

文章编号: 0258-7025(2006)Supplement-0016-04

激光二极管阵列侧面抽运 Nd:YAG 圆片激光器 热力学分析

张申金^{1,2}, 周寿桓^{1,2}, 唐晓军², 秘国江², 吕华昌²

¹西安电子科技大学技术物理学院, 陕西 西安 710079
²华北光电技术研究所固体激光技术国家重点实验室, 北京 100015

摘要 对圆片增益介质建立了均匀内热源、底面恒温冷却及其他面绝热的热传导模型, 得到不同抽运功率、不同圆片厚度时, 圆片内温度、位移及等效应力场的三维分布。结果表明, 均匀的内热源、低的热功率、薄的圆片及合理的冷却方式可实现一维的温度分布, 减小圆片内的温度、位移及等效应力。

关键词 激光技术; 激光二极管阵列侧面抽运; Nd:YAG 圆片; 温度分布; 等效应力分布

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A

Thermodynamics Analysis in Diode-Laser Side-Pumped Nd:YAG Disk Laser

ZHANG Shen-jin^{1,2}, ZHOU Shou-huan^{1,2}, TANG Xiao-jun², BI Guo-jiang², LÜ Hua-chang²

¹ School of Technology Physics, Xidian University, Xian, Shaanxi 710079, China
² National Key Laboratory of Solid-State Laser, North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China

Abstract Based on conduction model of even heat source, cooling underside and making the other sides adiabatic, the three-dimensional distributions of temperature, displacement and Von Mises stress of disk gain medium are calculated. The calculation results indicate that: even heat source, low heat power, thin medium and reasonable cooling can realize one-dimensional temperature distribution and decrease the temperature, displacement and Von Mises stress inside the disk.

Key words laser technique; diode-laser side-pumping; Nd:YAG disk; temperature distribution; Von Mises stress distribution

1 引言

高功率激光系统中激光二极管阵列(LDA)抽运固体激光器的热管理, 是大功率激光二极管抽运固体激光器(DPSSL)的一个主要问题^[1]。圆片激光器的结构设计允许高的抽运功率密度而在径向上不产生显著的温度梯度, 防止了因热应力过大而导致的断裂, 有效解决了激光介质的热效应问题, 成为未来高平均功率、高光束质量激光器的重要发展方向^[2~4]。

本文对圆片激光器建立了均匀分布的内热源、底面恒温冷却及其他面绝热的计算模型, 得到不同圆片厚度、不同抽运功率情况下, 稳态时 Nd:YAG 圆片内温度、位移及等效应力场三维分布的规律。结果表明, 晶体内均匀的抽运光分布、低的热功率密度、薄的晶体厚度及合理的散热冷却方式可以减少圆片内的热效应现象, 提高激光器的输出功率、光束

质量和效率。

2 理论模型

采用侧面抽运 Nd:YAG 圆片激光器的工作方式。圆片的侧面及上表面与静止的空气直接接触, 其对流换热系数很小, 计算中作绝热面处理。假设圆片底面的冷却效果及晶体内抽运光分布是均匀的, 底面 20 °C 恒温, 同时将底面 X, Y, Z 方向上的位移约束为零。

部分抽运光转化为介质的内热源, 在介质内产生温度梯度, 进而形成热应力。热力学分布与介质的参量、结构及外部环境等条件有关。在圆柱坐标系中, 瞬态热传导方程为^[5]

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{\rho C_p} \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{q_v}{k} \right), \quad (1)$$

作者简介: 张申金(1978—), 男, 山东新泰人, 西安电子科技大学物理学院博士研究生, 主要从事激光二极管抽运高功率固体激光器的研究。E-mail: zhangshenjin@163.com

式中 r 和 z 分别为圆片的半径和轴线方向; T 为圆片介质内的温度; t 为时间; k, ρ, C_p 分别为介质的导热系数、密度、比热容; q_v 为介质内的内热源强度, 可由 (2) 式求得

$$q_v = \eta \cdot \frac{\Delta I}{\Delta V}, \quad (2)$$

式中 ΔI 为介质微元体积 ΔV 内吸收的抽运光, η 为转化为热的光能在吸收的总抽运光能中所占的比例。温度场稳态分布时, 介质内温度分布不随时间变化, (1) 式两侧等于零。介质内热应力的分布遵守弹性力学的三个基本方程: 平衡微分方程、几何方程及物理方程^[6]。

3 模拟结果及分析

取圆片的 1/8 作为计算模型, 模拟计算得到不同圆片厚度和不同热功率情况下, 稳态时圆片的温度、位移及应力场的三维分布, 采用的 Nd:YAG 参量见文献[7]。

3.1 相同热功率、不同厚度

计算得到热功率为 100 W, 圆片厚度分别为 5 mm 和 3 mm, 稳态后圆片的温度、位移及等效应力场分布, 同时得到圆片上表面沿半径路径上各节点的位移在 z 轴方向分量的变化曲线, 分别如图 1~图 4 所示。

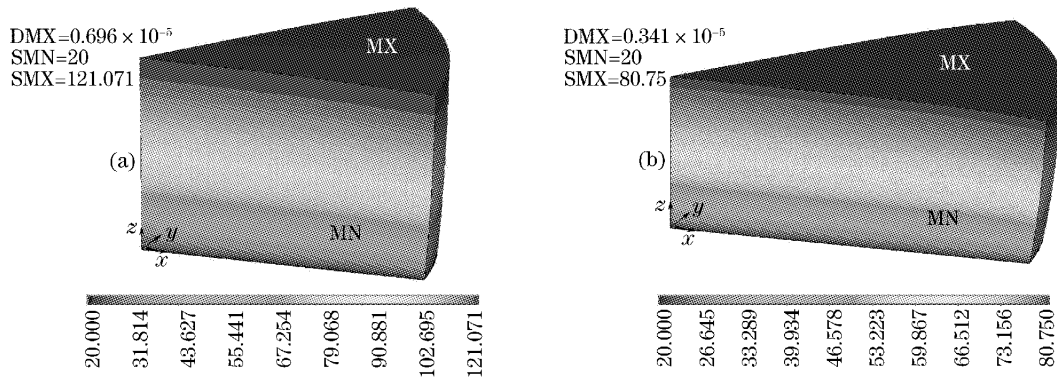


图 1 厚度为 5 mm(a)和 3 mm(b)的圆片内各节点的温度分布

Fig. 1 Temperature distributions of disks with thicknesses of 5 mm (a) and 3 mm (b)

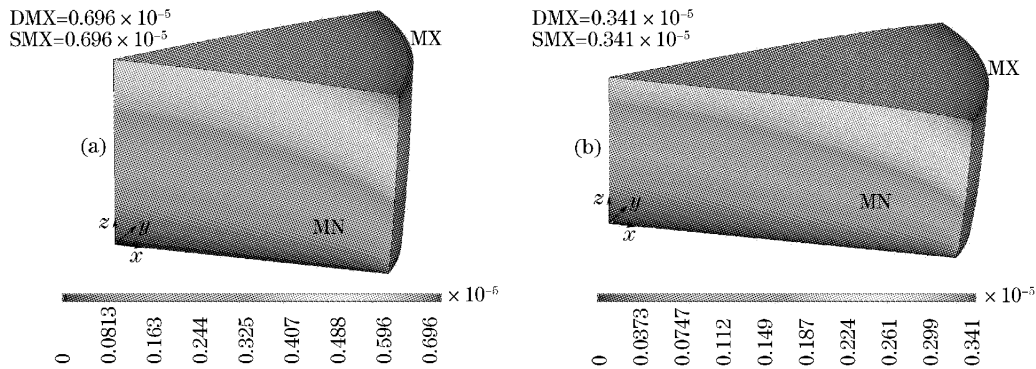


图 2 厚度为 5 mm(a)和 3 mm(b)的圆片内各节点的位移分布

Fig. 2 Displacement distributions of disks with thicknesses of 5 mm (a) and 3 mm (b)

从图 1 可以看出, 较厚圆片的温度比较薄介质的温度要高, 这是因为虽然较厚介质内的热功率密度较低, 但由于 Nd:YAG 的导热系数较小, 导致介质上表面产生的热不能较快传导到与冷却器接触的下表面。

由图 2 可见, 位移的最大值出现在上表面的圆周上。较厚介质内位移的最大位移量是较薄介质的两倍多, 因为较厚介质内温度较大, 且厚度较厚, 介

质内各节点的位移在介质上表面逐渐累积的更多, 即较厚圆片沿着半径向外、沿着 z 轴向上膨胀的更为明显。

图 3 表明, 等效应力的最大值出现在圆片底面的圆周上, 最小值出现在圆片上表面的圆周上, 因为介质底面在 X, Y, Z 方向上约束为零。较厚介质内各节点的等效应力比较薄介质的要大, 因为较厚介质内各节点的温度较大, 厚度也较厚。

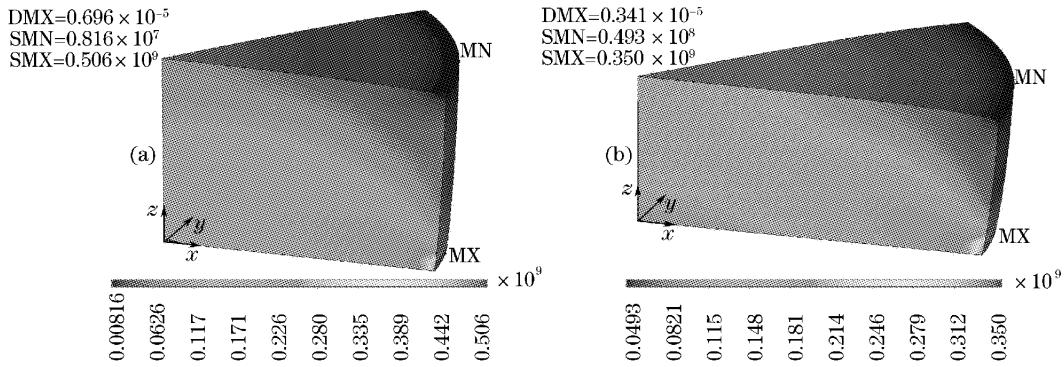


图 3 厚度为 5 mm (a)和 3 mm (b)的圆片内各节点的等效应力分布

Fig. 3 Von Mises stress distributions of disks with thicknesses of 5 mm (a) and 3 mm (b)

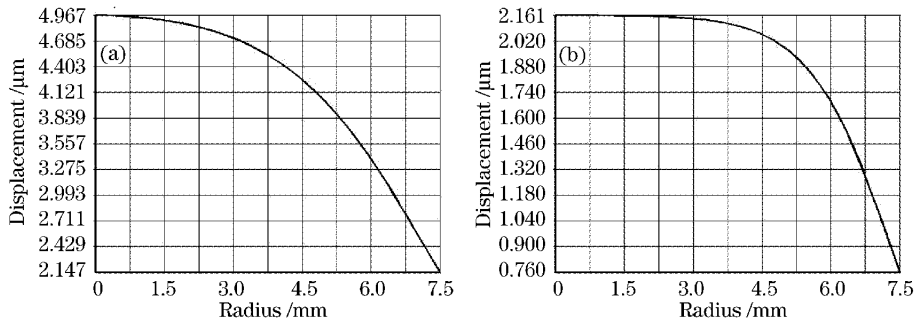


图 4 厚度为 5 mm (a)和 3 mm (b)的圆片上表面沿半径路径的位移在 z 轴方向的分量

Fig. 4 z-direction component of displacement along radius of up surface for disks with thicknesses of 5 mm (a) and 3 mm (b)

从图 4 可以看出,越靠近圆片上表面的圆周,位移在 z 轴方向的分量越小,即出现所谓“塌边”现象的边缘效应。比较相同位置节点的位移在 z 轴方向的分量,较厚介质的值比较薄介质的值要大一倍多,在圆周上甚至要大两倍多,这是因为较厚介质上表面的温度较高,且厚度较厚。在较薄介质中,靠近圆片轴线节点的位移在 z 轴方向的变化较为缓慢,远离轴线节点的位移变化较为迅速,这使得较薄介质的上表面有更好的表面平整度。

比较厚度为 5 mm 和 3 mm 的圆片模拟结果可知,稳态时圆片内温度、位移及等效应力场分布的趋势相同,且都是轴对称分布的,因为两者热传导的模型相同,且都是轴对称的。

3.2 不同热功率、相同厚度

计算得到热功率为 150 W,厚度为 5 mm 时,圆片内的温度、位移、等效应力场分布及圆片上表面沿半径路径,位移在 z 轴方向上分量的变化曲线,分别如图 5~图 8 所示。

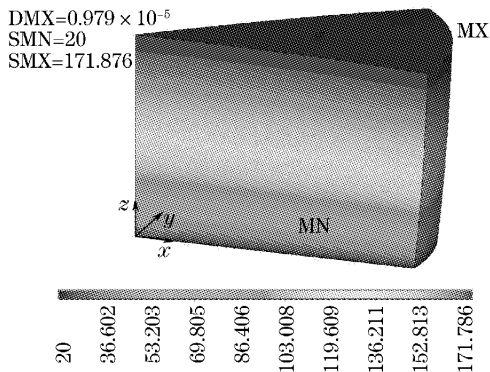


图 5 圆片内各节点的温度分布

Fig. 5 Temperature distribution of disk

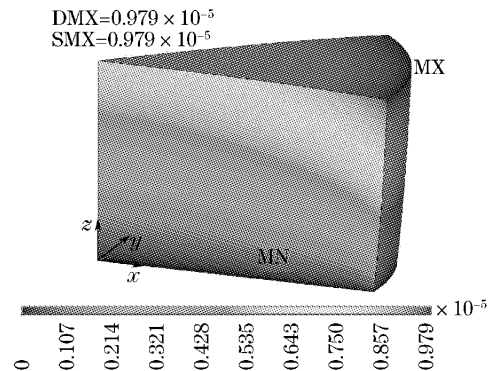


图 6 圆片内各节点的位移分布

Fig. 6 Displacement distribution of disk

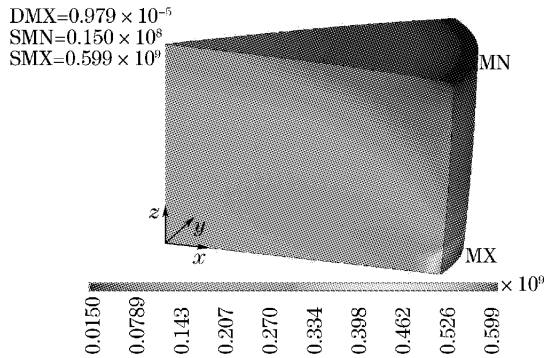


图7 圆片内各节点的等效应力

Fig. 7 Von Mises stress distribution of disk

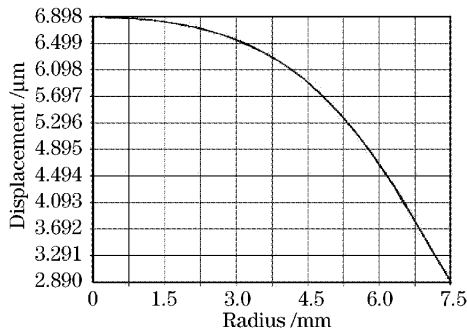


图8 表面沿半径路径的位移在z轴方向的分量

Fig. 8 z-direction component of displacement along radius of up surface

比较厚度为 5 mm, 热功率为 100 W, 150 W 时的计算模拟结果, 可以看出: 不同热功率、相同圆片介质厚度情况下, 介质内各节点的温度、位移及等效应力场分布的趋势与上述计算模拟的结果是相同的。同时, 相同厚度及冷却条件下, 热功率越大, 圆片的温度越高, 圆片内各节点的位移越大, 等效应力越大, 上表面的平整度越差, 这是因为热功率越大, 圆片内的温度越高, 圆片内各节点与热结构相关的量也就越大。

4 结 论

基于以上分析可以看出: 对于侧面抽运、底面冷却、其他面绝热的圆片介质, 温度、位移及等效应力的分布规律与热功率、圆片厚度无关。上表面的位移在 z 轴方向分量的最大值在 z 轴位置处, 最小值在圆周位置。相同冷却条件下, 热功率越大、厚度越厚, 圆片介质内各节点的温度较高, 位移越大, 等效应力也越大, “塌边”现象越明显, 即上表面的平整度越差。总之, 实现晶体内均匀的内热源、减小内热源密度、减薄圆片的厚度及采取合理的散热冷却方式, 可减小介质内各节点的温度、位移及等效应力, 进而提高激光器的输出功率、光束质量和效率。

参 考 文 献

- 1 Luo Yiming, Li Mingzhong, Qin Xingwu *et al.*. Study on ring-LD side-pumping solid laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2002, **14**(3): 331~333
罗亦鸣, 李明中, 秦兴武等. 大功率环形 LD 侧面泵浦 Nd³⁺:YLF 激光器的特性[J]. *强激光与粒子束*, 2002, **14**(3): 331~333
- 2 John Vetrovec. Ultrahigh-average power solid state laser [C]. *SPIE*, 2002, **4760**: 491~505
- 3 Yao Zhenyu, Lü Baida, Tu Bo *et al.*. 100 W diode-pumped Nd:YAG disk laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, **16**(9): 1116~1118
姚震宇, 吕百达, 涂波等. 100 W 二极管泵浦薄片激光器 [J]. *强激光与粒子束*, 2004, **16**(9): 1116~1118
- 4 C. Stewen, K. Contag, M. Larionov *et al.*. A 1 kW CW thin disc laser [J]. *IEEE J. Sel. Top. in Quantum Electron.*, 2000, **6**(4): 650~657
- 5 Zhao Zhennan. Heat Transfer [M]. Beijing: Higher Education Press, 2002
赵镇南. 传热学 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2002
- 6 Zhao Junhai, Wang Mengfu. Elasticity and Finite Elements [M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2003
赵均海, 汪梦甫. 弹性力学及有限元 [M]. 北京: 武汉理工大学出版社, 2003
- 7 Thomas J. Kane, John M. Eggleston, Robert L. Byer. The slab geometry laser-part II: Thermal effects in a finite slab [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1985, **QE-21**(8): 1195~1210