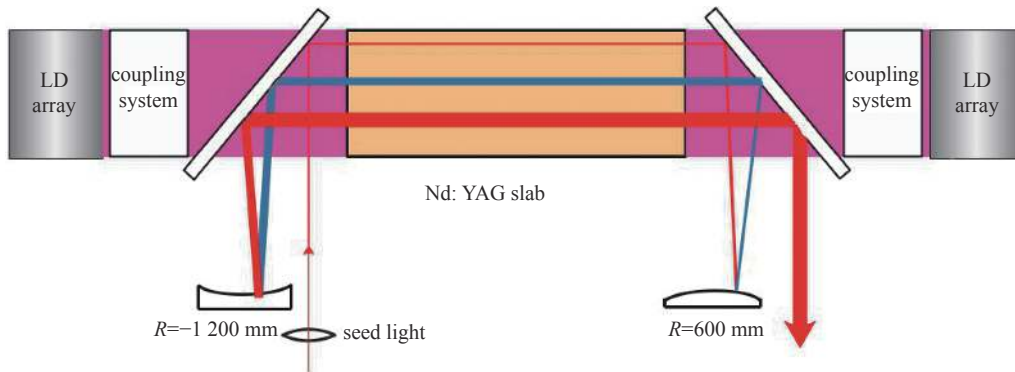


Fig. 7 Schematic diagram of the Innoslab laser amplifier

图 7 Innoslab 激光放大器结构示意图

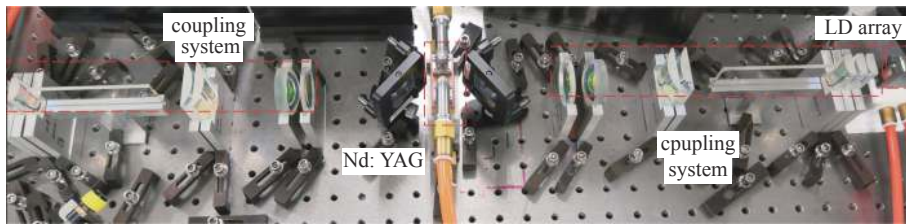
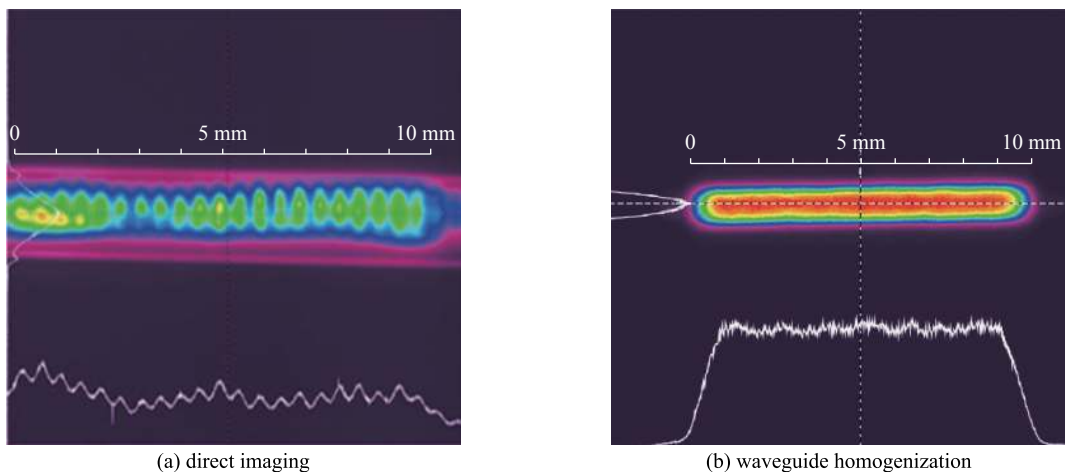


Fig. 8 Waveguide homogenization pump coupling experimental device

图 8 波导匀化泵浦耦合实验装置

图 9(a)和图 10(a)为采用 CCD 相机测得的直接成像泵浦耦合光强分布和使用 Spiricon 公司生产的 M-200 型  $M^2$  因子测量仪得到的放大输出激光光束质量。用 MATLAB 对光强分布图进行灰度处理,同样在泵浦光斑长度 9 mm、



(a) direct imaging

(b) waveguide homogenization

Fig. 9 Pump intensity distribution

图 9 泵浦耦合光强分布

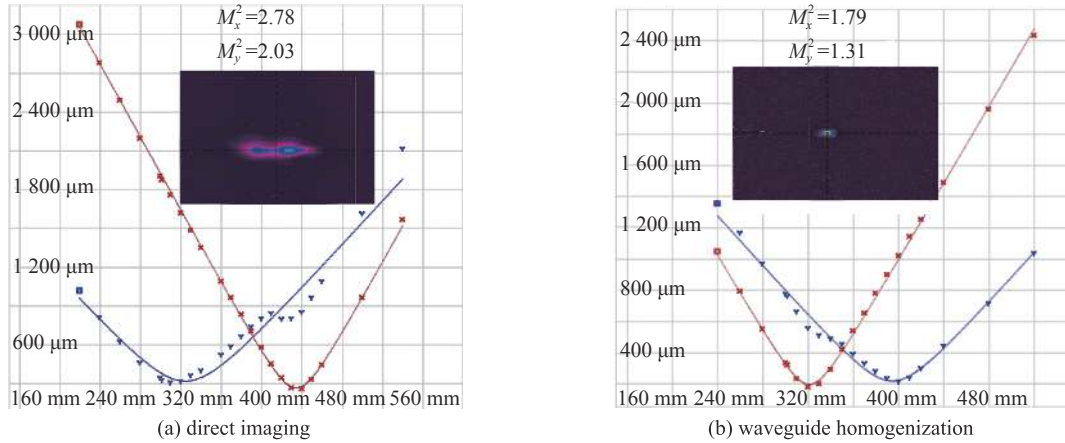


Fig. 10 Laser beam quality after amplification

图 10 放大输出激光光束质量

宽度中心 3/4 宽内取  $n=300$  个均匀采样点, 计算得泵浦均匀度  $U=90.6\%$ , 比直接成像的仿真结果稍大。泵浦电流加载至 200 A 时, 经放大后的输出激光光束质量  $M^2=2.41(M_y^2=2.78, M_x^2=2.03)$ 。

同样地, 搭建波导匀化泵浦耦合的 Innoslab 放大器。实验测试了泵浦光成像位置处的光强分布和经 3 通放大的输出激光光束质量, 如图 9(b) 和图 10(b) 所示。光强分布图利用相同采样方式, 计算泵浦均匀度  $U=95.4\%$ 。泵浦电流加载至 200 A 时, 种子光 3 通放大后测得光束质量  $M^2=1.55(M_y^2=1.79, M_x^2=1.31)$ , 最高获得 8.9 W 平均功率放大输出。由此可见, 相比直接成像泵浦耦合方式, 波导匀化明显改善了泵浦成像均匀度和 Innoslab 放大器输出的激光光束质量。

同时, 实验中还发现随着泵浦电流增加, 直接泵浦耦合 Innoslab 放大输出的激光脉冲在光滑脉冲基底上产生了无序的自激振荡尖峰“毛刺”(如图 11 所示), 而在波导匀化耦合 Innoslab 放大器中无此现象发生。分析其主要原因在于: Innoslab 板条激光放大器宽度方向采用非稳腔结构以实现多通高增益放大输出, 当泵浦光慢轴宽度方向存在光强不均匀时, 会产生热梯度和局部热焦距, 从而破坏非稳腔放大结构, 进而容易产生激光自激振荡。

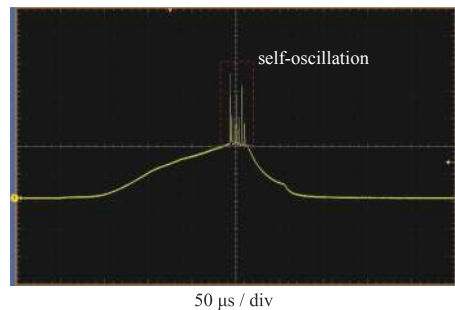


Fig. 11 Waveform of a single pulse when self-oscillation occurs

图 11 产生自激振荡时单脉冲波形图

### 3 结论

针对结构紧凑的部分端面泵浦混合腔 Innoslab 激光放大器, 本文理论分析对比了直接成像和波导匀化泵浦耦合两种方式的泵浦光强分布均匀性, 发现波导匀化可明显提高泵浦均匀性且能够弱化 LD 阵列 bar 条发光坏点可能带来的不利影响。在此基础上, 实验验证了泵浦匀化对 Innoslab 激光放大器光束质量的改善作用: 波导匀化后慢轴方向泵浦均匀度从 90.6% 提高到 95.4%, 3 通放大后输出激光光束质量  $M^2$  因子从 2.41 提升到 1.55, 并使放大腔内的自激振荡得到了有效抑制。

#### 参考文献:

- [1] 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. (Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power all solid state laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(7): 1605-1618)
- [2] 石鹏, 李代军, 张恒利, 等. 大功率部分端面抽运混合腔板条激光器[J]. 光学学报, 2004, 24(4): 491-494. (Shi Peng, Li Daijun, Zhang Hengli, et al. High power partially end-pumped slab laser with hybrid resonator[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(4): 491-494)
- [3] 毛小洁, 秘国江, 庞庆生, 等. 高功率高光束质量带内泵浦皮秒放大激光系统[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27: 061001. (Mao Xiaojie, Bi Guojiang, Pang Qingsheng, et al. High power high beam quality in-band pumping picosecond amplification laser system[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27: 061001)
- [4] Russbuedt P, Mans T, Hoffmann H D, et al. 1100 W Yb: YAG femtosecond Innoslab amplifier[C]//Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering. 2011: 7912-7921.
- [5] 杨彬. Innoslab激光放大器设计[D]. 南京: 南京理工大学, 2016: 10-16. (Yang Bin. Innoslab laser amplifier design. Nanjing: Nanjing University of Science and

- Technology, 2016: 10-16)
- [6] Du Keming, Wu Nianle, Xu Jiandong, et al. Partially end-pumped Nd: YAG slab laser with a hybrid resonator[J]. *Optics Letters*, 1998, 23(5): 370-372.
- [7] 徐浏. LD泵浦Innoslab激光振荡器和放大器研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2015: 10-32. (Xu Liu. LD-pumped Innoslab laser oscillators and amplifiers. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2015: 10-32)
- [8] Hoffmann H D, Weitenberg J, Russbueldt P, et al. Compact diode-pumped 1.1 kW Yb: YAG Innoslab femtosecond amplifier[J]. *Optics Letters*, 2010, 35(24): 4169-4171.
- [9] Lin Hua, LI Jinfeng, Liang Xiaoyan. 105 W, < 10 ps, TEM<sub>00</sub> laser output based on an in-band pumped Nd: YVO<sub>4</sub> Innoslab amplifier[J]. *Optics Letters*, 2012, 37(13): 2634-2636.
- [10] Hoffmann D, Elsen F, J. LÖHRING, et al. Two stage Innoslab amplifier for energy scaling from 100 to >500 mJ for future lidar applications[J]. *Applied Optics*, 2017, 56(10): 2886-2892.
- [11] Russbueldt P, Hoffmann D, Hofer M, et al. Innoslab amplifiers[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 2015, 21(1): 447-463.
- [12] Xu Liu, Zhang Hengli, He Jingliang, et al. Double-end-pumped Nd: YVO<sub>4</sub> slab laser at 1064 nm[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(12): 2012-2014.
- [13] 林林, 过振, 李兵斌, 等. 光纤耦合激光束输出光空间分布及其影响因素分析[J]. 光子学报, 2011, 40(8): 1205-1210. (Lin Lin, Guo Zhen, Li Bingbin, et al. Light intensity distribution of fiber-coupled laser beam and analysis of impact factors[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2011, 40(8): 1205-1210)
- [14] 王宁, 朱化凤. 波导光束整形系统的理论研究[J]. 光学仪器, 2011, 33(6): 43-47. (Wang Ning, Zhu Huafeng. Theoretical research of waveguide beam reshaping system[J]. *Optical Instruments*, 2011, 33(6): 43-47)
- [15] Zhong Nan, Zhang Xiaofu, Ma Qinglei, et al. Comparison of Nd: YAG ceramic laser pumped at 885 nm and 808 nm[J]. *Chinese Physics Letters*, 2009, 26: 054211.