

文章编号: 1001-3806(2009)06-0633-05

## 光纤耦合 LD 端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体材料热效应分析

董武威<sup>1</sup>, 李隆<sup>1,2\*</sup>, 史彭<sup>1</sup>, 甘安生<sup>1</sup>, 许启明<sup>2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 材料科学与工程学院, 西安 710055)

**摘要:** 为了研究半导体激光器端面抽运激光晶体产生的热效应问题, 采用解析分析的方法研究端面抽运激光晶体的温升以及热形变量的大小。通过激光晶体工作特点分析, 考虑到 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体热传导各向异性的特点, 采用各向异性传热的 Poisson 方程, 得出了超高斯光束端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体温度场以及热形变场的一般解析表达式。并定量分析了超高斯光束不同阶次、不同光斑尺寸抽运时对于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体温度场以及热形变场的影响。结果表明, 若半导体激光器的输出功率为 30W, 光学聚焦耦合器传输效率为 85%, 5 阶超高斯光束沿中心端面抽运掺钕离子原子数分数为 0.012 的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体, 抽运面可获得 419.3℃ 的最大温升, 并产生 0.711μm 的热形变。该结果对估算 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体热焦距变化范围以及进行热不敏谐振腔设计具有理论指导作用。

**关键词:** 激光物理; Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器; 热效应; 解析分析; 各向异性热传导

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A **doi:** 10.3969/j.issn.1001-3806.2009.06.021

## Thermal effect of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal end-pumped by fiber coupled diode laser

DONG Wu-wei<sup>1</sup>, LI Long<sup>1,2</sup>, SHI Peng<sup>1</sup>, GAN An-sheng<sup>1</sup>, XU Qi-ming<sup>2</sup>

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 2. School of Materials Science and Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In order to study the thermal effect of laser crystal end-pumped by diode lasers, the temperature rise and thermal distortion on pumped-face of the laser crystal were analytically studied. After analyzing the working characteristics of the laser crystal, taking into account of the anisotropy of heat conduction of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal, the general analytical expressions of the temperature field and thermal distortion field of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal end-pumped by super-Gaussian beam were obtained based on the Poisson equation for anisotropic heat conduction. The effect of different orders and spot size of super-Gaussian beam on the temperature field and the thermal distortion field of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal was quantitatively analyzed. The results show that the maximal temperature rise and thermal distortion on the pumped-face of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal doped with 0.012 (atomicity fraction) neodymium ion are 419.3℃ and 0.711μm respectively with the fifth-order super-Gaussian beam central-end-pumping, if the output power of diode laser is 30W, the transmission efficiency of the optical focusing coupler is 85%. The results have the theoretical instruction for estimating the thermal focus lens of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal and designing the heat insensitive resonant cavity of lasers.

**Key words:** laser physics; Nd:GdVO<sub>4</sub> laser; thermal effect; analytical; anisotropic heat conduction

### 引言

激光二极管抽运掺钕离子固态激光器以其结构紧凑、效率高、稳定好、寿命长, 并可实现红、绿、蓝、紫等多波长输出特点, 在科研、工业、医学、通信、以及军事等诸多领域有广泛的应用<sup>[1]</sup>。随着激光技术应用的深入, 人们需要发展大功率的小型台式激光器, 即使用

大功率的半导体激光器抽运固体激光器。然而, 在高功率抽运光能量辐射下除非辐射弛豫和量子亏损效应是引起激光晶体热效应的主要原因外, 浓度淬灭、能量上转换等也是引起激光晶体内部产生热量的来源<sup>[2,4]</sup>。热积聚在激光晶体内产生的热效应是影响掺钕离子激光器输出功率、光束质量的主要原因<sup>[5,6]</sup>。虽然 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体都以其良好的物理及激光特性受到人们的广泛关注, 但 Nd:GdVO<sub>4</sub> 大的发射截面 ( $7.6 \times 10^{-19} \text{ cm}^2 @ 1.06 \mu\text{m}$ )、高的吸收截面 ( $5.2 \times 10^{-19} \text{ cm}^2 @ 808 \text{ nm}$ ) 以及较高的热传导率, 更适合于大功率的半导体激光器抽运<sup>[7-10]</sup>。

激光晶体热效应的研究一直是激光器件研究的重要问题之一, 分析、解决激光晶体热透镜效应的关键基

基金项目: 陕西省工业攻关资助项目(2008K05-15); 陕西省教育厅专项科研资助项目(07JK284)

作者简介: 董武威(1983-), 男, 硕士研究生, 主要从事全固态激光技术研究。

\* 通讯联系人。E-mail: lilong7211@126.com

收稿日期: 2008-09-19; 收到修改稿日期: 2008-10-08

础工作是激光晶体内部温度场和热形变场的准确计算。Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体与 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体同属于各向热传导异性晶体材料,即热量在激光晶体内沿着不同方向热传导率不同<sup>[11]</sup>。在以往的研究中,将其视为热传导各向同性<sup>[12-13]</sup>,并采用了“激光晶体内热流线沿径向的假设”<sup>[14-16]</sup>,研究结果必然与激光晶体实际温场有着较大的差异。本文中采用各向异性传热 Poisson 方程,同时考虑到光纤耦合半导体激光器输出光束具有超高斯分布的特点,通过端面抽运、周边恒温激光晶体热模型边界条件分析,得出在超高斯光抽运下 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体温度场分布以及抽运端面热形变场的解析表达式。同时分析了超高斯光束不同阶次、不同光斑尺寸对于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体端面温升以及热形变量的影响。研究将对把握 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体热透镜焦距变化规律,合理进行 Nd:GdVO<sub>4</sub> 激光器热不敏腔参量设计具有理论指导意义。

## 1 超高斯光束端面抽运激光晶体温度场和热形变场的解析分析

### 1.1 光纤耦合半导体激光器输出光束超高斯描述

半导体激光器包容多个激光巴条,单个巴条辐射的抽运光经微透镜阵列准直、整形后耦合进入到一根光纤中。将多根光纤捆扎成束形成尾纤出射,输出激光为多模,并有一定的发散锥度,因此,光纤耦合半导体激光器的光强分布可用超高斯函数来近似<sup>[17]</sup>。耦合器由两个平凸透镜组合,为一个1级成像系统,不改变激光分布状态。调整准直聚焦耦合器的位置使抽运光正入射到晶体端面中心位置,激光晶体端面抽运结构简图如图1所示。

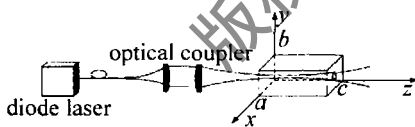


Fig. 1 Thermal model schematic diagram of laser crystal end-pumped by fiber coupled diode laser

具有超高斯分布的抽运光平行  $z$  轴入射到激光晶体抽运端面 ( $z=0$  面) 中心的光强分布表达式为<sup>[18]</sup>:

$$I(x, y, 0) = I_0 \exp \left[ -2 \left( \frac{r^2}{w_0^2} \right)^k \right] \quad (1)$$

式中,  $I_0$  为抽运光在晶体抽运面的功率密度;  $r$  为抽运光斑半径,  $r = \sqrt{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2}$ , 而  $a, b$  为激光晶体抽运端面尺寸;  $w_0$  为抽运光超高斯腰斑半径;  $k$  为超高斯分布阶次, 当  $k=1$  时为抽运光呈现出理想的高斯分布状态, 当  $k$  较大时, 如  $k=5$ , 抽运光呈现为所谓“top-hat”分布状态<sup>[19]</sup>, 而当  $k = \infty$  时, 抽运光呈现

为均匀分布状态。  $k$  取不同阶次时, 抽运光超高斯光强分布如图2所示。

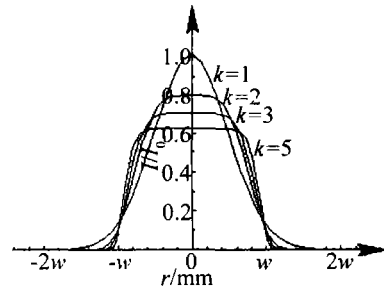


Fig. 2 Comparison of different orders of super-Gaussian distributions

用功率计测量耦合器准直聚焦的抽运光功率为  $I_p$ , 则:

$$I_p = \int_0^\infty I_0 \exp \left[ -2 \left( \frac{r^2}{w_0^2} \right)^k \right] 2\pi r dr \quad (2)$$

由此可确定  $I_0$  的值为:

$$I_0 = \frac{I_p}{2\pi \int_0^\infty \exp \left[ -2 \left( \frac{r^2}{w_0^2} \right)^k \right] r dr} \quad (3)$$

超高斯分布的抽运光进入激光晶体内的传输规律表示为<sup>[20]</sup>:

$$w_p(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{z - z_p}{z_0} \right)^2}, \quad z_0 = \frac{n_0 w_0^2 \pi}{\lambda_p} \quad (4)$$

式中,  $w_p$  为激光晶体内传播的超高斯抽运光的高斯半径;  $z_p$  为超高斯抽运光在晶体内最小腰斑位置;  $\lambda_p = 808\text{nm}$  为半导体激光器抽运光波长;  $n_0$  为激光晶体对于抽运光的折射率。激光晶体被置于超高斯抽运光束最小腰斑位置附近, 以提高激光晶体内单位体积内的抽运光功率密度。

### 1.2 激光晶体工作状态以及热分析模型边界条件

为使激光晶体内产生的热量尽快散失, 在抽运的同时一般采用循环水冷或半导体制冷模块控制激光晶体周边温度(一般为  $18^\circ\text{C} \sim 20^\circ\text{C}$ )。

由于激光晶体被放置在热沉夹块中, 并与热沉保持良好的热接触, 晶体侧面温度保持相对恒定。激光晶体内部热量主要通过热传导方式由周边散失。激光晶体两个通光端面虽与空气相接触, 但从两端面和空气热对流交换散失的热量远远小于经侧面热传导散失的热量, 因此, 可假设晶体的两通光端面近似绝热。端面抽运、周边恒温激光晶体热分析物理模型的边界条件为:

$$\begin{cases} u(0, y, z) = 0, u(a, y, z) = 0 \\ u(x, 0, z) = 0, u(x, b, z) = 0 \\ \frac{\partial u(x, y, 0)}{\partial z} = 0, \frac{\partial u(x, y, c)}{\partial z} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $c$  为激光晶体长度。

### 1.3 热传导各向异性激光晶体温度场的解析计算

由于激光晶体荧光量子效应和内损耗吸收抽运光的能量远大于其它原因晶体吸收的能量,仅考虑晶体由于荧光量子效应和内损耗吸收抽运光能量所产生的热量<sup>[21]</sup>。在  $z = z$  面晶体吸收能量产生的热功率密度为:

$$q(x, y, z) = \eta \beta I(x, y, z) \quad (6)$$

式中,  $\beta$  是激光介质对抽运光的吸收系数,  $\eta$  为由荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数:

$$\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_l \quad (7)$$

式中,  $\lambda_l = 1064\text{nm}$  为谐振腔的振荡激光波长。

当激光器稳定工作状态,即半导体激光器输出激光功率稳定,热沉温度恒定,这样在激光晶体会形成一个稳定的温度梯度场分布。由于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体是正交各向异性介质,晶体内部热传导遵守各向异性介质热传导方程(Poisson 方程):

$$\lambda_x \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial z^2} = -q(x, y, z) \quad (8)$$

式中,  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  分别为晶体在  $x, y, z$  方向上的热导率。

通过各向异性介质热传导方程的研究,得出超高斯光束端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体温度场的解析表达式:

$$u(x, y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} A_{n,m,l} \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{m\pi}{b} y \cos \frac{l\pi}{c} z \quad (9)$$

式中,  $A_{n,m,l}$  为比例系数:

$$A_{n,m,l} = \frac{8I_0\beta^2\eta}{ab\pi^2} \frac{c[1 - e^{-\beta c} \cos(l\pi)]}{(\beta^2 c^2 + l^2 \pi^2) \left( \frac{\lambda_x n^2}{a^2} + \frac{\lambda_y m^2}{b^2} + \frac{\lambda_z l^2}{c^2} \right)} \times \int_0^a \int_0^b \exp \left\{ -2 \left[ \frac{\left(x - \frac{a}{2}\right)^2 + \left(y - \frac{b}{2}\right)^2}{w_p^2} \right]^k \right\} \times \sin \frac{n\pi}{a} x \sin \frac{m\pi}{b} y dx dy \quad (10)$$

可利用计算软件,根据(9)式计算出激光晶体内部的温度场。

### 1.4 热膨胀各向异性激光晶体热形变场解析计算

当激光晶体内部形成稳定温度场后,因激光晶体受热膨胀会使得晶体发生热形变,在热沉夹块设计中留有一定框量。因激光晶体两个通光端面与空气相接触,四周虽被铝箔包裹,由于铝箔柔软,激光晶体周边可近似为无外力约束,激光晶体的热膨胀属于自由热膨胀。

设激光晶体内部一个小长方体,3 个边长分别为  $dx, dy, dz$ ,长方体原温度为 0(相对),晶体达到热平衡后的温度为  $u(x, y, z)$ ,该长方体温度变化量为  $u(x, y,$

$z)$ , 3 个方向的热形变量为:

$$\begin{cases} d\Gamma_x = \alpha_x u(x, y, z) dx \\ d\Gamma_y = \alpha_y u(x, y, z) dy \\ d\Gamma_z = \alpha_z u(x, y, z) dz \end{cases} \quad (11)$$

式中,  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$  分别为激光晶体  $x, y, z$  方向上的热膨胀系数。激光晶体在各方向上的热形变量为:

$$\begin{cases} \Gamma_x = \int_0^a d\Gamma_x = \alpha_x \int_0^a u(x, y, z) dx \\ \Gamma_y = \int_0^b d\Gamma_y = \alpha_y \int_0^b u(x, y, z) dy \\ \Gamma_z = \int_0^c d\Gamma_z = \alpha_z \int_0^c u(x, y, z) dz \end{cases} \quad (12)$$

可利用计算软件,根据(12)式可计算出激光晶体各方向上总的热形变量。

## 2 超高斯光束端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体热效应分析

### 2.1 超高斯光束端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体温度场

对于端面抽运的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体采用  $a$  轴切割,对于  $\pi$  偏振方向抽运光有着较大的吸收系数,同时可得  $\pi$  偏振的激光输出<sup>[22]</sup>。掺 Nd<sup>3+</sup> 原子数分数为 0.012 的 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体对于 808nm 波长抽运光的吸收系数为  $74\text{cm}^{-1}$ <sup>[12]</sup>。Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体为 ZrSiO<sub>4</sub> 结构的四方晶体,热导率与热膨胀系数各向异性,其热导率为  $5.23\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ( $\parallel c$ ),  $11.7\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  ( $\perp c$ ); 热膨胀系数为  $7.3 \times 10^{-6}\text{K}^{-1}$  ( $\parallel c$ ),  $1.5 \times 10^{-6}\text{K}^{-1}$  ( $\perp c$ )。

调节半导体激光器的工作输出功率为 30W,光学聚焦耦合器的传输效率为 85%,光纤耦合半导体激光器的光纤芯径为 400 $\mu\text{m}$ ,耦合器是一个 1:1 的光学成像系统。Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体尺寸为 3mm  $\times$  3mm  $\times$  5mm。利用(9)式可以得出 5 阶超高斯抽运光束端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的温度场分布,如图 3 所示。其中晶体抽运面的最大温升为 419.3 $^{\circ}\text{C}$ 。等温线分布见图 4。

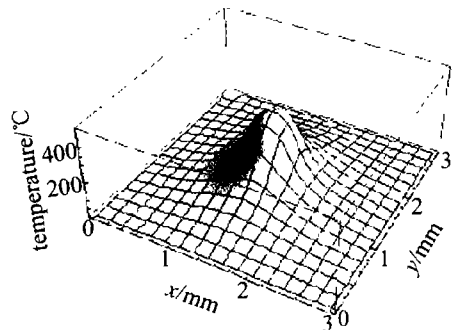


Fig. 3 Three dimensional temperature field distribution of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal end-pumped by the fifth-order super-Gaussian beam

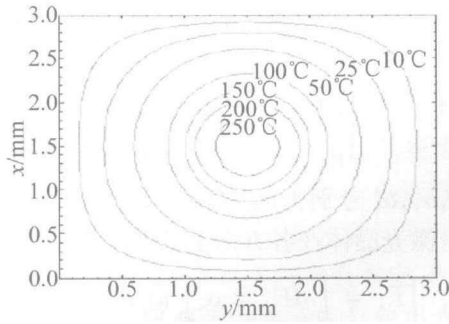


Fig. 4 Isotherm distribution diagram of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal end-pumped by the fifth-order super-Gaussian beam

若超高斯光束的阶次分别为 1, 2, 3 和 5 时, 在 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体抽运面 ( $z = 0$  面) 上中心线 ( $x = a/2$ ) 温度场分布如图 5 所示, 最高温度分别为 445.7°C,

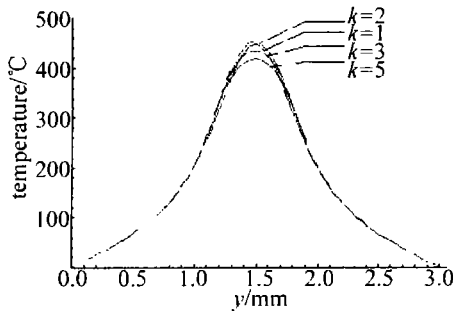


Fig. 5 Contrast diagram of temperature field distribution of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal end-pumped by different orders super-Gaussian beam

446.8°C, 443.8°C 和 419.3°C。由图得出用 2 阶超高斯光束抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体在抽运面的温升量值最大, 这是因为 2 阶高斯光束光强分布相对于理想高斯光束 ( $k=1$ ) 要相对集中一些。

抽运光束与激光晶体内谐振光束之间的模式匹配问题是影响 LD 端面抽运钕离子激光器效率的主要因素<sup>[23]</sup>。对于光学聚焦耦合器采用不同焦距的平凹透镜组和, 改变其成像比。在与图 3 相同的抽运条件下, 改变光学聚焦耦合器成像比, 图 6 中给出不同抽运光斑下 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体温度场分布图。由图可以看出,

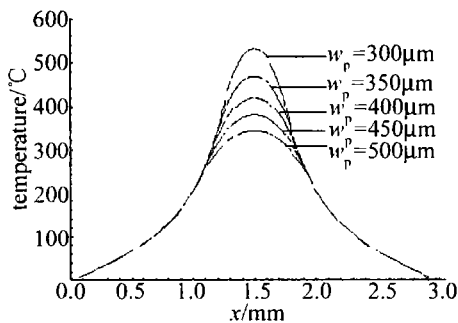


Fig. 6 Contrast diagram of temperature field distribution of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal end-pumped by super-Gaussian beam with different radii

若抽运光斑半径分别为 300µm, 350µm, 400µm, 450µm, 500µm 时, 抽运面的最高温升分别为 531.9°C, 469.5°C, 419.3°C, 378.0°C, 343.3°C。

## 2.2 超高斯光束端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体热形变场

激光晶体抽运面的非均匀温升造成的热形变不仅给腔内谐振光束带来了衍射损耗, 而且造成了波面的热畸变<sup>[24]</sup>。在与图 3 相同的抽运条件下, 利用 (12) 式可以得出 5 阶超高斯抽运光束端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体的热形变分布, 如图 7 所示。其中晶体抽运面的最大热形变为 0.711µm。

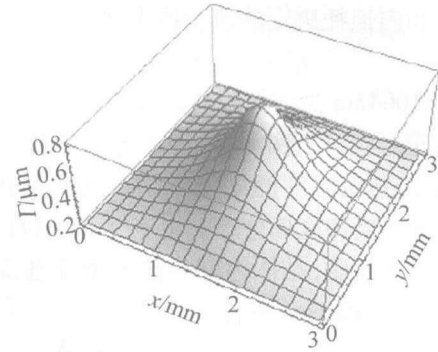


Fig. 7 Three dimensional thermal distortion field distribution of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal end-pumped by the fifth-order super-Gaussian beam

在与图 3 相同的抽运条件下, 仅改变光学聚焦耦合器成像比, 图 8 中给出不同光斑的超高斯光束抽运 ( $k=5$ ) 抽运下 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体热形变对比图。由图可以看出, 若超高斯光斑半径分别为 300µm, 350µm, 400µm, 450µm, 500µm 时, 晶体抽运面热形变量分别为 0.81µm, 0.77µm, 0.71µm, 0.67µm, 0.63µm。

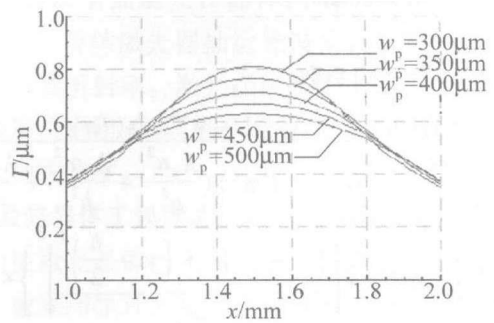


Fig. 8 Contrast diagram of thermal distortion field distribution of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal end-pumped by super-Gaussian beam with different radii

图 9 是不同阶次的超高斯光束端面抽运 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体时热形变量分布图。若超高斯光束阶

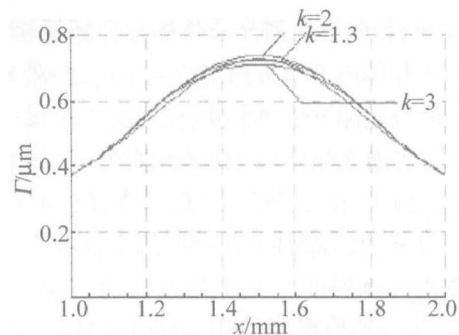


Fig. 9 Contrast diagram of thermal distortion field distribution of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal end-pumped by different orders super-Gaussian beam

次分别为 1, 2, 3 和 5 时, 晶体抽运面的最大热形变量分别为 0. 726  $\mu\text{m}$ , 0. 737  $\mu\text{m}$ , 0. 725  $\mu\text{m}$  和 0. 711  $\mu\text{m}$ 。抽运光束超高斯分布的阶次越高, 抽运光光强度的均匀性越好, 晶体的热形变量越小。

### 3 小 结

基于光纤耦合半导体激光器输出光束特点分析, 将其近似为超高斯抽运光束。考虑 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体具有各向热传导异性的特点, 采用各向传热异性的 Poisson 方程, 得出在超高斯光抽运下 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体温度场分布以及抽运端面热形变场的一般解析表达式。同时研究了超高斯光束不同阶次、不同光斑尺寸端面抽运对于 Nd:GdVO<sub>4</sub> 晶体温度场以及热形变场的影响。研究结果对估算激光晶体热透镜焦距变化规律, 优化光学谐振腔设计具有理论指导意义。

### 参 考 文 献

- [1] LÜ B D. Solid-state lasers [M]. Beijing: Beijing University of Post and Telecommunication Press, 2002: 201-204 (in Chinese).
- [2] FAN T Y. Heat generation in Nd:YAG and Nb:YAG [J]. IEEE J Q E, 1993, 29(6): 1457-1459.
- [3] CLARKSON W A. Thermal effects and their mitigation in end-pumped solid-state laser [J]. J Phys, 2001, D34(16): 2381-2395.
- [4] SABABAEIAN M, NADGARAN H, MOUSAVE H. Analytical solution of the heat equation in a longitudinally pumped cubic solid-state laser [J]. Appl Opt, 2008, 47(13): 2317-2326.
- [5] ZOU J, ZHAO Sh Zh, YANG K J, *et al.* Determining the thermal lens focus of LD end-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> solid-state laser with CCD detecting method [J]. Laser Technology, 2006, 30(4): 422-424 (in Chinese).
- [6] PFISTER C, WEBER R, WEBER H P, *et al.* Thermal beam distortion in end-pumped Nd:YAG, Nd:GSGG and Nd:YLF rods [J]. IEEE J Q E, 1994, 30(7): 1605-1615.
- [7] ZAGUMENNYĬ A I, OSTROUMOV V G, SHCHERBAKOV I A, *et al.* The Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal: a new material for diode-pumped lasers [J]. Soviet Journal of Quantum Electronics, 1992, 22(12): 1071-1072.
- [8] ZHANG H J, MENG X L, LIU J H, *et al.* Growth of lowly Nd doped GdVO<sub>4</sub> single crystal and its laser properties [J]. J Crystal Growth, 2000, 216(1/4): 367-371 (in Chinese).
- [9] WANG C Q, CHOW Y T, REEKIE L, *et al.* A comparative study of the laser performance of diode-laser-pumped Nd:GdVO<sub>4</sub> and Nd:YVO<sub>4</sub> crystals [J]. Appl Phys, 2000, B70(6): 769-772.
- [10] LI C, SONG J, SHEN D, *et al.* Diode-pumped passively Q-switched Nd:GdVO<sub>4</sub> lasers operating at 1.06  $\mu\text{m}$  wavelength [J]. Appl Phys, 2000, B70(4): 471-474.
- [11] YANG Y M, ZHOU R, GUO Zh, *et al.* Study on the end deformation of several LD end-pumped crystals [J]. Laser Technology, 2006, 30(1): 73-75 (in Chinese).
- [12] SHI P, LI L, GAN A Sh, *et al.* Thermal effect research of end-pumped rectangle Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal [J]. Chinese Journal of Laser, 2005, 32(7): 923-927 (in Chinese).
- [13] SHI P, LI L, GAN A Sh, *et al.* Research on thermal distortion of Nd:GdVO<sub>4</sub> crystal with laser diode end-pumped circular section [J]. Chinese Journal of Laser, 2006, 33(10): 1324-1328 (in Chinese).
- [14] INNOCENZI M E, YURA H T, FRUCHER C L, *et al.* Thermal modeling of continuous-wave end-pumped solid state lasers [J]. A P L, 1990, 56(19): 1831-1833.
- [15] FARRUCH U O, BUOCRISIANI A M, BYVIK C E. An analysis of the temperature distribution in finite solid-state laser rods [J]. IEEE J Q E, 1988, 24(11): 2253-2264.
- [16] COUSINS A K. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods [J]. IEEE J Q E, 1992, 28(4): 1057-1069.
- [17] NADGARAN H, SABAIAN B. Pulsed pump: thermal effects in solid state lasers under super-Gaussian pulses [J]. Paramana Journal of Physics, 2006, 67(6): 1119-1128.
- [18] XIE W J, KWON Y, HU W T, *et al.* Thermal modeling of solid state lasers with super-Gaussian pumping profiles [J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2003, 42(6): 1787-1794.
- [19] COUSINS A K. Temperature and thermal stress scaling in finite-length end-pumped laser rods [J]. IEEE J Q E, 1992, 28(4): 1057-1069.
- [20] LU Y X, YANG Y P, CHEN Sh F. Laser transmission and transform technology [M]. Chengdu: University Electronic Science and Technology of China Press, 1999: 53-86 (in Chinese).
- [21] YU J. Theoretical study on thermal beam focusing in longitudinally-pumped solid-state laser rods [J]. High Power Laser and Particle Beam, 2000, 12(1): 27-31 (in Chinese).
- [22] CZERANOWSKY C, SCHMIDT M, HEUMANN E, *et al.* Continuous wave diode pumped intracavity doubled Nd:GdVO<sub>4</sub> laser with 840mW output power at 456nm [J]. Opt Commun, 2002, 205(4/6): 361-365.
- [23] LAPORTA P, BRUSSARD M. Design criteria for size optimization in diode-pumped solid-state laser [J]. IEEE J Q E, 1991, 27(10): 2319-2326.
- [24] PFISTER C, WEBER R, WEBER H P. Thermal beam distortion in longitudinally pumped solid-state lasers [J]. IEEE J Q E, 1994, 30(7): 1605-1616.