

文章编号:1004-4213(2010)05-0776-5

LDA 侧面抽运棒状激光器热透镜效应的有限单元法分析*

刘全喜, 钟鸣

(西南技术物理研究所, 成都 610041)

摘要:建立了激光二极管阵列端面抽运棒状激光介质的数值模型. 考虑到介质与空气的对流换热和介质的热力学参量随温度的变化, 根据经典热传导方程和热弹性方程, 运用有限单元法, 得出了棒状介质内瞬态温度、热应力和应变的分布. 分析了热透镜焦距随抽运功率的变化规律, 所得的规律与有关文献相符合. 理论分析结果可为激光二极管阵列抽运固体激光器的结构优化设计和实验提供理论参考.

关键词:棒状激光器; 激光二极管阵列端面抽运; 温度分布; 热应力分布; 应变分布; 有限单元法; 热透镜效应

中图分类号: TN248.1

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20103905.0776

0 引言

激光二极管阵列(Laser-Doide Array, LDA)端面抽运固体激光器具有效率高、谱线窄、寿命长、横模选择能力强等优点, 因此 LDA 端面抽运固体激光器成为近些年研究的热点. 但当高功率激光端面抽运晶体时, 会产生端面形变、热应力双折射和热透镜等热效应, 严重影响了大功率端面抽运固体激光器的输出功率、光-光转换效率和光束质量等^[1-4]. 因此, 研究端面抽运晶体激光器的热透镜效应具有重要的意义.

2000 年, 张行愚等实验研究了激光二极管端面抽运激光器的热透镜效应^[3]; 2007 年, 宋小鹿等对端面抽运全固态激光器的温度分布做了研究^[4]. 2007 年, 李明真等对 LD 端面抽运截面为正方形的复合晶体的温度和热焦距进行了研究^[5]. 本文建立了 LDA 端面抽运棒状激光晶体的三维数值模型, 考虑到晶体介质热力学参量随温度的变化和介质与空气的对流换热, 以热传导方程和热弹性方程为基础, 采用有限单元分析算法, 对棒状激光介质中的瞬态温度、热应力、应变和热透镜进行了详细模拟计算和分析讨论, 计算结果可以为 LDA 抽运固体激光器设计提供参考.

1 理论模型

1.1 端面抽运棒状激光器的抽运结构

图 1 为 LDA 端面抽运棒状激光器的结构示意图. LDA 发出的抽运光经光纤耦合, 并经耦合透镜聚焦后进入激光晶体. 晶体介质外表面置于水冷装置中散热, 前后表面和空气对流散热.

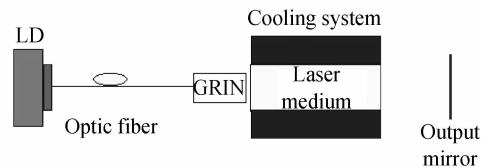


图 1 端面抽运棒状激光器的结构
Fig. 1 Schematic diagram of end-pumped for rod laser

1.2 温度场分析

激光晶体中的温度分布不仅与晶体的热物性参量、几何结构有关, 还与外部环境条件有关, 并且还会随时间发生变化. 由于对称性, 只需分析轴向截面的一半, 如图 2. 在柱面坐标系中, 热传导方程为^[6-8]

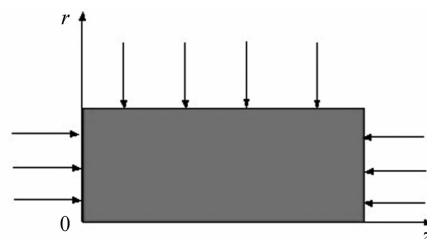


图 2 数值分析模型
Fig. 2 Geometry diagram of numerical analysis

* 西南技术物理研究所资助

Tel: 028-68011316

Email: liuquanxi234@sohu.com

收稿日期: 2009-12-23

修回日期: 2010-02-09

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} - k(T) \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right] = q \quad (1)$$

初始条件和边界条件分别为

$$T|_{t=0} = T_0 - k(T) \frac{\partial T}{\partial z} \Big|_{\Sigma_1, \Sigma_2} = h_1(T - T_a) - k(T) \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = h_2(T - T_c) \quad (2)$$

式中, T 为温度; t 为时间; $k(T)$ 为材料热导率, 与温度有关; ρ 为密度; c_p 为定压比热容; Σ_1, Σ_2 为介质的前表面和后表面, 与空气对流换热, T_a 为外界空气的温度, h_1 为介质和空气的对流换热系数; T_c 为冷却剂的温度, h_2 为介质和冷却装置的对流换热系数; R 为激光晶体介质的半径; q 为内热源强度;

采用光纤耦合的激光二极管阵列, 经聚焦后进入介质内的光场分布可近似用高斯分布表示, 其归一化分布函数为^[3-4]

$$I(r, z) = \frac{2P}{\pi \omega(z)^2 [1 - \exp(-\alpha l)]} \cdot \exp \left[-2 \left(\frac{r^2}{\omega(z)^2} \right) - \alpha z \right] \quad (3)$$

聚焦后的光斑半径可表示为

$$\omega(z) = \omega_0 + \theta |z - z_0| \quad (4)$$

则内热源强度 q 可表示为

$$q = \gamma \alpha I(r, z) \quad (5)$$

式中 P 为入射到介质的抽运总功率; α 为介质的吸收系数; l 为介质长度; ω_0 为束腰半径; θ 为光束发散角; z_0 为束腰位置; γ 为由荧光量子效应和内损耗决定的热转换系数, 表示吸收的抽运光中转化为热能的份额。

运用有限单元法, 将空间域离散为有限多个单元体, 单元体内的温度可近似用结点温度插值得到, 利用 Galerkin 方法选择权函数, 时间域上采用后差分格式可得介质内的温度分布。

1.3 热应力分析

介质内温度场发生非均匀变化, 必然产生热应变和热应力, 热应变和热应力可用热弹性方程来描述^[6-8]

$$\nabla^2 u_r - \frac{u_r}{r^2} + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial r} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial r} = 0 \quad (6)$$

$$\nabla^2 u_z + \frac{1}{1-2\nu} \frac{\partial e}{\partial z} - \frac{2(1+\nu)}{1-2\nu} \alpha_T \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad (7)$$

式中, u_r, u_z 分别是 (r, z) 点的位移在 r, z 方向上的分量; ν 为材料的泊松比; e 为体应变; α_T 为材料的热膨胀系数, 随温度变化比较明显。

取自由边界条件, 对包括边界条件在内的全部求解域进行有限元离散, 根据位移、应变、应力之间的弹性力学关系, 由热应力的位能原理的泛函表达式得出确定结点位移的矩阵方程, 在介质内温度场

分布已知的条件下, 即可用有限单元法求得介质内的热应力和应变。

1.4 热透镜焦距分析

激光介质吸热后会产生热致折射率改变、端面形变和热致双折射, 这三方面的因素就构成了激光介质的热透镜效应, 而这三方面的影响因素都可以归结为加上热载荷前后激光介质对传输光所造成的光程差(OPD)所致。一束光通过具有热透镜效应的晶体, 离介质轴向 r 处产生的光程差为^[3,5,9]

$$\text{OPD}(r) = \int_0^l \left[\frac{\partial n}{\partial T} T(r) \right] dz + \int_0^l [(n_0 - 1) \Delta u(r)] dz + \sum_{ij=1}^3 \int_0^l \left[\frac{\partial n}{\partial \epsilon_{ij}}(r) \epsilon_{ij}(r) \right] dz \quad (8)$$

式中, n_0 为介质的折射率; $\frac{\partial n}{\partial T}$ 为介质折射率随温度的变化率; $\Delta u(r)$ 为介质的轴向长度变化量; ϵ_{ij} 为热致应变张量中的元素, 径向和切向的数值不同, 引起径向和切向折射率的变化不同, 产生热致双折射; 可以看出式右端包含了导致激光介质中的热透镜效应的三方面的因素: 第一项为温度引起的折射率变化即热色散; 第二项代表介质的端面变形即端面效应; 而第三项为热致双折射。在抽运光光斑中心与激光棒轴心重合的前提下热透镜焦距可表示为^[3,5,9]

$$f = \frac{r^2}{2[\text{OPD}(0) - \text{OPD}(r)]} \quad (9)$$

2 模拟计算结果

运用理论分析, 对 LDA 端面抽运棒状介质 Nd:YAG 晶体的温度、热应力、应变分布和热透镜焦距进行了数值模拟。介质的尺寸为 $\Phi 3 \times 4 \text{ mm}^2$; 掺杂晶体的吸收系数为 $\alpha = 0.32 \text{ mm}^{-1}$; $\gamma = 32\%$; $n_0 = 1.82$; $\frac{\partial n}{\partial T} = 7.3 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$; 设冷却水、介质的初始温度和空气温度为 293 K ; $h_1 = 5 \times 10^{-5} \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$, $h_2 = 0.01 \text{ W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$; 抽运光总功率为 12 W ; $\omega_0 = 0.4 \text{ mm}$; $\theta = 0.02 \text{ rad}$; $z_0 = 0$; 抽运时间为 3 s 。表 1 给出了晶体的热力学参量^[9-10]。热导率和热膨胀系数随温度的变化比较明显, 分别为

$$k(T) = 1.9 \times 10^8 [\ln(5.33 \times T)^{-7.14}] - 33 \text{ 100}/T (\text{W}/\text{cm} \cdot \text{K})$$

$$\alpha_T = 3.3 \times 10^{-8} T - 1.78 \times 10^{-6} (/K)$$

表 1 Nd:YAG 晶体的热力学参量

Table 1 Thermodynamic parameters of Nd:YAG

$\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	$C_p/(\text{J} \cdot \text{g}^{-1} \text{K}^{-1})$	E/GPa	ν
4.56	0.59	300	0.3

2.1 温度场分布模拟

图 3 为 $t = 3 \text{ s}$ 时刻轴向截面的温度场的分布

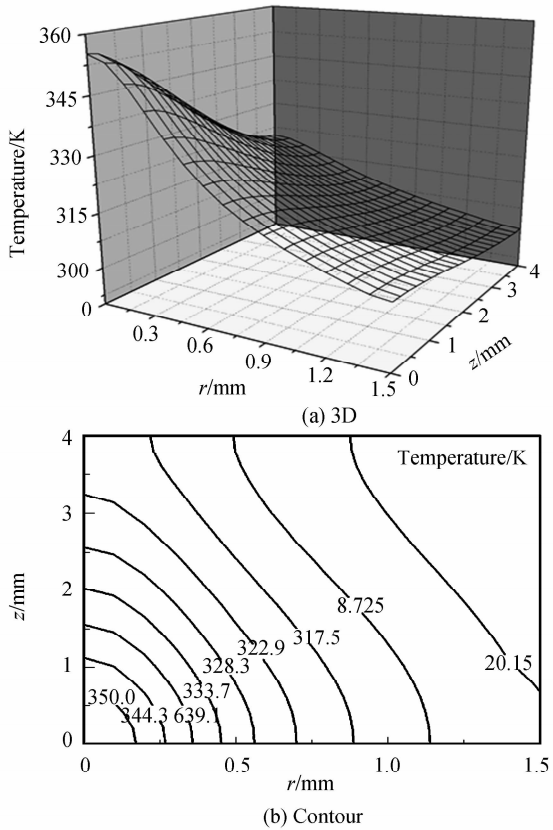


图3 $t=3$ s 轴向截面内温度场的分布图
Fig. 3 Temperature distribution on axial cross section at $t=3$ s

图. 由图可以看出, 介质最高温度出现在前表面 ($z=0$) 中心点, 温度从最高点沿径向、轴向逐渐降低, 前表面光斑外侧附近温度梯度较大.

2.2 热应力分布模拟

图4为轴向截面内环向应力的三维分布图. 由图可以看出, 前表面为张应力, 沿径向先增大后减小, 在光斑外侧附近达到最大值, 这样会使前表面膨胀向外凸起, 产生热透镜效应; 环向应力在前表面中心沿轴向由张应力快速的变为压应力, 达到最大压应力后减小到零, 最大压应力出现在前表面中心点的后方附近. 一般材料的抗压强度均远大于其抗拉强度, 所以若是应力损伤, 则应是前表面张应力的拉

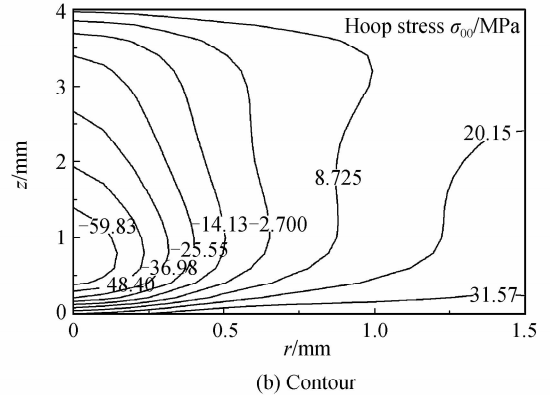
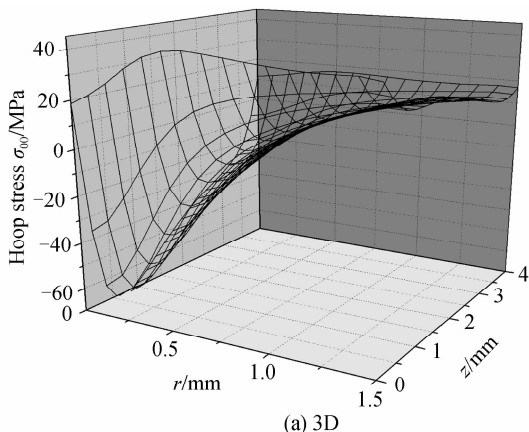


图4 $t=3$ s 时轴向截面内环向应力分布图
Fig. 4 Hoop stress distribution at $t=3$ s on axial cross section

伸破裂.

2.3 应变分布模拟

图5为 $t=3$ s 时刻轴向截面轴向应变的三维分布图. 由图可以看出, 最大轴向应变点也是最高温度点, 在前表面中心, 由最大值点沿径向、轴向逐渐降低; 前表面向外凸起, 产生热透镜效应.

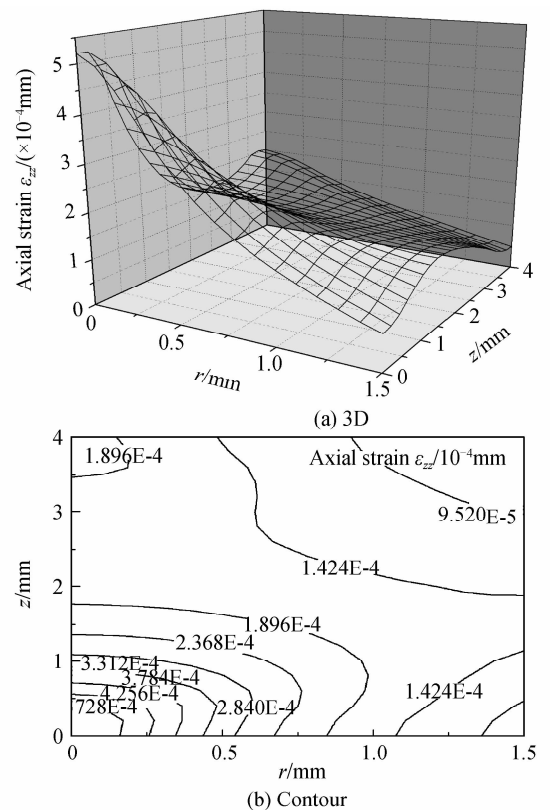


图5 $t=3$ s 时轴向截面内轴向应变分布图
Fig. 5 Axial strain distribution at $t=3$ s on axial cross section

2.4 热透镜焦距模拟

图6为 $t=3$ s 时径向热透镜焦距 f_r 和切向热透镜焦距 f_θ 随抽运功率的变化关系图. 可以看出热透镜焦距在抽运功率很小时很大, 但随着抽运功率的增大而快速减小, 径向热透镜焦距小于切向热透

镜焦距,表明出现了热致双折射,这对激光器(尤其是偏振激光器)的运转必将带来附加的退偏损失。在 $P=12\text{ W}$ 时,计算的径向热透镜焦距和切向热透镜焦距分别约为 156 mm 和 189 mm ,切向热透镜焦距约为径向热透镜焦距的 1.21 倍;文献[3]中同样参量下实验测得的热透镜平均总焦距在 $165\sim 170\text{ mm}$ 之间,表明理论分析和实验相符。

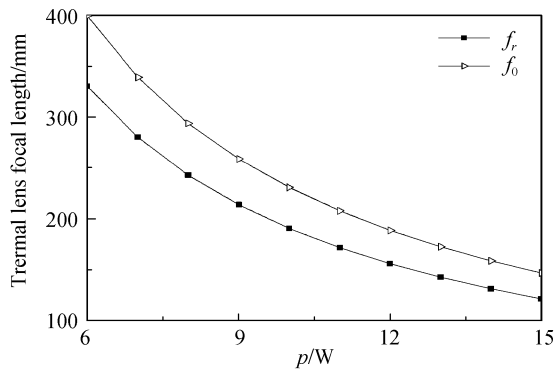


图 6 $t=3\text{ s}$ 时热透镜焦距随抽运功率的变化关系

Fig. 6 Thermal lens focal length versus pump power at $t=3\text{ s}$

3 结论

建立了 LDA 端面抽运棒状固体激光介质的轴对称数值模型,考虑到介质与空气的对流换热和介质材料的热力学参量随温度的变化,根据经典热传导方程和热弹性方程,运用有限单元法,得出了棒状介质内温度、热应力和应变的分布,分析了径向热透镜焦距和切向热透镜焦距随抽运功率的变化规律,结果表明,棒的最高温度和最大应变的位置相同,在前表面的中心;前表面为张应力,最大张应力在前表面光斑外侧附近;热透镜焦距随着抽运功率的增大而减小,径向热透镜焦距小于切向热透镜焦距,切向热透镜焦距约为径向热透镜焦距的 1.2 倍。计算结果可为 LDA 抽运固体激光器的结构优化设计和实验研究提供理论参考。

参考文献

[1] DAVID F W. A brief history of high-power semiconductor lasers[J]. *IEEE Sel Top Quant*, 2000, **6**(6):1470-1477.

- [2] PAYNE S A, BIBEAU C, BEACH R J, *et al.* Diode-pumped solid-state lasers for inertial fusion energy [J]. *Journal of Fusion Energy*, 1998, **17**(3):213-217.
- [3] ZHANG Xing-yu, ZHAO Sheng-zhi, WANG Qing-pu, *et al.* Study on thermal lens of $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ laser pumped by a laser diode[J]. *China J Lasers*, 2000, **A27**(9):777-781.
张行愚,赵圣之,王青圃,等.激光二极管抽运的激光器热透镜效应的研究[J]. *中国激光*, 2000, **A27**(9):777-781.
- [4] SONG Xiao-lu, LI Bing-bin, WANG Shi-yu, *et al.* Transient thermal effect in pulsed laser diode end-pumped solid-state laser[J]. *China J Lasers*, 2007, **34**(11):1476-1482.
宋小鹿,李兵斌,王石语,等.脉冲激光二极管端面抽运全固态激光器热效应瞬态过程[J]. *中国激光*, 2007, **34**(11):1476-1482.
- [5] LI Ming-zhen, ZHU Zhan-shou. Diode-end-pumped $\text{Nd}:\text{YVO}_4/\text{YVO}_4$ composite crystal lasers [J]. *Journal of Dongguan University of Technology*, 2007, **14**(5):33-36.
李明真,朱占收.激光二极管端面抽运 $\text{Nd}:\text{YVO}_4/\text{YVO}_4$ 复合晶体激光器热效应研究[J]. *东莞理工学院学报*, 2007, **14**(5):33-36.
- [6] LIU Quan-xi, ZHONG Ming, JIANG Dong, *et al.* Finite element analysis of damage threshold of semiconductor induced by multiple lasers[J]. *Laser & Infrared*, 2006, **36**(8):670-674.
刘全喜,钟鸣,江东,等.重频激光辐照半导体损伤的有限元分析[J]. *激光与红外*, 2006, **36**(8):670-674.
- [7] ZHANG Xiao-long, SHEN Jin-hua, CAI De-fang, *et al.* Study of temperature distribution and deformation of the end-face in end-pumped DPL[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(2):197-200.
张小龙,沈金华,蔡德芳,等.端面抽运激光晶体热形变及温度场分布研究[J]. *光子学报*, 2007, **36**(2):197-200.
- [8] LIU Quan-xi, QI Wen-zong, HAO Qiu-long, *et al.* Finite element analysis of thermal effect of photovoltaic detector irradiated by laser[J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, **28**(3):275-279.
刘全喜,齐文宗,郝秋龙,等.激光辐照光伏型光电探测器热效应的有限元分析[J]. *应用光学*, 2007, **28**(3):275-279.
- [9] KOECHNER K. Solid-state laser engineering[M]. SUN Wen, JIANG Ze-wen, CHENG Guo-xiang, translate. Beijing: Science Press, 2002.
克希耐尔 K. 固体激光工程[M]. 孙文,江泽文,程国祥,译.北京:科学出版社,2002.
- [10] BROWN D C. Nonlinear thermal distortion in YAG rod amplifiers[J]. *IEEE J Quantum Electron*, 1998, **34**(12):2383-2392.

Finite Element Method Analysis on Thermal Lens Effect of the Rod Laser End-pumped by LDA

LIU Quan-xi, ZHONG Ming

(South-West Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: A numerical model of the rod laser medium end-pumped by laser-diode array (LDA) is set up. Under considering the influence of temperature correlation of the thermodynamic parameters of the material and heat transfer coefficient between air and medium, based on the thermal conduction equations and the thermal-elastic equations, the transient distributions of temperature and thermal stress and strain in the rod medium are calculated by a finite element analysis method. The influence disciplinarian of the pump power on thermal lens focal length in the medium is analyzed. The theoretical results accord with interrelated experiment and provide theoretical reference for the design of solid laser pumped by LDA and experimental study.

Key words: Rod laser; Laser-diode array end-pumping; Temperature distribution; Thermal stress distribution; Strain distribution; Finite element method; Thermal lens effect



LIU Quan-xi was born in 1977. Currently, he is working for the Ph. D. degree, and his research interests focus on laser technology.



ZHONG Ming was born in 1957. He received the Ph. D. degree from Harbin Institute Of Technology. Currently, he is a research fellow, and his research interests focus on intense laser technology.