

文章编号: 0253-2239(2010)06-1697-05

# 激光系统三维放大计算模型研究

邓清华 丁磊 贺少勃 唐军 谢旭东 卢振华 董一芳

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 基于激光脉冲在增益介质中的放大过程建立了三维放大模拟计算模型, 该模型将自由空间传输与光线追迹放大相结合。在增益介质内抽运储能分布具有三维特点、离轴多程放大结构等复杂情况下, 该模型能真实模拟放大后输出光束的近场分布。利用该三维放大模型针对一个 12 程激光二极管抽运钕玻璃放大系统进行模拟计算, 计算结果准确地反映了输出光束近场分布。在此模拟结果的基础上能进一步优化多程放大光路。

**关键词** 激光器; 二极管抽运放大器; 端面抽运; 三维放大模拟

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS20103006.1697

## Study on Three-Dimensional Amplifying Model the Laser System

Deng Qinghua Ding Lei He Shaobo Tang Jun Xie Xudong Lu Zhenhua Dong Yifang

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan, 621900)

**Abstract** A three-dimensional amplifying model for the laser system is presented. Both free space transportation model and ray-tracing amplification model are included in this model. Using the model, the distribution of output laser beam from a complicated amplifying system close to the reality can be obtained. This model is used to simulate an amplification course in a 12-pass laser diode-pumped amplifying system. Simulation results precisely show the output distribution of the laser beam from the 12-pass amplifying system. Based on the simulation results, the 12-pass beamline can be further optimized.

**Key words** lasers; diode-pumped amplifier (DPL); end pumping; three-dimensional amplifying simulation

## 1 引言

20 世纪 90 年代以来, 激光二极管(LD)及其阵列取得巨大进展, 输出功率不断提高, 成本也在下降。适合二极管激光抽运的晶体也不断涌现, 因而二极管抽运固体激光器(DPSSL)的相关研究得到迅速发展<sup>[1~9]</sup>。与传统闪光灯抽运的固体激光器相比, DPSSL具有效率高、功率高、寿命长和体积小等显著优点, 因此激光二极管阵列(LDA)抽运的大口径放大器在惯性约束聚变(ICF)和惯性聚变能(IFE)研究领域应用越来越广。为了实现高强度抽运, 人们设计了多种耦合系统将大功率二极管阵列输出的抽运能量耦合进片状放大器中<sup>[4~7, 10~14]</sup>, 在片状放大器中形成特定的抽运储能分布。这种抽运储能分布不仅有一定的横向截面分布形状, 而且从抽运端开始抽运光不断被吸收, 储能纵向也呈现指数递减分布。因而这

种二极管阵列端面抽运片状放大器内的储能分布呈现三维分布特点。而在典型的几种放大光路中, 由于多程放大方式具有激光系统更紧凑、更简单和信噪比高等优点, 而被广泛使用。在这种多程放大系统中, 为了获得高的能量提取效率, 放大种子光光束口径应尽可能与放大器内的储能分布尺寸匹配; 这种多程放大系统中, 各程光路之间有一定夹角才能使光束分离。要实现高质量输出光束, 确定近场匹配关系和各程光路之间的夹角, 要求对多程放大过程进行模拟。由于片状放大器中增益分布呈现三维特点, 而且多程角度分离光路与抽运储能间也具有三维耦合特点, 所以要对二极管阵列端面抽运片状放大器多程放大系统输出光束质量进行模拟分析, 需将现有二维放大模型扩展至三维放大模型。本文结合自由空间传输模型与光线追迹模型, 建立了三维传输放大模拟计算模

收稿日期: 2009-06-23; 收到修改稿日期: 2009-09-01

作者简介: 邓清华(1976—), 女, 博士, 助理研究员, 主要从事高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: dqhaj@yahoo.com.cn

型,并对一个复杂的多程放大系统进行了模拟计算及光路结构优化。

## 2 三维放大模型

建立的三维放大模型是自由空间传输模型与光线追迹模型相结合的传输、放大过程模拟计算模型。具体计算过程是:当光束在自由空间传输时,应用自由空间传输模型对该过程进行模拟计算;当光束进入增益介质进行传输放大时,应用光线追迹模型对光束在增益介质中的传输放大过程进行模拟计算。下面分别就自由空间传输模型和放大过程光线追迹模型进行介绍。

### 1). 由空间传输模型

光在空气中的传输遵从亥姆霍兹方程

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{n_0^2}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \mathbf{E} = 0, \quad (1)$$

傍轴近似下,方程写成标量的惠更斯-菲涅耳积分公式

$$E_1(x_2, y_2) = \frac{\exp(ikz)}{i\lambda z} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_1(x_1, y_1) \times \exp\left\{\frac{ik}{2z}[(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2]\right\} dx_1 dy_1, \quad (2)$$

式中  $z$  为传输距离,  $\lambda$  为光波波长,  $k$  为波矢值,  $x_1, y_1$  和  $x_2, y_2$  分别为输入面和输出面的坐标。

对于衍射积分方程的数值求解,若采用直接积分的算法,计算量相当大。因此需寻求快速计算的方法。通过对衍射积分方程进行变形和推导,可以得到求解该方程的快速算法。

假设多程放大光路中,总的传输距离有限,所以所有光路传输过程为非涅耳衍射过程。因而在(2)式中,令脉冲响应函数

$$h(x - x_0, y - y_0) = \frac{1}{i\lambda z} \exp(ikz) \times \exp\left\{\frac{i\pi}{\lambda z}[(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2]\right\}, \quad (3)$$

则衍射积分方程可以写为卷积形式

$$E(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} E_0(x_0, y_0) h(x - x_0, y - y_0) \times dx_0 dy_0 = E_0(x, y) * h(x, y), \quad (4)$$

式中  $*$  表示卷积,根据卷积定理,上式可转化为

$$E(x, y) = \mathcal{F}^{-1}\{\mathcal{F}[E_0(x, y)] \cdot \mathcal{F}[h(x, y)]\}, \quad (5)$$

式中  $\mathcal{F}$  表示傅里叶变换,  $\mathcal{F}^{-1}$  表示逆傅里叶变换。

令  $H(f_x, f_y) = \mathcal{F}[h(x, y)]$ , 式中  $f_x, f_y$  为频谱坐标,经推导有

$$H(f_x, f_y) = \mathcal{F}[h(x, y)] = \exp(ikz) \exp[-i\pi\lambda z(f_x^2 + f_y^2)], \quad (6)$$

上式即为菲涅耳衍射在频域中的传递函数。菲涅耳积分可表示为

$$E(x, y) = \exp(ikz) \mathcal{F}^{-1} \times \{\mathcal{F}[E_0(x, y)] \exp[-i\pi\lambda z(f_x^2 + f_y^2)]\}, \quad (7)$$

即自由传输后的衍射积分  $E(x, y)$  可通过先对输入  $E_0(x_0, y_0)$  做傅里叶变换积分后,在频谱面上乘以二次相位因子,再进行逆傅里叶变换得到。

### 2). 放大过程光线追迹模型

假设二极管阵列端面抽运片状放大器中,考虑自发辐射放大(ASE)效应后抽运脉冲结束时增益介质中的储能密度分布为  $E_{\text{pump}}(x_i, y_j, z_k)$ , 则增益介质内  $\text{Nd}^{3+}$  反转粒子数分布为

$$n(x_i, y_j, z_k) = E_{\text{pump}}(x_i, y_j, z_k) / h\nu_{\text{pump}}, \quad (8)$$

式中  $h$  为普朗克常量,  $\nu_{\text{pump}}$  为抽运光频率。

片状放大器的增益分布为

$$g_0(x_i, y_j, z_k) = n(x_i, y_j, z_k) \times \sigma, \quad (9)$$

式中  $\sigma$  为受激发射截面。

当激光脉冲入射到增益介质前表面时,对入射光分布进行离散化处理,将入射光抽样成光线矩阵,每根光线代表一个小区域。每根光线由 7 个分量表示,即  $(x_{il}, y_{jl}, z_{kl}, a_{il}, b_{jl}, r_{kl}, E_0)$ 。其中  $(x_{il}, y_{jl}, z_{kl})$  为光线上的一个空间点,  $(\alpha_{il}, \beta_{jl}, \gamma_{kl})$  为光线的方向,  $E_0$  为光线所代表区域内的脉冲能量密度。

利用光线追迹方法及菲涅耳原理计算光线在增益介质前/后表面的折/反射过程及该过程中发生的折/反射损耗。

光线进入增益介质后,光线追迹算法将精确计算各光线在增益介质内所经过的体积元位置  $(x_l, y_m, z_n)$  和在其中的传输长度  $L$ 。然后利用法兰兹-诺得维克(F-N)方程计算该光线在其中的放大过程。

当光线经过体积元  $(x_l, y_m, z_n)$ , 放大后的能量密度由以下公式求得

$$E_1 = E_s \ln\{1 + [\exp(E_0/E_s) - 1] \exp[g_0(x_l, y_m, z_n)L]\}, \quad (10)$$

式中  $E_0, E_1$  分别为放大前后光线代表区域的脉冲能量密度,  $E_s$  为饱和能量密度。其计算公式为

$$E_s = \frac{h\nu_{\text{laser}}}{\sigma}, \quad (11)$$

式中  $\nu_{\text{laser}}$  为激光频率。

对于体积元  $(x_l, y_m, z_n)$  而言,上述放大过程的提取效率为

$$\eta_l = (E_1 - E_0) / g_0(x_l, y_m, z_n) L E_s, \quad (12)$$

该放大过程结束后这个体积单元的增益变为

$$g_1(x_l, y_m, z_n) = (1 - \eta_l) g_0(x_l, y_m, z_n), \quad (13)$$

完成以下赋值后,光线继续向前传输放大直至光线再次到达增益介质表面:

$$E_0 = E_1, \quad (14)$$

$$g_0(x_l, y_m, z_n) = g_1(x_l, y_m, z_n). \quad (15)$$

### 3 三维放大计算实例

假设增益介质为钕玻璃片,多程放大系统为图1所示的12程放大系统。下面利用上面建立的三维放大计算模型对12程放大系统进行分析。

钕玻璃片由25 kW 二极管阵列抽运,采用拟球面端面耦合方式<sup>[15]</sup>。面阵单元4×4排列,而激光阵列所在球面的球半径为300 mm,导管长度为297.5 mm。钕玻璃片紧贴导管输出端放置,厚度为5 mm,对802 nm 抽运光的吸收系数为6.5 cm<sup>-1</sup>。考虑ASE效应后钕玻璃片内的增益分布如图2所示

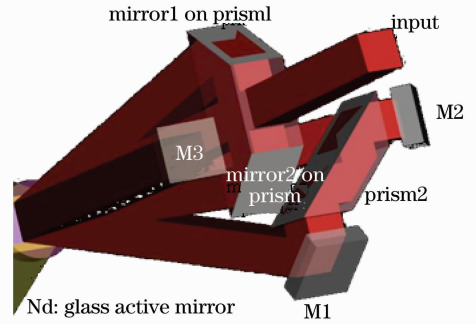


图1 12程片状放大器系统

Fig.1 The 12-pass slab amplifying system

示。假设12程放大光路的注入脉冲近场分布为8阶超高斯,1/100最大强度处的全宽为8 mm×8 mm,分布情况如图3所示。在12程放大光路中,当1,2,11,12程以5°入射和出射,而3~10程以15°入射和出射时,放大后脉冲近场分布如图4所示。由图4可知放大后光束近场分布与片状放大器内储能分布大体一致,只是放大后脉冲近场分布X, Y两维对称性稍有破坏,这是由于两维方向上光束偏离所造成的饱和放大效应不同引起的。减小3~10程入射和出射角度至12°,模拟计算得12程放大后脉冲近场分布如图5所示,由图5可知放大后脉

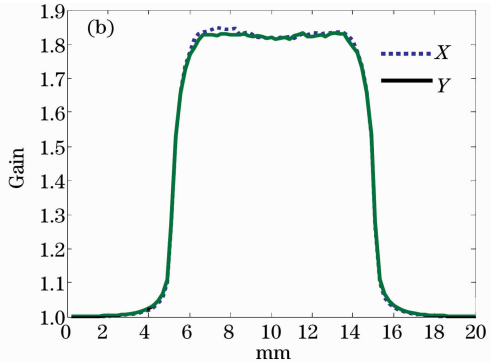
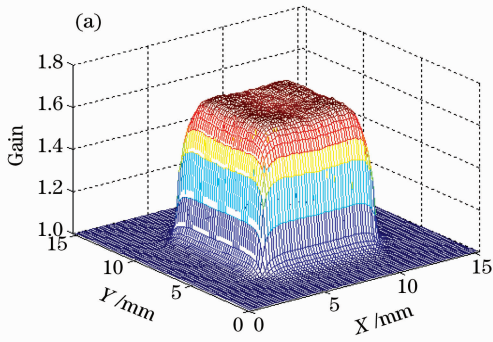


图2 片状放大器中的增益分布(a)及其中心截面分布(b)

Fig.2 Gain distribution in Nd:glass slab amplifier (a) and its profiles (b)

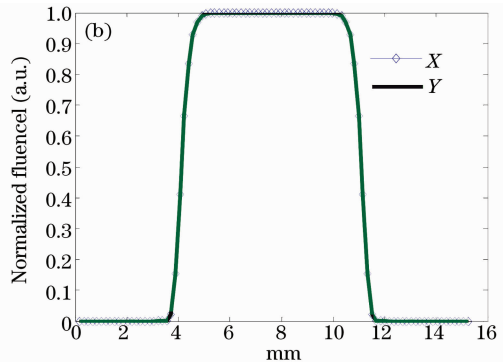
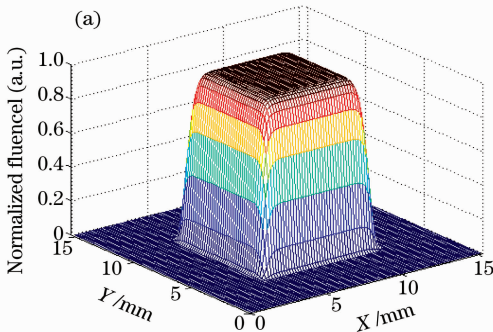


图3 12程放大器注入脉冲近场(a)及其截面分布(b)

Fig.3 Near field of injected pulse in 12-pass amplifier (a) and its profiles (b)

冲近场分布  $X, Y$  二维对称性得到改善。应用三维放大程序可得以上两种情况下, 12 程放大系统输出能量随注入能量变化曲线如图 6 所示。由图 6 可知以上两种情况下系统输出能量曲线基本重合, 所以以上两种情况下放大过程中能量提取效率基本相同。依据三维放大计算结果对 12 程放大光路构型

进行优化,  $3 \sim 10$  程入射和出射角度为  $12^\circ$ 。由以上计算实例表明, 建立的三维放大计算模型能就增益具有三维空间分布特点的多程放大系统进行模拟分析, 计算结果能准确地反映输出光束近场分布和能量放大过程, 并在计算结果基础上能进一步优化多程放大光路。

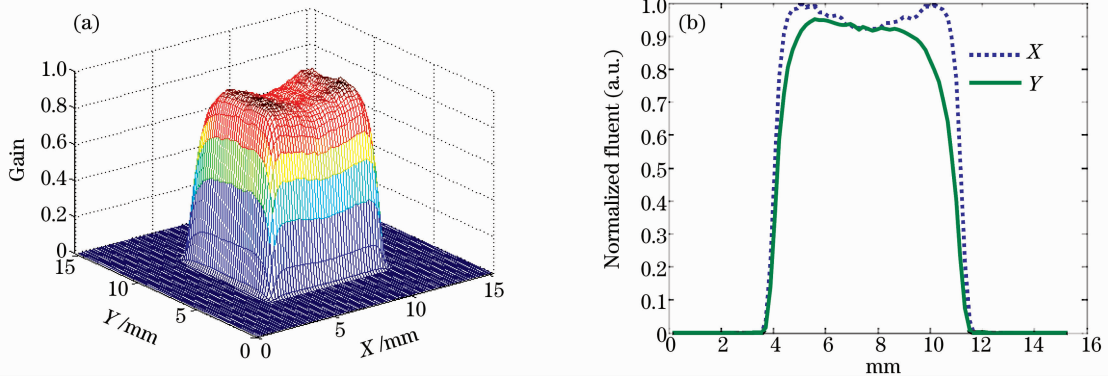


图 4 12 程放大光路中  $3 \sim 10$  程光路以  $15^\circ$  入射和出射时计算所得 12 程放大后脉冲近场(a)及其截面分布(b)  
Fig. 4 Amplified laser intensity distribution (a) and its profiles (b) when the 3rd to the 10th pass tilted at  $15^\circ$

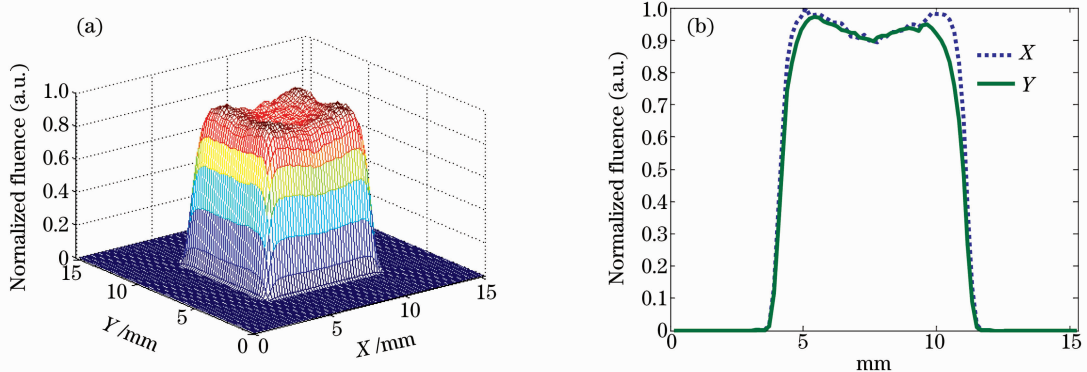


图 5 12 程放大光路中  $3 \sim 10$  程光路以  $12^\circ$  入射和出射时计算所得 12 程放大后脉冲近场(a)及其截面分布(b)  
Fig. 5 Amplified laser intensity distribution (a) and its profiles (b) when the 3rd to the 10th pass tilted at  $12^\circ$

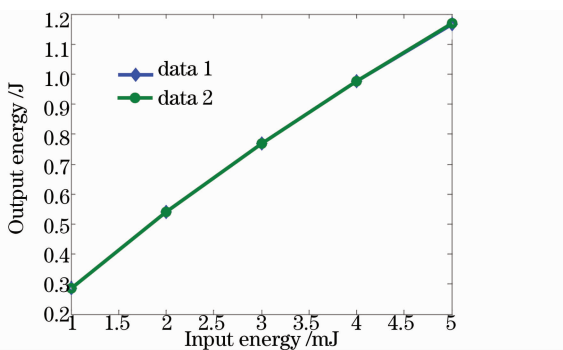


图 6 输出能量随注入能量变化曲线

Fig. 6 Output energy varying with input energy

## 4 结 论

将自由空间传输模型与光线追迹放大模型相结合, 建立了三维放大模拟计算模型。在增益介质内

抽运储能分布具有三维特点、离轴多程放大系统等复杂情况下, 该模型能真实模拟放大后输出光束质量。利用该三维放大模型针对一个 12 程激光二极管抽运钕玻璃放大系统进行模拟计算, 计算结果能准确地反映输出光束近场分布。在此模拟计算的基础上能进一步优化多程放大光路。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Sha, Chen Jun, Liu Chong *et al.*. Theoretical and experimental research on end pumped quasi-three-level Yb:YAG Laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 23~27  
汪沙, 成军, 刘崇等. 纵向抽运准三能级 Yb:YAG 激光器的理论模型及实验研究 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 23~27
- 2 Li Jingzhao, Zhu Haiyong, Chen Zhenqiang *et al.*. All-solid-state Continuous-wave laser at 447 nm [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 28~32  
李景照, 朱海永, 陈振强等. 全固态 447 nm 连续激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(1): 28~32

- 3 Zhao Hong, Jiang Dongsheng, Wang Jianjun *et al.*. Gain distribution characteristics in working medium side-pumped by diode bars [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(1): 57~62  
赵 鸿, 姜东升, 王建军等. 二极管侧面抽运条件下工作物质增益分布特性研究 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(1): 57~62
- 4 Lu Yanhua, Liu Dong, Zhang Lei *et al.*. 400 Hz All-solid-state sum-frequency sodium guidestar laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(7): 1898~1901  
鲁燕华, 刘 东, 张 雷等. 400 Hz 全固态和频钠导星激光器 [J]. *光学学报*, 2009, **29**(7): 1898~1901
- 5 Liu Huan, Gong Mali, Gao Song. Progress in corner-pumped all-solid-state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1693~1696  
刘 欢, 巩马理, 高 松. 角抽运全固态激光器的研究进展 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1693~1696
- 6 Meng Yuqing, Tan Huiming, Fu Xihong *et al.*. LD Pumped Nd:GdVO<sub>4</sub>/LBO intracavity sum-frequency 491 nm blue laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1735~1739  
孟玉青, 檀慧明, 付喜宏等. LD 抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub>/LBO 腔内和频 491 nm 蓝光激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1735~1739
- 7 Liu Guohong, Li Yongmin, Wang Yaoting *et al.*. All solid state continuous wave stabilized single frequency 1053 -nm Nd:YLF laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1732~1734  
刘国宏, 李永民, 王垚廷等. 全固态高功率连续单频稳频 1053 -nm Nd:YLF 激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1732~1734
- 8 Chai Lu, Ge Wenqi, Yan Jie *et al.*. High-power laser diode-pumped Yb, NaCaF<sub>2</sub> continuous-wave laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1700~1703  
柴 路, 葛文琦, 闫 杰等. 高功率激光二极管抽运的镱钠共掺氟化钙连续激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1700~1703
- 9 Wang Yuezhu, Duan Xiaoming, Ke Liang *et al.*. Room temperature efficient continuous wave laser diode-end-pumped Tm:YAP laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1710~1713  
王月珠, 段小明, 柯 亮等. 室温下高效率连续波激光二极管端面抽运 Tm:YAP 激光器 [J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1710~1713
- 10 R. J. Beach. Theory and optimization of lens ducts [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **35**(12): 2005~2015
- 11 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
- 12 Rulian Fu, Guangjun Wang, Zhaoqi Wang *et al.*. Design of efficient lens ducts [J]. *Appl. Opt.*, 1998, **37**(18): 4000~4003
- 13 Mali Gong, Fuyuan Lu, Qiang Liu *et al.*. Efficient corner-pumped Yb:YAG\_YAG composite slab laser [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(16): 3806~3810
- 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 Deng Qinghua, Peng Hansheng, Sui Zhan. Simulation on a new coupling method of laser diode array end-pumped large-aperture amplifiers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, **57**(10): 6340~6347  
邓青华, 彭翰生, 隋 展等. 高功率激光二极管阵列端面抽运放大器新型耦合方式研究 [J]. *物理学报*, 2008, **57**(10): 6340~6347