

文章编号: 0258-7025(2004)08-0939-04

空心透镜导管的模拟与设计

贾 伟^{1,2}, 胡永明¹, 李明中², 罗亦明², 张小民²

(¹ 国防科技大学理学院光电工程系, 湖南 长沙 410073; ² 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘要 采用大口径、高功率激光二极管(LD)阵列的大型全固化二极管抽运激光系统(DPSSLs)能够产生高功率、大能量、高重复频率的优良激光。为了实现对介质的抽运,将空心透镜导管应用于大口径高功率激光二极管阵列耦合系统。基于三维光线追迹的数值计算方法,编制了 LD 纵向抽运耦合系统模拟软件,对空心透镜导管进行模拟与设计,使系统耦合效率超过 90% 的同时,增益介质表面抽运场具有良好的均匀性,实现了对介质的高效均匀抽运;同时通过改变空心透镜导管的参数进行模拟比较,得出了空心透镜导管设计的经验公式,为大型 DPSSLs 耦合系统的设计提供了有益的参考。

关键词 激光技术;空心透镜导管;光线追迹;激光二极管阵列

中图分类号 TN 243 文献标识码 A

Simulation and Design of Hollow Lens Duct as a New Kind of Coupling System for High Power Laser Diode Arrays

JIA Wei^{1,2}, HU Yong-ming¹, LI Ming-zhong², LUO Yi-ming², ZHANG Xiao-min²

¹ Department of Optoelectronic Engineering, College of Science,
National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China
² Research Center of Laser Fusion,
China Academic of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract The hollow lens duct is introduced for the application in the coupling of pump radiation from extended two-dimensional semiconductor laser diode arrays into solid state laser gain media. With the help of numerical analysis of three-dimension ray tracing, a computer simulation program for longitudinal-pump laser diode (LD) coupling system was developed. Based on the result of simulation, a coupling system for large-aperture high-power LD arrays using hollow lens duct was build. Coupling efficiency beyond 90% was reached with perfect pumping-uniformity on the surface of gain material. An experience formula for hollow lens duct design was deduced at the same time, it would be very helpful in designing coupling system of large-scale diode-pumped solid-state lasers (DPSSLs).

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

1 引 言

采用大口径、高功率激光二极管(LD)阵列的大型全固化二极管抽运激光系统(DPSSLs)可以产生高功率、大能量、高重复频率的优良激光,能够显著提升高功率大能量激光系统的性能。要产生大能量

的激光,需要很高的抽运功率密度。然而目前 LD 面阵列的发光强度只有 1 kW/cm²,远远不能满足要求。为此,必须设计高效的耦合系统,将总功率达数十千瓦的 LD 阵列发出的抽运光汇聚,使抽运功率密度从 1 kW/cm² 提高到 10 kW/cm²,进而实现对激光介质的高效抽运。

收稿日期:2003-05-30;收到修改稿日期:2003-10-08

基金项目:国家 863 计划(2003aa845070)资助项目。

作者简介:贾 伟(1978—),男,重庆人,国防科技大学与中国工程物理研究院激光聚变中心联合培养博士研究生,主要从事二极管抽运固体激光器研究。E-mail:jwint@sina.com

对于这种特殊要求的耦合系统,目前国内主要采用实心透镜导管^[1]的方式。但实心透镜导管耦合效率较低,最高只能达到 80%左右^[2,3],而且出射光线的发散角很大(最大发散角接近 90°),难以实现对激光介质的高效抽运。

通过对实心透镜导管存在的问题进行分析,将空心透镜导管应用于大口径 LD 阵列耦合系统。基于三维光线追迹的数值计算方法,编制了 LD 纵向抽运耦合系统模拟软件,将 48kW 的 LD 阵列发出的抽运光高效汇聚,系统耦合效率超过 90%,使传输至激光介质表面的抽运场有良好均匀性,90%以上的区域抽运功率密度超过 10 kW/cm²。并根据模拟结果,得出了空心透镜导管优化设计的经验公式,为大型 DPSSLs 耦合系统的设计提供了有益的参考。

2 空心透镜导管耦合系统

与美国利弗莫尔实验室的“中空透镜型”透镜导管^[4,5]不同,本文采用的空心透镜导管是由一个表面镀有增透膜的平凸透镜和一个内壁高光洁度抛光(或内壁镀全反膜)的空心导管组成。除了耦合效率高的优点以外,空心导管可由单面高光洁度抛光的金属板(或镀全反膜玻璃板)拼装而成,具有加工方便、易调整的特点,能够很好地适应不同输入输出口径的要求。空心透镜导管主要在三个方面优于实心透镜导管:

1) 实心透镜导管是利用内壁的全内反射来约束抽运光线,当光线入射角不能满足全内反射条件时,能量将会从侧壁逸出;而空心透镜导管依靠内壁的全反射约束光线,能量不会从侧壁逸出;

2) 当光线传输到实心透镜导管的输出端面时,若入射角大于全内反射的临界角(若实心透镜导管的折射率为 1.5,临界角约 42°),光线就完全不能输出。即使不满足全内反射条件,光线的发散角也会由于发生折射而增大;而光线从空心透镜导管输出时不会发生折射,也就避免了能量的损失和发散角的增大,更有利于实现对介质的高效抽运;

3) 对于空心透镜导管,抽运光从透镜出射后即在空气中传输,缩短了抽运光在玻璃材料中的传输距离,从而减小了损耗。

耦合系统如图 1 所示,LD 阵列靠近空心透镜导管输入端口,间距 1 mm;激光介质的尺寸与输出端口相同,间距 2 mm。由于输出端口的面积小于

LD 阵列面积的 1/10,若绝大部分抽运功率能从耦合系统输出,则抽运功率密度相应提高 10 倍以上,为产生高功率大能量激光提供了可能。

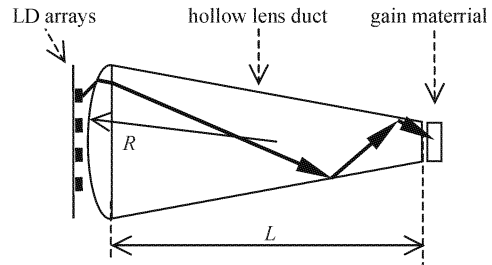


图 1 空心透镜导管耦合系统

Fig. 1 Hollow lens duct coupling system

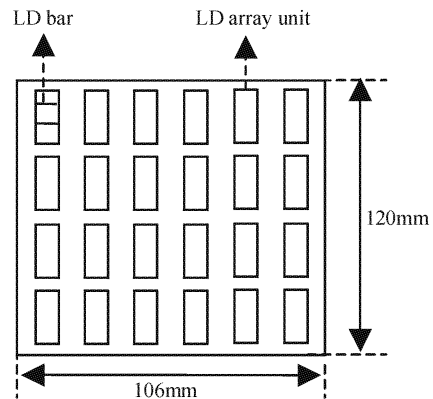


图 2 LD 阵列示意图

Fig. 2 Diagram of LD arrays

3 模拟方法

一般对二极管抽运过程的模拟分析仅限于快轴(或慢轴)平面上的二维模拟^[1,6~8],但大部分光线在透镜导管内的传输都不是在同一个平面上。为了更准确地分析系统耦合效率和抽运均匀性,对整个耦合系统进行了三维模拟,主要包括以下三个部分:

1) LD 阵列的模拟

模拟的 LD 阵列(如图 2 所示)由 6×4 个 LD 面阵单元组成,每个面阵单元有 40 条线阵(LD bar),每条线阵长 10 mm,约 70 个发光点。

根据 LD 的发光特性和系统要求,对模型作以下简化:

a) 所有的发光点具有很好的一致性,每一个发光点慢轴平面发散角 $\alpha = 10^\circ$,快轴平面发散角经微透镜准直后为 $\beta = 3^\circ$,光强的空间分布近似为二维高斯分布。

b) 对于每一个发光点在 2 倍发散角范围内均匀取光线,每条光线的光强由发散角确定。

2) 光线追迹

从 LD 阵列出发的一条光线的所有信息由一个 7 维向量 $(x_1, x_2, x_3, n_1, n_2, n_3, E)$ 表示, 其中 (x_1, x_2, x_3) 代表当前光线的起始点, (n_1, n_2, n_3) 代表当前光线的方向数, 即与三个坐标轴夹角的余弦, E 代表当前光线的光强。光线分别在透镜的前后表面发生两次折射后, 进入空心透镜导管; 软件自动搜寻光线传输的真实路径, 直至从输出端口出射。每发生一次折射或反射, 光强分量的变化由菲涅耳公式得到, 同时起始点坐标分量和方向数分量也发生相应的变化。

整个光线追迹模拟过程严格从空间几何、反射和折射定律出发, 消除了傍轴近似可能带来的误差。

3) 激光介质有效面积上的抽运功率统计

光线从耦合器输出后继续传输, 直至激光介质所在平面。将激光介质的有效面积 $(20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm})$ 划分为若干单元, 对传输至有效面积内的光线进行功率统计。系统耦合效率定义如下

$$\text{系统耦合效率} = \frac{\text{有效面积内的总功率}}{\text{LD 阵列发光总功率}} \quad (1)$$

4 模拟结果与分析

1) 空心透镜导管实际是平凸透镜和空心导管的组合。空心导管的输入输出口径由系统需要决

定, 所以唯一的可变参数就是空心导管的长度; 而平凸透镜的主要参数就是焦距。通过对这两个参数进行选择, 找到适当的参数组合, 使系统耦合效率最高。

将空心导管长度固定为 $L = 200 \text{ mm}$, 采用不同的透镜焦距进行模拟计算, 模拟结果如图 3 所示。可以看出, 耦合效率并不是透镜焦距 f 的单调函数, 而是存在一个最优值, 即 $f = 263 \text{ mm}$ 时耦合效率最高, 达到 94.2%; 抽运场分布具有很好的均匀性 (如图 4(b) 所示), 92% 的区域抽运功率密度超过 $100 \text{ W/mm}^2 (= 10 \text{ kW/cm}^2)$ 。此时光线最多在空心导管内反射 3 次, 输出光线的最大发散角为 47° 。

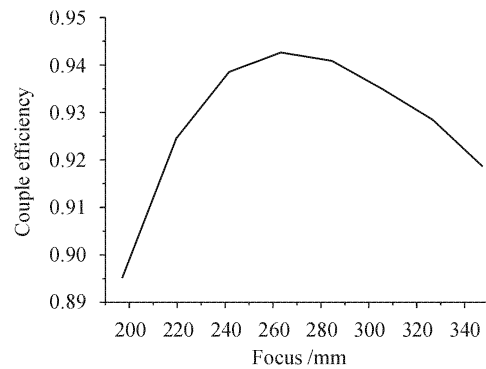


图 3 耦合效率与焦距的关系曲线 ($L = 200 \text{ mm}$)

Fig. 3 Relation between couple efficiency and focus ($L = 200 \text{ mm}$)

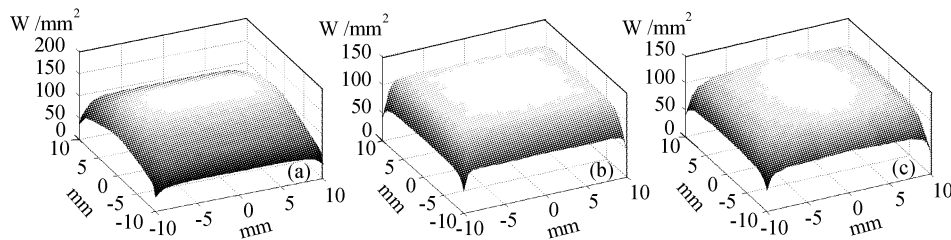


图 4 不同焦距下激光介质表面抽运功率密度的分布

Fig. 4 Pumping power distribution on the surface of gain material under different focus

(a) $f = 242 \text{ mm}$; (b) $f = 263 \text{ mm}$; (c) $f = 307 \text{ mm}$

若 f 从 263 mm 减小, 耦合效率迅速下降, 抽运均匀性也急剧变差, 如图 4(a) 所示; 若 f 从 263 mm 增大, 耦合效率和抽运均匀性 (图 4(c)) 也会下降, 但下降速度都比前者缓慢得多。

2) 将空心导管长度改为 250 mm , 按照上述方法进行模拟计算, 模拟结果如图 5 所示。

可以看出, 图 5 中曲线的变化趋势与图 3 基本相同: 即都存在一个最佳焦距, 使系统耦合效率最高。因此, 可以初步得出以下结论: 对于每一个空心

导管长度, 都可以找到一个与之对应的透镜焦距, 能够实现系统的最佳耦合。

3) 寻找实现系统最佳耦合时, 空心导管长度与相对应的透镜焦距之间的关系。

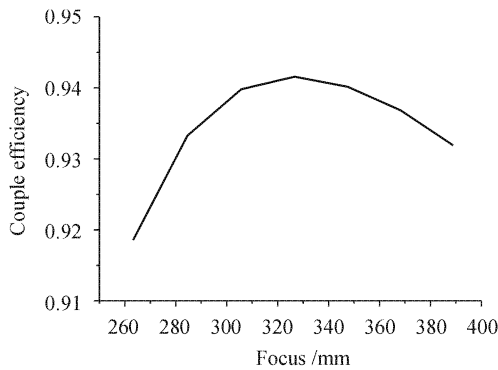
改变平凸透镜的厚度与前表面曲率半径, 即改变透镜焦距 f , 按照 1), 2) 的步骤进行模拟计算, 寻找与之配合能达到最佳耦合效果的空心导管长度 L , 并记录在表 1 中。

平凸透镜焦距按以下公式进行计算

表 1 系统耦合效率最佳时透镜焦距与空心导管长度的关系

Table 1 Relation between focus and length of the hollow duct when couple efficiency is maximal

Radius of the front-surface of the lens, R /mm	130	140	150	170	180	200
Thickness of the lens, d /mm	27.5	25	25	20	21.3	24
Focus of the lens, f /mm	242	263	283	327	346	384
Optimal length of the hollow duct, L /mm	185	200	215	250	265	295
L/f	0.764	0.76	0.76	0.765	0.766	0.768
Couple efficiency /%	94.08	94.26	94.11	94.16	94.27	94.25

图 5 耦合效率与焦距的关系曲线 ($L = 250$ mm)Fig. 5 Relation between couple efficiency and focus ($L = 250$ mm)

$$f = \frac{R_{\text{front}}}{n-1} - \frac{2}{3} \cdot d \quad (2)$$

焦距 f 从透镜后表面算起,其中 d 为透镜厚度, $\frac{2}{3}d$ 为平凸透镜像方主面与透镜后表面的距离。

从表 1 数据可以得出以下经验公式

$$L_{\text{optm}} = c \cdot f_{\text{lens}} \quad (3)$$

其中 c 为经验常数, $c \in [0.76, 0.77]$ 。

经验公式(3)为空心透镜导管耦合系统的设计提供了有益的参考。在设计过程中,可以根据系统大小首先确定空心导管的长度 L , 然后由这个规律迅速得到相对应的最佳透镜焦距,从而简化耦合系统的设计。

5 结 论

将空心透镜导管应用于大口径高功率 LD 阵列耦合系统中;编制了一套 LD 纵向抽运耦合系统模

拟软件。通过模拟分析表明,空心透镜导管能够实现大口径高功率 LD 阵列的高效耦合,系统耦合效率超过 90%,传输至激光介质表面的抽运场具有良好均匀性,远远优于实心透镜导管。模拟得出的经验公式为大型 DPSSLs 耦合系统的设计提供了有益的参考。根据模拟结果,正在对空心透镜导管进行设计和加工,准备进一步开展相关的实验工作。

参 考 文 献

- 1 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
- 2 Raymond J. Beach, William J. Bennett. Lensing duct [P]. US005307430A, United States Patent. 1994
- 3 Raymond J. Beach. Theory and optimization of lens ducts [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **35**(12):2005~2015
- 4 Raymond J. Beach. Hollow lensing duct [P]. US006160934A, United States Patent. 2000
- 5 E. C. Honea, R. J. Beach, S. C. Mitchell *et al.*. High-power dual-rod Yb:YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11):805~807
- 6 Chen Lin, Hou Xia, Lu Yutian. Analog calculation and evaluation of LDA direct side-pumping [J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7):825~828
谌霖,侯霞,陆雨田. 激光二极管阵列侧面直接抽运方式的模拟计算和效果评估[J]. *光学学报*, 2002, **22**(7):825~828
- 7 Wang Haibo, Ma Yan, Zhai Zehui *et al.*. 1.5 W cw frequency-stabilized and intracavity frequency-doubled ring laser end-pumped by diode laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2):119~122
王海波,马艳,翟泽辉等. LD 端面抽运 1.5 W 单频稳频绿光激光器[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2):119~122
- 8 Zhou Tao, Chen Jun. Characteristics and analysis of laser diode end-pumped $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ microchip laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(4):455~458
周涛,陈军. 激光二极管端面连续抽运的 $\text{Cr}^{4+}:\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 微片激光器输出特性研究[J]. *光学学报*, 2003, **23**(4):455~458