

文章编号: 1001-3806(2013)02-0231-04

椭圆截面离心率渐变的导管光线 3 维追迹设计

耿 雪, 刘晓娟, 韩克祯, 付圣贵, 秦 华
(山东理工大学 理学院, 淄博 255049)

摘要: 为了提高微柱阵列与透镜导管耦合系统的光斑整形效果, 设计了一种横截面是椭圆、且椭圆离心率随位置变化的不规则导管设计方案。在导管的前端面, 椭圆长轴在水平方向, 以与激光二极管阵列的发光面形状相匹配; 在导管后端面, 椭圆长轴逐渐过渡到竖直方向。利用 3 维光线追迹方法进行仿真计算, 可知该不规则导管可以得到圆对称性较好的光斑整形效果。微柱阵列和该导管的能量传输效率分别为 90.84% 和 91.98%, 对应于整个耦合系统的能量传输效率为 83.55%。结果表明, 该不规则导管在光斑整形效果和能量传输效率方面与普通导管相比具有一定优势。

关键词: 激光技术; 不规则导管; 光线 3 维追迹; 光斑整形

中图分类号: O436 文献标识码: A doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2013.02.023

3-D ray-tracing design for a duct with changing elliptical cross section

GENG Xue, LIU Xiao-juan, HAN Ke-zhen, FU Sheng-gui, QIN Hua
(School of Science, Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: In order to improve the facular-shaping effect of the microcylinders and lens duct, a new duct with changing elliptical cross section was proposed. The long axis of the ellipse on the front surface is located in horizontal direction, which matches the light emitting distribution pattern. The long axis of the ellipse on the back surface gradually become in vertical direction. The 3-D ray-tracing simulation indicates that the irregular duct can achieve relatively good circular symmetric pumping energy distribution. The energy transferring efficiency of microcylinders and the duct is calculated to be 90.84% and 91.98% respectively, corresponding to the total efficiency of 83.55%. The contrast indicates that the irregular duct possesses some advantages in facular shaping and energy transferring efficiency over common ducts.

Key words: laser technique; irregular duct; 3-D ray-tracing; facular shaping

引 言

近年来, 微柱阵列和导管构成的耦合系统因其结构简单、适应性好, 大量应用于激光二极管阵列 (laser diode array, LDA) 抽运的全固态激光器及相关领域^[1-5]。其中, 所用导管的形状有六面体形^[6-11]、渐细圆台形^[12-13] (或称为圆锥管) 和不规则形^[14-15]。不规则形导管的特点是其横截面逐渐发生扭转变形, 侧面的法线方向呈不规则变化, 光线在侧面反射时不同方向的光线得到比较充分的耦合, 最终得到需要的光斑整形效果。受此启发, 作者提出一种新的导管, 其横截面为椭圆且椭圆离心率 (或椭圆形状) 随导管轴向距离逐渐变化。将

该导管与微柱阵列组合, 在大功率全固态激光器中, 可对 LDA 发射的抽运光进行有效整形。

作者利用 MATHEMATICA 软件, 采用一种比较通用的 3 维光线追迹算法^[16], 对光线经微柱阵列和横截面椭圆离心率渐变的导管进行全程 3 维追迹, 并找出了一组合适的导管结构参量, 保证其光束整形效果和能量传输效率。

1 追迹模型

1.1 微柱阵列和导管耦合系统

微柱阵列和导管组成的耦合系统以及坐标系选取如图 1a 所示。

实验室中 LDA 由 12 条线阵构成, 相邻线阵间隔 0.4mm。每条线阵长度为 10mm, 包含 100 个发光点, 每个发光点发光功率为 1W 左右。整个 LDA 功率约为 1200W, 面积为 10mm × 4.4mm。靠近每条线阵放置一条微圆柱对发光点快轴方向的发散角进行预压缩, 共放置 12 条微圆柱形成微柱阵列。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (11104165); 山东省自然科学基金资助项目 (ZR2010FQ024)

作者简介: 耿 雪 (1979-), 女, 硕士, 讲师, 现主要从事全固态激光器技术、模式识别等方面的研究。

E-mail: gsnw1208@sina.com

收稿日期: 2012-06-27; 收到修改稿日期: 2012-07-11

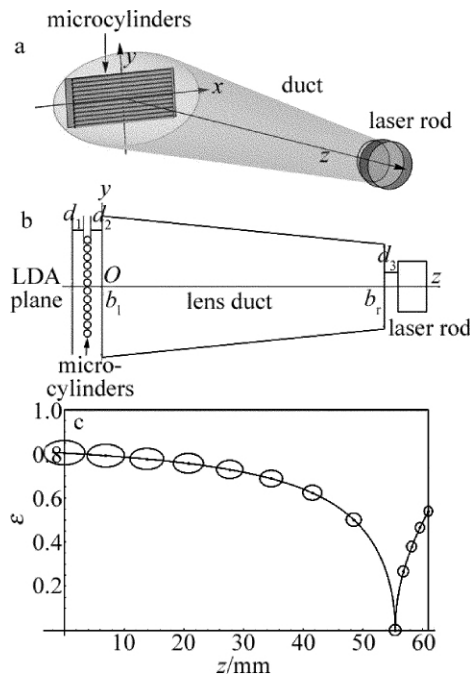


Fig. 1 Schematic diagram of microcylinders and duct

a—3-D diagram for microcylinders, duct and laser medium b—2-D diagram for the section plane in $x=0$ c—elliptical eccentricity and profile of duct in different positions

导管的前后两个端面都是平面,侧面利用全反射原理,使光线不断反射前进,最后经右侧端面折射而出。因此,对于透镜导管侧面,要保证光线入射角大于全反射临界角,并且一直向右前进,在右端面,光线入射角要小于临界角,以保证光线全部射出。其侧面的数学方程式 $F(x, y, z)$ 可以表示为:

$$\frac{x^2}{\left(a_1 - \frac{a_1 - a_r}{L} \cdot z\right)^2} + \frac{y^2}{\left(b_1 - \frac{b_1 - b_r}{L} \cdot z\right)^2} - 1 = 0 \quad (1)$$

式中 a_1, b_1 表示导管左端面 x, y 方向的椭圆半轴长度 $a_1 > b_1$; a_r, b_r 表示导管右端面 x, y 方向的椭圆半轴长度 $a_r < b_r$; L 表示导管长度。

光线追迹计算过程中,坐标系原点选在导管前端的中心。导管 $x=0$ 平面上的截面如图 1b 所示,不同长度处椭圆横截面的离心率以及导管若干位置处的横截面形状如图 1c 所示。图 1a 和图 1c 清楚地表明:导管横截面从长轴在 x 方向的椭圆,逐渐过渡到圆,再过渡到长轴在 y 方向上的椭圆。图 1c 中,根据椭圆离心率 ε 的数值把导管分为前后两段,前一段 ε 逐渐减小到 0,后一段从 0 又逐渐增加。前后两段对光斑整形的趋势是相反的,合理选择 a_1, b_1, a_r, b_r, L 以及导管与激光介质的距离 d_3 的数值,可以得到圆对称性较好的抽运光斑整形效果。

1.2 LDA 发射光经微柱阵列后的整形效果

LDA 每一个发光点的发射光线能量在空间呈椭圆

高斯分布,由于 LDA 快轴方向(图 1a 中的 y 轴方向)光束发散角很大,为 40° 左右,微柱阵列的主要作用是将该方向的光线在空间进行压缩。

LDA 每一发光点发射光线的数学建模以及整个 LDA 发射光线经微柱阵列的追迹过程在作者的前期工作中已经完成^[17],本文中不再赘述。仅给出设计参量以及计算结果:微柱阵与 LDA 发光平面距离为 0.05mm ,微柱半径为 0.15mm ,微柱阵列距离导管左端面 0.05mm ,能量耦合效率为 90.84% 。经微柱阵列后,抽运光在导管左端面的光强分布如图 2 所示。容易发现,其在 x 方向的分布范围比在 y 方向的要大,这正是导管前端面设计中 $a_1 > b_1$ 的原因所在。

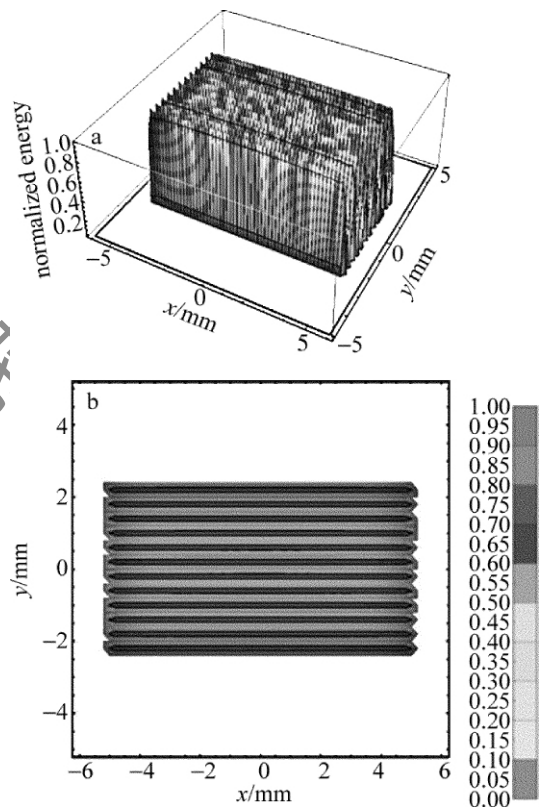


Fig. 2 Normalized energy distribution at the front surface of laser medium a—3-D distribution b—2-D distribution

1.3 导管 3 维光线追迹

光线经微柱出射后,先经导管左端面折射,再经侧面一次或多次全反射,最后从导管右端面折射而出,到达激光晶体抽运端面。

点 (x_0, y_0, z_0) 发射的、空间余弦为 $(\cos\alpha_0, \cos\beta_0, \cos\gamma_0)$ 的光线,与导管侧面的交点 (x, y, z) 可通过数值求解直线与导管侧面的方程组得到:

$$\begin{cases} x - x_0 = m \cdot \cos\alpha_0 \\ y - y_0 = m \cdot \cos\beta_0 \\ z - z_0 = m \cdot \cos\gamma_0 \\ F(x, y, z) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中 m 是一个辅助参量。根据空间解析几何知识,导

管侧面某点 (x, y, z) 处的法线方向余弦 $(\cos\alpha_n, \cos\beta_n, \cos\gamma_n)$ 为:

$$\begin{cases} \cos\alpha_n = \frac{\frac{\partial F}{\partial x}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}} \\ \cos\beta_n = \frac{\frac{\partial F}{\partial y}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}} \\ \cos\gamma_n = \frac{\frac{\partial F}{\partial z}}{\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}} \end{cases} \quad (3)$$

然后通过下式求解 (x, y, z) 处反射光线的方向 $(\cos\alpha_r, \cos\beta_r, \cos\gamma_r)$ [16]:

$$\begin{cases} \cos\alpha_r = \cos\alpha_i - 2\cos\theta_i\cos\alpha_n \\ \cos\beta_r = \cos\beta_i - 2\cos\theta_i\cos\beta_n \\ \cos\gamma_r = \cos\gamma_i - 2\cos\theta_i\cos\gamma_n \end{cases} \quad (4)$$

式中 $(\cos\alpha_i, \cos\beta_i, \cos\gamma_i)$ 表示 (x, y, z) 处入射光线的方向余弦; θ_i 表示 (x, y, z) 处入射光线与法线的夹角,即入射角,其数值可以通过解析几何计算求得。

将以上计算过程写成 MATHEMATICA 循环程序,最终得到微柱阵列和导管耦合系统的光线追迹效果如图 3 所示。



Fig. 3 Diagram for the ray-tracing effect(only a small proportion of light are presented)

1.4 耦合系统光束整形效果

经过计算机反复筛选运算,选定参量值 $a_1 = 7.4\text{mm}$, $b_1 = 4.4\text{mm}$, $a_r = 1.6\text{mm}$, $b_r = 1.9\text{mm}$, $L = 61\text{mm}$,这样既保证了高的能量传输效率(其中微柱阵列的能量传输效率为 90.84%,导管的传输效率为 91.98%,系统传输效率为 83.55%),又得到了符合激光介质需要的具有较好圆对称性的抽运光斑能量分布,如图 4a 所示。作者前期工作“渐细圆台导管”[17](该圆台导管参量:左端面曲率半径为 55mm,左端面截面半径为 6mm,右端面截面半径为 1.8mm,导管长度为 30mm)的光斑整形效果(见图 4b)相比可以发现,其圆对称性更好,显示出椭圆截面离心率渐变导管在光斑整形效果方面的优势。耦合效率方面,该导管 83.55% 的效率比图 4b 对应的圆台导管的 83.49% 略高一些。

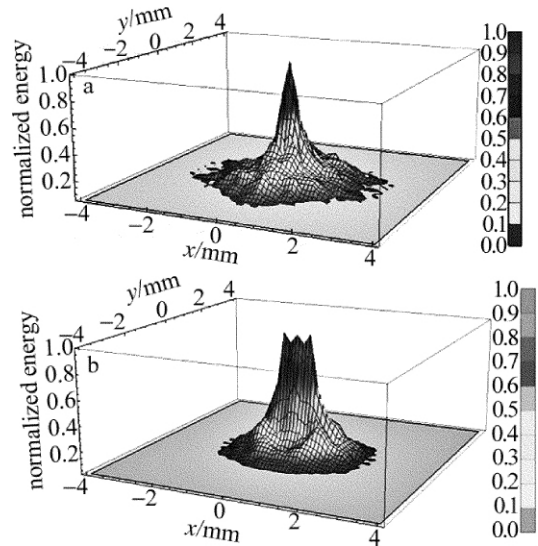


Fig. 4 Beam reshaping effect of the two ducts

a—duct with changing elliptical section b—tapered duct

本文中统计了所追迹光线在导管侧面的全反射次数,结果如图 5 所示。不经导管侧面反射直接从右端面射出的光线占 15%,反射一次的占 46.8%,这两类光线对光斑整形的贡献不大。反射两次以上的光线占 38.2%,正是这些光线分别经过了导管侧面横截面椭圆长轴在 x 方向和在 y 方向两种不同的情况,使耦合、整形后的光斑最终趋向于圆对称的分布模式。

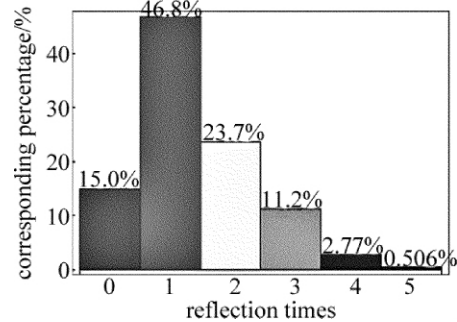


Fig. 5 Statistic for reflection times in side face of the duct

2 结 论

提出一种横截面椭圆离心率逐渐变化的不规则导管。在导管左端面,椭圆长轴在 x 方向,在导管右端面,椭圆长轴在 y 方向,中间是逐渐过渡的。椭圆长轴所在方向不同,提供的光斑整形趋势不同,一根导管前后两段提供不同的光斑整形趋势,通过选择合适的导管结构参量,最后得到圆对称性较好的光斑整形效果。该导管与微柱阵列组合,可作为 LDA 抽运大功率激光器的耦合系统。仿真结果支持了作者的设计思想。整个耦合系统能量传输效率为 83.55%,其中微柱阵列传输效率为 90.84%,导管的传输效率为 91.98%。仿真程序以及分析结果对大功率激光器耦合系统的设计提供了一定的参考和指导。

参 考 文 献

- [1] HONEA E C , BEACH R J , MITCHELL S C , *et al.* High-power dual-rod Yb:YAG laser [J]. *Optics Letters* 2000 ,25(11) : 805-807.
- [2] LEVOSHKIN A , MONTAGNE J E. Efficient diode pumping for Q-switched Yb:Er:glass lasers [J]. *Applied Optics* ,2001 ,40(18) : 3023-3032.
- [3] SCHILLING B W , CHINN S R , HAYS A D , *et al.* End-pumped 1.5 μ m monoblock laser for broad temperature operation [J]. *Applied Optics* 2006 45(25) : 6607-6615.
- [4] RANGANATHAN K , MISRA P , NATH A K. Thin Nd:YAG slab laser pumped by lens duct coupled diode laser stacks [J]. *Applied Physics* 2007 ,B86(2) : 215-217.
- [5] PENG H Y , GU Y Y , SHAN X N , *et al.* Study on beam shaping of high power diode lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers* 2011 ,38(2) : 0202010(in Chinese) .
- [6] FU R , WANG G , WANG Z , *et al.* Design of efficient lens ducts [J]. *Applied Optics* ,1998 37(18) : 4000-4003.
- [7] GOLNABI H. Thermal considerations on the design and operation of lens ducts [J]. *Optics and Laser Technology* , 2003 , 35(6) : 415-423.
- [8] GOLNABI H. Investigation of surface radius variation in design of a lens duct delivery system [J]. *Optics and Laser Technology* ,2004 , 36(1) : 1-10.
- [9] JIA W , HU Y M , LI M Zh , *et al.* Simulation and design of hollow lens duct as a new kind of coupling system for high power laser diode arrays [J]. *Chinese Journal of Lasers* , 2004 ,31(8) : 939-942(in Chinese) .
- [10] MASSUDI G R , LATIFI H. Simulation study for design and optimization of efficiency of two-dimensional lens ducts [J]. *Optical Engineering* 2006 45(4) : 043002.
- [11] FAN Sh W , SHEN Y T. Three-dimensional simulation analysis of ray trace for lens duct as a coupling system [J]. *Acta Optica Sinica* , 2009 29(8) : 2238-2242(in Chinese) .
- [12] LI Y D , LIN X Y , PAN Q L , *et al.* Study on the transmission characteristics of a tapered X-ray capillary [J]. *Acta Optica Sinica* , 2010 30(1) : 310-314(in Chinese) .
- [13] YAN X M , WANG Zh Sh. X-ray image device based on optical fiber taper coupling [J]. *Acta Optica Sinica* 2010 30(5) : 1478-1482(in Chinese) .
- [14] BOKOR N , DAVIDSON N. Anamorphic , adiabatic beam shaping of diffuse light using a tapered reflective tube [J]. *Optics Communications* 2002 201(4/6) : 243-249.
- [15] ZHANG F , LIU Ch , WANG Ch C , *et al.* Beam concentration and homogenization for high power laser diode bar [J]. *Optics Communications* 2008 281(17) : 4406-4410.
- [16] HUANG Zh H , CHENG H F , CAI H Y , *et al.* A study on universal ray tracing algorithm in the medium of variable refractive index [J]. *Acta Optica Sinica* 2005 25(5) : 589-592(in Chinese) .
- [17] HAN K Zh , LIU X J , GE X L , *et al.* Three-dimensional simulation analysis and design by ray-tracing method for microcylinders and two kinds of lens duct [J]. *Chinese Journal of Lasers* ,2012 ,39(3) : 0302003(in Chinese) .