

LDA 抽运固体微球阵列激光技术实验研究

丁建永¹ 桂 珞² 赵鹏飞³ 彭 波³ 韦 玮¹

¹ 南京邮电大学光电工程学院, 江苏 南京 210023

² 中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 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, 陕西 西安 710119

摘要 针对目前高功率固体激光器的热管理问题, 提出了一种基于折射率匹配液冷却的固体微球阵列激光技术方案。按照该方案搭建了布儒斯特角透射式激光放大光路, 进行了掺 Nd³⁺ 玻璃微球阵列激光器流动出光实验, 实现了连续稳定的激光输出, 并对其激光特性进行了初步研究。直径为 2 mm 和 4 mm 微球阵列激光器在 1 Hz 抽运频率下获得的最大单脉冲能量分别为 30.2 mJ 和 115.4 mJ, 斜率效率分别为 4.6% 和 16.2%。随着抽运频率的增加, 激光输出能量下降。实验结果表明, 掺 Nd³⁺ 玻璃微球阵列激光器具有较好的散热效能和热稳定性, 在高功率激光器方向具有极大的应用潜力。

关键词 激光器; 微球阵列激光; 热管理; 激光二极管抽运; 高功率激光

中图分类号 TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.1002010

Research on Microsphere Array Laser in Circulating State Pumped by LDA

Ding Jianyong¹ Gui Luo² Zhao Pengfei³ Peng Bo³ Wei Wei¹

¹ School of Optoelectronic Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023, China

² Joint 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 Sciences, Xi'an, Shaanxi 710119, China

Abstract A novel laser gain medium, microsphere array cooled by refractive index-matched coolant, is presented in response to the thermal management of high-power solid-state lasers in this paper. Experiments on microsphere array lasers in circulating state are carried out. The emission spectra and fluorescence decay curves are measured. Besides, the stable pulse output energy is achieved and its laser characteristics are studied. The maximum pulse energy of microsphere array laser with diameters of 2 mm and 4 mm are 30.2 mJ and 115.4 mJ, respectively at a repetition rate of 1 Hz, and the corresponding slope efficiencies are 4.6% and 16.2%, respectively. Output energy decreases as pumping frequency increases. Experimental results show that the microsphere array laser has relatively good thermal performance and thermal stability, and can be used in high-power laser systems.

Key words lasers; microsphere array laser; thermal management; laser diode pumping; high-power laser

OCIS codes 140.3410; 140.3320; 140.3480; 140.3530; 140.3580

收稿日期: 2013-04-23; 收到修改稿日期: 2013-05-27

基金项目: 国家自然科学基金(61077070, 611177086)

作者简介: 丁建永(1988—), 男, 硕士研究生, 主要从事新型激光器的设计与应用方面的研究。

E-mail: ding.jianyong@163.com

导师简介: 韦 玮(1960—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事有机/聚合物光电功能材料、新型激光材料与器件等方面的研究。E-mail: weiwei@njupt.edu.cn

1 引 言

目前,高功率固体激光器广泛应用于先进制造、国防工业、科学研究等领域^[1-2]。但激光器的热管理问题一直是制约高功率大能量激光系统进一步发展的瓶颈^[3-5]。与固体材料相比,液体材料具有流动性,可以进行循环流动冷却,具有实现高效热管理的潜力^[6]。但是传统的液体激光器(如染料激光器、掺稀土离子液体激光器等)还存在各种问题而未被广泛采用^[7]。目前,采用液体浸没式冷却的固体激光技术广受重视,具有代表性的是美国通用原子公司提出的浸泡固体激光器的技术^[8]。近年来美国 DARPA 项目的进展以及逐步披露出来的技术信息,显示了液体浸没式冷却这一激光技术的可行性和优越性^[9],这一技术路线被认为是能够解决高能激光系统热问题的方案。

本文采用折射率匹配液冷却的固体微球阵列激光器技术^[10],制造了液体浸没式冷却的新型激光器,即将固体颗粒(钕玻璃微球)规则排列在液体池中,以钕玻璃微球作为激光增益介质,折射率匹配液从微球间隙流过带走废热。该构型激光器的突出优点为:表面积-体积比较大,散热效率高;微球形结构具有较好的机械性能和抗热冲击/形变能力,可以承受很高的热负载,温度和环境的变换对其结构和面型的影响较小;微球直径仅为毫米量级,避免了大块均匀增益介质的加工难题,为受生长体积限制的晶体材料提供了广阔的应用空间。为验证微球阵列激光器的技术优势和热稳定性能,开展了激光二极管抽运掺 Nd³⁺ 玻璃微球阵列激光器的流动出光实验,实现了流动状态下高能量脉冲激光的稳定输出,测

量了单脉冲激光能量、脉冲宽度,并研究了频率对激光输出能量的影响。

2 实验装置及原理

钕玻璃微球阵列激光器的实验装置如图 1 所示。图 1(a)为微球阵列增益区的剖视图,其中液体池材质为石英,表面光滑,直径分别为 2、4 mm 的微球分别按单层排列于尺寸为 40.1 mm×28.1 mm×2.1 mm 和 40.1 mm×28.1 mm×4.1 mm 的石英皿中;掺 Nd³⁺ 磷酸盐玻璃微球的钕离子质量分数为 0.03,1053 nm 处的折射率为 1.534;阻拦片呈“工”字型,可固定微球、优化流场。图 1(b)为激光光路示意图,增益区法线方向与谐振腔中心轴线成布儒斯特角,耦合后的抽运光垂直于增益区表面入射。由于折射率匹配液流经光路,温度变化会导致匹配液折射率失配,进而降低激光输出能量,因此该实验的关键为精确控制匹配液的温度,实现在流动状态下微球和冷却液的折射率匹配。基于上述考虑,冷却液应对抽运光和信号光无吸收,且折射率与钕玻璃微球相同。实验中匹配液选用二溴乙烷(C₂H₄Br₂,折射率为 n₁,体积为 V₁)和四溴乙烷(C₂H₂Br₄,折射率为 n₂,体积为 V₂)的混合溶剂,配比公式为 $nV = n_1V_1 + n_2V_2$ 。增益区两个接头均连接温度传感器和压力传感器,对匹配液温度和管路压力进行监控。匹配液的温度由恒温装置控制,可根据需要对其温度进行调节。由于匹配液具有微弱腐蚀性,循环系统元件均采用耐腐蚀性材料,如管路为聚四氟乙烯管,动力装置为磁力泵。

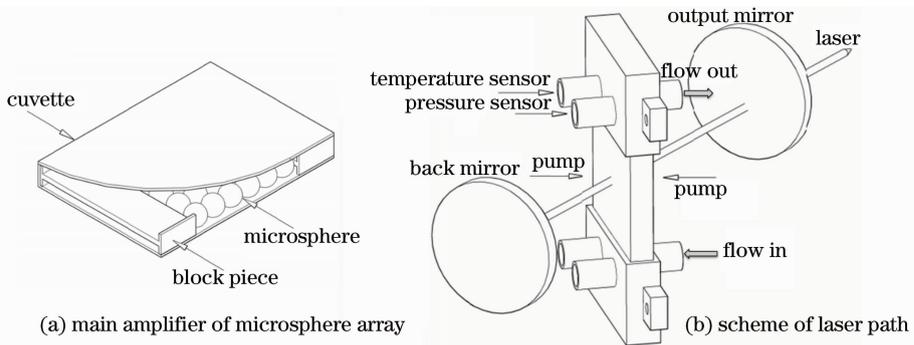


图 1 微球阵列激光装置

Fig. 1 Experimental setup of microsphere array laser

光学谐振腔为平凹腔,凹面镜为 1053 nm 全反镜,曲率半径为 300 mm,腔长约 10 cm;平面镜为输出镜,1053 nm 处透射率为 $T = 5\%$,腔镜直径为 30 mm。匹配液温度为 28.2 °C,折射率温度系数为

$-5 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$,入口流速为 0.4 m/s。抽运源为两台二极管激光器阵列,单台单脉冲能量为 700 mJ,波长为 801 nm,抽运频率调节范围为 1~10 Hz。抽运系统为单透镜耦合方式,耦合效率约为 65%,

抽运光斑面积为 $3\text{ mm} \times 16\text{ mm}$ 。钕玻璃材料的荧光发射峰为 883、1053、1323 nm，荧光寿命为

$286\ \mu\text{s}$ ，如图 2 所示。

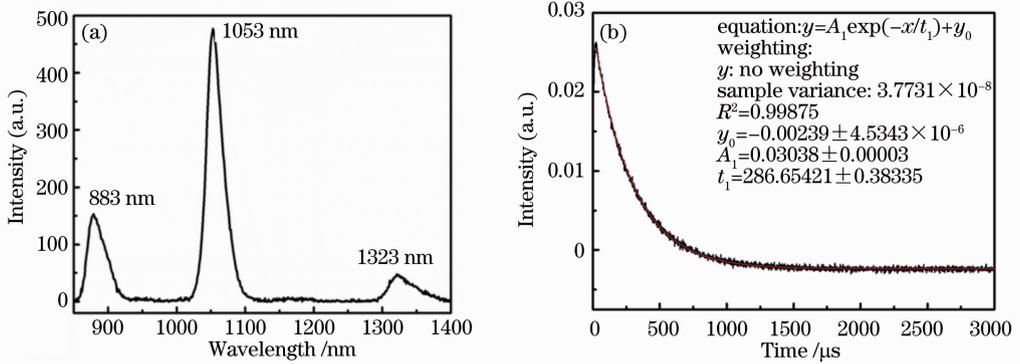


图 2 (a) 荧光光谱；(b) 荧光衰减曲线

Fig. 2 (a) Fluorescence spectroscopy; (b) fluorescence decay curves

直径为 4 mm 的钕玻璃微球阵列激光实验装置如图 3 所示，在流动状态下实现了激光输出。通过 GPIB 数据采集卡对激光脉冲能量计测得的流体激

光器输出脉冲进行记录，采用 S2000 型光纤光谱仪测量激光光谱，输出激光脉冲的波形通过硅光探头在示波器上获得。

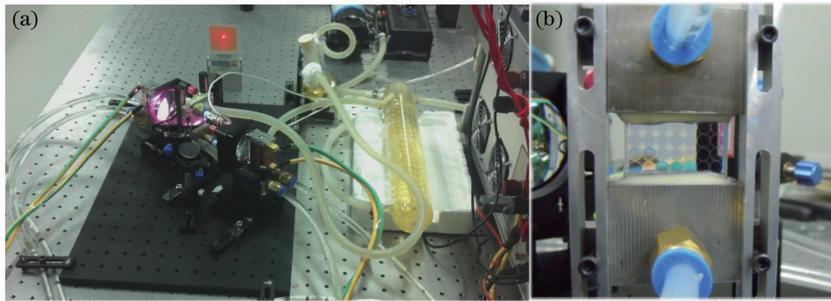


图 3 直径 4 mm 钕玻璃微球阵列激光器。(a) 实验装置；(b) 浸没在匹配液中的微球阵列

Fig. 3 Neodymium-doped glass microsphere laser with microspheres of 4 mm in diameter. (a) Experimental setup; (b) microsphere array immersed in the matching liquid

3 掺 Nd^{3+} 玻璃微球阵列激光实验结果

掺 Nd^{3+} 玻璃微球阵列激光的中心波长为 1053.2 nm，半峰全宽为 1.3 nm，其光谱如图 4 所示。抽运频率为 1 Hz 时，测量了直径分别为 2、

4 mm 的钕玻璃微球激光器连续 150 次脉冲输出能量，如图 5 所示。直径为 2 mm 的微球阵列激光器单脉冲激光最大输出能量为 30.2 mJ，平均值为 28.4 mJ；直径为 4 mm 的微球阵列激光器单脉冲激

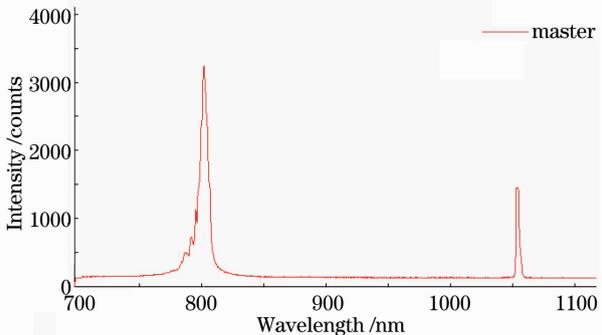


图 4 激光光谱图

Fig. 4 Spectrum of microsphere array laser

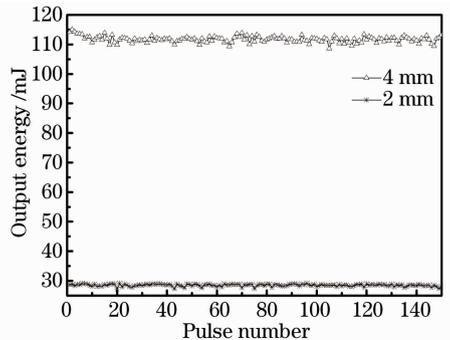


图 5 抽运频率为 1 Hz 时两激光输出能量
Fig. 5 Output energy of two lasers with repetition rate of 1 Hz

光最大输出能量为 115.4 mJ, 平均值为 110 mJ。两种尺寸的激光器均实现了激光的连续稳定输出, 且无明显衰减, 说明该构型的激光器具有较好的散热效能和热稳定性。

通过测量不同抽运能量下微球阵列激光的输出能量, 得到如图 6 所示的数据。经直线拟合得到直径分别为 2、4 mm 微球阵列激光器的斜率效率分别为 4.6% 和 16.2%。前者斜率效率低的主要原因是单层排列的 2 mm 微球阵列的增益体积仅为 4 mm 微球阵列的 1/3。16。对于直径 2 mm 的微球可考虑采用多层阵列来提高抽运能量的利用率。图 7 (a) 为输出激光的脉冲宽度 (约为 100 μ s), 计算可知, 两种尺寸的激光器单脉冲最大峰值功率分别为

0.3 kW 和 1.15 kW。图 7 (b) 为 CCD 获得的远场光斑, 光斑半径约为 3.6 mm。

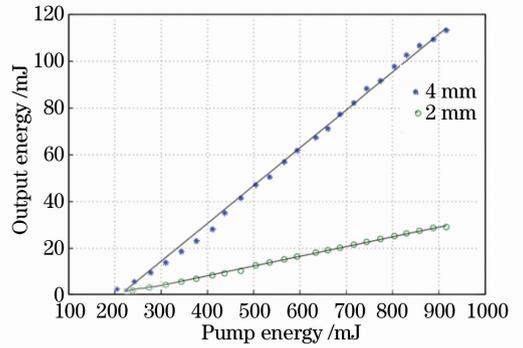


图 6 两激光器的斜率效率

Fig. 6 Slope efficiencies of lasers

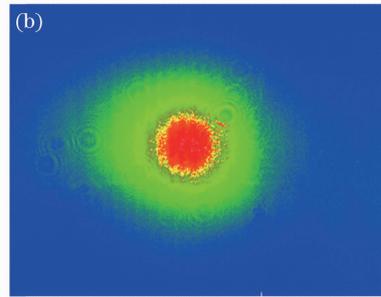
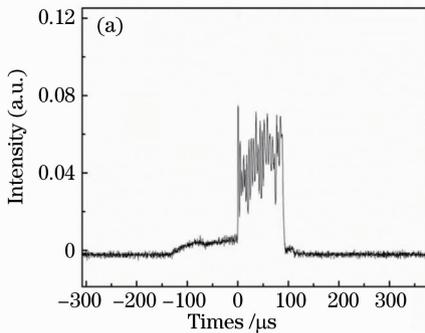


图 7 (a) 激光脉冲波形; (b) 远场光斑

Fig. 7 (a) Laser pulse waveform; (b) spot of far-field

匹配液温度不变时, 测得直径分别为 2、4 mm 的钕玻璃微球阵列激光器输出能量随抽运频率的变化图如图 8 所示。随着抽运频率的增加, 直径分别为 2、4 mm 的微球阵列激光器的输出能量均有不同程度的下降, 后者下降速度远大于前者。输出能量下降的主要原因为微球阵列增益结构所组成的光学系统对温度变化比较敏感。随着抽运频率的增加, 钕玻璃微球和匹配液的温度发生变化, 使得固-液界面存在折射率差, 导致钕玻璃微球激光器输出能量

下降, 光束质量变差。该现象对尺寸大的微球影响尤为显著, 尺寸越大, 其面积-体积比越小, 微球内部积累的热量受限于低热传导系数难以在短时间被匹配液带走, 使得固液折射率失配。抽运频率的增加使得固液折射率失配进一步加剧, 最终导致输出能量迅速下降。因此, 当微球阵列激光器的抽运频率改变时应及时调节匹配液温度, 从而达到微球阵列激光系统的动态折射率匹配。调节流速或匹配液温度均可改善微球阵列激光器出光效果。

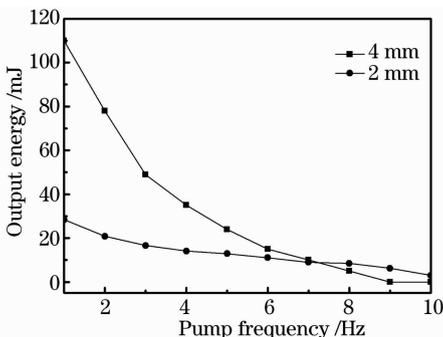


图 8 不同抽运频率时激光脉冲输出能量

Fig. 8 Output energy at different repetition rates

4 结 论

开展了掺 Nd^{3+} 玻璃微球阵列激光器的抽运出光实验, 实现了流动状态下的激光输出。抽运频率为 1 Hz 时, 直径为 2 mm 和 4 mm 的微球阵列激光器单脉冲激光最大输出能量分别为 30.2 mJ 和 115.4 mJ, 最大峰值功率分别为 0.3 kW 和 1.15 kW, 斜率效率分别为 4.6% 和 16.2%。同时, 研究了抽运频率对输出能量的影响, 抽运频率增加时微球阵列激光输出能量下降; 微球尺寸越大, 输出能量下降越明显。对微球阵列激光器的初步研究为

高能固体激光器的发展提供了新的思路,需要进行更深入的研究。

参 考 文 献

- 1 Jin Quanwei, Li Mi, Tang Chun, *et al.*. High beam quality and high power LD pumped solid-state laser[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(12): 1202001.
靳全伟, 李 密, 唐 淳, 等. 高光束质量高功率激光二极管抽运固体激光器[J]. 中国激光, 2011, 38(12): 1202001.
- 2 Angell A. The High-Energy Laser: Tomorrow's Weapon to Improve Force Protection [R]. Wangshington DC: National Defense University, 2012.
- 3 Wang Chao, Tang Xiaojun, Chen Sanbin, *et al.*. Investigation on thermal effect of high power slab laser with 11 kW[J]. Chinese J Lasers, 2010, 37(11): 2807-2809.
王 超, 唐晓军, 陈三斌, 等. 输出功率 11 kW 的高功率固体板条激光器介质热分析 [J]. 中国激光, 2010, 37 (11): 2807-2809.
- 4 Hou Chaoqi, Wei Wei, Peng Bo, *et al.*. A neodymium fluid laser: laser emission in circulating state[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44: 1633-1635.
- 5 Dai Shoujun, He Bing, Zhou Jun, *et al.*. Cooling technology of high-power and high-power fiber laser amplifier[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502003.
代守军, 何 兵, 周 军, 等. 高功率散热技术及高功率光纤激光放大器[J]. 中国激光, 2013, 40(5): 0502003.
- 6 Li Mi, Wang Yali, Li Chunling, *et al.*. Output characteristic research of inorganic liquid laser system pumped with laser diode array[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(2): 0214004.
李 密, 王亚丽, 李春领, 等. 二极管抽运无机液体激光体系输出特性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 0214004.
- 7 Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Progress of rare-earth-doped liquid laser[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2007, 44 (1): 45-50.
叶云霞, 范滇元. 掺稀土离子液体激光器的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2007, 44(1): 45-50.
- 8 M D Perry, P S Banks, J Zweiback, *et al.*. Laser Containing a Distributed Gain Medium: US. 6937629. [P]. 2005-8-30.
- 9 M A Wilmington. Textron Defense Systems Awarded Funding for the DARPA HELLADS Program [EB/OL]. 2008-10-03 [2013-05-21] <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/hellads.htm>.
- 10 She Jiangbo, Wei Wei, Peng Bo, *et al.*. Microsphere Immersed in Liquid Laser and Thermal Management: China, 201210364009.1[P]. 2013-01-09[2013-05-21].
余江波, 韦 玮, 彭 波, 等. 微珠浸没式液体激光器及其热管理方法: 中国, 201210364009.1[P]. 2013-01-09 [2013-05-21].

栏目编辑: 张 腾