

文章编号: 0258-7025(2010)02-0339-06

# 激光二极管双侧面抽运平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体热效应

范 婷<sup>1</sup> 高 峰<sup>3</sup> 史 彭<sup>2</sup> 曹海宾<sup>1</sup> 李金平<sup>1,2\*</sup>

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

**摘要** 以解析热分析理论为基础,建立了平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体在激光二极管阵列双侧抽运时的导热微分方程。通过方程求解,得到平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体内部温度场分布的解析式和热形变分布。温度场和热形变场的数值模拟表明,当抽运光平均功率为 10 W,抽运区域为 1 mm×1 mm 时,4 组激光二极管阵列光源在 3 处不同位置的一维温度场、二维温度场分布和热形变量有很大差异;3 处抽运光源位置所产生的温度分布和热形变量对比,得到了抽运光源在位置 1,2 处所产生的温升和热形变量相对较小,位置 3 处最大。

**关键词** 激光器;平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体;温度场;热形变场

**中图分类号** TN 248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103702.0339

## Thermal Effect in Nd:GdVO<sub>4</sub> Crystal Slab by Laser Diode Double-Side Pumped

Fan Ting<sup>1</sup> Gao Feng<sup>3</sup> Shi Peng<sup>2</sup> Cao Haibin<sup>1</sup> Li Jinping<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Ecophysics and Department of Physics, Normal College, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China

<sup>2</sup> College of Science, Xian University of Architecture and Technology, Xi'an, Shaanxi 710055, China

<sup>3</sup> China Electronics Technology Group Corporation No.39th Research Institute, Xian, Shaanxi 710065, China

**Abstract** Based on the theory of thermal analysis, heat conduction equation of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal slab double-side pumped by laser diode arrays was built. By solving the heat conduction equation, the analytic expression of temperature field and thermal deformation distribution were obtained. As geometry of pumping diodes corresponds to 1 mm×1 mm, and the average power is about 10 W, the distribution of one-dimensional temperature field, two-dimensional temperature field and thermal deformation have great difference when four groups of laser diode arrays were in there different locations; contrasting with the temperature distribution and thermal deformation produces by pump source in three positions, the temperature rise and thermal deformation in the location 1 and 2 are relatively small, while those of the location 3 are biggest.

**Key words** lasers; Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal slab; temperature field; thermal deformation field

## 1 引 言

随着固体微片激光器的发展<sup>[1]</sup>,由于掺入激活离子的钽酸盐晶体具有优良的荧光和激光性质,对钽酸盐晶体的研究受到越来越多的各国科学工作者的关注。作为钽酸盐晶体之一的 Nd:GdVO<sub>4</sub>,在参数上和

Nd:YAG,Nd:YVO<sub>4</sub>等晶体相比,有着显著的优点:如输出激光具有更大的发射截面,对抽运光的高吸收系数、宽吸收带宽和依赖性小,高的激光阈值和良好的导热性能等<sup>[2~5]</sup>。这些优点将使 Nd:GdVO<sub>4</sub> 成为全固态激光器的首选激光晶体材料。

收稿日期: 2009-03-02; 收到修改稿日期: 2009-04-03

基金项目: 陕西省教育厅专项科研项目(06JK251)资助课题。

作者简介: 范 婷(1978—),女,讲师,主要从事固体激光器及其应用方面的研究。E-mail: ft\_tea@shzu.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: ljp\_tea@shzu.edu.cn

在全固态激光器光抽运过程中,由于量子缺陷效应、淬灭机制和基质材料对抽运光子的吸收等原因而引起热效应是影响激光器运转及输出激光质量的重要因素之一<sup>[6~9]</sup>。虽然 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体具有良好的热导率,但是以其作为激光介质的激光器也无法避免热效应的影响。因此对 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的热效应分析及数值模拟可为合理的抽运几何设计及热效应消除提供依据。本文基于激光晶体传热理论,对平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体建立了符合实际参数的热分析模型,通过模型分析计算得到了晶体内部的温度场分布,并对由温度梯度引起的热透镜焦距等进行了数值模拟。

## 2 平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体热模型

如图 1 所示,  $w$ ,  $t$  和  $l$  分别表示 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体沿  $x$ ,  $y$  和  $z$  方向的几何尺寸。坐标系原点选取在晶体几何中心位置。晶体  $y = \pm t/2$  和  $z = \pm l/2$  表面与水冷热沉充分接触,设其温度为  $T_0$ ,且  $T_0$  为常数,4 组激光二极管阵列(标号为 1,2,3,4)从晶体上下表面( $z = \pm l/2$ )进行抽运,其输出功率均为  $P_0$ ,光斑大小为  $a_1 \times a_2$ ,光斑中心坐标分别为  $(x_1, 0, l/2)$ ,  $(x_2, 0, l/2)$ ,  $(x_3, 0, -l/2)$ ,  $(x_4, 0, -l/2)$ 。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,再无其他热源。表 1,表 2 给出了后续计算中将要用到的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的几何<sup>[10]</sup>和物理参数<sup>[11~13]</sup>。

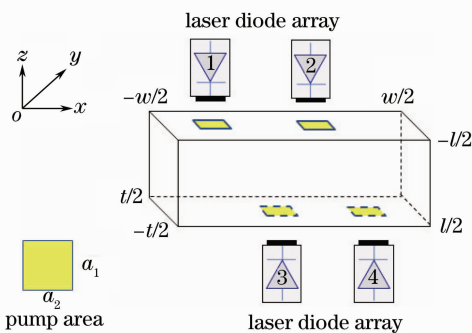


图 1 平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体结构图

Fig. 1 Schematic views of Nd:GdVO<sub>4</sub> slab geometry

表 1 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体几何尺寸

Table 1 Geometrical properties of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal

Geometrical properties	Value
Width $w$ /mm	5
Thickness $t$ /mm	3.5
Length $l$ /mm	3

表 2 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体物理参数

Table 2 Physical properties of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal

Physical properties	Value	
Thermal expansion coefficients	$\zeta_x / (10^{-6} \text{K}^{-1})$	1.5
	$\zeta_y / (10^{-6} \text{K}^{-1})$	1.5
	$\zeta_z / (10^{-6} \text{K}^{-1})$	7.3
Thermal conductivity	$K_a / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	9.63
	$K_c / [\text{W} / (\text{m} \cdot \text{K})]$	11.7
Absorption coefficient (808 nm, 1.2 at%)	$\alpha / \text{cm}^{-1}$	78

### 2.1 平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体热传导方程及边界条件

设 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体上下表面抽运光分布函数分别为  $P_U(x, y)$  和  $P_D(x, y)$ 。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决定的光热转化系数  $\eta$  和晶体吸收系数  $\alpha$ , 导热微分方程<sup>[14]</sup>和边界条件分别为

$$-K\Delta T = \eta\alpha \{P_U(x, y)\exp[-\alpha(z + l/2)] + P_D(x, y)\exp[-\alpha(-z + l/2)]\}, \quad (1)$$

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

式中  $K$  为晶体的热导率。热转化系数  $\eta = 1 - \lambda_i / \lambda_o = 0.24$ ,  $\lambda_i$  (808 nm) 是抽运光波长,  $\lambda_o$  (1064 nm) 是谐振腔内激光波长,  $T_0$  为冷却系统相对温度, 设  $T_0 = 0$ 。K 和  $\alpha$  等参数的具体数值见表 2。

### 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

$$T(x, y, z) = \cos(\alpha_m x) \cos(\beta_n y) \sum_{m,n} \times \left\{ A_{mn} \exp(\gamma_{mn} z) + B_{mn} \exp(-\gamma_{mn} z) - \frac{\eta\alpha}{K} \frac{u_{mn}^{(U)} \exp[-\alpha(z + l/2)] + u_{mn}^{(D)} \exp[-\alpha(-z + l/2)]}{\alpha^2 - \gamma_{mn}^2} \right\} + \sin(\alpha'_m x) \cos(\beta_n y) \times \sum_{m,n} \left\{ A_{mn} C_{mn} \exp(\gamma'_{mn} z) + D_{mn} \exp(-\gamma'_{mn} z) - \frac{\eta\alpha}{K} \frac{v_{mn}^{(U)} \exp[-\alpha(z + l/2)] + v_{mn}^{(D)} \exp[-\alpha(-z + l/2)]}{\alpha^2 - \gamma'^2_{mn}} \right\}. \quad (3)$$

由边界条件确定通解(3)式中的系数分别为

$$\alpha_m = 2m\pi/w, \quad (4a)$$

$$\alpha'_m = (2m+1)\pi/w, \quad (4b)$$

$$\beta_n = (2n+1)\pi/t, \quad (4c)$$

$$\gamma_{nm} = \pi \left[ \left( \frac{2m}{w} \right)^2 + \left( \frac{2n+1}{t} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (4d)$$

$$\gamma'_{nm} = \pi \left[ \left( \frac{2m+1}{w} \right)^2 + \left( \frac{2n+1}{t} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (4e)$$

$$A_{nm} = \frac{\eta\alpha \exp(-al + \gamma_{nm}l/2)}{K(\alpha^2 - \gamma_{nm}^2)} \times \frac{u_{nm}^{(U)} [\exp(al) - \exp(\gamma_{nm}l)] + u_{nm}^{(D)} \{1 - \exp[(\alpha + \gamma_{nm})l]\}}{1 - \exp(2\gamma_{nm}l)}, \quad (5a)$$

$$B_{nm} = \frac{\eta\alpha \exp(-al + \gamma_{nm}l/2)}{K(\alpha^2 - \gamma_{nm}^2)} \times \frac{u_{nm}^{(U)} \{1 - \exp[(\alpha + \gamma_{nm})l]\} + u_{nm}^{(D)} [\exp(al) - \exp(\gamma_{nm}l)]}{1 - \exp(2\gamma_{nm}l)}, \quad (5b)$$

$$C_{nm} = \frac{\eta\alpha \exp(-al + \gamma'_{nm}l/2)}{K(\alpha^2 - \gamma'^2_{nm})} \times \frac{v_{nm}^{(U)} [\exp(al) - \exp(\gamma'_{nm}l)] + v_{nm}^{(D)} \{1 - \exp[(\alpha + \gamma'_{nm})l]\}}{1 - \exp(2\gamma'_{nm}l)}, \quad (5c)$$

$$D_{nm} = \frac{\eta\alpha \exp(-al + \gamma'_{nm}l/2)}{K(\alpha^2 - \gamma'^2_{nm})} \times \frac{v_{nm}^{(U)} \{1 - \exp[(\alpha + \gamma'_{nm})l]\} + v_{nm}^{(D)} [\exp(al) - \exp(\gamma'_{nm}l)]}{1 - \exp(2\gamma'_{nm}l)}. \quad (5d)$$

$$u_{nm}^{(U)} = u_{nm}^{(1)} + u_{nm}^{(2)}, \quad (6a)$$

$$v_{nm}^{(U)} = v_{nm}^{(1)} + v_{nm}^{(2)}, \quad (6b)$$

$$u_{nm}^{(D)} = u_{nm}^{(3)} + u_{nm}^{(4)}, \quad (6c)$$

$$v_{nm}^{(D)} = v_{nm}^{(3)} + v_{nm}^{(4)}. \quad (6d)$$

$$u_{nm}^{(i)} = \frac{4\sin(a_2\alpha_m/2)\sin(a_1\beta_n/2)}{U_{nm}\alpha_m\beta_n} \cos(x_i\alpha_m), \quad (7a)$$

$$v_{nm}^{(i)} = \frac{4\sin(a_2\alpha'_m/2)\sin(a_1\beta_n/2)}{V_{nm}\alpha'_m\beta_n} \sin(x_i\alpha'_m), \quad (7b)$$

(7)式中的  $i = 1, 2, 3, 4$ 。  $U_{nm}$  和  $V_{nm}$  为

$$U_{nm} = \frac{P_0 a_1 a_2}{4} [1 + \text{sinc}(\alpha_m a_2)] [1 + \text{sinc}(\beta_n a_1)], \quad (8a)$$

$$V_{nm} = \frac{P_0 a_1 a_2}{4} [1 - \text{sinc}(\alpha'_m a_2)] [1 + \text{sinc}(\beta_n a_1)]. \quad (8b)$$

### 2.3 平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体的热形变

2.2 节已经得到了在激光二极管双侧抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体时晶体内的温度场,此温度场是具有梯度的非均匀温度场,这将导致晶体在各温度点发生不同的热形变,这种热形变不仅会严重影响输出激光的品质,甚至造成晶体开裂。

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

$$\begin{cases} dL_x = \zeta_x T(x, y, z) dx, \\ dL_y = \zeta_y T(x, y, z) dy, \\ dL_z = \zeta_z T(x, y, z) dz. \end{cases} \quad (9)$$

式中  $\zeta_x, \zeta_y, \zeta_z$  分别为 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体在不同方向的热膨胀系数。将温度场(3)式代入(9)式并积分得到激光晶体在各个方向总的热膨胀量为

## 3 平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体热模型的数值模拟

### 3.1 平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体温场

根据所得到的平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体温场,选取抽运光功率  $P_0 = 10$  W,抽运区域尺寸为  $a_1 = a_2 = 1$  mm,其他参数见表 1 和表 2,得到晶体的一维温度场和二维温度场分布如图 2 和图 3 所示。

图 2 中曲线 A 对应激光二极管位置 1,其抽运光斑中心沿  $x$  方向坐标为  $x_1 = -1.875$  mm,  $x_2 = 0.625$  mm,  $x_3 = -0.625$  mm,  $x_4 = 1.875$  mm;图 2 中曲线 B 对应激光二极管位置 2,其抽运光斑中心沿  $x$  方向坐标为  $x_1 = -1.75$  mm,  $x_2 = 0.075$  mm,  $x_3 = -0.075$  mm,  $x_4 = 1.75$  mm;图 2 中曲线 C 对应激光二极管位置 3,其抽运光斑中心沿  $x$  方向坐标为  $x_1 = -1.25$  mm,  $x_2 = 1.25$  mm,  $x_3 = -1.25$  mm,  $x_4 = 1.25$  mm。

图 3 中(a1),(b1)及(c1)对应激光二极管位置 1,(a2),(b2)及(c2)对应激光二极管位置 2,(a3),(b3)及(c3)对应激光二极管位置 3。

$$\begin{cases} L_x(y, z) = \zeta_x \int_{-w/2}^{w/2} T(x, y, z) dx, \\ L_y(x, z) = \zeta_y \int_{-t/2}^{t/2} T(x, y, z) dy, \\ L_z(x, y) = \zeta_z \int_{-l/2}^{l/2} T(x, y, z) dz. \end{cases} \quad (10)$$

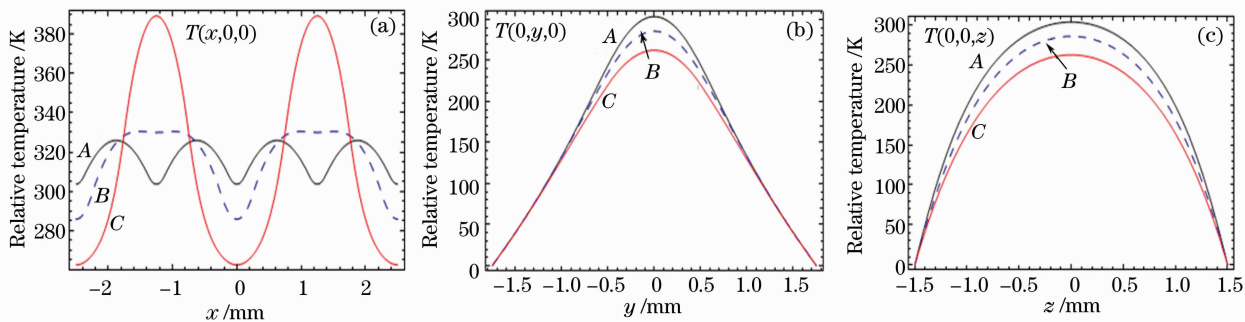


图 2 一维温度场分布图

Fig. 2 One-dimensional temperature distributions

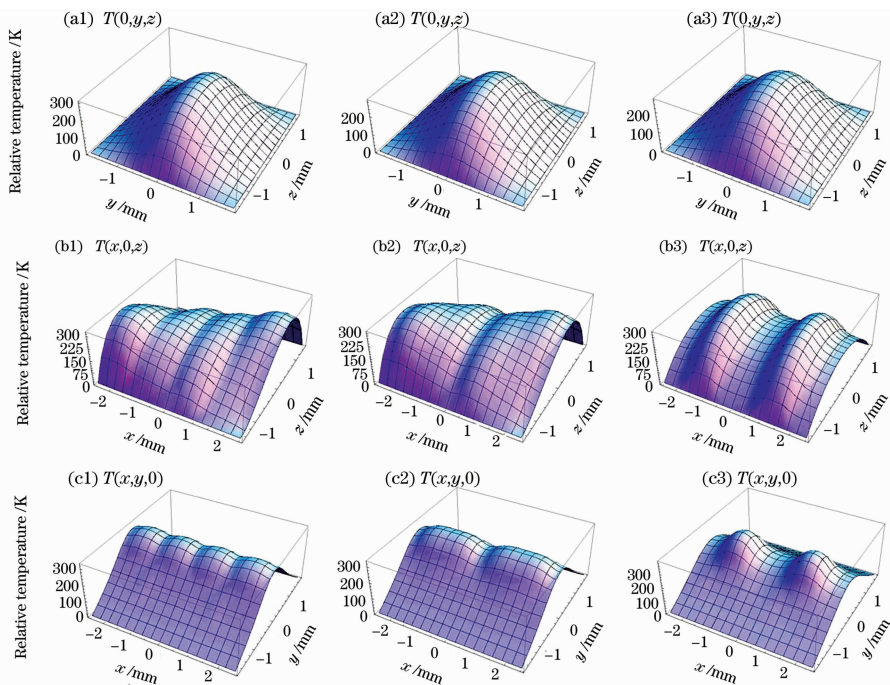


图 3 二维温度场分布图

Fig. 3 Two-dimensional temperature distributions

### 3.2 平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体热形变量

根据(3)式和(10)式,计算得到了激光二极管在不同位置抽运时平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体沿  $x, y, z$  3 个方向的热形变量如表 3 所示。

表 3 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体热形变量

Table 3 Thermal deformation of Nd:GdVO<sub>4</sub>

LD's position	Direction	Thermal deformation / $\mu\text{m}$
1	$x$	2.37661
	$y$	1.62838
	$z$	5.28764
2	$x$	2.37661
	$y$	1.43470
	$z$	5.35095
3	$x$	2.37661
	$y$	0.88105
	$z$	6.52540

## 4 平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体热模型分析

### 4.1 平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体一维温度场分析

图 2(a)为激光晶体沿  $x$  方向温度场分布,由温度分布曲线可以看出抽运光源在不同位置所形成的温度分布差异很大,抽运激光二极管阵列分别在位置 1, 2 和 3 处时,沿着  $x$  方向最高温升分别为 325.910 K, 330.465 K 和 389.258 K。3 处抽运位置温度分布也各不相同,位置 1 处温度分布类似正弦线形,位置 2 处温度分布在激光晶体中心两侧集中且相对温升增加,位置 3 处温度在激光晶体中心两侧达到最大,和位置 1, 2 处相比相对温升分别高出 63 K 和 58 K 左右。

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抽运光源在不同位置所形成的温度分布差异较小, 抽运激光二极管阵列分别在位置 1, 2 和 3 处时, 沿着  $y$  方向的最高温升分别为 303.621 K, 285.810 K 和 262.562 K。3 处抽运位置温度分布均呈现三角形分布形式。

图 2(c) 为激光晶体沿  $z$  方向的温度分布曲线, 抽运光源在不同位置处温度分布均呈现近似高斯分布; 抽运激光二极管阵列分别在位置 1, 2 和 3 处时, 最高温升分别和  $y$  方向相同。

#### 4.2 平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体二维温度场分析

一维温度场的分析给出了平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体稳定工作时在  $x, y, z$  3 个变量中只有一个变化时的温度场分布, 而图 3 则给出了抽运激光二极管分别在位置 1, 2 和 3 处时平面温度场分布。

图 3(a) 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。抽运激光二极管阵列分别在位置 1, 2 和 3 处时, 此面处最高的温升分别为 303.621 K, 285.810 K 和 262.562 K。

图 3(b), (c) 分别为  $xz(y=0)$  和  $xy(z=0)$  面处的温度场分布, 由图可以看出在  $xz(y=0)$  和  $xy(z=0)$  面上, 抽运激光二极管阵列分别在位置 1, 2 和 3 处时晶体的温度场分布分别类似于不同形状的平面波峰。在这两个面上最高相对温升分别为 325.910 K, 330.465 K 和 389.258 K, 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。

#### 4.3 平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体热形变分析

由表 3 计算结果看出, 抽运激光二极管阵列分别在 3 个不同位置处时  $x$  方向的热形变量均相同。 $y$  方向热形变量位置 1 和位置 2 处相差较小, 为  $0.2 \mu\text{m}$ ; 位置 3 处热形变量最大, 和位置 1, 2 处相比分别多了近  $0.75 \mu\text{m}$  和  $0.47 \mu\text{m}$ 。 $z$  方向热形变也和  $y$  方向相同, 位置 1 和位置 2 处相差不大, 为  $0.06 \mu\text{m}$ ; 位置 3 处热形变量最大, 和位置 1, 2 处相比多了近  $1.2 \mu\text{m}$ 。

通过平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光晶体温度场和热形变分析, 可以看出多个激光二激光阵列光源抽运时, 其位置不同产生的温度分布、最高温升及热形变也不同, 进而所产生的热效应也不同。因此在本文所分析的激光器中, 激光二激光阵列光源在位置 1, 2 处相对位置 3 处所产生的温度分布、最高温升及热形变要更合理。

## 5 平板 Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 的温度场及热形变量的比较

用建立的导热微分方程来比较 Nd:YAG, Nd:YVO<sub>4</sub> 与 Nd:GdVO<sub>4</sub> 3 种平板晶体的温度场及热形变量。3 种晶体选取相同的几何尺寸 ( $5 \text{ mm} \times 3.5 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ), Nd:YAG 中 Nd<sup>3+</sup> 掺杂原子数分数为 1.1%, 吸收系数为  $11 \text{ cm}^{-1}$ , 热传导系数为  $14 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 热膨胀系数为  $7.5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1[10]}$ ; Nd:YVO<sub>4</sub> 中 Nd<sup>3+</sup> 掺杂原子数分数为 1.0%, 吸收系数为  $40 \text{ cm}^{-1}$ , 热传导系数  $K_c = 5.23 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,  $K_a = 5.10 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , 热膨胀系数为  $\eta_{x,y} = 4.43 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ,  $\eta_z = 11.37 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1[10,15]}$ 。抽运激光二极管位置选取 2, 通过数值计算得到 3 种晶体温度场分布形状虽相似, 但最高温升及热形变量相差较大, 表 4 给出了最高温升和热形变量的比较。通过表 4 的比较看出, 在相同的抽运光源抽运下, Nd:YVO<sub>4</sub> 的最高温升和热形变量均远大于 Nd:YAG 和 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体, Nd:YAG 的最高温升和热形变量虽然在 3 种晶体中最小, 但是其吸收系数也是最小。因此 3 种晶体从吸收系数、抽运后温度场分布和热形变量综合比较来看, Nd:GdVO<sub>4</sub> 是优于其他两种晶体的。

表 4 3 种晶体温度场及热形变量的比较

Table 4 Compose of temperature field and thermal deformation of three crystals

Crystal	Direction	Maximum	Thermal
		temperature rise /K	deformation / $\mu\text{m}$
Nd:YAG	$x$	96.951	3.48017
	$y$	83.171	1.21453
	$z$	83.171	1.53885
Nd:YVO <sub>4</sub>	$x$	625.141	13.26060
	$y$	537.412	5.64031
	$z$	537.412	15.22620
Nd:GdVO <sub>4</sub>	$x$	330.465	2.37661
	$y$	285.810	1.43470
	$z$	285.810	5.35095

## 6 结 论

在建立了平板 Nd:GdVO<sub>4</sub> 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, 分析了激光二极管阵列光源在 3 处不同位置的一维温度场、二维温度场分布和热形变量, 通过 3 处抽运光源位置所产生的温度分布、最高温升和热形变量对比, 得到了抽运光源在位置 1, 2 处所产生的温度分布和

热形变量相对较小,位置 3 处最大。所得到的结论可为平板 Nd:GdVO<sub>4</sub>激光器的设计提供依据。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Shuxiang, Chen Yunlin, Yan Caifan *et al.*. Survey of microchip lasers [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2007, **24**(4): 401~406  
王淑香, 陈云琳, 颜彩繁 等. 微片激光器的最新研究进展[J]. 量子电子学报, 2007, **24**(4): 401~406
- 2 Qin Lianjie, Meng Xianlin, Zhang Jiguo *et al.*. Growth and defects of Nd:GdVO<sub>4</sub> single crystal [J]. *J. Crystal Growth*, 2002, **242**: 183~188
- 3 Dai Houmei, Tian Laike, Xu Bing. New laser crystal Nd:GdVO<sub>4</sub> [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(s1): 95~98  
戴厚梅, 田来科, 徐兵. 新型激光晶体 Nd:GdVO<sub>4</sub>[J]. 光子学报, 2007, **36**(s1): 95~98
- 4 Su Jing, Zhang Qingli, Yin Shaotang *et al.*. Growth and spectral properties of Nd:GdVO<sub>4</sub> laser crystal [J]. *Physica B*, 2008, **403**: 3002~3008
- 5 Mingwei Gao, Chungqing Gao, Kun Tang *et al.*. Intracavity optical parametric oscillator at 1.57- $\mu$ m wavelength pumped by passive Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(2): 127~129
- 6 Zilun Chen, Jing Hou, Zongfu Jiang. Theoretical analysis of thermal effects in fiber laser from the moment when pump is turned on to steady-state [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(3): 178~180
- 7 Shi Peng, Li Long, Gan Ansheng *et al.*. Thermal analysis of rectangular Nd:YVO<sub>4</sub> crystal by laser diode dide-pumped [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 176~180  
史彭, 李隆, 甘安生 等. 激光二极管侧抽运长方形 Nd:YVO<sub>4</sub>激光晶体热分析 [J]. 中国激光, 2007, **34**(2): 176~180
- 8 Shao Jie, Li Xiaoli, Feng Yutong *et al.*. LD-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> slab lasers 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:YVO<sub>4</sub>板条激光器及其热效应 [J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 497~501
- 9 Shi Peng, Li Jinping, Li Long *et al.*. Influence of pump light distribution on thermal effects within Nd:YAG microchip laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(5): 643~646  
史彭, 李金平, 李隆 等. 抽运光分布对 Nd:YAG 微片激光器热效应的影响 [J]. 中国激光, 2008, **35**(5): 643~646
- 10 Lei Zhifeng. The research of LD end-pumped AO Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with high repetition reate [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 1998. 39  
雷志锋. LD 端泵 Nd:GdVO<sub>4</sub>重频声光调 Q 激光器研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 1998. 39
- 11 Zhang Huaijin, Meng Xianlin, Zhu Li *et al.*. Growth and thermal properties of Nd:GdVO<sub>4</sub> single crystal [J]. *Materials Research Bulletin*, 1999, **34**(10/11): 1589~1593
- 12 Yin Zhao, Shen Deyuan, Ueda Kenichi. A laser-diode pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(10): 1375~1377  
尹钊, 沈德元, 植田宪一. 激光二极管抽运的 Nd:GdVO<sub>4</sub>激光器 [J]. 光学学报, 2000, **20**(10): 1375~1377
- 13 Chuanbo Gong, Changshui Chen, Bian Wu *et al.*. All solid-state passively Q-switched frequency-doubled intra-cavity Nd:GdVO<sub>4</sub>/KTP laser [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(2): 94~96
- 14 Patrice Hello, Eric Durand, Peter K. Fritschel *et al.*. Thermal effects in Nd:YAG slabs [J]. *J. Modern Optics*, 1994, **41**(7): 1371~1390
- 15 Zhao Bin, Zhao Changming, He Jianwei *et al.*. The study of active medium for solar-pumped solid-state lasers [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(10): 1797~1801  
赵彬, 赵长明, 何建伟 等. 太阳光抽运固体激光工作物质的研究 [J]. 光学学报, 2007, **27**(10): 1797~1801