

文章编号: 1001-3806(2009)01-0080-03

## 复合 $YVO_4$ -Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体的超高斯热效应研究

徐仰彬, 凌亚文

(西安建筑科技大学 理学院, 西安 710055)

**摘要:** 为了研究方形复合激光晶体  $YVO_4$ -Nd:YVO<sub>4</sub> 在超高斯抽运光分布下的热效应, 采用半解析的分析方法进行了理论分析和实验验证。当使用输出功率为 15W 的半导体激光器端面中心入射, 超高斯阶次为 2 时, 在抽运端面中心获得 175.4℃ 的最高温升和 1.97 $\mu$ m 的最大热形变量。结果表明, 超高斯模型有更广泛的适用性, 复合晶体可以有效地降低晶体中最高温升, 但是不能明显减少晶体端面热形变。这一结果对解决激光系统热问题是有帮助的。

**关键词:** 激光光学; 复合激光晶体; 热效应; 温度场; 热形变场; 超高斯分布

**中图分类号:** TN248.1 **文献标识码:** A

### Super-Gaussian thermal effect of $YVO_4$ -Nd:YVO<sub>4</sub> composite crystals

XU Yang-bin, LING Ya-wen

(College of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** Based on semi-analytical theory, thermal effect of rectangle  $YVO_4$ -Nd:YVO<sub>4</sub> composite crystal end-pumped by the diode laser with super-Gaussian mode was studied through academic analysis and experimental validation. When the output power of diode laser was 15W and the order of the super-Gaussian beam was 2, in the center of the pump-face of neodymium-doped  $YVO_4$ -Nd:YVO<sub>4</sub> composite crystal, the maximum temperature rise and thermal distortion got up to 175.4 $^{\circ}$ C, 1.97 $\mu$ m respectively. The results show that super-Gaussian model is widely applicable and composite crystals can reduce the top temperature but can't reduce thermal distortion obviously. The result can offer theoretical basis for efficiently resolving the thermal problems in laser systems.

**Key words:** laser optics; composite laser crystal; thermal effect; temperature field; thermal distortion field; super-Gaussian distribution

### 引言

大功率激光二极管端面抽运全固态激光器具有体积小、寿命长、抽运功率高等优点, 近年来成为人们研究的热点<sup>[1]</sup>。而其中晶体的热效应是激光器稳定运转的主要因素之一。解决热效应的关键是激光晶体内部温度场, 热形变场的准确计算<sup>[2]</sup>。

在以往激光晶体热效应的研究中, 虽有对  $YVO_4$ -Nd:YVO<sub>4</sub> 复合激光晶体的讨论, 但大都使用高斯分布进行热效应的分析, 这是一种比较理想化的光束分布模型<sup>[3]</sup>, 经研究表明, 抽运二极管图像, 用超高斯的分布图像来描述更为合理<sup>[4]</sup>。作者通过对  $YVO_4$ -Nd:YVO<sub>4</sub> 复合激光晶体工作特性的超高斯分布进行了热效应分析, 同时用解析的方法计算出了各向异性复合  $YVO_4$ -Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体温度场的分布及其抽运端面

热形变的理论分析, 并与高斯分布进行了对比分析。研究结果对于解决激光晶体的热效应、改善  $YVO_4$ -Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的性能提供理论依据。

### 1 矩形截面 $YVO_4$ -Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体内部温度场及端面热形变的计算方法

光纤耦合的 LD 发出抽运激光, 经过平凸透镜组成的光学系统或自聚焦透镜构成的耦合器后, 入射到激光晶体端面, 形成端面抽运方式, 当抽运光沿  $YVO_4$ -Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体端面几何中心方向入射时, 热模型如图 1 所示。

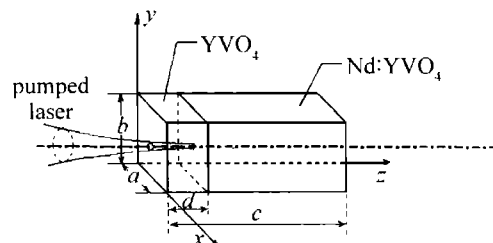


Fig. 1 Schematics of  $YVO_4$ -Nd:YVO<sub>4</sub> laser

作者简介: 徐仰彬 (1979-), 男, 讲师, 主要从事高功率激光系统热问题研究。

E-mail: xyb0929@126.com

收稿日期: 2007-10-12; 收到修改稿日期: 2008-02-26

1.1 抽运光超高斯分布假设

抽运光束最初被认为是高斯分布模型<sup>[5-6]</sup>。但在实际中,超高斯分布图像更能精确地描述抽运图像<sup>[4]</sup>,设抽运光平行z轴入射到晶体端面z=0面(x-y面),并辐射在晶体中心时,抽运光分布表达式为:

$$I(x,y,0) = I_0 \exp\left\{-2\left[\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{w^2}\right]^k\right\},$$

(超高斯分布阶次  $k = 1, 2, 3, \dots$ ) (1)

式中, $I_0$ 为抽运晶体的激光功率密度, $(x_0, y_0)$ 为晶体端面几何中心, $w$ 为抽运光的高斯半径。

1.2 内部温度场的通解表达式

由于 YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体是正交各向异性介质,

$$A_{nml} = \frac{8I_0\beta\eta\left\{\beta c\left[\cos\left(\frac{dl\pi}{c}\right) - \exp[-\beta(c-d)]\cos(l\pi)\right] - l\pi\sin\left(\frac{dl\pi}{c}\right)\right\}}{ab\pi^2(\beta^2c^2 + l^2\pi^2)\left(\frac{\lambda_x n^2}{a^2} + \frac{\lambda_y m^2}{b^2} + \frac{\lambda_z l^2}{c^2}\right)} \times \int_0^b \int_0^a \exp\left\{-2\left[\frac{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2}{w^2}\right]^k\right\} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{b}\right) dx dy$$
 (4)

式中, $a, b, c, d$ 如图1所示, $\beta$ 为吸收系数, $\eta = \frac{1-\lambda_p}{\lambda_l}$ 为荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数, $\lambda_p$ 为激光二极管发射激光波长808nm, $\lambda_l$ 为谐振腔的振荡激光波长1064nm。 $I_0 = \frac{I_{max}}{2\pi \int_0^\infty \exp[-2(r^2/w^2)^k] r dr}$ 为入射端面抽运光中心光强, $I_{max}$ 表最大光强, $r$ 表半径。

1.3 端面热形变的理论分析

当激光晶体内部形成稳定温度场后,由于激光晶体受热膨胀会使得晶体发生热形变,严重影响激光器的品质<sup>[7-8]</sup>。假设晶体后表面无热形变(晶体后部升温很低),则晶体热形变产生在晶体前表面。设晶体内部某点 $(x, y, z)$ 原温度为0,达到热平衡后的温度为 $u(x, y, z)$ ,以z方向为例,晶体热膨胀量为 $dl = \alpha_z u(x, y, z) dz$ ,式中, $\alpha_z$ 为激光晶体z向热膨胀系数。晶体沿z向上总的热膨胀量为:

$$l_z = \int_0^c dl_z = \alpha_z \int_0^c u(x, y, z) dz = \alpha_z c \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} A_{nml} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{b}\right)$$
 (5)

2 YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的温度场与抽运端面热形变分析

2.1 YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体的温度场分析

忽略温度场对晶体物理特性的影响,YVO<sub>4</sub>晶体与Nd:YVO<sub>4</sub>晶体的导热系数均为 $5.10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ( $\perp c$ ), $5.23 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ( $\parallel c$ ),沿轴向热膨胀系数

内部有热源,则晶体内部热传导遵守正交各向异性介质热传导的 Poisson 方程:

$$\lambda_x \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial y^2} + \lambda_z \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial z^2} + q_v(x, y, z) = 0$$
 (2)

式中, $q_v$ 是热源, $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$ 分别为晶体在x,y,z轴向上的导热系数。晶体内部温度场解析解为:

$$u(x, y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} A_{nml} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \times \sin\left(\frac{m\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{l\pi z}{c}\right)$$
 (3)

$11.37 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ( $\parallel c$ ), $4.43 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ ( $\perp c$ )。参考文献[9]中给出了原子数分数为0.005的Nd:YVO<sub>4</sub>晶体对抽运波长808nm的吸收系数为 $14.8 \text{ cm}^{-1}$ 。调节半导体激光器的抽运功率为15W,抽运光斑为 $400 \mu\text{m}$ ,复合晶体尺寸为 $3 \text{ mm} \times 3 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$ ,其中YVO<sub>4</sub>晶体长度为2mm,图2中给出了激光二极管端面抽运 YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体内3维温度场分布图。

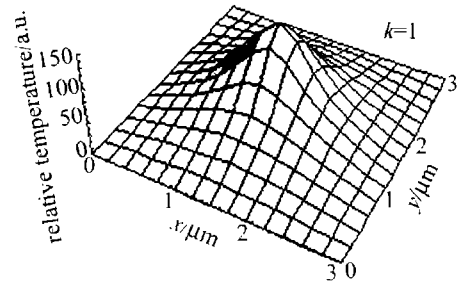


Fig. 2 3-D temperature field of LD end-pumped YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub> composite crystal

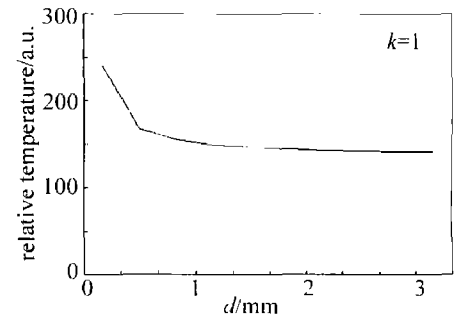


Fig. 3 Contrast diagram along the axis of YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub> composite crystal by undoped crystal length

由图3可知,YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub>复合晶体前部距离不小于1mm后晶体最高温升基本不再下降,说明晶体前部导热功能以达到了最大后不再起作用,因此,没有

必要盲目地增加复合晶体前端不掺杂部分的长度。过多增加晶体前部距离会缩短后部掺 Nd 粒子晶体长度,以至于部分抽运激光能量穿过晶体造成浪费。

由图 4 可以得出,  $\text{YVO}_4\text{-Nd:YVO}_4$  复合晶体 ( $d =$

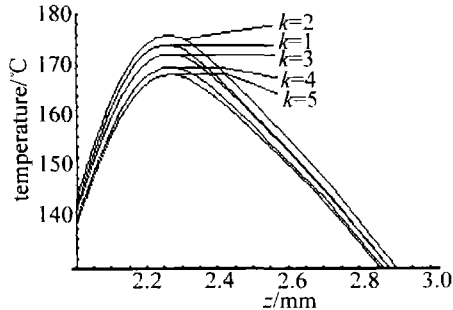


Fig. 4 Super-Gaussian temperature distribution along the axis of  $\text{YVO}_4\text{-Nd:YVO}_4$  composite crystal

2mm)使用超高斯模型建模时,温度分布轮廓大体一致,仅在最高温升的位置有所不同,当  $k=1$  时(高斯分布),最高温升为  $173.4^\circ\text{C}$ ,当  $k=2$  时,最高温升为  $175.4^\circ\text{C}$ ,由此可见,当阶次取 2 时得到的温度是最高的, $k>2$  时,最高温升有所降低,逐渐接近大礼帽分布。相同条件下  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体中最高温升为  $244.9^\circ\text{C}$ <sup>[10]</sup>,降低 28% 左右,说明复合晶体可以降低晶体中最高温升,这是由于晶体中热功率最高点从端面后移,其前部参与导热造成的。

## 2.2 $\text{YVO}_4\text{-Nd:YVO}_4$ 晶体端面热形变场分析

在同上条件下,得出  $\text{YVO}_4\text{-Nd:YVO}_4$  晶体抽运端面  $y = b/2$  线上产生的热形变分布如图 5 所示。晶体

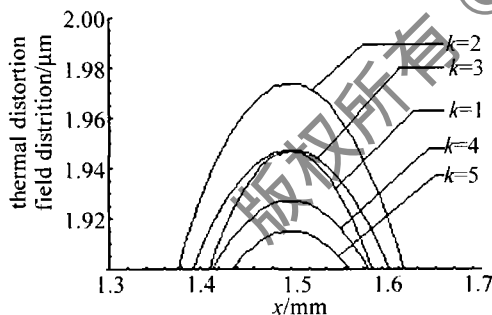


Fig. 5 Super-Gaussian thermal distortion field distribution diagram of  $\text{YVO}_4\text{-Nd:YVO}_4$  crystal pumped face ( $z=0, y=b/2$ )

抽运端面最高热形变在 ( $x = a/2, y = b/2, z = 0$ ) 处,当  $k=1$  时为  $1.95\mu\text{m}$ , $k=2$  时为  $1.97\mu\text{m}$ ,当  $k=5$  时为  $1.92\mu\text{m}$ ,PENG 等人<sup>[11]</sup>利用激光干涉法测量了在上同条件下的  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体抽运端面热形变,得出  $\text{Nd:YVO}_4$  晶体端面最大热形变为  $1.97\mu\text{m}$ ,当  $k=2$  时,计算结果与实验结果相同。PENG 等人的实验结果验证了本文中超高斯模型的正确性。

通过对比发现,高斯分布时的最高稳升和热形变

均较大,这是由于超高斯分布降低了抽运区域和非抽运区域间的温度梯度,进而减小了整个晶体的最高温升和热形变。以上计算结果表明,抽运偶合系统提供超高斯分布的能量在一定程度上有助于减小晶体的热效应。

## 3 结论

由于超高斯模型涵盖了高斯分布、均匀分布、大礼帽分布,因此有更好的通用性。在使用超高斯模型的基础上,分析了单端抽运形式下,矩形截面  $\text{YVO}_4\text{-Nd:YVO}_4$  复合激光晶体的内部温度场的解和端面热形变场的解,通过对比分析,验证了超高斯模型的正确性和更广泛的适用性,并利用他人在相同条件下的实验结果验证了理论分析的正确性。本文中所得出的结果可以应用到其它激光晶体温度场、热应变场、热形变场的定量计算分析中,为发展二极管抽运全固态激光器的稳定设计提供基础理论依据,同时也能给设计者提供一些好的建议。

### 参考文献

- [1] FAN T Y, BYER R L. Diode laser pumped solid state lasers [J]. IEEE J Q E, 1988, 24(6): 895-912.
- [2] OU Q F, FENG G Y, LIU D P, et al. Simulation and experimental study on thermal effects of Nd:YAG lasers [J]. Laser Technology, 2002, 26(1): 15-16 (in Chinese).
- [3] SHI P, LI L, GAN A Sh, et al. Semi-analytical thermal analysis of double-end-pumped Nd:YVO<sub>4</sub> crystal [J]. Laser Technology, 2004, 28(6): 616-619 (in Chinese).
- [4] XIE W J, KWON Y, HU W T, et al. Thermal modeling of solid-state lasers with super-Gaussian pumping profiles [J]. Opt Engng, 2003, 42(6): 1787.
- [5] 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.
- [6] SHI P, CHEN W, LI L, et al. Semianalytical thermal analysis of thermal focal length on Nd:YAG rods [J]. Appl Opt, 2007, 46(27): 6655.
- [7] 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.
- [8] CHEN Y F, HUANG T M, KAO C F, et al. Optimization in scaling fiber-coupled laser-coupled laser-diode end-pumped lasers to high power: influence of thermal effect [J]. IEEE J Q E, 1997, 33(8): 1424-1429.
- [9] HE J L, HOU W, ZHANG H L, et al. Continuous wave output of 5.5W at 532 nm by intracavity frequency doubling of a Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. Chinese Physics Letters, 1998, 15(6): 418-419.
- [10] SHI P, CHEN W, LI L, et al. Semianalytical thermal analysis on Nd:YVO<sub>4</sub> crystal [J]. Appl Opt, 2007, 46(19): 4046.
- [11] PENG X Y, ASUNDI A, CHEN Y H, et al. Study of the mechanics properties of Nd:YVO<sub>4</sub> crystal by use of laser interferometry and finite-element analysis [J]. Appl Opt, 2001, 40(9): 1396-1403.