

二极管抽运无机液体激光体系输出特性研究

李 密 王亚丽 李春领 王 姣 柳丽卿

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要 开展了二极管抽运流动无机液体激光体系的激光实验研究, 获得了长时间稳定的准连续激光输出, 抽运频率 300 Hz 时的平均输出功率超过 10 W, 光光转换效率约为 6%。实验中研究了抽运电流、抽运频率、输出耦合率和磁力泵转速对平均输出功率的影响, 并进行了初步的理论分析, 为进一步开展无机液体流动激光实验研究积累了经验。同时, 很好地解决了无机激光液体的长时间保存技术问题, 有效地避免了激光液体光学性能的退化。实验结果表明, 二极管抽运的无机液体体系在流动时能有效地避免热沉积, 可以获得长时间稳定的准连续激光输出。

关键词 液体激光; 流动出光; 激光功率; 抽运频率; 输出耦合率

中图分类号 TN248.3⁺2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201131.0214004

Output Characteristic Research of Inorganic Liquid Laser System Pumped with Laser Diode Array

Li Mi Wang Yali Li Chunling Wang Jiao Liu Liqing

(Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China)

Abstract Lasing experiment of inorganic liquid system pumped bilaterally with laser diode array under flowing state is carried out, and the smooth quasi continuous-wave laser output for long time is achieved. The average laser output power is higher than 10 W when the pumping frequency is 300 Hz, and the optical to optical efficiency is about 6%. The influence of pumping current, pumping frequency, output coupling ration and the rotate speed of magnetic pump on the laser average output power is researched, and the elementary academic analysis is carried out. The experience for the further lasing experimental research of the inorganic liquid laser system under flowing state is accumulated. At the same time, the preservation technology problem of inorganic laser liquid for long time is solved and the optical performance degradation for the inorganic laser liquid is avoided effectively. The experimental results show that the inorganic liquid laser system pumped by laser diode array can avoid heat deposition effectively at flowing state and obtain the smooth quasi continuous-wave laser output in long time.

Key words liquid laser; lasing at flowing state; laser power; pumping frequency; output coupling ratio

OCIS codes 140.3410; 140.3480; 140.3530; 160.3380

1 引 言

热效应是制约激光器在高平均功率下运行的巨大障碍, 为了减小热效应对激光输出带来的许多不利影响, 技术人员对激光材料、工作模式和几何形状等方面进行了大量研究, 发展了许多革命性的实用技术, 推动了高平均功率激光技术的迅速发展^[1~7]。基于不同的热管理思路, Livermore 实验室提出二极管抽运掺铈无机液体体系的研究方向, 并开展了实验研究^[8,9]。比较固体和液体激光材料可知: 液

体材料具有高损伤阈值、无热应力和热致双折射及通过流动可长时间运行等优点, 而且液体材料具有明显的成本优势^[10,11]。理论分析表明: 只要克服了液体穿越抽运区域时的热畸变, 则液体激光体系在流动状态下能够获得长时间、高性能的激光输出^[12,13]。2004 年 3 月, Livermore 实验室的科研人员进行了连续二极管双侧横向抽运无机液体激光器的实验研究, 增益区体积为 0.4 mm × 0.4 mm × 10 mm, 获得了功率 1.2 W、光束质量接近衍射极限

收稿日期: 2010-05-24; 收到修改稿日期: 2010-06-29

作者简介: 李 密(1981—), 男, 硕士, 研究实习员, 主要从事激光技术及应用等方面的研究。

E-mail: limi@tsinghua.org.cn

的连续激光输出^[14],并提出了高能液体激光区域防御体系(HELLADS)^[15]。

目前,国内对二极管抽运无机液体体系的实验研究还很不够,理论研究缺乏相应的实验数据支撑,无机液体激光技术的研究进展比较缓慢。本文开展了二极管抽运流动无机液体体系的激光实验,实现了准连续激光输出,为进一步研究高功率液体激光技术奠定基础。

2 无机液体流动激光实验装置

图1为无机液体流动激光实验装置原理示意图。光学谐振腔为平凹腔,其中凹面镜为全反镜,其曲率半径为3 m,平面输出镜的输出耦合率有10%和20%两种,无机液体流场截面尺寸为10 mm×3 mm。抽运模块的峰值功率为2000 W,抽运脉宽300 μs,最大占空比为10%,中心波长808 nm(激光液体吸收峰位于801 nm),经过两块柱透镜对快轴和慢轴进行准直,最终会聚成尺寸10 mm×3 mm的光斑,对无机液体双侧抽运。液体增益盒为石英材料,其对1053 nm波长激光的透射率约为95.5%。在流动激光实验中分别对不同抽运频率、不同抽运强度和不同磁力泵转速下的输出特性进行了研究。

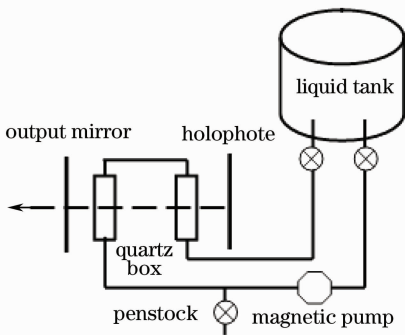


图1 无机液体流动激光实验装置示意图

Fig.1 Sketch map of liquid laser at flowing state

图2为双侧抽运、单增益模块流动出光实验装置,谐振腔长度约为7.7 cm;图3为单侧抽运、双增益模块流动出光实验装置,该装置中串联了两个尺寸相同的液体增益盒,两个液体增益盒中的激光液体流动方向刚好相反以抵消流动方向的温度分布不均匀性^[16]。由于抽运模块只有两个,因此两个液体增益盒只能采用单侧抽运,抽运模块分别放置在两增益盒的两侧。光学谐振腔仍然选择平凹腔,腔长为25.0 cm,两个增益盒中心间距14.8 cm,其余参数不变。两增益盒串联以后的单程传输损耗将会高达9.0%,输出功率会有明显下降。

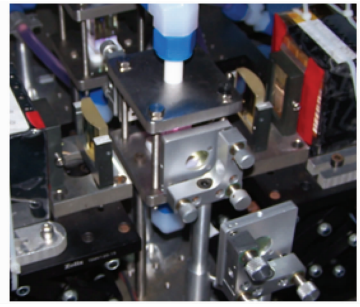


图2 双侧抽运无机液体流动出光实验装置

Fig.2 Experiment equipment of inorganic liquid laser system the lasing at flow state in pumped bilaterally with laser diode

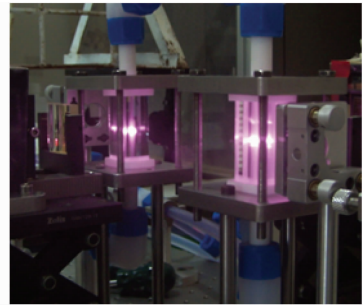


图3 单侧抽运双模块液体激光流动出光实验装置

Fig.3 Experiment equipment of the lasing at flow state in double module liquid laser pumped unilaterally with laser diode

3 无机液体流动激光实验结果

无机液体吸收的抽运功率直接影响输出功率的大小,因此需要测量增益区内无机液体吸收的抽运功率,方法是分别测量经过柱透镜聚焦的抽运光斑的单脉冲能量和透过无机液体的抽运光能量,二者相减并乘以抽运频率即可得到无机液体吸收的抽运功率。实验中,在两个抽运模块电流100 A时测得无机液体吸收的抽运脉冲能量分别为290 mJ和360 mJ,再扣除石英盒表面和固-液界面的损耗,实际吸收的抽运脉冲能量分别约为280 mJ和350 mJ。

实验中,开展了双侧抽运单增益模块液体激光实验研究和单侧抽运双增益模块串联激光实验研究。在双侧抽运单模块液体流动激光实验中,测量了抽运电流、抽运频率、输出耦合率 T 和磁力泵转速 V 对激光平均输出功率的影响,并进行了初步的理论分析;在单侧抽运单增益模块和单侧抽运双增益模块串联激光实验中,测量了抽运频率对输出功率的影响。

图4为不同频率下的激光输出功率曲线。从图4中可知,随着抽运频率的增长,平均激光功率基

本上按照线性增长;抽运电流(对应于抽运强度)越大,激光功率越高。实验中测得在双侧抽运时激光振荡的阈值电流为 30 A,在抽运电流 100 A,输出耦合率 $T=20\%$ 和抽运频率 300 Hz 时的激光平均输出功率为 11.6 W,此时对应的光光转换效率约为 6%。

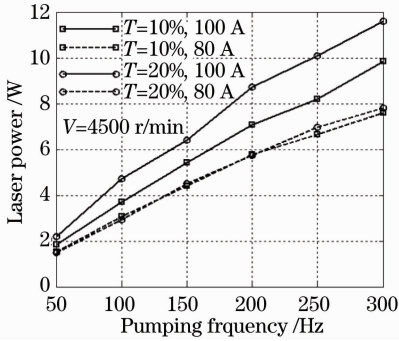


图 4 不同抽运频率下的激光功率(双侧抽运)

Fig. 4 Laser power at different pumping frequencies (bilateral pumping)

图 5 为不同转速下的激光输出功率曲线。从图 5 中可知,磁力泵转速增大有利于提高激光输出功率,但是在磁力泵转速增大到临界转速时继续提高转速对激光输出功率的提高效果会变得很有限。定义临界转速为输出功率达到极限输出功率的 95% 时的转速,则当抽运电流越大,抽运频率越高,其临界转速越高。当抽运频率为 300 Hz,抽运电流 100 A,其临界转速约为 4500 r/min。实际上,临界转速是抽运热沉积和流动散热达到平衡的临界点。

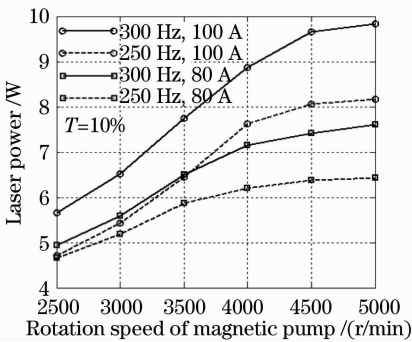


图 5 不同磁力泵转速下的激光输出功率

Fig. 5 Laser output power at different rotation speeds of magnetic pump

图 6 为单侧抽运状态下不同频率对应的激光输出功率,也基本符合线性增长规律,不过其输出功率不到双侧抽运对应的输出功率的一半,这是因为单侧抽运时的激光振荡区域体积远远小于双侧抽运的激光振荡区域体积。图 7 为两个增益模块串连工作时的激光输出功率与工作频率的关系曲线,其中 L 为谐振腔长度。由于两个增益模块串联,传输界面

过多导致激光损耗太大,同时由于两个增益盒的相对平行性较差,导致激光输出功率明显下降,300 Hz 时的功率只有 0.5 W。

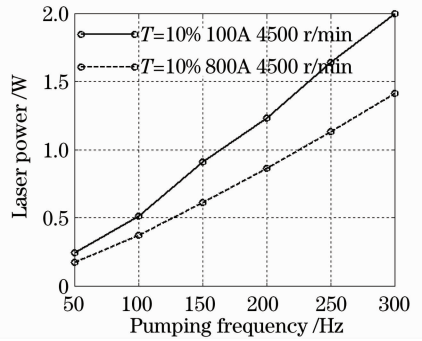


图 6 不同抽运频率下的激光功率(单侧抽运)

Fig. 6 Laser power at different pumping frequencies (unilateral pumping)

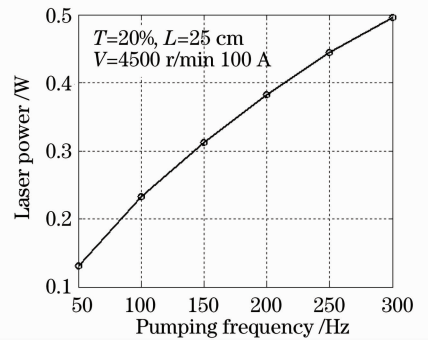


图 7 不同抽运频率下的双模块激光功率

Fig. 7 laser power of double gain module at different pumping frequencies

实验发现,双增益模块串联能够获得更好的光斑形状。在单个增益模块工作时,输出光斑为长条形;在两个增益模块串联工作时,输出光斑为圆形,上述现象有待进一步研究。

实验还发现,由于无机液体的快速更新,在 300 Hz 频率下进行 5 min 持续抽运,输出功率稳定性优于 2%。通过红外测温仪测得无机液体整体温度只上升 18 °C,以大量液体整体温度的缓慢上升避免了增益区内液体温度的大幅上升,从而实现长时间稳定的激光输出。

实验很好地解决了无机激光液体长时间保存的技术难题:无机液体在流动装置内放置时间长达 12 天,光学性能没有出现退化,主要是实验室环境湿度得到较好控制。若实验室环境湿度超过 60%,并且液体存放期间的实验室温度低于 18 °C,液体增益盒表面将出现结露,容易导致水分通过可溶性聚四氟乙烯(PFA)接口渗入激光液体而引起无机液体光学性能明显退化。根据上述特点,无机液体在流动装

置内存放期间的环境湿度不宜超过 40%，同时除湿机需要长时间工作以控制实验室环境湿度。由于无机液体的强酸性，为了防止 PFA 材料在无机液体中长时间浸泡，无机液体在流动装置内的放置时间为 12 天，实际上在确保实验室湿度得到控制的前提下，无机液体可以在流动装置内放置更长的时间而确保其光学性能不退化。

4 结 论

本文进行了二极管抽运无机液体体系的流动激光实验研究，实现了长时间稳定的准连续激光输出，在抽运频率 300 Hz 时的平均输出功率超过 10 W，光光转换效率约为 6%。实验中测量了工作条件对输出功率的影响，为进一步开展无机液体流动激光实验积累了经验。同时很好地解决了无机激光液体的长时间保存问题，有效地避免了激光液体光学性能的退化。实验结果表明，二极管抽运的无机液体体系在流动时能有效地避免热沉积，可以获得长时间稳定的准连续激光输出；抽运光源的热沉积功率密度越高，则磁力泵临界转速越高；双增益模块串联的工作方式能够获得更理想的输出光斑形状，有利于提高激光输出的光束质量。

参 考 文 献

- Zhou Shouhuan, Zhao Hong, Tang Xiaojun. High average power laser diode pumped solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1605~1618
周寿桓, 赵 鸿, 唐小军. 高平均功率全固态激光器[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1605~1618
- Ren Guoguang. The current situation and development trend of high energy laser weapon[J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2008, **45**(9): 62~69
任国光. 高能激光武器的现状与发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(9): 62~69
- He Kunna, Wei Zhiyi, Zhang Zhiguo *et al.*. Overview on laser diode pumped solid-state laser with direct pumping scheme [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1679~1685
何坤娜, 魏志义, 张治国. 全固态激光直接抽运技术的发展和研究现状[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1679~1685
- Tian Changqing, Xu Hongbo, Cao Hongzhang *et al.*. Cooling technology for high-power solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1686~1692
田长青, 徐洪波, 曹宏章 等. 高功率固体激光器冷却技术[J].

- 中国激光*, 2009, **36**(7): 1686~1692
- Liu Huan, Gong Mali, Gao Song. Progress in corner-pumped all-solid-state laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(7): 1693~1699
刘 欢, 巩马理, 高 松. 角抽运全固态激光器的研究进展[J]. *中国激光*, 2009, **36**(7): 1693~1699
- Tan Zuojun, Chen Haiqing, Kang Jinran *et al.*. Design of MEMS deformable micro-mirror for compensation thermally induced aberration of diode-pumped solid-state laser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(4): 853~858
谭佐军, 陈海清, 康竟然 等. 用于激光二极管抽运固体激光器热畸变补偿的 MEMS 微变形镜设计[J]. *光学学报*, 2009, **29**(4): 853~858
- Huang Xiujiang, Guo Baoling, Yang Wenkui *et al.*. Pulsed-pumped optical fiber amplifier [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(8): 712~714
- Brian J. Comaskey, Walnut Creek, Eral R. Ault *et al.*. High average power laser gain medium with low optical distortion using a transverse flowing liquid host: [P]. United States Patent, US20030206568A1 2003\11-06[2010-6-28]
- A. Eddy, R. San. Hybrid heat capacity-moving slab solid-state laser: [P]. United States Patent, US20030072341A1 2003-4-17 [2010-06-28]
- Ye Yunxia, Fan Dianyuan. Progress of rare-earth-doped liquid laser [J]. *Laser & Optoelectronic 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
- Cao Dinxiang, He Shaobo, Zheng Wanguo *et al.*. Aprotic liquid Nd laser [J]. *Laser & Optoelectronic Progress*, 2005, **42**(8): 17~21
曹丁象, 贺少勃, 郑万国 等. 掺钕无机液体激光器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2005, **42**(8): 17~21
- Li Mi, Su Yi, Song Yingsong. Research of multi-segment liquid laser system connected in series [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2349~2353
李 密, 苏 毅, 宋影松. 多增益段串接的液体激光系统特性研究[J]. *光学学报*, 2008, **28**(12): 2349~2353
- Yuan Yongke, Xu Zheng, Li Mi *et al.*. Effect of flow field characteristic in liquid laser system on thermal induced distortion [J]. *Chinese J. Lasers*, 2008, **35**(9): 1342~1345
袁永轲, 许 正, 李 密 等. 液体激光系统流场特性对热畸变的影响[J]. *中国激光*, 2008, **35**(9): 1342~1345
- H. A. Jones. Flowing neodymium offers improved heat management [J]. *Laser Focus World*, 2004, **40**(3): 15~17
- Ren Guoguang. New tactical high energy liquid laser [J]. *Laser Technology*, 2006, **30**(4): 418~421
任国光. 新型战术高能液体激光器[J]. *激光技术*, 2006, **30**(4): 418~421
- Li Mi, Xu Zheng, Chen Xingwu *et al.*. Performance compare of LD pumped liquid laser between single gain host and double gain host [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(4): 722~725
李 密, 许 正, 陈兴无. 激光二极管抽运单双增益模块液体激光性能对比[J]. *光学学报*, 2008, **28**(4): 722~725