

高能全固态激光器的透镜导管耦合系统设计

彭超¹ 刘学胜^{1*} 杨光辉² 董剑¹ 曹明真¹ 刘友强¹ 王智勇¹

¹北京工业大学激光工程研究院, 北京 100022

²96658 部队 202 分队, 北京 100094

摘要 激光二极管阵列(LDA)的出射光束空间分布不均匀,发散角大,难以直接用于端面抽运的固体激光器中,需要对 LDA 输出光束进行整形耦合。用 Zemax 光学设计软件设计出一款适合端面抽运全固态激光器的耦合系统,该耦合系统由快轴准直镜与透镜导管组成。着重研究了透镜导管的耦合效率与透镜导管特征参数之间的关系,并通过光线追迹得出最佳耦合系统参数。设计的透镜导管长 22 mm,输入面尺寸为 12 mm(快轴)×9 mm(慢轴),输出面尺寸为 3.5 mm×3.5 mm,输入端球面曲率半径为 14 mm。该系统耦合效率可达 90.7%,距输出端 1 mm 处的光束发散角为 0.38 mrad(快轴)与 0.02 mrad(慢轴),可使抽运光和固体激光器振荡光达到良好的光束匹配效果。

关键词 激光器;全固态激光器;透镜导管;耦合系统;光束追迹;Zemax

中图分类号 TN248 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.101404

Design of Lens Duct Coupling System in High Energy All-Solid-State Laser

Peng Chao¹ Liu Xuesheng^{1*} Yang Guanghui² Dong Jian¹

Cao Mingzhen¹ Liu Youqiang¹ Wang Zhiyong¹

¹Institute of Laser Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China

²202 Division of 96658 Army, Beijing 100094, China

Abstract Due to inhomogeneous spatial distribution and large divergence angle of the laser diode array (LDA), LDA is inconvenient for end-pumping solid-state lasers, and the output beam reshaping and coupling is required. A coupling system for end-pumping solid-state lasers is designed with Zemax. The system is composed of a fast axis collimating lens and a lens duct. The relationship between the coupling efficiency and the characteristic parameters of the lens duct is studied. The optimal coupling system parameters are obtained by ray tracing. The final designed lens duct is 22 mm long, the input surface size is 12 mm (fast axis) × 9 mm (slow axis), the output surface size is 3.5 mm × 3.5 mm, the radius of curvature is 14 mm, and the coupling efficiency can reach 90.7%. The beam divergence angle at 1 mm away from the lens duct is 0.38 mrad for fast axis and 0.02 mrad for slow axis. This system can make the pumping beam and the oscillating beam match well.

Key words lasers; all-solid-state lasers; lens duct; coupling system; ray tracing; Zemax

OCIS codes 140.3325; 230.4555; 220.3620; 140.3480

1 引言

透镜导管作为中小功率激光二极管阵列(LDA)端面抽运大功率固体激光器的一种抽运光耦合方式,已经得到了广泛的应用。相比于传统的非球面柱透镜组耦合方式与微透镜光纤耦合方式^[1-2],透镜导管具有结

收稿日期: 2016-04-27; 收到修改稿日期: 2016-05-16; 网络出版日期: 2016-09-24

基金项目: 北京市教委项目(KM201310005019)

作者简介: 彭超(1989—),男,硕士研究生,主要从事大功率半导体抽运的全固态激光器方面的研究。

E-mail: pc2014@emails.bjut.edu.cn

导师简介: 王智勇(1970—),男,博士,研究员,博士生导师,主要从事大功率高光束质量半导体激光技术方面的研究。

E-mail: zywang@bjut.edu.cn

* 通信联系人。E-mail: liuxuesheng@bjut.edu.cn

构简单、耦合效率高、光斑均匀性好、成本低、可靠性高等特点。1996年,Beach^[3]利用镜像法对透镜导管的耦合效率及特性参数进行了系统的分析。2006年,美国夜视与电子传感指挥部使用透镜导管抽运Nd:YAG晶体得到50 mJ的脉冲输出能量,抽运耦合效率达到90%,但是并未详细叙述透镜导管的设计过程^[4-9]。国内在透镜导管的耦合设计方面也取得很大的进展^[10-14]。2005年,中国工程物理研究院利用数值计算方法进行三维光线追迹,编制透镜导管端面抽运耦合系统模拟软件,得到最高耦合效率92.3%^[15-18]。南开大学近代光学研究所一直致力于透镜导管的理论分析与仿真设计,实验测得耦合效率高达90%^[19-21]。LDA发出的抽运光由大量发光点分别输出,并沿不同的路径传播,光线追迹方法使用的是几何光学中的反射定律和折射定律以及空间几何知识。以往通过编程建立数学模型进行光线追迹的方法过于复杂,并未定量分析透镜导管各参数对耦合效率与光场分布的影响。非序列光线追迹采用蒙特卡罗算法,其精度与取样数目 $N^{-1/2}$ 成正比,为达到采样精度,采样光线数目应该足够多^[22]。本文利用Zemax非序列模式下的光线追迹方法,主要研究了透镜导管内的光束传输规律,设计出一款针对高能量全固态脉冲激光器抽运光耦合的透镜导管,并分析各参数对透镜导管耦合效率的影响。

2 光源模型

选用的半导体抽运源为Quantel公司所生产的准连续(QCW)系列堆栈,工作脉冲宽度为200 μs ,重复频率为100 Hz,由20条线阵组成,单巴条(bar)峰值功率为200 W,慢轴方向发光点数目为19个,发光点间距为0.5 mm,发光总功率为4000 W,发光区域尺寸为10 mm \times 7.6 mm,出射光束的空间分布为椭圆高斯光束。光束发散角的半峰全宽(FWHM)为 $8^\circ \times 36^\circ$,巴条之间间距为0.38 mm。用于抽运5 mm \times 5 mm方形Nd:YAG晶体。对于每个激光器二极管(LD)发光点光场的空间分布可描述为

$$I(\theta_x, \theta_y) = I_0 \exp \left\{ -2 \left[\left(\frac{\theta_x}{\alpha_x} \right)^2 + \left(\frac{\theta_y}{\alpha_y} \right)^2 \right] \right\}, \quad (1)$$

式中 I_0 为发光点中心的光强, α_x 、 α_y 为LD水平与垂直方向的FWHM发散角,分别为 8° 与 36° ; θ_x 、 θ_y 为空间角度的水平和垂直分量。

使用Zemax软件进行追迹计算,模拟过程假定LD发出的光束符合理想高斯光束分布,对于整个阵列共追迹 2×10^6 条光线。分析时假定每条光线具有相同的光功率,在探测面上光强分布与光线数目呈相同的分布规律。通过模拟仿真,可以得到透镜导管的耦合效率与光强分布等参数。

3 透镜导管的理论分析

如图1所示,透镜导管的输入面为球面,侧面和输出面均为平面,构成一个鸭舌形状的棱体。透镜导管前端的球面能够会聚光线,侧面利用全反射原理使光线反射后继续前进,最后经右侧端面折射而出。因此,要得到高效率的半导体激光耦合输出,必须保证光线在透镜导管侧壁的人射角大于全反射临界角,而在透镜导管输出面的人射角小于全反射临界角。透镜导管选用材料为未掺杂的YAG晶体($n=1.82$),损伤阈值较高。

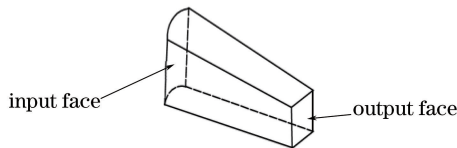


图1 透镜导管示意图

Fig. 1 Schematic of lens duct

透镜导管最佳长度的计算公式为

$$l = 0.92r \frac{n}{n-1}, \quad (2)$$

式中 r 为球面的曲率半径, n 为透镜导管材料的折射率。透镜导管内的光束传输如图2所示。

以球面圆心为原点,LD某发光点的坐标为 (x_{0q}, y_{0q}) ,光线与透镜导管的交点依次为 (x_i, y_i) ,光线与水平方向的夹角为 θ_i ($i=1, 2, \dots$)。入射光线与输入面圆心法线的夹角为 β ,其折射光线与输入面圆心法线夹

角为 γ 。快轴准直镜与导管球面端点顶点距离 $d=0.2$ mm。透镜导管输入面高度为 h_1 , 输入面宽度为 h_2 , 输出面高度为 h_3 , 透镜导管侧壁倾角为 α 。

与 x 轴夹角为 θ_0 的光线对应的球面上的入射点坐标确定公式为

$$\begin{cases} y_1 - y_2 = (x_1 - x_2) \tan \theta_0 \\ x_1^2 + y_1^2 = r^2 \end{cases} \quad (3)$$

通过球面的光线满足折射定律

$$n \sin \gamma = \sin \beta, \quad (4)$$

由(2)、(3)式可得, 入射角 $\beta = \theta_0 + \arcsin(y_1/r)$ 。

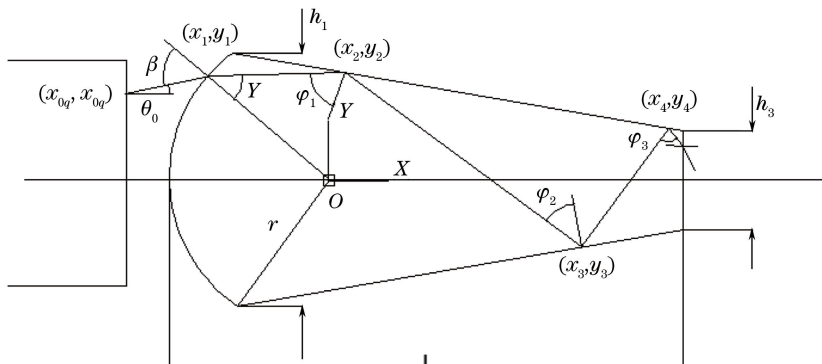


图2 透镜导管主要参数

Fig. 2 Main parameters of lens duct

透镜导管内部的折射光线与侧壁的交点 (x_i, y_i) 坐标确定公式为

$$\begin{cases} y_{i+1} - y_i = (x_{i+1} - x_i) \tan \theta_i \\ \frac{|y_{i+1}| - h_1/2}{x_{i+1} + \sqrt{r^2 - (h/2)^2}} = \frac{h_1/2 - h_3/2}{-\sqrt{r^2 - (h_1/2)^2} - (l - r)} \end{cases}, \quad (5)$$

式中 $i=1, 2, 3, \dots$ 。倾角 α 必须满足

$$\tan \alpha = \frac{h_1 - h_3}{2(l - r) + \sqrt{4r^2 - h_1^2}}. \quad (6)$$

为了保证 LDA 最边缘发光点 $(x_{020}, y_{020}) = (-r - d, 3.9)$ 的光束以快轴发散角出射并与透镜导管上沿相交, 快轴发散角与透镜导管球面曲率半径、输入面尺寸的关系为

$$\tan \phi = (h_1 - y_0) / (-\sqrt{r^2 - h_1^2} - x_0). \quad (7)$$

在侧壁上各反射点的入射角 φ_i 必须满足全反射条件, 即

$$\varphi_i = \arcsin(1/n). \quad (8)$$

由于距出射面一定距离的平面上光线分布主要受输入端球面曲率半径、输出端端面尺寸、半导体激光器发散角以及所求平面距输出端距离的影响, 所以, 设计透镜导管时应综合考虑各种因素的影响, 才能得到高质量的耦合光输出。

4 透镜导管的设计与分析

透镜导管输入面尺寸要保证半导体堆栈发射的光束能全部照射在入射面上, 因此透镜导管输入面尺寸取 $12 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ 。透镜导管输出面尺寸要与激光晶体尺寸匹配, 保证抽运光入射激光晶体后充满增益介质, 满足大能量输出的要求, 因此选用晶体端面尺寸为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$, 透镜导管的输出端尺寸取 $3.5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm}$ 。

透镜导管耦合系统通常使用快轴准直镜对 LDA 快轴方向光束发散角进行预压缩, 以压缩耦合系统快轴方向入射光尺寸, 但是快轴准直镜对耦合效率的影响需要具体分析。图 3 为对未加快轴准直镜的耦合系统进行快轴和慢轴光线追迹的结果。在远离透镜导管出光口的位置, 光场逐渐扩散, 光束只能在一定距离内

保持良好的光斑形状,实际安装时透镜导管通常与激光晶体紧挨放置,简单起见,只需考虑光束自由传播 1 mm后(Nd:YAG 晶体棒前端面处)的光束能量分布情况。如图 4 所示,快轴方向的光束发散严重,光斑长度为 10 mm,且能量的接收效率很低,说明耦合效率低。因此预先使用英国 Power Photonic 公司设计的焦距为 0.3 mm 的快轴准直镜对快轴方向的光束进行压缩,将快轴方向发散角由 36° 压缩至 0.572° 。

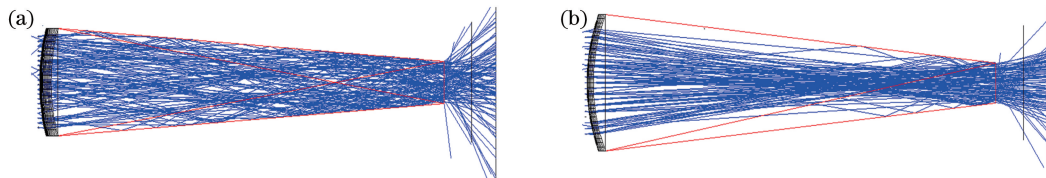


图 3 未对快轴方向光束准直的透镜导管的光线追迹。(a)快轴方向;(b)慢轴方向

Fig. 3 Ray tracing for lens duct without fast axis collimating lens. (a) Fast axis; (b) slow axis

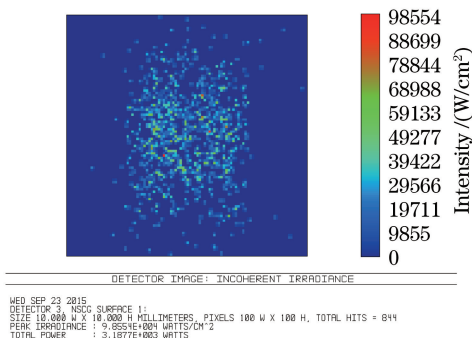


图 4 距离透镜导管输出端 1 mm 处的输出光场模拟结果

Fig. 4 Simulation result of output optical field at 1 mm away from the lens duct

透镜导管的耦合效率主要受输入面尺寸、输出面尺寸、侧面倾角和输入面曲率半径影响,输入面与输出面尺寸由 LDA 尺寸和激光晶体尺寸确定,因此主要考虑透镜导管侧面倾角与输入面曲率半径的影响。为详细分析各变量对耦合效率的影响,先分析侧面倾角与耦合效率之间的关系,而侧面倾角由透镜导管的长度决定。假设输入面为平面,对平面透镜导管进行光线追迹,分析透镜导管长度与输出功率的关系。长度为 36 mm 的透镜导管的光线追迹结果如图 5 与图 6 所示。

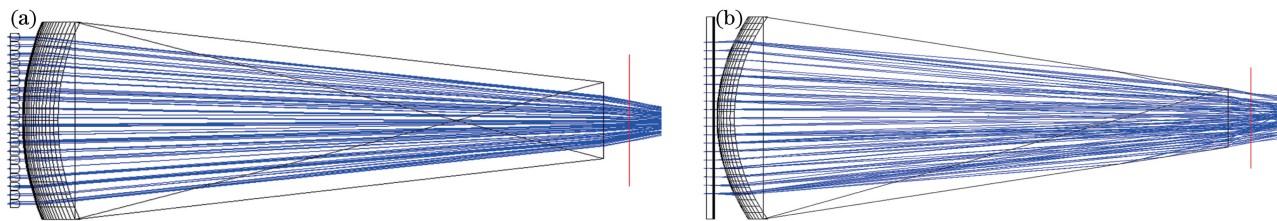


图 5 针对平面透镜导管的光线追迹。(a)快轴方向;(b)慢轴方向

Fig. 5 Ray tracing for the planar lens duct. (a) Fast axis; (b) slow axis

系统的耦合效率明显提升,距平面透镜导管输出端 1 mm 处光斑的快慢轴尺寸都在 4 mm 左右,透镜导管射出光斑尺寸得到很好的压缩。透镜导管长度与耦合效率的关系如图 7 所示。透镜导管长度与耦合效率呈正比关系,与(1)式相符。当透镜导管长度达到 36 mm 时,透镜导管耦合效率达到 89%,随着透镜导管长度继续增加,耦合效率增加幅度减缓,逐渐趋于稳定,若要进一步提升耦合效率,需要优化透镜导管输入面曲率半径。

如图 8 所示,选取长度为 22,32,42,52 mm 的透镜导管,分析其输入面曲率半径变化对耦合效率的影响。从图 8 可以看出,透镜导管输入面的曲率半径存在一个最佳值,耦合效率随曲率半径的增加先提升,随后缓慢降低。透镜导管越长,最佳曲率半径越大。

由图 8 可以得出结论,当透镜导管长度为 22 mm 时,最佳耦合效率最高,这是因为透镜导管的曲率半径

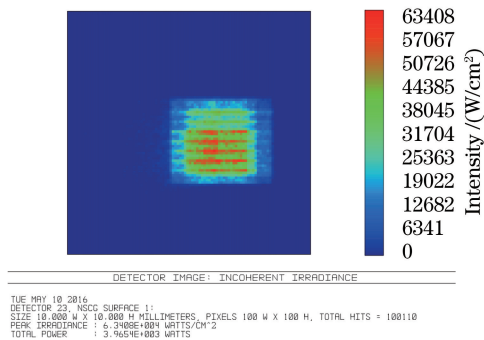


图6 距离平面透镜导管输出端1 mm处的输出光场模拟结果

Fig. 6 Simulation result of output optical field at 1 mm away from the planar lens duct

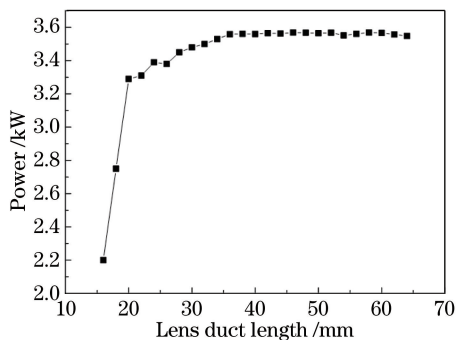


图7 输出功率与加快轴准直透镜导管长度的关系

Fig. 7 Relationship between output power and length of lens duct with fast axis collimating lens

越小,焦距越小,达到最佳耦合效率时所需透镜导管越短,光线在侧面全反射次数越少,光能损失越少。但透镜导管过短,其侧面倾角过大,在透镜导管侧面透射的光束与后向反射过多,耦合效率会降低。由于系统尺寸的限制,透镜导管的长度应尽可能小。

在透镜导管光线追迹的结果与理论分析基础上,在保证光束耦合效率、出射光斑尺寸与光束发散角的情况下,选取参数如下: $r=14$ mm, $l=22$ mm, $h_1=12$ mm, $h_2=9$ mm, $h_3=3.5$ mm,对该参数设置下的透镜导管进行光线追迹,并在距离输出端1 mm处放置探测面,模拟结果如图9所示。耦合效率达到90.7%,输出光斑尺寸为1.96 mm(快轴)和3.1 mm(慢轴),光束发散角为0.38 mrad(快轴)和0.02 mrad(慢轴),在中心处的光功率密度最高,达到 3.05×10^5 W/cm²,可保证光束在高掺杂浓度的晶体中得到充分吸收,抑制寄生振荡,实现振荡光与抽运光的光束匹配。

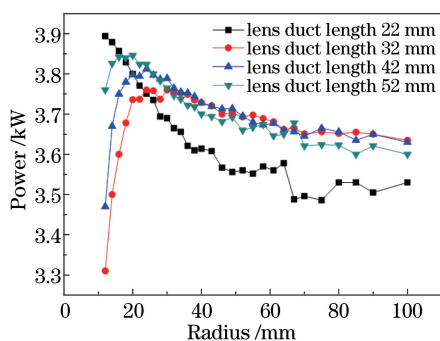


图8 透镜导管输出功率与输入面曲率半径的关系

Fig. 8 Relationship between output power after lens duct and radius of curvature of input surface

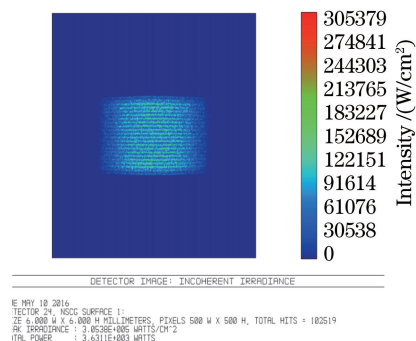


图9 取定参数后距透镜导管输出面1 mm处的输出光场模拟结果

Fig. 9 Simulation result of output optical field at 1 mm away from the lens duct with exact parameters

5 结 论

针对LDA端部抽运全固态激光器设计了一套由快轴准直微透镜阵列和透镜导管组成的耦合系统,并对透镜导管的传输规律进行分析,模拟了透镜导管长度与输入面曲率半径对透镜导管耦合效率与输出光束尺寸的影响,探讨了快轴准直镜对输出功率与输出光束质量的影响,设计的透镜导管的耦合效率达到90.7%,输出光束接近矩形,发散角在可接受范围内。光束能量在耦合传输过程中损失很小,方法简单可行,有助于透镜导管的制造和激光器的研发。

参 考 文 献

- Zan Qingbo, Hao Xiaojian, Zhou Hanchang. Design of laser light path of optical fiber coupling lens based on Zemax[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(10): 102201.

- 管清波, 郝晓剑, 周汉昌. 基于 Zemax 光纤耦合透镜激光光路设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 102201.
- 2 Wang Yanhong, Wang Haiwei, Wang Gao. Design of high efficiency fiber coupling system based on microlens array[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 041401.
王艳红, 王海伟, 王 高. 基于微透镜阵列的高效率光纤耦合系统设计[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 041401.
- 3 Beach R J. Theory and optimization of lens ducts[J]. Applied Optics, 1996, 35(12): 2005-2015.
- 4 Glodberg L, Nettleton J, Schilling B, *et al.* Compact laser sources for laser designation, ranging and active imaging[C]. SPIE, 2007, 6552: 65520G.
- 5 Schilling B W, Chinn S R, Hays A D, *et al.* End-pumped 1.5 μm monoblock laser for broad temperature operation[J]. Applied Optics, 2006, 45(25): 6607-6615.
- 6 Huang Y P, Huang Y J, Cho C Y, *et al.* Influence of output coupling on performance of a passively Q-switched Nd:YAG laser with intracavity optical parametric oscillator[J]. Optics Express, 2013, 21(6): 7583-7589.
- 7 Sabaghzadeh J, Rahimzadeh F, Mashayekhe I. 468-W CW operation of a diode-pumped Nd:YAG rod laser with high beam quality and highly efficient concentrator of pump light[J]. Optics & Laser Technology, 2008, 40(5): 748-755.
- 8 Zhu Z D, Gou L, Jiang M H, *et al.* High beam quality in two directions and high efficiency output of a diode laser array by spectral-beam-combining[J]. Optics Express, 2014, 22(15): 17804-17809.
- 9 Golnabi H. Investigation of surface radius variation in design of a lens duct delivery system [J]. Optics & Laser Technology, 2004, 36(1): 1-10.
- 10 Zhao Tianzhuo, Yu Jin, Huang Ke, *et al.* Multi-pass traveling-wave Nd:glass amplification with a duct for coupling[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(4): 0402004.
赵天卓, 余 锦, 黄 科, 等. 采用导光管耦合的钕玻璃多程行波放大[J]. 中国激光, 2013, 40(4): 0402004.
- 11 Han Kezhen, Liu Xiaojuan, Ge Xiaolu, *et al.* Three-dimensional simulation analysis and design by ray-tracing method for microcylinders and two kinds of lens duct[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(3): 0302003.
韩克祯, 刘晓娟, 葛筱璐, 等. 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[J]. 中国激光, 2012, 39(3): 0302003.
- 12 Zhao Tianzhuo, Fan Zhongwei, Chen Yanan, *et al.* Large area laser diode stack pumping structure[J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(8): 1951-1956.
赵天卓, 樊仲维, 陈亚楠, 等. 大发光面积激光二极管堆栈抽运结构[J]. 中国激光, 2009, 36(8): 1951-1956.
- 13 Zhang Biao, Chen Meng, Li Gang. The coupling theory design of the high power semiconductor lasers [J]. Laser Technology, 2005, 29(4): 433-436.
张 彪, 陈 檬, 李 港. 面阵半导体激光器的耦合理论设计[J]. 激光技术, 2005, 29(4): 433-436.
- 14 Hao Yingchao, Ning Jiping, Yang Jisheng. Coupling systems in LD end-pumped solid-state lasers [J]. Laser Journal, 2002, 23(1): 25-27.
郝迎超, 宁继平, 杨吉生. LD 纵向抽运固体激光器中的耦合系统[J]. 激光杂志, 2002, 23(1): 25-27.
- 15 Chen Lin, Jing Feng, Deng Qinghua, *et al.* Pump coupling optimization for high-power diode array pumped solid-state laser[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(6): 1439-1443.
陈 林, 景 峰, 邓青华, 等. 高功率二极管阵列泵浦固体激光泵浦耦合优化设计[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(6): 1439-1443.
- 16 Deng Qinghua, Ding Lei, He Shaobo, *et al.* Coupling of cylindrical high-power laser-diode array end-pumped disk amplifier[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2010, 22(10): 2249-2252.
邓青华, 丁 磊, 贺少勃, 等. 拟柱面激光二极管阵列端面泵浦方式提高固体激光器性能[J]. 强激光与粒子束, 2010, 22(10): 2249-2252.
- 17 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.
- 18 Duan Wentao, Jiang Dongbin, Jiang Xuejun, *et al.* High power laser diode arrays end-pumped efficient coupling system [J]. Chinese J Lasers, 2009, 36(1): 51-55.
段文涛, 蒋东宾, 蒋学君, 等. 高效大功率激光二极管阵列端面抽运耦合系统[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 51-55.

- 19 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.
- 20 Fu Rulian, Wang Guangjun, Zhang Lingqian, *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, 王广军, 张凌倩, 等. 全固态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.
- 21 Gao Hongyun, Fu Rulian, Qin Hua, *et al.*. Optimization of lens duct [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2006, 17(4): 396-400.
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): 396-400.
- 22 Ye Miao. Error analysis of focal length of lens based on quasi-Monte Carlo algorithm evaluation [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(6): 061202.
叶 苗. 基于准蒙特卡罗算法的测透镜焦距数据误差分析 [J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(6): 061202.