

文章编号: 0258-7025(2009)08-1923-05

激光二极管侧面抽运平板 Nd : LuVO₄ 晶体热效应

李金平^{1,2} 史 彭² 范 婷¹ 高 峰³

¹石河子大学师范学院生态物理重点实验室, 新疆 石河子 832003
²西安建筑科技大学理学院, 陕西 西安 710055
³中国电子科技集团第三十九研究所, 陕西 西安 710065

摘要 在解析热分析理论的基础上,建立了平板 Nd : LuVO₄ 激光晶体在激光二极管阵列侧面抽运时的导热微分方程。通过对方程的求解,得到了 Nd : LuVO₄ 晶体内部温度场解析式,热形变场分布、温度场和热形变场的数值模拟表明,当抽运光功率为 40 W, 抽运区域为 1 mm×4 mm 时,晶体在 x 方向的最大相对温升为 11.63 K, y 和 z 方向的最大温升为 11.00 K; 在 x, y, z 三方向上的热形变量分别为 0.050 μm , 0.034 μm 和 0.48 μm 。这一结果可为 Nd : LuVO₄ 激光器设计提供理论支持。

关键词 激光器; Nd : LuVO₄ 晶体; 温度场; 热形变场

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20093608.1923

Thermal Effect in Nd : LuVO₄ Crystal Slab by Laser Diode Side-Pumped

Li Jinping^{1,2} Shi Peng² Fan Ting¹ Gao Feng³

¹Key Laboratory of Ecophysics & Department of Physics, Normal College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China
²College of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China
³China Electronics Technology Group Corporation No. 39th Research Institute, Xi'an, Shaanxi 710065, China

Abstract Based on the theory of thermal analysis, heat conduction equation of Nd : LuVO₄ crystal slab side-pumped by diode laser arrays is built. By solving the heat conduction equation, the analytic expression of temperature field and thermal deformation distribution is obtained. When geometry of pumping diodes corresponds to 1 mm×4 mm, and the power is about 40 W, temperature and heat deformation field of numerical simulation results show that the maximum temperature rise of 11.63 K along x , and 11.00 K along y and z direction, respectively, and total thermal deformations are 0.050 μm , 0.034 μm and 0.48 μm along x, y and z direction, respectively. This work will supply the theory for design of Nd : LuVO₄ laser.

Key words lasers; Nd : LuVO₄ crystal; temperature field; thermal deformation field

1 引 言

半导体抽运全固态激光器(DPSSL)^[1~3]的转换效率高、光束质量好、工作稳定可靠、体积小、质量轻、寿命长、工作介质覆盖的波段广及运转方式多样等优点,在激光打标、精细加工、材料处理等方面得

到蓬勃的发展。目前全固态的半导体激光器已经逐步开始取代气体、液体及传统固体激光器。这类器件已经成为当前固体激光技术中最具活力的研究领域。但是由于光热现象,即使在适当的冷却条件下,抽运光工作时也会有相当一部分的抽运能量转变为

收稿日期: 2008-09-24; 收到修改稿日期: 2008-10-17

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(06JK251)和陕西省科技厅工业攻关项目(2008K05-15)资助课题。

作者简介: 李金平(1976—),男,讲师,主要从事固体激光器及其应用的研究。E-mail: lj_p_tea@shzu.edu.cn

热量而非均匀地耗散在激光晶体内,导致热透镜、热致双折射等热效应^[4, 5]。这些效应会严重地影响器件的输出性能,因而对 DPSSL 热效应的分析和模拟可为合理的抽运几何设计提供理论依据。

Nd : LuVO₄ 晶体吸收横截面和发射横截面比其他钒酸盐晶体要大,损伤阈值高,是激光二极管抽运全固态激光器的优良激光晶体材料^[6, 7]。基于激光晶体传热理论,对平板状的 Nd : LuVO₄ 晶体建立了符合该晶体实际参数的热分析模型。通过对模型的分析计算,得到了晶体温度场的解析解。在此基础上对晶体热形变进行了计算。通过对模型的数值分析得到了 x, y 和 z 方向的温升及热形变,这一结果可为 Nd : LuVO₄ 激光器设计提供依据。

2 平板 Nd : LuVO₄ 激光晶体热模型

对于平板状几何体的 Nd : LuVO₄ 晶体,在笛卡尔坐标下可建立三维热传导微分方程。选取合适的边界条件可获得导热微分方程的唯一解析解。边界条件取决于平板状几何体及其冷却条件。如图 1 所示, l, w 和 t 分别表示该晶体的长度、宽度和厚度。坐标系原点选取在晶体几何中心位置。抽运光是从前侧面(yz 面)沿着 z 方向抽运。晶体的上下表面($y = \pm t/2$)为冷却面,与水冷热沉充分接触,可认为温度保持恒定。由于晶体其他面相对冷却面体积很小,因此可假定为绝热面且晶体中的热量都是由光抽运产生的,再无其他热源。表 1 给出了后续计算中将要用到的 Nd : LuVO₄ 晶体的光学和热参数。

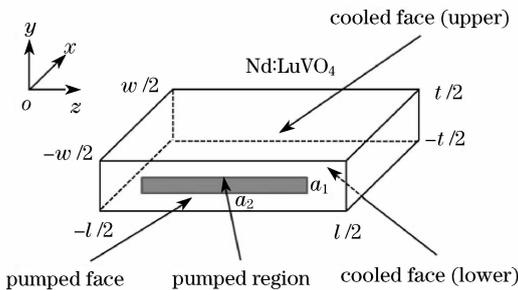


图 1 平板 Nd : LuVO₄ 晶体结构图

Fig. 1 Schematic views of Nd : LuVO₄ slab geometry

2.1 平板 Nd : LuVO₄ 激光晶体热传导方程及边界条件

光抽运区域为图 1 中的 $a_1 \times a_2$ 。假定抽运光均匀分布,设分布函数为 $P(x, y)$ 。当光致生热和热传导冷却达到动态平衡时,在晶体中将产生一个稳定的温度场。考虑由于晶体荧光量子效应和内损耗

表 1 Nd : LuVO₄ 晶体几何尺寸和物理参数
Table 1 Geometrical and physical properties of Nd : LuVO₄ crystal

Geometrical properties ^[8]	
Width	$w = 3 \text{ mm}$
Thickness	$t = 3 \text{ mm}$
Longness	$l = 8 \text{ mm}$
Physical properties ^[8, 9]	
Thermal expansion coefficients	$\xi_x = 1.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ $\xi_y = 1.7 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ $\xi_z = 9.1 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Thermal conductivity	$K_a = 7.882 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$ $K_c = 9.629 \text{ W / (m} \cdot \text{K)}$
Absorption coefficient (808 nm)	$\alpha = 7.2 \text{ cm}^{-1}$

决定的光热转化系数 η 和晶体吸收系数 α , 导热微分方程和边界条件分别为^[10]

$$-K\Delta T(x, y, z) = \alpha\eta P(x, y)e^{-\alpha(x+w/2)}, \quad (1)$$

$$\Delta T(x, y, z) = \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2},$$

$$\begin{cases} \frac{\partial T(\pm w/2, y, z)}{\partial x} = 0, \\ T(x, \pm t/2, z) = T_0, (T_0 = 0), \\ \frac{\partial T(x, y, \pm l/2)}{\partial z} = 0. \end{cases} \quad (2)$$

式中 K 为晶体的热传导率. $\eta = 1 - \lambda_i/\lambda_o$, λ_i (808 nm) 是抽运光波长, λ_o (1064 nm) 是谐振腔内激光波长, 则 η 的数值为 0.24. T_0 为冷却系统相对温度, 设 $T_0 = 0$ 。对于 Nd : LuVO₄ 晶体, 忽略各向异性, 看作各向同性处理。参数 K, α 和 w 的具体数值见表 1 所示。

2.2 热传导微分方程的解和参数

在直角坐标系下求解热传导微分方程, 其通解为

$$\begin{aligned} \Delta T(x, y, z) = & \sum_{m, n} \left[A_{mn} e^{\alpha_{mn} x} + B_{mn} e^{-\alpha_{mn} x} - \right. \\ & \left. \frac{\eta \alpha}{K} \cdot \frac{u_{mn} e^{-\alpha(x+w/2)}}{\alpha^2 - \alpha_{mn}^2} \right] \cos(\beta_m y) \cos(\gamma_n z) + \\ & \sum_{m, n} \left[C_{mn} e^{\alpha'_{mn} x} + D_{mn} e^{-\alpha'_{mn} x} - \right. \\ & \left. \frac{\eta \alpha}{K} \cdot \frac{v_{mn} e^{-\alpha(x+w/2)}}{\alpha^2 - \alpha_{mn}^{\prime 2}} \right] \cos(\beta_m y) \sin(\gamma'_n z). \quad (3) \end{aligned}$$

由边界条件确定通解(3)中的系数分别为

$$\alpha_{mn} = \pi \sqrt{\left(\frac{2m+1}{t}\right)^2 + \left(\frac{2n}{l}\right)^2},$$

$$\alpha'_{mn} = \pi \sqrt{\left(\frac{2m+1}{t}\right)^2 + \left(\frac{2n+1}{l}\right)^2},$$

$$\beta_m = \frac{2m+1}{t}\pi,$$

$$\gamma_m = \frac{2n}{t}\pi,$$

$$\gamma'_m = \frac{2n+1}{t}\pi,$$

$$u_{mm} = \frac{P_o}{U_{mm}} \text{sinc}\left(\frac{\beta_m a_1}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{\gamma_n a_2}{2}\right) \cos(\gamma z_1),$$

$$v_{mm} = \frac{P_o}{V_{mm}} \text{sinc}\left(\frac{\beta_m a_1}{2}\right) \text{sinc}\left(\frac{\gamma'_n a_2}{2}\right) \cos(\gamma' z_1),$$

$$U_{mm} = \frac{tl}{4} [1 + \text{sinc}(\beta_m t)] [1 + \text{sinc}(\gamma_n l)],$$

$$V_{mm} = \frac{tl}{4} [1 + \text{sinc}(\beta_m t)] [1 - \text{sinc}(\gamma'_n l)],$$

$$A_{mm} = \frac{\alpha^2 \eta u_{mm}}{K \alpha_{mm}} \cdot \frac{e^{\omega(\alpha_{mm}/2-a)} (e^{\omega \alpha_{mm}} - e^{\omega a})}{(1 - e^{2\omega \alpha_{mm}}) (\alpha_{mm}^2 - \alpha^2)},$$

$$B_{mm} = \frac{\alpha^2 \eta u_{mm}}{K \alpha_{mm}} \cdot \frac{e^{\omega(\alpha_{mm}/2-a)} [1 - e^{\omega(\alpha + \alpha_{mm})}]}{(1 - e^{2\omega \alpha_{mm}}) (\alpha_{mm}^2 - \alpha^2)},$$

$$C_{mm} = \frac{\alpha^2 \eta v_{mm}}{K \alpha'_{mm}} \cdot \frac{e^{\omega(\alpha'_{mm}/2-a)} (e^{\omega \alpha'_{mm}} - e^{\omega a})}{(1 - e^{2\omega \alpha'_{mm}}) (\alpha'^2_{mm} - \alpha^2)},$$

$$D_{mm} = \frac{\alpha^2 \eta v_{mm}}{K \alpha'_{mm}} \cdot \frac{e^{\omega(\alpha'_{mm}/2-a)} [1 - e^{\omega(\alpha + \alpha'_{mm})}]}{(1 - e^{2\omega \alpha'_{mm}}) (\alpha'^2_{mm} - \alpha^2)}. \quad (4)$$

3 平板 Nd : LuVO₄ 激光晶体内部温度场的数值模拟

平板型 Nd : LuVO₄ 激光晶体的尺寸分别为 $w=3 \text{ mm}$, $t=3 \text{ mm}$, $l=8 \text{ mm}$ 。抽运光是由激光二极管阵列所产生, 其均匀地抽运在图 1 中的 $x=w/2$ 面上, 抽运区域尺寸为 $a_1=1 \text{ mm}$, $a_2=4 \text{ mm}$, 抽运功率为 $P=40 \text{ W}$ 。其他参数见表 1。在第二部分所建立的 Nd : LuVO₄ 激光晶体热模型基础上, 对 Nd : LuVO₄ 激光器稳定工作时的温度场进行数值模拟, 一维温度场分布如图 2(a)~(c) 所示, 二维温度场分布如图 3(a)~(c) 所示。

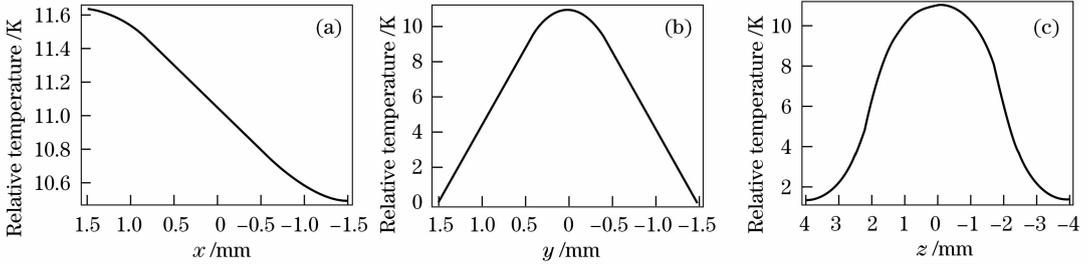


图 2 一维温度场分布图。(a) $T(x, 0, 0)$; (b) $T(0, y, 0)$; (c) $T(0, 0, z)$

Fig. 2 One-dimensional temperature distributions. (a) $T(x, 0, 0)$; (b) $T(0, y, 0)$; (c) $T(0, 0, z)$

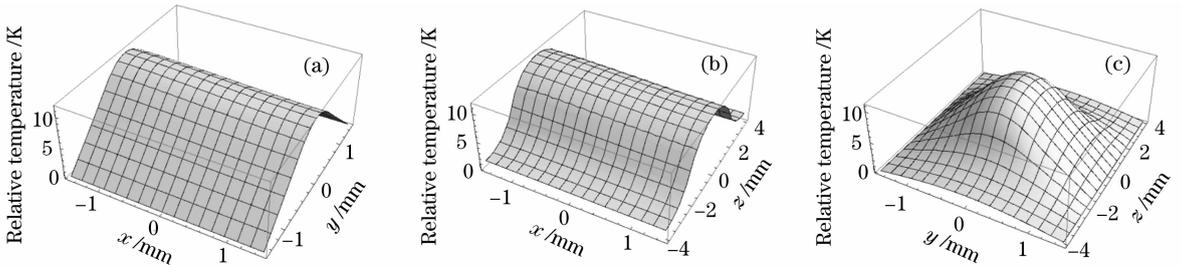


图 3 二维温度场分布图。(a) $T(x, y, 0)$; (b) $T(x, 0, z)$; (c) $T(0, y, z)$

Fig. 3 Two-dimensional temperature distributions. (a) $T(x, y, 0)$; (b) $T(x, 0, z)$; (c) $T(0, y, z)$

3.1 平板 Nd : LuVO₄ 激光晶体一维温度场分析

图 2(a) 为激光晶体沿 x 方向的温度分布, 由温度分布曲线可以看出沿着 x 方向的温差很小; 减小抽运光束区域, 沿着此方向的温差也较小, 只是 x 方向最高温升会显著提高; 抽运光是从 $x=1.5 \text{ mm}$ 平面处进行抽运的, 在平均功率为 $P=40 \text{ W}$ 的抽运光作用下, 此处温升最大, 为 11.63 K 左右; 沿着 $x=1.5 \text{ mm}$ 至 $x=-1.5 \text{ mm}$ 处, 温度分布呈现很小的指

数衰减。在 $x=-1.5 \text{ mm}$ 处, 温升为 10.50 K ; 根据 x 方向的温度场分布状态及很小的温差, 可以看出此方向的热透镜效应将不会显著呈现。

图 2(b) 为激光晶体沿 y 方向的温度分布, 根据图中的温度分布曲线可以看出此方向的温差为 10 K , 比 x 方向的温差显著增大; 在 $P=40 \text{ W}$ 的抽运光抽运下, 此方向的温升最高达到 11 K ; 从 $y=1.5 \text{ mm}$ 处至 $y=-1.5 \text{ mm}$ 处, 温度分布呈现三角

形形式。由于 $y=1.5\text{ mm}$ 和 $y=-1.5\text{ mm}$ 所在平面为上下冷却面,由模型计算得到的温度也为 0 K ,这在实际完全吻合,由此也检验了模型的正确性。根据 y 方向的温度分布状态,可以看出在该方向将会出现热透镜效应。

图 2(c)为激光晶体沿 z 方向的温度分布曲线,曲线呈现近似高斯分布;在 $P=40\text{ W}$ 的抽运光抽运下,此方向的最高温升和温差与 y 方向一致。分别为 11 K 和 10 K ,在此方向也将会出现热透镜效应。

3.2 平板 Nd : LuVO₄ 激光晶体二维温度场分析

图 2 给出了平板 Nd : LuVO₄ 激光晶体稳定工作时在 x, y, z 三个变量中只有一个变化时的温度场分布,而图 3 则给出了平面的温度场分布。

图 3(a), (b)分别为 $xy(z=0)$ 和 $xz(y=0)$ 面处的温度场分布。由图可以看出在 $xy(z=0)$ 和 $xz(y=0)$ 面上,晶体的温度场分布类似于倒鼻型,前面部分低,后面部分高。在 $P=40\text{ W}$ 的抽运光抽运下,这两个面上最高的温升均为 12 K 左右,分别在 $(x=1.5\text{ mm}, y=0)$ 和 $(x=1.5\text{ mm}, z=0)$ 处。这样的温度场分布形状,体现了在 $y=0$ 和 $z=0$ 两侧有着对称的温度梯度分布,因此在这两侧的激光热效应,如热透镜效应、热膨胀效应等也将对称分布。

图 3(c)为 $yz(x=0)$ 面上的温度场分布,图中的温度场分布形状类似于中间鼓起的波包。在 $P=40\text{ W}$ 的抽运光抽运下,此面处最高的温升比 xy

($z=0$)和 $xz(y=0)$ 面处略低,为 11 K 左右。

4 Nd : LuVO₄ 晶体热形变

由于非均匀的温度场将导致晶体在各温度点发生不同的热形变,这种热形变会严重影响输出激光的品质。

设 dL_x, dL_y, dL_z 分别为 x, y, z 方向的热膨胀量,则

$$dL_x = \zeta_x T(x, y, z) dx, \quad (5)$$

$$dL_y = \zeta_y T(x, y, z) dy, \quad (6)$$

$$dL_z = \zeta_z T(x, y, z) dz, \quad (7)$$

式中 $\zeta_x, \zeta_y, \zeta_z$ 分别为 Nd : LuVO₄ 激光晶体在不同方向的热膨胀系数。将温度场(3)式代入(5), (6), (7)式并积分得到激光晶体在各个方向总的热膨胀量为

$$L_x(y, z) = \int_{-w/2}^{w/2} dL_x = \zeta_x \int_{-w/2}^{w/2} T(x, y, z) dx, \quad (8)$$

$$L_y(x, z) = \int_{-t/2}^{t/2} dL_y = \zeta_y \int_{-t/2}^{t/2} T(x, y, z) dy, \quad (9)$$

$$L_z(x, y) = \int_{-l/2}^{l/2} dL_z = \zeta_z \int_{-l/2}^{l/2} T(x, y, z) dz. \quad (10)$$

4.1 平板 Nd : LuVO₄ 激光晶体热形变数值模拟

根据平板 Nd : LuVO₄ 激光晶体在 x, y, z 方向的热膨胀量计算公式(8), (9), (10),将相关参数代入并进行模拟得到图 4(a)~(c)。

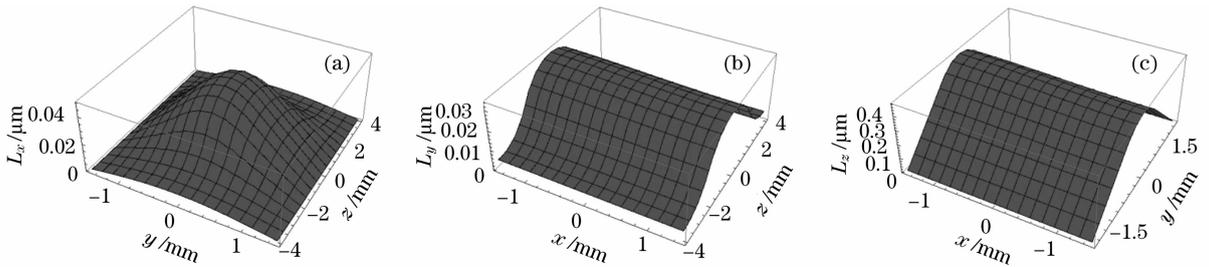


图 4 热形变场分布图。(a) $L_x(y, z)$; (b) $L_y(x, z)$; (c) $L_z(x, y)$

Fig. 4 Thermal distortion field distributions. (a) $L_x(y, z)$; (b) $L_y(x, z)$; (c) $L_z(x, y)$

图 4(a)为晶体在 x 方向的热膨胀量 $L_x(y, z)$,最大形变量为 $0.05\text{ }\mu\text{m}$ ($y=z=0\text{ mm}$), $L_x(y, z)$ 随 y, z 变化的分布类似于波包。由此可见平板 Nd : LuVO₄ 激光晶体在 x 方向的热膨胀量在不同位置形变也不相同,在 $y=0$ 和 $z=0$ 两侧对称分布。

图 4(b)为晶体在 y 方向的热膨胀量 $L_y(x, z)$,最大形变量为 $0.034\text{ }\mu\text{m}$ ($x=1.5\text{ mm}, z=0\text{ mm}$)。 $L_y(x, z)$ 随 x, z 变化的分布为高斯面型。这样的分布体现了 y 方向的热膨胀量在 $z=0$ 两侧对称,但从 $x=1.5\text{ mm}$ 至 $x=-1.5\text{ mm}$ 则略微减小。

图 4(c)为晶体在 z 方向的热膨胀量 $L_z(x, y)$,最大形变量为 $0.48\text{ }\mu\text{m}$ ($x=1.5\text{ mm}, z=0\text{ mm}$), z 方向的热膨胀量的变化趋势和 y 方向基本相同,但是分布曲面为三角面。此外三个方向的热形变大小为 $L_z > L_x > L_y$ 。

5 Nd : YVO₄, Nd : GdVO₄ 和 Nd : LuVO₄ 晶体热效应比较

掺钕(Nd^{3+})离子的晶体中除 Nd : LuVO₄ 外, Nd : YVO₄ 和 Nd : GdVO₄ 也是目前研究最成熟

的激光材料。林强等^[11]计算了抽运功率为 2 W, 抽运光束半径为 100 μm 的方形 Nd: YVO₄ 晶体热效应, 得到了 45 K 的温升和 0.21 μm (x 轴) 及 0.28 μm (y 轴) 的最大形变量; 邵杰等^[12]计算了抽运功率为 110 W 的平板 Nd: YVO₄ 晶体温度场, 得到了 366.4 K 的温升。孙尧等^[13]计算了抽运功率为 12 W, 抽运光束半径为 320 μm 的平板 Nd: GdVO₄ 晶体热效应, 得到了近 200 K 的温升和 0.855 μm 的形变; 张帅一等^[14]计算了抽运功率为 10 W, 抽运光束半径为 320 μm 的平板 Nd: GdVO₄ 晶体温度场, 得到了近 250 K 的温升。通过以上分析, 可以看出不论是最高温升或热形变, Nd: LuVO₄ 晶体均优于 Nd: YVO₄ 和 Nd: GdVO₄。

6 结 论

在建立了平板 Nd: LuVO₄ 激光晶体温度分布模型的基础上, 得到了晶体内部温度场分布的解析式。通过对得到的温度场解析式数值模拟, 分析了不同方向的温度场分布。其中 x 方向最高温升为 11.63 K, y , z 方向的最高温升为 11.00 K。对温度梯度所引起的晶体热膨胀量也进行了计算, x 方向热膨胀量为 0.05 μm, y 方向的热膨胀量为 0.034 μm, z 方向的热膨胀量为 0.48 μm。通过和 Nd: YVO₄ 及 Nd: GdVO₄ 晶体的热效应比较, 看出 Nd: LuVO₄ 是一款优良的激光晶体。

参 考 文 献

- 1 R. N. Hall, G. E. Fenner, J. O. Kingsley *et al.*. Coherent light emission from GaAs junctions[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1962, **9**(9): 366~368
- 2 W. Koechner. Solid-State Laser Engineering[M]. New York: Springer-Verlag Press, 1976. 28~34
- 3 Lü Baida. Solid-State Lasers[M]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunication Press, 2002. 201~240
吕百达. 固体激光器件[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2002. 201~240

- 4 Shi Peng, Li Long, Gan Ansheng *et al.*. Thermal effect research of end-pumped rectangle Nd: GdVO₄ crystals[J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(7): 923~927
史 彭, 李 隆, 甘安生等. 端面抽运矩形截面 Nd: GdVO₄ 晶体热效应研究[J]. 中国激光, 2005, **32**(7): 923~927
- 5 Shi Peng, Li Long, Gan Ansheng. Thermal analysis of rectangular Nd: YVO₄ crystal by laser diode side-pumped[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 176~180
史 彭, 李 隆, 甘安生. 激光二极管侧抽运长方形 Nd: YVO₄ 激光晶体热分析[J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 176~180
- 6 Xu Fanghua, Wang Zhengping, Zhang Huaijin *et al.*. Study on the properties of LD-pumped Nd: LuVO₄ microchip laser[J]. *Acta Physica Sinica*, 2007, **56**(7): 3950~3954
徐方华, 王正平, 张怀金等. LD 抽运 Nd: LuVO₄ 微片激光器性能研究[J]. 物理学报, 2007, **56**(7): 3950~3954
- 7 Jia Chuanlei, Wang Xuelin, Wang Keming *et al.*. Characterization of optical waveguide in Nd: LuVO₄ crystals by triple-energy oxygen ion implantation[J]. *Physica B*, 2008, **403**: 679~683
- 8 F. Q. Liu, H. R. Xia, S. D. Pan *et al.*. Passively Q-switched Nd: LuVO₄ laser using Cr⁴⁺: YAG as saturable absorber[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007, **39**: 1449~1453
- 9 Zhao Shouren, Zhang Huaijin, Lu Yingbo *et al.*. Spectroscopic characterization and laser performance of Nd: LuVO₄ single crystal[J]. *Optical Materials*, 2006, **28**: 950~955
- 10 Patrice Hello, Eric Durand, K. Peter *et al.*. Thermal effects in Nd: YAG slabs[J]. *J. Modern Optics*, 1994, **41**(7): 1371~1390
- 11 Li Qiang, Wang Xiantao, Zhu Jianqiang. Balance of asymmetry of thermal beam distortion in laser diode end-pumped Nd: YVO₄ solid state lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(10): 1371~1374
林 强, 王宪涛, 朱健强. 激光二极管端面抽运 Nd: YVO₄ 固体激光器热致光束畸变非对称的平衡[J]. 中国激光, 2007, **34**(10): 1371~1374
- 12 Shao Jie, Li Xiaoli, Feng Yutong *et al.*. LD-end-pumped Nd: YVO₄ slab laser and its thermal effects[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 497~501
邵 杰, 李小莉, 冯宇彤等. 激光二极管端面抽运 Nd: YVO₄ 板条激光器及其热效应[J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 497~501
- 13 Sun Yao, Li Tao, Yu Guolei *et al.*. Characteristics of laser diode end-pumped laser crystal on thermal effect and second harmonic generation[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3): 359~363
孙 尧, 李 涛, 于果蕾等. 激光二极管端面抽运 Nd: GdVO₄ 晶体热效应分析及倍频研究[J]. 中国激光, 2007, **34**(3): 359~363
- 14 Zhang Shuaiyi, Huang Chunxia, Yu Guolei *et al.*. Thermal effect of laser crystal by laser diode end-pumped[J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(3): 333~337
张帅一, 黄春霞, 于果蕾等. 激光二极管端面抽运激光晶体的热效应[J]. 中国激光, 2008, **35**(3): 333~337