

文章编号: 0258-7025(2008)08-1139-05

高功率激光二极管阵列端面抽运大口径 片状放大器抽运场评价方法

邓青华^{1,2} 彭翰生³ 丁磊¹ 李明中¹ 王建军¹ 唐军¹ 罗亦鸣¹ 林宏奂¹ 张锐¹ 卢振华¹

(中国工程物理研究院¹ 激光聚变研究中心,² 研究生部,³ 院机关, 四川 绵阳 621900)

摘要 在高功率激光二极管阵列(LDA)端面抽运大口径放大器研究中,高效均匀的抽运耦合系统是非常重要的。为了对各种抽运耦合系统进行比较,需要对抽运场分布实现量化评价。依据抽运场分布提出一套评价方法,利用沉积效率、平均抽运密度、调制度、起伏均方根(RMS)值、均匀区尺寸等五项指标对抽运场分布进行综合评价。评价方法中既有统计量(如沉积效率、起伏 RMS 值、平均抽运密度),又有极值量(如调制度),还有建立在起伏 RMS 值统计结果基础上且满足一定条件的均匀区尺寸指标,是一套比较综合的评价方法。还提出从抽运场中间小区域开始,逐步向外扩大面积计算各指标,最后得到这些指标的变化曲线,根据这些变化曲线可对不同的耦合系统进行分析比较。对三个抽运场分布进行实例分析,结果表明,提出的评价指标和计算方法能反映出抽运场分布的抽运能沉积效率和分布起伏等关键信息。

关键词 激光技术;固体激光器;激光二极管抽运;端面抽运;均匀抽运

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20083508.1139

Evaluating Specifications on Coupled Pump Distribution in Laser Diode Array End-Pumped Large-Aperture Amplifiers

Deng Qinghua^{1,2} Peng Hansheng³ Ding Lei¹ Li Mingzhong¹ Wang Jianjun¹

Tang Jun¹ Luo Yiming¹ Lin Honghuan¹ Zhang Rui¹ Lu Zhenhua¹

(¹Laser Fusion Research Center, ²Postgraduate Department,
³Headquarter, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract In laser diode array (LDA) end-pumped large-aperture amplifiers, coupling system with high efficiency and uniform pump distribution is very important. To evaluate different coupling systems, a set of evaluating specifications is put forward, including depositing efficiency, mean pump intensity, modulation, fluctuation root-mean-square (RMS) and size of uniformly pumped region. In these specifications, depositing efficiency, mean pump intensity and fluctuation RMS are statistical variables, and modulation is extreme variable. Dimension index of uniformly pumped region under certain conditions is obtained based on the statistical variable fluctuation RMS. A new method of calculating these values is put forward. The variation curves of these indices are obtained through calculating the pumping area gradually. When the analyzed region is as large as the whole pumping region, varying trends of these specifications can be given out. Using these trends, different coupling methods can be compared. Calculating example of there different pumping fields shows that this set of specifications is comprehensive and is valuable to assess different coupling systems.

Key words laser technique; solid-state laser; laser diode-pumped; end pumping; uniform pumping

1 引言

20 世纪 90 年代以来,激光二极管(LD)及其阵

列取得飞速发展,输出功率不断提高,成本也在不断降低。适合激光二极管抽运的晶体也不断涌现,因

收稿日期:2007-11-26;收到修改稿日期:2008-01-02

作者简介:邓青华(1976—),女,湖南人,博士研究生,主要从事高功率固体激光技术研究。E-mail:dqhaj@yahoo.com.cn

导师简介:彭翰生(1936—),男,山东人,博士生导师,主要从事等离子体物理和超短激光技术方面的研究。

E-mail:penghsh@839.caep

而激光二极管抽运固体激光器(DPSSL)的相关研究得到迅速发展^[1~7]。与传统闪光灯抽运的固体激光器相比,DPSSL具有高效率、高功率、长寿命、小体积等显著优点,因此激光二极管阵列(LDA)抽运的大口径片状放大器在惯性约束聚变(ICF)和惯性聚变能(IFE)研究领域应用越来越广。目前激光二极管阵列的发光强度只有 $1\sim 3\text{ kW/cm}^2$,远远不能满足产生大能量激光所需的高抽运强度要求。针对大功率激光二极管阵列端面抽运片状放大器耦合系统,人们提出了各种各样的耦合方式,如实心透镜导管、空心透镜导管等^[8~12]。在设计和评价这些耦合系统时,国内外学者总结出三个基本要求:耦合输出效率高;耦合输出抽运场均匀;发散角小。这些要求是对耦合系统输出提出的,其中耦合输出效率只能描述抽运光从耦合系统输出时的效率高,并不能表明抽运光在增益介质内沉积效率的高低;而耦合输出抽运场均匀和发散角小这两个要求对耦合系统输出出口处抽运场的分布及发散特性提出了宏观要求,但没有量化指标,无法客观比较。本文针对如何建立抽运场分布的量化分析指标系统进行研究。

2 指标定义和计算方法

由于抽运光从耦合系统输出出口出射后具有一定发散性,进入增益介质后会沿不同方向传输吸收,因而耦合系统出口处面内的功率统计分布不能完全反映这种发散光源的沉积特性。为了对各耦合系统的耦合效果进行量化评价,提出对沉积在增益介质内的抽运场进行分析比较。将增益介质划分成 $M\times N\times L$ 个体积元,如图1所示,通过光线追迹方法精确计算从耦合系统输出后各光线所通过的体积元位置和其中的传输长度,进而利用线性吸收规律计算各光线在这些体积元内沉积的功率。通过对激光二极管阵列每个发光点进行光线密集随机采样,然后经过耦合传输过程和功率沉积过程模拟计算,可以

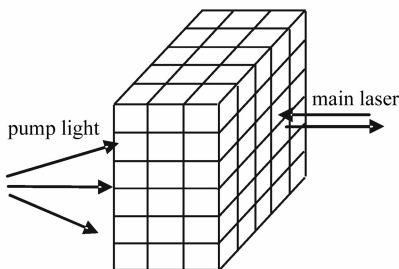


图1 增益介质储能分析模型

Fig. 1 Analyzing model of power depositing in gain media

得到接近真实情况的储能体分布结果,即各体积元内沉积的抽运功率。最后在主激光能量提取方向上进行累积,即可求得储能面分布,用矩阵 $x(i,j)$ ($i=1,M;j=1,N$)表示。针对储能面分布进行分析比较。

对于高功率激光二极管阵列端面抽运大口径放大器而言,为了对主激光进行均匀放大,其抽运场面分布的理想要求是均匀平顶分布。而实际上较好的抽运场分布也只能是超高斯分布,这种分布情况下中心平顶部分是受关心的放大区。这一区域面积大小、平均抽运功率密度及该区域内抽运功率密度的起伏等参数是对耦合系统进行评价的重要指标。为了确定平顶区域的大小和这一区域内的抽运功率密度及其起伏情况,提出从抽运场中心小区域开始,求出该区域内的沉积效率、平均抽运功率密度、调制度、起伏均方根(RMS)值、均匀区尺寸等各项指标,然后逐步扩大分析区域,直到覆盖整个抽运场,这样就可以得到分析区域扩大过程中各指标的变化数组。对某一抽运场的数组进行分析,可以得到抽运场的各种重要信息;对不同抽运场分布的数组进行比较,可以选择出优异的耦合系统设计方案。需要指出的是,当主激光是圆光束时,分析区域是不断扩大的圆;当主激光近场分布呈长方形时,分析区域是按其长宽比不断扩大的长方形;当主激光近场分布呈正方形时,分析区域是不断扩大的正方形。仅以最后一种情况为例进行分析。

针对片状放大器抽运场分布要求,为评定各耦合方案的优劣,提出5点指标针对不断扩大的分析区域进行分析,假设分析区域内沉积的抽运功率分布为 $x(i,j)$ ($i=1,m;j=1,n$):

1) 沉积效率是指沉积在分析区域区内的功率与总抽运功率(激光二极管阵列总抽运功率)之比;

2) 平均抽运功率密度是指分析区域内的平均功率密度,计算公式为

$$\bar{\rho} = [\sum_{m=1}^{i=1} \sum_{n=1}^{j=1} x(i,j)] / (m \times n \times dx \times dy);$$

3) 调制度的计算表达式为:(最大沉积功率-最小沉积功率)/平均沉积功率;

4) 起伏RMS值的计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\sum_{m=1}^{i=1} \sum_{n=1}^{j=1} [x(i,j) - \bar{x}]^2 / (m \times n)} / \bar{x};$$

5) 均匀区尺寸是指从抽运场中心开始,起伏RMS值小于 α 的最大分析区域(称为平顶区 α 值根据对抽运场的均匀性要求确定,取为0.05),该区域

的宽度定义为均匀区尺寸。

这些指标中,沉积效率能反映不同分析区域面积内抽运功率沉积效率的变化情况;平均抽运功率密度能反映不同分析区域面积内平均抽运功率的变化情况;调制度能反映不同分析区域内抽运功率分布起伏值的变化情况;起伏 RMS 值能反映不同分析区域内抽运功率分布起伏统计的变化情况;均匀区尺寸能反映满足一定均匀性要求的抽运区域大小。

3 实例分析及讨论

将激光二极管阵列内接球面排布后,紧接一个空心导管进行缩束耦合可得均匀的端面抽运场,改变球半径和导管长度可得不同的抽运场分布,图 2~4 是其中的三种抽运场面分布和两维截面分布情况。从抽运场面分布可以看出大致的均匀区大小和起伏情况,但不能量化;从截面分布可以看出两维对称性和起伏情况,但截面分布只能反映局部情况,有局限性。为了对抽运场进行全面、量化认识,从抽运场中心小区域开始逐步扩大面积,利用第 2 节的 5 点指标对这些区域进行分析,可以得到图 5~9 所示结果。图 5 反映了沉积在不断增大的分析区域内的抽运功率百分比增大情况,当分析区域扩大到整个抽运区域时,沉积效率反映了耦合输出系统有效的输出耦合效率;图 6 反映了从中心开始不断增

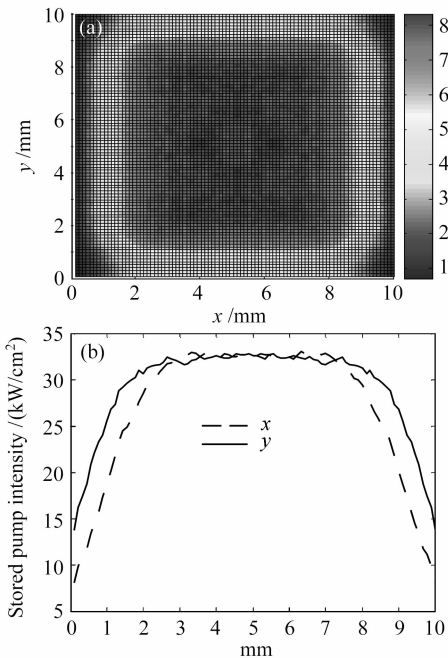


图 2 抽运场 1 的面分布(a)及其两维截面分布(b)
Fig. 2 Field 1 (a) and its profiles (b)

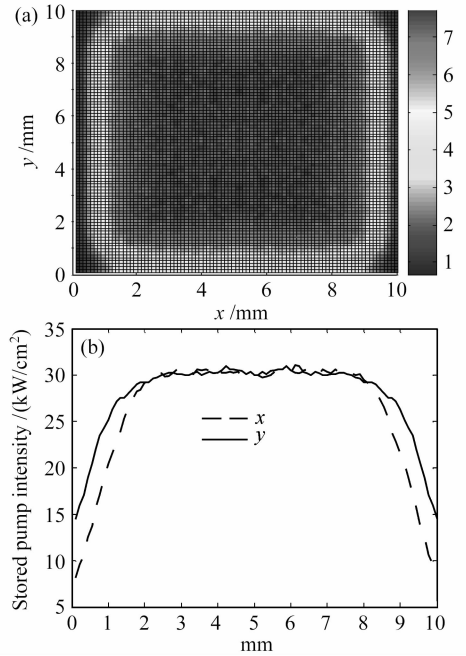


图 3 抽运场 2 的面分布(a)及其两维截面分布(b)
Fig. 3 Field 2 (a) and its profiles (b)

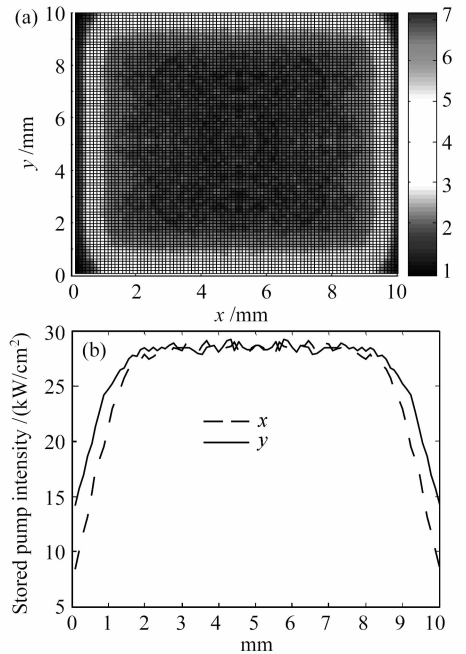


图 4 抽运场 3 的面分布(a)及其两维截面分布(b)
Fig. 4 Field 3 (a) and its profiles(b)

大的分析区域内抽运功率密度变化曲线,较小分析区域内该曲线的起伏反映了中部抽运区域内抽运功率密度的不均匀性,功率密度曲线开始大幅度减小的分析区域大小可反映中间平顶区的尺寸;图 7 中的起伏 RMS 曲线反映了不同分析区域内抽运功率起伏的统计大小,其开始大幅度增长的分析区域大小也可反映中间平顶区的尺寸;图 8 中的调制度曲

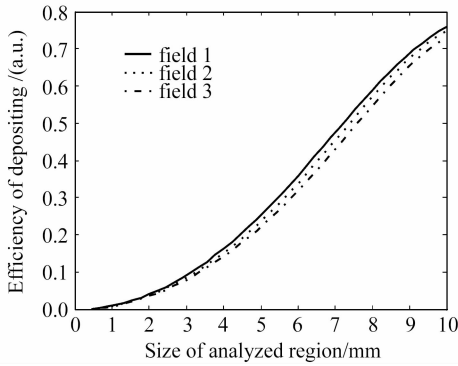


图 5 功率沉积效率变化曲线

Fig. 5 Depositing efficiency fluctuating curve

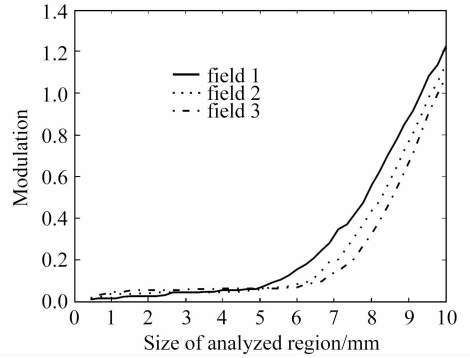


图 8 调制度变化曲线

Fig. 8 Modulation fluctuating curve

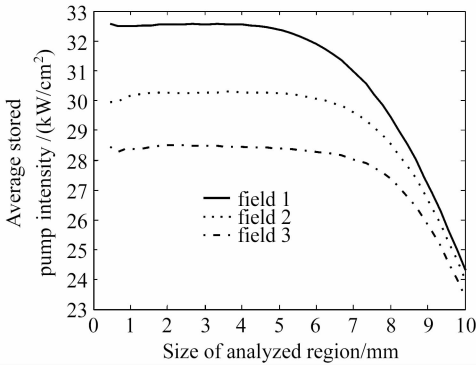


图 6 平均功率密度变化曲线

Fig. 6 Average power density fluctuating curve

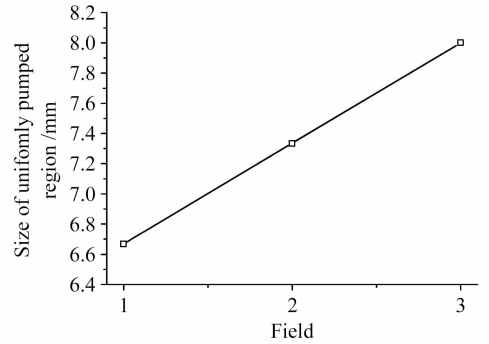


图 9 均匀区尺寸变化情况

Fig. 9 Length variation of uniformly pumped regions

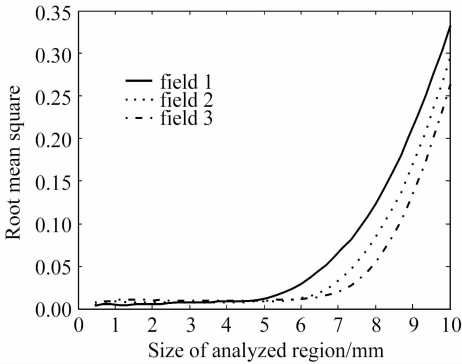


图 7 起伏 RMS 变化曲线

Fig. 7 RMS fluctuating curve

线反映了不同分析区域内抽运功率起伏的极值大小,其开始大幅度增长的分析区域大小也可反映中间平顶区的尺寸;图 9 反映了不同抽运场分布满足一定统计均匀性要求的均匀区域大小情况。

由图 5 和图 6 可知,三种抽运场的功率沉积效率相差不大,三种抽运场的平均功率密度在抽运场中间区域均能基本保持不变,但平均功率密度有较大差异,抽运场 1,2,3 的平均功率密度依次减小。原因可由图 9 中的均匀区尺寸变化曲线看出,由于抽运场 1,2,3 的中间均匀区依次增大,因而造成平

均功率密度减小。从图 7 中的起伏 RMS 变化曲线和图 8 中的调制度变化曲线可知,三种抽运场分布在抽运场中间区域的起伏都很小,但抽运场 3 相对于抽运场 1,2 而言,中心部分起伏较大,这一点从场分布截面图可以看出;由于其均匀区较大,因而在更大区域内抽运场 3 的起伏 RMS 和调制度都最小。从图 7 和图 8 中也可看出,在中间区域内,抽运场 2 的起伏比抽运场 1 的大,这一点可从图 6 中的平均功率密度曲线变化情况得到验证,从图 2,3 的对比中是看不出来的。从图 8 看出,在中间均匀区内,三个抽运场的调制度曲线都没有突然变化点,因而三个抽运区均不存在局部亮区和暗区,这一点由三个抽运场的截面分布图可以证明。综上所述,图 5~9 反映了三个抽运场分布的所有信息,并且有些指标变化可从不同图中得到相互验证。

比较图 2~4 和图 5~9 可以得到,提出的评价指标及计算方法能真实定量地反映抽运场的分布情况。依据这些数据可以根据不同要求选择最优耦合方案。在不要求大的抽运区均匀面积而只要求高的抽运密度和小的起伏调制时,产生抽运场 1 的耦合系统无疑是最好的选择;而要求有大的均匀区面积时,产生抽运场 3 的耦合系统是最好的选择。

4 结 论

针对高功率激光二极管阵列端面抽运大口径放大器中的抽运场分布提出了一套评价指标和分析方法, 利用功率沉积效率、平均功率密度、调制度、起伏 RMS 值、均匀区尺寸等五项指标对抽运场分布进行综合评价。提出从抽运场中心小区域开始, 逐步扩大面积来计算该面积内抽运场的这些指标, 最后得到它们的变化曲线, 并可据此对不同的耦合系统进行分析比较。实例分析证明, 这套评价方法是可靠和全面的, 对耦合系统的评价和选择具有参考意义。

参 考 文 献

- 1 Tian Yubing, Tan Huiming, Cao Hongzhong *et al.*. Low power laser diode-pumped solid-state Yb : YAG laser at room temperature [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):633~636
田玉冰, 檀慧明, 曹洪忠等. 低功率激光二极管抽运的室温运转 Yb:YAG 激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):633~636
- 2 Wang Wei, Liu Xingang, Liu Yingdong. Laser diode pumped Nd: NYW/LBO green laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(5):646~648
王 巍, 刘妍钢, 刘英同. 激光二极管抽运的 Nd:NYW/LBO 绿光激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(5):646~648
- 3 Cai Zhiqiang, Wang Peng, Wen Wuqi *et al.*. LD end-pumped all-solid-state picosecond passively mode-locking lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(7):901~907
蔡志强, 王 鹏, 温午麒等. 端面抽运全固态皮秒被动锁模激光器[J]. *中国激光*, 2007, **34**(7):901~907
- 4 Yu Guolei, Huang Chunxia, Sun Yao *et al.*. Thermal effect of rectangle-section Nd : GdYVO₄ crystal end-pumped by diode laser [J]. *Laser and Optoelectronics Progress*, 2007, **44**(7):57~60
于果蕾, 黄春霞, 孙 尧等. 激光二极管端面抽运矩形截面 Nd:GdYVO₄ 晶体热效应分析[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, **44**(7):57~60
- 5 Guo Mingxiu, Li Jingdong, 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 Ou Pan, Yan Ping, Gong Mali *et al.*. LD-pumped passively Q-switched Nd³⁺:YAG microchip laser and its stability [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(12):1465~1469
欧 攀, 闫 平, 巩马理等. 激光二极管抽运的被动调 QNd³⁺:YAG 微晶片激光器及其稳定性[J]. *光学学报*, 2002, **22**(12):1465~1469
- 7 Zhang Xiaolong, Shen Jinhua, Cai Defang *et al.*. Study of temperature distribution and deformation of the end-face in end-pumped DPL [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2):197~200
张小龙, 沈金华, 蔡德芳等. 端面抽运激光晶体热形变及温度场分布研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2):197~200
- 8 Raymond J. Beach. Theory and optimization of lens ducts [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(12):2005~2015
- 9 Eric C. Honea, Raymond J. Beach, Scott C. Mitchell *et al.*. High-power dual-rod Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11):805~807
- 10 Rulian Fu, Guangjun Wang, Zhaoqi Wang *et al.*. Design of efficient lens ducts [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(18):4000~4003
- 11 Mali Gong, Fuyuan Lu, Qiang Liu *et al.*. Efficient corner-pumped Yb:YAG/YAG composite slab laser [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(16):3806~3810
- 12 Jia Wei, Hu Yongming, Li Mingzhong *et al.*. Simulation and design of hollow lens duct as a new kind of coupling system for high power laser diode arrays [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):939~942
贾 伟, 胡永明, 李明中等. 空心透镜导管的模拟与设计[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8):939~942