

文章编号 1004-924X(2006)05-0786-06

YVO₄-Nd:YVO₄ 复合晶体热效应研究

李 隆^{1,2}, 史 彭¹, 刘小芳³, 甘安生¹, 陈浩伟², 贾 森²

(1. 西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055; 2. 西北大学 光子学与光子技术研究所
光电子省级重点开放实验室, 陕西 西安 710069; 3. 黄河集团有限公司, 陕西 西安 710043)

摘要:在全固态激光器中使用了复合结构的激光晶体,通过端面泵浦复合晶体工作特点分析,提出了矩形截面复合晶体热分析模型。在热模型中,考虑了复合晶体具有轴向加热、周边恒温,耦合后的泵浦光束具有高斯分布的特点。利用热传导方程,得出了YVO₄-Nd:YVO₄复合晶体内部温度场及端面热变形的一般解析表达式。研究结果表明,若用输出功率为20 W的激光二极管端面泵浦YVO₄-Nd:YVO₄复合晶体(其中复合晶体中YVO₄晶体长为2 mm,Nd:YVO₄晶体长为6 mm,钕离子掺杂质量分数为0.5%),泵浦光斑为0.2 mm时,复合晶体内最大温升为324.5 °C,泵浦端面具有3.61 mm的热形变量。在相同泵浦条件下,采用复合晶体替代Nd:YVO₄晶体,可将其最大温升降低23.4%,这对于削弱激光晶体热效应的影响,解决激光二极管端面泵浦激光晶体引起的非均匀温升以及热折裂问题,提高激光器性能有着重要的意义。

关键词:激光二极管;YVO₄-Nd:YVO₄复合晶体;解析方法;热效应。

中图分类号:TN244 **文献标识码:**A

Thermal effect of YVO₄-Nd:YVO₄ composite laser crystals

LI Long^{1,2}, SHI Peng¹, LIU Xiao-fang³, GAN An-sheng¹, CHEN Hao-wei², JIA Sen²

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;
2. Institute of Photonics & Photo-Technology and Provincial Key Laboratory of Photoelectronic Technology, Northwest University, Xi'an 710069, China; 3. Shanxi Huanghe Group Co., LTD, Xi'an 710043, China)

Abstract: Through characteristic analysis of composite laser crystal, a thermal analysis model of rectangle composite crystal was introduced. In the thermal model, the composite crystal was characterized by axially symmetrical heating, fixed boundary temperature and coupled pump laser having Gaussian distribution. Based on the heat conductive equation and its boundary, the analytical solutions of interior temperature field and thermal deformation of YVO₄-Nd:YVO₄ composite crystal were obtained. The result shows that when the end-pumped power of diode laser is 20 W and the diameter of pump spot is 0.2 mm, the maximal temperature rise of YVO₄-Nd:YVO₄ composite crystal (the length of YVO₄ crystal is 2 mm, the length of Nd:YVO₄ crystal is 6 mm and the neodymium doped concentration in Nd:YVO₄ crystal is 0.5 %) is 324.5 °C, and thermal distortion on pump-face of composite crystal is 3.61 mm. Under the same pumped conditions, the maximal temperature rise is decreased by

收稿日期:2005-11-16;修订日期:2006-08-18.

基金项目:陕西省教育厅专项科研项目(No: 06JK251)与校基金资助

23.4% using the composite crystal instead of Nd:YVO₄ crystal. This means it can reduce thermal effect influence of laser crystal and improve laser characteristics and performance, and also can solve nonuniform temperature rise and thermal fracture problems of laser crystal by high power diode laser end-pumped.

Key words: diode laser; YVO₄-Nd:YVO₄ composite crystal; analytical solution; thermal effect

1 引 言

激光二极管(LD)泵浦的固体激光器具有结构紧凑、效率高、稳定性好、寿命长等优点,在科研、医疗、通讯、军事等领域有着广阔的应用前景^[1]。在众多适于激光二极管泵浦的激光增益介质中Nd:YVO₄晶体具有对泵浦光波长依赖性低,吸收带宽,斜率效率高等特点,倍受人们青睐^[2-6]。然而,Nd:YVO₄晶体吸收泵浦光能量产生激光振荡的同时,有相当一部分泵浦光能量转变为晶体内的热能。热现象的出现使得Nd:YVO₄晶体产生光弹效应、热应力折射、热形变等现象,不仅严重地影响了激光器谐振腔的稳定性,而且制约了激光二极管的泵浦功率^[7-9]。

对于大功率Nd:YVO₄激光器的研究和应用表明,所使用的Nd:YVO₄晶体不仅朝着低掺杂、大尺寸的方向发展(晶体长度一般在5 mm以上,Nd³⁺离子的掺杂质量分数范围为0.3~0.8%)^[10],而且对于晶体采取了复合结构的处理^[11-12],以减小激光增益介质热效应对激光器稳定性的影响。

本文利用热传导方程,对于激光二极管端面泵浦YVO₄-Nd:YVO₄复合晶体温度场以及端面热形变场进行了研究。通过对于端面泵浦复合晶体工作特点的分析,提出了复合激光晶体热模型。在热模型中考虑了泵浦光具有高斯分布、复合晶体有沿轴向加热、周边恒温等特点。通过Poisson方程以及边界条件,得到了YVO₄-Nd:YVO₄复合晶体温度场以及端面热形变场的解析表达式。同时对比了复合晶体与常规Nd:YVO₄晶体温度场以及端面热形变场的差异。研究对于解决激光晶体热效应问题,提高激光器的特性具有指导作用。

2 端面泵浦复合晶体温度场及端面热形变场的解析分析

采用激光二极管端面泵浦方式,泵浦光可以有效地进入激活介质TEM₀₀模体积内,从而实现了泵浦光与谐振腔内振荡光之间的模式匹配,使得激光器不仅具有较高的转换效率,而且容易获得稳定的基模运转^[13]。图1所示为端面泵浦YVO₄-Nd:YVO₄复合晶体绿光激光器实验装置图。

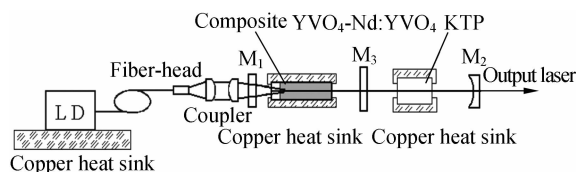


图1 LD端面泵浦YVO₄-Nd:YVO₄复合晶体绿光激光器实验装置简图

Fig. 1 Schematics of LD end-pumped YVO₄-Nd:YVO₄ composite crystal green laser

2.1 LD端面泵浦复合晶体热模型的建立

依据复合晶体的尺寸设计冷却块,在晶体周边涂抹导热硅脂后,用钢包裹,置于冷却块中。复合晶体内部产生的热量以热传导的方式转移至冷却块上,再通过循环水冷或半导体致冷方式保持冷却块温度的稳定。这样一来,当激光器稳定运转时,便在复合晶体内部形成一个相对稳定的温度梯度场分布。图2为激光二极管端面泵浦YVO₄-Nd:YVO₄复合晶体结构与泵浦光强分布图^[11]。其中复合晶体的尺寸为 a mm \times b mm \times c mm,YVO₄晶体长度为 d mm。泵浦光由YVO₄晶体一侧沿晶体中心泵浦复合晶体内的激活离子,形成所谓的端面泵浦方式。其中YVO₄-Nd:YVO₄复合晶体YVO₄泵浦端镀有808 nm高透膜、1 064 nm高反膜,复合晶体另一端镀808 nm、1 064 nm双色增透膜。

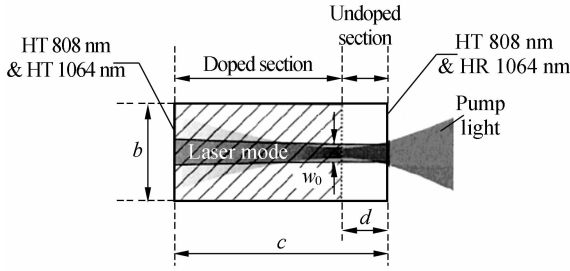


图 2 LD 端面泵浦 $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 复合晶体结构与泵浦光强分布图

Fig. 2 Conformation and light intensity distribution of LD end-pumped $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ composite crystal

为了分析复合激光晶体内部温度场分布状态,需建立端面泵浦复合晶体热分析模型。在热模型的建立中,考虑到了泵浦光具有理想的高斯分布^[7-8],并且泵浦光沿复合晶体 YVO_4 端中心入射;复合晶体四个侧面与冷却块具有良好的热接触,其温度相同(在数学处理中可设复合晶体周边温度为 0);复合晶体的两个通光端面与空气相接触,由于经端面与空气热交换流出的热量远远小于从复合晶体侧面通过传导流出的热量,可假设复合晶体的两通光端面满足近似绝热条件^[14]。由此得到复合激光晶体温度场所满足的边界条件:

$$\begin{aligned} u(0, y, z) = 0; u(a, y, z) = 0 \\ u(x, 0, z) = 0; u(x, b, z) = 0 \\ \left. \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0; \left. \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=c} = 0, \quad (1) \end{aligned}$$

2.2 端面泵浦复合激光晶体内部温度场分布的解析表达式

复合晶体吸收泵浦光能量,在晶体内部形成热源分布,其温度场分布遵守热传导 Poisson 方程

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{q_v(x, y, z)}{\lambda}, \quad (2)$$

其中: $q_v(x, y, z)$ 为复合激光晶体内部单位体积的热功率密度; λ 为晶体导热系数或称为热导率。

通过对热模型及边界条件的分析,可以得到复合晶体内部温度场分布的表达式:

$$u(x, y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=1}^{\infty} A_{nml} \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{m\pi}{b} y \cos \frac{l\pi}{c} z, \quad (3)$$

式中常数 A_{nml} 为

$$\begin{aligned} A_{nml} = & \frac{8I_0 \eta \left[\beta c \left(\cos \frac{dl\pi}{c} - e^{-\beta(c-d)} \cos l\pi \right) - l\pi \sin \frac{dl\pi}{c} \right]}{\lambda ab \pi^2 (\beta^2 c^2 + l^2 \pi^2) \left(\frac{n^2}{a^2} + \frac{m^2}{b^2} + \frac{l^2}{c^2} \right)} \times \\ & \int_0^b \int_0^a e^{-2 \frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{w_0^2}} \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{m\pi}{b} y dx dy, \quad (4) \end{aligned}$$

式中 I_0 为泵浦复合晶体的光强; β 为复合晶体对于泵浦光的吸收系数; a, b, c 为晶体的尺寸参数; d 为复合晶体中未掺杂晶体长度; n, m, l 为正交归一化的本征函数族所确定的正整数; η 为由荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数。 $\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_l$, 其中 λ_p 为激光二极管泵浦光波长 808 nm, λ_l 为腔内谐振激光波长 1 064 nm。

2.3 端面偏心泵浦复合激光晶体端面热形变场分布的解析表达式

设复合晶体内部某点 (x, y, z) 原温度为 0, 达到热平衡后的温度为 $u(x, y, z)$, 可得晶体沿泵浦方向 dz 微元的热膨胀量

$$dl = \alpha u(x, y, z) dz, \quad (5)$$

式中 α 为复合晶体 c 向热膨胀系数。复合晶体泵浦端温升较大, 而另一端温升较低。可假设其表面无热形变, 则复合晶体沿泵浦向上的热膨胀量, 即泵浦端面 (YVO_4 晶体端面) 的热膨胀量为

$$l = \int_0^c dl = \alpha \int_0^c u(x, y, z) dz, \quad (6)$$

3 端面泵浦 $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 复合晶体温度场与热形变场分析

3.1 LD 端面泵浦 $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 复合晶体温度场分析

忽略温度场对晶体物理特性的影响, YVO_4 晶体与 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体的热传导系数均为 $5.10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 沿轴向热膨胀系数 $\alpha_c = 4.43 \times 10^{-6} / \text{K}$ 。文献[3]给出 0.5% 质量分数 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体对泵浦波长 808 nm 的吸收系数为 14.8 cm^{-1} 。若泵浦功率为 20 W, 泵浦光斑为 $200 \mu\text{m}$, 复合晶体尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$, 其中 YVO_4 晶体长度为 2 mm, 图 3、4 分别给出了激光二极管端面泵浦 $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体三维温度场分布图以及轴线上的温度分布情况。

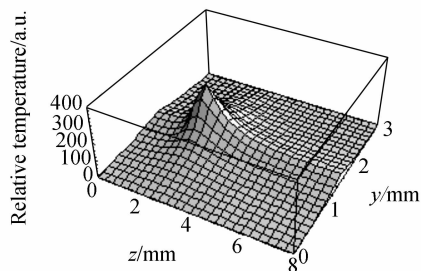


图 3 LD 端面泵浦 YVO₄-Nd : YVO₄ 复合晶体三维温度场分布图

Fig. 3 Three-dimensional temperature field of LD end-pumped YVO₄-Nd : YVO₄ composite crystal

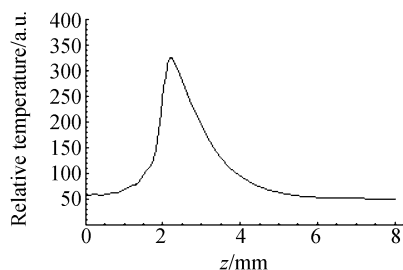


图 4 YVO₄-Nd : YVO₄ 复合晶体轴向上的温度分布图

Fig. 4 Temperature distribution along the axis of YVO₄-Nd : YVO₄ composite crystal

经式(3)计算,可得 YVO₄-Nd : YVO₄ 复合晶体内最大温升为 324.5 °C。

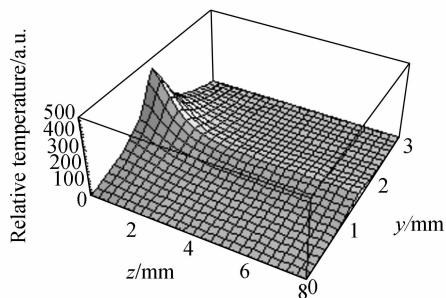


图 5 LD 端面泵浦 Nd : YVO₄ 晶体三维温度场分布图

Fig. 5 Three-dimensional temperature field of LD end-pumped Nd : YVO₄ crystal

从图 5 可得在相同泵浦条件下 Nd : YVO₄ 晶体内最大温升为 423.9 °C。将图 3、5 进行对比,可以得出采用 YVO₄-Nd : YVO₄ 复合晶体替代 Nd : YVO₄ 晶体作为激光增益介质,其最大温

升可降低 23.4%。图 6 给出了 YVO₄-Nd : YVO₄ 复合晶体内等温线分布情况。

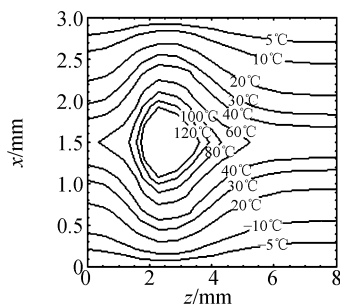


图 6 YVO₄-Nd : YVO₄ 复合晶体内部等温线分布图

Fig. 6 Isotherm distribution of YVO₄-Nd : YVO₄ composite crystal

(1)不同泵浦功率下 YVO₄-Nd : YVO₄ 复合晶体内部温升。

调节激光二极管的泵浦功率分别为 15 W、20 W、25 W、30 W,经过耦合器的泵浦光斑为 200 μm。复合晶体尺寸为 3 mm×3 mm×8 mm,其中 YVO₄ 部分长度为 2 mm。YVO₄-Nd : YVO₄ 复合晶体泵浦轴线(x = a/2,y = b/2)上温度分布如图 7 所示。

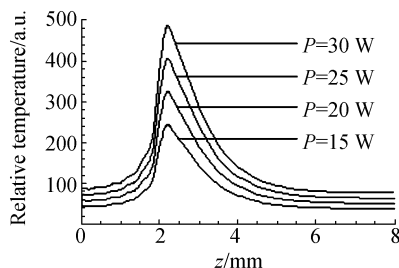


图 7 不同泵浦功率下 YVO₄-Nd : YVO₄ 复合晶体轴向上的温度分布图

Fig. 7 Temperature distribution along the axis of YVO₄-Nd : YVO₄ composite crystal interior x = a/2,y = b/2 by different pump powers

由图 7 可以得出,若泵浦功率为 15 W 时,YVO₄-Nd : YVO₄ 复合晶体内最大温升为 243.4 °C。泵浦功率分别为 20 W、25 W、30 W 时,复合晶体内最大温升分别为 324.5 °C、405.6 °C、486.8 °C。

(2)不同泵浦光斑下 YVO₄-Nd : YVO₄ 复合晶体内部温升。

在激光二极管端面泵浦情形下,激光晶体对

泵浦光的吸收局限在一个很小的体积内,要获得高效率基模输出的必要条件是实现泵浦光与基模间的模匹配。

通过不同焦距平凸透镜的组合,达到控制泵浦光斑的目的。图 8 给出了不同泵浦光斑下 $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 复合晶体内部温升分布图。

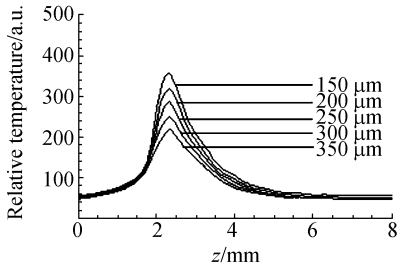


图 8 不同泵浦光斑下 $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 复合晶体轴线上温度分布图

Fig. 8 Temperature distribution along the axis of $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ composite crystal under different pump spot radius

由图 8 可以得出,若泵浦功率为 20 W,泵浦光斑分别为 $150\ \mu\text{m}$ 、 $200\ \mu\text{m}$ 、 $250\ \mu\text{m}$ 、 $300\ \mu\text{m}$ 、 $350\ \mu\text{m}$ 时, $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 复合晶体内部最大温升分别为 $373.9\ ^\circ\text{C}$ 、 $342.5\ ^\circ\text{C}$ 、 $287.2\ ^\circ\text{C}$ 、 $257.9\ ^\circ\text{C}$ 、 $214.6\ ^\circ\text{C}$ 。

(3) YVO_4 晶体具有不同长度时 $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 复合晶体内部温升

在与图 3 相同泵浦条件下,图 9 给出了 YVO_4 晶体具有不同长度下温升分布图。

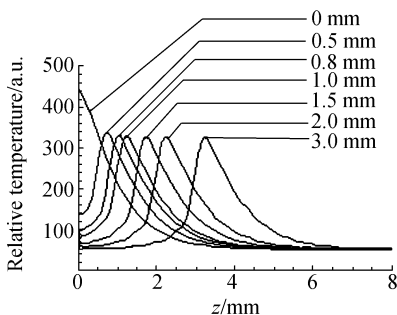


图 9 YVO_4 晶体不同长度下 $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 复合晶体轴线上温度分布图

Fig. 9 Temperature distribution along the axis of $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ composite crystal under different lengths of YVO_4 crystal

图 9 可以得出,当 YVO_4 晶体长度为 0.5

mm 、 $0.8\ \text{mm}$ 、 $1.0\ \text{mm}$ 、 $1.5\ \text{mm}$ 、 $2.0\ \text{mm}$ 、 $3.0\ \text{mm}$ 时, $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 复合晶体内部最大温升基本相同,只是在 YVO_4 晶体端面处的温升值发生变化。

3.2 LD 端面泵浦 $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 复合晶体热形变场分析

激光晶体由于非均匀温升引起的热形变是产生热透镜效应主要因素之一。图 10 给出了当泵浦功率为 20 W,泵浦光斑为 $200\ \mu\text{m}$,复合晶体 $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 的三维热形变场图。

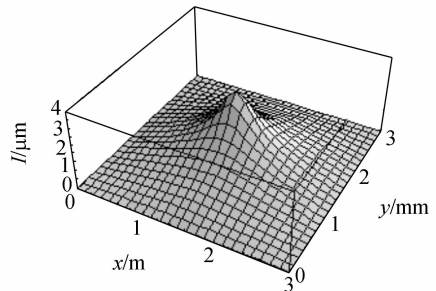


图 10 $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 复合晶体热形变场三维分布图

Fig. 10 Three-dimensional thermal distortion distribution of $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ composite crystal

经计算得到泵浦端面的最大热形变量为 $3.61\ \mu\text{m}$ 。若在相同泵浦条件下, $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 泵浦端面最大热形变量也为 $3.61\ \mu\text{m}$ 。

4 结 论

分析了激光二极管端面泵浦下 $\text{YVO}_4\text{-Nd}:\text{YVO}_4$ 复合晶体内部温度场和热形变场的分布情况。研究表明:使用输出功率为 20 W 的激光二极管端面泵浦复合晶体(其中复合晶体 YVO_4 晶体长为 $2\ \text{mm}$, $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体长为 $6\ \text{mm}$,钕离子掺杂为 0.5% 原子数分数),若泵浦光斑为 $0.2\ \text{mm}$ 时,复合晶体内部最大温升为 $324.5\ ^\circ\text{C}$,泵浦端面具有 $3.61\ \mu\text{m}$ 的最大热形变。在相同泵浦条件下,以复合晶体替代 $\text{Nd}:\text{YVO}_4$ 晶体,最大温升可降低 23.4% 。复合晶体热效应的研究为激光二极管端面泵浦全固态激光器的优化设计提供了理论指导作用。

参考文献:

- [1] 毕勇,孙志培,李瑞宁,等. 高平均功率腔内和频蓝光 Nd:YAG 激光器[J]. 光学精密工程,2005,13(1):16-21.
BI Y, SUN Z P, LI R N, *et al.* High power blue Nd:YAG laser by intracavity summing frequency[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005,13(1):16-21. (in Chinese)
- [2] CHEN Y F, LAN Y P, WANG S C. Efficient high-power diode-end-pumped TEM₀₀ Nd:YVO₄ laser with a planar cavity[J]. *Opt. Lett.*, 2000, 25 (14): 1016-1018.
- [3] HE J L, HOU W, ZHANG H L, *et al.* Continuous-wave output of 5.5 W at 532 nm by intracavity frequency doubling of a Nd:YVO₄ laser[J]. *Chin Phys Lett.*, 1998, 15(6): 418-419.
- [4] LIU J H, WANG C Q, LU J H, *et al.* Diode-laser-array single-end-pumped 5 W Nd:YVO₄/KTP continuous wave solid-state green laser[J]. *Chin Phys Lett.*, 1999, 16(7):508-509.
- [5] 吕彦飞,檀慧明,钱龙生. 全固态 589 nm 复合腔连续波和频激光器[J]. 光学精密工程,2005,13(3):260-264.
LU Y F, TAN H M, QIAN L S. All-solid-state continuous-wave doubly resonant all intra cavity sum-frequency laser at 589 nm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005,13(3):260-264. (in Chinese)
- [6] BAI J T, CHEN G F, Continuous wave diode laser end pumped Nd:YVO₄/KTP high power solid-state green laser[J]. *Optic and Laser Technology*, 2002,34(4):333-336.
- [7] INNOCENZI M E, YURA H T, FRUCHER C L, *et al.* Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid state laser[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1990, 56 (19):1831-1833.
- [8] COUSINS A K. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1992, 28(4):1057-1069.
- [9] PENG X Y, ASUNDI A, CHEN Y H, *et al.* Study of the mechanical properties of Nd:YVO₄ crystal by use of laser interferometry and finite-element analysis[J]. *Appl. Opt.*, 2001, 40(9):1396-1402.
- [10] 李健,何京良,侯玮,等. Nd³⁺ 掺杂浓度对大功率全固态 Nd:YVO₄ 激光器输出特性影响的研究[J]. 中国激光, 2000, 27(4): 298-302.
LI J, HE J L, HOU W, *et al.* Influence of the Nd³⁺-doped concentration on the output performance of a high-power all-solid-state Nd:YVO₄ laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2000, 27(4): 298-302. (in Chinese)
- [11] MACDONALD M P, GRAF T, BALMER J E. Reducing thermal lensing in diode-pumped laser rods[J]. *Opt Commun*, 2000, 178(4-6):383-393.
- [12] 李志刚,熊政军,黄维玲,等. 高功率激光二极管端面抽运复合晶体激光器的研究[J]. 中国激光,2005, 32(3): 297-300.
LI Z G, XIONG Z J, HUANG W L, *et al.* Study of high power laser diode end-pumped composite crystal lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(3): 297-300.
- [13] LAPORTA P, BRUSSARD M. Design criteria for size optimization in diode-pumped solid-state lasers[J]. *IEEE J Quant Electron*, 1991, 27(10): 2319-2326.
- [14] 史彭,李隆,甘安生,等. 端面泵浦矩形截面 Nd:GdVO₄ 晶体热效应研究[J]. 中国激光, 2005, 32(7):923-928.
SHI P, LI L, GAN A S, *et al.* Thermal effect research of end-pumped rectangle Nd:GdVO₄ crystals[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(7):923-928. (in Chinese)

作者简介:李 隆(1972—),男,河南正阳人,博士,西安建筑科技大学副教授,研究方向为大功率全固态激光器及非线性光学技术。E-mail:lilong7211@126.com.