



激光二极管端泵Yb:YAG晶体的温度场及应力场

李昕阳 李隆 任嘉欣 贺政隆 石镡 宁江浩 张春玲

Temperature field and stress field of LD end-pumped Yb:YAG crystal

Li Xinyang, Li Long, Ren Jiaxin, He Zhenglong, Shi Pu, Ning Jianghao, Zhang Chunling

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/IRLA20230683>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光二极管端面抽运梯度浓度掺杂介质激光器热效应的有限元法分析

Finite element method analysis of thermal effect in gradient dopant concentration medium laser end-pumped by laser diode
红外与激光工程. 2019, 48(11): 1105004 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.1105004>

星载热控制辐冷板激光致热计算分析

Calculation and analysis of the thermal characteristic of the satellite load radiant plate irradiated by laser
红外与激光工程. 2018, 47(12): 1243002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1243002>

脉冲激光二极管巴条侧面泵浦Nd:YAG陶瓷瞬态热效应研究

Transient thermal effect of Nd:YAG ceramics with pulsed laser diode bar side-pumped
红外与激光工程. 2021, 50(11): 20200495 <https://doi.org/10.3788/IRLA20200495>

导光镜镜面温度场的模拟分析

Simulation analysis of the temperature field of the light guide mirror on mirror surface
红外与激光工程. 2018, 47(11): 1106008 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.1106008>

泵浦线宽和波长漂移对全固态Tm激光器性能的影响

Influence of pump bandwidth and wavelength-drift on laser performance of solid-state Tm laser
红外与激光工程. 2019, 48(4): 405002 <https://doi.org/10.3788/IRLA201948.0405002>

光电复合海缆温度场建模分析及在在线监测中的应用

Analysis of temperature field model in optic-electric composite submarine cable and its applications in online monitoring
红外与激光工程. 2018, 47(7): 717003 <https://doi.org/10.3788/IRLA201847.0717003>

激光二极管端泵 Yb:YAG 晶体的温度场及应力场

李昕阳¹, 李隆^{1,2*}, 任嘉欣¹, 贺政隆¹, 石锴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端面泵浦 Yb:YAG 晶体引起的热效应问题, 通过对晶体工作特点的分析, 建立了周边冷却恒温、端面与空气存在热交换的有限元热模型。利用泊松方程, 对 Yb:YAG 晶体的温度场、热应力场、热形变场和热透镜焦距进行了数值计算, 并定量分析了激光二极管泵浦光的高斯阶次、光斑半径和泵浦功率对激光晶体温度场的影响。研究表明: 若激光二极管泵浦功率为 50 W, 耦合到泵浦面的光斑半径为 400 μm 时, 晶体尺寸为 3 mm \times 3 mm \times 4 mm、掺杂浓度为 5.0 at.% 的 Yb:YAG 晶体端面的最高温升为 59.2 K, 最大热形变量为 0.64567 μm , 晶体内稳定时最大应力为 $2.380\times 10^8 \text{ N/m}^2$, 热透镜焦距为 19.99 mm, 该条件下激光器可正常运行。研究结果为全固态 Yb:YAG 激光器的设计提供了理论依据。

关键词: 热效应; 温度场; 有限元分析; Yb:YAG 激光器; 端面泵浦

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20230683

0 引言

在工业、医疗、国防等领域有着广泛应用的激光二极管 (LD) 端面泵浦 Yb:YAG 激光器, 因其有着峰值功率高、寿命长等特点, 成为了激光技术研究者的关注对象^[1-3]。与 Nd:YAG 晶体相比, Yb:YAG 晶体在高掺杂情况下不会发生浓度猝灭现象, 而且量子亏损很小, 更容易产生高效高功率的脉冲激光^[4]。然而, 激光二极管泵浦 Yb:YAG 晶体在产生激光辐射的同时也会产生大量的热。热的沉积会导致晶体内部温度分布不均匀, 使激光晶体产生热效应, 严重影响了激光的输出功率及光束质量, 减小热效应已经成为激光器设计中的关键步骤^[5-7]。

以往的热效应研究常采用解析法计算端面绝热晶体热模型的温度场分布^[8-10]。然而, 这种模型忽略了空气与端面的热交换, 分析结果存在一定误差。文中建立了晶体周边恒温冷却、通光面与空气热交换的热模型, 采用有限元分析法, 对 LD 端面泵浦的 Yb:YAG 方形晶体晶体内的温度场、应力场、形变场及热焦距

进行了计算, 并对不同高斯阶次、光斑半径和泵浦功率下的晶体温度场分布变化进行了定量分析。

1 模型建立

1.1 激光晶体热力学模型

LD 发出的泵浦光经耦合镜聚焦后射入激光晶体端面中心。图 1 为 LD 端面泵浦 Yb:YAG 晶体激光器实验装置简图, 图 2 为 LD 端面泵浦 Yb:YAG 晶体几何结构图。其中, 晶体尺寸为 $a\times b\times c$, 晶体的通光面记作 $z=0$ 、 $z=c$, 令泵浦光线从 $z=0$ 的端面射入。在晶体端面镀有 940 nm 波长的增透膜 (透射率大于 99.8%) 和 1030 nm 波长的增透膜 (透射率大于 99%)。作为谐振腔输入镜 M1, 镀有 940 nm 波长的增透膜 (透射率大于 99.8%), 同时镀有 1030 nm 波长的高反膜 (反射率大于 98%); 作为谐振腔输出镜 M2, 镀有 1030 nm 波长的高反膜 (反射率为 91%, 透射率为 9%)。此外, Yb:YAG 晶体应涂有导热硅脂并被钢膜包裹, 也要尽可能完全接触热沉, 达到快速传热冷却的目的。

收稿日期: 2023-12-08; 修订日期: 2024-01-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11705136)

作者简介: 李昕阳, 男, 硕士生, 主要从事激光技术方面的研究。

导师 (通讯作者) 简介: 李隆, 男, 教授, 博士, 主要从事激光技术方面的研究。

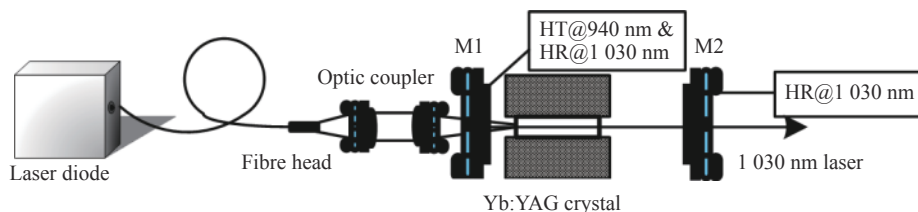


图 1 LD 端面泵浦 Yb:YAG 晶体激光器实验装置简图

Fig.1 Schematic diagram of LD end-pumped Yb:YAG crystal laser experimental device

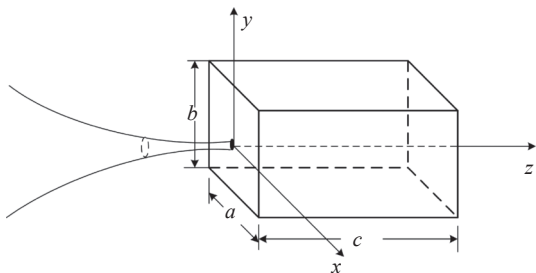


图 2 LD 端面泵浦 Yb:YAG 晶体几何结构图

Fig.2 LD end-pumped Yb:YAG crystal geometry diagram

泵浦光入射到单个光纤中时,其光纤出射光的功率分布为高斯分布,而激光器中由一捆光纤发射到光学耦合元件上的光可视为高斯光的叠加,其光强分布呈“大礼帽”状,称为超高斯分布^[1],光强表达式为:

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

式中: I_0 为泵浦功率; ω_0 为泵浦光高斯半径; k 为高斯阶次; β 为激光介质对泵浦光的吸收系数。

晶体内部的荧光量子效应和内损耗对泵浦光的消耗远大于其他因素造成的光损耗,因此仅考虑量子效应和内损耗所带来的热效应。则 z 轴截面的热功率密度为:

$$q_v(x, y, z) = \beta \eta I_0 \exp\left(-2 \frac{x^{2k} + y^{2k}}{\omega_0^{2k}}\right) \exp(-\beta z) \quad (2)$$

式中: η 为热转换系数,其数值由量子效应及内损耗决定。有:

$$\eta = 1 - \lambda_p / \lambda_L \quad (3)$$

式中: λ_p 为泵浦光波长, 940 nm; λ_L 为出射激光波长, 1 030 nm。

激光器工作一段时间后,其工作状态和热力学状态达到稳定,此时激光器输出功率稳定, Yb:YAG 晶

体内部温度场呈梯度分布。方形晶体 Yb:YAG 的热传导方程可以表示为:

$$\frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T(x, y, z)}{\partial z^2} = -\frac{q_v}{\lambda} \quad (4)$$

式中: T 为温度函数; λ 为晶体导热系数。

涂有导热硅脂并被钢膜包裹的晶体与冷却铜块紧密接触,晶体侧面受到铜块限制,仅有与空气接触的端面可自由形变,该情况下 z 轴方向的应力起到引起形变的主导作用,故将晶体视为各向同性的线弹性材料。

1.2 边界条件

通常激光器稳定工作过程中会使用循环水冷,减小热能对激光工作的影响,因此初始温度设为冷却水温度:

$$T = T_0 \quad (5)$$

考虑到晶体周边恒温冷却、端面与空气热交换,提出以下边界条件。公式 (6) 描述的是周边恒温冷却条件, $x=-a/2, x=a/2, y=-b/2, y=b/2$, 这四个面始终为冷却水温度。公式 (7)、公式 (8) 为第三类边界条件, $z=0, z=c$, 两个与空气相接触的端面始终与空气热交换。

$$\begin{cases} T(-a/2, y, z) = T_0; T(a/2, y, z) = T_0 \\ T(x, -b/2, z) = T_0; T(x, b/2, z) = T_0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=0} = h(T|_{z=0} - T_0) \quad (7)$$

$$-\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{z=c} = h(T|_{z=c} - T_0) \quad (8)$$

式中: h 为空气传热系数。

此外,激光器水冷装置中的铜块与涂有导热硅脂并被钢膜包裹的晶体紧密接触,故将晶体侧面视为受到铜块限制的固定约束;而端面不受约束,仅与空气

接触,故视为可自由形变的端面。

2 LD 端泵 Yb:YAG 方形晶体温度场分析

按照上述理论建立热模型,该模型尺寸为 3 mm×3 mm×4 mm,掺杂浓度为 5.0 at.%,对于 940 nm 泵浦光的吸收系数为 5.6 cm^{-1} [11-13],导热系数为 $0.13\text{ W}\cdot\text{cm}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$,高斯阶次为 1,冷却温度 T_0 为 291 K,热膨胀系数为 $7.8\times 10^{-6}\text{ K}^{-1}$ 。

当激光泵浦功率为 50 W、泵浦面光斑半径为 400 μm 时,系统泵浦端面最高温升为 59.2 K。图 3 为

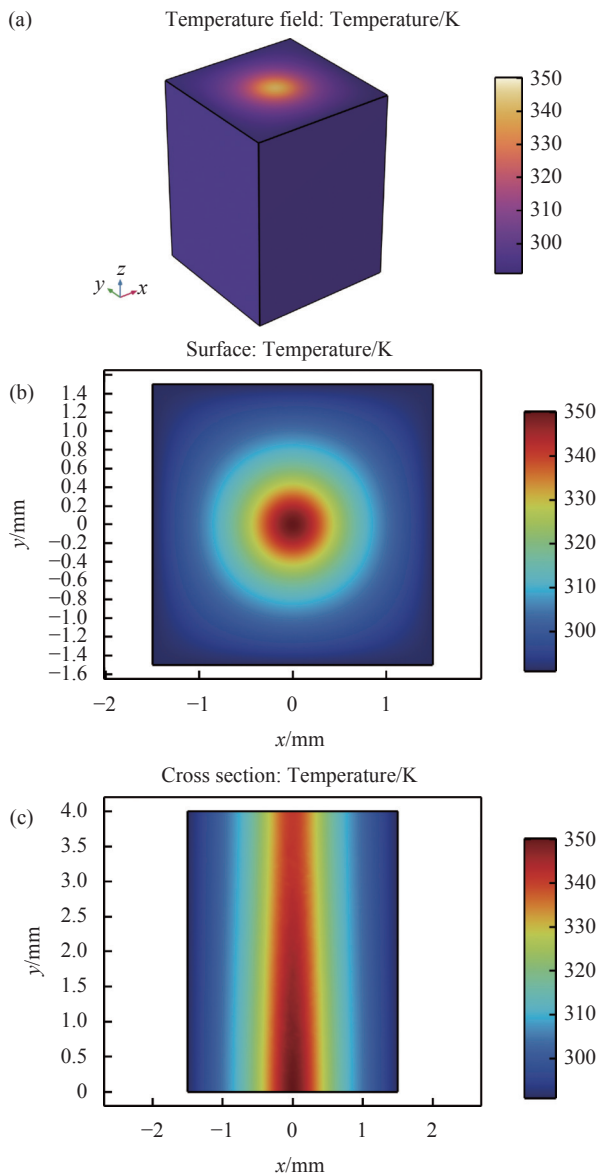


图 3 三维晶体 (a)、泵浦面 (b) 及 z 轴截面 (c) 温度场分布图
Fig.3 Three-dimensional crystal (a), (b) pump surface and (c) z axis section temperature field distribution diagrams

激光二极管端面泵浦的 Yb:YAG 晶体温度场分布图,图 4 为激光二极管端面泵浦的 Yb:YAG 晶体内部等温线分布图。

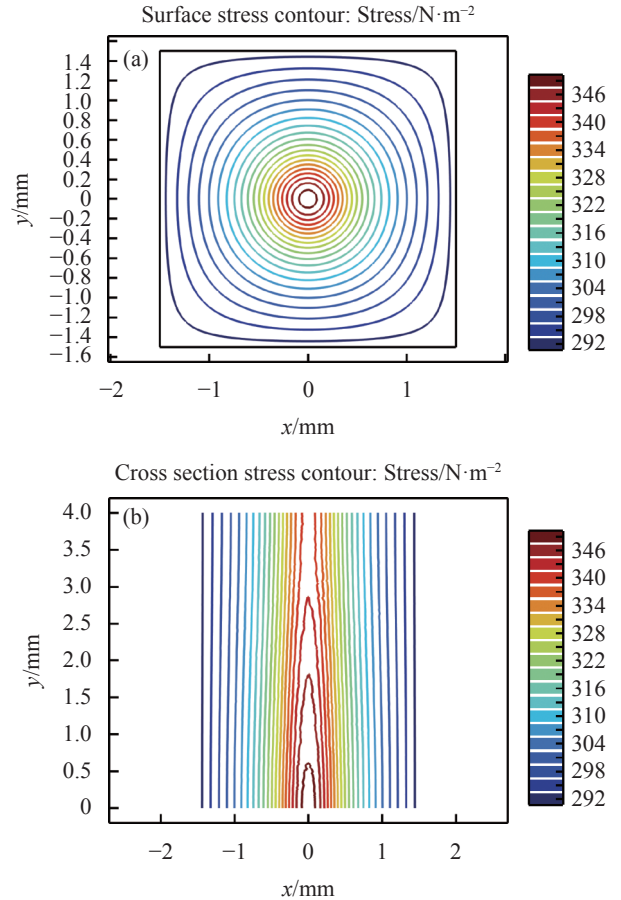


图 4 泵浦面 (a) 及 z 轴截面 (b) 等温线分布图
Fig.4 Pump surface (a) and z axis section (b) isotherm distribution diagrams

2.1 泵浦光不同高斯阶次下的激光晶体温度场分析

考虑到可以通过改变光纤疏密来调制光斑分布函数,期望通过对比不同高斯阶次的功率函数对激光晶体温度场的影响,获取更为合适的功率函数,对激光器设计提供依据。在其他条件与图 3 一致的情况下,高斯阶次分别选择 1、2、3,其对应的泵浦端面最高温升分别为 59.18、75.24、83.99 K。图 5 为不同高斯阶次下 Yb:YAG 晶体 z 轴上的温度场分布对比图,随着高斯阶次提升,温升也在提高,这是因为高斯阶次的提升会使光能的分布更加集中。

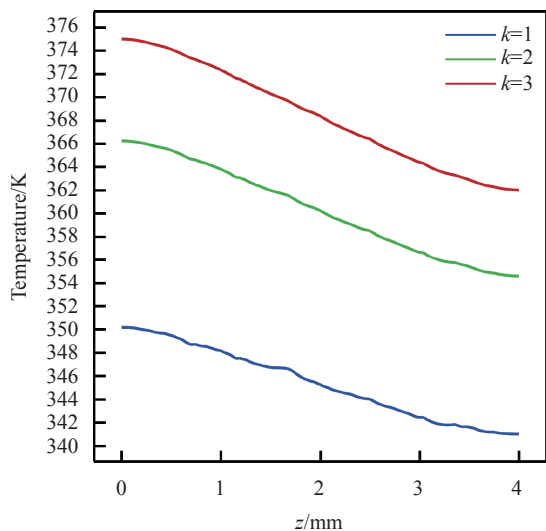


图 5 不同高斯阶次下 Yb:YAG 晶体 z 轴上的温度场分布对比图
Fig.5 Comparison of temperature field distribution on z axis of Yb:YAG crystal at different Gauss order

2.2 泵浦光不同光斑半径下的激光晶体温度场分析

泵浦光与激光晶体内振荡模的匹配是提高 Yb:YAG 激光器输出光束质量的关键^[14]。在其他条件与图 3 一致的情况下,只改变泵浦光斑半径,分别为 300、350、400、450、500 μm 时,其对应的泵浦端面最高温升为 105.21、77.30、59.18、46.76、37.88 K。图 6 为不同光斑半径的 Yb:YAG 晶体 z 轴上的温度场分布对比图,可以看出,光斑半径越小,温升越大,这是因为光斑半径越小,其功率密度越大。

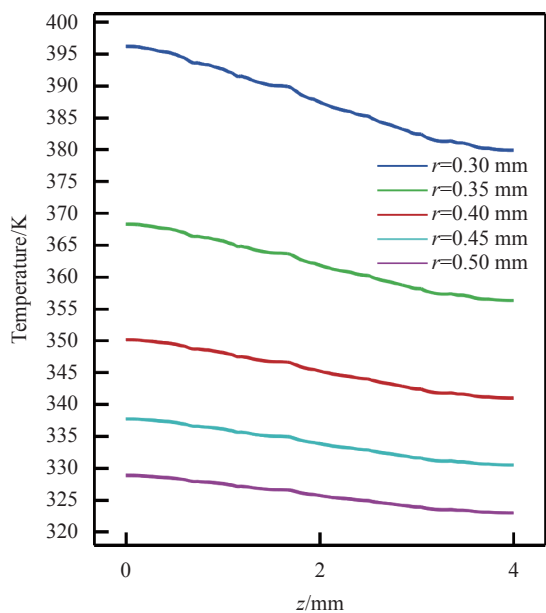


图 6 不同光斑半径的 Yb:YAG 晶体 z 轴上的温度场分布对比图
Fig.6 Comparison of temperature field distribution on z axis of Yb:YAG crystal with different spot radius

2.3 泵浦光不同泵浦功率下的激光晶体温度场分析

在符合实验要求的前提下选择适当的泵浦功率,能有效降低温度场的温度。在其他条件与图 3 一致的情况下,只改变泵浦功率,分别为 50、60、70 W,其对应的最高温升为 59.18、71.02、82.85 K。图 7 为不同泵浦功率下的 Yb:YAG 晶体 z 轴上的温度场分布对比图,可以看出,功率越大,温升越大。

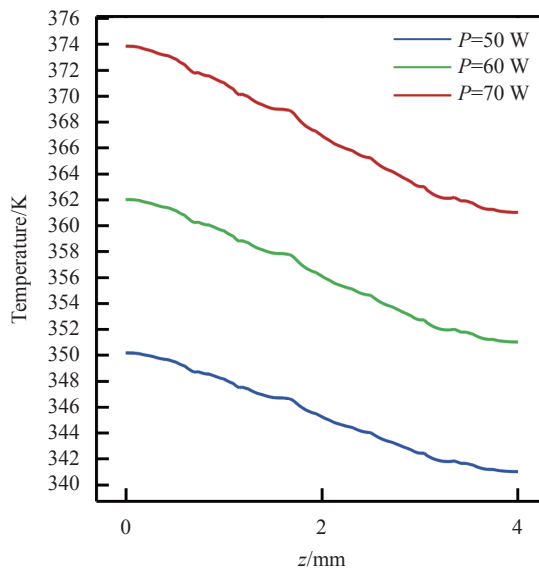
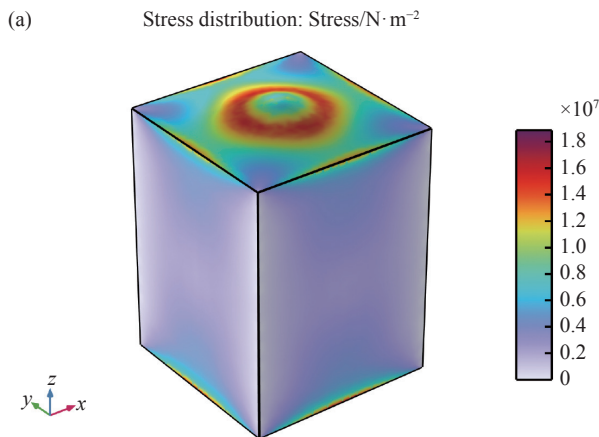


图 7 不同泵浦功率下的 Yb:YAG 晶体 z 轴上的温度场分布对比图
Fig.7 Comparison of temperature field distribution on z axis of Yb:YAG crystal at different pump power

3 LD 端泵 Yb:YAG 方形晶体应力场分析

Yb:YAG 晶体在工作过程中不断产生热量,积累的热量引起温度场分布的变化,并使晶体内应力场与热形变场发生变化,在与图 3 条件一致的情况下,系统所受最大应力为 $2.380 \times 10^8 \text{ N/m}^2$,产生的最大形变为 $6.4567 \times 10^{-4} \text{ mm}$ 。图 8 为 Yb:YAG 晶体应力场分布图,



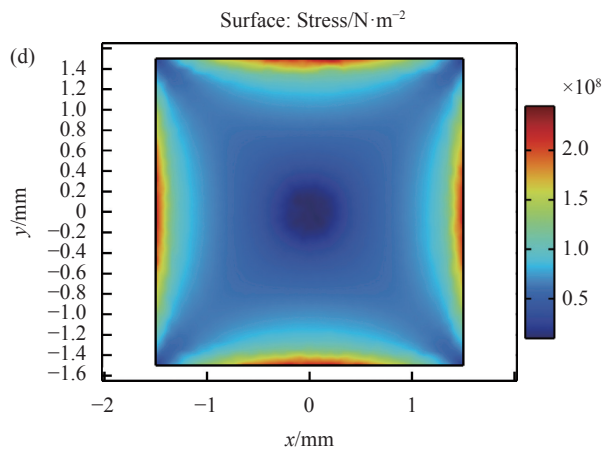
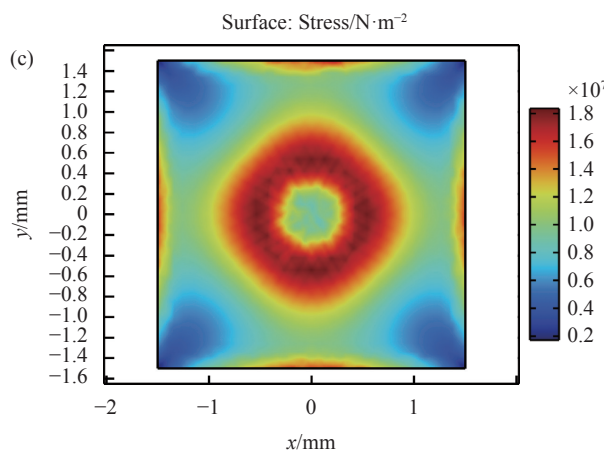
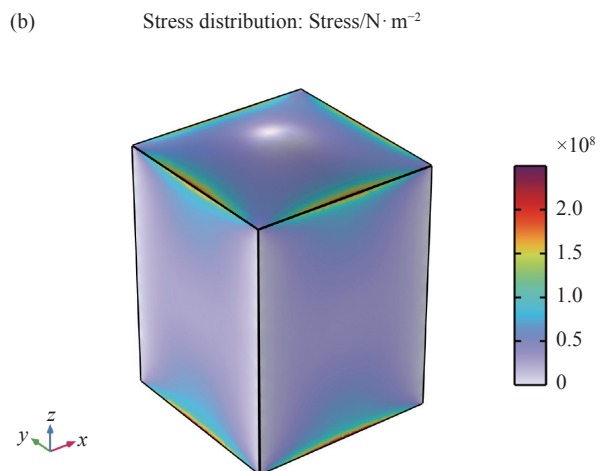


图 8 形变开始时 (a)、热应力稳定后 (b) 三维晶体应力分布图; 形变开始时 (c)、热应力稳定后 (d) 泵浦面应力分布图

Fig.8 Three-dimensional crystal stress distribution at the beginning of deformation (a) and after thermal stress stabilization; pump surface stress distribution at the beginning of deformation (c) and after thermal stress stabilization (d)

图 9 为 Yb:YAG 晶体热形变分布图。

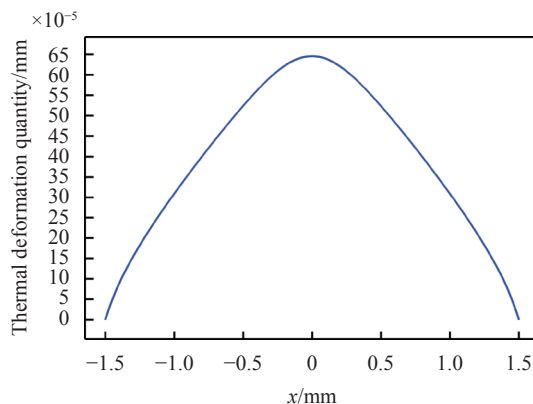


图 9 Yb:YAG 晶体泵浦面热形变分布图

Fig.9 Yb:YAG crystal pump surface thermal deformation distribution

4 LD 端泵 Yb:YAG 方形晶体热焦距分析

产生激光晶体热透镜效应的原因主要是大量的泵浦能量以热的形式沉积在激光晶体中,而晶体在工作状态下产生热量的主要原因有:能级间非辐射跃迁所释放的能量被基质材料吸收;泵浦波长范围内的部分能量因与晶体泵浦能带不匹配而被基质材料吸收;晶体的量子亏损与内损耗。这些因素使晶体内热量沉积,并形成温度梯度、应力梯度及形变。因此,在计算 LD 端面泵浦 Yb:YAG 方形晶体的热透镜焦距时,考虑到的主要因素为温度梯度、端面形变和热致双折射^[15]。

温度梯度、热致双折射、端面形变造成了热透镜效应,它们产生的热透镜焦距分别为:

$$f_{TO} = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{ph} dn/dT} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right] \quad (9)$$

$$f_{EO} = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{2\alpha_T n^3 C_{\varphi,r} P_{ph} [1 - \exp(-\alpha l)]} \quad (10)$$

$$f_{TE} = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{\alpha_T r_o P_{ph} [1 - \exp(-\alpha r_o)] 2(n-1)} \quad (11)$$

式中: K_c 为晶体热导率; dn/dT 为热光系数; $C_{\varphi,r}$ 为弹性系数; α_T 为热膨胀系数; α 为吸收系数; P_{ph} 为泵浦光功率的致热功率,其与泵浦功率关系如下。

$$P_{ph} = P_m \xi \quad (12)$$

式中: ξ 为热转化效率。由公式 (10)~(12) 可得综合热透镜焦距为:

$$f_{th} = \frac{1}{1/f_{TO} + 1/f_{EO} + 1/f_{TE}} \quad (13)$$

相对于温度梯度带来的热透镜效应,热应力双折射与热形变产生的热透镜效应十分微弱^[15],因此,只关注温度分布时热透镜焦距随功率的变化,如图 10 所示,公式 (14) 为简化后只考虑温度梯度的热透镜效应。

$$f_{th} = \frac{\pi K_c \omega_p^2}{P_{in} \xi dn/dT} \left[\frac{1}{1 - \exp(-\alpha l)} \right] \quad (14)$$

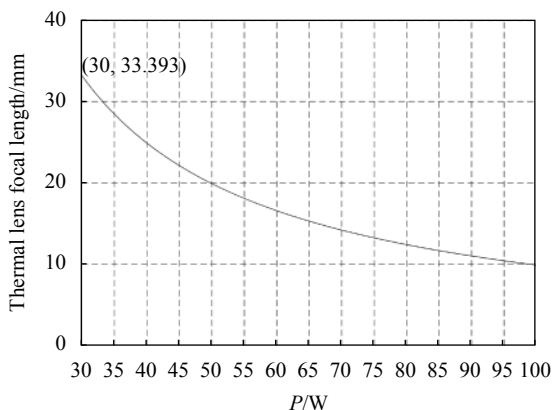


图 10 不同泵浦功率下热透镜焦距的变化

Fig.10 Thermal lens focal length varying with pump power

5 结 论

考虑到晶体周边恒温冷却、通光面与空气热交换,建立了更符合激光二极管端面泵浦 Yb:YAG 晶体实际工作状态的热模型,利用泊松方程和有限元分析法,对激光二极管端面泵浦 Yb:YAG 方形晶体的温度场分布进行了分析,并进一步计算了 Yb:YAG 晶体内由非均匀温升引起的的应力场以及热形变场的变化情况,最后得出一定条件下热透镜焦距随功率变化的曲线图。当激光二极管泵浦功率为 50 W、泵浦光高斯半径为 400 μm 时,晶体尺寸为 3 mm×3 mm×4 mm、掺杂浓度为 5.0 at.% 的 Yb:YAG 晶体端面的最高温升为 59.2 K,最大热形变量为 0.645 67 μm,晶体内稳定时最大应力为 2.426×10⁷ N/m²,热透镜焦距为 19.99 mm。此外,最大温升会随着高斯阶次和功率的增大、光斑半径的减小而提高,这些量的变化实际上是功率密度的变化,故可得出最大温升与功率密度正相关的结论。与文献 [4] 中的实验测量结果进行比较,理论计算结果基本符合,所得结果为全固态 Yb:YAG 激光器的设计提供了理论依据。

参考文献:

- [1] Xiao Kaibo, Jiang Xinying, Yuan Xiaodong, et al. Optimization of thermal effects in a cryogenically cooled Yb: YAG multislabs amplifier with interlayers [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(12): 1206004. (in Chinese)
- [2] Tang Liang, Ye Huiqi, Xiao Dong. Ion clustering in YAG: Ce, Yb near-infrared down-conversion phosphors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(5): 0521004. (in Chinese)
- [3] Li Guohui, Du Yinglei, Xu Honglai, et al. Correction of beam quality correction of Yb: YAG laser with double deformable mirrors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20210800. (in Chinese)
- [4] Geng Yingge, Li Long, Pan Xiaorui, et al. Temperature field of pulsed LD end-pumped square Yb: YAG crystal with variable thermal conductivity [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(8): 081401. (in Chinese)
- [5] Zhang Deping, Wu Chao, Zhang Rongzhu, et al. Study on thermal effect of LD end-pumped separated amplifier structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(8): 2250-2255. (in Chinese)
- [6] Meng Peibei, Yan Fanjiang, Li Xu, et al. Influence of boundary condition and pump scheme on thermal effects of laser crystal [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3216-3222. (in Chinese)
- [7] Qiu Haiqi, Zhang Bin, Zhu Songjun. Analysis of temperature field distribution in reflective LD end-pumped Nd: YAG ceramic laser [J]. *Laser Journal*, 2008, 29(2): 8-10. (in Chinese)
- [8] Tian Xiao, Qi Bing. Temperature field of Nd: YAG crystal under air heat transfer [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(3): 686-692. (in Chinese)
- [9] Li Long, Nie Jianping, Shi Peng, et al. Temperature field characteristic of YAG-Nd: YAG composite crystal rod end-pumped by laser diode [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(4): 917-922. (in Chinese)
- [10] Dai Qin, Li Xinzhong, Wang Xijun. Influence of YAG materials property on thermal effects in LD side pumping solid state lasers [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, 36(12): 2201-2204. (in Chinese)
- [11] 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)

- [12] Shao Ming, Zhang Liwen. Performance of Yb: YAG laser [J]. *Laser Journal*, 2003, 24(5): 15-17. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] Mao Xiaojie, Zhong Guoshun, Wang Xu, et al. Thermal lens focus of the end-pumped Nd-doped crystallaser [J]. *Lasers & Infrared*, 2010, 40(12): 1316-1318. (in Chinese)
- [15] Xiao Nana. Research on thermal lens effects in the LD pumped Tm: YAP laser[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2016. (in Chinese)

Temperature field and stress field of LD end-pumped Yb:YAG crystal

Li Xinyang¹, Li Long^{1,2*}, Ren Jiabin¹, 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:

Objective Laser is a device that can emit high energy radiation, and its excellent characteristics make it to be widely used and paid attention to by researchers in various fields. Its most important part is the laser crystal. During the operation of the laser, the crystal will generate a lot of heat inside the crystal because of the crystal thermal effect such as quantum deficit, and cause the gradient distribution of stress and crystal deformation, which seriously affects the beam quality of the laser. Therefore, studying the thermal effect of crystals is an important step to design and manufacture lasers with high beam quality. In this paper, through the simulation of the working state of the laser, the monitoring of the temperature field and stress field inside the crystal is tested, so as to provide data and theoretical support for better laser design.

Methods In order to simulate the working state of the laser and monitor the temperature field and stress field, the model conditions are simplified based on the actual situation. The temperature distribution in the crystal is analyzed by the Poisson equation in the thermodynamic theory, and the stress distribution in the incident direction is analyzed by the mechanical theory. Then the geometric model is established by finite element analysis, and the theoretical model close to the working state of the crystal is obtained by combining them. The boundary conditions around the crystal are analyzed and the physical field constraints are given to the model. Finally, the control variable method is used to analyze the variables in the system.

Results and Discussions The initial conditions are as follows. The model size is 3 mm×3 mm×4 mm, doping concentration is 5.0 at.%, absorption coefficient of 940 nm pump light is 5.6 cm⁻¹, thermal conductivity is 0.13 W·cm⁻¹·K⁻¹, Gauss order is 1, cooling temperature T_0 is 291 K. The coefficient of thermal expansion is 7.8×10⁻⁶ K⁻¹. When the laser pump power is 50 W and the spot radius of the pump surface is 400 μm, the maximum temperature rise of the pump end face is 59.2 K (Fig.3), the maximum stress on the system is 2.380×10⁸ N/m² (Fig.8), and the maximum deformation is 6.456 7×10⁻⁴ mm (Fig.9). When only temperature gradient is considered, the relationship between thermal focal length and power is obtained (Fig.10). If other conditions remain unchanged, when the Gauss order is 1, 2, and 3 respectively, the corresponding maximum temperature rise of the pump end face is 59.18 K, 75.24 K, and 83.99 K (Fig.5). If other conditions remain

unchanged, when the half-diameter of the pump light spot is 300 μm , 350 μm , 400 μm , 450 μm , and 500 μm respectively, the corresponding maximum temperature rise of the pump end face is 105.21 K, 77.30 K, 59.18 K, 46.76 K, and 37.88 K (Fig.6). If other conditions remain unchanged, when the pump power is 50 W, 60 W and 70 W respectively, the maximum temperature rise of the reaction is 59.18 K, 71.02 K and 82.85 K (Fig.7).

Conclusions The light energy distribution is a function of power, spot radius and Gaussian order, and the properties reflected by power, spot radius and Gaussian order are the properties of light energy distribution, and it can be seen that the light energy density is positively correlated with the temperature field and stress field. In addition, the temperature field, stress field and thermal stress variables are also positively correlated. There are many factors affecting thermal focal length, but the most important one is temperature gradient distribution.

Key words: thermal effect; temperature field; finite element analysis; Yb:YAG laser; end-pumped

Funding projects: National Natural Science Foundation of China (11705136)