

文章编号 1004-924X(2008)02-0197-05

# 激光分布对抽运 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体热效应的影响

史 彭, 陈 文, 李 隆, 甘安生

(西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055)

**摘要:**以解析各向异性分析理论为基础,研究了在矩形横截面 Nd : YVO<sub>4</sub> 激光晶体受到超高斯分布 LD 端面抽运时,激光晶体的温度场分布和抽运面热形变分布。通过分析激光晶体工作特点,考虑了激光分布和激光光束半径变化,建立了符合激光晶体工作状态的热模型。利用各向异性介质热传导方程的一种新求解方法,得出了矩形截面 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体的温度场、端面热形变场的通解表达式。研究表明:当使用输出功率为 15 W 的半导体激光器(超高斯阶次为 1)从端面中心入射 Nd : YVO<sub>4</sub> 晶体(晶体掺钕离子质量分数为 0.5%)时,在抽运端面中心获得了 243.8 °C 最高温升和 1.99 μm 最大热形变量,与实验结果一致。这种方法可以应用到其它激光晶体热问题研究中,为有效解决激光系统热问题提供了理论依据。

**关键词:**激光物理; Nd : YVO<sub>4</sub> 激光器; 热分析; 超高斯分布; 矩形截面; 各向异性

**中图分类号:** TN244 **文献标识码:** A

## Influence of laser distribution on thermal effect of Nd : YVO<sub>4</sub> crystal

SHI Peng, CHEN Wen, LI Long, GAN An-sheng

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

**Abstract:** Based on the analytical theory of anisotropy, the thermal distortion and temperature field distributions of laser crystal were investigated when Nd : YVO<sub>4</sub> crystal with rectangular section was end-pumped by a laser beam of super-Gaussian distribution from a Laser Diode(LD). By analyzing the working characteristics of the Nd : YVO<sub>4</sub> laser crystal, a thermal model accorded with the working state of the laser crystal was established considering the distribution and the radius change of laser beam. By using a kind of new solution to the thermal conduction equation of the anisotropic medium, the general solution expressions of temperature field and the thermal distortion field of Nd : YVO<sub>4</sub> crystal with rectangular section were obtained. The results show that a maximum temperature rise of 243.8 °C and a maximum thermal distortion of 1.99 μm can be obtained in the center of the pump face when the Nd : YVO<sub>4</sub> laser crystal is pumped by a LD with an output power of 15 W from the center of end face (the weight percent of neodymium ion doped in the crystal is 0.5%), which is in agreement with experimental results. Also the result shows that this method can also be applied to the research on the other thermal problems of laser crystal and can offer theoretical basis for effectively solving the

收稿日期:2007-08-27;修订日期:2007-10-12.

基金项目:陕西省教育厅专项科研资助项目(No. 06JK251)

thermal problems in laser system.

**Key words:** laser physics; Nd:YVO<sub>4</sub> laser; thermal analysis; super-Gaussian distribution; rectangular section; anisotropy

## 1 引言

LD 抽运的全固态激光器(DPSSL)以其结构紧凑、效率高、稳定性好、寿命长等优点,广泛应用于多种领域。基于 LDNd:YVO<sub>4</sub> 晶体可以建构多种激光器。激光晶体吸收 LD 抽运光能量产生荧光辐射的同时,有部分抽运光能量转变为晶体的热能。当激光器稳定工作时会在晶体内部形成相对稳定的温度梯度场分布,引起晶体端面发生热形变。激光晶体这种热效应严重地影响着 LD 抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的性能<sup>[1-2]</sup>。

分析、解决热效应问题的基础工作中的关键是激光晶体内部温度场和热形变场的准确计算。这些已有了一些研究成果,但是,已有研究成果存在一些不足,主要是:(1)抽运光分布假设为高斯分布,或均匀分布;(2)假设谐振腔内抽运光束是平行光;(3)将各向异性激光晶体按各向同性介质近似处理<sup>[3-4]</sup>。这些假设给激光晶体热分析带来较大的误差。

本文通过对具有超高斯分布 LD 端面抽运、周边恒温冷却的矩形截面 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体工作特点分析,建立了符合实际情况的热分析物理模型,利用各向异性晶体热传导方程的一种求解方法,研究各向异性矩形截面 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体在谐振腔内受到超高斯分布抽运时,晶体内部产生的温度场分布和抽运端面的热形变场。研究结果可对解决激光晶体的热效应,改善 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器的性能提供理论的依据。

## 2 超高斯分布激光抽运激光晶体内部温度场的计算方法

### 2.1 晶体热模型

当具有超高斯分布 LD 激光束抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体时,晶体吸收部分泵浦光能量产生热量。一般采用封闭冷却循环水或 TEC 半导体制冷模块控制激光晶体周边冷却温度,晶体内部热

量通过热传导方式由周边散失。当抽运光通过激光晶体中心时,热模型如图 1 所示。

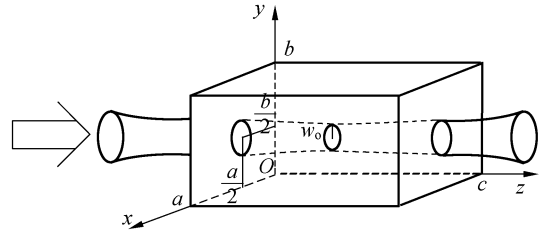


图 1 激光晶体热模型简图

Fig. 1 Laser crystal thermal model

#### 2.1.1 超高斯分布抽运光

由于高斯基模填充因子小,提取效率不高,目前一些谐振腔采用装超高斯反射镜等技术,使得输出激光束具有超高斯分布,兼顾了光束质量和提取效率<sup>[5]</sup>。具有超高斯分布函数抽运光平行  $z$  轴入射到  $z=0$  面的分布表达式为:

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

其中,  $I_0$  为抽运光中心在  $z=0$  面处的功率密度,  $w$  为光束的高斯半径,  $k$  为超高斯分布阶次。当  $k=1$  时为高斯分布;当  $k=\infty$  时为均匀分布;当  $k$  较大时(如  $k=5$ )为所谓大礼帽分布。不同高斯分布阶次光强分布如图 2 所示。

抽运到晶体  $z=0$  端面的 LD 激光功率为  $I_m$ , 则

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

确定出  $I_0$  的量值为

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

对于常用的大曲率半径谐振腔, M. Sovizi, R. Massudi 等人研究得到高斯半径的变化规律为<sup>[6]</sup>:

$$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left( \frac{z - z_p}{z_0} \right)^2}, \quad z_0 = \frac{n_0 w_0^2 \pi}{\lambda_0}, \quad (4)$$

其中,  $w_0$  为光束在  $z_p$  处的高斯半径,  $\lambda_0$  为抽运激

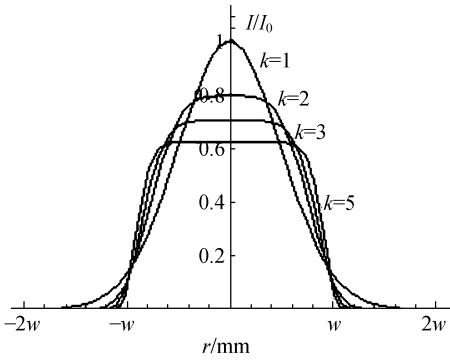


图2 不同阶次的超高斯分布对比图

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

光的波长,  $n_0$  为激光晶体的折射率。激光晶体放在谐振腔腰斑最小处,  $z_p = c/2$ 。

激光晶体对抽运光的吸收系数为  $\beta$ , 由吸收规律得到在晶体内部  $z=z$  面的光强为:

$$I(x, y, z) = I(x, y, 0) \cdot \exp(-\beta z). \quad (5)$$

### 2.1.2 激光晶体内部产生的热功率密度

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, 可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。在  $z=z$  面晶体吸收能量产生的热功率密度为:

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

其中,  $\eta$  为由荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数

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

其中,  $\lambda_p$  为半导体激光器抽运光波长 808 nm,  $\lambda_L$  为谐振腔的振荡激光波长 1 064 nm。

### 2.1.3 激光晶体的边界条件

由于晶体放置在冷却器内, 晶体侧面温度保持相对恒定, 设为  $u_w$ , 作为热模型数学处理可设其为 0(相对), 得出温度场后, 再叠加冷却环境温度  $u_w$ 。晶体两个通光端面与空气相接触, 从两端面和空气热交换流出的热量远远小于从晶体侧面通过传导流出的热量, 因此可假设晶体的两端面绝热, 热模型的边界条件为:

$$\begin{aligned} u(0, y, z) = 0; u(a, y, z) = 0, \\ u(x, 0, z) = 0; u(x, b, z) = 0, \\ u_z(x, y, 0) = 0; u_z(x, y, c) = 0. \end{aligned} \quad (8)$$

## 2.2 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体内部温度场的计算表达式

由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体是正交各向异性介质, 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方程(Poisson 方程)<sup>[7]</sup>:

$$\begin{aligned} \lambda_x \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial x^2} + \lambda_y \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial y^2} + \\ \lambda_z \frac{\partial^2 u(x, y, z)}{\partial z^2} = -q_v(x, y, z), \end{aligned} \quad (9)$$

其中,  $\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z$  分别为晶体在  $x, y, z$  方向上的导热系数或称为热导率。

Poisson 方程的解为:

$$\begin{aligned} u(x, y, z) = \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{l=0}^{\infty} A_{nml} \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \\ \sin\left(\frac{m\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{l\pi z}{c}\right), \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} A_{nml} = \frac{8I_0\beta\eta}{abc\pi^2 \left(\frac{\lambda_x n^2}{a^2} + \frac{\lambda_y m^2}{b^2} + \frac{\lambda_z l^2}{c^2}\right)} \times \int_0^b \int_0^a \int_0^c \\ \exp\left\{-2\left[\frac{(x-\frac{a}{2})^2 + (y-\frac{b}{2})^2}{w^2}\right]^k - \beta z\right\} \\ \sin\left(\frac{n\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{m\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{l\pi z}{c}\right) dx dy dz. \end{aligned} \quad (11)$$

可利用计算软件, 根据式(10)计算出激光晶体内部的温度场。

## 3 激光晶体热形变场的计算方法

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, 这种热形变会严重影响激光器的品质。

由于激光晶体两个端面无外力约束, 四周被钢箔包裹, 而钢箔很软, 所以激光晶体的四周近似无外力约束, 则激光晶体的热膨胀是自由热膨胀。

设激光晶体内部一个小长方体的三个边长分别为  $dx, dy, dz$ , 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  $(x, y, z)$ , 三个方向的热形变量为:

$$\begin{aligned} dl_x = a_x u(x, y, z) dx, \\ dl_y = a_y u(x, y, z) dy, \\ dl_z = a_z u(x, y, z) dz, \end{aligned} \quad (12)$$

其中,  $a_x, a_y, a_z$  分别为激光晶体在  $x, y, z$  方向上的热膨胀系数。晶体在各方向上总的热形变量为:

$$\begin{aligned}
 l_x &= \int_0^a dl_x = \alpha_x \int_0^a u(x, y, z) dx, \\
 l_y &= \int_0^b dl_y = \alpha_y \int_0^b u(x, y, z) dy, \\
 l_z &= \int_0^c dl_z = \alpha_z \int_0^c u(x, y, z) dz.
 \end{aligned} \quad (13)$$

可利用计算软件,根据式(13)计算出激光晶体各方向上总的热形变量。

## 4 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体的热分析

掺 Nd<sup>3+</sup> 浓度为原子数百分比 0.5% 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体导热系数为 5.23 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>(//c), 5.10 Wm<sup>-1</sup>K<sup>-1</sup>(⊥c)。热膨胀系数 11.37×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>(//c), 4.43×10<sup>-6</sup> K<sup>-1</sup>(⊥c)。晶体 c 轴方向为 x 方向。对泵浦光的吸收系数为 14.8 cm<sup>-1</sup>[8]。

### 4.1 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体内部温度场

抽运功率为 15 W(Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体输出激光功率为 5 W, Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体实际吸收抽运功率 10 W), 抽运光高斯半径  $\omega$  为 0.40 mm, 晶体尺寸为 3 mm×3 mm×5 mm。计算出超高斯分布阶次分别为 1、2、3 和 5 时晶体抽运面( $z=0$  面)上中心线( $x=a/2$ )温度场分布如图 3 所示, 最高温度分别为 243.8、247.2、242.6 和 235.4 °C。沿抽运光中心线( $x=a/2, y=b/2$ )上温度分布如图 4 所示。

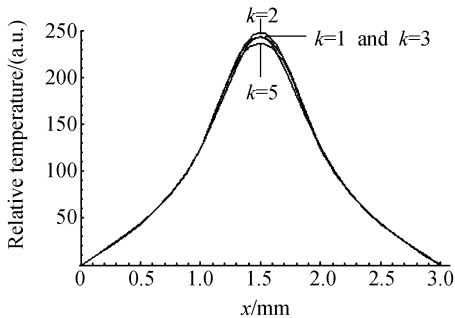


图 3 抽运面温度场分布对比图

Fig. 3 Comparison of distributions of temperature field on pump face

从图 3、4 中可以得出:(1)各种激光分布在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体内部产生的温度场仅在抽运中心附近区域略有不同,在晶体内部其它区域基本相

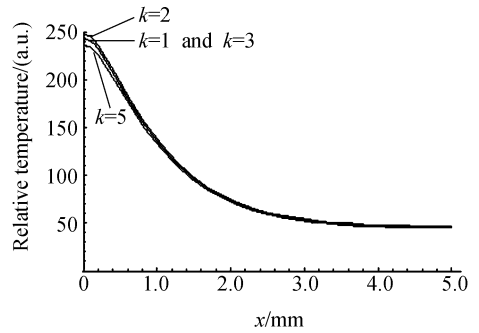


图 4 抽运光中心线温度场分布对比图

Fig. 4 Comparison of distributions of temperature field in the center of pump light

同;(2)超高斯分布阶次为 2 时产生的温度最高,除高斯分布(阶次为 1)外,阶次越高,最高温度越低,最大相差 12 °C;(3)高斯分布产生的温度场与阶次为 3 超高斯分布产生的温度场相近;(4)由于 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体热导率较大、吸收率较高,晶体前部中心温升比后部高的多。

### 4.2 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体抽运端面热形变分析

由于晶体后部温升很低,可以假设晶体后表面无热形变,晶体的温升造成晶体抽运端面热形变。在上同条件下,计算出超高斯分布阶次分别为 1、2、3 和 5 时在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体抽运面( $z=0$ ) $y=b/2$  线上产生的热形变分布如图 5 所示。最高热形变分别为 1.99、2.02、1.99 和 1.92  $\mu\text{m}$  (在  $x=a/2, y=b/2, z=0$  处)。阶次为 5 时,抽运端面三维热形变场分布如图 6 所示。

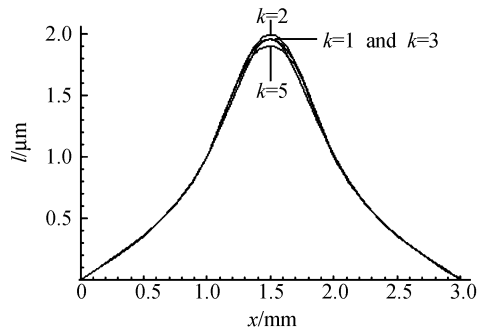


图 5 抽运面热形变分布对比图

Fig. 5 Comparison of distributions of thermal distortion on pump face

从图 5、6 中可以得出:(1)各种激光分布在 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体端面产生的形变场仅在抽运中心附近略有不同,在端面其它区域基本相同;(2)

超高斯分布阶次为 2 时,产生的形变最大,除高斯分布(阶次为 1)外,阶次越高,形变越小,最大相差  $0.10 \mu\text{m}$ ; (3)高斯分布产生的形变场与阶次为 3 时,超高斯分布产生的形变场相似。

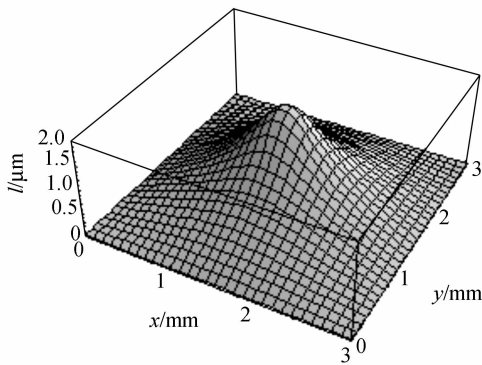


图 6 阶次为 5 时抽运面热形变场三维分布图

Fig. 6 Three-dimensional distribution of thermal distortion on pump face when the order is 5

### (3)Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体抽运端面热形变的实验验证

Xiaoyuan Peng 等人利用激光干涉法测量了

在上条件下,Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体抽运端面热形变<sup>[8]</sup>。得出 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体抽运端面最高热形变为  $1.97 \mu\text{m}$ (高斯分布),与本文计算结果一致,验证了本文理论分析的正确性。

## 5 结 论

本文分析了在超高斯激光分布端面抽运形式下,矩形截面 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光晶体的实际情况,利用各向异性介质热传导方程的一种新求解方法,并考虑到激光光束变化,得出了晶体内部温度场和晶体端面热形变场的解。当使用输出功率为 15 W 的半导体激光器(超高斯阶次为 1)端面中心入射 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体(晶体掺钕离子质量分数为 0.5%)时,在抽运端面中心获得  $243.8 \text{ }^\circ\text{C}$  最高温升和  $1.99 \mu\text{m}$  最大热形变量。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。

## 参考文献:

- [1] 毕永,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): 16-18. BI Y, SUN ZH P, LI R N, *et al.*. High power blue Nd:YAG laser by intracavity summing frequency [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2005,13(1): 16-18. (in Chinese)
- [2] 尧舜,套格套,路国光,等. 68.5 W 连续输出 1 060 nm 波长半导体激光阵列模块[J]. 光学精密工程, 2006,14(1): 8-11. YAO SH, TAO G T, LU G G, *et al.*. 1 060 nm wavelength high power diode array module[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(1): 8-11. (in Chinese)
- [3] WEN J X, KWON Y, WEN T H, *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.
- [4] SHI P, CHEN W, LI L, *et al.*. Semianalytical thermal analysis on a Nd:YVO<sub>4</sub> crystal[J]. *Applied Optics*, 2007, 46(19):4046-4061.
- [5] WANG N, LU Y T, KONG Y. Analysing the light intensity distribution of super-Gaussian mirror resonator by fast fourier-transform[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2004, 31(11):1317-1322.
- [6] SOVIZIA M, MASSUDIA R. Thermal distribution calculation in diode pumped Nd:YAG laser rod by boundary element method[J]. *Optics & Laser Technology*, 2007,39:46-52.
- [7] 李隆,史彭,刘小芳,等. YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub> 复合晶体热效应研究[J]. 光学精密工程, 2006,14(5): 786-791. LI L, SHI P, LIU X F, *et al.*. Thermal effect of YVO<sub>4</sub>-Nd:YVO<sub>4</sub> composite laser crystals[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006,14(5): 786-791. (in Chinese)
- [8] PENG X Y, ASUNDI A, CHEN Y H, *et al.*. Study of the mechanical properties of Nd:YVO<sub>4</sub> crystal by use of laser interferometry and finite-element analysis[J]. *Applied Optics*, 2001, 40(9):1396-1403.