

# 透镜导管耦合系统中光线三维追迹模拟分析

樊叔维 沈玉婷

(西安交通大学电子与信息工程学院, 陕西 西安 710049)

**摘要** 半导体激光器抽运耦合系统是固体激光器的重要组成部分。非成像系统空心透镜导管构成的耦合系统非常适用于大功率的半导体抽运阵列。为了给出透镜导管耦合系统的最佳结构,需要研究抽运光束在耦合系统内及输出面的分布。利用几何光学理论,在三维空间内,建立了空心透镜导管中抽运光束传播的数学模型,推导了光束传播的三维轨迹方程;在全三维光线追迹的理论分析基础上,开发了模拟透镜导管耦合系统传输光线的 3D 计算机仿真软件;通过该软件可以自动获得全部抽运光线在透镜导管耦合系统中的真实传输路径及在耦合系统输出端面的分布。最后探讨了抽运光束通过空心透镜导管耦合系统后的能量转换效率。计算结果表明,空心透镜导管的能量转换效率可以达到 96.08% 以上。

**关键词** 激光技术;激光二极管阵列;透镜导管;光线追迹;三维模拟

**中图分类号** TN243 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20092908.2238

## Three-Dimensional Simulation Analysis of Ray Trace for Lens Duct as A Coupling System

Fan Shuwei Shen Yuting

(The School of Electronic and Information Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an, Shaanxi 710049, China)

**Abstract** Laser diode (LD) pump coupling system is an important part of the solid-state lasers. Non-imaging system consisting of hollow lens duct coupling system is ideal for high-power semiconductor laser array. Based on geometric optics theory, the mathematic model of three-dimensional (3D) light transmission in hollow lens duct was developed, and 3D ray trace equations were clearly presented. With the help of theoretical analysis of three-dimensional ray trace, a 3D simulation software of ray transmission for lens duct as coupling systems was developed. The real transmission trace of all the pump rays can be shown automatically with the developed 3D software and the pump light distribution in output of lens duct also can be given. Finally, The coupling energy efficiency coming through the hollow lens duct was discussed. The results show that the coupling energy efficiency of the hollow lens duct can reach more than 96.08%.

**Key words** laser technology; laser diode arrays; lens duct; ray trace; three-dimensional simulation

### 1 引言

激光二极管阵列(LDA)抽运的固体激光器(DPL)以其高功率、高能量、高光束质量等特性成为激光器的研究热点<sup>[1~2]</sup>。然而由于激光二极管(LD)出射光束在快轴(垂直于 p-n 结)、慢轴(平行于 p-n 结)上的发散角不对称以及出射光束发散角大,不适合直接抽运端面抽运固体激光器的工作物质。在 LDA 与固体激光器之间需要设计合适的耦合系统,使 LDA 发射的光束与固体激光器的光场

有效地匹配。目前,耦合系统设计与热效应已成为 DPL 激光器最为关键的技术<sup>[3~4]</sup>。激光二极管阵列耦合系统一般有光纤耦合、二元光学器件耦合、透镜组耦合、透镜导管耦合等多种形式<sup>[5~8]</sup>。与传统的耦合系统相比,透镜导管耦合结构简单、适应性好、输出效率高,是目前最适用于大口径高功率二极管阵列的耦合方式<sup>[9~14]</sup>。透镜导管耦合系统主要分为实心透镜导管和空心透镜导管两大类,现有的研究表明,空心透镜导管相比实心透镜导管更适用

收稿日期: 2008-09-25; 收到修改稿日期: 2008-11-27

作者简介: 樊叔维(1968—),女,副教授,博士,主要从事固体激光器及技术方面的研究。

E-mail: shwfan@mail. xjtu. edu. cn

于大口径高功率的 DPL 系统<sup>[13]</sup>。透镜导管耦合系统的设计基于对在其内部传输的抽运光分布的研究。目前,国内在此方面也开展了一系列的研究<sup>[10~13]</sup>。但是这些研究大都是基于光束在简化的快轴、慢轴两个方向在透镜导管内的二维模拟研究<sup>[10,11,13]</sup>,没有考虑到 LDA 实际光束在透镜导管内的复杂分布。据报道,美国利弗莫尔实验室和法国的 LULI 实验室建立了相应的光束三维追迹分析软件,中国的国防科学技术大学完成了三维分析模拟<sup>[12,14]</sup>,本文针对空心透镜导管耦合系统中抽运光束的传播进行数学建模,推导出光束三维追迹方程,并进行了能量传输效率分析。

## 2 数学建模

### 2.1 透镜导管耦合系统简介

空心透镜导管由折射透镜和空心导管组成。空心导管形状为四棱台,由单面高光洁度的金属板或镀全反膜玻璃板拼装而成。折射透镜对 LDA 出射光束进行会聚,再通过空心导管内壁的反射,将抽运光传递到输出端。透镜导管耦合系统的结构示意图如图 1 所示。

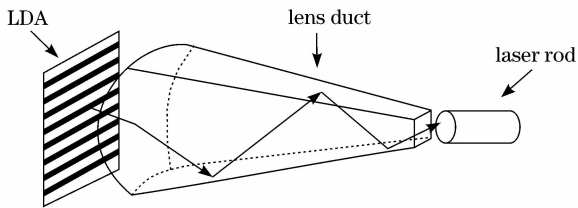


图 1 LDA 及透镜导管耦合系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of LDA and lens duct coupling system

### 2.2 光线追迹

一般采用光线追迹的方法来模拟和分析激光二极管阵列对固体激光介质的抽运耦合过程。只有真实地追迹激光二极管阵列发出的大量光线,特别是非傍轴光线,才能够揭示激光二极管抽运光源通过透镜导管耦合系统传输到激光器晶体棒,设计出最优的耦合系统,并分析抽运光在晶体中相对强度分布。传统的二维光线追迹方法仅仅分别考虑了光线在快轴、慢轴两个平面内的传输过程,而全三维光线追迹可以真实地模拟光束的三维立体角发射情形,如图 2 所示。同时由于透镜导管耦合系统的结构特点,使得大量的光线在传输过程中并不是在同一平面上,这些光线的传输与快慢轴平面上的光线传输过程是不同的。而全三维的光束追迹模拟分析可以

真实地反映光线在耦合系统内的传输轨迹。

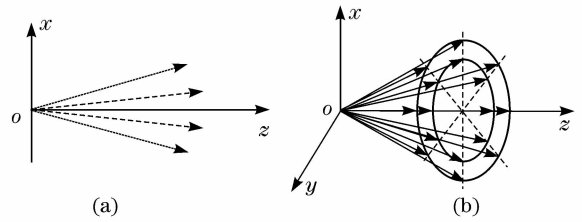


图 2 二维光源和三维光源的发射角模拟示意图 (a) 2D; (b) 3D

Fig. 2 Schematic diagram of 2D (a) and 3D (b) light source radiation angle

### 2.3 三维光线追迹方程

透镜导管耦合系统全三维光线追迹的坐标系建立与耦合系统的主要结构参数如图 3 所示。

在图 3 所示的空心透镜导管耦合系统中,折射透镜对 LDA 出射光束进行会聚,再通过空心导管内壁的多次反射,将抽运光传递到输出端。其中,透镜第一个面的曲率半径为  $R_1$ ,第二个面的曲率半径为  $R_2$ ,空心导管长  $L$ ,入射端面的尺寸为  $H_x \times H_y$ ,出射端面为  $h_x \times h_y$ ,二极管阵列到透镜导管表面中心距离为  $d$ ,透镜表面中心点到入射端面的距离为  $L'$  ( $L'$  非初值,可由以上条件解得),出射端面到接受屏的距离为  $E_{\text{pin}}$ 。

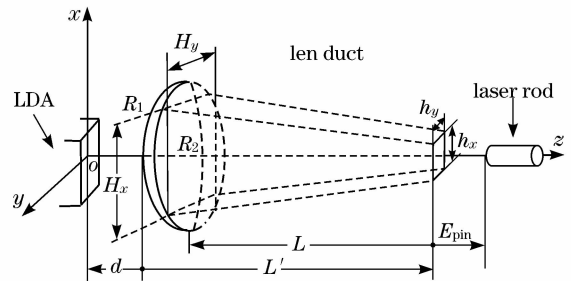


图 3 透镜导管主要参数图

Fig. 3 Parameters of lens duct

设由二极管阵列发出的某一光线的坐标为  $(x_0, y_0, z_0)$ , 出射角度为  $(\alpha_0, \beta_0, \gamma_0)$ , 则该出射光线的直线方程为

$$\frac{x - x_0}{\cos \alpha_0} = \frac{y - y_0}{\cos \beta_0} = \frac{z - z_0}{\cos \gamma_0}. \quad (1)$$

透镜所在球面方程为

$$x^2 + y^2 + (z - R - d)^2 = R_1^2. \quad (2)$$

联立(1)、(2)两式可解得出射光线与透镜第一个面的交点  $(x_1, y_1, z_1)$ 。

利用折射定理来确定折射光线的传播方向  $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ 。首先要确定折射面,设其面向量为  $(A, B, C)$ ,透镜表面在交点  $(x_1, y_1, z_1)$  处的法线向量为

$(A_n, B_n, C_n)$  易知

$$\begin{cases} A^2 + B^2 + C^2 = 1; \\ A_n \times A + B_n \times B + C_n \times C = 0; \\ A \times \cos \alpha_0 + B \times \cos \beta_0 + C \times \cos \gamma_0 = 0. \end{cases} \quad (3)$$

在折射面内, 利用折射定律, 可得

$$\begin{cases} A_n \times \cos \alpha_1 + B_n \times \cos \beta_1 + C_n \times \cos \gamma_1 = M; \\ A \times \cos \alpha_1 + B \times \cos \beta_1 + C \times \cos \gamma_1 = 0; \\ \cos^2 \alpha_1 + \cos^2 \beta_1 + \cos^2 \gamma_1 = 1. \end{cases} \quad (4)$$

解方程组即可得到  $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ , 其中  $M$  为折射角的余弦值。

同理, 可得第二次折射后的光线  $(x_2, y_2, z_2)$  及  $(\alpha_2, \beta_2, \gamma_2)$ 。

如图 4 所示, 将透镜导管的四个面分别定为  $A'$ ,  $B'$ ,  $C'$ ,  $D'$  面。以  $D'$  面为例, 来讨论光线在该面上的反射情况, 其他三个面采取相同的方法确定反射光线。

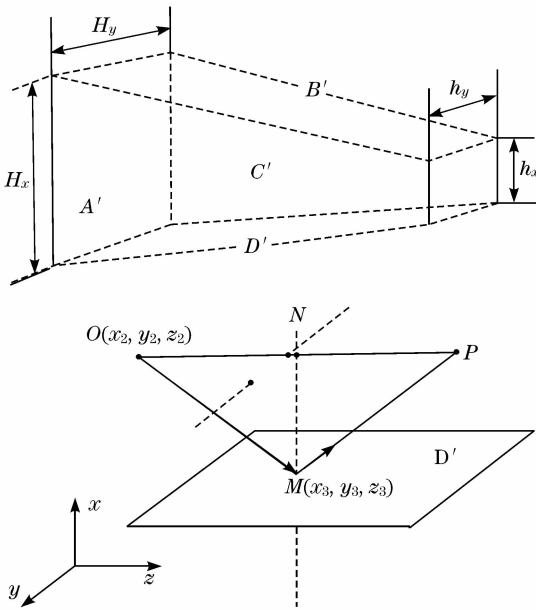


图 4  $D'$  面的反射情况示意图

Fig. 4 Schematic diagram of  $D'$  plane reflection

$D'$  面的方程为

$$m_{D'} \left( x + \frac{h_x}{2} \right) + n_{D'} (z - L' - d) = 0, \quad (5)$$

其中  $m_{D'}$ ,  $n_{D'}$  分别为  $D'$  面的面向量参数:

$$m_{D'} = \frac{L}{\left[ \left( \frac{H_x - h_x}{2} \right)^2 + L^2 \right]^{1/2}},$$

$$n_{D'} = - \frac{\frac{H_x - h_x}{2}}{\left[ \left( \frac{H_x - h_x}{2} \right)^2 + L^2 \right]^{1/2}}.$$

将折射光线的直线方程和  $D'$  面的面方程(5)联立, 即可得到在  $D'$  面上的反射点  $(x_3, y_3, z_3)$ 。接下来就是要确定反射光线的方向角  $(\alpha_3, \beta_3, \gamma_3)$ 。如图 4 所示,  $OM$  为折射光线, 在  $D'$  面发生反射,  $M$  点为反射点。  $MN$  为过反射点做  $D'$  面的垂线, 即过  $M$  点  $D'$  面的法线,  $MP$  为反射光线。首先, 确定  $MOP$  平面, 已知平面过点  $(x_3, y_3, z_3)$ , 则只需要求平面法线就可以得到平面方程, 设法向量为  $(a, b, c)$ , 则

$$\begin{cases} a^2 + b^2 + c^2 = 1, \\ am_{D'} + cn_{D'} = 0, \\ a \cos \alpha_2 + b \cos \beta_2 + c \cos \gamma_2 = 0. \end{cases} \quad (6)$$

通过上式可解得  $a, b, c$  的值, 即确定了反射光线所在的平面, 就可以通过反射定律计算出反射光线的方向角:

$$\begin{cases} m_{D'} \cos \alpha_2 + n_{D'} \cos \gamma_2 = - (m_{D'} \cos \alpha_3 + n_{D'} \cos \gamma_3), \\ a \cos \alpha_3 + b \cos \beta_3 + c \cos \gamma_3 = 0, \\ \cos^2 \alpha_3 + \cos^2 \beta_3 + \cos^2 \gamma_3 = 1. \end{cases} \quad (7)$$

求解方程组(7), 即可得到要求的反射光线的方向角  $(\alpha_1, \beta_1, \gamma_1)$ 。利用程序反复计算反射光线, 直到光线出现回射或出射为止。

对每个发光源的光线进行空间立体角范围内采样, 通过三维光线追迹程序自动获得全部光线在透镜导管耦合系统中的真实传输路径, 在全三维光线追迹的理论分析基础上, 开发了相应的计算机模拟分析程序。

## 2.4 能量转换效率

从二极管阵列发出的每一条光线都携带一定的能量。对激光二极管来说, 它的光斑分布不均匀, 其输出光斑可近似为空间椭圆高斯分布。根据二极管阵列的能量公式<sup>[4]</sup>

$$E_i(x, y, \theta_x, \theta_y) = \frac{1}{\omega_a h_a \pi \theta_s \theta_t} \times \exp \left\{ - \left[ \left( \frac{\theta_x}{\theta_s} \right)^2 + \left( \frac{\theta_y}{\theta_t} \right)^2 \right] \right\}, \quad (8)$$

可以计算二极管阵列出射的每条光线携带的能量  $E_i$ , 其中  $\theta_s, \theta_t$  分别表示光线在慢轴, 快轴的发散角。不计透镜损耗, 可以得到此光线经过透镜导管后出射的能量

$$E_o = \Gamma \times E_i, \quad (9)$$

其中  $I$  为光线在透镜导管壁上的反射次数,  $\Gamma$  为透镜导管侧壁的反射率。在出射端面设定一个接受屏, 屏距出射端口的距离为  $E_d$ 。屏的大小取固体激光器端面的尺寸, 对满足出射条件并能够射到这个

屏上的光线的能量进行叠加,可以得到系统的输出能量,它与入射能量的比值即为整个系统的理论能量转换效率。

### 3 计算机仿真

采用的 LDA 参数参考中科院研制的 QCW—600W<sup>[13]</sup>(10 条 LD 线阵均匀分布,快轴方向总长度 3.6 mm,发散角为 40°,经微柱透镜压缩后减小为 10°;慢轴方向长度为 10 mm,发散角为 10°);固体激光器工作物质参数参考 Nd:YVO<sub>4</sub>(端面尺寸为 4 mm×4 mm)。透镜导管耦合系统的参数取值为: $d=0.5, f=46, H_x=12, H_y=5, h_x=2.8, h_y=2.2, L=37, R=23, E_{pin}=2.5$ ,数据单位为 mm。

图 5 给出了一条光线三维追迹模拟,(a),(b)分别为不同角度的视图,由图 5 可以清晰地看到光线在不同平面上的传输轨迹。

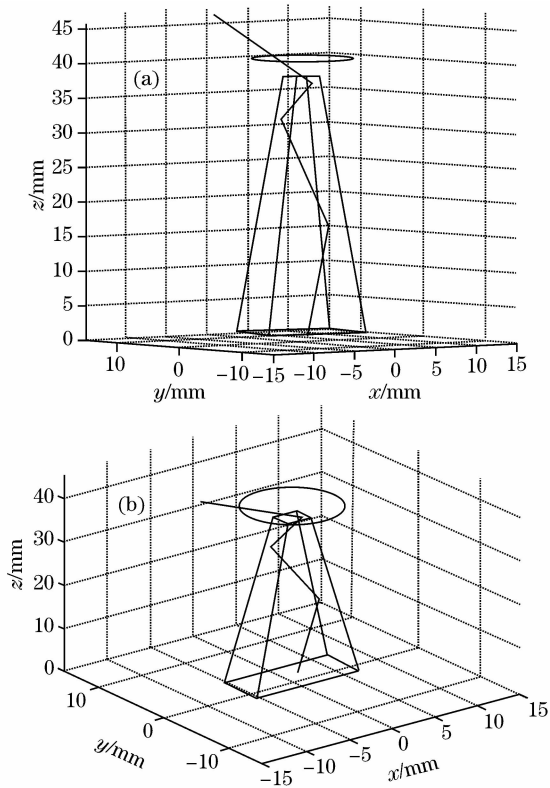


图 5 一条光线传输轨迹图

Fig. 5 Diagrams of one ray trace from different view angles

整个二极管阵列发出的光束的全三维追迹图如图 6 所示,(a),(b)分别为不同角度的视图。为观察清晰起见,每个发光元在空间立体角范围内取 5 条光线(光线过于密集图示不能清楚显示光线轨迹)。模拟实际光源情况增加点阵光源的个数,在

3.6 mm×10 mm 的阵列上取 10×19 共 190 个光源点时,并将屏距离调整为 0.5 mm。能量转换效率高则 96.08%。这与文献[14]所提供的空心透镜导管的能量转换效率吻合度很好,并且,该耦合系统的结构参数可以进一步优化。

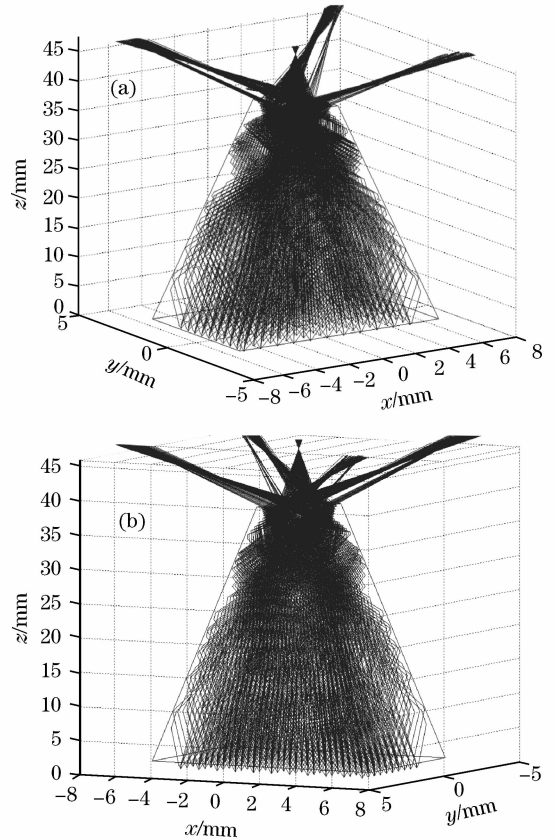


图 6 二极管阵列发出的光束的全三维追迹

Fig. 6 Diagrams of LDA rays trace from different view angles

### 4 结 论

由于空心透镜导管耦合系统的结构特点,抽运光束在其内部的传输、分布十分复杂,简化的二维光束追迹不能准确反映出抽运光的实际情况,通过三维光线追迹模拟抽运光束的真实传输、分布对设计高效的空心透镜导管耦合系统无疑具有重要的意义。本文以几何光学为理论依据,建立了空心透镜导管内抽运光束在三维空间的传播的数学模型,给出了详细的光束传播的三维轨迹方程;以 Matlab 软件为编程工具,开发了模拟基于三维空间中的透镜导管耦合系统传输光线仿真软件。利用该软件可以得到透镜导管耦合系统中光线的真实传播轨迹、分布图,探讨了抽运光束通过空心透镜导管耦合系统

后的能量转换效率。对系统研究空心透镜导管耦合的参数设计、研究抽运光在 DPL 激光器增益介质内的分布具有重要意义。

### 参 考 文 献

- 1 Guo Mingxiu, Li Jindong, Fu Wenqiang. 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
- 2 Wu Chunting, Ju Youlun, Wang Zhenguo *et al.*. Laser diode-pumped Tm, Ho : YLF single-frequency laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(6): 815~818  
吴春婷, 鞠有伦, 王振国等. 激光二极管抽运的 Tm, Ho : YLF 单模激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(6): 815~818
- 3 Song Xiaolu, Guo Zhen, Li Bingbi *et al.*. Thermal relaxation time of crystal in pulsed laser diode end-pumped solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(8): 1132~1138  
宋小鹿, 过 振, 李兵斌等. 脉冲激光二极管端面抽运固体激光器中晶体的热弛豫时间[J]. *中国激光*, 2008, **35**(8): 1132~1138
- 4 Shao Jie, Li Xiaoli, Feng Yutong *et al.*. LD-end-pumped Nd : YVO<sub>4</sub> Slab laser and its thermal effects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 497~501  
邵 杰, 李小莉, 冯宇彤等. 激光二极管端面抽运 Nd : YVO<sub>4</sub> 板条激光器及其热效应[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 497~501
- 5 Feugnet G., Bussac C., Larat C. *et al.*. High efficiency TEM<sub>00</sub> Nd:YVO<sub>4</sub> laser longitudinally pumped by a high-power array[J]. *Opt. Lett.*, 1995, **20**(2): 157~159
- 6 Raymond J. Beach. Theory and optimization of lens ducts[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(12): 2005~2015
- 7 Sudesh V., Asai K., Shimamura K. *et al.*. Room-temperature Tm, Ho:LuLiF<sub>4</sub> laser with a novel quasi-end-pump in Technique[J]. *Applied Optics*, 2001, **26**(21): 1675~1677
- 8 Beach R. J., Reichert, Bebbett *et al.*. Scalable diode-end-pumping technology applied to a 100 mJ Q-switched Nd<sup>3+</sup> : YLF laser oscillator[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1236~1238
- 9 Fu R. L., Wang G. J.. Design of efficient lens ducts[J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(18): 4000~4003
- 10 Fu Rulian, Wang Guangjun, Zhang Lingqing *et al.*. Simplify design of lens duct as coupling system for all-solid-state lasers[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 1998, **9**(2): 96~99  
傅汝廉, 王光军, 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
- 11 Liu Xiaojuan, Fu Rulian, Qin Hua *et al.*. Theoretical and experimental research on lens duct for LDA coupling[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2006, **14**(2): 167~172  
刘晓娟, 傅汝廉, 秦 华等. LDA 耦合系统透镜导管的理论与实验研究[J]. *光学精密工程*, 2006, **14**(2): 167~172
- 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
- 13 Gao Hongyun, Fu Rulian, Qin Hua *et al.*. Optimized design of hollow lens duct[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, **17**(4): 398  
郜洪云, 傅汝廉, 秦 华等. 透镜导管的优化设计[J]. *光电子·激光*. 2006, **17**(4): 398
- 14 Jia Wei. *Research on High-Efficient Coupling Technology of the Large-Scale Diode Arrays* [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2005, 61~63  
贾 伟. 大口径激光二极管阵列的高效抽运耦合技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2005, 61~63