

文章编号: 0258-7025(2009)01-0051-05

高效大功率激光二极管阵列端面抽运耦合系统

段文涛 蒋东宾 蒋学君 蒋新颖 徐美健 於海武

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 利用光线追迹法为 12 kW 激光二极管(LD)阵列抽运的 Yb:YAG 激光器设计了一套空心导管型耦合系统并开展了耦合实验,以研究大功率 LD 阵列端面抽运结构的高效耦合技术及模拟设计方法。基于 LD 结构和发光特性,以高斯型微激射元为基本单位建立单条 LD 和 LD 阵列光源模型,设计了由透镜和镀银板构成的抽运光汇聚传输系统。实验结果表明,该耦合系统实现了对抽运光的高效耦合,且强度分布与模拟结果一致。该耦合系统传输损耗低,反射板的反射率为 94% 时耦合效率达 92.3%;输出光束具有良好的传输性能,有效抽运区域接近理论值,且增益介质表面分布均匀,满足实验要求。

关键词 激光技术;激光二极管;空心导管;光线追迹

中图分类号 TN243 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093601.0051

High Power Laser Diode Arrays End-Pumped Efficient Coupling System

Duan Wentao Jiang Dongbin Jiang Xuejun Jiang Xinying Xu Meijian Yu Haiwu

(Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In order to study the efficient coupling system and its stimulation method for the end-pumped structure of high power laser diode (LD) arrays, a hollow duct coupling system for 12 kW LD pumped Yb:YAG laser was designed by ray tracing method. Based on the LD bar's structure and beam parameters, the source models about LD bar and array were simulated by arranging emitters with Gaussian beam. In the coupling system, two lenses and silver-coated flat reflectors were used to concentrate pumping radiations. The experimental results have confirmed that the coupling system achieve a high efficiency and the energy distribution is agreed well with the theoretical analysis. The coupling efficiency of the system is 92.3% on the condition of 94% reflectivity of reflectors. The coupling beam shows excellent propagation characteristics and large uniform pump field on the surface of gain medium which meet the requirement of the Yb:YAG laser very well.

Key words laser technique; laser diode; hollow duct; ray tracing

1 引 言

高效抽运耦合技术是采用端面结构的激光二极管(LD)抽运的固体激光器(DPSSL)系统的关键单元技术之一,其目的是将 LD 阵列射出的抽运光传输汇聚至激光介质,使抽运强度提升至每平方厘米数千瓦至数十千瓦以上,以满足激光介质的高效抽运要求。目前,在已知的多种端面抽运光耦合方式中,空心导管型耦合系统具有结构简单、耦合效率高、均匀性好、可等比例扩张及易模块化等多种优点,在满足单元技术要求的同时降低了工程化难度,且具有较强的普适性,适合于各种规模的 DPSSL 系统,尤其在中大型 DPSSL 系统中具有十分显著的优势。在一些中大型 DPSSL 系统中,空心导管

型耦合系统已成为抽运耦合技术的主角之一,国际上正在建设的四大百焦耳级 DPSSL 激光驱动器中,已有美国 Mercury 装置和法国 Lucia 装置的放大器单元采用空心导管型的耦合系统^[1,2]。国内对于中等规模以上的 DPSSL 系统的耦合研究尚处于起步阶段,文献[3]报道中国工程物理研究院在建的 Nd:YLF 激光放大器采用透镜空心导管型耦合系统汇聚 48 kW LD 抽运源,设计耦合效率 70%;其他针对数千瓦以上抽运源的耦合研究多采用正交柱面透镜来实现^[4~6],这种方式结构复杂且扩展性较差,不利于更大规模的 DPSSL 系统。

本文基于光线追迹原理,模拟设计了一套空心导管型耦合系统,并将其成功运用于 12 kW LD 端

收稿日期:2008-02-20;收到修改稿日期:2008-04-22

作者简介:段文涛(1982—),男,主要从事高功率固体激光器研究工作。E-mail:mofeie@126.com

面抽运的 Yb:YAG 激光器。

2 耦合系统设计

2.1 光源模型

激光二极管阵列由若干条 LD 线阵组成,当前市售的准连续(QCW)型单条 LD 典型参数如表 1 所示。这种类型的 LD 中,每个微激射元(emitter)激光输出近场呈狭长的椭圆形,快轴(f)方向近似为基横模高斯分布,慢轴(s)方向激光输出为多模高斯分布,整个 10 mm 线阵的激光输出为这些微激射元输出的非相干叠加。

表 1 准连续 LD 条的典型参数

Table 1 Typical parameters of QCW LD bar

Emitting area after FAC lens /mm ²	Numbers of emitter	Emitter size /μm ²	Fast axis angle (FWHM) / (°)		Slow axis angle (FWHM) / (°)	Optical power /W
			Before FAC lens	After FAC lens		
1 (f) × 10 (s)	20~100	1 (f) × 50~200 (s)	30~40	0.5~1	6~10	100~200

FWHM: full-width at half-maximum.

$$I = I_0 e^{-2(x/x_0)^2} e^{-2(y/y_0)^2}, \quad (1)$$

式中 x_0 和 y_0 为光线沿 x 和 y 方向光通量 $1/e^2$ 时的半角角度即远场发散半角,计算时依据(1)式取单位角度内的光线,每条光线能量相等,光线数量与单位角度内能量呈正比。将建好的微激射元光源导入 TRACEPRO 光线追迹软件中,按照 LD 结构参数排列成单条 LD,进一步组成所需阵列,并按需求改变阵列的空间位置,至此,光源模型建立完成。峰值总功率 12 kW 的光源共 4 个阵列(stack),模拟光线

准确的光源模型是耦合系统模拟设计的前提条件,常见光源模型的基本单元是单条 LD,一般仅限于快轴或慢轴平面方向的二维模拟^[5,7,8],模拟光线数量较少,这种简化处理适用于小功率 LD 系统,对于中大型 DPSSL 系统的 LD 光源,这种简化模型与实际情况的偏差会导致结果出现较大误差,直接误导系统设计。这里以 LD 中的微激射元为基本单元建立光源模型,每个微激射元快慢轴空间分布简化为二维高斯分布,快轴方向束腰半径及角度取被准直之后的束腰大小及发散角,慢轴束腰半径和发散角均取实际值,快慢轴光强角度分布为

441 万条;每个阵列有 25 个 LD 条(bar),条间距 1.7 mm;单条 LD 峰值功率 120 W,高斯发散角小于 0.6° (快轴) × 7.5° (慢轴),尺寸为 1 mm(快轴) × 10 mm(慢轴),即微激射元快轴方向的束腰半径为 0.5 mm;单条 LD 中有 25 个微激射元,每个微激射元慢轴方向大小为 200 μm,即微激射元模型中慢轴方向束腰半径为 100 μm。按照光源模型建立流程和 12 kW LD 结构参数,建立起微激射元,单条 LD,单 stack 光源如图 1 所示。

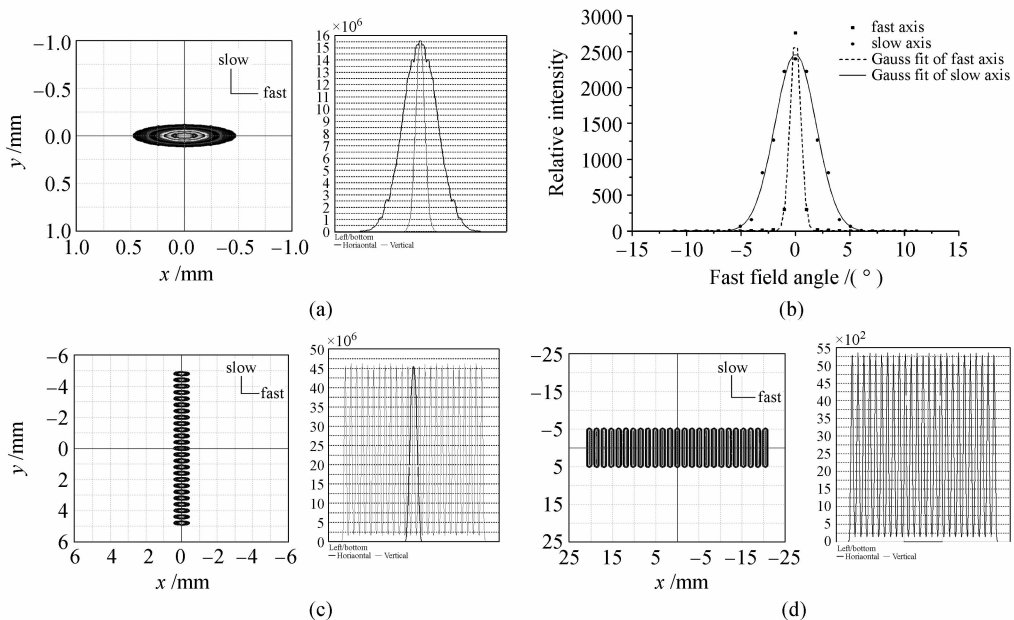


图 1 光源模型。(a) 微激射元;(b) 微激射元的远场发散角;(c) 单条 LD;(d) 单组 LD 阵列

Fig. 1 Source model. (a) emitter; (b) fast field of angle; (c) LD bar; (d) stack

图 1(a)为微激射元模型的近场分布,呈椭圆形,准直后的远场角度拟合曲线符合实际 LD 的角度分布规律,如图 1(b),且角度大小与生产商提供的远场角度值一致;25 个微激射元在慢轴方向排列,组成一条快轴准直的 LD,如图 1(c),再将 25 条 LD 沿快轴方向平行排列成一组峰值功率 3 kW 的 LD 阵列,如图 1(d),多个微激射元慢轴方向的近场分布轮廓为平顶状,即(d)中慢轴方向的单条 LD 近场平顶分布。单个 LD 阵列模拟光线 110 多万条,能够保证模拟结果满足强度、角度分布及调制度等信息需求。

2.2 耦合系统结构

根据空心导管型耦合系统的一般性设计原则,该耦合系统对 LD 阵列快慢轴方向的光线分别汇聚^[9]。用两个高反射率的平板传导收缩慢轴方向的光线,选择 3 倍缩束比将多数慢轴光线射出耦合系统的出射角控制在十几度内;用两块透镜汇聚快轴方向光线,同时阵列偏离主光轴一定角度,并在出口添加侧反射板以改善边缘强度分布,建立起如图 2 所示的耦合系统。

该耦合系统总长 300 mm,出口大小 7 mm(快轴)×6 mm(慢轴),增益介质迎光面口径 $\phi 10$ mm,距耦合系统出口 3 mm。两组 LD 阵列为一个模块并共用一块半径 181 mm 的矩形耦合透镜,每模块快轴

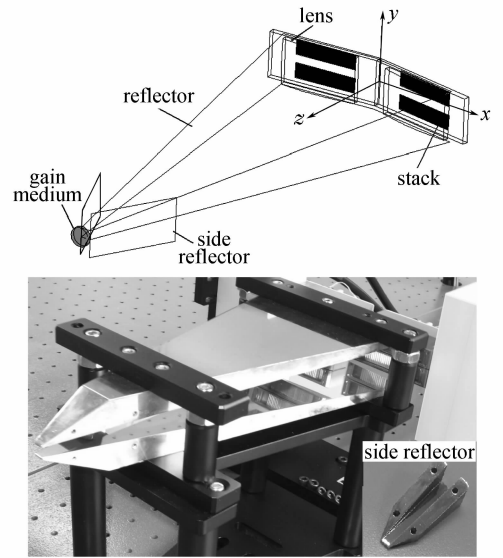


图 2 耦合系统结构

Fig. 2 Configuration of coupling system

方向抽运光的出射面法线与光轴夹角约 7° ,结合侧反射板实现对快轴方向光线的耦合;用两个抛光镀银反射板来传导慢轴光线,该反射面在 20° 入射角范围内的平均反射率为 94%,其基底采用不易变形而易导热的不锈钢材料,从而保证自然冷却效率的同时沉积在基底上的废热不会导致基底形变。

2.3 模拟结果

将光源模型引入耦合系统中,进行三维光线追

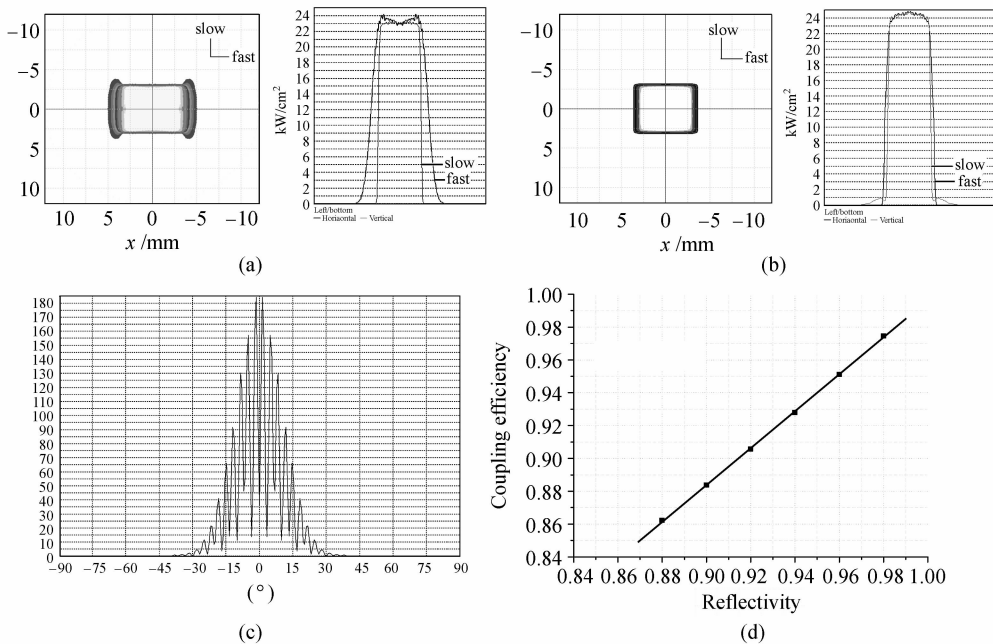


图 3 模拟结果。(a) 无侧反射板时激光介质面上的强度分布;(b) 有侧反射板时激光介质面上的强度分布;(c) 慢轴光线出射角分布;(d) 耦合效率与反射板平均反射率的关系

Fig. 3 Simulation results. Pump distribution on the surface of gain medium (a) without side reflectors and (b) with side reflectors; (c) distribution of exit angle in slow axis; (d) coupling efficiency dependent on the average reflectivity of reflector

迹模拟,反射板平均反射率取 94%时结果如图 3 所示。不用侧反射板时,均匀区域大小约 7 mm(快轴)×6 mm(慢轴),均匀区域平均抽运强度 23.5 kW/cm²,到达介质表面的抽运光共 11.174 kW,耦合效率 92.8%,如图 3(a)。加侧反射板后,快轴方向因单透镜导致的少数边缘光线被侧反射板接收,进一步提升了介质面上的抽运强度,达 25 kW/cm²,而均匀区域大小几无变化,耦合效率也无明显差别,达 92%,如图 3(b)。对于耦合系统来说,小的出射角能够保证均匀抽运光在一定距离内仍均匀分布,此系统慢轴方向的出射角大多在 15°内,如图 3(c),满足实验所需的 5 mm 传输距离抽运光束质量要求,而快轴方向没有侧反射板时,两模块的 7°偏转和透镜对抽运光的汇聚完全可以将光线出射角控制在十几度范围内,故该系统具有较好的传输性;有侧反射板时,边缘部分光线被反射后出射角将大大增加至 40°以上,传输性能变差但边缘光线分布得到明显改善,一般加侧反射板时激光晶体应尽可能贴近耦合系统。反射板镀银膜的反射率对耦合效率影响较大,反射率为 94%时,耦合效率理论值达 92.8%,当反射率提升至 98%时,该系统的耦合效率达 97.8%,如图 3(d),因此提高耦合效率的关键在于提高反射板镀金属膜的反射率。

3 实验结果及讨论

利用模拟计算设计加工的耦合系统测得镀银反射板的平均反射率为 94%,按照设定角度及位置装配 LD 阵列,开展耦合实验。

LD 阵列在 35 A 电流注入时,输出功率为 2.64 kW,电流脉宽 1 ms 时抽运光能量为 2.64 J,没有侧反射板时在激光介质面的位置测得抽运光能量为 2.438 J,耦合效率为 92.3%,与理论值 92.8% 相符;加侧反射板后测得能量为 2.35 J,对应耦合效率为 89%,与理论值 92% 有偏差,原因在于侧反射板导致快轴边缘光线出射角增大,能量计接收面与激光介质面的位置误差对这种大角度弥散光线十分敏感,部分光线未完全进入能量计,导致测量值比实际值偏小。

利用成像法对介质面位置成像并用科学级 CCD 采集,得到经耦合后入射至介质面处的抽运光空间分布,如图 4 所示。(a) 是无侧反射板时的强度分布,抽运区为 7.5 mm(快轴)×6.25 mm(慢轴),快轴边缘有少许光线未被透镜完全收缩,符合模拟结果。加侧反射板后强度分布如(b),抽运区大小

7.03 mm(快轴)×6.28 mm(慢轴),边缘光线分布得到明显改善,也与模拟计算结果一致。与计算结果不同的是,强度分布在快轴方向有调制,不论有无侧反射板,调制均存在,其原因主要是 LD 阵列的人工封装无法保证多条 LD 空间指向的一致性,而 LD 的快轴光线经准直后发散角极小,受阵列封装不一致性的影响较大,最终导致了图 4 中的条状调制,而慢轴光线大的出射角降低了对 LD 阵列封装的敏感度,慢轴分布较均匀,由于该耦合系统用于激光振荡器,这种分布完全满足振荡器的抽运光分布要求。由此可见,对大功率 LD 阵列耦合而言,LD 快轴光线的发散角并非越小越好,该值及阵列封装指向的一致性对抽运强度分布的影响值得下一步深入研究。从传输角度来看,抽运光出射耦合系统后自由传输 3 mm,慢轴方向从 6 mm 增加至 6.28 mm,快轴方向没有侧反射板时扩大了 0.5 mm,加侧反射板后几乎没有扩束,因此,该耦合系统具有较好的传输性能,满足传输 5 mm 的自由传输要求。

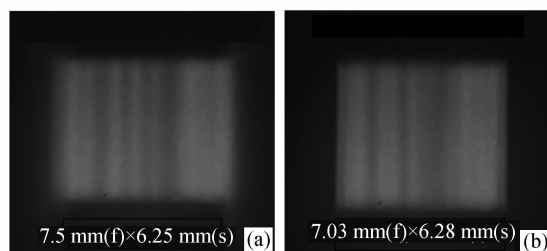


图 4 入射至介质表面的抽运光强分布。

(a) 无侧反射板; (b) 有侧反射板

Fig. 4 Pump distribution on the surface of gain medium.

(a) without side reflectors; (b) with side reflectors

4 结 论

基于 LD 结构,以高斯型微激射元为基本单位建立单条 LD 和 LD 阵列光源模型,利用光线追迹法为 Yb:YAG 激光器的 12 kW LD 抽运源设计了一套由透镜和反射板构成的耦合系统。研究结果表明,该光源模型建立方法准确有效,抽运光经耦合系统汇聚传输后,强度分布与模拟结果一致;该系统传输损耗低,反射板的反射率为 94% 时只用透镜和两块反射板获得 92.3% 的耦合效率,加侧反射板后耦合效率达 89%;射出耦合系统的抽运光线具有良好的传输性能,有效抽运区域接近理论值;均匀性满足实验要求,用了侧反射板后均匀性没有明显变化但快轴方向边缘强度分布得到了明显改善。以上结果说明,这种空心导管型耦合系统具有耦合效率高、传

输性能好、均匀性好等特点,且结构简单,在中大型 DPSSL 系统中有很大的应用潜力。

参 考 文 献

- 1 S. A. Payne, C. Bibeau, R. J. Beach *et al.*. Diode-pumped solid-state lasers for inertial fusion energy [J]. *J. Fusion Energy*, 1998, **17**(3):213~217
- 2 Jean Maignan, Brigitte Marchesin. LUCIA current status [C]. 3rd International Workshop on High Energy Class Diode Pumped Solid State Lasers, LLNL, California USA, May 17~19, 2006
- 3 Jia Wei, Li Mingzhong, Ding Lei. Research of the large-aperture high power diode arrays end-pumped coupling system [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(S0):105~107
贾伟,李明中,丁磊等. 大口径高功率激光二极管阵列端面泵浦技术研究[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(增刊):105~107
- 4 Jiang Jianfeng, Tu Bo, Zhou Tangjian *et al.*. Pumped coupling system design of high average power disk laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, **17**(S0):108~110
蒋建锋,涂波,周唐建等. 高平均功率薄片激光多通泵浦耦合系统设计[J]. *强激光与粒子束*, 2005, **17**(增刊):108~110
- 5 Guo Mingxiu, Li Jindong, Fu Wenqiang *et al.*. Kilowatt laser

- diode-pumped solid-state heat capacity slab laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(2):280~286
- 郭明秀,李劲东,付文强等. 千瓦级半导体抽运的固体热容板条激光器[J]. *光学学报*, 2007, **27**(2):280~286
- 6 Cai Zhen, Hu Hao, Jiang Jianfeng *et al.*. Kilowatt class laser diode-pumped solid state heat capacity laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(2):153~156
蔡震,胡浩,蒋建锋等. 千瓦级激光二极管抽运热容固体激光器[J]. *中国激光*, 2006, **33**(2):153~156
- 7 Gao Hongyun, Fu Rulian, Qin Hua *et al.*. Novel coupling system in solid state laser end-pumped by LDA-taper duct [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(4):419~423
郜洪云,傅汝廉,秦华等. LDA 端泵浦固体激光器的新型耦合系统——圆锥形导管[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(4):419~423
- 8 Fu Rulian, Wang Guangjun, Zhang Lingqian *et al.*. Simplify design of lens duct as coupling system for all-solid-state lasers [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 1998, **9**(2):96~99
傅汝廉,王广军,张凌倩等. 全固化激光器中的耦合系统——透镜导管的简化设计[J]. *光电子·激光*, 1998, **9**(2):96~99
- 9 Duan Wentao, Xu Meijian, Jiang Xinying *et al.*. Design and simulation of end-pumped coupling system for large aperture LD arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(S1):52~56
段文涛,徐美健,蒋新颖等. 大口径 LD 阵列端面抽运耦合系统设计模拟[J]. *中国激光*, 2008, **35**(S1):52~56

《中国激光》“光纤通信及器件”专题征稿启事

光纤技术和网络技术的迅猛发展,对现代光通信技术的发展产生了巨大的推动作用,尤其在光纤通信系统及器件的设计与实现方面,已取得了诸多令人兴奋的成就。《中国激光》计划于 2008 年 12 月正刊上推出“光纤通信及器件”专题栏目,现特向国内外广大读者以及作者征集“光纤通信及器件”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 光纤通信系统的设计及实现
- 光纤激光器的设计与实现(如掺杂光纤激光器、新型可调谐光纤激光器、微结构光纤激光器等)
- 光纤放大器的设计与实现(如宽波段掺铒光纤放大器、拉曼光纤放大器、微结构光纤放大器等)
- 全光纤无源器件的设计与实现(如宽带光纤耦合器、宽带光纤滤波器、新型光纤色散补偿器、阵列光开关等)
- 新型光纤光栅的设计与实现(如微结构光纤光栅、超长周期光纤光栅及特种光纤光栅等)
- 其他

截稿日期:2009 年 1 月 10 日

投稿方式以及格式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/zgjg.htm>)直接上传稿件(主题标明“光纤通信及器件”投稿),也可直接将稿件电子版发至邮箱:zhgjg@mail.shnc.ac.cn(主题标明“光纤通信及器件”投稿),详情请参见中国光学期刊网:www.opticsjournal.net。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用 MS-word 格式,有任何问题请发邮件至 zhgjg@mail.shnc.ac.cn 询问。

《中国激光》编辑部