

# 微柱阵列和两种透镜导管耦合系统的三维光线追迹与设计

韩克祯<sup>1</sup> 刘晓娟<sup>1</sup> 葛筱璐<sup>1</sup> 耿 雪<sup>1</sup> 万云芳<sup>1</sup> 付圣贵<sup>1</sup> 何京良<sup>2</sup>

<sup>1</sup> 山东理工大学理学院, 山东 淄博 255049

<sup>2</sup> 山东大学晶体材料国家重点实验室, 山东 济南 250100

**摘要** 微柱阵列和透镜导管组成的耦合系统在激光二极管阵列(LDA)抽运的全固态高能量激光器中起着重要的作用,其光束耦合性能直接影响激光器的最终输出能量和光束质量。为了设计微柱阵列和透镜导管耦合系统的最佳结构参数,需要研究抽运光在耦合系统内部以及在激光晶体端面的分布。利用几何光学理论,对 LDA 的发射光线经微柱阵列和透镜导管的传输进行三维空间追迹,并计算其能量传输效率和光束整形效果。比较了六面体导管和渐细圆台形导管的耦合性能。仿真分析结果表明,六面体导管需要长度较大,能量传输效率略高,而圆台形导管可以较短,耦合整形后的光斑更接近圆形。

**关键词** 激光技术;微柱阵列;透镜导管;光线三维追迹

**中图分类号** O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0302003

## Three-Dimensional Simulation Analysis and Design by Ray-Tracing Method for Microcylinders and Two Kinds of Lens Duct

Han Kezhen<sup>1</sup> Liu Xiaojuan<sup>1</sup> Ge Xiaolu<sup>1</sup> Geng Xue<sup>1</sup> Wan Yunfang<sup>1</sup>

Fu Shenggui<sup>1</sup> He Jingliang<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Science, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255049, China

<sup>2</sup> State Key Laboratory of Crystal Materials, Shandong University, Ji'nan, Shandong 250100, China

**Abstract** The coupling system consisting of microcylinders and lens duct is an important part of high power all-solid-state lasers. Its coupling performance has direct influence on the laser's output power and beam quality. The rays distribution inside the system and on the lasering crystal surface should be studied to optimize the coupling system's structural parameters. Utilizing a 3D ray-tracing method, the real spatial lights propagating through microcylinders and lens duct are traced and the energy transfer efficiency and light distribution are calculated. The coupling characteristics of a hexahedral lens duct and a tapered lens duct are compared. The results show that the hexahedral lens duct needs a bigger length and can achieve higher energy coupling efficiency, while the tapered lens duct can get the light distribution closer to round and the length can be very short.

**Key words** laser technique; microcylinders; lens duct; three-dimensional ray-tracing

**OCIS codes** 140.3460; 220.2740; 080.4295

## 1 引 言

近年来,微柱阵列和透镜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(LDA)抽运的全固态激光器及其他相关领

域<sup>[1~7]</sup>。对该耦合系统的设计,初期大多进行简化的二维光线追迹<sup>[8~11]</sup>,该方法简单易行,但由于所追迹光线是实际三维光线中最特殊的一部分,不能完全描述光线在三维空间的复杂分布。最近国内外

**收稿日期**: 2011-11-09; **收到修改稿日期**: 2011-12-12

**基金项目**: 国家自然科学基金(11104165)、中国科学院大气成分与光学重点实验室开放课题基金(JJ-10-03)和山东省自然科学基金(ZR2010FQ024)资助课题。

**作者简介**: 韩克祯(1981—),男,硕士,讲师,主要从事全固态激光器技术方面的研究。E-mail: kezhen\_han@163.com

进行了常用的六面体形透镜导管的三维光线追迹<sup>[12~15]</sup>,但没有进行光线经微柱阵列的追迹。本文利用 Mathematica 软件,采用一种通用的追迹算法<sup>[16]</sup>,对光线经微柱阵列和实心玻璃透镜导管进行全程三维追迹,统计分析了透镜导管左侧球面半径和导管长度对能量传输效率的影响,并比较了六面体形导管和渐细圆台形导管的耦合性能,最后给出了适合本实验室 LDA 和激光晶体棒尺寸的两组优化的透镜导管结构参数以及对应的光束整形效果。

## 2 追迹模型

### 2.1 LDA、微柱阵列和透镜导管耦合系统

实验室中 LDA 由 12 条线阵构成,相邻线阵间

隔 0.4 mm。每条线阵长度为 10 mm,包含 100 个发光点,每个发光点发光功率为 1 W 左右。整个 LDA 功率约为 1200 W,面积 10 mm×4.4 mm。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。透镜导管的前端是球面,对光线起会聚作用,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,而在右端面,光线入射角要小于临界角,以保证光线全部射出。本文模拟分析了微柱阵列与六面体形导管系统、微柱阵列与渐细圆台形导管系统的耦合性能。两种耦合系统如图 1 所示。

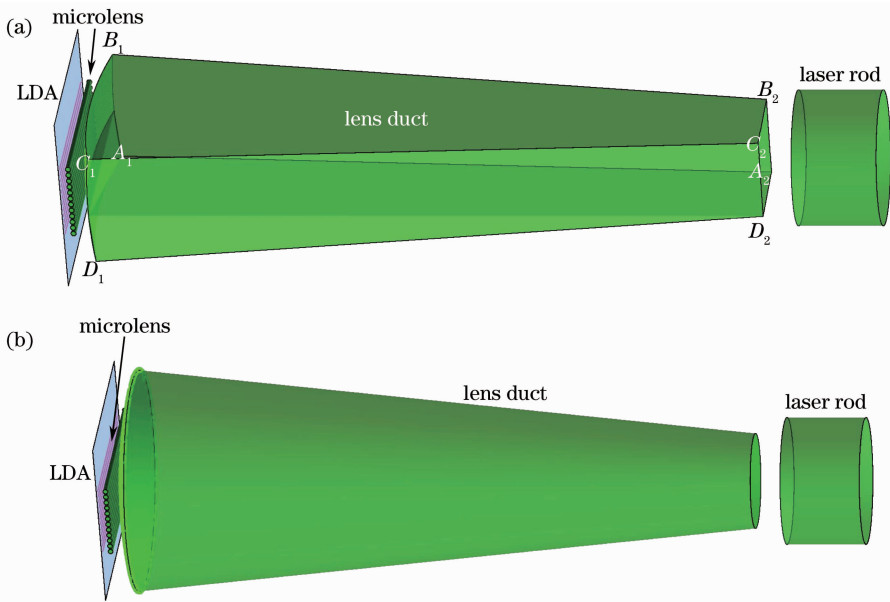


图 1 LDA、微柱阵列和透镜导管系统示意图。(a)六面体形导管;(b)渐细圆台形导管

Fig. 1 Schematic diagram of microcylinders and lens duct. (a) Hexahedral duct; (b) tapered cylinder duct

### 2.2 LDA 发射光线模型

每个 LDA 发光点的追迹过程如下:

空间原点  $o(0,0,0)$  选在透镜导管左球面的球心。坐标系方向选取如图 2(a)所示。每一个发光

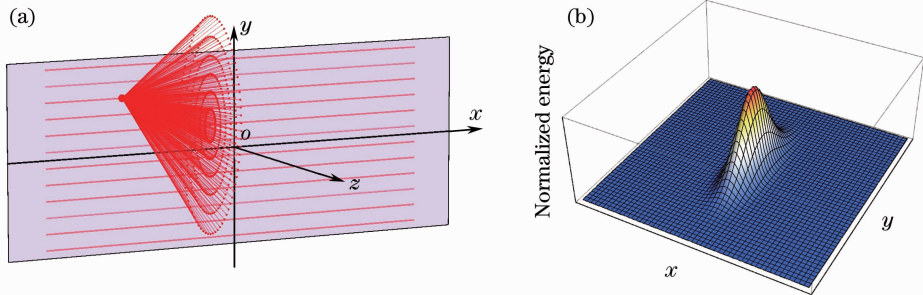


图 2 LDA 线阵某发光点的光线及能量分布示意图。(a)光线的三维空间分布;(b)光能量在垂直于  $z$  方向的观察平面内的分布

Fig. 2 Schematic diagram of rays and distribution of energy from an emitting point in LDA. (a) 3D distribution of rays; (b) distribution of energy in the plane vertical to  $z$  orientation

点的发射光线能量在空间呈椭圆高斯分布,如图 2(b)所示。

### 2.3 微柱阵列光线追迹

由于 LDA 快轴方向[图 3(a)中的  $y$  轴方向]光束发散角很大,为  $40^\circ$  左右,微柱阵列的主要作用是

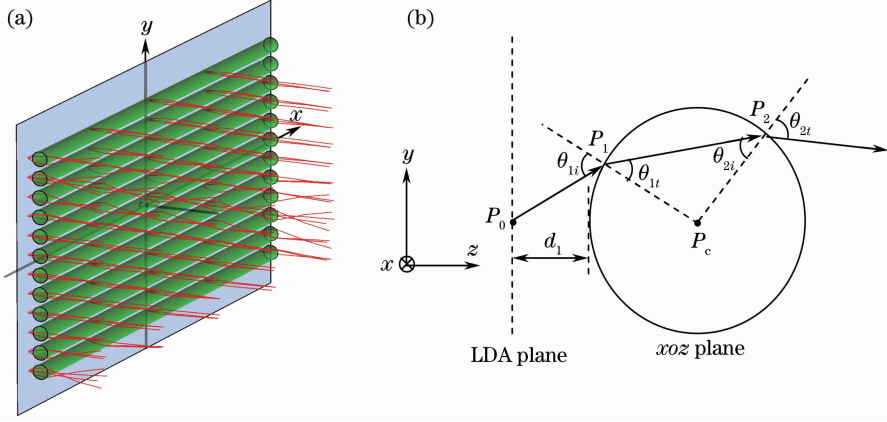


图 3 微柱阵列光线追迹示意图。(a) 3D(仅标出了少量光线);(b)在  $xoz$  平面内

Fig. 3 Schematic diagram of ray-tracing for microcylinders. (a) 3D schematic diagram (only a small portion of rays are presented); (b) cross section in  $xoz$  plane

设 LDA 线阵上某发光点的坐标为  $P_0:(x_0, y_0, z_0)$ , 其发射的某条光线的空间方向余弦为  $(\cos \alpha_0, \cos \beta_0, \cos \gamma_0)$ , 该光线的归一化能量服从椭圆高斯分布:

$$E_{\text{power}0} = \exp \left\{ - \left[ \frac{\arctan \left( \frac{\cos \alpha_0}{\cos \gamma_0} \right)}{\theta_s} \right]^2 - \left[ \frac{\arctan \left( \frac{\cos \beta_0}{\cos \gamma_0} \right)}{\theta_t} \right]^2 \right\} \quad (1)$$

此光线交其右侧的微圆柱于  $P_1:(x_1, y_1, z_1)$ , 具体数值可以通过求解空间直线方程与圆柱面方程的交

将该方向的光线在空间进行压缩。光线追迹效果如图 3(a)所示,追迹模型如图 3(b)所示,LDA 发光面与微柱的距离为  $d_1$ ,微柱半径为  $r_{\text{cylinder}}$ 。由于相邻阵列距离  $0.4 \text{ mm}$ ,因此应满足  $r_{\text{cylinder}} < 0.2 \text{ mm}$ ,考虑实际情况,取  $r_{\text{cylinder}} = 0.15 \text{ mm}$ 。

点得到:

$$\begin{cases} x_1 - x_0 = m \cos \alpha_0 \\ y_1 - y_0 = m \cos \beta_0 \\ z_1 - z_0 = m \cos \gamma_0 \\ (y - y_c)^2 + (z - z_c)^2 = r_{\text{cylinder}}^2 \end{cases}, \quad (2)$$

得到  $P_1$  后,可由空间解析几何确定该点处光线入射角  $\theta_{1i} = \arcsin \left( \frac{|\overrightarrow{P_c P_1} \times \overrightarrow{P_1 P_0}|}{|\overrightarrow{P_c P_1}| \cdot |\overrightarrow{P_1 P_0}|} \right)$ 。折射光线  $|\overrightarrow{P_1 P_2}|$  的方向余弦  $(\cos \alpha_1, \cos \beta_1, \cos \gamma_1)$  由折射定律结合空间解析几何确定,求解公式为<sup>[16]</sup>

$$\begin{aligned} \cos \alpha_1 &= \frac{1}{n_1} (\cos \alpha_0 - \cos \theta_{1i} \times \text{norm } \alpha) + \text{norm } \alpha \times \sqrt{1 - \left( \frac{1}{n_1} \right)^2 (1 - \cos \theta_{1i}^2)}; \\ \cos \beta_1 &= \frac{1}{n_1} (\cos \beta_0 - \cos \theta_{1i} \times \text{norm } \beta) + \text{norm } \beta \times \sqrt{1 - \left( \frac{1}{n_1} \right)^2 (1 - \cos \theta_{1i}^2)}; \\ \cos \gamma_1 &= \frac{1}{n_1} (\cos \gamma_0 - \cos \theta_{1i} \times \text{norm } \gamma) + \text{norm } \gamma \times \sqrt{1 - \left( \frac{1}{n_1} \right)^2 (1 - \cos \theta_{1i}^2)}; \end{aligned} \quad (3)$$

式中  $n_1$  表示微柱折射率,  $(\cos \alpha_0, \cos \beta_0, \cos \gamma_0)$  表示入射光线  $|\overrightarrow{P_0 P_1}|$  的方向余弦,  $(\text{norm } \alpha, \text{norm } \beta, \text{norm } \gamma)$  表示点  $P_1$  处法线矢量  $\overrightarrow{P_c P_1}$  的方向余弦。折射光线  $|\overrightarrow{P_1 P_2}|$  携带的能量根据菲涅耳公式得到:

$$E_{\text{power}1} = E_{\text{power}0} \times$$

$$\left\{ 1 - \frac{1}{2} \left[ \left( \frac{\cos \theta_{1t} - n_1 \cos \theta_{1i}}{\cos \theta_{1t} + n_1 \cos \theta_{1i}} \right)^2 + \left( \frac{\cos \theta_{1i} - n_1 \cos \theta_{1t}}{\cos \theta_{1i} + n_1 \cos \theta_{1t}} \right)^2 \right] \right\}. \quad (4)$$

光线与微柱的第二个交点  $P_2$  的坐标  $(x_2, y_2, z_2)$ 、 $P_2$  处折射光线的方向余弦以及光线能量的确定,方法

同上。

### 2.4 透镜导管光线追迹

光线经微柱出射后,先经透镜导管左端球面折射,然后在侧面一次或多次全反射(如果入射角不够大,则会在侧面发生折射,这种情况应避免),再经导管右端面折射而出(如果入射角过大,则会发生全反射致使光线向左侧折回,这种情况也应避免),最终到达激光晶体的抽运端面。微柱阵列右侧与透镜导管最左端距离为 $d_2$ ,如图4所示。六面体透镜导管的几何构造为:左端面是半径为 $r$ 的球面,4个侧面及右端面为平面,左端球面与4个侧面交于4个顶点

$A_1、B_1、C_1、D_1$ ,其中水平线段 $B_1C_1$ 的长度为 $H_x$ ,竖直线段 $A_1B_1$ 的高度为 $H_y$ ,右端面4个顶点为 $A_2、B_2、C_2、D_2$ ,其中水平线段 $B_2C_2$ 的长度为 $h_x$ ,竖直线段 $A_2B_2$ 的高度为 $h_y$ 。渐细圆台形透镜导管的几何参数为:左侧球面半径为 $r$ ,左侧面圆环半径为 $r_{left}$ ,右侧面圆环半径为 $r_{right}$ 。透镜导管右侧与激光晶体左端面的距离用 $d_{outdis}$ 表示,如图4(a)所示。光线经导管的追迹与能量传输的计算方法与光线经微柱的追迹相同。微柱阵列和透镜导管耦合系统的光线追迹效果如图4(b),(c)所示。

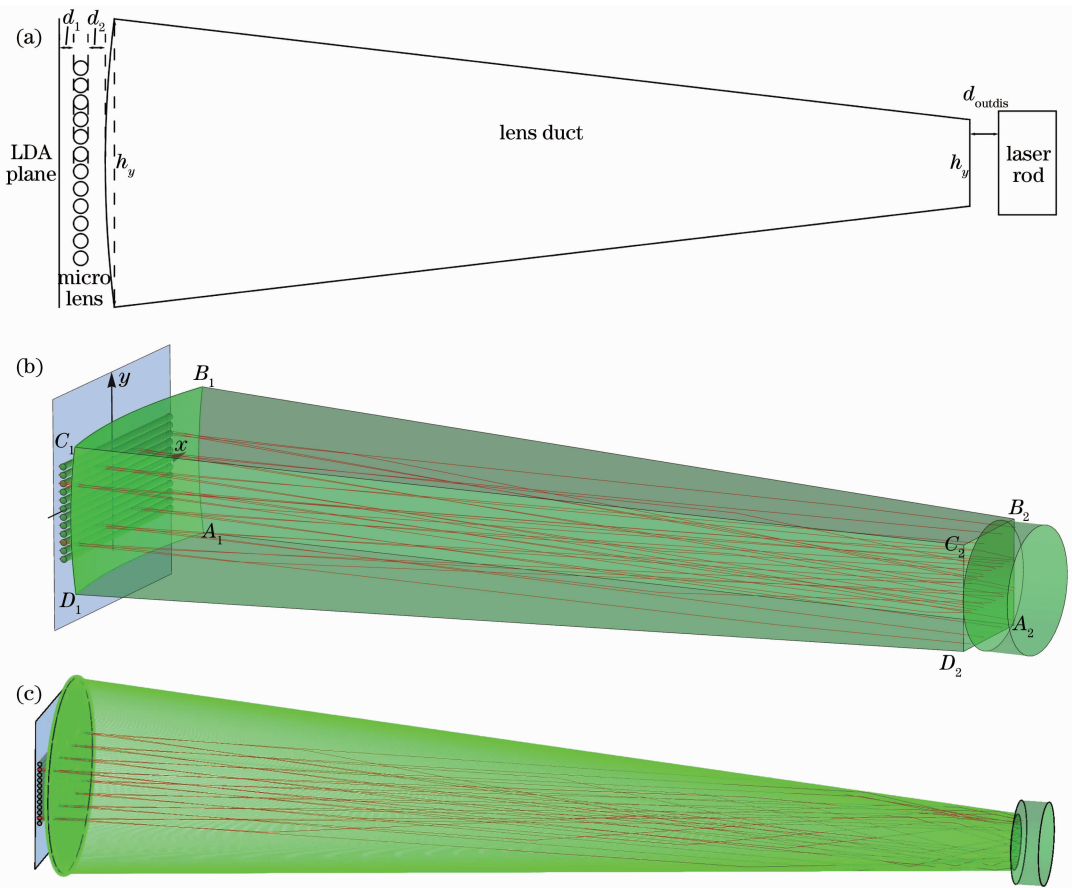


图4 耦合系统光线追迹效果图(仅标出了少量光线)。(a)耦合系统前视图;(b)微柱阵列+六面体透镜导管追迹效果;(c)微柱阵列+渐细圆台透镜导管追迹效果

Fig. 4 Schematic diagram of 3D ray-tracing for the coupling system (only a small portion of rays are presented). (a) Front view of the coupling system; (b) 3D ray-tracing for microcylinders and hexahedral duct; (c) 3D ray-tracing for microcylinders and tapered cylinder duct

### 2.5 能量传输效率

考虑 LDA 线阵、微柱阵列和激光晶体的实际尺寸(端面半径 4 mm),取微柱半径 $r_{cylinder}=0.15$  mm,  $d_1=0.05$  mm,  $d_2=0.05$  mm, 这组参数保证了对 LDA 快轴方向光线的有效、合理压缩。为分析透镜导管左侧球面半径 $r$ 和长度 $L$ 对能量传输效率影响

的一般规律,对于六面体导管,取 $H_x=12$  mm,  $H_y=7$  mm,  $h_x=h_y=5$  mm, 对渐细圆台导管,取左端面圆环半径 $r_{left}=7$  mm,右端面圆环半径 $r_{right}=2.5$  mm, 对这两种导管,分别于 $r$ 在 20~60 mm,  $L$ 在 30~120 mm 范围内,统计耦合系统的能量传输效率,其结果如图 5 所示。结果表明,对于六面体形导管,在整

个统计范围内,能量传输效率都较高,且最高效率出现在  $r$  和  $L$  都较大的区域;而对于渐细圆台导管,其能量传输效率则对长度  $L$  非常敏感,为保证高的能量传输效率,长度  $L$  应取较小的值。原因在于:对渐细圆台导管,在其他几何参数相同的条件下,导管长度越大,光线在侧壁反射次数增加,在侧面的入射

角逐渐减小,最终造成在导管右端面的入射角大于全反射临界角,从而不能出射,严重影响能量传输效率。必须指出的是,图 5 中的能量传输效率值是光线经微柱阵列、透镜导管整个系统之后的值。其中微柱阵列的能量传输效率为 90.8%,透镜导管的耦合效率最高可达到 92.2%。

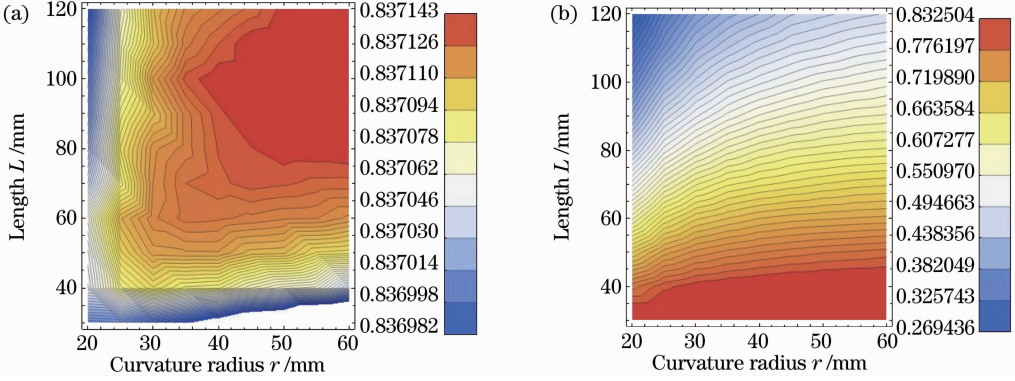


图 5 不同  $r$ 、 $L$  组合的能量传输效率。(a)微柱阵列+六面体透镜导管能量传输效率;(b)微柱阵列+渐细圆台透镜导管能量传输效率

Fig. 5 Energy transfer efficiency for different  $r$  and  $L$ . (a) Efficiency for microcylinders and hexahedral duct; (b) efficiency for microcylinders and tapered cylinder duct

## 2.6 光束整形效果

将激光晶体放置在距离透镜导管右端面不同的距离  $d_{\text{outdis}}$  处,会得到不同的抽运光斑分布。 $d_{\text{outdis}}$  的取值应使光斑尽可能接近高斯分布,并保证光斑大小不超过晶体端面尺寸。经多次计算、比较后,对六面

体导管,取  $r = 55$  mm,  $L = 100$  mm,  $H_x = 12$  mm,  $H_y = 6$  mm,  $h_x = 3$  mm,  $h_y = 4$  mm,  $d_{\text{outdis}} = 0.5$  mm;对渐细圆台形导管,取  $r = 55$  mm,  $L = 30$  mm,  $r_{\text{left}} = 6$  mm,  $r_{\text{right}} = 1.8$  mm,  $d_{\text{outdis}} = 1$  mm。两组参数的导管对应的抽运光在激光晶体左端面的能量分布如图 6

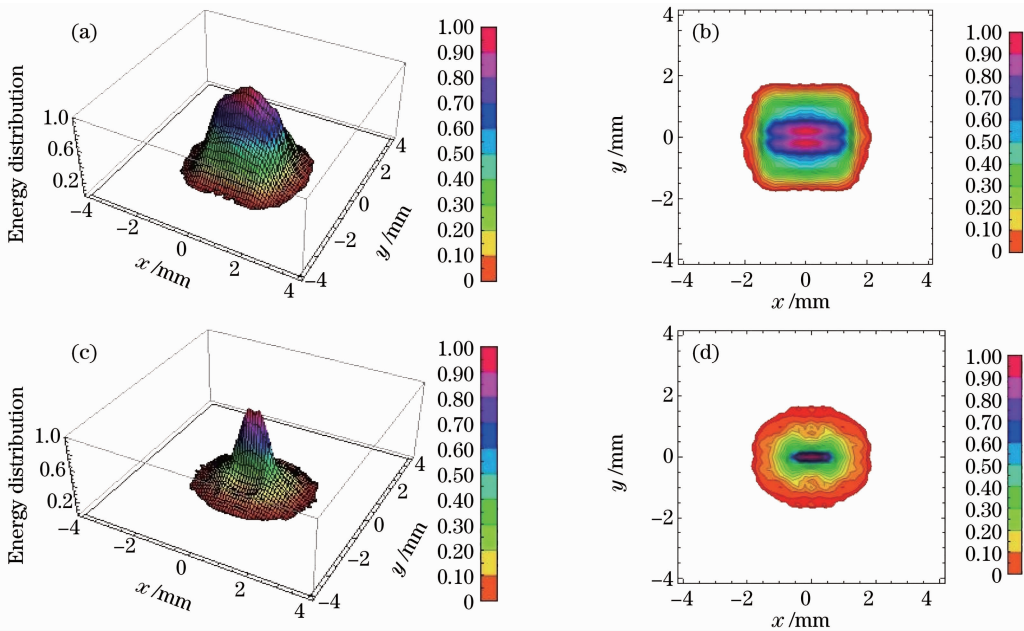


图 6 耦合系统的光束整形效果(统计光线条数均为 36360 条)。(a)、(b)微柱阵列+六面体透镜导管整形后光能量三维、二维分布;(c)、(d)微柱阵列+渐细圆台形导管整形后光能量三维、二维分布

Fig. 6 Beam shaping effect of the coupling system (36360 rays are calculated). (a), (b) Energy distribution after microcylinders and hexahedral duct; (c), (d) energy distribution after microcylinders and tapered cylinder duct

所示。比较发现,六面体导管得到的抽运光斑接近矩形,而渐细圆台导管得到的光斑更接近圆形。其原因为:在侧面上,六面体导管仅提供了4个法线方向,而渐细圆台导管提供了无数个法线方向,后者使不同方向光线相互耦合的能力明显大于前者,从而使整形后的光斑更接近圆形。

### 3 结 论

利用科学软件 Mathematica,根据光线反射折射定律、空间解析几何、菲涅耳公式,对 LDA 发出的光线经微柱阵列和透镜导管的整个传输过程进行了三维追迹,统计分析了不同情况下光线能量传输效率、激光晶体左端面的抽运光能量横向分布,并比较了六面体形透镜导管和渐细圆台形透镜导管的耦合性能。结果发现六面体导管能量传输效率对长度不很敏感,能量传输效率略高,得到的抽运光斑接近矩形,而圆台形透镜导管的能量传输效率对长度改变非常敏感,耦合整形后的光斑更接近圆形。需要指出的是,本论文的仿真计算结果未经实验严格验证,相应器件的制备和实验验证将在下一步工作中进行。

### 参 考 文 献

- 1 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
- 2 Alexander Levoshkin, Jean E. Montagne. Efficient diode pumping for Q-switched Yb:Er:glass lasers[J]. *Appl. Opt.*, 2001, **40**(18): 3023~3032
- 3 Bradley W. Schilling, Stephen R. Chinn, A. D. Hays *et al.*. End-pumped 1.5  $\mu\text{m}$  monoblock laser for broad temperature operation[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(25): 6607~6615
- 4 K. Ranganathan, P. Misra, A. K. Nath. Thin Nd:YAG slab laser pumped by lens duct coupled diode laser stacks[J]. *Applied Physics B-Lasers and Optics*, 2007, **86**(2): 215~217
- 5 Peng Hangyu, Gu Yuanyuan, Shan Xiaonan *et al.*. Study on

- beam shaping of high power diode lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(2): 0202010
- 彭航宇, 顾媛媛, 单肖楠 等. 大功率半导体激光光源光束整形技术研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(2): 0202010
- 6 Li Yude, Lin Xiaoyan, Pan Qiuli *et al.*. Study on the transmission characteristics of a tapered X-ray capillary[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(1): 310~314
- 李玉德, 林晓燕, 潘秋丽 等. 圆锥形 X 光导管的传输特性研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(1): 310~314
- 7 Yan Xiaomei, Wang Zhishe. X-ray image device based on optical fiber taper coupling[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(5): 1478~1482
- 闫晓梅, 王志社. 基于光锥耦合的 X 射线像增强器[J]. *光学学报*, 2010, **30**(5): 1478~1482
- 8 R. Fu, G. Wang, Z. Wang *et al.*. Design of efficient lens ducts[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(18): 4000~4003
- 9 H. Golnabi. Thermal considerations on the design and operation of lens ducts[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2003, **35**(6): 415~423
- 10 H. Golnabi. Investigation of surface radius variation in design of a lens duct delivery system[J]. *Opt. & Laser Technol.*, 2004, **36**(1): 1~10
- 11 Ghasemi, R. Massudi, H. Latifi. Simulation study for design and optimization of efficiency of two-dimensional lens ducts[J]. *Opt. Engng.*, 2006, **45**(4): 043002
- 12 N. Bokor, N. Davidson. Anamorphic, adiabatic beam shaping of diffuse light using a tapered reflective tube[J]. *Opt. Commun.*, 2002, **201**(4-6): 243~249
- 13 Zhang Fan, Liu Chu, Wang Chuncan *et al.*. Beam concentration and homogenization for high power laser diode bar[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**(17): 4406~4410
- 14 Fan Shuwei, Shen Yuting. Three-dimensional simulation analysis of ray trace for lens duct as a coupling system[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(8): 2238~2242
- 樊叔维, 沈玉婷. 透镜导管耦合系统中光线三维追迹模拟分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(8): 2238~2242
- 15 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
- 16 Huang Zhanhua, Cheng Hongfei, Cai Huaiyun *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
- 黄战华, 程红飞, 蔡怀宇 等. 变折射率介质中光线追迹通用算法的研究[J]. *光学学报*, 2005, **25**(5): 589~592