

文章编号: 0258-7025(2010)05-1176-06

# 激光二极管阵列侧面抽运棒状增益介质抽运 储能分布的评价方法

邓青华 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** 在高功率激光二极管阵列(LDA)侧面抽运模块研究中,高效率高质量的抽运耦合结构设计非常重要。为了对抽运耦合结构进行优化设计,需要对棒状增益介质内的抽运储能分布实现量化评价。由于用于激光谐振腔和放大光路的激光二极管抽运模块的抽运储能分布要求不同,因此对激光振荡模块和放大模块中的抽运储能分布分别建立了一套评价方法。分别对激光振荡模块和放大模块中的抽运储能分布进行实例评价分析,结果表明,所提出的评价指标和计算方法既能充分反映出放大模块中抽运储能分布的储能沉积效率和抽运均匀性变化情况,也能反映出激光振荡模块中抽运储能分布与谐振腔模分布的匹配程度。

**关键词** 激光器;激光二极管侧面抽运;均匀抽运;腔模匹配

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103705.1176

## Evaluating Specifications on Coupled Pump Distribution in LDA Side-Pumped Rod Gain Medium

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

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

**Abstract** In laser diode array (LDA) side-pumped module, coupling system with high efficiency and optimized pump distribution is very important. To evaluate different coupling systems, evaluating specifications are put forward. Because different requirements are put on LDA side-pumped modules used in laser oscillator and as amplifiers, different specifications are set up for laser modules and amplifier modules. Calculating results of different pumping intensity distributions of laser modules and amplifier modules show that these specifications can not only show pump depositing efficiency and uniformity of the intensity distribution in the gain modules, but also the matching degree between pump intensity distribution in the laser module and laser oscillating modes.

**Key words** lasers; laser diode side pumping; uniform pumping; mode matching

### 1 引 言

与传统闪光灯抽运的固体激光器相比,激光二极管抽运的固体激光器(DPSSL)具有高效率、高功率、长寿命、小体积等显著优点,近些年来已成为新一代固体激光技术发展的主流<sup>[1~7]</sup>。从激光二极管抽运固体激光器出现至今,人们对抽运耦合方式开展了大量的研究。相对于端面抽运结构,侧面抽运容易实现大功率抽运和大功率输出,而且不需要十分复杂的整形集光系统,抽运结构更简单。近年来对这种抽运方式开展了大量的研究工作,文献[8~11]对侧面抽运

结构中的抽运储能模拟计算方法进行了研究,优化设计过程中对抽运储能质量的判断是根据抽运强度的三维分布和截面分布进行的,是一种直观判断结果,无系统量化指标。为了对侧面抽运结构优化过程进行更深入的研究,本文就激光二极管阵列侧面抽运棒状增益介质中的抽运储能分布建立系统的评价体系。用于激光谐振腔和放大光路的激光二极管抽运模块(分别称为激光振荡模块和放大模块)结构相同,但功能不同,激光振荡模块需与振荡腔模高度匹配,而放大模块需对种子光源进行均匀放大,因而对它们的抽

收稿日期: 2009-06-23; 收到修改稿日期: 2009-08-28

作者简介: 邓青华(1976—),女,博士,主要从事高功率固体激光技术方面的研究。E-mail: dqhaj@yahoo.com.cn

运储能分布要求不同。基于以上原因,有必要对激光二极管侧面抽运的激光振荡模块和放大模块建立侧重点不同的评价体系。

## 2 放大模块抽运储能评价体系

### 2.1 指标定义和计算方法

由文献[11]的分析可知,对于激光二极管阵列(LDA)侧面抽运放大器而言,抽运储能效率和均匀性是非常重要的指标,而对于棒状增益介质,均匀性可分为径向均匀性和极轴方向均匀性。本文用不同半径圆上的平均抽运密度变化曲线作为径向均匀性评价依据,而将不同半径圆上抽运储能起伏均方根(RMS)值变化曲线作为极轴方向均匀性评价依据。为了对增益介质棒内的抽运储能沉积效率及储能沉积分布均匀性进行量化和评价,从棒中心开始,对不同半径圆域内的储能分布进行分析,求出该区域内的抽运储能沉积效率、该半径圆上的平均抽运功率密度及起伏 RMS 值。逐渐扩大分析区域的半径,直到覆盖整个抽运储能分布。这样就可以得到分析区域扩大过程中各指标的变化数组。通过对某一抽运储能分布的这些数组进行分析,可以得到这一抽运储能分布的各种重要信息;通过对不同抽运储能分布的这些数组进行比较,可以选择出优异的抽运结构设计方案。

针对棒状放大器抽运储能分布高储能沉积效率和均匀性要求,为评定各耦合方案的优劣,特提出以下指标就抽运储能分布进行分析,假设分析区域内沉积的抽运功率分布为  $x(i, j)$  ( $i = 1, m; j = 1, n$ ):

1) 抽运储能沉积效率:沉积在分析区域内的抽运功率与总抽运功率(即激光二极管阵列发射的总抽运功率)之比;

2) 平均抽运功率密度:分析半径圆上的平均功率密度,计算公式为

$$\bar{\rho} = \frac{\sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{n_1} x(i, j)}{m_1 \times n_1 \times dx \times dy}, \quad (1)$$

式中  $x(i, j)$  ( $i = 1, m_1; j = 1, n_1$ ) 表示一定半径圆上的抽运功率分布;

3) 抽运储能起伏 RMS 值:计算公式为

$$\sigma = \frac{1}{\bar{x}} \sqrt{\sum_{i=1}^{m_1} \sum_{j=1}^{n_1} [x(i, j) - \bar{x}]^2 / (m_1 \times n_1)}, \quad (2)$$

式中  $\bar{x}$  表示该半径圆上的平均抽运功率。

这些指标中,抽运储能沉积效率能反映不同半径圆域内抽运功率沉积效率的变化情况;平均抽运功率密度能反映不同半径圆上的平均抽运功率变化情况;起伏 RMS 值能反映不同半径圆上的抽运功率分布起伏情况,这 3 个指标综合起来能完全反映出介质棒内抽运功率沉积的分布情况。

### 2.2 实例分析

图 1 显示了激光二极管侧面抽运钕玻璃放大器内两种不同的抽运储能分布情况。抽运光中心波长为 802 nm,钕玻璃棒掺杂质量分数为 2.2% 的 Nd,其对抽运光的吸收系数为  $6.5 \text{ cm}^{-1}$ 。激光二极管发散角为  $40^\circ$ ,由其组成的抽运环直径为 6 mm,个数分别为 3 个和 9 个,等间隔排列,总功率相同。从图中可以看出场 1 的极角方向上的对称性不好;场 2 极角方向上的对称性较好,从棒中心到边沿抽运储能密度是降低的。利用定义的指标及计算方法对图 1 中所示的两种抽运储能分布进行分析,结果分别如图 2~4 所示。从图 2~4 可见,两种抽运储能分布的抽运储能沉积效率变化曲线和平均功率密度

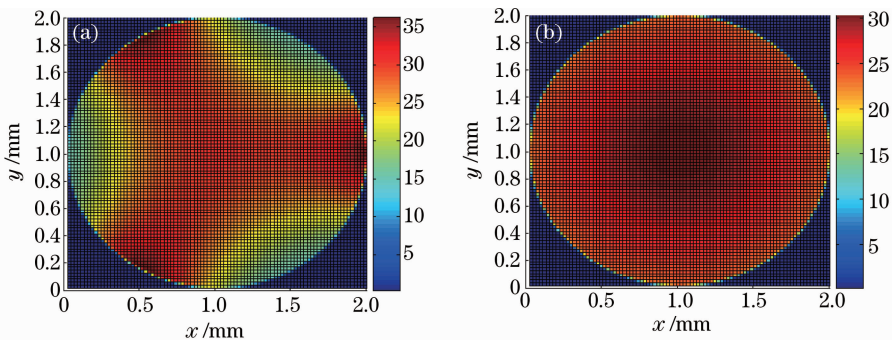


图 1 棒状放大器内两种抽运储能分布情况。(a)场 1;(b)场 2

Fig. 1 Stored pumping energy in rod amplifiers. (a) field 1;(b) field 2

变化情况完全相同;整个增益介质内的抽运储能沉积效率约 60%;两种抽运储能分布中平均抽运功率密度从棒中心到边沿逐渐减小;场 1 的 RMS 变化曲线随着半径的增大而急剧增大,而场 2 的 RMS 变化曲线随着半径的增大基本保持在一个小量值不变,这表明场 1 在极角方向上不对称分布,而场 2 在极角方向上呈对称分布。比较图 1 中两种抽运储能分布情况和图 2~4 中的计算分析结果可知:3 种评价指标综合起来,能全面反映对棒状介质内抽运储能分布情况;场 2 的抽运结构能实现均匀的抽运储能分布。实验加工了 9 个激光二极管抽运钕玻璃棒,其荧光分布如图 5 所示,极轴方向分布均匀,储能功率密度从棒中心到边沿稍有下降。这与上述场 2 的特点非常吻合。实验结果证明本文建立的放大器储能评价方法能在抽运结构优化设计中得到有效应用。

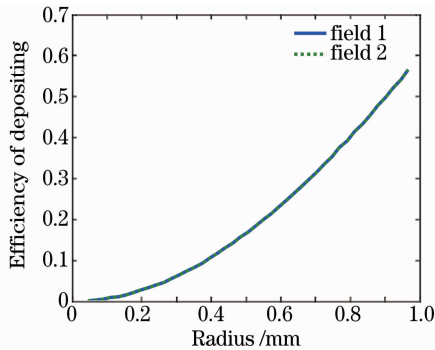


图 2 两种抽运储能分布中抽运储能沉积效率随半径的变化曲线

Fig. 2 Depositing efficiency of the two distributions

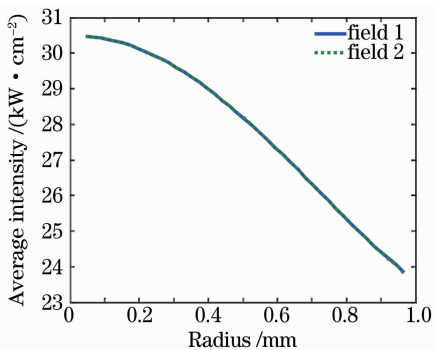


图 3 两种抽运储能分布中平均抽运功率密度随半径的变化曲线

Fig. 3 Average pumping density of the two distributions

### 3 激光振荡模块抽运储能评价体系

#### 3.1 指标定义和计算方法

由文献[12]可知,对于激光二极管阵列侧面抽运激光振荡模块而言,抽运储能分布和振荡腔模之

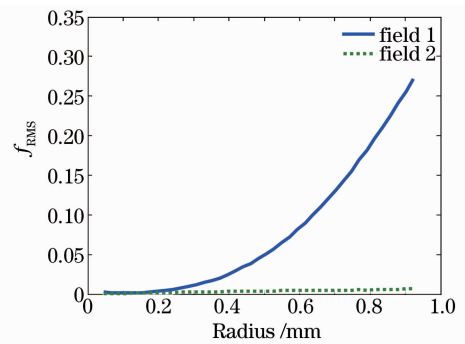


图 4 两种抽运储能分布中抽运储能起伏 RMS 值  $f_{\text{RMS}}$  随半径的变化情况

Fig. 4 RMS of the two distributions

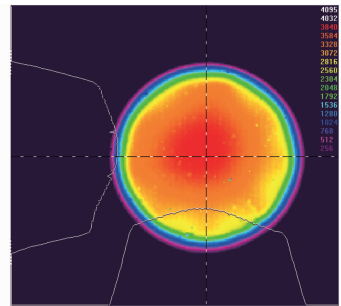


图 5 钕玻璃放大器的荧光分布图

Fig. 5 Fluorescence distribution in Nd:glass amplifier

间的匹配非常重要。由于大能量基模(TEM<sub>00</sub>模)输出是振荡器设计追求的目标,所以本文主要就抽运储能分布和基模之间的匹配进行研究。TEM<sub>00</sub>模的数学表达式为

$$I(x, y) = \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{\omega_0^2}\right), \quad (3)$$

提出两个指标对抽运储能分布和基模之间的匹配程度进行评估:1/e 模半径范围内抽运储能效率、抽运储能分布和基模之间的相关度。而径向平均抽运功率密度变化曲线和极轴方向抽运功率密度起伏曲线作为辅助参考指标。总结起来,激光二极管阵列侧面抽运激光振荡模块抽运储能分布评价指标系统如下:

1)1/e 模半径范围内抽运储能效率:沉积在基模 1/e 半径圆域内的抽运功率与总抽运功率之比;

2)抽运储能分布与基模分布之间的相关度。计算方法为:将抽运储能分布归一化,然后求该分布与基模分布之间的相关系数,两分布矩阵  $\mathbf{A}$ 、 $\mathbf{B}$  间相关系数计算公式为

$$f = \frac{\sum_{i,j} [\mathbf{A}(x_i, y_j) - \bar{\mathbf{A}}] \times [\mathbf{B}(x_i, y_j) - \bar{\mathbf{B}}]}{\sqrt{\sum_{i,j} [\mathbf{A}(x_i, y_j) - \bar{\mathbf{A}}]^2} \sqrt{\sum_{i,j} [\mathbf{B}(x_i, y_j) - \bar{\mathbf{B}}]^2}}. \quad (4)$$

3) 平均抽运功率密度曲线: 归一化后抽运储能分布中不同分析半径圆上的平均功率密度变化曲线;

4) 抽运储能起伏 RMS 值变化曲线: 不同分析半径圆上抽运储能密度起伏变化曲线。

这些指标中,  $1/e$  模半径范围内抽运储能效率会在  $0\sim 1$  变化。而当储能分布为理想基模分布时, 沉积在  $1/e$  模半径范围内的能量是全部能量的  $65.16\%$ , 所以  $1/e$  模半径范围内抽运储能效率的最佳值为  $0.6516$ 。抽运储能分布与基模分布之间的相关度会在  $0\sim 1$  间变化, 而当储能分布为理想基模分布时, 相关度为  $1$ 。所以当  $1/e$  模半径范围内抽运储能效率趋近  $0.6516$  且相关度趋近  $1$  时, 抽运储能分布与基模分布之间非常匹配。当抽运储能分布和基模分布之间的相关度较小时, 可以从平均抽运功率密度变化曲线和抽运储能起伏 RMS 值变化曲

线中寻找原因。将平均抽运功率密度曲线与基模分布不同半径圆上的平均功率密度曲线相比较, 可以看出该分布与基模分布之间的偏离方向; 从抽运储能起伏 RMS 值变化曲线可以看出该分布的极轴方向均匀性, 基模是圆对称分布的, 所以不同圆半径上的抽运储能起伏 RMS 值越小越好, 如果存在较大的抽运储能起伏 RMS 值, 则应进一步优化极轴方向均匀性。综合以上两个比较结果可以明确抽运结构优化改进方向。因此, 通过对以上几个指标的综合分析, 可知抽运储能分布与基模分布的匹配程度及进一步优化抽运结构的方向。

### 3.2 实例分析

为了证实 3.1 节中评价体系的实用效果, 对两个抽运储能分布进行分析, 如图 6 所示, 是在 9 个激光二极管抽运条件下改变增益介质吸收系数得到的。

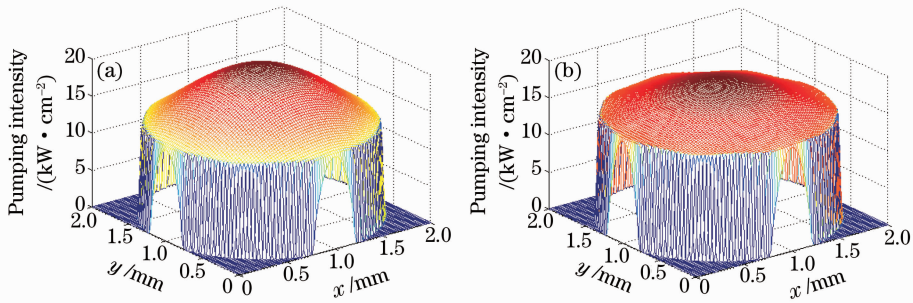


图 6 振荡模块棒状介质内两种抽运储能的分布情况。(a) 场 1; (b) 场 2  
Fig. 6 Stored pumping energy in laser modules. (a) field 1; (b) field 2

图 7 显示了  $1/e$  半径为  $0.65\text{ mm}$  的基模高斯分布。比较图 6 和图 7 可知: 场 1 分布中心集中度更高, 其与基模的匹配应更好一些。应用 3.1 节中定义的评价体系对这两种抽运储能分布进行分析。两种抽运储能沉积分布的抽运储能沉积效率随分析半径变化曲线如图 8 所示, 由图可知在  $1/e$  基模半

径(即  $0.65\text{ mm}$ )处, 场 1 的抽运储能效率比场 2 的大, 更接近  $0.6216$ ; 场 1、场 2 储能分布与基模分布的相关系数分别为  $0.75, 0.66$ , 这表明场 1 分布与基模分布的相似程度更大, 这一点可从图 9 所示的平均抽运功率密度变化曲线看出, 场 1 的平均功率

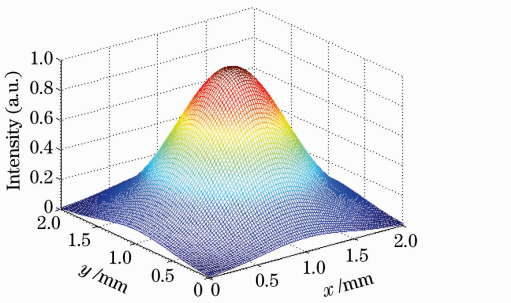


图 7  $1/e$  半径为  $0.65\text{ mm}$  时  $\text{TEM}_{00}$  模的分布  
Fig. 7  $\text{TEM}_{00}$  distribution with  $0.65\text{ mm}$   $1/e$  radius

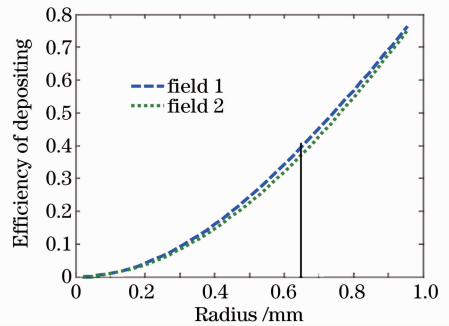


图 8 两种抽运储能分布中抽运储能沉积效率随半径的变化曲线  
Fig. 8 Depositing efficiency of the two distributions



变化曲线与基模分布的更接近。从图 10 所示的抽运功率密度起伏 RMS 值随半径变化曲线可以看出:随着半径增大,起伏 RMS 值始终较小,因而场 1 和场 2 储能分布极轴方向非常均匀。通过上述评价体系可以得出结论:场 1 储能分布与基模分布的匹配程度更好,但  $1/e$  模半径范围内抽运储能效率离 0.6516 还有一定差距,相关度也与 1 有一定差距,应该进一步优化抽运结构和增益材料参数,提高中心能量集中度,促进其与基模分布的匹配。因而激光振荡模块储能分布评价体系不仅能用系统量化指标表明抽运效果好坏,而且能给出其与基模分布的差异从而指明进一步优化的方向。

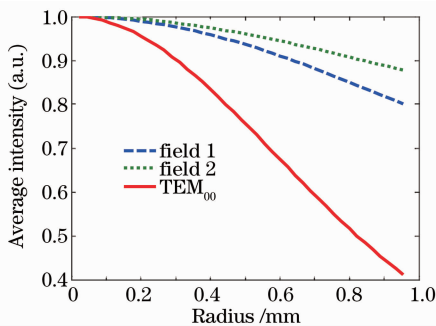


图 9 两种抽运储能分布中平均抽运功率密度随半径的变化曲线

Fig. 9 Average pumping density of the two distributions

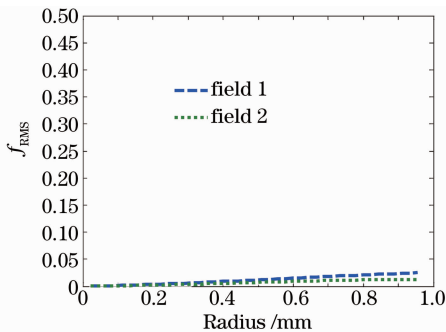


图 10 两种抽运储能分布中抽运储能起伏 RMS 值  $f_{\text{RMS}}$  随半径的变化情况

Fig. 10 RMS of the two distributions

## 4 结 论

分别就高功率激光二极管阵列侧面棒状放大器模块和激光振荡模块中的抽运储能分布建立了一套评价体系。放大器模块抽运储能评价体系中,主要包括随半径增大而增大的分析区域内的抽运储能沉积效率变化曲线、不同半径圆上的平均抽运功率密度和抽运功率密度起伏 RMS 值。而激光振荡模块抽运储能评价体系中,主要指标为  $1/e$  基模半径范

围内抽运储能沉积效率和抽运储能沉积分布与基模分布的相关系数,这两个指标能反映激光振荡模块中抽运储能分布与振荡基模之间的匹配程度,另外将不同半径圆上的平均抽运功率密度和抽运功率密度起伏 RMS 值作为辅助分析指标,这两个指标能帮助分析耦合结构进一步优化的方向。实例分析也证明,这两套评价方法是可靠和全面的。

## 参 考 文 献

- Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1605~1618  
周寿桓,赵 鸿,唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1605~1618
- Xu Zuyan. Deep-ultraviolet diode-pumped solid-state laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1619~1624  
许祖彦. 深紫外全固态激光光源[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1619~1624
- Zheng Yaohui, Li Fengqin, Zhang Kuanshou *et al.*. Progress of all-solid-state single-frequency lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1635~1642  
郑耀辉,李凤琴,张宽收等. 全固态单频激光器研究进展[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1635~1642
- Zhu Xiaolei, Tang Hao, Li Xiaoli *et al.*. Recent progresses of LD pumped solid state lasers with high repetition rate electro-optic Q-switch[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1654~1659  
朱小磊,唐 昊,李小莉等. 高重复频率电光调 Q 全固态激光器研究进展[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1654~1659
- He Kunna, Wei Zhiyi, Zhang Zhiguo *et al.*. Overview on laser diode pumped solid-state laser with direct pumping scheme[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1679~1685  
何坤娜,魏志义,张治国等. 全固态激光直接抽运技术的发展和研究现状[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1679~1685
- Tian Changqing, Xu Hongbo, Cao Hongzhang *et al.*. Cooling technology for high-power solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1686~1692  
田长青,徐洪波,曹宏章等. 高功率固体激光器冷却技术[J]. 中国激光, 2009, **36**(7): 1686~1692
- Liu Huan, Gong Mali, Gao Song. Progress in corner-pumped all-solid-state lasers [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1693~1699  
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): 1693~1699
- Chen Lin, Hou Xia, Lu Yutian. Analog calculation and evaluation of LDA direct side-pumping[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(7): 825~828  
谌 霖,侯 霞,陆雨田. 激光二极管阵列侧面直接抽运方式的模拟计算和效果评估[J]. 光学学报, 2002, **22**(7): 825~828
- Wang Jianhua, Zhai Gang, Jin Feng. Pump uniformity study of solid-state laser rods directly side-pumped by laser diode[J]. *Laser Technology*, 2004, **28**(1): 36~41  
王建华,翟 刚,金 锋. LD 直接侧面泵浦棒状介质的光场研究[J]. 激光技术, 2004, **28**(1): 36~41
- 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
- 11 Deng Qinghua, Peng Hansheng, Gao Songxin *et al.*. Laser diode array pumped high-gain Nd glass rod amplifier[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(1): 70~76
- 邓青华,彭翰生,高松信 等. 激光二极管阵列抽运高增益钕玻璃棒状放大器[J]. 中国激光, 2009, **36**(1): 70~76
- 12 Walter Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1999