

LD泵浦镶嵌式Yb:YAG微片激光器的热效应分析

李昕阳 李隆 任嘉欣 贺政隆 石镭 宁江浩 张春玲

Thermal effect analysis of LD pumped mosaic Yb:YAG microchip laser

LI Xinyang, LI Long, REN Jiaxin, HE Zhenglong, SHI Pu, NING Jianghao, ZHANG Chunling

引用本文:

李昕阳, 李隆, 任嘉欣, 等. LD泵浦镶嵌式Yb:YAG微片激光器的热效应分析[J]. 应用光学, 2026, 47(1): 219–226. DOI: 10.5768/JAO202647.0107002

LI Xinyang, LI Long, REN Jiaxin, et al. Thermal effect analysis of LD pumped mosaic Yb:YAG microchip laser[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 219–226. DOI: 10.5768/JAO202647.0107002

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202647.0107002>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率金刚石拉曼激光器热效应数值模拟

Numerical simulation of thermal effects in high-power diamond Raman lasers

应用光学. 2023, 44(6): 1201–1211 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610006>

全固态太阳光泵浦激光器热效应分析

Thermal effect analysis of all-solid-state solar pumped laser

应用光学. 2023, 44(6): 1219–1227 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610008>

CO₂激光作用玻璃管的热效应

Thermal effect of CO₂ laser on glass tubes

应用光学. 2024, 45(5): 923–929 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0501006>

Nd:YAG调Q激光器下能级寿命对激光脉冲性能的影响

Influence of energy level lifetime of Nd:YAG Q-switched laser on laser pulse performance

应用光学. 2023, 44(6): 1236–1243 <https://doi.org/10.5768/JAO202344.0610010>

高斯脉冲激光灼烧TC4钛合金时变温度场特性

Time-varying temperature field characteristics of TC4 titanium alloy by Gaussian-pulsed laser ablation

应用光学. 2025, 46(3): 604–611 <https://doi.org/10.5768/JAO202546.0301008>

谐振腔状态对高功率Nd:YAG脉冲固体激光器光束指向稳定性的影响

Influence of resonant cavity state on beam pointing stability of high-power Nd:YAG pulsed solid-state laser

应用光学. 2024, 45(6): 1298–1306 <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0607003>



关注微信公众号，获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2026) 01-0219-08

引用格式: 李昕阳, 李隆, 任嘉欣, 等. LD 泵浦镶嵌式 Yb:YAG 微片激光器的热效应分析 [J]. 应用光学, 2026, 47(1): 219-226.

LI Xinyang, LI Long, REN Jiaxin, et al. Thermal effect analysis of LD pumped mosaic Yb:YAG microchip laser[J]. Journal of Applied Optics, 2026, 47(1): 219-226.



在线阅读

LD 泵浦镶嵌式 Yb:YAG 微片激光器的热效应分析

李昕阳¹, 李隆^{1,2}, 任嘉欣¹, 贺政隆¹, 石镨¹, 宁江浩¹, 张春玲^{1,2}

(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) 端面泵浦的微片激光器会在晶体内部发生废热堆积的问题, 基于镶嵌式 Yb:YAG 微片激光晶体的工作特点, 建立了侧面与底面始终冷却, 泵浦端面与空气热交换的 Yb:YAG 微片热模型。根据热传导方程, 对 Yb:YAG 微片的温度场、应力场及热形变场使用有限元分析法进行计算, 并定量分析了泵浦功率、泵浦半径与高斯阶次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 μm 的激光二极管对底面半径为 3 mm, 柱高为 0.5 mm, 且掺杂浓度为 8.0at.% 的 Yb:YAG 微片端面进行泵浦, 晶体内部场的最高温升为 67.75 K, z 轴方向最大热形变量为 1.8351×10^{-4} mm, 泵浦端面最大形变量为 1.8355×10^{-4} mm, 最大应力为 $1.249 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 。研究结果对激光二极管端面泵浦的 Yb:YAG 微片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

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202647.0107002

Thermal effect analysis of LD pumped mosaic Yb:YAG microchip laser

LI Xinyang¹, LI Long^{1,2}, REN Jiaxin¹, HE Zhenglong¹, SHI Pu¹, NING Jianghao¹, ZHANG Chunling^{1,2}

(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 waste heat accumulation occurs inside the crystal when the laser diode (LD) end-pumped microchip laser operates. Based on the working characteristics of mosaic Yb:YAG microplate laser crystal, a thermal model of Yb:YAG microplate with cooling side and bottom and heat exchange between pump end and air is established. According to the heat conduction equation, the temperature field, stress field and thermal deformation field of Yb:YAG microplate are calculated by finite element analysis, and the effects of pump power, pump radius and Gaussian order on the temperature field and thermal deformation field are quantitatively analyzed. The results show that if the laser diode with pump power of 50 W and pump Gaussian radius of 300 μm YAG microplate end-pumped, the maximum temperature rise of the crystal internal field is 67.75 K, the maximum thermal deformation in z -axis direction is 1.8351×10^{-4} mm, the maximum deformation in pump end-face is 1.8355×10^{-4} mm, and the maximum stress is $1.249 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$. The results provide theoretical basis for the design of laser diode end-pumped Yb:YAG microplate lasers.

Key words: solid state laser; thermal effect; Yb:YAG crystal; temperature field; thermal deformation

收稿日期: 2025-02-26; 修回日期: 2025-06-09

基金项目: 国家自然科学基金 (11705136)

第一作者: 李昕阳, E-mail: 985351292@qq.com

通信作者: 李隆, E-mail: lilong@xauat.edu.cn

引言

激光二极管泵浦的微片激光器 (diode pump microchip laser) 因其具备腔长较短、光束质量好、光强亮度大等特点, 在各个领域都有着广泛应用, 是激光技术研究者们的重点关注对象之一^[1-3]。微片激光器的核心是微片型的激光晶体, 常使用 Nd:YAG、Yb:YAG 等激光晶体作为工作物质。其中, Yb:YAG 的激发性能十分优异, 它有着荧光寿命长、量子亏损低、吸收带宽、吸收系数大等特点^[4], 为微片激光器的小型化提供了必要条件^[5]。然而, 微片激光器在小型化的过程中并未解决晶体热效应带来的废热堆积问题, 该问题严重限制了激光器的光线输出质量和效率, 减小晶体热效应对激光器的影响已经成为激光设计中的关键步骤^[6-8]。

本文通过分析激光二极管泵浦的镶嵌式 Yb:YAG 微片激光器的工作条件, 结合热传导理论, 得出了符合晶体实际工作环境的第三类边界条件。并通过有限元分析法对温度场、应力场及热形变量进行计算, 最后对镶嵌式 Yb:YAG 微片激光器的泵浦功率、光斑半径和高斯阶次进行定量分析, 计算其对温度场和形变量的影响。研究结果可为激光二极管泵浦的镶嵌式 Yb:YAG 微片激光器的设计提供理论依据。

1 LD 端泵镶嵌式 Yb:YAG 晶体热模型

1.1 热模型建立

激光二极管端面泵浦时, 出射的泵浦光经光学器件耦合后从晶体端面入射, 形成易于被激光晶体吸收的 TEM₀₀ 模, 从而实现泵浦光与振荡光之间的模式匹配, 并提高激光输出效率^[9-10]。半径为 3 mm, 厚度为 0.5 mm 的微片型圆柱状激光晶体镶嵌在热沉内, 提高了晶体的散热性能, 图 1 为 LD 端泵镶嵌式 Yb:YAG 晶体示意图。

经光纤耦合后的泵浦光一般可被看作平面光或高斯光束^[11]。由光束的不同分布模式可将其区分为不同阶次的高斯光束, 高阶次的高斯分布形似“礼帽”状^[12], 称为超高斯分布。微片激光晶体泵浦端面上的泵浦光光强分布表达式为^[13]

$$I(r, z) = I_0 \exp\left(-2 \frac{r^{2k}}{\omega_0^{2k}}\right) \exp(-\beta z) \quad (1)$$

式中: I 为泵浦光强度; I_0 为端面几何中心的泵浦光强; r 为端面上点距离光轴的距离; ω_0 为高斯半径; k 为高斯阶次; β 为吸收系数; L 为键合长度。

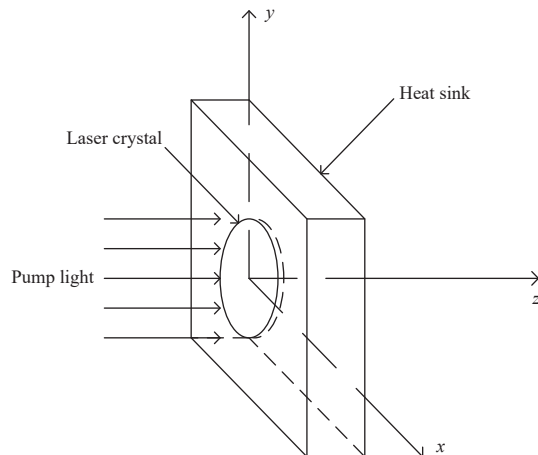


图 1 LD 端泵镶嵌式 Yb:YAG 晶体示意图

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

微片激光器热源的表达式为^[14]

$$q_v(r, z) = \beta \eta I_0 \exp\left(-2 \frac{r^{2k}}{\omega_0^{2k}}\right) \exp[-\beta z] \quad (2)$$

式中 η 为热转换系数。

设 Yb:YAG 微片晶体的温度函数为 $u(r, z, t)$, 则当它处于热平衡状态时, 其遵循的热传导泊松方程分别为

$$\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (3)$$

式中 λ 为热导率。

1.2 模型数据

根据上述理论, 可建立底面半径为 3 mm, 高为 0.5 mm 的柱状微片模型, 该晶体模型掺杂浓度为 8.0 at.%, 此浓度下对 940 nm 泵浦光的吸收系数为 8.28 cm^{-1} ^[15], 导热系数为 $0.13 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, 热膨胀系数为 $7.8 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 泵浦光模型的高斯阶次为 5, 冷却温度 u_0 为 291 K。

1.3 边界条件

微片激光器在泵浦时会产生巨大的热量, 因此通常会使用半导体制冷、循环水冷或风冷等方式进行冷却, 因此在激光器刚开始工作时, 晶体温度应与热沉的温度一致, 故将冷却温度 u_0 记作初始温度, 则有:

$$u(r, z, 0) = u_0 \quad (4)$$

考虑到镶嵌式微片晶体的实际工作状况, 提出以下边界条件^[16-17]:

$$\begin{cases} u(3, z, t) = u_0 \\ u(r, 0.5, t) = u_0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\lambda \frac{\partial u}{\partial z} \Big|_{z=0} = h[u(r, 0, t) - u_0] \quad (6)$$

式(6)为镶嵌式微片激光晶体的冷却条件, 因晶体侧面与底面被导热性能良好的钢膜包裹, 并

与热沉紧密接触, 因此始终受到冷却, 故令晶体侧面及底面始终为冷却水温度。

式(5)和式(6)共同定义的条件为第三类边界条件^[15], $z=0$ 为暴露在空气中的泵浦端面, 其始终与空气存在热交换。其中, h 为空气传热系数。

2 LD 端面泵浦镶嵌式 Yb:YAG 微片温度场分析

令射入端面的泵浦光光斑半径为 $300\text{ }\mu\text{m}$, 功率为 50 W 时, 入射端面最高温升为 67.75 K 。图 2 为激光二极管端泵的 Yb:YAG 微片晶体内部温度场二维图组。图 3 为激光二极管端泵 Yb:YAG 微片晶体温度场三维图组。

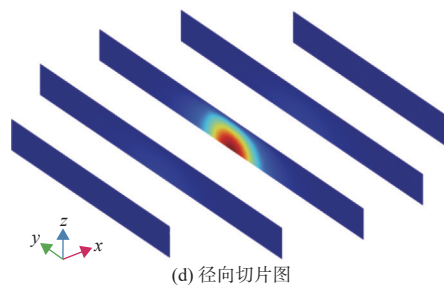
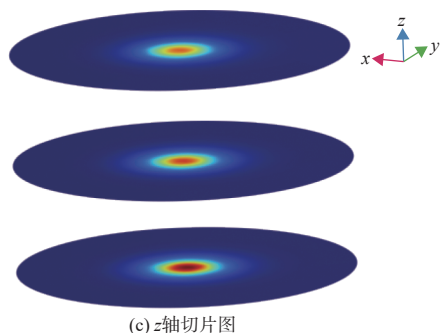
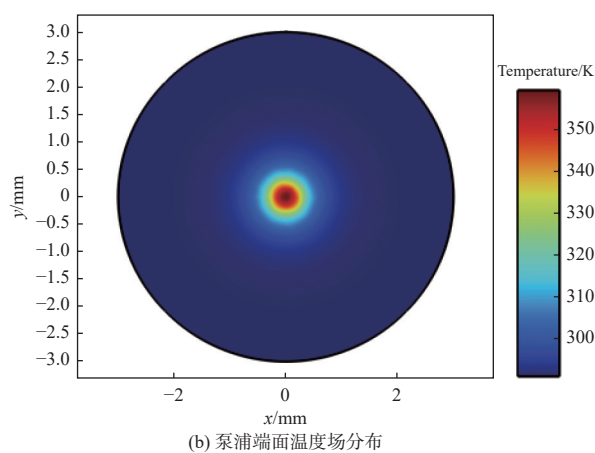
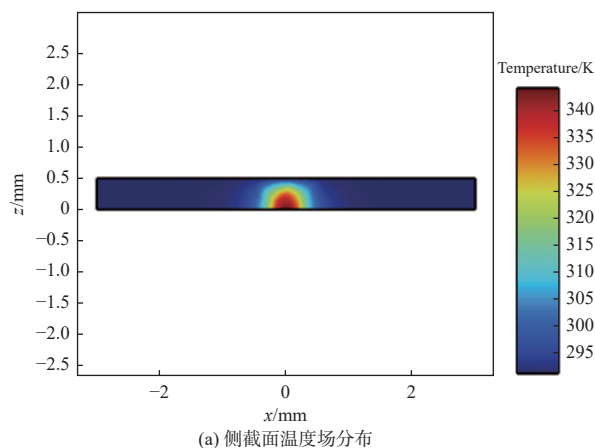


图 2 激光二极管泵浦 Yb:YAG 微片

Fig. 2 Laser diode pumped Yb:YAG microchip

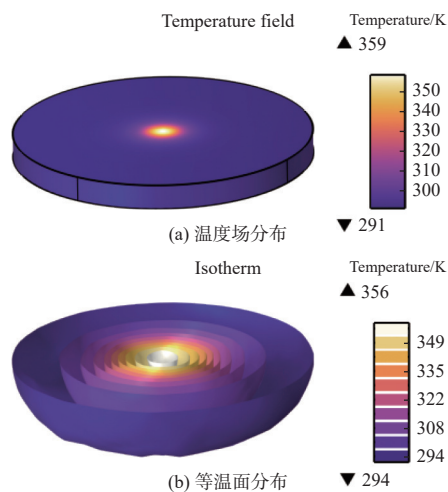


图 3 激光二极管泵浦 Yb:YAG 微片的温度场分布与等温面分布

Fig. 3 Temperature field distribution and isothermal surface distribution of laser diode pumped Yb:YAG microchip

2.1 不同泵浦功率下镶嵌式 Yb:YAG 微片的温度场分布

改变泵浦功率所产生的影响, 不仅与激光输出功率有关, 因热沉积的存在还与晶体温度场紧密相连。控制其他参量不变, 只改变泵浦功率, 当泵浦功率分别为 50 W 、 60 W 、 70 W 时, 其对应的最高温升为 67.75 K 、 81.30 K 、 94.84 K 。图 4 为不同泵浦功率下的 Yb:YAG 微片晶体端面径向及 z 轴的温度场分布对比图。由图 5 可知, 功率越大, 温升越大, 功率的变化几乎不影响端面 and 轴向的温度分布规律, 这是由于功率的变化没有改变光斑的分布模式, 但是会使得泵浦面上的光功率密度变大, 从而使单位晶体吸收的光能以及沉积的热能变大, 导致晶体热效应加剧, 表现为晶体内温升变大, 应力变大。

2.2 不同光斑半径下镶嵌式 Yb:YAG 微片的温度场分布

泵浦半径是与泵浦光能量密度紧密相关的参

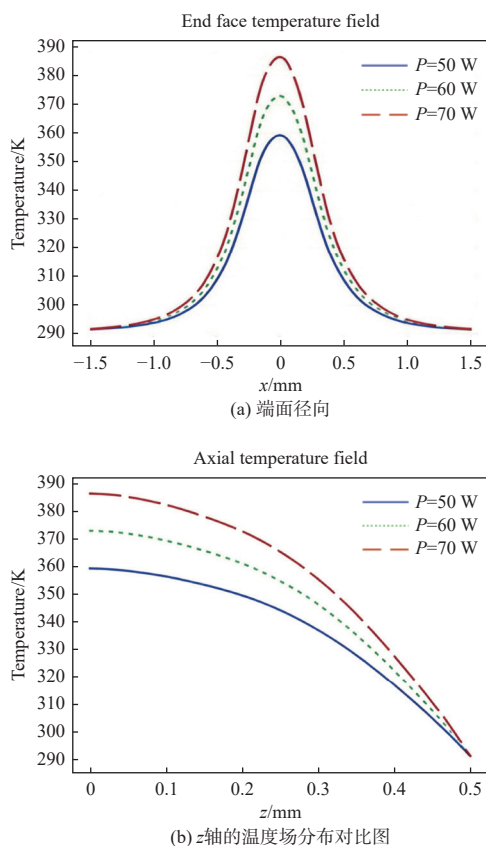


图4 不同泵浦功率下的Yb:YAG微片晶体

Fig. 4 Temperature distribution of Yb:YAG microchip crystal under different pump powers

量,光能量密度的变化会对单位面积上晶体所吸收的光能大小产生影响。令泵浦半径分别为 $300\text{ }\mu\text{m}$ 、 $400\text{ }\mu\text{m}$ 、 $500\text{ }\mu\text{m}$,其对应的最高温升分别为 67.75 K 、 52.30 K 、 41.63 K 。图5为不同泵浦半径下的Yb:YAG微片晶体端面径向及 z 轴的温度场分布对比图。由图5可知,光斑半径越大,最大温升越小,且光斑半径的变化会影响温度场的分布规律,这是由于光斑半径的变化改变了端面的光分布,光斑越小,光功率密度越大,同时光的分布也更集中,因此光斑半径的减小会使温度场的高温区域分布更集中,同时造成更严重的温升,加剧晶体热效应。

2.3 不同高斯阶次下镶嵌式Yb:YAG微片的温度场分布

高斯阶次的改变是会使光斑的分布和光能密度发生改变,分析高斯阶次对温度场的影响,本质上是分析光纤疏密对光斑分布函数及温度场的影响。令高斯阶次分别为1、3、5,其对应的最高温升分别为 43.25 K 、 61.75 K 、 67.75 K 。图6为不同

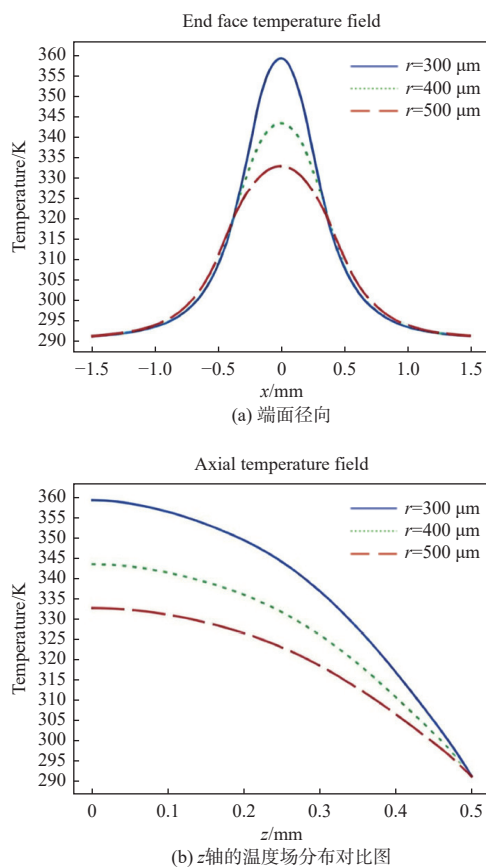
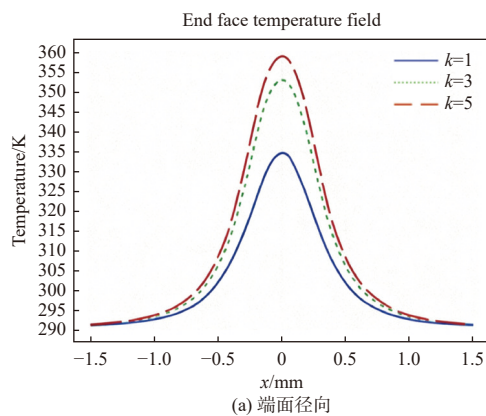


图5 不同泵浦半径下的Yb:YAG微片晶体

Fig. 5 Temperature distribution of Yb:YAG microchip crystal under different spot radius

高斯阶次下的Yb:YAG微片晶体端面径向及 z 轴的温度场分布对比图。可以看出,高斯阶次越大,最大温升越大,且随着高斯阶次的变大,最大温升升高的幅度明显减小。高斯阶次的变化会改变光的分布模式,但其改变后仍然遵从高斯分布,变为超高斯分布,表现为在波峰更为平整,高温区域更加集中,因此对温度场分布的改变较小,但会加剧晶体热效应。



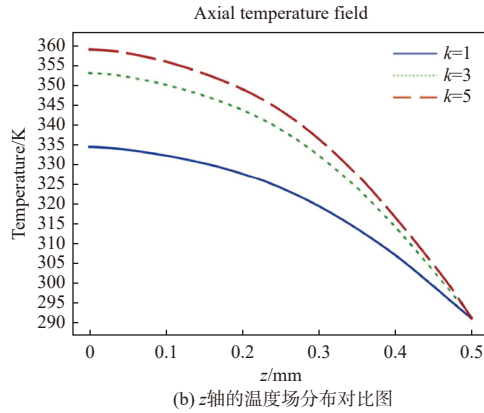


图 6 不同高斯阶次下的 Yb:YAG 微片晶体

Fig. 6 Temperature distribution of Yb:YAG microchip crystal under different Gaussian order

3 LD 端面泵浦镶嵌式 Yb:YAG 微片的应力场分析

Yb:YAG 微片晶体在工作过程中产生的热量积累引起了温度场分布的变化, 温度场分布的不均匀使晶体内部各处发生形变, 从而改变了晶体内部应力场分布。与分析温度场条件一致时, 系统内最大应力为 $1.249 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, z 轴最大形变为 $1.8351 \times 10^{-4} \text{ mm}$, 端面最大形变为 $1.8355 \times 10^{-4} \text{ mm}$, 图 7 为 Yb:YAG 晶体应力场分布图。图 8 为 Yb:YAG 晶体热形变分布图。

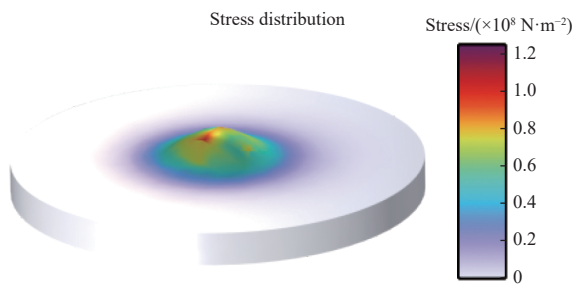


图 7 Yb:YAG 晶体应力场分布图

Fig. 7 Yb:YAG crystal stress field distribution map

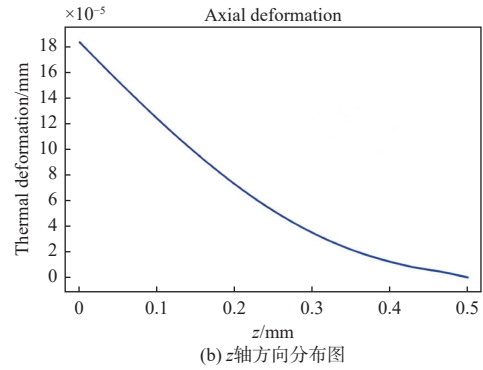
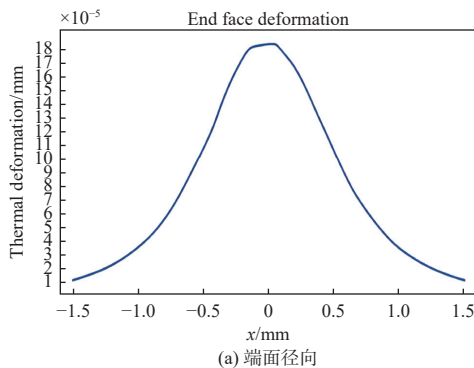
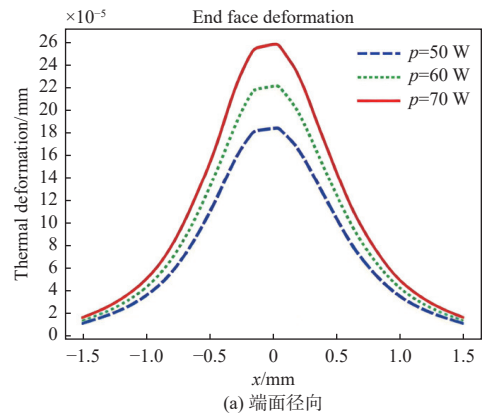


图 8 Yb:YAG 晶体热形变

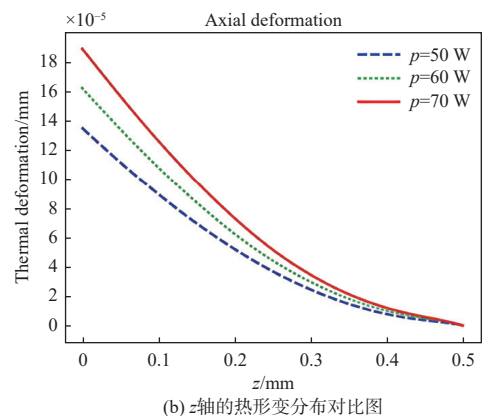
Fig. 8 Yb:YAG crystal thermal deformation

3.1 不同泵浦功率下镶嵌式 Yb:YAG 微片的热形变量

只改变泵浦功率为 50 W、60 W、70 W, 不改变其他参量, 则晶体内的最大应力分别为 $1.249 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1.498 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1.748 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$, 端面径向最大形变量为 $1.835 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 、 $2.203 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 、 $2.570 \times 10^{-4} \text{ mm}$, z 轴最大形变量分别为 $1.349 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 、 $1.619 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 、 $1.889 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 。图 9 不同泵浦功率下的 Yb:YAG 微片晶体端面径向及 z 轴的热形变分布对比图。



(a) 端面径向



(b) z轴的热形变分布对比图

图 9 不同泵浦功率下的 Yb:YAG 微片晶体

Fig. 9 Stress distribution of Yb:YAG microchip crystal under different pump powers

3.2 不同光斑半径下镶嵌式 Yb:YAG 微片的热形变量

只改变泵浦半径为 300 μm 、400 μm 、500 μm ，不改变其他参量，则晶体内的最大应力分别为 $1.249 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1.043 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $8.810 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ，端面径向最大形变量分别为 $1.835 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 、 $1.584 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 、 $1.372 \times 10^{-4} \text{ mm}$ ， z 轴最大形变量分别为 $1.349 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 、 $1.136 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 、 $9.567 \times 10^{-5} \text{ mm}$ 。图 10 为不同光斑半径下的 Yb:YAG 微片晶体端面径向及 z 轴的热形变分布对比图。

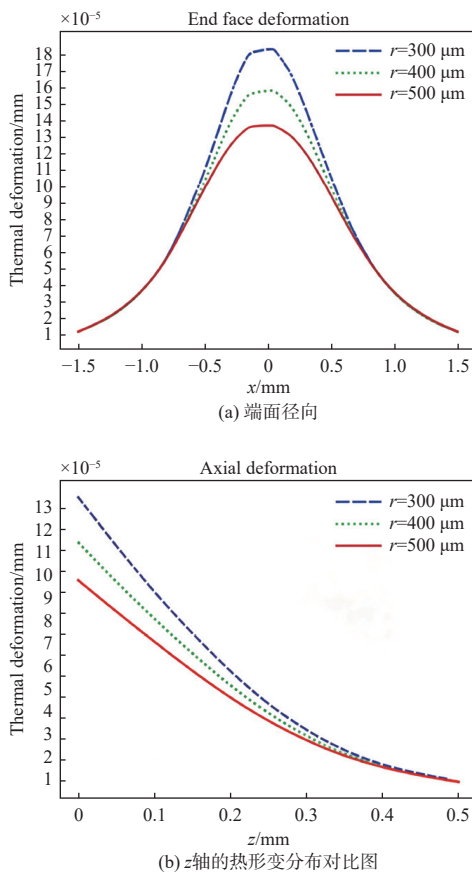


图 10 不同光斑半径下的 Yb:YAG 微片晶体

Fig. 10 Stress distribution of Yb:YAG microchip crystal under different spot radius

3.3 不同高斯阶次下镶嵌式 Yb:YAG 微片的热形变量

只改变高斯阶次为 1、3、5，不改变其他参量，则晶体内的最大应力分别为 $7.440 \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1.113 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $1.249 \times 10^8 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$ ，端面径向最大形变量分别为 $1.835 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 、 $1.633 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 、 $1.100 \times 10^{-4} \text{ mm}$ ， z 轴最大形变量分别为 $1.349 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 、 $1.202 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 、 $8.030 \times 10^{-5} \text{ mm}$ 。图 11 为不同高斯阶次下的 Yb:YAG 微片晶体端面径向及 z 轴的热形变分布对比图。

形变分布对比图。

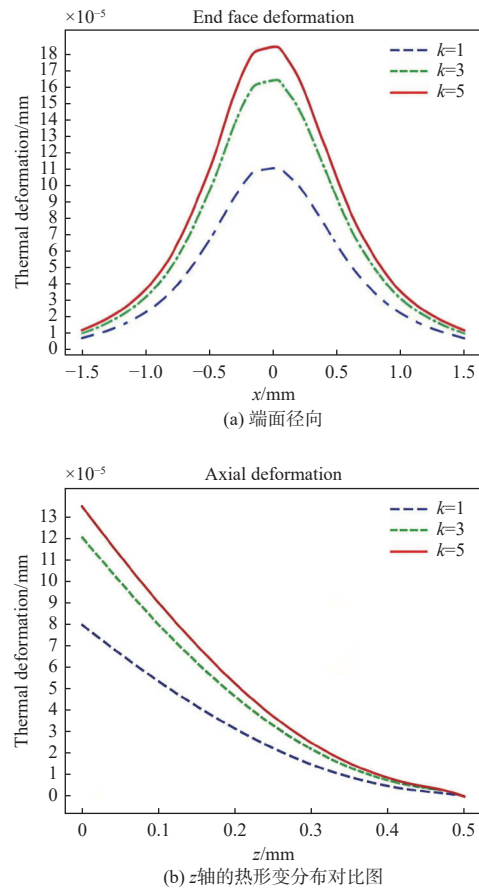


图 11 不同高斯阶次下的 Yb:YAG 微片晶体

Fig. 11 Stress distribution of Yb:YAG microchip crystal under different Gaussian order

4 结论

晶体热效应的本质就是晶体内温度、应力及形变所产生的影响。在热传导理论以及热效应理论的支撑下，使用有限元方法对 Yb:YAG 微片的温度场、应力场及热形变场进行计算，并定量分析了泵浦功率、光斑半径和高斯阶次对 Yb:YAG 微片晶体热效应的影响。结果发现：激光晶体在工作时会发生大量热的沉积，最终会进入热稳态；温度场、应力场及热形变场在晶体热效应的单一影响下紧密相关；泵浦功率、高斯阶次与温度场及热形变量正相关，光斑半径与温度场及热形变量负相关；光斑半径的变化会引起光强分布的变化，从而使温度场的分布规律改变。使用合适的工作参数可以有效减少废热的产生，研究结果对镶嵌式 Yb:YAG 微片激光器的搭建提供了数据支撑与理论依据。

参考文献:

- [1] 耿鹰鸽, 李隆, 潘晓瑞, 等. LD 端面泵浦变热导率方形 Yb:YAG 微片晶体热效应[J]. 应用光学, 2016, 37(3): 489-494.
GENG Yingge, LI Long, PAN Xiaorui, et al. Thermal effect of variable thermal-conductivity square Yb:YAG crystal end-pumped by pulse LD[J]. Journal of Applied Optics, 2016, 37(3): 489-494.
- [2] 任成, 杨星团, 张书练. 微片 Nd:YAG 双频激光器腔调谐现象研究[J]. 应用光学, 2012, 33(6): 1147-1152.
REN Cheng, YANG Xingtuan, ZHANG Shulian. Cavity tuning characteristics of microchip Nd:YAG dual-frequency laser[J]. Journal of Applied Optics, 2012, 33(6): 1147-1152.
- [3] 杨发宇, 史晋芳, 邱荣, 等. CO₂ 激光作用玻璃管的热效应[J]. 应用光学, 2024, 45(5): 923-929.
YANG Fayu, SHI Jinfang, QIU Rong, et al. Thermal effect of CO₂ laser on glass tubes[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(5): 923-929.
- [4] 陈巧, 葛文琦, 边圣伟, 等. 侧面折返泵浦多边形 Nd:YAG 薄片的热效应研究[J]. 中国激光, 2022, 49(21): 2101002.
CHEN Qiao, GE Wenqi, BIAN Shengwei, et al. Thermal effect of side-zigzag-pumped polygonal Nd:YAG thin disk[J]. Chinese Journal of Lasers, 2022, 49(21): 2101002.
- [5] 韩雪, 吕游, 彭嘉宁, 等. LD 泵浦 Er³⁺/Yb³⁺: Lu₂Si₂O₇ 晶体 kHz 微型激光器[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(7): 167-173.
HAN Xue, LYU You, PENG Jianing, et al. Er³⁺/Yb³⁺: Lu₂Si₂O₇ crystal microchip laser pumped by LD at kHz[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(7): 167-173.
- [6] 朱铎, 宋艳洁, 陈中正, 等. 宽温区 Yb:YAG 板条激光模块热畸变仿真研究[J]. 激光与红外, 2024, 54(4): 503-507.
ZHU Duo, SONG Yanjie, CHEN Zhongzheng, et al. Simulation study of thermal aberration of Yb:YAG slab laser module in wide temperature region[J]. Laser & Infrared, 2024, 54(4): 503-507.
- [7] 王子文, 曹雪辰, 张艳林, 等. 采用 BBO 晶体产生 266 nm 深紫外激光过程中的热特性研究[J]. 中国激光, 2024, 51(14): 1401003.
WANG Ziwen, CAO Xuechen, ZHANG Yanlin, et al. Thermal characteristics of 266 nm DUV laser generated by BBO crystal[J]. Chinese Journal of Lasers, 2024, 51(14): 1401003.
- [8] 金光勇, 吴婧, 吴春婷, 等. 脉冲激光二极管双端抽运 Tm:YAG 棒瞬态热效应分析[J]. 中国激光, 2013, 40(10): 1002002.
JIN Guangyong, WU Jing, WU Chunting, et al. Pulsed laser diode dual-end pumped Tm:YAG rod transient thermal effect analysis[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(10): 1002002.
- [9] 毛小洁, 钟国舜, 王旭, 等. LD 端面泵浦掺 Nd 晶体的热透镜焦距[J]. 激光与红外, 2010, 40(12): 1316-1318.
MAO Xiaojie, ZHONG Guoshun, WANG Xu, et al. Thermal lens focus of the end-pumped Nd-doped crystal laser[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(12): 1316-1318.
- [10] 刘树山, 刘敏, 李雷, 等. LD 端面泵浦 Nd:KGW 激光器热效应的理论研究[J]. 红外, 2008, 29(6): 31-35.
LIU Shushan, LIU Min, LI Lei, et al. Theoretical study of thermal effect in diode-end-pumped Nd:KGW laser[J]. Infrared, 2008, 29(6): 31-35.
- [11] 孙佳宁, 王雨雷, 张雨, 等. LD 端面泵浦 Er:Yb:glass/Co:MALO 晶体热效应分析[J]. 红外与激光工程, 2023, 52(8): 20230349.
SUN Jianing, WANG Yulei, ZHANG Yu, et al. Thermal effect analysis of LD end-pumped Er:Yb:glass/Co:MALO crystal[J]. Infrared and Laser Engineering, 2023, 52(8): 20230349.
- [12] 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.
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.
- [13] 聂建萍, 李隆, 史彭, 等. 激光二极管端面泵浦 Yb:YAG 圆棒热效应研究[J]. 光学技术, 2009, 35(3): 354-358.
NIE Jianping, LI Long, SHI Peng, et al. Thermal effect of Yb:YAG rod end-pumped by diode laser[J]. Optical Technique, 2009, 35(3): 354-358.
- [14] 潘晓瑞. LD 端面泵浦方片与圆棒 Nd:YAG 热分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2018.
PAN Xiaorui. The thermal analysis of the square and the round rod Nd:YAG laser crystal end pumped by LD[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2018.
- [15] 潘晓瑞, 李隆, 耿鹰鸽, 等. 第三类边界条件 LD 端面泵

- 浦 Nd:YAG 激光器热分析[J]. [激光与红外](#), 2019, 49(6): 697-701.
- PAN Xiaorui, LI Long, GENG Yingge, et al. The third type of boundary conditions LD end pumped Nd:YAG laser thermal analysis[J]. [Laser & Infrared](#), 2019, 49(6): 697-701.
- [16] 李隆, 牛娟, 张春玲, 等. 连续 LD 端面泵浦 YAG/Yb:YAG 复合晶体温度场分析[J]. [激光与光电子学进展](#), 2022, 59(13): 1314002.
- LI Long, NIU Juan, ZHANG Chunling, et al. Temperature field of continuous LD end-pumped YAG/Yb:YAG composite crystal[J]. [Laser & Optoelectronics Progress](#), 2022, 59(13): 1314002.
- [17] 李隆, 董武威, 史彭, 等. 高功率 Yb:YAG 微片激光器热效应研究[J]. [激光技术](#), 2010, 34(1): 8-12.
- LI Long, DONG Wuwei, SHI Peng, et al. Thermal effect of high power Yb:YAG microchip solid-state laser[J]. [Laser Technology](#), 2010, 34(1): 8-12.