

文章编号:1001-5078(2024)12-1815-07

· 激光器技术 ·

## LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器的热效应

李昕阳<sup>1</sup>, 李 隆<sup>1,2</sup>, 任嘉欣<sup>1</sup>, 贺政隆<sup>1</sup>, 石 锴<sup>1</sup>, 宁江浩<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:**为了解决激光二极管(Laser Diode, LD)端面泵浦的热容激光器在泵浦阶段会在晶体内部产生大量废热的问题,由LD端面泵浦激光晶体的工作特点,建立了泵浦阶段无冷却、端面与空气热交换的Yb:YAG复合晶体热模型。基于热传导理论,使用有限元方法对Yb:YAG复合晶体的温度场、应力场及热形变场进行了计算,定量分析了键合长度与键合方式对温度场及热形变场的影响。研究表明:若以泵浦功率为50 W、泵浦光高斯半径为300  $\mu\text{m}$ 的激光二极管对晶体尺寸为3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  4 mm、键合长度为1 mm、键合方式为单端键合,且掺杂浓度为5.0 at. %的Yb:YAG复合晶体端面进行泵浦,且工作时长为2 s,晶体内部场的最高温升为248  $^{\circ}\text{C}$ 、最大热形变量为5.9515  $\mu\text{m}$ 、最大应力为 $3.70395 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。研究结果对激光二极管端面泵浦的Yb:YAG热容激光器的设计提供了理论依据。

**关键词:**固体激光器;热效应;Yb:YAG晶体;温度场;热形变

中图分类号:TN248.1;O437 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2024.12.002

## Thermal effects of laser diode end pumped Yb : YAG composite crystal heat capacity laser

LI Xin-yang<sup>1</sup>, LI Long<sup>1,2</sup>, REN Jia-xin<sup>1</sup>, HE Zheng-long<sup>1</sup>, SHI Pu<sup>1</sup>, NING Jiang-hao<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 order to solve the problem that the heat capacity laser pumped by laser diode generate a large amount of waste heat inside the crystal during the pumping stage, a thermal model of Yb : YAG composite crystal without cooling in the pumping stage and heat exchange between the face and air is established by the working characteristics of the LD end-pumped laser crystal. Based on the heat conduction theory, the temperature field, stress field and thermal deformation field of Yb : YAG composite crystal are calculated by finite element method. The effects of bonding length and bonding mode on the temperature field and thermal deformation field are quantitatively analyzed. The results show that if a laser diode with a pumping power of 50 W and a pumping optical Gaussian radius of 300  $\mu\text{m}$  is used to pump the end face of Yb : YAG composite crystal with a crystal size of 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  4 mm, a bonding length of 1 mm, a bonding mode of single end bonding, and a doping concentration of 5.0 at. %, and the working time is 2 s, The maximum temperature rise of the internal field is 248  $^{\circ}\text{C}$ , the maximum thermal shape variable is 5.9515  $\mu\text{m}$ , and the maximum stress is  $3.70395 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ . The research results provide a theoretical basis for the design of Yb : YAG heat capacity laser pumped by laser diode end face.

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11705136)资助。

作者简介:李昕阳,男,硕士研究生,主要从事激光技术方面的研究。E-mail:985351292@qq.com

通讯作者:李 隆,男,教授,博士,主要从事激光技术方面的研究。E-mail:lilong@xauat.edu.cn

收稿日期:2024-03-27

**Keywords:** solid-state laser; thermal effect; Yb : YAG crystal; temperature field; thermal deformation

## 1 引言

激光二极管泵浦的全固态激光器 (Diode Pump Solid State Laser, DPSSL) 因其有着峰值功率高、寿命长、稳定性高等特点, 在工业、医疗、国防等领域有着广泛应用, 成为了激光技术研究者的关注对象<sup>[1-3]</sup>。DPSSL 中有一类特殊的激光器, 其在工作时不对晶体进行冷却, 而当激光晶体的温度持续升高到一定程度后再停止工作进行冷却, 工作时将废热存储在介质中, 减少激光发射过程中激光增益介质的热应力和光学畸变, 从而获得高功率、高光束质量的激光, 它就是全固态热容激光器 (Solid-State Heat Capacity Laser, SSHCL)<sup>[4]</sup>。SSHCL 的工作方式有效解决了全固态激光器工作时的热效应瓶颈, 使得输出的光束质量更好, 更适合高功率激光的输出<sup>[5]</sup>。激光二极管泵浦的全固态热容激光器充分利用了激光二极管泵浦的优点, 并且融合了热容激光器的独特优势, 已经成为世界上最先进的激光器之一<sup>[6]</sup>。

然而, 热容激光器在工作阶段也因其工作阶段不进行冷却的特点容易造成废热堆积, 影响工作时长, 为增强热容激光器的散热性能, 本文提出采用复合晶体作为激光介质的热容激光器设计, 通过对激光二极管泵浦的 Yb : YAG 复合晶体热容激光器工作特点的分析, 得出了边界条件。随后利用泊松方程, 通过有限元分析法对温度场、应力场及热形变量进行了计算, 并定量分析了键合长度和键合方式对温度场和形变量的影响。研究结果为激光二极管泵浦的 Yb : YAG 热容激光器设计提供理论依据。

## 2 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热模型

### 2.1 热模型建立

LD 端面泵浦使泵浦光可被有效的耦合进入激光晶体的 TEM<sub>00</sub> 模体积内, 易于实现泵浦光与振荡光之间的模式匹配, 提高了激光器的工作效率<sup>[7]</sup>。激光二极管发出的泵浦光经光纤耦合后, 又通过光学元件组准直聚焦, 最终入射到 YAG/Yb : YAG 复合晶体端面中心, 图 1 为 LD 端面泵浦 Yb : YAG 复合晶体示意图, 晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 4 mm、键合长度为 1 mm、键合方式为单端键合。

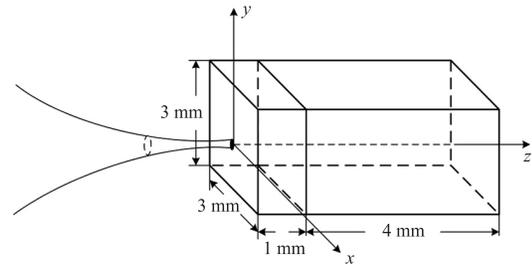


图 1 LD 端面泵浦 Yb : YAG 复合晶体示意图

Fig. 1 LD end-pumped Yb : YAG composite crystal diagram

在激光晶体热效应的研究中, 激光二极管输出的泵浦光通常被视为平面光或理想高斯光束<sup>[8]</sup>。其泵浦光通过光纤束后发射到光学耦合元件上, 此时的光线是多个光纤出射光的叠加, 其光强分布呈“大礼帽”状<sup>[9]</sup>, 称为超高斯分布。复合晶体泵浦端面上的泵浦光光强分布表达式为:

$$I(x, y, z, t) = I_0 \exp\left(-2 \frac{x^{2k} + y^{2k}}{\omega_0^{2k}}\right) \cdot \exp[-\beta(z - L)] G(t) \quad (1)$$

式中,  $I$  为泵浦光强度;  $I_0$  为泵浦光中心强;  $\omega_0$  为泵浦光高斯半径;  $k$  为高斯阶次;  $\beta$  为激光介质对泵浦光的吸收系数;  $L$  为键合长度;  $G(t)$  为时间函数其表示为:

$$G(t) = \begin{cases} 1 & (t \leq t_w) \\ 0 & (t > t_w) \end{cases} \quad (2)$$

其中,  $t_w$  为工作时长。

热容激光器的工作过程中, 因为冷却阶段不会进行泵浦, 故可视为晶体内部不存在热源, 因此其含时热源函数为:

$$q_v(x, y, z, t) = \beta \eta I_0 \exp\left(-2 \frac{x^{2k} + y^{2k}}{\omega_0^{2k}}\right) \cdot \exp[-\beta(z - L)] G(t) \quad (3)$$

式中,  $\beta$  为激光介质对泵浦光的吸收系数;  $\eta$  为热转换系数。

设 Yb : YAG 复合晶体工作阶段的温度函数为  $u_I(x, y, z, t)$ ; 而 Yb : YAG 复合晶体冷却阶段的温度函数为  $u_{II}(x, y, z, t)$ , 则它们遵循的热传导泊松方程分别为:

$$\rho C \frac{\partial u_I}{\partial t} = \lambda \left[ \frac{\partial^2 u_I}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_I}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_I}{\partial z^2} \right] + q_v \quad (4)$$

$$\rho C \frac{\partial u_{II}}{\partial t} = \lambda \left[ \frac{\partial^2 u_{II}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_{II}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u_{II}}{\partial z^2} \right] \quad (5)$$

其中,  $\rho$  为晶体密度;  $C$  为比热容;  $\lambda$  为热导率。

## 2.2 边界条件

热容激光器会在工作时产生大量废热,而在冷却阶段为使晶体降低温度,通常会使用半导体制冷、循环水冷或风冷等方式进行冷却,此处将冷却温度  $u_0$  记作初始温度:

$$u(x, y, z, 0) = u_0 \quad (6)$$

考虑晶体实际工作状态提出以下边界条件:

$$\begin{cases} u_{\text{I}}(\pm 1.5, \pm 1.5, z, t) = u(\pm 1.5, \pm 1.5, z, t) \\ u_{\text{II}}(\pm 1.5, \pm 1.5, z, t) = u_0 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \lambda \frac{\partial u_{\text{I}}}{\partial z} \Big|_{z=0} = h[u(r, 0, t) - u_0] \\ \lambda \frac{\partial u_{\text{II}}}{\partial z} \Big|_{z=0} = h[u(r, 0, t) - u_0] \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} -\lambda \frac{\partial u_{\text{I}}}{\partial z} \Big|_{z=4} = h[u(x, y, 4 + L, t) - u_0] \\ -\lambda \frac{\partial u_{\text{II}}}{\partial z} \Big|_{z=4} = h[u(x, y, 4 + L, t) - u_0] \end{cases} \quad (9)$$

公式(7)描述的为工作阶段无冷却,冷却阶段周边恒温冷却的条件,因冷却阶段时晶体被导热性能良好的钢膜包裹,并且周边始终与冷却块接触紧密,因此晶体四周始终为冷却水温度。

公式(8)、式(9)为第三类边界条件<sup>[10]</sup>,  $z=0$ 、 $z=4$  这两个暴露在空气中的端面始终与空气存在热交换。其中,  $h$  为空气传热系数。

## 3 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器温度场分析

使用泵浦功率为 50 W, 输出波长为 940 nm 的激光二极管对晶体尺寸为 3 mm × 3 mm × 4 mm、键合长度为 1 mm、键合方式为单端键合,且掺杂浓度为 5.0 at. %、晶体吸收系数为 5.6 cm<sup>-1</sup><sup>[11-13]</sup> 的 Yb : YAG 复合晶体端面进行泵浦,端面的参考温度及冷却温度  $u_0$  为 291 K、光斑半径为 300 μm、高斯阶次为 1, 工作时间为 2 s。此条件下的最高温升为 248 °C。图 2 为 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器温度场图组。

### 3.1 不同键合长度时 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器温度场分析

晶体的放热行为主要发生在受激辐射的过程中, YAG 晶体并不参与这一过程,而是作为一种缓

冲介质和激活离子的载体,因此端面键合的 YAG 会提高晶体的散热性能。键合长度和键合方式的变化会改变晶体的散热性能,是复合晶体十分重要的参数。只改变键合长度,其他条件与图 2 一致,则键合长度分别为 0.5 mm、1 mm、1.5 mm 时泵浦阶段最高温升为 341 °C、248 °C、218 °C。图 3 为不同键合长度时 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器温度场。可以看出键合长度的增加能够有效降低最大温升,但这种关系并非线性的。

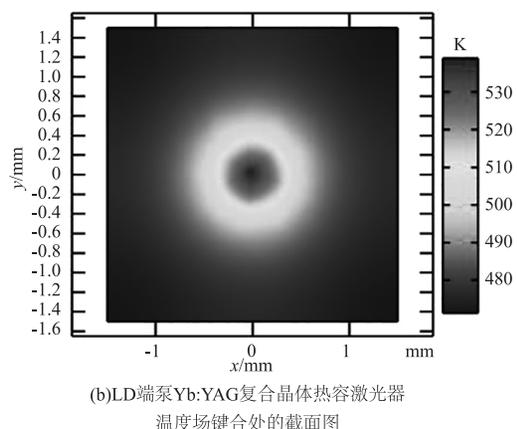
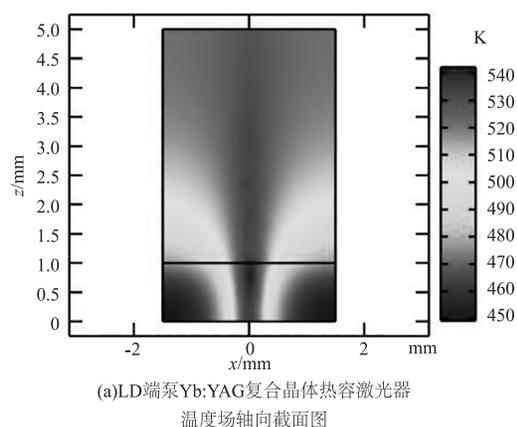
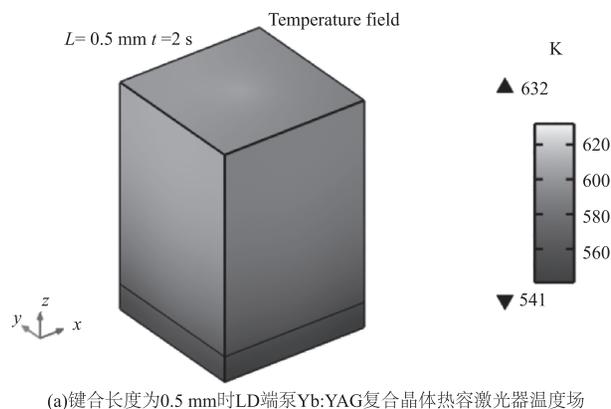
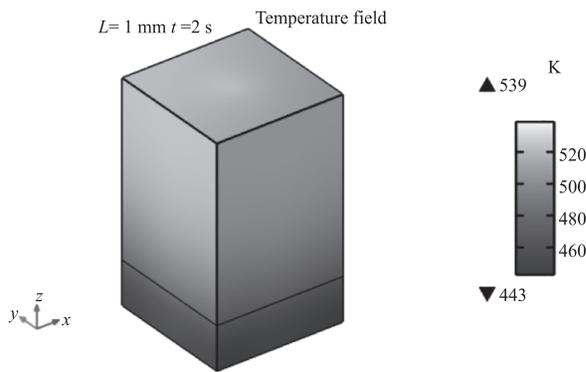
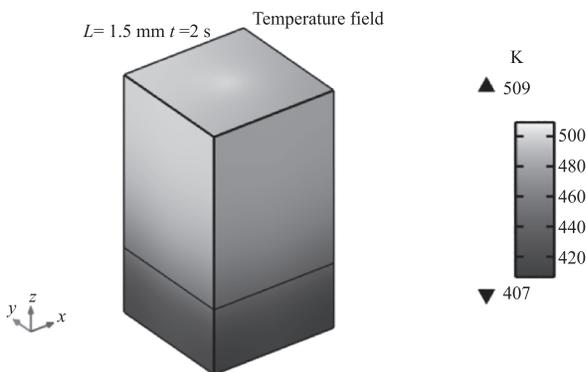


图2 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器温度场图组  
Fig. 2 LD end pump Yb : YAG composite crystal heat capacity laser temperature field diagram

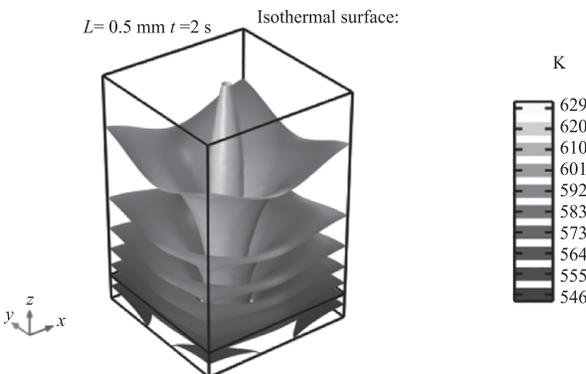




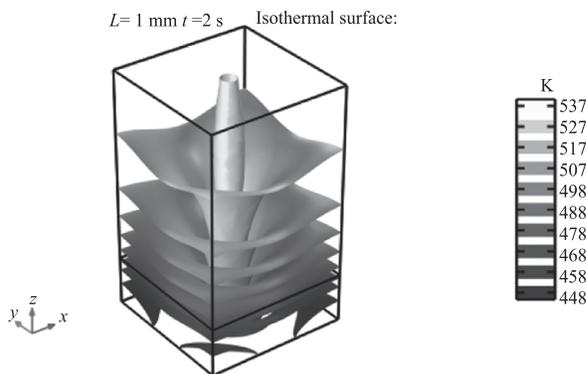
(b)键合长度为1 mm时LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器温度场



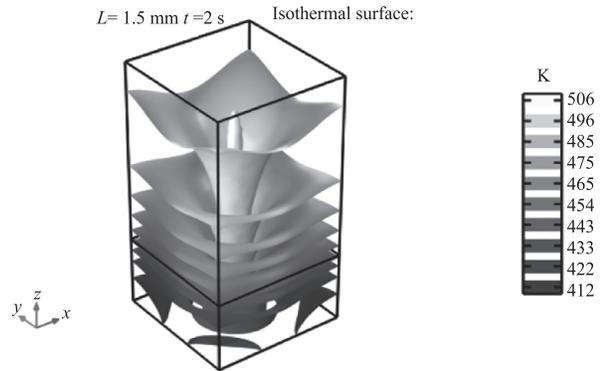
(c)键合长度为1.5 mm时LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器温度场



(d)键合长度为0.5 mm时LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器等温面



(e)键合长度为1 mm时LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器等温面



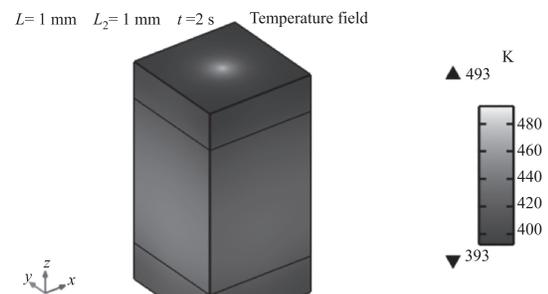
(f)键合长度为1.5 mm时LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器等温面

图3 不同键合长度时LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器温度场

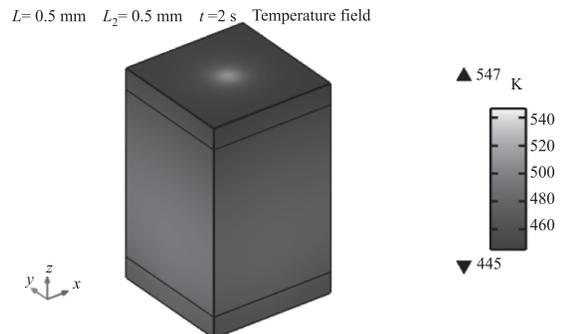
Fig. 3 Temperature field of LD end-pumped Yb:YAG composite crystal heat capacity laser with different bonding lengths

### 3.2 不同键合方式时LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器温度场分析

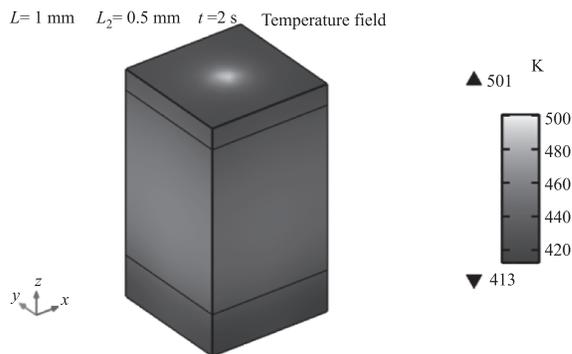
工作条件与图2一致,但分别采用单端键合和双端键合的方式提升晶体散热性能,前后端面的键合长度都为1 mm,泵浦阶段双端键合的最高温升为201 ℃;使双端键合前后端面键合长度分别为0.5 mm/0.5 mm、1 mm/0.5 mm、1 mm/1.5 mm进行对照实验,泵浦阶段最高温升为255 ℃、209 ℃、202 ℃。图4为双端键合时不同键合长度组合的LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器温度场。单端泵浦时双端键合虽然能够降低最大温升,但主要起到散热作用的为泵浦端面的键合,后端的键合虽然能够降低温升的,但相对作用较小。



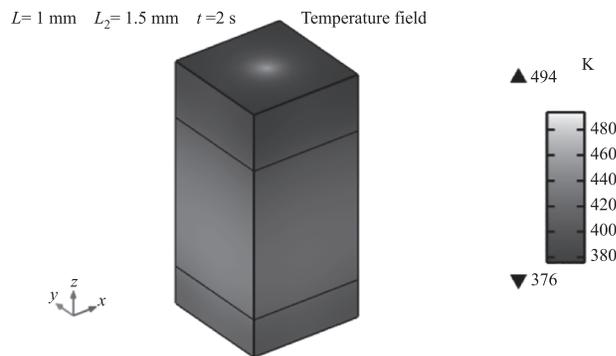
(a)前段键合长度为1 mm、后端键合长度为1 mm的LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器温度场



(b)前段键合长度为0.5 mm、后端键合长度为0.5 mm的LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器温度场



(c)前段键合长度为1 mm、后端键合长度为0.5 mm的LD端泵 Yb:YAG复合晶体热容激光器温度场



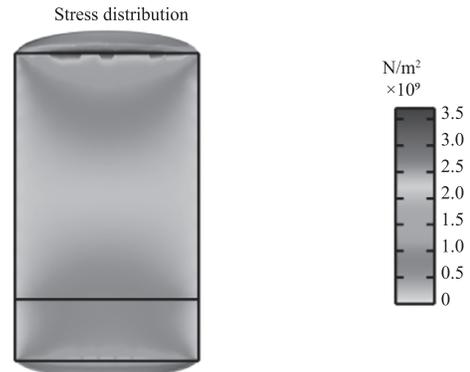
(d)前段键合长度为1 mm、后端键合长度为1.5 mm的LD端泵 Yb:YAG复合晶体热容激光器温度场

图4 双端键合时不同键合长度组合的LD端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器温度场

Fig. 4 Temperature field of LD end-pump Yb : YAG composite crystal heat capacity laser with different bonding lengths in double-ended bonding

#### 4 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器应力场分析

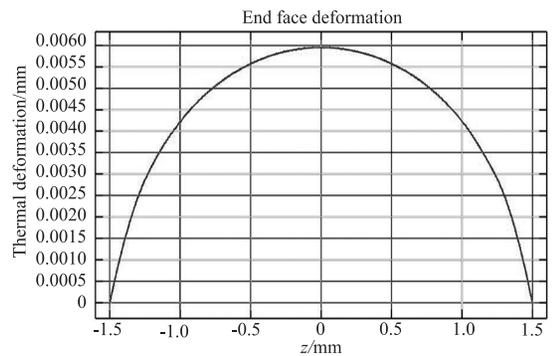
工作条件与图 2 一致时,泵浦阶段所受最大应力为  $3.70395 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ ,产生的最大形变为  $5.9515 \mu\text{m}$ 。图 5 为 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器应力场图组,图 6 为 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器热形变图组。



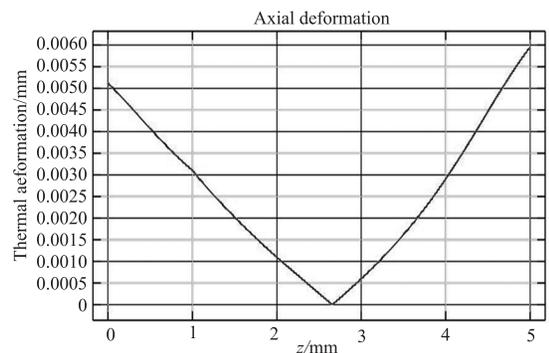
(b)LD端泵Yb:YAG复合晶体的形变侧视图

图5 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器应力场图组

Fig. 5 LD end pump Yb : YAG composite crystal heat capacity laser stress field group



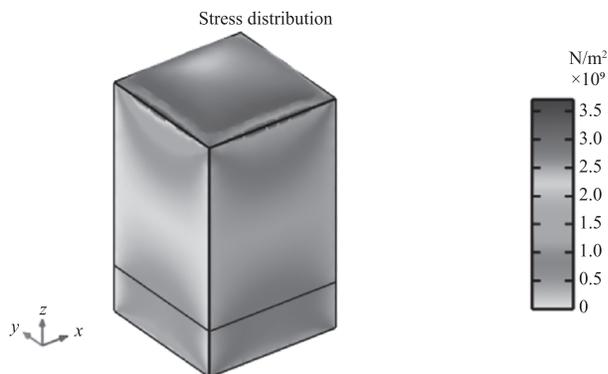
(a)LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器最大形变处的x轴向形变分布



(b)LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器泵浦入射中心的z轴形变分布

图6 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器热形变图组

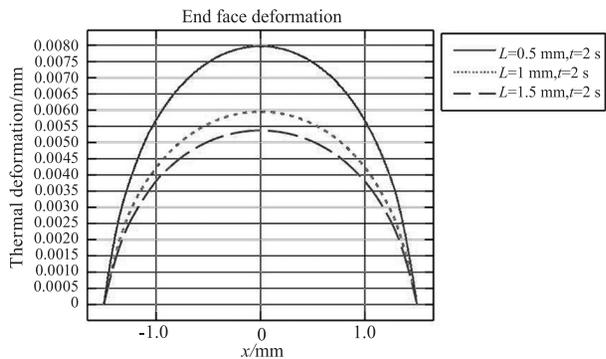
Fig. 6 Thermal deformation diagram of LD end pump Yb : YAG composite crystal heat capacity laser group



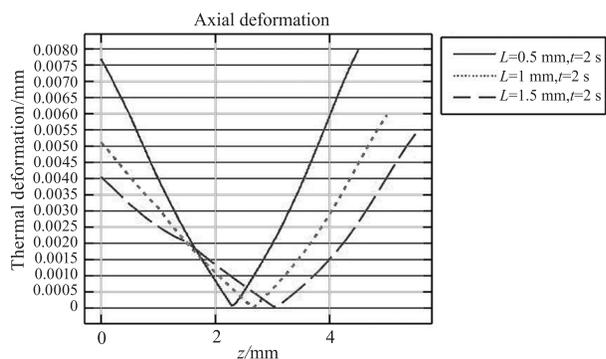
(a)LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器应力场三维图

#### 4.1 不同键合长度时 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器应力场分析

只改变键合长度,其他条件与图 2 一致,则键合长度分别为 0.5 mm、1 mm、1.5 mm 时泵浦阶段最大形变为  $7.9725 \mu\text{m}$ 、 $5.9515 \mu\text{m}$ 、 $5.3741 \mu\text{m}$ 。图 7 为不同键合长度时 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器热形变图组。热形变与泵浦温度正相关,因此复合晶体的散热性能越好,热形变越小。



(a) LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器最大形变处的x轴向形变分布



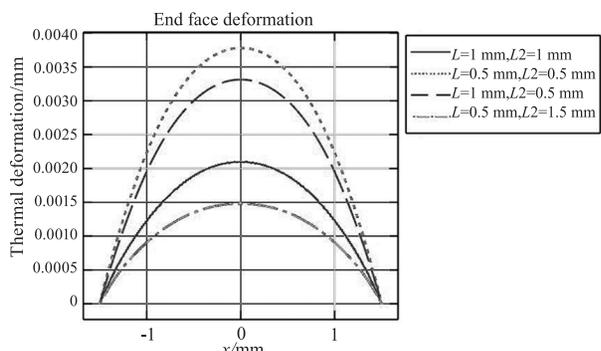
(b)不同键合长度时LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器泵浦入射中心的z轴形变分布

图 7 不同键合长度时 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器热形变图组

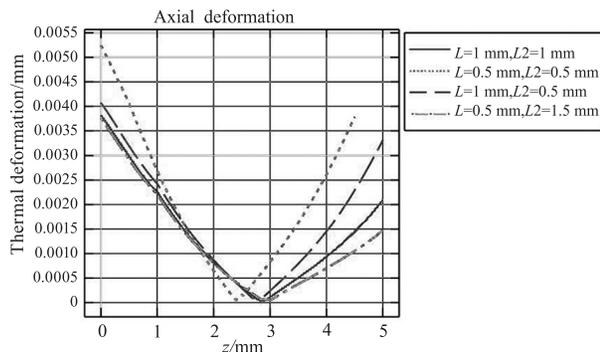
Fig. 7 Thermal deformation diagram of LD end-pumped Yb : YAG composite crystal heat capacity laser with different bonding lengths

#### 4.2 不同键合方式时 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器应力场分析

条件与图 2 一致,键合方式分别为单端键合和双端键合,前后端面的键合长度都为 1 mm,泵浦阶段最大形变量为 2.0958  $\mu\text{m}$ ;使双端键合前后端面键合长度分别为 0.5 mm/0.5 mm、1 mm/0.5 mm、1 mm/1.5 mm 进行对照实验,泵浦阶段最大形变量为 3.7793  $\mu\text{m}$ 、3.3134  $\mu\text{m}$ 、1.4817  $\mu\text{m}$ 。图 8 为双端键合时不同键合长度组合的 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器热形变图组。



(a)不同键合长度组合的LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器最大形变处的x轴向形变分布



(b)不同键合长度组合的LD端泵Yb:YAG复合晶体热容激光器泵浦入射中心的z轴形变分布

图 8 双端键合时不同键合长度组合的 LD 端泵 Yb : YAG 复合晶体热容激光器热形变图组

Fig. 8 LD-end pump Yb : YAG composite crystal heat capacity laser thermal deformation diagram group

### 5 结论

本文利用泊松方程和有限元分析法,对激光二极管端面泵浦的热容激光器 Yb : YAG 复合晶体的温度场、应力场及形变场进行了分析,并定量分析了键合长度及键合方式对温度场与形变场的影响。得到以下研究结果:键合是一种能有效提高晶体散热性能的手段,主要起散热作用的是泵浦光入射的面,其散热性能的提高与键合长度呈非线性正相关;若以泵浦功率为 50 W、泵浦光高斯半径为 300  $\mu\text{m}$  的激光二极管对晶体尺寸为 3 mm  $\times$  3 mm  $\times$  4 mm、键合长度为 1 mm、键合方式为单端键合,且掺杂浓度为 5.0 at. % 的 Yb : YAG 复合晶体端面进行泵浦,且工作时长为 2 s,晶体内部场的最高温升为 248  $^{\circ}\text{C}$ 、最大热形变量为 5.9515  $\mu\text{m}$ 、最大应力为 3.70395  $\times 10^9 \text{ N/m}^2$ 。研究结果对激光二极管泵浦的 Yb : YAG 热容激光器的设计提供了理论依据。

#### 参考文献:

[1] Ding Yuanhao, Liang Sanyong, Zong Siguang. Design and implementation of underwater pulse laser ranging system [J]. Laser & Infrared, 2023, 53 (12) : 1834 - 1839. (in Chinese)  
丁元昊,梁善永,宗思光.水下高重频激光测距系统设计与实现[J].激光与红外,2023,53(12):1834-1839.

[2] Xu Zhi, Zhang Zewen, Lu Yujie, et al. Laser ultrasonic evaluation of AlCuMg based on frequency domain attenuation coefficient [J]. Laser & Infrared, 2023, 53 (12) : 1846 - 1854. (in Chinese)  
徐值,张泽文,鲁宇杰,等.基于频域衰减系数的 AlCuMg

- 铝合金激光超声评价[J]. 激光与红外,2023,53(12):1846-1854.
- [3] Cao Haisong, Ma Yuping, Peng Yubin, et al. Research progress of ultrashort pulse laser processing of carbon fiber composites [J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53 (12): 1810 - 1821. (in Chinese)  
曹海松, 马玉平, 彭玉斌, 等. 超短脉冲激光加工碳纤维复合材料研究进展[J]. 激光与红外,2023,53(12):1810-1821.
- [4] Zhang Lingling, Chen Yuan, Li Guoqi, et al. High energy dual-slabs heat capacity laser with off-axis hybrid resonator[J]. *Applied Laser*, 2017, 37(6):893-897. (in Chinese)  
张玲玲, 陈媛, 李国旗, 等. 离轴混合腔高能双板条热容激光器[J]. 应用激光,2017,37(6):893-897.
- [5] Ma Xiuhua, Tang Qianjin, Hu Qiquan, et al. Numerical simulation of cooling methods for solid heat capacity laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18 (12):1937-1940. (in Chinese)  
马秀华, 唐前进, 胡企铨, 等. 固体热容激光器冷却方式的数值模拟[J]. 强激光与粒子束,2006,18(12):1937-1940.
- [6] Tan Jia, Hu Jian, Wang Ke, et al. Nonlinear analysis of thermal induced birefringence of YAG laser crystal [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(4):520-524. (in Chinese)  
田佳, 胡健, 王珂, 等. YAG 激光晶体热致双折射的非线性分析[J]. 激光技术,2015,39(4):520-524.
- [7] Zhi Yin, Li Long, Shi Peng, et al. Temperature field of pulse LD end pumped Nd : YAG crystal[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2):491-496. (in Chinese)  
支音, 李隆, 史彭, 等. 脉冲 LD 端面泵浦 Nd : YAG 晶体温场研究[J]. 红外与激光工程,2015,44(2):491-496.
- [8] Lin Lin, Guo Zhen, Wang Shiyu, et al. Analysis of themral axial symmetry in the LD side-pumped laser [J]. *Journal of Xidian University*, 2011, 38 (2): 141 - 145. (in Chinese)  
林林, 过振, 王石语, 等. 二极管抽运固体激光器热效应的非对称性分析 [J]. 西安电子科技大学学报, 2011, 38(2):141-145.
- [9] Shi Peng, Bai Bing, Li Long, et al. Thermal analysis of LD end-pumped rod Nd : YAG heat capacity laser crystal [J]. *Laser Technology*, 2013, 37(3):321-325. (in Chinese)  
史彭, 白冰, 李隆, 等. 端面抽运 Nd : YAG 圆棒热容激光晶体热分析[J]. 激光技术,2013,37(3):321-325.
- [10] Shi Peng, Chang Rui, Chen Wen, et al. Influence of the third thermal boundary condition on the thermal effect of laser crystal [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38 (10): 2539 - 2542. (in Chinese)  
史彭, 常锐, 陈文, 等. 第三类热边界条件对激光晶体热效应的影响[J]. 光子学报,2009,38(10):2539-2542.
- [11] Yang Hongru, Zuo Tiechuan. Investigation on thermal effects and output of all solid state miniature Yb : YAG laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2003, 32(8):907-910. (in Chinese)  
杨鸿儒, 左铁钊. 全固体小型 Yb : YAG 激光器热效应及输出特性研究[J]. 光子学报,2003,32(8):907-910.
- [12] Shao Ming, Zhang Liwen. Performance of Yb : YAG laser [J]. *Laser Journal*, 2003, 24(5):15-17. (in Chinese)  
邵铭, 张立文. Yb : YAG 激光器特性[J]. 激光杂志, 2003, 24(5):15-17.
- [13] Gan Ansheng, Li Long, Shi Peng. Thermal effect of Yb : YAG slice laser by diode laser end-pumped [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(4):631-635. (in Chinese)  
甘安生, 李隆, 史彭. 激光二极管端面泵浦 Yb : YAG 薄片激光器的热效应[J]. 光子学报,2008,37(4):631-635.