

文章编号: 1001-3806(2014)01-0017-04

掺 Nd³⁺ 玻璃微球阵列激光器的热学性能研究

丁建永¹, 桂 珞², 彭 波³, 韦 玮^{1*}

(1. 南京邮电大学 光电工程学院, 南京 210046; 2. 中国科学院 上海光学精密机械研究所 高功率激光和物理联合实验室, 上海 201800; 3. 中国科学院 西安光学精密机械研究所 瞬态光学与光子技术国家重点实验室, 西安 710119)

摘要: 为了研究二极管阵列抽运折射率匹配液冷却的掺 Nd³⁺ 玻璃微球阵列增益区产生的热效应, 采用 FLU-ENT 6.3.26 软件建立了激光器增益区流场的热-流-固耦合模型, 利用有限元分析法, 模拟分析了钕玻璃微球阵列的温度分布与自身尺寸、匹配液流速、微球层数和抽运频率的变化关系及其对热畸变的影响。由模拟结果可知, 固体微球激光器的热恢复时间短, 冷却效果与微球层数无关, 流速增加对小尺寸微球的冷却效果无明显改善; 当抽运频率为 1Hz 时, 直径为 2mm 和 4mm 的微球增益区的单程最大光程差为 3.1nm 和 51.9nm。结果表明, 该构型激光器具有高效的冷却能力。这一结果对微球阵列激光器的热管理是有帮助的。

关键词: 激光器; 热分析; 流-热-固耦合模型; 折射率匹配; 二极管抽运

中图分类号: TN248.1 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.01.004

Thermal analysis of the neodymium-doped microspheres array lasers

DING Jianyong¹, GUI Luo², PENG Bo³, WEI Wei¹

(1. School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China; 2. National Laboratory on High Power Laser and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China; 3. State Key Laboratory of Transient Optics and Photonics, Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, Chinese Academy of Science, Xi'an 710119, China)

Abstract: In order to study the thermal effect of the neodymium-doped microsphere array caused by the pumping laser diode array (LDA), a thermal-flow-solid coupling model was established with FLUENT6.3.26 software, and the dependence of the temperature of neodymium-doped microsphere array on its size, fluid velocity, pump frequency and the number of microsphere layers was analyzed by means of finite element analysis. Analysis results show that the laser has short thermal recovery time and the cooling effect has nothing to do with the number of layers. The cooling effect of the microspheres in the small size isn't improved by increasing velocity. The maximum one-way optical path difference of Nd³⁺ microsphere in 2mm and 4mm diameter was 3.1nm and 51.9nm respectively at a repetition rate of 1Hz. The results show that the neodymium-doped microsphere array laser has a highly efficient cooling capacity and is beneficial to the thermal management of a microsphere array laser.

Key words: lasers; thermal analysis; thermal-flow-solid coupling model; index-matching; diode-pumped

引 言

热管理问题是制约高能激光系统发展的主要障碍之一^[1-3], 在激光器工作过程中会有部分抽运能量转化为热量。当激光器在高重复频率或高功率

输出下工作时, 激光介质中存在的热积累问题是不可忽略的^[4-5]。为了有效地控制高能激光器的热效应问题, 各种激光器热管理的技术方案被提出并得到不断发展, 比如经典的热容激光器、板条激光器、碟片激光器^[6-9], 但是热效应仍然是限制这几种激光器发展应用的主要因素。近年来, 流体直接冷却固体激光器的研究进入了飞速发展的阶段, 美国通用原子公司和清华大学的作者对该型激光器进行了实验研究^[10], 认为该型激光器从物理上讲不再受热效应的局限, 具有极高的输出功率。

作者给出了一种基于折射率匹配液冷却的固体

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61077070; 61177086)

作者简介: 丁建永(1988-), 男, 硕士研究生, 现主要从事新型激光器设计及其热管理研究。

* 通讯联系人。E-mail: weiwei@njupt.edu.cn

收稿日期: 2013-04-22; 收到修改稿日期: 2013-05-21

微球阵列激光技术^[11],并对其热学性能进行研究。微球阵列完全浸泡于匹配液中,微球与液体界面的反射损耗取决于两者的温度分布情况。当两者折射率相同时不存在界面反射,但当激光器工作时,微球吸收抽运能量使得内部温度分布不均匀,进而导致折射率失配,降低激光输出能量和光束质量。因此,对影响微球阵列温度分布因素的研究是十分必要的。本文中采用 FLUENT6.3.26 软件建立了增益区流场的流-热-固耦合模型,使得界面的换热系数不再是计算的先决条件,并提高了计算精度^[12],分析了抽运脉冲结束后至下次抽运脉冲来临之前区域内增益介质的温度分布,得到不同尺寸钕玻璃微球的热恢复时间,并分析了不同流速、微球尺寸和层数对激光介质温度分布的影响。

1 理论基础

钕玻璃微球阵列作为增益介质分层排列于比色皿中,比色皿两端加阻拦层,可以起到优化流场、降低湍流度的作用,如图 1a 所示。图中,1 为液体池,材质为石英,表面光滑,尺寸为 40.1mm × 32.1mm × 4.1mm;2 为掺Nd³⁺的磷酸盐玻璃微球,折射率为 1.534@1053nm,微球直径为 2mm 和 4mm,按阵列排布于液体池中;3 为阻拦片,呈“工”字型,可固定微球、优化流场。图 1b 为激光器结构。表 1 为参量列表。匹配液为二溴乙烷和四溴乙烷的混合溶液,在一定温度下,匹配液的折射率与钕玻璃微球精确匹配,且匹配液对抽运光和信号光的吸收极小。匹配液沿 x 轴正方向流经增益区,二极管阵列沿 z 轴

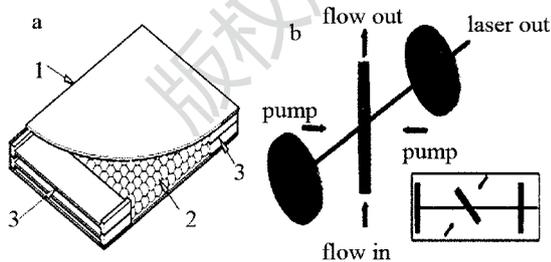


Fig. 1 Schematic diagram of the model

a—microsphere array b—structure of the microsphere array laser

Table 1 Parameters in the calculation

	$\alpha/$ cm^{-1}	$\kappa/$ $(\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-1})$	$c_p/$ $(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	$\rho/$ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$
neodymium-doped microspheres	3	0.614	750	2830
index-matching liquid	0	0.8	1900	2180

方向对增益区进行双侧抽运,单台二极管阵列输出能量为 0.7J,脉宽 200μs,波长 801nm。匹配液对抽运光和信号光吸收极小,抽运前匹配液折射率与微球折射率相同。

由激光二极管发出的抽运光经过优化的聚光腔到达增益介质表面时,可以被认为是均匀分布。当双侧抽运时,增益介质的热源强度可以用下式来表示:

$$Q(y, z) = I_0 \eta \alpha \{ e^{-\alpha y} + e^{-\alpha(a-y)} \} \quad (1)$$

式中, I_0 为抽运光强, η 为光热转化效率, α 为钕玻璃微球吸收系数, a 表示抽运方向增益介质长度, z 表示抽运方向增益介质的坐标。因为微球体积较小,可以认为微球在抽运时内部温度分布是均匀的。将相关实验参量带入(1)式可知,抽运导致钕玻璃微球的温度升高了 0.75K。假设初始时刻为抽运结束时刻,微球的热传导方程可由无源 3 维瞬态热传输方程来描述:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \kappa \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (2)$$

初始条件:

$$T(x, y, z; 0) = T_0(x, y, z) \quad (3)$$

边界条件:

$$-\kappa \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_{\Sigma_1} = h_b (T|_{\Sigma_1} - T_1) \quad (4)$$

式中, T 表示微球温度, ρ, c_p, κ 分别为钕玻璃微球的密度、比定压热容和导热系数, Σ_1 为钕玻璃微球的抽运表面, h_b 为钕玻璃微球边缘与匹配液的对流传热系数, T_1 为匹配液的温度, T_0 为初始时刻微球温度, n 表示垂直于界面的法线方向。

由于微球内部温度分布不均匀会导致折射率的改变。因此,对增益区进行网格划分,共 m 个面积微元,每个微元被认为温度分布均匀,微元光程差为 D_i ,将微元的光程差积分,即得到增益区抽运方向(z 轴)单程的光程差:

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{dm}{dT} l_i \Delta T_i \quad (5)$$

式中, ΔT_i 表示第 i 个面积微元的温差, l_i 表示面积微元在信号光传输方向的长度。

2 模拟结果与讨论

针对复杂几何区域内的流体流动与传热现象,可采用 FLUENT 软件对微球阵列增益区涉及的光学分析问题进行分析。利用前处理软件创建微球

阵列增益区耦合模型,设置钕玻璃微球和匹配液参量,打开能量方程、湍流方程,设置边界条件,选择非稳定数值解法,入口设为速度入口,出口为压力出口(背压 0Pa),进行迭代求解,监测残差曲线,直到达到收敛条件。计算结束后就可以得到微球阵列的温度场分布、速度场分布、压力场分布和密度场分布,再将获得的数据导入 MATLAB 软件,并结合光程差的计算公式,即可得到微球阵列的波前畸变。

2.1 液体流速、微球尺寸对钕玻璃微球温度分布的影响

图 2 为钕玻璃微球阵列(直径为 2mm 和 4mm)在匹配液入口流速为 0.1m/s,0.5m/s 和 1.0m/s 的情况下,微球阵列温升变化的曲线。可以看出,对于同一尺寸的钕玻璃微球来说,液体流速对钕玻璃微球冷却效率影响较小,主要原因是钕玻璃较低的导热系数,使得内部热量不能快速传到出来,匹配液只能带走有限热量。当液体入口速率为 0.1m/s 时,微球内部间隙较小,在管道压力下增益区内流速大大增加,最大流速可达 3.1m/s,匹配液完全可以带走微球所传导的热量,因此增加流速对小尺寸微球的影响不大。对于直径越小的钕玻璃微球,其面积体积比越大,越利于散热。

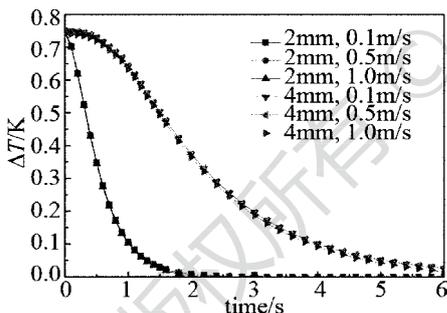


Fig. 2 The cooling curve of microspheres at different flow rates (microspheres in 2mm diameter and 4mm diameter)

2.2 微球层数对钕玻璃微球温度分布的影响

微球散热面积大,球面与匹配液的对流传热系数高,最重要的是钕玻璃微球相当于片状钕玻璃的一个微元,对钕玻璃微球的冷却就相当于从内部对片状钕玻璃进行冷却,降低了低导热系数对冷却效率的不利影响。为了研究微球排列层数对微球温度分布的影响,建立微球直径为 2mm 和 4mm 的单层和多层(10 层)模型,在流速为 0.1m/s 时,对其耦合分析,见图 3。可以看出,层数对直径 2mm 微球温度分布无影响,而对直径 4mm 微球略有影响。因此,微球可以灵活地组合排列,便于设计增益区结构。

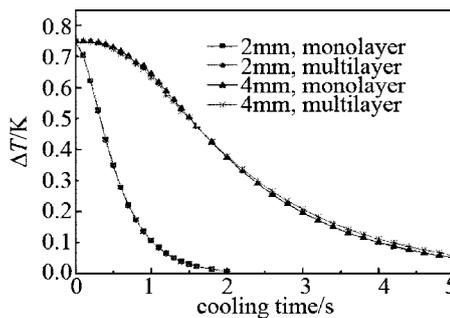


Fig. 3 The cooling curve of microsphere array in different monolayer at 0.1m/s flow rate (microspheres in 2mm diameter and 4mm diameter)

2.3 抽运频率对钕玻璃微球温度分布的影响

钕玻璃微球阵列激光器在重复频率下工作时,激光作用出现在抽运周期的中后期,光学畸变来自于抽运过程产生的热梯度,而非来自冷却造成的热流。在重复抽运时,钕玻璃微球内部热量在下次抽运来临之前会仍有残留,并随着抽运次数的增加,微球的热积累增加,最终会达到稳定态。设定抽运频率为 1Hz,匹配液入口速率为 0.1m/s,直径为 2mm 和 4mm 微球内部温差随抽运时间的变化关系如图 4 所示。分析表明,在 1Hz 的抽运频率下,直径为 2mm 的微球内部没有出现明显的热量积累,即在抽运周期内,0.1m/s 流速的匹配液对微球有良好的降温效果,而直径为 4mm 的微球内部有明显的热量积累,即该高频率抽运时,直径为 2mm 的微球阵列激光器工作更加稳定,光束热致畸变较小。

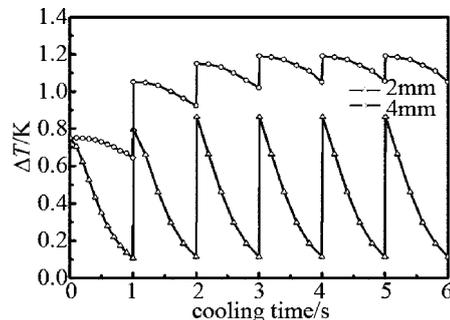


Fig. 4 The curve of temperature difference of microspheres at 1Hz pump frequency (microspheres in 2mm diameter and 4mm diameter)

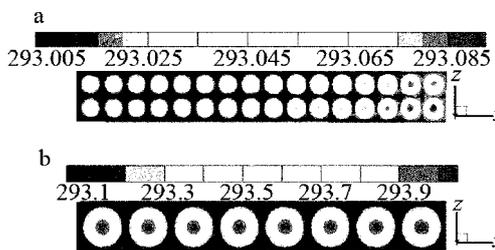


Fig. 5 The temperature distribution of microsphere array a—2mm diameter b—4mm diameter

图 5a 和图 5b 为钕玻璃微球在流速 0.1m/s、抽运频率 1Hz 下稳定工作时,经 1s 冷却后在下次抽运来临前 2mm 和 4mm 钕玻璃微球在 x - O - z 截面上的温度分布, x 轴正向为匹配液流向。由此可以看出,4mm 微球在重复频率工作时内部温差要比 2mm 微球高 0.81K,而且靠近入口的 2mm 微球内部温度均匀分布,在接近出口处时微球内部温差仅为 0.09K。

将 FLUENT 计算的温度数据导入 MATLAB 程序中,根据(5)式绘制出光截面内单个微球区域的光程差分布图,如图 6 所示。液体流动对信号光波前影响极小,现只考虑温度梯度因素导致的波前畸变^[13-14]。图 6a 为直径 2mm 微球的出光截面的光程差分布图,增益区的剩余热畸变每程为 3.1nm,4mm 微球的剩余热畸变每程为 51.9nm,说明 2mm 微球阵列热恢复能力强,激光束的波前畸变小。

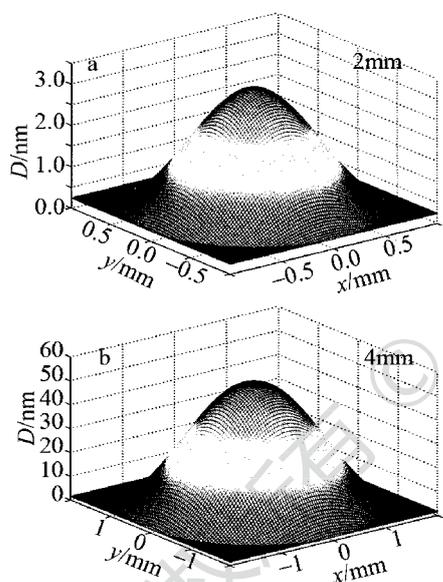


Fig. 6 The initial temperature distribution of microsphere array
a—2mm diameter b—4mm diameter

3 结 论

通过建立抽运后的热-流-固模型,完成了钕玻璃微球阵列的瞬态模拟分析,为研究固体微球阵列激光器的热恢复效能提供了理论依据。模拟结果表明,流速对较小体积微球的温度分布影响较小,而微球尺寸则会明显影响温度分布。冷却效果与微球层数无关,那么微球的排列方式就有多种形式,有利于增益区的结构设计。在 1Hz 抽运频率下,2mm 和

4mm 微球增益区的单程最大光程差分别为 3.1nm 和 51.9nm。另外,要精确控制流动状态下匹配液的温度,使匹配液与钕玻璃微球的折射率达到动态匹配,降低反射损耗。目前折射率匹配液冷却的微球阵列激光器已经实现激光输出,为解决高能固体激光器的热管理问题提供了新的研究思路。

参 考 文 献

- [1] LI L, GAN A Sh, QI B, *et al.* Thermal effect of LD end-pumped Nd: YAG crystal with variable thermal conductivity [J]. *Laser Technology*, 2012, 36(5):612-616(in Chinese).
- [2] PENG Y F, WU D Y, ZHANG Y, *et al.* Simulation and structure design of a high power laser mirror with self-compensation of thermal distortion[J]. *Laser Technology*, 2012, 36(1):120-123(in Chinese).
- [3] REN G G. New tactical high energy liquid laser[J]. *Laser Technology*, 2006, 30(4):418-421(in Chinese).
- [4] TIAN G Zh, OU Q F, ZHONG M, *et al.* Thermal-management technology for a 2kJ high energy Nd: glass laser[J]. *Laser Technology*, 2007, 31(3):253-256(in Chinese).
- [5] GUO J W, LI T, NIU R H, *et al.* Analysis of the temperature characteristics of a Cr,Tm,Ho:YAG laser [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(6):761-764(in Chinese).
- [6] LEI Ch Q, WANG Y F, HUANG F, *et al.* Progress of high power solid-state laser pumping and coupling technology [J]. *Laser Technology*, 2011, 35(6):725-733(in Chinese).
- [7] MA D D, LIU Q, GONG L, *et al.* Design an experiment of edge-pumped asymmetric Yb: YAG/YAG thin disk laser [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(3): 228-228(in Chinese).
- [8] IYAMA K, BHUSHAN R, FURUKAWA H, *et al.* Development of kW class Nd:YAG composite ceramic thin disc laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8599:2801-2807.
- [9] LI L, DONG W W, SHI P, *et al.* Thermal effect of high power Yb:YAG microchip solid-state laser[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(1):8-12(in Chinese).
- [10] PERRY M D, BANKS P S, ZWEIBACK J, *et al.* Laser containing a distributed gain medium: USA, 6937629[P]. 2005-08-30.
- [11] SHE J B, WEI W, PENG B, *et al.* Microsphere array laser and its method of thermal management: China, 201210364009.1[P]. 2013-01-09(in Chinese).
- [12] HU T, WEI Y T, SONG Y S, *et al.* The flow field heat distribution of inorganic liquid laser under oblique pumping[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(10): 7027-7305.
- [13] WANG M G, XU X J, LU Q S. Influence of liquid flow on laser beam quality in liquid lasers [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(1):131-135(in Chinese).
- [14] WANG P F, MA Z R, LI M, *et al.* Effect of thermal flow field on the output field distribution of liquid lasers[J]. *Laser Technology*, 2010, 34(6):861-864(in Chinese).