

文章编号: 0258-7025(2009)07-1766-06

激光二极管侧面抽运激光器热效应的不均匀性

林 林 过 振 王石语 蔡德芳 文建国

(西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要 激光二极管(LD)三向侧面抽运晶体时,每根抽运源上激光二极管阵列间的散热空隙使得抽运光在晶体中轴向分布不均匀,晶体的轴向热均匀性变差。从光强分布的解析表达式出发,通过研究热源分布特性,导出了工作物质热透镜焦距的理论计算方法。数值计算了总抽运功率不变的情况下,抽运源激光二极管阵列的空间占空比、抽运源到晶体中心距离等因素对晶体热透镜焦距的影响。发现热透镜焦距随激光二极管阵列空间占空比和抽运距离的增大而增大。结果表明,抽运光沿轴向分布越均匀,热透镜焦距越长。这为追求晶体轴向热均匀性时侧面抽运源的选择和改进提供了依据。

关键词 激光器; 固体激光器; 热效应; 光线追迹; 轴向不均匀性

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093607.1766

Nonuniformity of Thermal Effect in a LD Side-Pumped Laser

Lin Lin Guo Zhen Wang Shiyu Cai Defang Wen Jianguo

(School of Technical Physics, Xidian University, Xi'an, Shaanxi, 710071, China)

Abstract In a three-stack side-pumped laser, the gaps between two arrays for cooling make the pump light nonuniform and affect the thermal uniformity in the crystal. Based on the light intensity equation and the distribution characteristic of hot source, numerical method for thermal lens focus is proposed. With the total pumping power unchanged, the effects of dimensional duty factor of arrays and the distance between LD and the center of the crystal on the thermal lens focus are numerically calculated. The thermal lens focus increases along with the increasing array dimensional duty factor and the pumping distance. The result indicates that the evener the pump light distributes along the axis, the smaller the thermal lens affects. It can furnishe evidences for making choice and improving pump resources when axial thermal uniformity is concerned.

Key words lasers; solid-state laser; thermal effect; method of ray trace; axial nonuniformity

1 引言

激光二极管(LD)抽运固体激光器(DPL)因其效率高、结构紧凑、性能稳定,已获得广泛应用^[1,2]。然而随着抽运功率的提高,晶体的热效应对 DPL 性能的影响愈显突出^[3,4]。在端面抽运和侧面抽运两种方式中,端面抽运能够获得更高的效率和更好的模式输出^[5~7],但由于接收抽运光的面积较小,往往输出功率较低。要获得高能量的激光输出通常采用侧面抽运方式。侧面抽运时,随抽运功率的增高,晶

体中的热效应显著^[8~14]。之前的研究都假设抽运光沿晶体轴向的分布是均匀的。实际上抽运源 LD 产生的抽运光都呈高斯或近高斯分布,并不均匀;并且随着抽运源功率的增加,两 LD 阵列间留有一定的散热空隙十分必要,这就导致了每个阵列在一条抽运源(LD 阵列组)上的空间占空比不可能做到 100%。为了改善和提高激光器的性能,研究侧面抽运光的轴向分布不均匀性对热透镜焦距的影响十分必要。

收稿日期: 2008-11-26; 收到修改稿日期: 2009-03-18

作者简介: 林 林(1983—),男,博士研究生,主要从事固体激光器热效应方面的研究。

E-mail: linlin@mail.xidian.edu.cn

导师简介: 过 振(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事固体激光器件与激光技术等方面的研究。

E-mail: zhguo@xidian.edu.cn

2 热透镜焦距的理论计算方法

2.1 三向侧面抽运的光强分布

侧面抽运源的一个发光单元由一个 LD 阵列和两相邻阵列间的一段空隙组成,如图 1 所示。一个 LD 阵列尺寸为 $a \times c$,一个发光单元长度为 b ,文中抽运源的空间占空比是指一个阵列的长度与其对应的发光单元长度的比值 $a/b \times 100\%$ 。每个侧向抽运源由 19 个阵列组成。

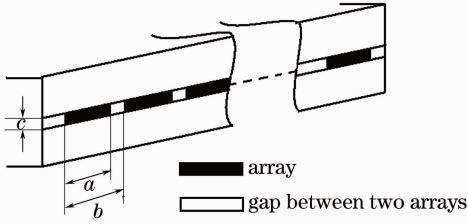


图 1 侧面抽运源的 LD 阵列分布

Fig. 1 Distribution of arrays in a side-pumping stack

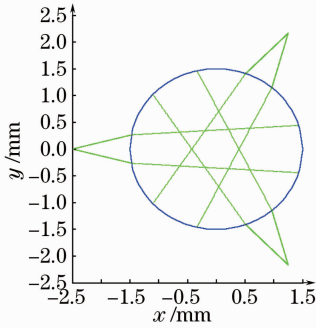


图 2 三向侧面抽运快轴传播示意图

Fig. 2 Fast axis sketch map of a three-stack side-pumping system

抽运系统及坐标系如图 2 所示,沿晶体轴线垂直纸面向里为 $+z$ 方向。3 个抽运源与晶体中心的距离(简称抽运距离)、抽运功率、发散角都相同,夹角严格为 120° 。

抽运光进入激光介质后的光斑半径等参数,可通过传输矩阵求解。对于某一方向(快轴或慢轴),抽运光束经过空气,在空气与晶体界面发生折射,然后在晶体中传播至某一位置 x 。假设初始的光束复半径为 q_0 ,抽运距离为 d ,入射界面曲率半径为 r (快轴方向为晶体半径 r_0 ,慢轴方向为无穷大),空气和晶体中心的折射率分别为 n 和 n_0 ,经计算得出抽运源 1 发出的抽运光的光斑与晶体的左端在 x' 处相交,则 x 处光束的复半径 $q(x)$ 为

$$q(x) = \frac{Aq_0 + B}{Cq_0 + D}, \quad (1)$$

其中传输矩阵

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & x - x' \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_0 - n}{n_0} \cdot \frac{1}{r} & \frac{n}{n_0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & d + x' \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

光斑半径 $w(x)$ 可由下式求解^[15]

$$\frac{1}{q(x)} = \frac{1}{R(x)} - \frac{i\lambda}{\pi n_0 w^2(x)}. \quad (3)$$

在抽运光强 z 方向分布均匀的情况下,抽运源 1(起点坐标为 $(-2.5, 0)$)发出的抽运光在晶体中沿快轴方向的光强分布为^[16]

$$I_1(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{w(x)} \exp\left(\frac{-2y^2}{w^2(x)} - al\right), \quad (4)$$

$$l = \sqrt{r_0^2 - y^2} + x, \quad (5)$$

式中 I_0 为初始的抽运光中心的光强。同样地,可以得出另外两个抽运源的抽运光强

$$I_2(x_2, y_2) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{w(x_2)} \exp\left(\frac{-2y_2^2}{w^2(x_2)} - al_2\right), \quad (6)$$

$$l_2 = \sqrt{r_0^2 - y_2^2} + x_2, \quad (7)$$

$$I_3(x_3, y_3) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{w(x_3)} \exp\left(\frac{-2y_3^2}{w^2(x_3)} - al_3\right), \quad (8)$$

$$l_3 = \sqrt{r_0^2 - y_3^2} + x_3, \quad (9)$$

而

$$\begin{aligned} x_2 &= x \cos(120^\circ) + y \sin(120^\circ) \\ y_2 &= -x \sin(120^\circ) + y \cos(120^\circ), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} x_3 &= x \cos(-120^\circ) + y \sin(-120^\circ) \\ y_3 &= -x \sin(-120^\circ) + y \cos(-120^\circ), \end{aligned} \quad (11)$$

那么

$$I(x, y) = I_1(x, y) + I_2(x, y) + I_3(x, y), \quad (12)$$

xo 面慢轴的光路如图 3 所示。

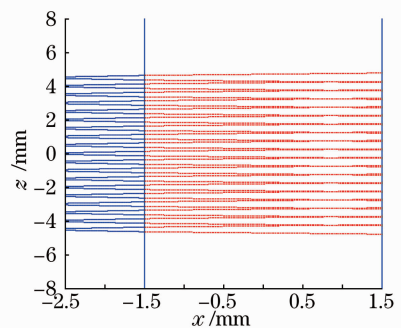


图 3 抽运光慢轴传播示意图

Fig. 3 Sketch map of transmitting pump lights along slow axis

相应地,慢轴方向单个 LD 阵列的光强分布为

$$I(x, z) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0'}{w'(x)} \exp\left(\frac{-2z^2}{w'^2(x)} - al'\right), \quad (13)$$

19 个阵列的光强分布为(13)式在 z 方向的空间叠加。所以考虑抽运光 z 方向不均匀性时,快轴方向的光强计算公式(4),(6),(8)中初始光强 I_0 将不再是常数,而是沿 z 轴周期性变化的函数 $I_0(x, y, z)$ 。同样地,(12)式将变为

$$I(x, y, z) = I_1(x, y, z) + I_2(x, y, z) + I_3(x, y, z), \quad (14)$$

2.2 晶体中的热源分布

对于三向侧面抽运结构,有^[17]

$$Q(x, y, z) = \eta_r \times I(x, y, z), \quad (15)$$

式中 $Q(x, y, z)$ 为晶体中的热源分布,即单位体积的均匀发热量, η_r 为热耗功率占总抽运功率的百分比。

2.3 热透镜焦距的计算公式

假定晶体在 z 方向一段长度 L 上发热均匀,经热效应改变后各点的折射率与半径 r 呈二次方关系,沿棒轴传播的光束将出现二次方的空间相位变化,此扰动相当于球面透镜效应。忽略晶体的端面效应,令 K 为晶体的热导率, α_0 为晶体的热扩散系数,则类透镜介质折射率可表示为

$$n(r) = n_0 \left(1 - \frac{k_2}{2k} r^2\right), \quad (16)$$

其焦距可表示为

$$f \approx \frac{k}{k_2} \cdot \frac{1}{n_0 L}, \quad (17)$$

因此,对于折射率总变化量为

$$n(r) = n_0 \left[1 - \frac{Q}{2K} \left(\frac{1}{2n_0} \frac{dn}{dT} + n_0^2 \alpha_0 C_{r,\varphi}\right) r^2\right], \quad (18)$$

的晶体,其热焦距为^[18]

$$f \approx \frac{K}{QL} \cdot \left(\frac{1}{2} \frac{dn}{dT} + \alpha_0 C_{r,\varphi} n_0^3\right)^{-1}, \quad (19)$$

但由于抽运光 z 方向分布不均匀,19 个阵列的光强在晶体中相互叠加,所以晶体内每点的热密度 $Q(x, y, z)$ 不是常数,假设沿 z 方向某一段微小长度 dl 上热源分布是均匀的,则这段晶体形成一个小热透镜,通过(19)式可求解其焦距 f_i 。考虑短晶体的情况,小热透镜可以当作薄透镜处理。若将晶体分成 N 段,则有总的热透镜焦距 f

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} + \frac{1}{f_3} + \frac{1}{f_4} + \dots + \frac{1}{f_N}, \quad (20)$$

对于(20)式中每段 dl 上的 $Q(z)$ 有

$$Q(z) = \frac{\int_0^r \int_0^\pi Q(r, \varphi, z) d\varphi \cdot r dr dl}{\pi \cdot r^2}, \quad (21)$$

与晶体的半径 r_0 不同,式中 r 是对 $Q(r, \varphi, z)$ 积分平均时的半径,显然 $0 \leq r \leq r_0$,后面的模拟可以看出,积分时半径取值不同,求解出的热效应焦距也不相同。

3 理论模型的 Matlab 仿真

模拟计算时使用的参数:抽运功率 3×100 W 恒定,发光单元 $b = 0.5$ mm,LD 阵列宽 $1 \mu\text{m}$,长度随其空间占空比的不同而选取不同值,每根抽运源的发散角为 $42^\circ \times 10^\circ$,Nd:YAG 晶体棒选用 $\phi 3$ mm

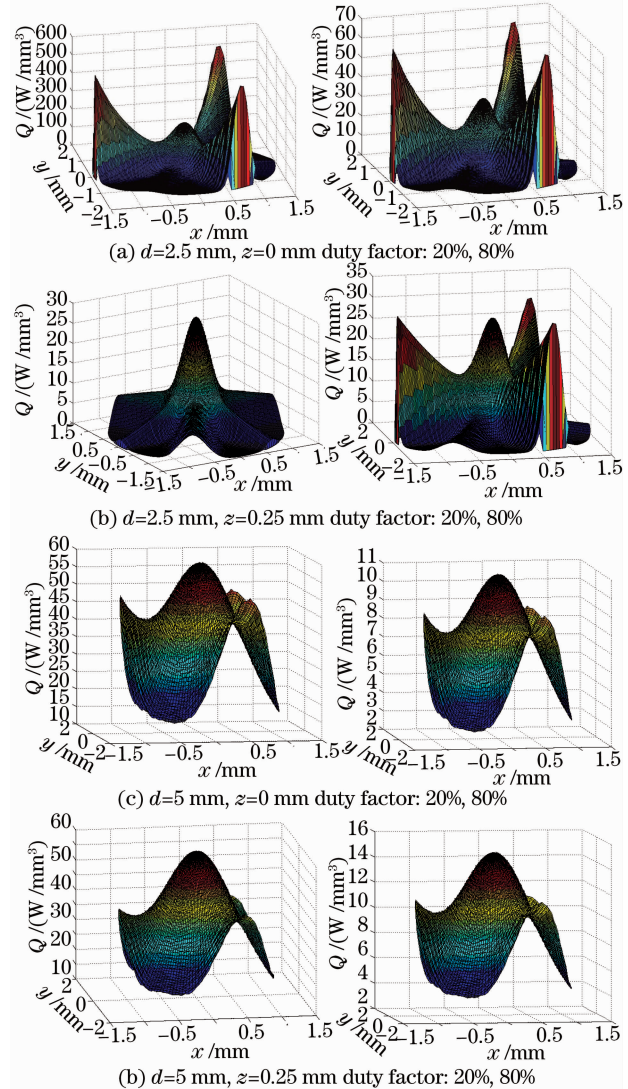


图 4 不同间距和占空比时晶体的热源分布

Fig. 4 Hot source distribution in the crystal with different pumping distance and dimensional duty factor

$\times 10 \text{ mm}$, 晶体中心折射率 $n_0 = 1.82$, 其热导率 $K = 14 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$, $\eta_r = 30\%$, $C_{r,\varphi} = 0.0165$, $\frac{dn}{dT} = 7.3 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}^{[19]}$, 晶体热扩散系数 $\alpha_0 = 7.9 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$, 晶体的吸收系数 $\alpha = 0.41 / \text{mm}$, $dl = 0.05 \text{ mm}$.

图 4 为抽运距离 d , LD 空间占空比变化的情况下 $z = 0$ (一个阵列的中心) 和 $z = 0.25 \text{ mm}$ (一个发光单元的边界) 面的热密度分布。由图可见, d 为 2.5 mm 时, 晶体 z 方向的不同截面热量径向分布差异很大。随着占空比或抽运距离的增大, 这一差异逐渐变小。

设定 $d = 2.5 \text{ mm}$, (21) 式求解 $Q(z)$ 时选取不同的半径 r , 则焦距随占空比变化的曲线如图 5 所示。

对于某一确定的空间占空比, 选取的半径 r 不同, 得到的焦距数值差别很大。其原因在于, 将晶体折射率变化后抽象成二次型函数(16) 式的做法仅限于傍轴区域。由图 4 可见, 由于抽运光从晶体的 3 个侧面进入, 在 xoy 面实际的抽运光强分布不是轴对称的, 例如, 抽运距离为 2.5 mm 时 $z = 0$ 的平面, 抽运光刚进入的地方光强值较高, 这使得该点热密度 $Q(x, y, z)$ 较大, 从而导致了晶体截面的折射率并不完全按(16) 式二次型公式分布, 故不能用此公式完全仿真计算。但如果把对 $Q(z)$ 平均的区域缩小

至傍轴的某一范围, 则模拟结果应该跟真实值更加接近。通常震荡光在晶体中的半径为 $0.4 \sim 0.6 \text{ mm}$, 故热焦距的计算选取 $r = 0.5 \text{ mm}$ 。

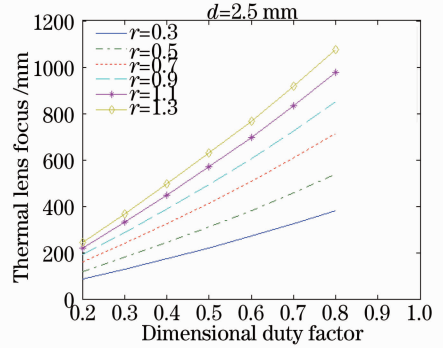


图 5 积分半径 r 不同时热透镜焦距随占空比的变化曲线

Fig. 5 Curve of thermal lens focus changing with duty factor

以 $r = 0.5 \text{ mm}$ 的曲线为例, 由图 5 可见, 当总抽运功率一定, 抽运距离固定时, 随着 LD 阵列空间占空比的增大, 热透镜焦距逐渐变长。因为阵列空间占空比越大, 每个阵列单位长度上的功率越小, 并且抽运光在晶体中 z 方向扩散得越宽, 从而晶体 z 方向发热越均匀, 形成的热焦距越长。模拟计算得出, 20% 占空比的热焦距为 119.1 mm , 80% 的热焦距为 537.0 mm , 是 20% 的 4.5 倍。

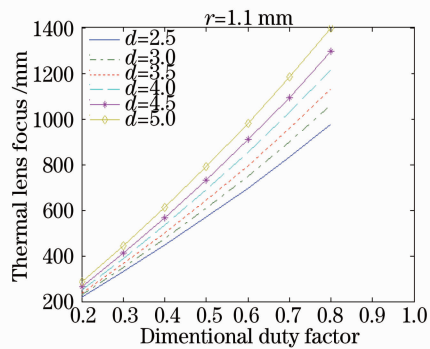
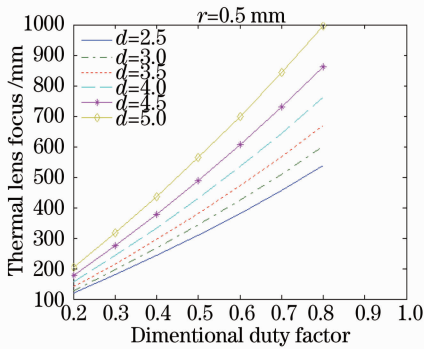


图 6 热透镜焦距随间距和占空比的变化曲线

Fig. 6 Curve of thermal lens focus changing with pumping distance and duty factor

图 6 模拟了抽运距离 d 分别为 $2.5 \sim 5 \text{ mm}$ 时热焦距随抽运距离和空间占空比的变化。两图分别选择了 $Q(z)$ 的积分半径 $r = 0.5 \text{ mm}$ 和 $r = 1.1 \text{ mm}$ 进行计算。由此可见, 抽运距离越大, 相同空间占空比的抽运源产生的热透镜焦距越大。这是因为随着抽运距离的增大, 由 LD 阵列之间的空隙带来的 z 方向不均匀性逐渐变小, 晶体中 z 方向热分布均匀性变好, 故而热焦距变长。

抽运距离的变化, 相同占空比产生热焦距的变化率, 当抽运距离等间隔变化时, 定义焦距变化率

$$V_{f_j} = \frac{\Delta f / f_j}{\Delta d / d_j} = \frac{(f_{j+1} - f_j) / f_j}{\Delta d / d_j}, \quad (22)$$

式中 f_j 是某一空间占空比情况下在抽运距离为 d_j 时的热焦距, f_{j+1} 为相同占空比、下一抽运距离 $d_j + \Delta d$ 时的热焦距, 抽运距离以 $\Delta d = 0.5 \text{ mm}$ 递增, 如图 7 所示。

以 $d = 2.5 \text{ mm}$ 曲线为例, 由图 7 可见, 在抽运

针对 $r = 0.5 \text{ mm}$ 得到的模拟数据, 计算其随着

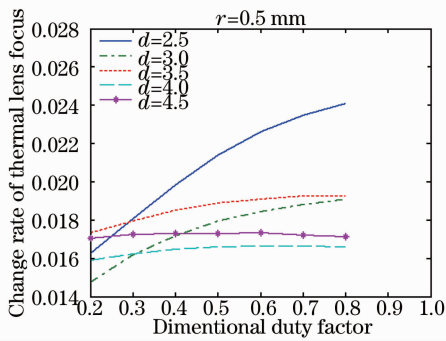


图 7 焦距变化率

Fig. 7 Change rate of thermal lens focus

距离较小时,适当增大抽运距离,不同占空比下焦距变化率不同,占空比越大,焦距的变化率越高。这说明抽运距离较小时,适当增大抽运距离,小占空比情况下抽运光在晶体中轴向分布仍然非常不均匀,而大占空比情况下的晶体轴向热均匀性得到了明显的改善,故而焦距相对增量较大,从抽运距离 3.5 mm 处开始,大占空比情况下焦距相对增量趋于稳定,说明此时轴向热分布已基本均匀;抽运距离较大时,小占空比情况下抽运光轴向不均匀状况已经好转,如抽运距离 4 mm 处适当增大抽运距离,各种占空比的抽运光产生的热焦距相对增量已经基本一致,说明它们分别对应的轴向热分布已基本均匀。

4 结 论

针对激光二极管三向侧面抽运的固体激光器,数值模拟了总抽运功率一定的情况下,抽运源中 LD 阵列的空间占空比以及抽运源到晶体中心距离对晶体热透镜焦距的影响,得出了抽运光在晶体轴线方向分布越均匀,热透镜焦距越大的结论。在抽运距离一定的情况下,空间占空比越大,晶体轴向热分布越均匀,从而热透镜焦距越长,即热透镜效应越小。这为今后选择大占空比的抽运源以更好保证晶体轴向热均匀分布提供了依据。而对于相同空间占空比、抽运距离不同的几种情况,抽运距离越大,晶体轴向热分布越均匀,热透镜焦距越长,所以适当增加抽运距离在追求晶体轴向热均匀分布时,尤其在抽运功率较高,其空间占空比无法再提高的情况下,是一种有效的方式。

参 考 文 献

1 Gong Mali, Zhai Gang, Jin Feng *et al.*. High-efficiency laser-diode side-pumped Nd:YAG laser[J]. *Acta Optica Sinica*, 1997, **17**(7): 900~903
 巩马理, 翟刚, 金锋等. 激光二极管侧面泵浦的高效 Nd:YAG 激光器[J]. *光学学报*, 1997, **17**(7): 900~903

2 Cai Zhiqiang, Yao Jianquan, Wen Wuqi *et al.*. Simulation of absorbed power and temperature distribution in LD side-pumped laser[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2004, **15**(11): 1305~1310
 蔡志强, 姚建铨, 温午麒等. LD 侧泵激光器抽运光和温度分布数值研究[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(11): 1305~1310
 3 Ou Qunfei, Chen Jianguo, Feng Guoying *et al.*. Analysis of transient temperature and thermal stress distribution in ring laser diode array pumped laser rod [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(6): 803~807
 欧群飞, 陈建国, 冯国英等. 环形激光二极管抽运棒状激光器中瞬态温度和热应力分析[J]. *光学学报*, 2004, **24**(6): 803~807
 4 Yang Yongming, Zhou Rong, Guo Zhen *et al.*. End deformation's experiment and its computer mimic in LD end pumped Nd:YAG crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(9): 1297~1300
 杨永明, 周荣, 过振等. LD 端泵下 Nd:YAG 端面形变热效应研究[J]. *光子学报*, 2005, **34**(9): 1297~1300
 5 Wang Jianhua, Jin feng, Zhai Gang *et al.*. Pump uniformity study of solid state rods direct side-pumped by laser diode[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, **34**(4): 421~426
 王建华, 金锋, 翟刚等. 二极管阵列侧面泵浦固体激光介质的光场分布[J]. *红外与激光工程*, 2005, **34**(4): 421~426
 6 Liu Shushan, Li Min, Li Lei *et al.*. Theoretical study of thermal effect in diode-end-pumped Nd:KGW laser [J]. *Infrared*, 2008, **29**(6): 31~35
 刘树山, 刘敏, 李雷等. LD 端面泵浦 Nd:KGW 激光器热效应的理论研究[J]. *红外*, 2008, **29**(6): 31~35
 7 Guan Jun, Li Jinping, Cheng Guanghua *et al.*. Experimental study on thermal lensing of end-pumped solid-state lasers [J]. *Acta Physica Sinica*, 2004, **53**(6): 1804~1809
 关俊, 李金萍, 程光华等. 端面抽运固体激光器热透镜效应的实验研究[J]. *物理学报*, 2004, **53**(6): 1804~1809
 8 Xu Jinlong, Guo Jun. Thermal effect analysis on LD side pump entire solid state laser [J]. *Journal of Chongqing Institute of Technology*, 2007, **21**(7): 92~97
 徐金龙, 郭军. LD 侧面泵浦全固态激光器的热效应分析[J]. *重庆工学院学报*, 2007, **21**(7): 92~97
 9 Ning Jiping, Cai Zhiqiang, Chen Zhiqiang *et al.*. Study on uniform of pump distributivity in LD side-pumped Nd:YAG laser [J]. *Chinese. J. Lasers*, 2004, **31**(4): 390~394
 宁继平, 蔡志强, 陈志强等. LD 侧面抽运的 Nd:YAG 激光器抽运均匀性研究[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 390~394
 10 Zhang Shenjin, Zhou Shouhuan, Lv Huachang *et al.*. Laser-diode arrays symmetrically side-pumped thin disk laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(2): 168~172
 张申金, 周寿桓, 吕华昌等. 激光二极管阵列侧面对称抽运薄片激光器[J]. *中国激光*, 2008, **35**(2): 168~172
 11 Zheng Wei, Yu Jianhua, Xie Wu *et al.*. Influence of thermal effect on the beam quality of a high power diode side-pumped solid-state laser [J]. *Laser Journal*, 2006, **27**(5): 22~23
 郑伟, 余建华, 谢武等. 高功率半导体侧面泵浦固体激光器热效应对光束质量的影响[J]. *激光杂志*, 2006, **27**(5): 22~23
 12 Dsi Qin, Li Xinzong, Wang Xijun. Analysis of thermal effect in LDA side pumping Nd:YAG solid state lasers [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(2): 197~201
 岱钦, 李新忠, 王希军. LDA 侧面泵浦 Nd:YAG 激光器的热效应分析[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(2): 197~201
 13 Dai Qin, LI Xinzong, Wang Xijun. Analysis of temperature rise in LDA side pumped solid state laser rod [J]. *Laser & Infrared*, 2007, **37**(8): 731~733
 岱钦, 李新忠, 王希军. LDA 侧面泵浦固体激光器介质瞬态温升过程分析[J]. *激光与红外*, 2007, **37**(8): 731~733
 14 Jiang Dongsheng, Zhou Shouhuan, Hu Yu *et al.*. Simulation study on thermal effects of LD side-pumped solid state laser[J]. *Journal of University of Electronics Science and Technology of*

- China*, 1999, **28**(4): 428~431
- 姜东升,周寿桓,胡 渝等. LD 侧泵浦固体激光器的热效应分析和模拟研究[J]. 电子科技大学学报, 1999, **28**(4): 428~431
- 15 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. Principles of Laser[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2002, 76
- 周炳琨,高以智,陈倜嵘等. 激光原理(第四版)[M]. 北京:国防工业出版社. 2002, 76
- 16 Yang Aifen, Guo Zhen, Wang Shiyu *et al.*. Influence of the thermal effect on the TEM₀₀ mode output power in a three bar side-pumped DPL [J]. *Laser Journal*, 2004, **25**(1): 3~5
- 杨爱粉,过 振,王石语等. 热效应对三向侧面泵浦 DPL 中 TEM₀₀ 模输出功率的影响[J]. 激光杂志, 2004, 25(1): 3~5
- 17 Chen Dedong, Yang Aifen, Wen Jianguo *et al.*. Thermal lensing in three side-pumped solid-state laser[J]. *Laser Journal*, 2002, **23**(5): 26~27
- 陈德东,杨爱粉,文建国等. 三向侧面泵浦固体激光器中热透镜的研究[J]. 激光杂志, 2002, **23**(5): 26~27
- 18 Walter Koechner. Solid-State Laser Engineering [M]. Beijing: Science Press, 2002. 363~364
- W·克希耐尔. 固体激光工程[M]. 北京:科学出版社. 2002. 363~364
- 19 Zhao Cunhua, Fan Zhongwei, Wang Peifeng *et al.*. New thermal lens equation of LD side-pumped solid-state laser rod[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(8), 1004~1006
- 赵存华,樊仲维,王培峰等. LD 侧面泵浦固体激光棒新的热透镜焦距计算[J]. 光电子·激光, 2005, **16**(8): 1004~1006