

文章编号: 0258-7025(2010)Supplement 1-0057-04

# 掺钕无机液体体系流动激光特性研究

李 密 李春领 王亚丽 许 正

(中国工程物理研究院应用电子学研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要** 对激光二极管(LD)抽运无机液体体系在流动状态下进行了激光实验研究,初步实现了流动状态下较长时间和较高重复频率的激光脉冲输出,最大单脉冲能量为 5 mJ,最高抽运频率为 400 Hz。根据实验参数数值计算了激光脉冲能量,初步分析了抽运频率、流场特性和环境湿度对激光输出性能的影响,为进一步开展无机液体流动激光实验积累了经验。实验结果表明,LD 抽运的无机液体体系在流动时能有效地避免热沉积,可以获得较长时间和较高频率的激光脉冲输出,而流场特性和环境湿度对激光输出具有十分重要的影响,需要优化设计流道和控制环境湿度。

**关键词** 激光器;液体激光;流动出光;激光脉冲;单脉冲能量

中图分类号 TN248.3 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201037s1.0057

## Lasing Characteristic Research of Nd<sup>3+</sup>-Doped Inorganic Liquid System under Flowing Status

Li Mi Li Chunling Wang Yali Xu Zheng

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

**Abstract** Lasing experiment of inorganic liquid system pumped with laser diode under flowing status is carried out, high repeat frequency laser pulse output is achieved in long time, the maximum single laser pulse energy is 5 mJ and the maximum pumping frequency is 400 Hz. The laser pulse energy is simulated according to the experiment parameters, and the influence of pumping frequency, flowing parameter and environment humidity to the laser output capability are analyzed initially. The experiment results show that the inorganic liquid laser system pumped with laser diode can avoid heat deposition effectively under flowing status and obtain high repeat frequency laser pulse output in long time; the flowing parameter and environment humidity possess very important influence to the laser output, it is very necessary to design the conduit structure excellently and control the environment humidity.

**Key words** lasers; liquid laser; laser output under flowing status; laser pulse; single laser pulse energy

### 1 引 言

目前的激光体系已经能够实现高平均功率的激光输出,但还存在一些有待解决的关键技术问题。在固体激光系统中,由于不均匀的热分布在固体材料中产生较大的应力,容易导致材料损伤,因此单个模块的激光功率受到一定的限制,功率比重量不够高<sup>[1,2]</sup>。同时,由于国内在激光材料的制造与加工方面的不足以及国际禁运等问题,半导体激光抽运全固态激光器(DPSSL)的研制成本十分高昂并且存在较多的不可控因素。基于不同的热管理思路,Livermore 提出了激光二极管(LD)抽运掺钕无机激光液体体系的研究方向<sup>[3,4]</sup>。通过对固体激光材料和液体激光材料的比

较,可知液体材料具有高损伤阈值、无热应力和热致双折射以及通过流动可避免热沉积等优点<sup>[5,6]</sup>,而且费用相对低得多。目前,国内开展掺钕液体激光材料研究的科研单位有中国科学院西安光学精密机械研究所、复旦大学和中国工程物理研究院应用电子学所等单位<sup>[7~9]</sup>。理论分析表明,只要克服了激光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持续、高性能的激光输出<sup>[10]</sup>。

在此前的无机液体静态激光实验中,发现部分区域的液体吸热十分严重,存在较为严重的热畸变效应<sup>[11]</sup>。因此,液体激光必须在流动状态下才具有吸引力。本文对 LD 抽运无机液体体系进行了实验研

收稿日期: 2009-11-20; 收到修改稿日期: 2010-04-01

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

究和理论分析,为进一步开展无机液体流动激光实验积累经验。

## 2 无机液体流动激光实验参数

无机液体体系为  $\text{Nd}^{3+}:\text{POCl}_3:\text{ZrCl}_4$ ,易于挥发并具有强酸性,需要密封于具有耐强酸性能的高性能 PFA 材料制成的流动装置内部。LD 抽运无机液体激光体系流动激光实验装置如图 1 所示。激光液体通过磁力泵带动在流动装置内流动,由下向上穿越抽运区域。

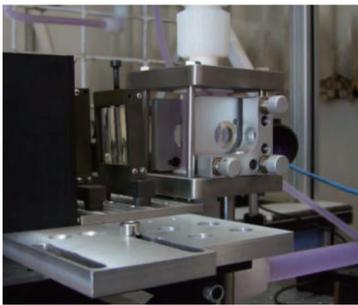


图 1 LD 抽运无机液体流动激光实验装置

Fig. 1 Lasing device of liquid laser at flowing state

在磁力泵转速为 2200 r/m 时,测得液体流量为 3.6 L/min,液体增益盒为矩形,其内部尺寸为 10 mm×6 mm,液体平均流速为 1.02 m/s。在液体稳定流动以后,测得 1053 nm 波长激光穿越液体增益盒的透射率仅为 88%,是由于增益盒表面未镀增透膜、传输界面较多和激光液体的散射造成的。LD 阵列(LDA)单侧抽运激光液体,耦合光斑约为 10 mm×3 mm,抽运耦合效率约为 75%,抽运脉宽为 300 μs,峰值功率 2 kW,抽运频率最高达 400 Hz。光学谐振腔选择平凹腔,其中凹镜为全反镜,曲率半径为 3 m,平面镜为输出镜,透射率为 10%,谐振腔长度约为 4 cm。实验测得液体吸收系数为 3 cm<sup>-1</sup>,上能级寿命约 160 μs,图 2 为荧光衰减曲线。

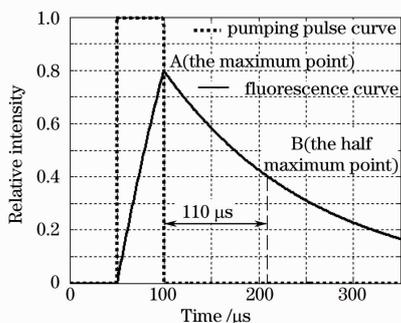


图 2 无机液体荧光衰减曲线

Fig. 2 Fluorescence decay curve of inorganic liquid

## 3 无机液体流动激光实验分析

实验中,在测量设备前放置 900 nm 的高通滤波片,用 OMA500i 红外光谱仪测得激光中心波长为 1052.7 nm,半峰全宽为 1.1 nm,着重测量了不同抽运频率下的单脉冲能量。下面针对抽运频率、流场特性和环境湿度对无机液体激光输出性能的影响进行分析和研究。

### 3.1 抽运频率对激光输出的影响

实验中,调节 LDA 抽运频率,测得平均单脉冲激光能量与抽运频率的关系见表 1。

表 1 平均单脉冲激光能量序列

Pumping frequency/Hz	Average pulse energy/mJ
1~10	1.05
50~100	0.76
200	0.52
300	0.43
400	0.32

由表 1 可知,在抽运频率不超过 10 Hz 时,平均单脉冲能量几乎保持不变;在抽运频率超过 10 Hz 以后,平均单脉冲激光能量随着抽运频率的上升而逐渐下降。上述现象可以用液体的渡越时间与抽运脉冲间隔的相对关系来解释:液体平均流速为 1 m/s,抽运光斑在流动方向的宽度为 3 mm,因此液体平均渡越时间为 3 ms。根据附面层理论,粗略地计算出附面层平均流速大约为整体流速的 3%,因而附面层的平均渡越时间长达 100 ms。在单侧抽运时,液体表面对抽运光存在强烈的吸收,附面层的热效应十分严重<sup>[12]</sup>。若相邻两个抽运脉冲的时间间隔超过 100 ms,即抽运频率不超过 10 Hz 时,前一个脉冲的热效应不会对下一个激光脉冲产生负面影响;否则,前一个抽运脉冲的热沉积会对下一个脉冲产生负面影响。

实验中测得最大单脉冲能量为 5.0 mJ,而 LDA 耦合到激光液体的能量为 450 mJ,因而光-光转换效率十分不理想。这种现象的主要原因在于谐振腔内的激光传输损耗过大:由于液体增益盒外表面未镀膜,激光损耗高达 7%左右,其次激光液体中的杂质或者微粒引起的散射损耗也是不容忽视的,粗略测量大约为 4%,其余损耗大约 1%。因此,需要在液体增益盒外表面镀增透膜和对激光液体采取更加严格的提纯和过滤,减少激光液体自身的散射损耗。

由于  $\text{Nd}^{3+}$  为四能级结构,根据四能级体系的粒子数速率方程,对抽运区域内的激光液体进行离散

化(网格数为  $N \times N$ , 步长为  $h$ ), 从而可以粗略计算出单个激光脉冲的能量为

$$E = \sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{1-R}{1+R} \left[ \frac{\beta I(m,n) \eta \eta_0}{g_{th}} - I_e \right] h^2 t(m,n), \quad (1)$$

式中  $R$  为输出耦合率,  $\beta$  为吸收系数,  $g_{th}$  为损耗系数,  $\eta$  为光谱耦合率,  $\eta_0$  为斯托克斯因子,  $I_e$  为饱和光强,  $t(m,n)$  为网格  $(m,n)$  处激光持续时间。根据实验参数, 模拟得到单次抽运状态下的激光脉冲能量大约为 24 mJ。数值模拟结果明显高于实验结果, 可能是因为数值模拟过程中没有考虑到腔的不对准程度、流场中的气泡和非辐射弛豫等因素。

### 3.2 流场特性对激光输出的影响

根据抽运频率对激光脉冲能量的影响可知, 提高液体流速有助于改善高抽运频率状态下的激光输出性能, 不过需要避免出现湍流。根据雷诺准则, 液体在矩形流道内的雷诺数( $Re$ )为

$$Re = \frac{\rho u}{\mu} \frac{2ab}{a+b}, \quad (2)$$

式中  $u$  为液体平均流速,  $\rho$  为液体密度,  $\mu$  为液体粘度, 无机激光液体参数如表 2 所示,  $a$  和  $b$  分别为流道截面的长度和宽度(10 mm  $\times$  6 mm)。当  $Re < 2300$  时, 流场为层流, 此时液体流速小于 1.03 m/s。

表 2 无机激光液体参数

Table 2 Parameters of inorganic laser liquid

Parameters	Value
Specific heat capacity / (J $\cdot$ K <sup>-1</sup> $\cdot$ °C <sup>-1</sup> )	1.30
Liquid boiling point / °C	106
Liquid viscosity / cp	6
Liquid density / (g $\cdot$ cm <sup>-3</sup> )	1.80
Liquid volume / L	2

本次实验的液体流速为 1 m/s, 基本达到层流的上限。如果流速继续上升, 则会逐渐进入湍流, 湍流效应对激光输出造成极为不利的影 响。若流道截面改为 10 mm  $\times$  2 mm, 则在保证液体流场为层流的前提下, 液体流速最高可达到 2.3 m/s。

实验中发现, 在流场中存在可见气泡的情况下, 激光起振是非常困难的。这是因为液体中存在可见气泡时, 气泡造成的散射损耗相当可观, 从而进一步提高了激光工作的阈值。

因此, 通常需要对液体增益盒的入口端进行优化设计, 防止出现流道形状突变和过大的弯转。液体在进入抽运区域前要整形和均匀化处理, 可以通过网格状整流筛来实现。

实验中发现, 平均单脉冲能量具有很好的时间

稳定性。这说明流动能够很好地避免热沉积效应(实际上是将抽运区域的热量分散到抽运区外的大量激光液体中, 因而整体温升不明显), 可以长时间工作。若以液体沸腾为工作极限, 则液体体系流动时的极限工作时间为

$$t_{max} = CV(T_e - T_0)\rho / P_0, \quad (3)$$

式中  $C$  为液体的比热容,  $V$  为液体体积,  $T_e$  为液体沸点,  $T_0$  为环境温度,  $P_0$  为液体吸收的热功率。目前, 本课题组已经能够单次合成 2 L 的激光液体, 若液体吸收的热功率为 600 W, 环境温度为 20 °C, 则:  $t_{max} = 11.2$  min。同时, 随着激光液体总量的增加, 液体激光体系的极限工作时间还将延长, 这是液体激光体系的一个主要优点。

### 3.3 环境湿度对激光输出的影响

环境湿度是另一个需要认真对待的问题。由于 OH 键的振动能高达 3450 cm<sup>-1</sup>, 而 Nd<sup>3+</sup> 的上能级 4F<sub>3/2</sub> 与次能级 4I<sub>15/2</sub> 的能量差只有 5400 cm<sup>-1</sup>, 因而存在很严重的无辐射跃迁。

因为液体流动装置是处于负压状态的, 环境中的水气将会逐渐渗入到激光液体, 导致激光液体性能不断退化。分析水含量的渗入速率可知, 实验中, 流动装置的真空度泄漏速率大约为 530 Pa/h(真空度泄漏速率与流动装置内外气压差呈正相关), 而实验室环境湿度通常在 60% 以上。已知 25 °C 时水的饱和蒸气压约 4000 Pa, 大气压约为 1.01  $\times$  10<sup>5</sup> Pa。根据道尔顿分压定律, 可以得知实验室环境中水分子的摩尔分数为 2.38%, 再由克劳修斯-克拉珀龙方程计算出水分子的渗透速率为

$$k = 2.38\% \times \frac{FU}{R'T}, \quad (4)$$

式中  $F$  为真空度泄漏速率,  $U$  为流动装置内的气体体积,  $T$  为实验室温度,  $R'$  为克拉珀龙常数(8.314 J/mol  $\cdot$  K)。已知实验室温度为 298 K(25 °C), 液体流动装置中的气体体积大约为 0.5 L, 则:  $k = 2.5$   $\mu$ mol/h。因为 Nd<sup>3+</sup> 的量为 0.6 mol(0.3 mol/L  $\times$  2L), 因此水分子相对于 Nd<sup>3+</sup> 的浓度增长速率为 4.2  $\times$  10<sup>-6</sup> /h, 这是不容忽视的。

实验中, 无机激光液体在流动装置内放置约 10 h, 其光学性能出现了明显退化, 几乎无法实现激光振荡。因此, 实验室湿度必须加以控制, 同时流动装置的密封性需要继续提高。

## 4 结 论

开展了 LD 抽运无机液体激光体系的流动出光

实验研究,实现了流动状态下较长时间和高重复频率的激光脉冲输出,最大单脉冲能量为 5 mJ,最高工作频率为 400 Hz。初步分析了抽运频率、流场特性和环境湿度对激光输出性能的影响,为进一步开展无机液体流动激光实验积累了经验。实验结果表明,LD 抽运的无机液体体系在流动时能有效地避免热沉积效应,可以获得较长时间和较高重复频率的激光脉冲输出;同时,液体流场特性和环境湿度对液体激光输出性能具有十分重要的影响,需要优化设计流道和努力控制环境湿度。

### 参 考 文 献

- Zhou Shouhuan. The heat managements of the solid-state lasers [J]. *Chinese J. Quantum Electronics*, 2005, **22**(4): 497~509  
周寿桓. 固体激光器中的热管理[J]. *量子电子学报*, 2005, **22**(4): 497~509
- 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
- Brian J. Comiskey, 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 Publication, US20030206568A1
- Rice, Robert R. Liquid laser with colloidal suspension of lasant nano-particles [P]. World Intellectual Property Organization, WO 2007/095246 A1
- 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 Dingxiang, 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
- Ye Yunxia, Yu Kehan, Qian Liejia *et al.*. Spectral properties of hydrogen-containing organic solution of neodymium chelate [J]. *Acta Physica Sinica*, 2006, **55**(12): 6424~6429  
叶云霞, 余柯涵, 钱列加 等. Nd<sup>3+</sup>螯合物的含氢有机溶液光谱性能研究[J]. *物理学报*, 2006, **55**(12): 6424~6429
- Yu Rongbiao, Yu Kehan, Wei W. *et al.*. Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nano-particles modified with a silane coupling agent as liquid laser medium [J]. *Advanced Materials*, 2007, **19**(6): 838~842
- Chunhua Xu, Rumping Jia, Chunfa Ouyang. Preparation and optical property of ploy (vinylidene difluoride)/ (Y<sub>0.97</sub>Eu<sub>0.03</sub>)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> rare-earth nano-composite [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(10): 763~766
- Xu Zheng, Su Yi, Li Chunling *et al.*. Experimental study on diode pumping inorganic liquid laser output [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(12): 1941~1943  
许 正, 苏 毅, 李春领 等. 二极管泵浦无机液体出光实验研究 [J]. *强激光与粒子束*, 2006, **18**(12): 1941~1943
- Li Mi, Su Yi, Song Yingsong *et al.*. Research of multi-segments liquid laser system connected in series [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2349~2353  
李 密, 苏 毅, 宋影松 等. 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 characteristics in liquid laser system on thermally 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