

## 连续激光二极管端泵 Tm : YAG 晶体棒热效应

任嘉欣<sup>1</sup>, 李隆<sup>1,2</sup>, 李昕阳<sup>1</sup>, 杨恒鑫<sup>1</sup>, 纪玉潇<sup>1</sup>, 张春玲<sup>1,2</sup>

(1. 西安建筑科技大学 理学院, 陕西 西安 710055; 2. 西安建筑科技大学 应用物理研究所, 陕西 西安 710055)

**摘要:** 根据激光二极管端面泵浦激光晶体工作特点的分析, 建立了激光二极管端面泵浦 Tm : YAG 晶体棒热模型, 利用热传导理论, 用有限元分析法对晶体棒的温度场、热应力场和端面形变量进行了数值计算。分析了激光能量分布不同的激光光束(圆形高斯光斑、椭圆形高斯光斑、圆形平顶光斑、方形平顶光斑)、泵浦光斑半径、Tm<sup>3+</sup> 掺杂浓度对激光棒内部温度场分布及端面形变量的影响, 并绘制三维分布图。结果表明, 在稳定状态下, 若激光二极管泵浦功率为 30 W、泵浦光斑半径为 400 μm 时, 掺杂浓度为 3.5 at. % 的 Tm : YAG 晶体棒泵浦面的最高温升为 124.55 °C, 其泵浦面的最大应力为 246 MPa, 沿晶体 z 轴最大应力为 209 MPa, 泵浦面最大热形变量为 0.888 μm。该研究为实现 Tm : YAG 激光器的设计提供了理论指导。

**关键词:** Tm : YAG 晶体; 热效应; 热应力; 热形变; 有限元分析; 光束条件

**中图分类号:** TN248.1; O437 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.08.003

## Thermal effect of continuous laser diode end-pumped Tm : YAG crystal rod

REN Jia-xin<sup>1</sup>, LI Long<sup>1,2</sup>, LI Xin-yang<sup>1</sup>, YANG Heng-xin<sup>1</sup>, JI Yu-xiao<sup>1</sup>, ZHANG Chun-ling<sup>1,2</sup>

(1. Faculty of Science, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China;

2. Institute for Applied Physics, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China)

**Abstract:** In this paper, based on the analysis of the operation characteristics of laser diode end-pumped laser crystal, a thermal model of laser diode end-pumped Tm : YAG crystal rod is established. The temperature field, thermal stress field and end-pumped crystal rod are numerically calculated by finite element method using heat conduction theory. The effects of laser beam with different laser energy distribution (circular Gaussian spot, elliptical Gaussian spot, circular flat top spot, square flat top spot), pump spot radius and Tm<sup>3+</sup> doping concentration on the temperature field distribution and end surface shape variables of laser rod are analyzed, and plotted in three-dimensional distribution diagrams. The results show that under the stable state, if the laser diode pump power is 30 W, and the pump spot radius is 400 μm, the maximum temperature rise of the pump surface of the Tm : YAG crystal rod with the doping concentration of 3.5 at. % is 124.55 °C, and the maximum stress of the pump surface is 209 MPa along the crystal z axis. The maximum heat shape variable of the pump surface is 0.888 μm. This study provides theoretical guidance for the design of Tm : YAG laser.

**Keywords:** Tm : YAG crystal; thermal effect; thermal stress; thermal deformation; finite element analysis; beam conditions

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (No. 11705136) 资助。

**作者简介:** 任嘉欣 (2000 -), 女, 硕士研究生, 主要激光技术及器件方面的研究。E-mail: 1748931294@qq.com

**收稿日期:** 2023-12-22; **修订日期:** 2024-01-29

## 1 引言

中红外波段 2 μm 固体激光器输出波长处在大气窗口、水的吸收带和人眼安全区,故在激光远程遥感、激光雷达、光电对抗和环境监测等领域,2 μm 固体激光器具有广泛的应用前景<sup>[1-4]</sup>。掺 Tm<sup>3+</sup> 的 YAG 晶体相较于掺 Nd<sup>3+</sup> 的 YAG 晶体具有更高的转换效率、更大的量子效率等优点,可以实现大功率 2 μm 波段激光输出,是 2 μm 波长固体激光器的理想介质,因此得到人们的广泛关注<sup>[5-9]</sup>。

Tm : YAG 固体激光器虽然有很多优势,但是其准三能级系统的特点以及较小的发射截面,导致其受热效应影响严重,泵浦阈值高<sup>[10-13]</sup>。因此,减小热效应成为 Tm : YAG 激光器设计中的关键步骤。

以往对于激光二极管端面泵浦激光晶体热效应研究多采用晶体四周周边恒温、端面近似绝热的边界条件,忽略了晶体的两个端面直接接触空气,与空气存在热交换过程<sup>[14-15]</sup>。而本文选择在时间上持续输出、功率能量都很均匀连续激光端面泵浦 Tm : YAG 晶体棒,构建激光晶体体热源热模型,考虑了晶体棒端面与空气发生热对流以及周边恒温的边界条件,分析了激光能量分布不同的激光光束、Tm<sup>3+</sup> 的掺杂浓度以及泵浦光光斑半径对激光晶体热效应的影响。结果表明,改变光束条件、增大光斑半径、减小 Tm<sup>3+</sup> 的掺杂浓度均可有效降低激光晶体的热效应。

## 2 有限元模型的建立

### 2.1 Tm : YAG 晶体的热模型

激光二极管发出的泵浦光通过耦合聚焦器聚焦到 Tm : YAG 晶体棒端面中心,晶体周围使用钢膜进行包裹,以确保与热沉铜块之间有良好的热接触。通过循环水冷装置来控制热沉铜块的温度。设  $z=0, z=l$  为晶体棒的两个端面,泵浦光从  $z=0$  射入,沿  $z$  轴入射到晶体内部。 $r, z$  分别为径向和轴向坐标, $R$  为晶体的半径,Tm : YAG 晶体棒及其热沉实验装置结构简图如图 1 所示。

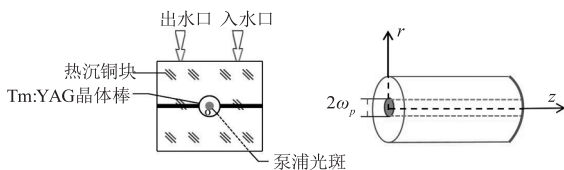


图 1 Tm : YAG 晶体棒及其热沉实验装置结构简图

Fig. 1 Tm : YAG crystal round rod and its heat sink experimental device structure schema

### 2.2 激光晶体体热源

Tm : YAG 晶体的稳态热传导方程表示为<sup>[16]</sup>:

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[ r \cdot K_c \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial r} \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_c \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial z} \right] + Q(r, z) \quad (1)$$

式中,  $K_c$  为晶体的导热系数;  $\rho$  为晶体密度;  $C_p$  为晶体比热容;  $T(r, z, t)$  为晶体内部的温度。  $Q(r, z)$  是 Tm : YAG 晶体棒吸收泵浦光产生的热功率密度, 表示为:

$$Q(r, z) = \eta \alpha I(r, z) \quad (2)$$

式中,  $\alpha$  表示激光晶体对泵浦光的吸收系数;  $\eta$  为晶体棒的热转换系数;  $\eta = 1 - \lambda_{\text{pump}} / \lambda_{\text{laser}}$ ; 其中,  $\lambda_{\text{pump}}$  ( $\lambda_{\text{pump}} = 780 \text{ nm}$ ) 为泵浦光波长;  $\lambda_{\text{laser}}$  ( $\lambda_{\text{laser}} = 2014 \text{ nm}$ ) 为输出波长;  $\alpha$  表示激光晶体对泵浦光的吸收系数;  $I(r, z)$  为激光器工作过程中晶体棒内  $(r, z)$  点处的泵浦光强度。根据吸收定律, 泵浦光沿  $z$  轴传播的光强表示为<sup>[17]</sup>:

$$I(r, z) = I_0 \cdot \exp\left(-\frac{2r^2}{\omega_p^2}\right) \cdot \exp(-\alpha z) \quad (3)$$

式中,  $\omega_p$  为泵浦光光斑半径;  $I_0$  为激光二极管泵浦光强:

$$I_0 = \frac{2P_{\text{in}}}{\pi\omega_p^2} \quad (4)$$

式中,  $P_{\text{in}}$  为泵浦光功率, 晶体体热源的表达式为:

$$Q(r, z) = \frac{2\eta\alpha P_{\text{in}} \exp(-2r^2/\omega_p^2) \exp(-\alpha z)}{\pi\omega_p^2} \quad (5)$$

Tm : YAG 晶体棒被热沉铜块包裹, 通过循环水冷周边散热保持热沉铜块温度恒定, 属于第一类边界条件。晶体的两个端面直接接触空气, 与空气有热交换过程, 发生热对流, 属于第三类边界条件。晶体棒的边界条件为:

$$\begin{cases} T(r, z) \Big|_{r=R} = T_b \\ K_c (T - T_0) - h \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = 0 \\ K_c (T - T_0) + h \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=l} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中,  $h$  为晶体表面与空气热交换系数;  $T_0$  为初始温度;  $T_b$  为水冷温度。

## 3 连续激光端面泵浦 Tm : YAG 晶体热效应分析

### 3.1 温度场分布

#### 3.1.1 LD 端面泵浦 Tm : YAG 晶体温度场分布

使用有限元仿真软件中的热传导模块对

Tm : YAG激光晶体棒在激光器中达到稳态时的温度场分布进行模拟。所用参数如表 1 所示。

表 1 Tm : YAG 晶体的热性能<sup>[18]</sup>

Tab. 1 Thermal performance of Tm : YAG crystal

Parameter	Value
Density/(g · cm <sup>-3</sup> )	4.56
Thermal conductivity/(W · m <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	14
Specific heat/(J · g <sup>-1</sup> · K <sup>-1</sup> )	0.59
Crystalline rod radius/mm	1.5
Crystalline rod height/mm	6
Coefficient of thermal expansion/K <sup>-1</sup>	8 × 10 <sup>6</sup>
Absorption coefficient of 3.5at. % Tm : YAG/cm <sup>-1</sup>	3.15
Initial temperature/K	291
Water cooling temperature/K	288.15

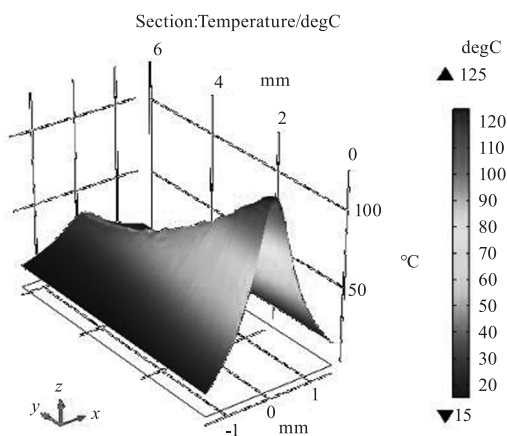


图 2 Tm : YAG 晶体沿 z 轴温度三维分布图

Fig. 2 Tm : YAG crystal z axis temperature three-dimensional distribution

图 2 为功率为 30 W、光斑半径为 400 μm 时,激光二极管端面泵浦 Tm : YAG 晶体棒沿 z 轴温度三维分布图。由图可知,连续激光端面泵浦 Tm : YAG 晶体棒的最大升温可达 124.55 °C。研究表明,晶体内部非均匀温升引起的光弹效应将是限制激光高功率输出的主要因素之一。

### 3.1.2 光束条件对晶体端面温度分布的影响

在许多实际应用中,需要激光能量分布不同的激光光束。圆形高斯光斑适用于大部分场景,能够提供较高的功率密度,使焊缝熔化更加充分,焊接速度更快。而椭圆光斑适用于焊接宽度较大的工件,可以在一定程度上提高焊接速度。而平顶光束顶部能量均匀,多用于实现精细的加工,例如细微孔加工、微细切割等。因此,本小节引入不同光束条件(圆形高斯光斑、椭圆形高斯光斑、圆形平顶光斑、方形平顶光斑;其光斑的能量分布三维图如图 3 所示)对 Tm : YAG 晶体端面温度分布的影响。

当功率为 30 W、圆形光斑的半径为 400 μm,椭

圆形的长半轴和短半轴分别为 400 μm、800 μm,方形平顶光斑的边长 800 μm 时,激光二极管端面泵浦 Tm : YAG晶体端面温度分布图如图 4 所示。由图可知,当光束条件分别为圆形高斯光斑、椭圆形高斯光斑、圆形平顶光斑、方形平顶光斑,晶体端面中心温度分布同样类似于呈圆形、椭圆形、圆形、方形分布,且泵浦面中心最大温升分别为 125 °C、101 °C、218 °C、203 °C。在相同的激光输出平均功率条件下,平顶光斑具有均匀的能量分布,并且能量集中在最高点,然而高斯光斑的能量会随着光斑边界的径向递减。因此,当平顶光斑用于泵浦 Tm : YAG 晶体端面(z = 0)时,所达到的最高温度要高于高斯光斑;当泵浦光高斯光斑形状由圆形变为椭圆,平顶光斑形状由圆形变为方形时,Tm : YAG 晶体端面(z = 0)达到的最高温度越高,这是由于作用面积变大,单位面积的晶体在单位时间内获得的能量低的缘故。

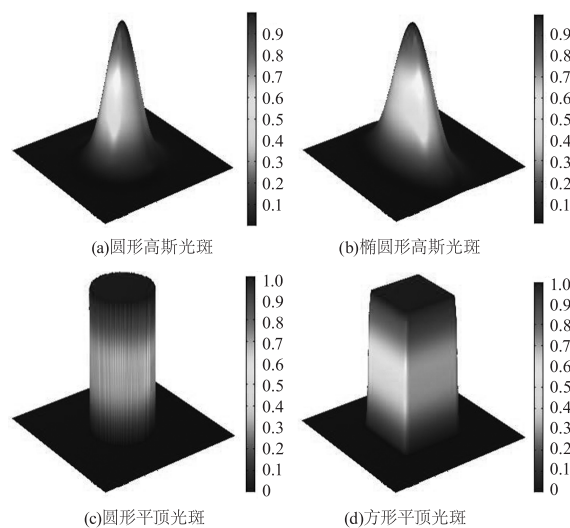
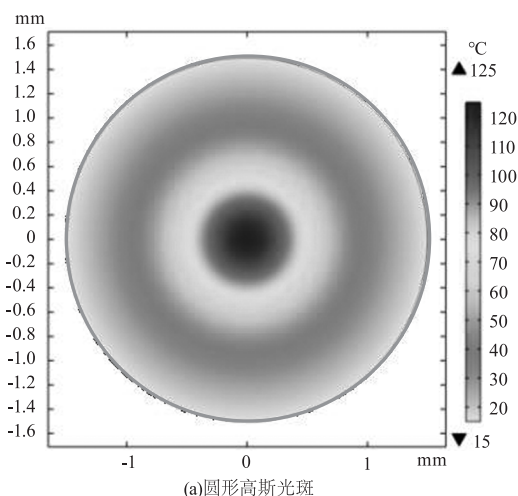


图 3 光斑能量分布三维图

Fig. 3 Three-dimensional diagram of spot energy distribution



(a)圆形高斯光斑

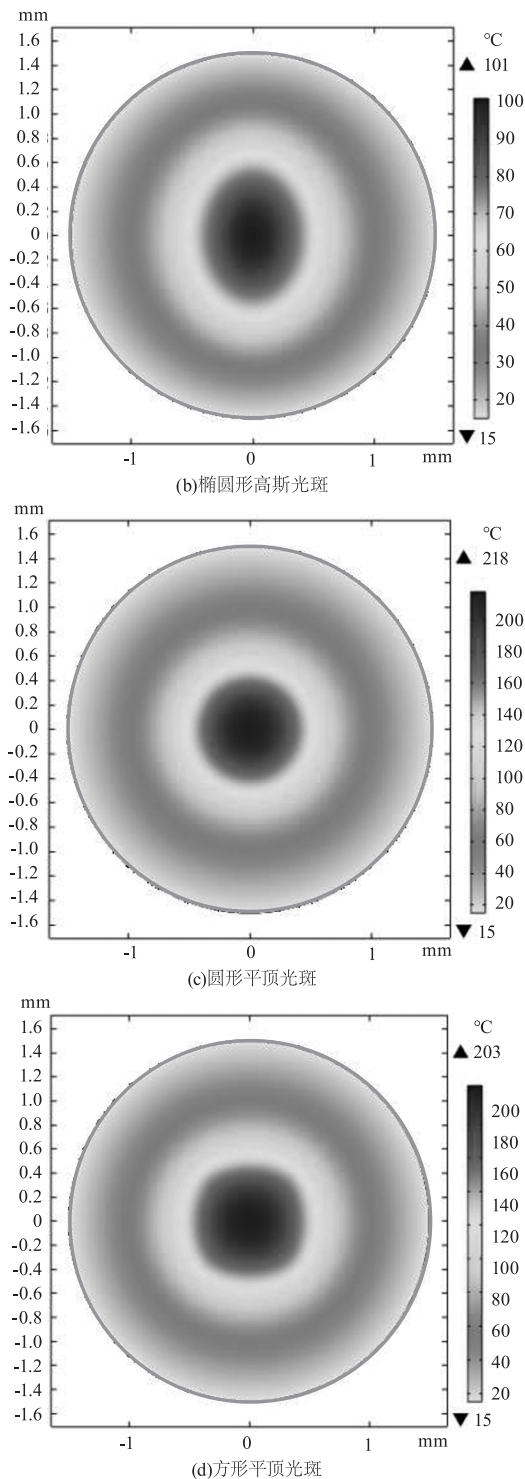


图4 不同光束条件下的Tm:YAG晶体泵浦面温度分布图

Fig.4 Temperature profile of pump surface of Tm:YAG crystal under different beam conditions

### 3.1.3 晶体端面温度随光斑半径的变化

泵浦光斑与激光介质内基模的模式匹配方式达到最佳时,激光器可获得较高的光-光转换效率且有较高质量的光束输出<sup>[17]</sup>。当晶体达到平衡状态,功率为30 W时,图5为不同光斑半径下晶体棒泵浦面径向温度的变化,近激光入射处的端面温度最高,而

沿着z轴温度分布则逐渐递减。从图中看出,当泵浦光光斑半径为350 μm、400 μm、450 μm、500 μm时,其泵浦面最大升温分别为132.42 °C、124.55 °C、117.61 °C、111.42 °C。在其他外部条件不变的情况下,光斑半径越小其温度值就越高,晶体内部中心温度逐渐升高,晶体中心温度越大热效应越严重。

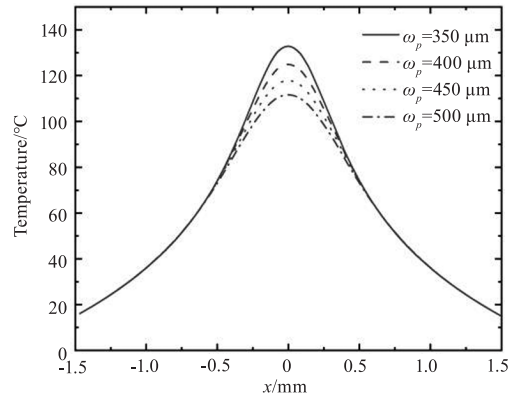
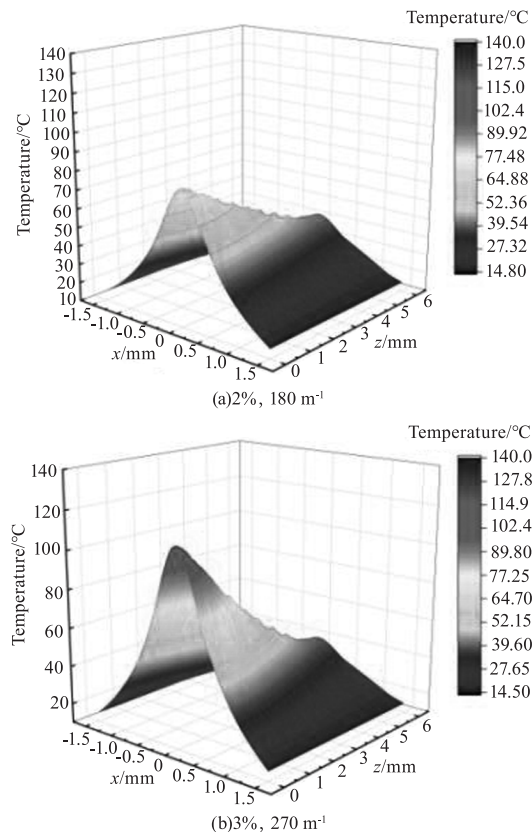


图5 不同光斑半径下晶体棒泵浦面径向温度的变化  
Fig.5 Variation of radial temperature of crystal rod pump surface under different spot radius

### 3.1.4 晶体掺杂浓度对晶体温度影响

当Tm:YAG晶体掺杂浓度分别为2%、3%、4%,即吸收系数分别为180 m<sup>-1</sup>、270 m<sup>-1</sup>和360 m<sup>-1</sup>。当其他参量取值不变时,连续LD端面泵浦Tm:YAG晶体棒沿z轴温度三维分布图如图6所示。



(b)3%, 270 m<sup>-1</sup>



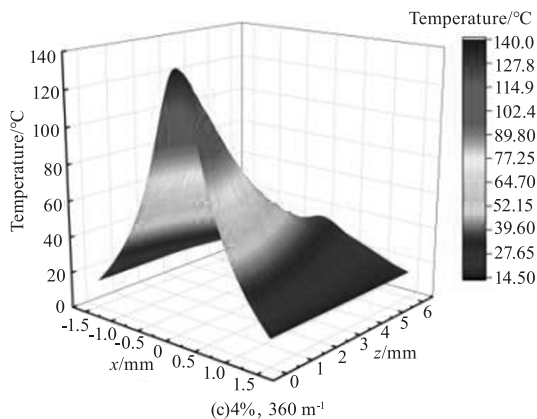


图6 不同掺杂浓度和吸收系数下的 Tm:YAG 晶体沿 z 轴温度三维分布图

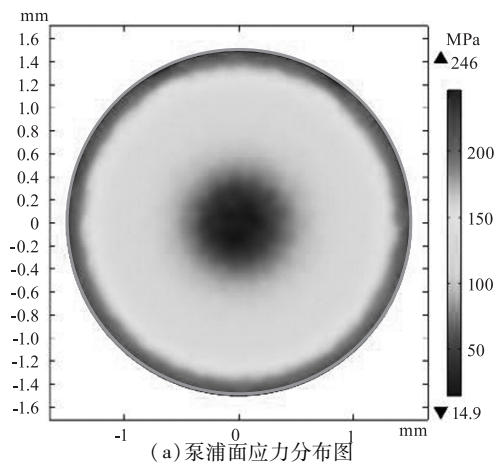
Fig. 6 3D temperature profile of Tm:YAG crystals with different doping concentrations and absorption coefficients along the z axis

由图 6(a) ~ (c) 可知,当 Tm:YAG 晶体棒的掺杂浓度分别为 2%、3%、4% 时,其最大温升分别为 81.3 °C、111 °C、138 °C。随着晶体掺杂浓度的增加,晶体棒的整体温度也升高。且晶体泵浦面中心的温度和 z=c 端面中心点处温差变大。

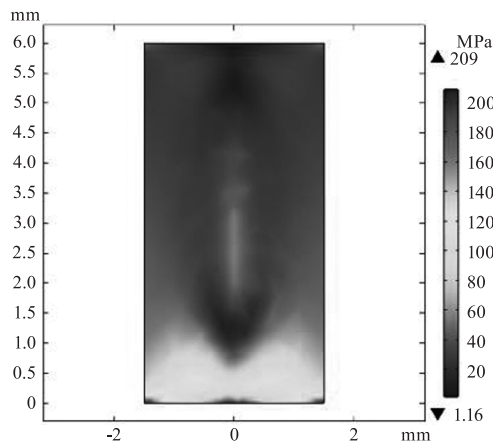
### 3.2 热应力及端面形变量

#### 3.2.1 端面泵浦 Tm:YAG 晶体形变量及热应力

在计算 Tm:YAG 晶体棒温度场的基础上,利用有限元分析软件的固体传热及固体力学模块的耦合系统得到了激光晶体的热应力场分布及端面热形变场分布。图 7 为 Tm:YAG 晶体应力场分布图组。图中可得,当晶体棒内部达到稳定状态时,其表面最大应力达到了 246 MPa,沿晶体 z 轴最大应力达到了 209 MPa。如图 8 为晶体热形变分布图。可得出端面形变最大值为 0.888 μm,当连续 LD 端面泵浦 Tm:YAG 晶体棒达到平衡状态时,其最高的热形变出现在泵浦光的中心(即 YAG 晶体端面的中心),呈现出以泵浦光为中心的圆形凸起状。



(a) 泵浦面应力分布图



(b) 沿晶体 z 轴应力分布图

图7 泵浦面应力分布图及沿晶体 z 轴应力分布图

Fig. 7 Pump surface stress distribution diagram and crystal z axis stress distribution diagram

可以看出,由于温升的不均匀分布所导致的热形变同样会对激光输出功率和光束质量产生影响。

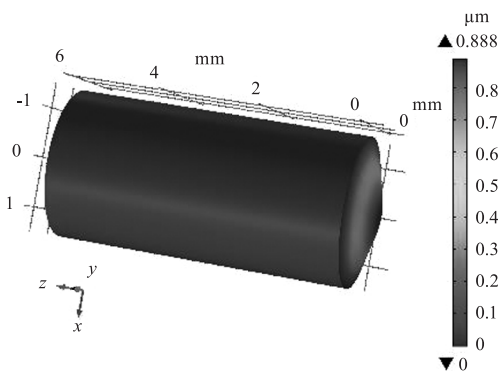


图8 Tm:YAG 晶体热形变分布图

Fig. 8 Tm:YAG crystal thermal deformation distribution

#### 3.2.2 光束条件对晶体端面形变量分布的影响

在使用 3.1.2 节参数时,激光二极管端面泵浦 Tm:YAG 晶体泵浦面(z=0)形变量分布图如图 9 所示。由图 9(a) ~ (d) 可知,当光束条件分别为圆形高斯光斑、椭圆形高斯光斑、圆形平顶光斑、方形平顶光斑时,晶体端面最大形变量分别为 0.888 μm、0.77 μm、1.81 μm、1.745 μm。在同样的激光输出平均功率下,平顶光斑泵浦 Tm:YAG 晶体端面(z=0)的形变量比高斯光斑要大;当泵浦光高斯光斑形状由圆形变为椭圆,平顶光斑形状由圆形变为方形时,Tm:YAG 晶体端面(z=0)形变量越高。此与温度变化趋势保持一致。

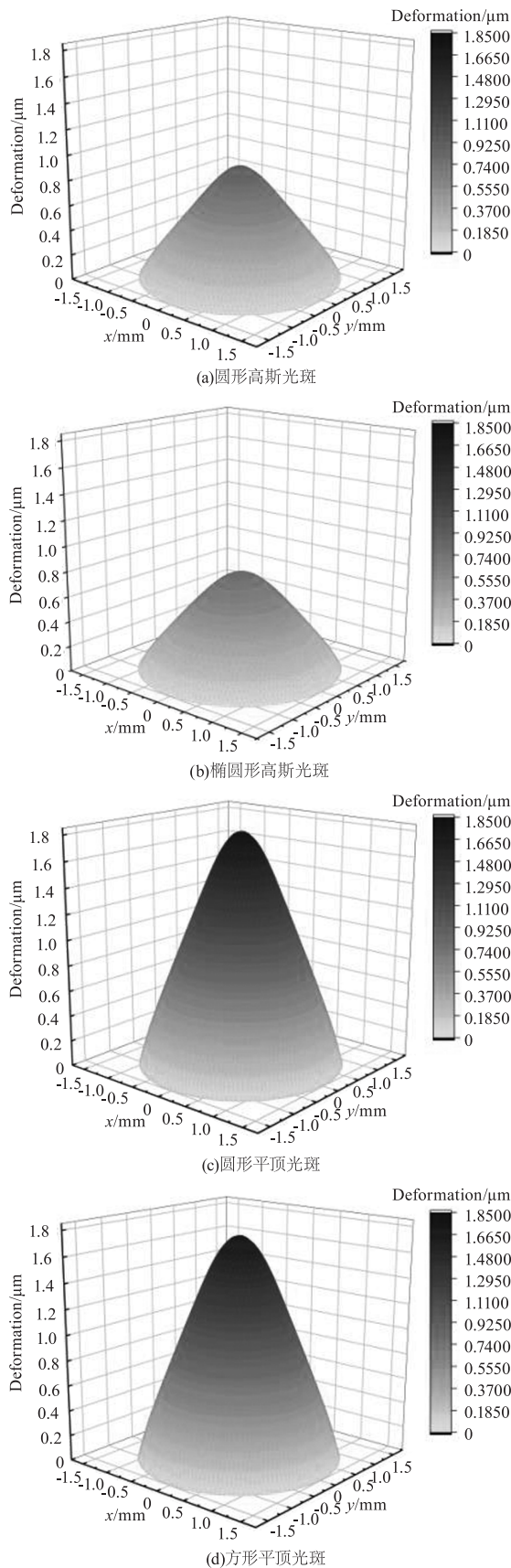


图9 不同光束条件下的Tm:YAG晶体泵浦面形变量分布三维图  
Fig.9 3D diagram of pump surface shape variable distribution of Tm:YAG crystal under different beam conditions

### 3.2.3 晶体端面形变量随光斑半径的变化

当晶体达到平衡状态,功率为30 W时,其他参数条件不变的情况下,图10为不同光斑半径下晶体棒泵浦面径向形变量的变化。当泵浦光光斑半径为350 μm、400 μm、450 μm、500 μm时,晶体圆棒端面最大变量分别为0.916 μm、0.888 μm、0.86 μm、0.832 μm。在其他参数条件不变的情况下,光斑半径越小其形变量就越大,增大光斑半径,晶体内部的形变量也增大。

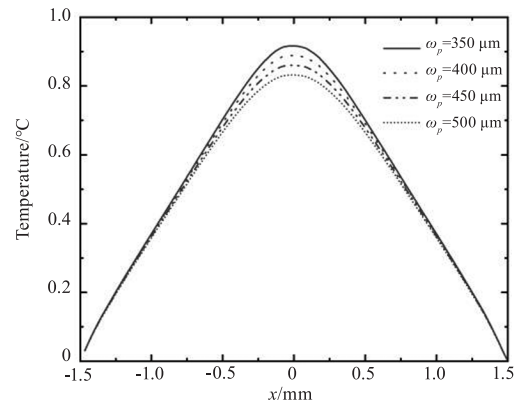
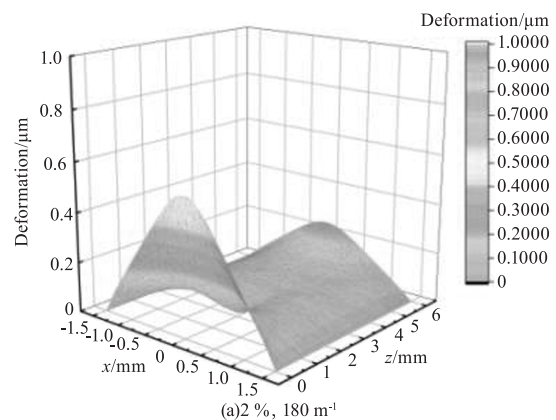


图10 不同光斑半径下晶体棒泵浦面径向形变量的变化  
Fig.10 Variation of radial shape of crystal rod pump surface under different spot radius

### 3.2.4 晶体掺杂浓度对晶体形变量的影响

当Tm:YAG晶体掺杂浓度分别为2%、3%、4%,即吸收系数分别为180 m<sup>-1</sup>、270 m<sup>-1</sup>和360 m<sup>-1</sup>,其他参量取值不变时,连续LD端面泵浦Tm:YAG晶体沿z轴温度三维分布图如图11。由图11(a)~(c)可知,当Tm:YAG晶体棒的掺杂浓度分别为2%、3%、4%时,其端面最大形变量分别为0.547 μm、0.783 μm、0.986 μm。随着晶体掺杂浓度的增加,晶体棒端面形变量也升高,且晶体泵浦面中心的形变量和z=c端面中心点处形变量差变大。



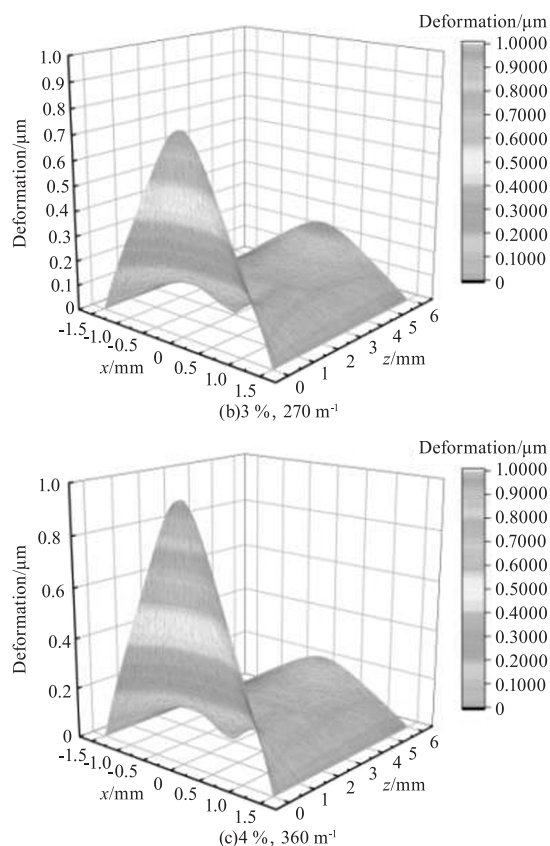


图 11 不同掺杂浓度和吸收系数下的 Tm : YAG 晶体沿 z 轴形变量三维分布图

Fig. 11 Three-dimensional distribution of the z axis variables of Tm : YAG crystals at different doping concentrations and absorption coefficients

#### 4 结 论

本文采用有限元分析方法,遵循热传导理论研究了激光二极管端面泵浦 Tm : YAG 晶体棒的热效应。分析了不同光束条件、泵浦光斑半径、 $\text{Tm}^{3+}$  掺杂浓度对激光棒内部温度场及端面形变量的影响。由计算结果可知,在同样的激光输出平均功率下,平顶光斑泵浦 Tm : YAG 晶体端面的热效应比高斯光斑要大;当泵浦光高斯光斑形状由圆形变为椭圆,平顶光斑形状由圆形变为方形时,Tm : YAG 晶体的热效应越高。随着光斑半径由  $350 \mu\text{m}$  增加为  $500 \mu\text{m}$ ,晶体棒内最高温降低了  $21 \text{ }^\circ\text{C}$ ;最大形变量降低了  $0.084 \mu\text{m}$ 。随着  $\text{Tm}^{3+}$  的掺杂浓度由 2 % 到 4 %,晶体棒内的最高温升增加了  $56.7 \text{ }^\circ\text{C}$ ,端面最大形变量增加了  $0.439 \mu\text{m}$ ,且晶体泵浦面中心的温度和  $z = c$  端面中心点处温差变大。以上实验数据表明,改变光束条件、增大光斑半径、减小  $\text{Tm}^{3+}$  的掺杂浓度均可有效降低激光晶体的热效应。该研究结论为进一步设计热性能更好的 Tm : YAG 激光器提

供了优化条件,为输出高功率,高光束质量的  $2 \mu\text{m}$  激光提供了理论依据。同时也为全固态激光器的激光增益介质选择和理论研究提供了参考。

#### 参考文献:

- [1] Wang Caili, Xie Shiyong, Liu Hui, et al. Theoretical study of  $2 \mu\text{m}$  Tm : YAG laser with wavelength switchable accurately for lidar[J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(8):830003 - 0830003(5). (in Chinese)  
王彩丽, 谢仕永, 刘辉, 等. 激光雷达用  $2 \mu\text{m}$  Tm : YAG 激光器波长精细调控的理论研究[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(8):830003 - 0830003(5).
- [2] Zhang Yongtang, Xian Minyi. Research on thermal effects of mid-infrared  $2 \mu\text{m}$  Tm : YLF laser[J]. Laser & Infrared, 2017, 47(7):813 - 816. (in Chinese)  
张永棠, 洗敏仪. 中红外  $2 \mu\text{m}$  Tm : YLF 激光热效应分析[J]. 激光与红外, 2017, 47(7):813 ~ 816.
- [3] Ai Chengjun, He Lijie, Wei Lei, et al. Study on the characteristics of thermal lens effect of Tm : YAP laser end pumped by laser diode[J]. Laser & Infrared, 2013, 43(10):1125 - 1128. (in Chinese)  
艾成君, 何利杰, 魏磊, 等. 二极管端面抽运 Tm : YAP 激光器热透镜效应研究[J]. 激光与红外, 2013, 43(10):1125 - 1128.
- [4] Zhang Dayou, Xu Hong, Cai Jun, et al. The diode-pumped pulsed  $2 \mu\text{m}$  laser with crystal doped Tm[J]. Laser & Infrared, 2008, 38(8):771 - 773. (in Chinese)  
张大有, 许宏, 蔡军, 等. 一种采用二极管泵浦单掺 Tm 晶体的  $2 \mu\text{m}$  脉冲激光器[J]. 激光与红外, 2008, 38(8):771 - 773.
- [5] Wang Ruiming, Li Yue, Zhou Guanlong, et al. LD double ended co polarization pumped Tm : YLF laser[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(6):771 - 775. (in Chinese)  
王睿明, 李玥, 周冠龙, 等. LD 双端同向偏振泵浦 Tm : YLF 激光器[J]. 激光与红外, 2021, 51(6):771 - 775.
- [6] Yuan Ligang, Zhou Shouhuan, Zhao Hong, et al. 109.5 W output  $1.94 \mu\text{m}$  wavelength Tm : YAP solid-state laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2019, 48(4):87 - 94. (in Chinese)  
苑利钢, 周寿桓, 赵鸿, 等. 109.5 W 输出  $1.94 \mu\text{m}$  波长 Tm : YAP 固体激光器[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(4):87 - 94.
- [7] Wang Yuezhu, Duan Xiaoming, Ke Liang, et al. High efficiency CW laser diode end-pumped Tm : YAP laser at

- room temperature [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009 (7):112 - 115. (in Chinese)
- 王月珠,段小明,柯亮,等. 室温下高效率连续波激光二极管端面抽运 Tm : YAP 激光器[J]. 中国激光, 2009(7):112 - 115.
- [8] Mengmeng T, Qijie H, Ting Y, et al. LD clad-pumped high efficient Tm-doped fiber lasers with different laser cavities[J]. Infrared & Laser Engineering, 2013, 42(8):2008 - 2011.
- [9] Shu Shijiang, Yu Ting, Hou Junyan, et al. Diode-side-pumped AO Q-switched Tm, Ho:LuLF laser[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(9):58 - 60.
- [10] Kracht D, Dupré K, Ackermann L, et al. 407 W End-pumped multi-segmented Nd : YAG laser[J]. Optics Express, 2005, 13(25):10140 - 10144.
- [11] Li Zhigang, Xiong Zhengjun, Huang Weiling, et al. Study on end-pumped composite crystal laser with high power laser diode[J]. Chinese Journal of Lasers, 2005, 32(3):297 - 300. (in Chinese)
- 李志刚,熊政军,黄维玲,等. 高功率激光二极管端面抽运复合晶体激光器的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(3):297 - 300.
- [12] Wilhelm R, Frede M, Kracht D. Power scaling of end-pumped solid-state rod lasers by longitudinal dopant concentration gradients[J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 2008, 44(3):232 - 244.
- [13] Yan Ying, Zhang Hengli, Liu Yang, et al. Thermal effect of laser diode end-pumped multistage composite strip laser [J]. Acta Photonica Sinica, 2009, 38(9):16 - 20. (in Chinese)
- 闫莹,张恒利,刘洋,等. 激光二极管端面泵浦多段复合板条激光器热效应[J]. 光子学报, 2009, 38(9):16 - 20.
- [14] Li Long, Nie Jianping, Shi Peng, et al. Temperature field of end pumped thermally conductive anisotropic laser rod [J]. Optical Precision Engineering, 2009, 17(12):2931 - 2938. (in Chinese)
- 李隆,聂建萍,史彭,等. 端面泵浦热传导各向异性激光棒的温度场[J]. 光学精密工程, 2009, 17(12):2931 - 2938.
- [15] Sun Yao, Li Tao, Yu Guolei, et al. Thermal effect analysis and frequency doubling study of Nd : GdYVO<sub>4</sub> crystal pumped by laser diode end face[J]. China Laser, 2007, 34(3):359 - 363. (in Chinese)
- 孙尧,李涛,于果蕾,等. 激光二极管端面抽运 Nd : GdYVO<sub>4</sub>晶体热效应分析及倍频研究[J]. 中国激光, 2007, 34(3):359 - 363.
- [16] Li Yongzhi, Zhang Meng, Yan Dongyu, et al. Efficient passive Q-switched laser based on Nd : YAG/YAG/Cr : YAG/YAG composite crystals[J]. China Laser, 2021, 48(21):41 - 51. (in Chinese)
- 李永智,张萌,闫东钰,等. 基于 Nd : YAG/YAG/Cr : YAG/YAG 复合晶体的高效被动调 Q 激光器[J]. 中国激光, 2021, 48(21):41 - 51.
- [17] Li Long, Zhang Qiujuan, Zhagn Chunling, et al. Research on transient thermal effects of Nd : YAG ceramics pumped by pulsed laser diode bar side[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(11):158 - 164. (in Chinese)
- 李隆,张秋娟,张春玲,等. 脉冲激光二极管巴条侧面泵浦 Nd : YAG 陶瓷瞬态热效应研究[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(11):158 - 164.
- [18] Wu Chunting, Yao Mengxi, Dai Tongyu, et al. Thermal effect and laser characteristics of LD end-pumped CW Tm : YAG laser at room temperature[J]. Optik, 2017, 58(4):356 - 362.