

激光与光电子学进展

连续 LD 端面泵浦方片 YAG/Yb:YAG 复合晶体
热效应分析李隆^{1,2}, 牛娟^{1*}, 张春玲^{1,2}, 杨建华¹¹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 以激光二极管(LD)端面泵浦方形 YAG/Yb:YAG 复合晶体为研究对象,采用有限元分析方法,并根据热传导理论以及连续 LD 端面泵浦方形 YAG/Yb:YAG 的工作特点,系统分析了泵浦功率、YAG 晶体厚度及截面尺寸对激光晶体温度、热应力及热形变的影响。计算过程中经光学耦合系统准直聚焦的泵浦光斑半径为 400 μm 。研究结果表明:当 Yb:YAG 晶体尺寸为 4 mm \times 4 mm \times 1 mm, YAG 晶体厚度为 0.1 mm 时,随着泵浦功率由 60 W 增加为 80 W, YAG/Yb:YAG 方片晶体内最高温升明显增大,由 37.19 $^{\circ}\text{C}$ 变为 82.92 $^{\circ}\text{C}$;当 YAG 晶体厚度由 0 mm 增加为 0.5 mm 时,薄片晶体内最大热应力由 26.93 MPa 变为 10.438 MPa,最高温升也随之降低了 18.18 $^{\circ}\text{C}$,但由热应力产生的热形变基本保持不变。利用方片 YAG/Yb:YAG 复合晶体能够有效降低激光晶体内最大热应力及最高温升,对全固态 Yb:YAG 激光器的设计及高功率输出具有指导意义。

关键词 激光器; 激光二极管; YAG/Yb:YAG; 热效应; 复合晶体

中图分类号 O434 文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP213005

Thermal Effect Analysis of Continuous LD End-Pumped Square
YAG/Yb : YAG Composite CrystalLi Long^{1,2}, Niu Juan^{1*}, Zhang Chunling^{1,2}, Yang Jianhua¹¹School of Science, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China;²Institute for Applied Physics, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, Shaanxi, China

Abstract Laser diode (LD) end-pumped square YAG/Yb:YAG composite crystal is taken as the study specimen. Based on the theory of heat conduction and working characteristics of continuous LD end-pumped square YAG/Yb:YAG, the effects of pump power, thickness, and section size of YAG crystal on temperature, thermal stress, and thermal deformation of laser crystal is systematically investigated using finite element method. The pump spot radius of collimation focused using an optical coupling system is 400 μm in the calculation process. The findings show that when the size of Yb:YAG crystal is 4 mm \times 4 mm \times 1 mm, and the thickness of YAG crystal is 0.1 mm, the maximum temperature rise in YAG/Yb:YAG square crystal increases from 37.19 $^{\circ}\text{C}$ to 82.92 $^{\circ}\text{C}$ with the increase in pump power from 60 W to 80 W. When the YAG crystal's thickness increases from 0 mm to 0.5 mm, the maximum thermal stress changes from 26.93 MPa to 10.438 MPa, and the maximum temperature decreases by 18.18 $^{\circ}\text{C}$, but the thermal deformation due to thermal stress remains unchanged. The use of square YAG/Yb:YAG composite crystal can efficiently decrease the maximum thermal stress and temperature rise in laser crystal, which has guiding significance for the design and high power output of all-solid Yb:YAG laser.

Key words lasers; laser diode; YAG/Yb:YAG; thermal effect; composite crystal

收稿日期: 2021-10-19; 修回日期: 2021-11-21; 录用日期: 2021-11-29; 网络首发日期: 2021-12-10

基金项目: 国家自然科学基金(11705136)

通信作者: *2628492591@qq.com

1 引言

激光二极管(LD)泵浦的全固态 Yb:YAG 激光器体积小、稳定性良好,并以其较长的荧光寿命、高转换效率等优点,成为固体激光器领域研究的热点之一,广泛应用于工业、通信、国防、医疗以及科研等领域^[1-4]。相比于 Nd:YAG 激光晶体,掺 Yb³⁺的激光晶体具有以下优点:1)较长的荧光寿命,常温下 Yb³⁺的荧光寿命为 0.95 ms, Nd³⁺的荧光寿命仅为 0.26 ms,更有利于有效储存能量^[5-6];2)较宽的发射带和吸收带,有利于获得宽调谐激光输出,使得掺 Yb³⁺固体激光器对泵浦源的温控要求比较低^[7];3)激活粒子的掺杂浓度高、能级结构简单,理论上不存在浓度猝灭,没有激发态吸收,光-光转换效率高,同时,泵浦波长跟激光波长接近,量子缺陷低,能有效降低激光晶体的热负荷^[8-9]。

但是,在 Yb:YAG 晶体吸收泵浦光产生荧光辐射的同时,部分光会转变为热能在晶体内部形成非均匀温度场,导致晶体端面发生热形变,激光器的性能受到严重的影响^[10-11]。通过掺杂晶体和非掺杂晶体进行热键合形成的复合晶体,可以改善固体激光器的工作性能。杨丽颖等^[12]提出了复合晶体的概念并研究了当 LD 侧面泵浦带有无掺杂端的复合晶体 Tm/Ho:YAG 时,其最大输出功率是 Yb:YAG 晶体的 2 倍。2016 年,Chen 等^[13]采用三个掺杂段和两个非掺杂段的复合 Yb:YAG 晶体板为增益介质,由两个输出波长为 940 nm

的激光二极管进行端面泵浦,获得了最大激光输出功率为 3.54 kW,光转换效率为 41%,斜率效率最高达到 59% 的输出。

本文借助有限元法计算了泵浦功率、键合晶体厚度及截面尺寸等对掺 Yb³⁺复合晶体固体激光器温度场的影响,然后利用力-热耦合方法得到了 YAG/Yb:YAG 复合晶体内热应力及热形变随键合晶体厚度的变化,该研究结果为掺 Yb³⁺固体激光器的设计提供了理论参考。

2 有限元模型的建立

2.1 LD 端面泵浦方形 YAG/Yb:YAG 复合晶体 z 型折叠腔激光器的结构及几何建模

泵浦光通过耦合聚焦器聚焦到 YAG/Yb:YAG 晶体键合部分端面中心,图 1 为 LD 端泵方形 YAG/Yb:YAG 复合晶体实验装置简图。输入镜 M1 是平面镜,表面镀有增透膜(HT, 940 nm)和高反膜(HR, 1030 nm);M2、M4 均为平面反射镜,反射面镀有高反膜(HR, 1030 nm);M3 为耦合输出镜,对于 1030 nm 波长的透射率为 6%。YAG/Yb:YAG 复合晶体几何结构如图 2 所示,LD 发出的光沿着 YAG 晶体端面中心入射,LD 中心波长为 940 nm, YAG/Yb:YAG 复合晶体两端面均镀有 940 nm 和 1030 nm 的双波长增透膜(透射率 > 99.8%)。图 2(a)和(b)分别为复合晶体的长和宽, l_0 为 Yb:YAG 晶体厚度, l 为 YAG 晶体厚度。表 1^[14]为计算中所用参数。

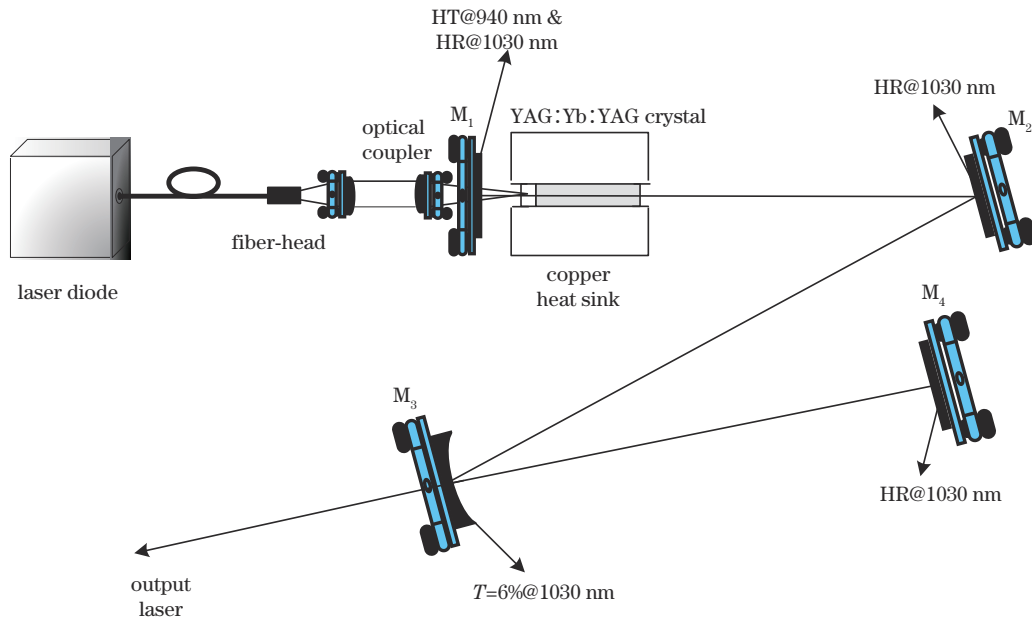


图 1 LD 端面泵浦方形 YAG/Yb:YAG 复合晶体 z 型折叠腔激光器实验装置简图

Fig. 1 Experimental setup of LD end-pumped square YAG/Yb:YAG composite crystal z-shaped fold cavity laser

2.2 热传导方程及边界条件

1) 热传导方程

在泵浦面上, YAG/Yb:YAG 方片晶体吸收泵浦

光产生的热功率密度 $q(x, y, z)$ 为

$$q(x, y, z) = \alpha \eta I(x, y, z), \quad (1)$$

式中: η 为热转换系数, $\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_L$; λ_p ($\lambda_p = 940 \text{ nm}$)

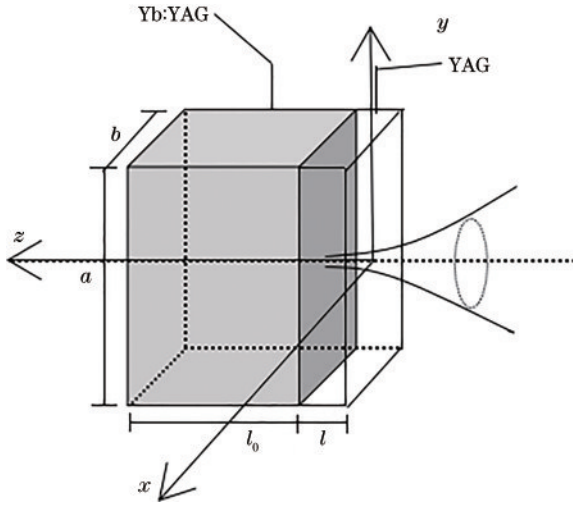


图 2 LD 端泵方形 YAG/Yb:YAG 复合晶体几何结构图
Fig. 2 Geometry diagram of LD end-pumped square YAG/Yb:YAG composite crystal

表 1 计算中所用到的参数

Table 1 Parameters used in the calculation

Parameter	Value
Pump power /W	60/70/80
Melting point /°C	1970
Density /($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	4.56
Thermal conductivity /($\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	14
Specific heat /($\text{J}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$)	0.59
Radius of disk / μm	400
Coefficient of thermal expansion /°C	8.2×10^{-6}
Poisson's ratio	0.3
Young's ration /MPa	310000

为泵浦光波长; λ_L ($\lambda_L = 1030 \text{ nm}$) 为振荡激光波长; α 为方片 Yb:YAG 晶体对 940 nm 波长泵浦光的吸收系数 ($\alpha = 8.28 \text{ cm}^{-1}$)^[2]; $I(x, y, z)$ 为泵浦端面的光强。当 YAG/Yb:YAG 激光器达到输出功率稳定、温度恒定的稳定工作状态时, 方片 Yb:YAG 晶体的热传导方程可表示为

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

式中: k 为 Yb:YAG 晶体热导率; $U(x, y, z)$ 为晶体的温度分布。

2) 边界条件

利用紫铜热沉对方片 YAG/Yb:YAG 复合晶体背部强制冷却, 使其温度保持恒定, 数学上假设为 0。根据方片模型特点建立直角坐标系, 坐标原点位于泵浦端面中心处, YGA/Yb:YAG 方片晶体端面长、宽分别用 a 、 b 表示, Yb:YAG 晶体厚度为 l_0 , YAG 晶体厚度为 l 。泵浦面 ($z=0$) 上的初始温度也为 0, 则边界条件

表示为

$$\begin{cases} u(x, y, 0) = 0 \\ u(x, y, l + l_0) = 0 \\ \left. \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=0} = 0 \\ \left. \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial z} \right|_{z=l+l_0} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

2.3 热源

LD 泵浦光入射到 YAG/Yb:YAG 复合晶体未掺杂端面上, 在晶体内部产生了热传导性质的内热源, 具有发热率的内热源产生热从而引起 YAG/Yb:YAG 复合晶体内部的温度分布变化。泵浦光斑近似为圆形高斯分布, 激光器工作过程中 Yb:YAG 晶体吸收泵浦光, 在 (x, y, z) 点附近产生的单位体积内的热源功率为

$$Q(x, y, z) = \frac{dP(x, y, z)}{dV} = \beta I_p(x, y, z), \quad (4)$$

式中 $\beta = \alpha \times \eta$; $I_p(x, y, z)$ 为激光器工作过程中晶体内部 (x, y, z) 点处的泵浦光强度; $P(x, y, z)$ 为热源功率。根据吸收定律可知, 泵浦光在 z 位置沿 z 轴传播的光强^[15]为

$$I_p(x, y, z) = I_{op} \cdot \exp\left[\frac{-2(x^2 + y^2)}{\omega_p^2}\right] \cdot \exp[-\alpha(z-l)], \quad (5)$$

式中: ω_p 为泵浦光光斑半径; I_{op} 为入射光强的最大值。

$$I_{op} = \frac{2P_{in}}{\pi\omega_p^2}, \quad (6)$$

式中: P_{in} 为入射到方片 YAG/Yb:YAG 复合晶体泵浦端面的功率。因此可以计算出热源表达式为

$$Q(x, y, z) = \frac{2\alpha\eta P \exp[-2(x^2 + y^2)/\omega_p^2] \cdot \exp[-\alpha(z-l)]}{\pi\omega_p^2}, \quad (7)$$

式中: P 为泵浦功率, 分别取 60 W、70 W、80 W。

3 温度和热应力

3.1 晶体温度随泵浦功率、键合长度及截面尺寸的变化

利用有限元方法计算方形 YAG/Yb:YAG 薄片晶体的温度场分布, 图 3 为晶体泵浦面最高温升分布图。当泵浦功率 $P = 70 \text{ W}$, 光斑半径 $\omega = 400 \mu\text{m}$, Yb:YAG 晶体厚度 $l_0 = 1 \text{ mm}$, YAG 晶体厚度 $l = 0.1 \text{ mm}$ 时, 模拟结果显示: YAG/Yb:YAG 复合晶体内部最高温升位于泵浦面端面中心处, 最高温升可达 $50.08 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

如图 4 所示, 当泵浦功率分别为 60 W、70 W、80 W 时, YAG/Yb:YAG 方片晶体内部沿着 z 轴方向的最大温升依次为 $37.19 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $52.42 \text{ }^\circ\text{C}$ 、 $82.92 \text{ }^\circ\text{C}$ 。随着泵

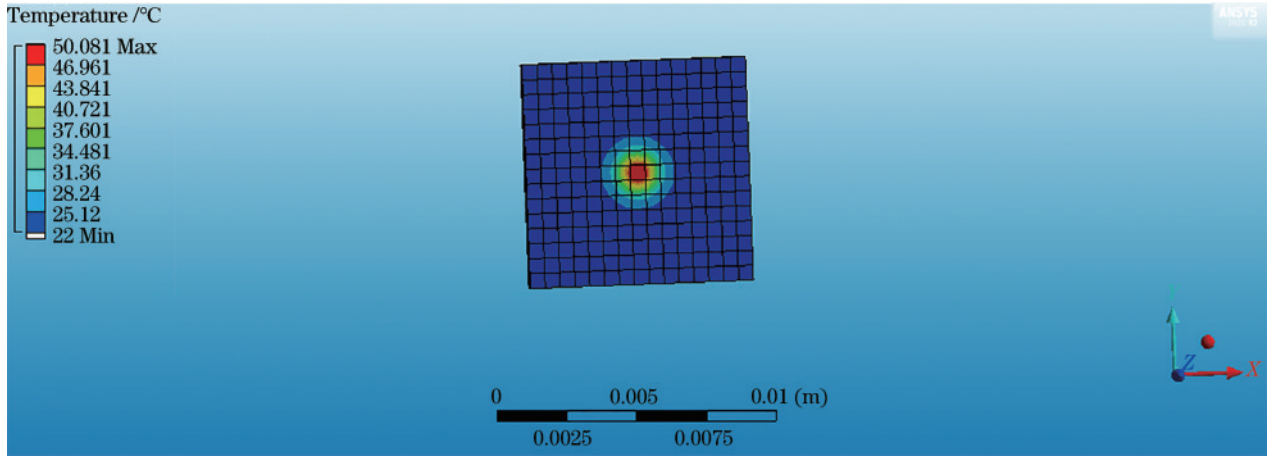


图 3 方形复合晶体泵浦面温度分布图

Fig. 3 Temperature distribution of square composite crystal in pump surface

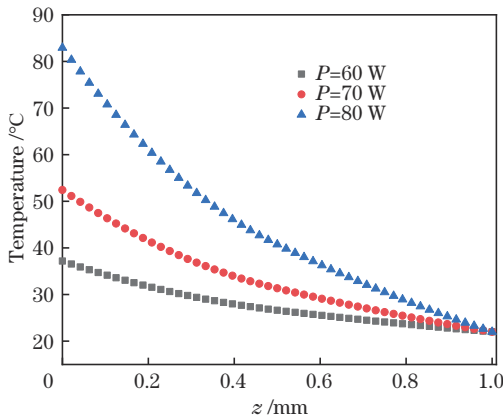


图 4 不同泵浦功率下方形复合晶体内沿 z 轴的温度变化

Fig. 4 Temperature variation along z axis in the square composite crystal under different pump powers

泵功率的增大, 晶体内温升也会增大。为了解决高功率泵浦时晶体内热效应问题, 本文提出复合晶体概念, 在计算过程中引入复合晶体模型来降低激光晶体内温升。由图 5 和图 6 可知: 当泵浦功率为 70 W 时, 复合晶

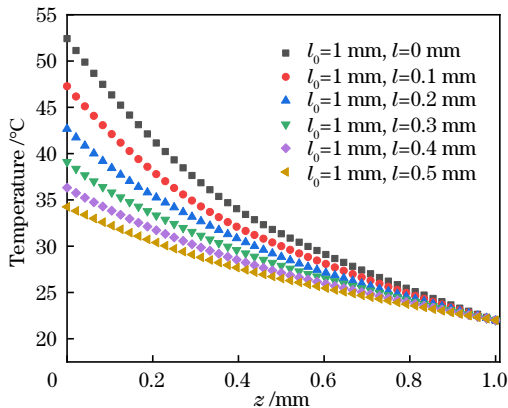


图 5 键合不同长度 YAG 的复合晶体中增益晶体内沿 z 轴温度变化

Fig. 5 Temperature variation along z axis of gain crystals of composite crystals bonded with YAG of different lengths

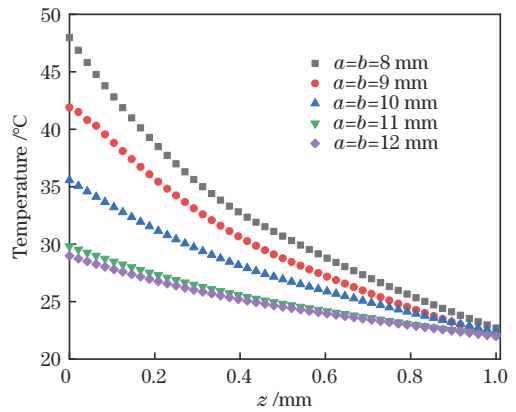


图 6 不同截面尺寸的方形 YAG/Yb:YAG 复合晶体中增益晶体内沿 z 轴的温度变化

Fig. 6 Temperature variation along z axis of gain crystals of square YAG/Yb:YAG composite crystals of different cross section sizes

体截面边长为 8 mm, YAG 晶体厚度由 0 mm 增加至 0.5 mm, 晶体内沿着 z 轴方向上的最高温升由 52.42 °C 降为 24.24 °C; 在泵浦功率不变的情况下, 取 YAG 晶体厚度为 0.1 mm, 当键合晶体截面尺寸由 8 mm × 8 mm 变为 12 mm × 12 mm 时, 晶体内沿着 z 轴方向上的最高温升由 47.93 °C 降低为 28.98 °C。同时, 当 YAG 晶体厚度及截面边长分别增加至 0.4 mm 和 11 mm 时, 继续增加键合厚度及截面尺寸, 对降低复合晶体内温升效果不再明显。

3.2 晶体端面热形变随键合长度的变化

在计算方形 YAG/Yb:YAG 复合晶体温度场的基础上, 利用温度-力学间接耦合的方法得到了激光晶体的热形变场分布。

当泵浦功率为 70 W, Yb:YAG 方片晶体尺寸为 8 mm × 8 mm × 1 mm, 键合晶体厚度为 0.1 mm 时, YAG/Yb:YAG 复合晶体端面热形变场二维分布如图 7 所示, 复合晶体泵浦面中心处的热形变最明显, 并向周

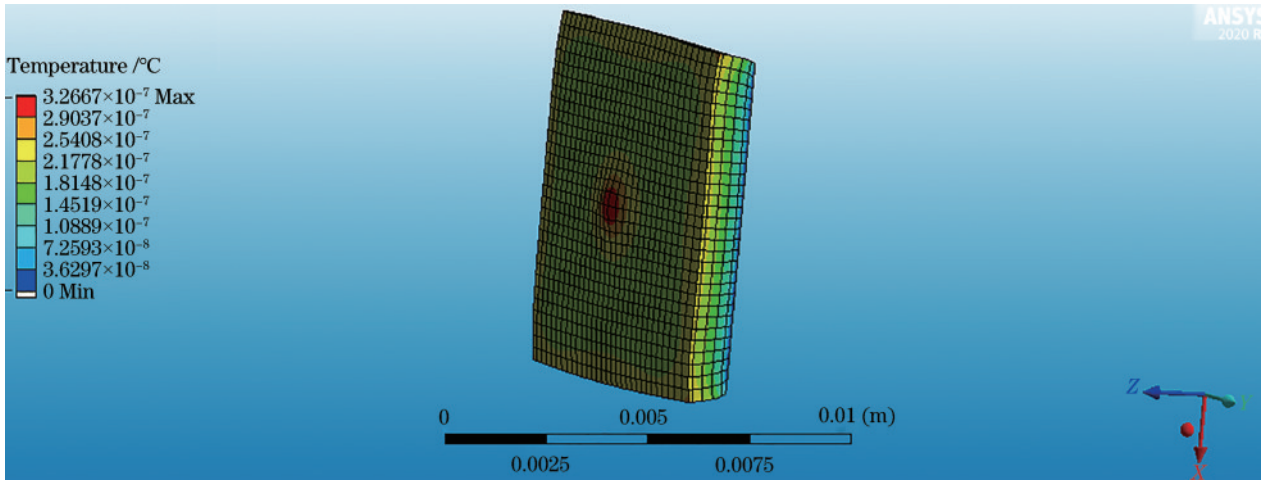


图 7 方形 YAG/Yb:YAG 复合晶体泵浦面热形变分布图

Fig. 7 Thermal deformation distribution of square YAG/Yb:YAG composite crystal in pump surface

围逐步减小,形成以泵浦光中心为圆心的圆形凸包。随后改变复合晶体未掺杂端(YAG 端)厚度,如图 8 所示,当 l 分别为 0 mm, 0.1 mm, 0.2 mm, 0.3 mm 时,晶体端面最大热形变量分别为 0.446 μm 、0.381 μm 、0.375 μm 、0.370 μm ,说明利用方形 YAG/Yb:YAG 复合晶体能够略降低晶体端面热形变,但随着键合晶体厚度 l 的增加热形变分布几乎不受影响。

3.3 晶体端面热应力随键合长度的变化

通过以上分析可知,晶体端面热形变几乎不受键合厚度的影响,造成这一结果的原因是晶体内热应力分布。在与热形变分析同等条件下计算 YAG/Yb:YAG 方形复合晶体内热应力分布情况,图 9 为方形复合晶体泵浦端面热应力分布图。由图 9 可知,晶体内受到的最大热应力位于泵浦面中心处并向周围逐渐减小,最大热应力为 20.07 MPa。

如图 10 所示,当 YAG 晶体厚度由 0 增加为 0.5 mm 时,激光晶体内最大热应力由 26.92 MPa 降低为

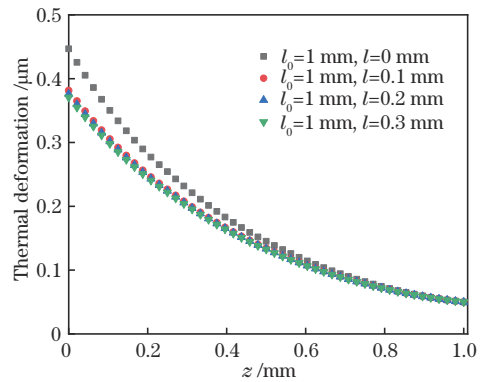


图 8 不同键合厚度的方形 YAG/Yb:YAG 复合晶体沿 z 轴的热形变曲线

Fig. 8 Thermal deformation curves of square YAG/Yb:YAG composite crystals with different bonding thicknesses along the z axis

10.438 MPa,热应力的减小有助于提升输出激光的稳定性及功率。

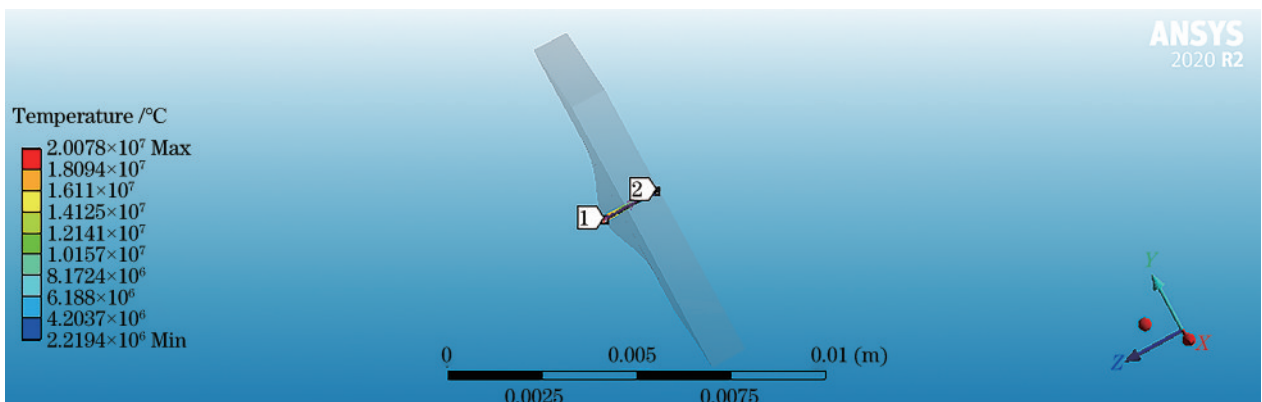


图 9 方形 YAG/Yb:YAG 复合晶体泵浦面热应力分布图

Fig. 9 Thermal stress distribution of square YAG/Yb:YAG composite crystal in pump surface

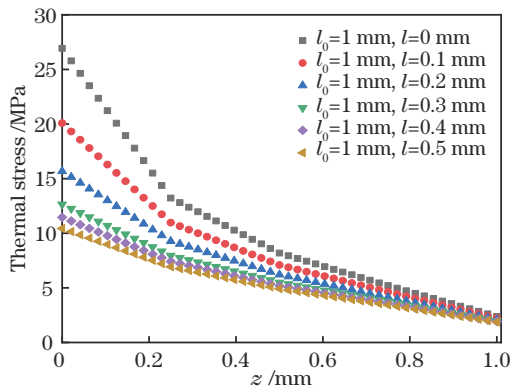


图 10 不同键合厚度的方形 YAG/Yb:YAG 复合晶体沿 z 轴的热应力变化

Fig. 10 Thermal stress variation along z axis of square YAG/Yb:YAG composite crystals with different bonding thicknesses

4 结 论

本文通过有限元分析法研究了 LD 端面泵浦方片形 YAG/Yb:YAG 复合晶体固体激光器的热效应。定量计算了泵浦功率、键合晶体厚度及截面面积对热稳态下 YAG/Yb:YAG 复合晶体中心温度、热形变及热应力的影响。由模拟结果可知,随着泵浦功率由 60 W 增加为 80 W,复合晶体内最高温升增加了 45.73 °C。本文利用键合晶体能够解决高功率泵浦时的热效应问题,当键合晶体截面边长由 8 mm 增加至 12 mm 时,晶体内最高温升降低了 18.98 °C,而随着键合晶体厚度的适度增加,YAG/Yb:YAG 晶体内最高温升降低了 18.18 °C,最大热应力降低了 16.48 MPa。因此,当采用复合晶体为激光器增益介质时,其激光晶体温度和热应力都显著下降,从而提升了掺 Yb³⁺ 固体激光器的输出功率和可靠性。

参 考 文 献

[1] 周宗仁. 基于 ANSYS 的激光晶体热效应仿真研究[J]. 软件导刊, 2019, 18(12): 93-97.
Zhou Z R. Research on thermal effect of composite crystal based on ANSYS[J]. Software Guide, 2019, 18(12): 93-97.

[2] 耿鹰鸽, 李隆, 潘晓瑞, 等. LD 端面泵浦变热导率圆片 Yb:YAG 激光器的热效应[J]. 光学技术, 2017, 43(2): 103-107.
Geng Y G, Li L, Pan X R, et al. Thermal effect of variable thermal-conductivity circular Yb:YAG crystal end pumped by pulse LD[J]. Optical Technique, 2017, 43(2): 103-107.

[3] 程小劲, 牛金富, 徐剑秋. 部分抽运的板条激光器的热效应分析[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 854-858.
Cheng X J, Niu J F, Xu J Q. Thermal effects in partially laser-diode-pumped slab lasers[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 854-858.

[4] 刘东升, 王金川, 徐浏, 等. 长脉宽大能量 Yb:YAG 平面波导激光放大器[J]. 中国激光, 2021, 48(16): 1601004.
Liu D S, Wang J C, Xu L, et al. Long pulse laser amplification of Yb:YAG planar waveguide with high energy[J]. Chinese Journal of Lasers, 2021, 48(16): 1601004.

[5] Chanteloup J C, Albach D. Current status on high average power and energy diode pumped solid state lasers [J]. IEEE Photonics Journal, 2011, 3(2): 245-248.

[6] Bruesselbach H W, Sumida D S, Reeder R A, et al. Low-heat high-power scaling using InGaAs-diode-pumped Yb:YAG lasers[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1997, 3(1): 105-116.

[7] Rutherford T S, Tulloch W M, Sinha S, et al. Yb:YAG and Nd:YAG edge-pumped slab lasers[J]. Optics Letters, 2001, 26(13): 986-988.

[8] 乔焱. LD 抽运全固态激光晶体热效应的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2012: 11-15.
Qiao Y. Thermal effect of LD end-pumped laser crystal with circular cross-section[D]. Jinan: Shandong Normal University, 2012: 11-15.

[9] 宋恩茂, 朱广志, 王海林, 等. Yb:YAG 薄片多程激光放大器的设计及实验研究[J]. 光学学报, 2019, 39(12): 1214001.
Song E M, Zhu G Z, Wang H L, et al. Design and experimental investigation of Yb:YAG thin-disc multipass laser amplifier[J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(12): 1214001.

[10] 樊素, 侯涛. 基于 ANSYS 的圆截面激光晶体的热变形分析[J]. 激光技术, 2012, 36(2): 285-288.
Fan S, Hou T. Thermal distortion analysis of laser crystal with circular cross-section based on ANSYS[J]. Laser Technology, 2012, 36(2): 285-288.

[11] Bowman S R, Lynn J G, Searles S K, et al. Power scaling of diode-pumped 2 micron lasers[C]//Proceedings of LEOS'93, November 15-18, 1993, San Jose, CA, USA. New York: IEEE Press, 1993: 692.

[12] 杨丽颖, 李嘉强, 张金玉, 等. 半导体激光泵浦复合晶体固体激光器的热效应[J]. 发光学报, 2017, 38(6): 742-746.
Yang L Y, Li J Q, Zhang J Y, et al. Thermal effect of composite crystals solid state lasers pumped by diode laser[J]. Chinese Journal of Luminescence, 2017, 38(6): 742-746.

[13] Chen X M, Xu L, Hu H, et al. High-efficiency, high-average-power, CW Yb:YAG zigzag slab master oscillator power amplifier at room temperature[J]. Optics Express, 2016, 24(21): 24517-24523.

[14] 徐飞, 程小劲, 李超. 主动镜结构 Yb:YAG 激光器的热效应研究[J]. 半导体光电, 2019, 40(3): 347-350.
Xu F, Cheng X J, Li C. Research on the thermal effect of Yb:YAG lasers with active-mirror structure[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2019, 40(3): 347-350.

[15] Gong L Y, Qiao Y Q, Yao M X, et al. LD end-pumped single-ended bonding Tm:LuAG laser[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 103: 103059.