

高功率激光二极管阵列端面抽运放大器 新型耦合方式研究^{*}

邓青华^{1)†} 彭翰生²⁾ 隋展¹⁾ 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⁾ 邓颖¹⁾ 卢振华¹⁾

1) 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900)

2) 中国工程物理研究院机关, 绵阳 621900)

(2007 年 12 月 21 日收到, 2008 年 3 月 22 日收到修改稿)

就高功率激光二极管阵列端面抽运大口径放大器提出一种新的耦合方式: 激光二极管阵列拟球面排布, 其后紧接一个导管进行耦合传输. 用三维光线追迹法对这种耦合方式的特性进行模拟分析. 结果表明, 该耦合方式能实现高的抽运耦合效率和高的能量沉积效率, 在面积缩束比为 30 的条件下, 该耦合方式的耦合效率和能量沉积效率最高可分别达 96.7%、93.7%. 当激光二极管面阵单元发光区域不小于导管输出端口径时, 该耦合方式能实现抽运场均匀平顶分布. 另外, 采用该耦合方式, 激光二极管阵列排列方式灵活, 非对称排布时也可实现二维对称性好、均匀平顶分布的抽运耦合场输出. 建立了激光二极管阵列端面耦合实验系统, 实现了 85.4% 的耦合效率和均匀的抽运耦合场输出.

关键词: 激光二极管阵列抽运固体激光器, 端面抽运, 均匀抽运

PACC: 4260

1. 引言

20 世纪 90 年代以来, 激光二极管(LD)及其阵列取得巨大进展, 输出功率不断提高, 成本也在下降. 适合二极管激光抽运的晶体也不断涌现, 因而二极管抽运固体激光器(DPSSL)的相关研究得到迅速发展^[1-3]. 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泛. 目前激光二极管阵列的发光强度只有 1—3 kW/cm² 左右, 远远不能满足产生大能量激光所需的高抽运强度要求. 针对大功率二极管阵列耦合, 人们提出了实心透镜导管、空心透镜导管等耦合方式^[4-6]. 实心透镜导管耦合方式在很多小系统上得到成功应用^[7], 作为其改进方式的空心透镜导管耦合方式也已成功应用于法国 LUCIA、

美国 Mercury 等大激光装置中. 采用透镜导管耦合方式无论是耦合效率还是抽运场分布都得到了改善, 但无法实现均匀平顶分布的抽运场. 为了进一步对抽运场进行匀化, 必须加匀束器, 不仅增大了耦合损耗, 还大大增加了系统的复杂性.

目前国内外生产的激光二极管阵列是通过将多个激光二极管线阵(bar 条)进行排列, 组成数千瓦的激光二极管面阵(Stack), 并对快轴方向进行准直, 最后将这样的面阵进行组合形成大口径高功率阵列. 本文提出将激光二极管阵列拟球面排布(组成激光二极管阵列的二维面阵单元均内接分布在一球面上), 其后紧接一个空心导管(duct)实现光束的耦合传输. 本耦合方式中利用二极管面阵单元(Stack)的向心排布实现抽运光的集中和缩束, 每个面阵的小角度光线直接对增益介质进行抽运, 大角度光线经过高反射率导管进行少数几次反射后对增益介质进行抽运. 这样的耦合方式不但具有高的耦合效率, 而且能得到非常均匀的平顶分布抽运场, 对光束

^{*} 国家高技术研究发展计划(批准号 2006AA4505)资助的课题.

[†] E-mail: dqhbj@yahoo.com.cn

实现高效均匀放大具有重要意义。

2. 耦合结构

文献 [5] 已对单用空心导管端面抽运耦合方式进行了研究。然而该文献中将激光二极管阵列排布在一平面内,为了实现好的对称性,快轴方向准直角度与慢轴方向发散角相同,都为 10° ,因而用这种方法很难对大功率激光二极管阵列进行高效耦合。此文献所得的抽运场呈高斯分布,无法对大口径光束进行均匀放大。本文提出的新型耦合方式中:激光二极管阵列拟球面排布,即所有激光二极管面阵内接在一球面上,球心在增益介质的几何中心;激光二极管阵列快轴方向的准直角度尽可能小,这样能够获得高的耦合效率;单个激光二极管面阵的封装尺寸为正方形,能够实现旋转 90° 安装,使相邻两个激光二极管面阵的快慢轴方向相互垂直,从而获得混合的均匀抽运场。拟球面排布的激光二极管阵列效果图如图 1 所示,由它和导管组成的耦合抽运放大器系统如图 2 所示。

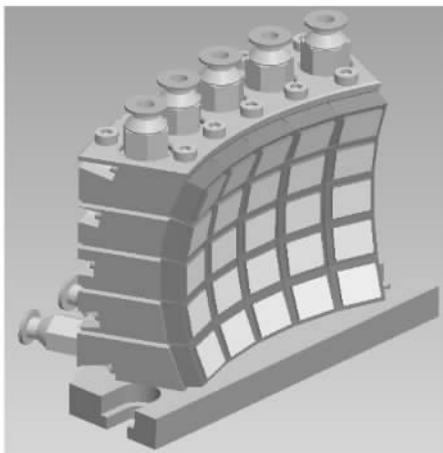


图 1 拟球面排布的激光二极管阵列

图 2 中导管具有四棱台结构,它由四块抛光且镀银的铝板或不锈钢板拼装组成。镀金属膜的导管能对各种角度的入射抽运光进行高效率反射,能对主激光进行反射和多程放大的增益介质片背面镀有双色膜,能实现对抽运光增透和主激光高反。抽运光从背面进行高效抽运耦合,主激光则从正面进行同轴多程高效能量提取。增益介质背面通水冷却,能及时将剩余热带走。这样的放大系统具有紧凑、简洁、高效的特点。

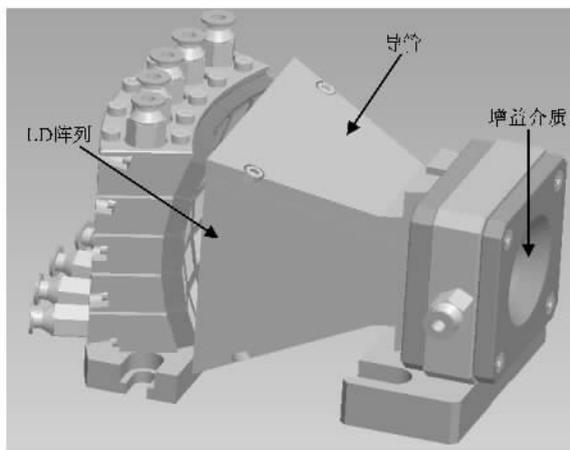


图 2 LDA 球面排布加导管抽运的放大器系统

3. 模拟方法

由于该耦合方式中各激光二极管面阵的法线空间方向不一致,而且 LD 发射的绝大多数光线不在快轴或慢轴平面内,因而很有必要建立三维光线追迹程序对该耦合方式的耦合效果进行模拟计算,而不能仅用仅限于快轴(或慢轴)平面内的二维模拟方法^[8]。

模拟计算中的几个关键点如下:

1) 激光二极管阵列模型

激光二极管阵列由 $m \times n$ 个面阵组成,按 $m \times n$ 方式内接排列在球面上;每个面阵由 12 个 bar 条组成,每个 bar 条上有 25 个发光元,并将各发光元视为点源。发光元发射的任意一条角度为 $[\theta_{\text{fast}}, \theta_{\text{slow}}]$ 的光线,其携带的抽运功率为

$$P(\theta_{\text{slow}}, \theta_{\text{fast}}) = \frac{1}{k\theta_s\theta_f\pi} \exp\left[-\left[\left(\frac{\theta_{\text{slow}}}{\theta_s/2}\right)^2 + \left(\frac{\theta_{\text{fast}}}{\theta_f/2}\right)^2\right] \cdot \ln 2\right], \quad (1)$$

其中 $\theta_{\text{fast}}, \theta_{\text{slow}}$ 分别为光线快、慢轴方向的偏角, θ_s 和 θ_f 分别为慢轴和快轴的发散角(FWHM), k 为归一化常数。当 $\theta_{\text{fast}} = \theta_{\text{slow}} = 0$ 时,这条光线的方向即为激光二极管面阵的法线方向。

为了较全面地反映发光元的发散情况,我们在 4 倍于快慢轴发散角的范围内对光线密集采样。如快慢轴发散角为 $10^\circ \times 2^\circ$,则我们的光线采样范围达到 $40^\circ \times 8^\circ$ 范围。

2) 导管模型

导管入口尺寸由激光二极管阵列的四个顶点位置确定, 输出口为方形. 导管由四个平面构成, 反射率均为 99%.

3) 光线传输追迹模型

从阵列出发的每一条光线由一个 7 维向量 $[x_1, x_2, x_3, \cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma, p]$ 确定, 其中 $[x_1, x_2, x_3]$ 为光线的起始位置, $[\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma]$ 为光线的方向矢量, 而 p 即为该光线所携带的功率, 其值由 (1) 式计算可得. 光线从起始点发出后, 程序将通过算法自动搜索其在导管中的真实传输路径, 直至其从导管输出口输出或因反向而传输终止. 从导管输出口输出的光线进入激光介质, 被增益介质吸收并在介质内形成相应的储能分布.

4) 激光介质内的储能分布

由于从导管输出口出射的光线具有一定发散性, 进入增益介质后会沿不同方向传输吸收, 因而一个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. 本文将增益介质划分成 $M \times N \times L$ 个体积元 (如图 3 所示), 通过算法精确计算各光线所通过的体积元位置和在其中的传输长度, 进而利用线性吸收规律计算在这些体积元内沉积的功率. 通过对阵列每个发光点进行光线密集随机采样, 然后通过传输过程和功率沉积过程模拟计算, 可以得到接近真实情况的储能体分布结果, 最后在主激光能量提取方向上将储能体分布进行累积, 从而可求得储能面分布. 本文以下部分的分析是针对储能面分布进行的.

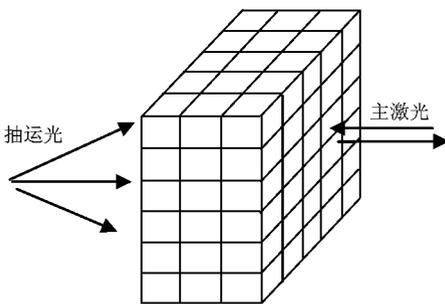


图 3 增益介质储能分析模型

4. 模拟计算结果

用上节介绍的数值模拟方法建立了三维光线追迹程序, 对本文提出的新型耦合方式的特性进行模拟分析. 计算条件如下: 激光二极管阵列总功率为

32 kW, 面阵单元采用 4×4 排布方式 (非对称排布时采用 3×4 排布方式); 每个激光二极管面阵的封装尺寸为 $14 \text{ mm} \times 14 \text{ mm}$, 发光区域为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$ (考虑发光区域大小影响时除外); LD 快、慢轴方向的发散角分别为 2° 和 10° ; 导管的输入口径等于激光二极管阵列的排列尺寸, 输出口径为 $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$, 导管长度由计算条件决定, 导管壁的反射率为 99%, 增益介质厚为 5 mm, 吸收系数为 6 cm^{-1} .

4.1. 耦合规律及耦合输出效率分析

将球心定在导管输出端后 2.5 mm 处, 对激光二极管阵列内接球面的球半径分别为 90, 170, 210 mm 时的耦合过程进行模拟分析. 球半径不同时, 从导管输出的光线在导管中的反射次数不尽相同, 不同反射次数的功率百分比情况如图 4 所示. 由图可知, 当球半径为 90 mm 时, 46% 左右的抽运光直接从导管输出, 42% 左右的抽运光经过一次反射后从导管输出; 当球半径增大时, 从导管直接输出的抽运光功率百分比减小, 而经过两次反射后从导管输出的抽运光功率大大增加. 球半径变化时, 反射次数小于等于 2 的输出抽运光均约占 90%. 所以, 应用这种耦合方式能实现高的耦合效率.

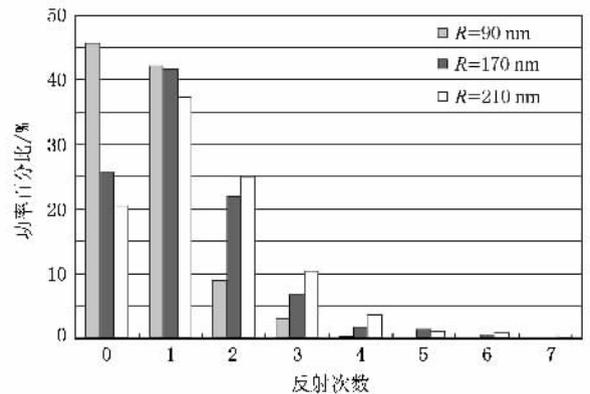


图 4 输出抽运光不同反射次数功率百分比

激光二极管阵列所内接球面的球半径变化时, 导管输出端的耦合输出效率如图 5 所示. 由图可知, 球半径在 70—210 mm 间变化时, 耦合输出效率均在 92.5% 以上; 当球半径为 170 mm 时, 最高的耦合输出效率可达 96.7%. 最大输出耦合效率出现在球半径为 170 mm 处, 是后向反射损失和导管壁反射损耗相互平衡的结果. 当球半径小于 170 mm 时, 耦合输出效率随着球半径增大而增大, 这是因为球半径增大时, 导管四个面的倾角减小, 传输过程中反向

的光线减少,从而因后向反射而损失的功率百分比减小,如图 6 所示.当球半径大于 170 mm 时,耦合输出效率随着球半径增大而减小,这是因为此时反射损耗已经是主要损耗,随着导管长度的增大,部分光线反射次数增加,反射损耗增大.但是因为导管反射率很高,所以输出耦合效率下降不明显.

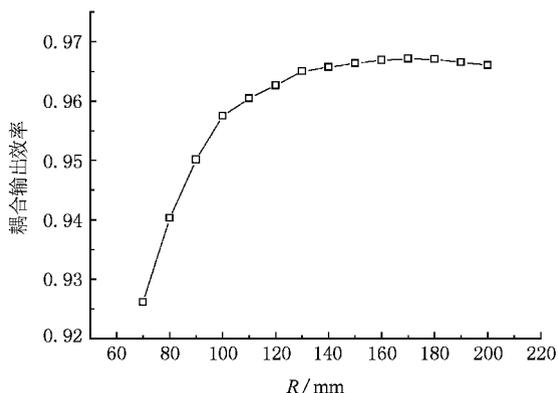


图 5 导管输出耦合效率随着球半径变化曲线

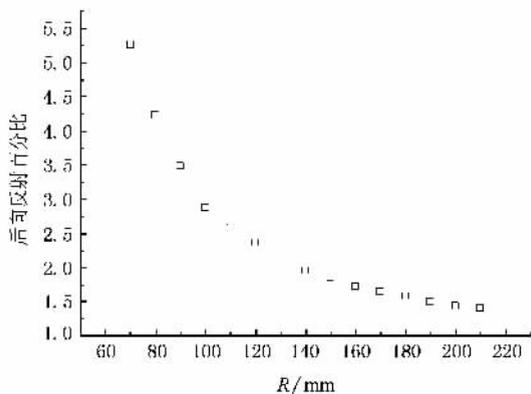
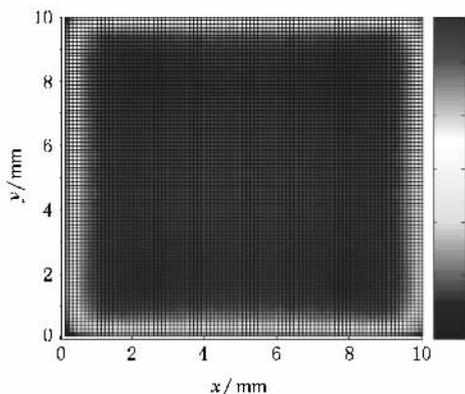


图 6 后向传输功率百分比随球半径变化曲线



4.2. 增益介质中能量沉积效率和能量沉积分布分析

将球心定在增益介质几何中心,对增益介质与导管输出端相距 0 和 4 mm 两种情况进行了模拟分析.增益介质紧贴导管输出端放置时,增益介质 10 mm × 10 mm 区域内的能量沉积效率如图 7 所示.由图可知,能量沉积效率曲线与导管输出耦合效率曲线的变化趋势基本一致;当球半径为 170 mm 时,最高的能量沉积效率可达 93.7%(抽运光的缩束比约为 30).典型的储能分布及其截面分布如图 8 所示(球半径为 170 mm).从图中可以看出,除四个角由于导管相邻两面的反射光线叠加而抽运功率沉积稍显集中外,抽运场整体上是均匀的.因而利用这种耦合方式能实现均匀抽运场;x 和 y 方向的储能分布有很好的对称性,这两个特点对大口径光束的均匀放大是非常有意义的.

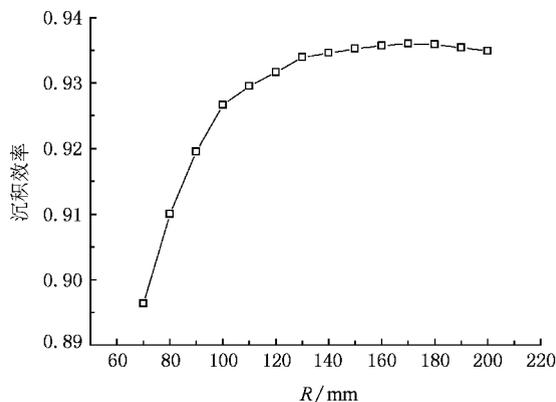


图 7 增益介质紧贴导管输出端放置时,10 mm × 10 mm 区域内能量沉积效率随球半径变化曲线

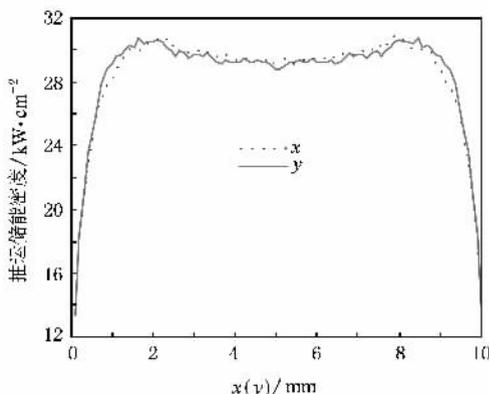


图 8 增益介质紧贴导管输出端放置时储能分布(a)及其截面分布(b)

当增益介质与导管输出口有 4 mm 间距时,增益介质 10 mm × 10 mm 区域内能量沉积效率随球半径变化曲线如图 9 所示. 从图可知,增益介质中能量沉积效率有所下降. 典型的储能分布及其截面分布如图 10 所示(球半径为 170 mm). 由图可知,储能分布中间平顶区均匀性变好,但该区域大小有所减小,区域内的抽运功率密度增大;X, Y 方向的对称性仍很好.

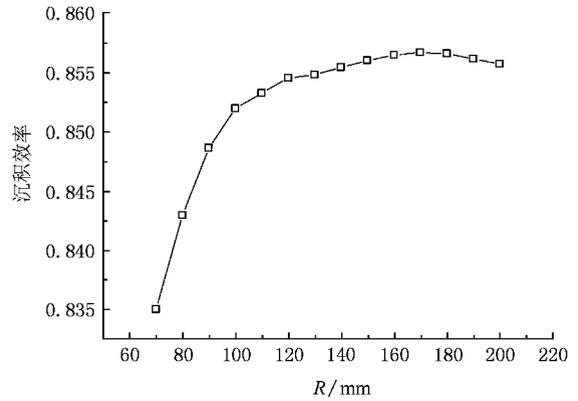


图 9 增益介质离导管输出口 4 mm 放置时 10 mm × 10 mm 区域内能量沉积效率随球半径变化曲线

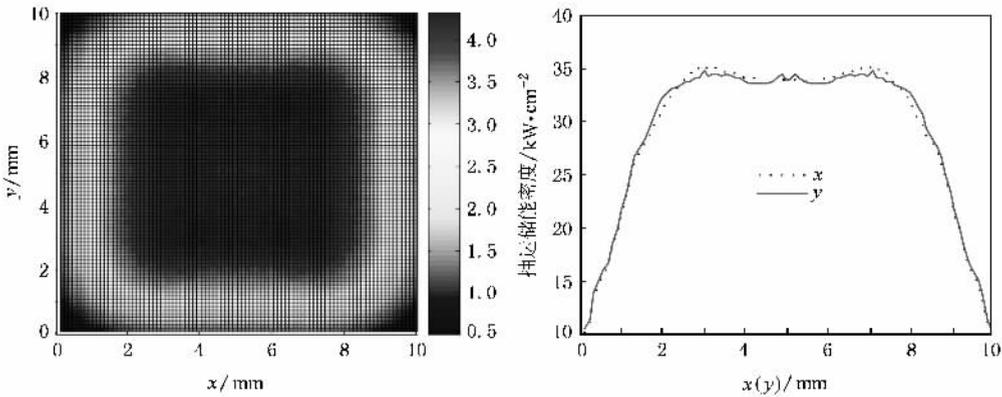


图 10 增益介与导管输出口相距 4 mm 放置时储能分布(a)及其截面分布(b)

4.3. 激光二极管面阵发光区尺寸对抽运能量沉积分布的影响分析

以上的模拟计算中都假设激光二极管面阵的发光区域尺寸与导管输出口径完全相同(10 mm × 10 mm),这里就激光二极管面阵的发光区域与导管输出口尺寸不相同的情况进行模拟,此过程中仍然假

定导管输出口为 10 mm × 10 mm.

假设激光二极管面阵的发光区域为 12 mm × 10 mm,紧贴导管输出端的增益介质内的储能分布及其截面分布如图 11 所示. 由图可知,当激光二极管面阵发光区域大于导管输出口径时,增益介质内沉积抽运场均匀性变好,二维方向对称性也很好.

假设每个激光二极管面阵的发光区域为 8 mm

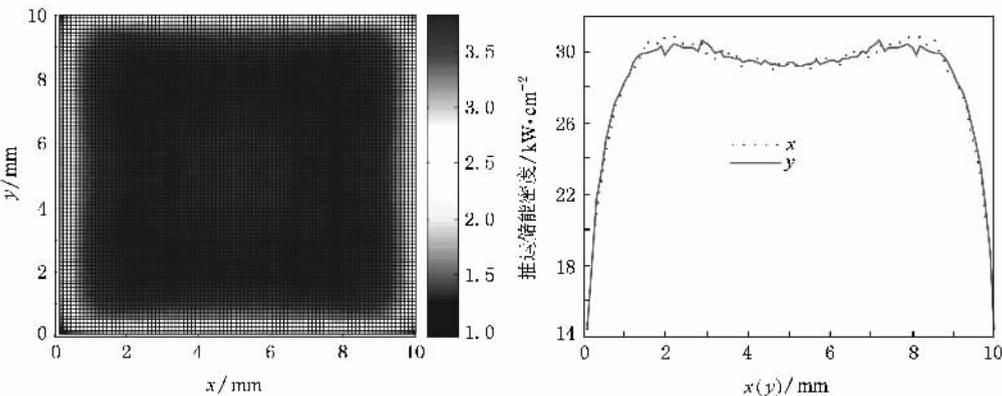


图 11 Stack 发光区域为 12 mm × 10 mm 时增益介质中储能分布(a)及其截面分布(b)

$\times 10$ mm,紧贴导管输出端增益介质内的储能分布及其截面分布如图 12 所示。由图可知,当激光二极管面阵发光区域小于导管输出口径时,虽然耦合输出储能分布的两维方向对称性仍然很好,但其已不再呈均匀平顶分布,而是呈低阶超高斯分布。

综上所述,在要求抽运能量沉积分布呈平顶分布的放大器设计过程中,应使激光二极管面阵发光区域的尺寸大于等于导管输出口径。当然,在更大

口径的放大器设计中,由于激光二极管阵长度限制为 10 mm,不可能直接实现激光二极管面阵发光尺寸与放大器口径之间的匹配,但是可以用几个小的激光二极管面阵组合成一个平面单元,然后再以这样的平面单元作为阵列单元内接排列在球面上实现更大口径放大器的均匀抽运。所以,应用这种新耦合方式,可以实现大口径放大器的高效率均匀抽运。

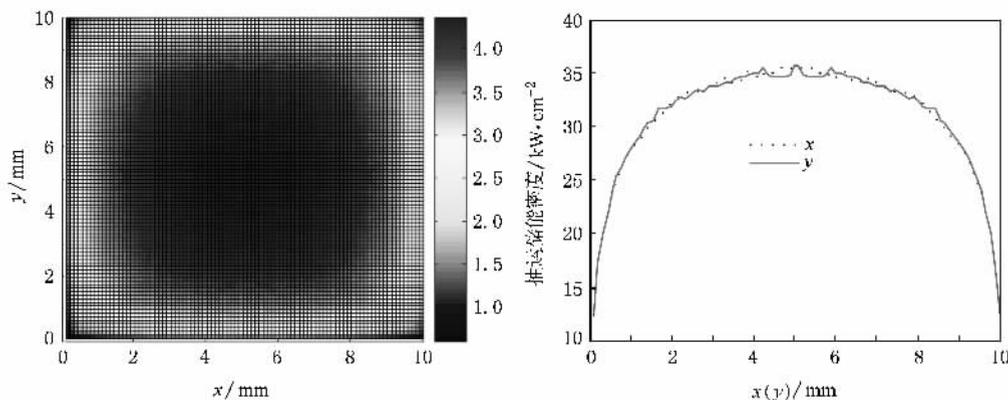


图 12 Stack 发光区域为 $8\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 时增益介质中储能分布(a)及其截面分布(b)

4.4. 激光二极管面阵非对称排布方式模拟计算

以上所有计算中都假设激光二极管阵列中的面阵以对称排布方式排列(4×4)。图 13 显示了面阵

以 3×4 非对称排列时,紧贴导管输出端的增益介质内的储能分布及其截面分布。由图 13 可知,在这种耦合方式中,面阵非对称排列(如 3×4)时也可实现耦合输出抽运场均匀平顶分布,两维对称性也很好。

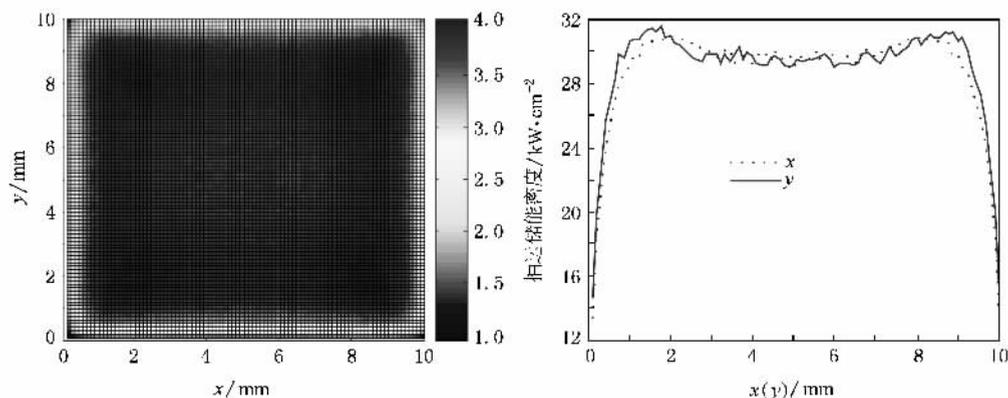


图 13 Stack 3×4 排列时增益介质中储能分布(a)及其截面分布(b)

5. 实验研究

为了验证该耦合方式的有效性,建立了 24 kW 激光二极管阵列耦合系统,如图 14 所示。激光二极

管阵列由 12 个面阵单元组成,呈 3×4 排列。每个面阵由 20 条 bar 组成,总功率为 2 kW。由于所用激光二极管面阵并不是为这个实验定制的,而是从其他系统挪用过来的,外形尺寸为 $22\text{ mm} \times 13\text{ mm}$,因而不能实现相邻激光二极管面阵相对旋转 90° 安装。

面阵发光区尺寸为 $15\text{ mm} \times 10\text{ mm}$. 各面阵能够独立进行多维旋转和平动调节,通过对各面阵进行仔细调节可实现激光二极管阵列拟球面排布. 导管长 200 mm ,是由抛光镀银的不锈钢板组成,导管也能进行多维旋转和平动,通过仔细调整导管的姿态能实现高的耦合输出效率和均匀抽运场.

在导管输出口测到了 20.5 kW 的耦合输出功率,总的耦合效率为 85.4% ;耦合输出的抽运场分布比较均匀(如图 15 所示). 通过更仔细地调整各面阵和导管姿态,抽运场均匀性会更好. 耦合效率

偏低,究其原因有二:一是由于工艺限制,导管壁的反射率只达到了 94% 左右;二是面阵中各 bar 条的准直方向一致性和准直发散角一致性较差. 本实验中所用的面阵在空间自由传输 30 cm 后典型的光场分布如图 16(a)所示,由于准直一致性问题, 30 cm 处光场分布已呈纺锤形,而进口面阵在传输 30 cm 后的光场分布如图 16(b)所示,从中可清晰地看到多条平行发光线. 通过改进面阵准直工艺和导管的抛光镀膜工艺,可进一步提高抽运耦合效率.

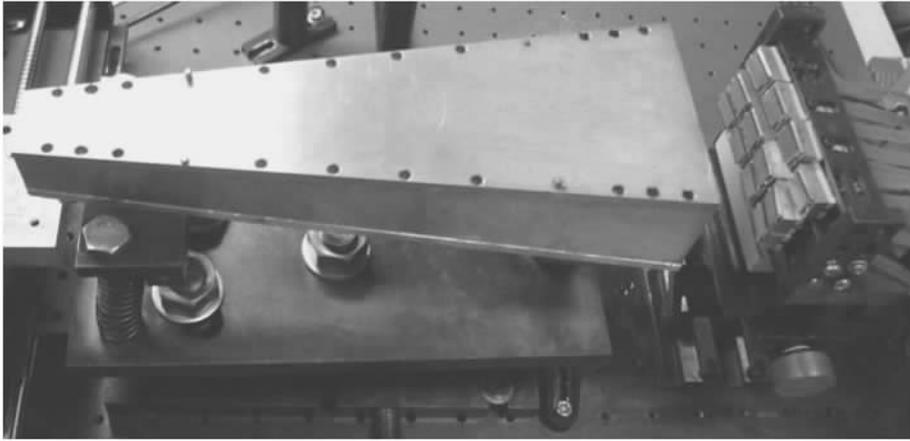


图 14 LDA 耦合实验系统

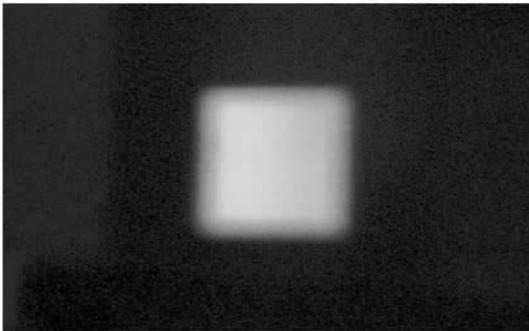


图 15 导管输出口抽运场分布

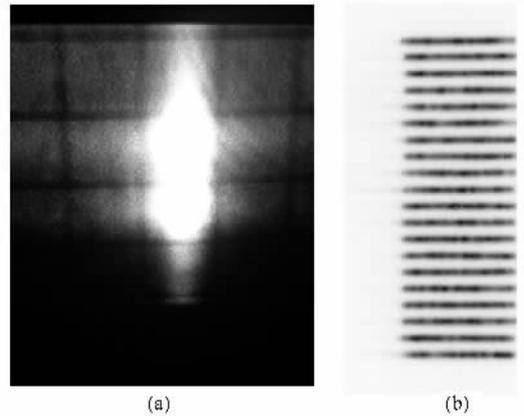


图 16 实验用 Stack(a)和进口 Stack(b)传输 30 cm 后的光场分布比较

6. 结 论

本文就高功率二极管阵列端面抽运大口径放大器提出了一种新的耦合方式. 在这种新型耦合方式

中,二极管阵列拟球面排布,其后紧接一个空心导管进行耦合传输. 建立了三维光线追迹程序对这种新耦合方式的耦合输出特性进行模拟. 模拟计算结果表明,这种耦合方式能实现高的输出耦合效率和高的能量沉积效率;无论增益介质紧贴导管输出口还

是与之有一定距离,都能实现抽运能量沉积均匀平顶分布;当单元面阵发光区域大于等于导管输出端口径时,能实现增益介质内抽运能量沉积均匀平顶分布;采用本耦合方式,LDA的排列具有很大的灵活性,非对称排列时也可实现两维对称性好、均匀平顶

分布的耦合输出抽运场.建立了24 kW激光二极管阵列耦合系统,输出抽运场比较均匀,耦合效率偏低,只有85.4%,但通过改进面阵准直工艺和导管的抛光镀膜工艺,可进一步提高抽运耦合效率.

- [1] Liu H , Yao J Q , Zheng F H , Lu Y , Wang P 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 230 (in Chinese) [刘欢、姚建铨、郑芳华、路洋、王鹏 2008 物理学报 **57** 230]
- [2] Guo Z , Xu Q M , Yang Y M 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 223 (in Chinese) [过振、许启明、杨永明 2008 物理学报 **57** 223]
- [3] Du S F , Feng B H , Wang S M , Zhang L , Zhang C Y , Zhang D X , Zhang S W , Zhang Z G 2006 *Chin. Phys.* **15** 1522
- [4] Beach R J 1995 *Appl. Opt.* **35** 2005
- [5] Honea E C , Beach R J , Mitchell S C , Skidmore J A , Emanuel M A , Sutton S B , Payne S A , Avizonis P V , Monroe R S , Harris D G 2000 *Opt. Lett.* **25** 805
- [6] Fu R L , Wang G J , Wang Z Q , Ba E X , Mu G D , Hu X H 1998 *Appl. Opt.* **37** 4000
- [7] Gong M L , Lu F Y , Liu Q , Gong W P , Li C 2006 *Appl. Opt.* **45** 3806
- [8] Gao H Y , Fu R L , Chen D S , Qin H , Liu J , Shi X G , Ba E X 2005 *J. Optoelectronics · Laser* **16** 541 (in Chinese) [郜洪云、傅汝廉、陈德胜、秦华、刘娟、史新刚、巴恩旭 2005 光子·激光 **16** 541]

Simulation on a new coupling method of laser diode array end-pumped large-aperture amplifiers *

Deng Qing-Hua^{1)†} Peng Han-Sheng²⁾ Sui Zhan¹⁾ Ding Lei¹⁾ Li Ming-Zhong¹⁾ Wang Jian-Jun¹⁾
Tang Jun¹⁾ Luo Yi-Ming¹⁾ Lin Hong-Huan¹⁾ Zhang Rui¹⁾ Deng Ying¹⁾ Lu Zhen-Hua¹⁾

1) *Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

2) *Headquarter of China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China*

(Received 21 December 2007 ; revised manuscript received 22 March 2008)

Abstract

A new coupling method is put forward for high power LDA end-pumped large-aperture amplifiers. The LDA is inscribed on a sphere and then a duct is added adjacent to it. Three-dimensional ray-tracing program is used to simulate the features of the new coupling method. Simulation results show that when the area contraction coefficient is about 30, deposition efficiency in the gain media as high as 93.7% can be achieved; When the emitting area is not less than the aperture of the duct, uniform and top-hat distribution is obtained. When several stacks are spliced to make an inscribing area, amplifiers with larger aperture can be end pumped. When stacks in LDA is placed as $m \times n$ ($m \neq n$) arrays, uniform and top-hat distribution is also obtained. In the LDA coupling experiment, the output is top-hat distributed at the end of the duct and the coupling efficiency is 85.4%.

Keywords : diode pumped solid-state lasers , end pumping , uniform pumping

PACC : 4260

* Project supported by the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA4505).

† E-mail : dqhaj@yahoo.com.cn