

文章编号: 0258-7025(2009)06-1403-04

燃烧驱动全气相化学碘激光燃烧室实验研究

唐书凯 多丽萍 于海军 汪健 桑凤亭 金玉奇

(中国科学院大连化学物理研究所, 辽宁 大连 116023)

摘要 以 HF 基频激光功率大小作为判断依据,对燃烧驱动全气相碘激光的燃烧室参数进行了考察。实验结果表明,在 D_2 流量为 10~20 mmol/s 时,相对燃料 D_2 而言, NF_3 过量 30%~70% 时可以获得较大的 F 原子流量,而稀释 He 的加入不利于 F 原子的生成;加入足够量的 DCl,可以实现 F 原子全部向 Cl 原子的转变,为燃烧驱动全气相碘激光器提供了稳定的 Cl 原子源。

关键词 激光器; 全气相碘激光; 燃烧器; 氟原子源; 氯原子源

中图分类号 TN248.5 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093606.1403

Experimental Study of Combustor of Combustion-Driven All Gas-Phase Iodine Laser

Tang Shukai Duo Liping Yu Haijun Wang Jian Sang Fengting Jin Yuqi

(Dalian Institute of Chemical Physics, Chinese Academy of Sciences, Dalian, Liaoning 116023, China)

Abstract Combustor parameter of all gas-phase iodine laser is studied using the power of HF fundamental laser as a test criterion. The experimental results show that optimal F flow rate can be obtained as the excessive NF_3 flow rate of 30%~70% is used for D_2 flow rate of 10~20 mmol/s. Addition of attenuant He is a disadvantage for the F atom production. F atoms can be replaced by Cl atoms with enough DCl added. A source of Cl atoms is prepared for the study of all gas-phase iodine laser.

Key words lasers; all gas-phase iodine laser; combustor; fluorine atom source; chlorine atom source

1 引言

碘化学激光 (Chemical Oxygen Iodine Laser, COIL) 是目前最成功的化学激光之一。随着 COIL 的发展,人们发现利用气-液两相反应的单重态氧发生器 (Singlet Oxygen Generator, SOG) 占了整个系统的大部分体积和重量,一方面不利于提高体积效率和重量效率,降低了 COIL 的机动性能,这种特点随着功率的不断提高显得更加突出,另一方面 SOG 带入的水蒸气等对激发态碘原子 $I(^2P_{1/2})$ (以下简称 I^*) 具有很强的失活作用,为了降低 SOG 带入的水蒸气等强猝灭粒子所采取的诸如除水气冷阱等措施进一步增加了装置的重量和复杂性,同时,这种气-液两相反应机制给 COIL 在诸如失重等环境方面的应用增加了难度。

为了克服 SOG 的气-液两相反应所带来的问题,很有必要寻找一种全气相化学产生的、高粒子数密度的传能粒子。 $NCl(a)$ 与 I 存在近共振传能的发现^[1],激发了 $NCl(a)$ 替代 $O_2(a)$ 实现全气相碘激光的研究。在随后的十几年里,基于 $NCl(a)$ - I 传能的全气相碘激光经历了设想、实现和初步放大的发展历程,主要包括以放电产生 Cl 原子的前期演示实验^[2~6] 和燃烧驱动的完全意义上的全气相化学碘激光探索实验^[7]。

本研究小组利用放电产生 Cl 原子的方法,对该体系进行了探索研究^[8~15],同时通过数值模拟,对该体系的一些问题有了较深入的了解^[16,17]。在此基础上,参考现有 HF/DF 化学激光系统,独立设计、搭建了一套燃烧驱动的全气相化学激光研究平

收稿日期: 2008-08-26; 收到修改稿日期: 2008-09-23

基金项目: 863-802 专题项目(2007AA802305)资助课题。

作者简介: 唐书凯(1972-),男,博士,副研究员,主要从事化学激光方面的研究。E-mail: shukaitang@hotmail.com

台,以实现真正意义上的全气相化学碘激光,下面就该系统的燃烧室参数优化结果做一总结。

2 实 验

实验装置如图 1 所示,中间部分为单狭缝超音速喷管,长 100 mm,喉道高度为 0.23 mm,前为高压燃烧室,后为低压光腔。燃烧室前部中心的一排小孔为燃料 D_2 加入孔,个数为 10,直径为 1.32 mm;其上下对称的两排小孔是氧化剂 NF_3 加入孔,个数为单排 10 个,直径为 0.38 mm;紧随其后的上下侧依次有两个火花塞点火装置;在第二个火花塞与超音速狭缝之间为稀释气 He 加入孔,其加入方式为上下两侧对称的小孔喷入方式,小孔个数为单排 58 个,直径为 0.5 mm。超音速狭缝出口的扩张部分分别开有保护 He 和 H_2 加入孔,小孔类型为超音速喷口,个数皆为 32 个,孔径分别为 0.3 mm 和 0.5 mm。各路气体的流量都由文氏管控制,根据文氏管入口处压力和文氏管口径等参数计算气体的摩尔流量。实验时根据需要打开相应气体,同时启动点火装置,在燃烧室中 D_2 与 NF_3 燃烧,产生的热量用于解离过量的 NF_3 ,生成的 F 原子通过超音速狭缝得到冻结,燃烧室的气体得到大幅度冷却。F 原子与出口狭缝的 H_2 反应,生成振动激发态的 $HF(v)$,在紧随 H_2 加入口的位置,进行 HF 基频激光的提取,光腔为稳定谐振腔结构,反射镜为全反镜(曲率半径 4.88 m),输出镜为透过率约为 2.6% 的平面镜,增益区长度为 100 mm。用功率计(COHERENT, EPMQ1000, Laser Energy/Power Meter)测量出光功率,用铈化铟探头(液氮冷却)和示波器记录出光峰形。在保持充分过量的 H_2 流量和其他参数条件下,获得的功率越大,表明

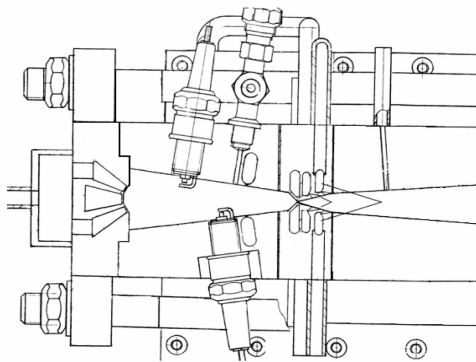


图 1 燃烧驱动全气相碘激光装置示意图
Fig. 1 Schematic diagram of combustion-driven all gas-phase iodine laser

燃烧室出口的 F 原子流量越大,据此可以对燃烧室产生 F 原子的参数进行优化。

3 结果与讨论

用功率计得到的典型功率曲线如图 2 所示,由于热释电探头的响应太慢,只能得到出光的最大功率值,瞬间出光强度经衰减处理后用铈化铟光敏探头测得,典型的激光波形如图 3 所示,尽管点火装置的高压脉冲产生的空间干扰信号降低了激光波形的信噪比,但仍然可以清楚地看到在出光期间激光功率是非常平稳的。

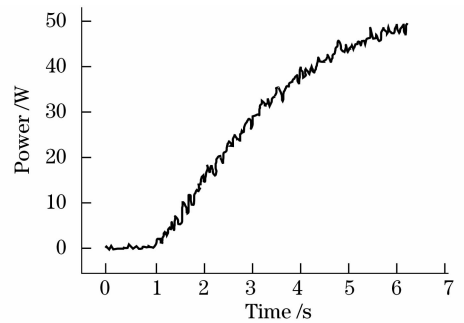


图 2 功率计记录的功率曲线

Fig. 2 Power recorded by power meter

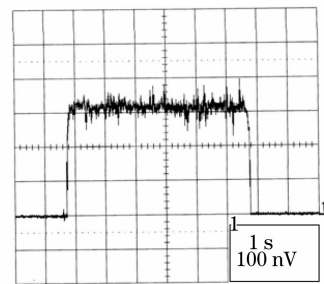


图 3 铈化铟探头(液氮冷却)检测到的功率波形

Fig. 3 Power detected by InSb-detector (cooled by liquid nitrogen)

燃烧室加入的气体有 D_2 , NF_3 和稀释 He,大量的实验表明,稀释 He 的加入对出光功率的提高不利,也就间接表明其对燃烧室中 F 原子的产生是不利的,该结果与理论计算结果^[18]相符。对于 D_2 和 NF_3 ,研究的目的是为后续的燃烧驱动全气相碘激光提供稳定的 F 原子源,由于受到 HN_3 量的限制,经估算,F 原子量控制在约 10~20 mmol/s 是适当的。实验结果表明, D_2 流量固定在约 15 mmol/s 时,理论上只需要 10 mmol/s 的 NF_3 就能完全反应, NF_3 的实际流量约为 13~17 mmol/s,即 NF_3 过量 30%~70% 左右,获得的出光功率较大,如图 4 所示。考虑到 NF_3 的热解效率,生成的 F 原子流量应

该小于 21 mmol/s。

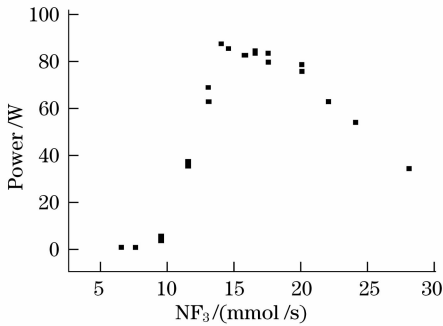


图 4 NF_3 流量对功率的影响

Fig. 4 Dependence of power on NF_3 flow rate

基于 $\text{NCl}(a)\text{-I}$ 传能的全气相碘激光需要的是 Cl 原子,所以燃烧室产生的 F 原子需要转化,考虑到转化过程是放热反应和 HF 对激发态碘原子的强猝灭作用,采用了在燃烧室稀释 He 处加入 DCl,与 F 原子反应生成 Cl 原子的方案。利用 HF 基频激光功率作指示,判定 DCl 加入量是否足够到完全置换 F 原子的量,考虑到 DCl 加入对燃烧室和超音速流场的影响,为了尽量做到 HF 基频激光功率的变化主要是 DCl 与 F 原子置换反应所造成的,同时做了惰性气体 Ar 代替 DCl 的实验,实验结果见图 5。结果表明,惰性气体 Ar 的加入,对 HF 基频出光功率有一定影响,可以认为这是 Ar 的加入改变了燃烧室和超音速流场所造成的,相对 Ar 而言,DCl 的加入对 HF 基频出光功率的影响要显著得多,除了前述的两个因素,可以认为 DCl 通过反应消耗 F 原子是最主要的原因,所以,通过 HF 基频出光功率的降低来判断 DCl 的加入量是可行的。同时看到,在明显过量的 DCl 加入条件下,仍有微弱的激光输出,表明还有诸如混合、反应时间等其他因素在起作用。由于 DCl 的加入导致燃烧室压力的大幅上升,所以 D_2 和 NF_3 的用量做了适当的减少,流量分别为 D_2 : 12 mmol/s, NF_3 : 11 mmol/s,

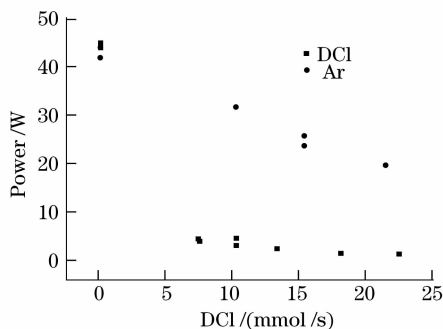


图 5 DCl 流量确定

Fig. 5 Determination of DCl flow rate

H_2 : 70 mmol/s, NF_3 过量 3 mmol/s,考虑到 NF_3 的解离效率,F 原子流量不大于 9 mmol/s,从加入 DCl 后功率下降的曲线看,F 原子的实际流量与理论估算是吻合的。

4 结 论

利用 HF 基频激光功率为判断依据,对 D_2/NF_3 燃烧室产生 F 原子的情况进行了考察。实验结果表明,在本实验考察的流量范围内,相对燃料 D_2 而言, NF_3 过量 30%~70% 时可以获得较大的 F 原子流量,而稀释 He 的加入不利于 F 原子的生成;在此基础上,加入足够过量的 DCl,可以实现 F 原子全部向 Cl 原子的转变,从而为燃烧驱动全气相碘激光提供稳定的 Cl 原子源,为全气相碘激光的放大和完全化学驱动提供有效的技术途径。

参 考 文 献

- 1 T. T. Yang, R. D. Bower. $\text{I}(^2P_{1/2})$ produced from the energy transfer from $\text{NCl}(a)$ to $\text{I}(^2P_{3/2})$ [C]. *SPIE*, 1990, **1225**: 430~435
- 2 A. J. Ray, R. D. Coombe. An I^* laser pumped by $\text{NCl}(a)$ [J]. *J. Phys. Chem.*, 1995, **99**: 7849~7852
- 3 J. M. Herbelin, T. L. Henshaw, B. D. Rafferty *et al.*. The measurement of gain on the 1.315 μm transition of atomic iodine in a subsonic flow of chemically generated $\text{NCl}(a)$ [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 1999, **299**: 583~588
- 4 T. L. Henshaw, Gerald C. Manke II, T. J. Madden *et al.*. A new energy transfer chemical laser at 1.315 μm [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2000, **325**: 537~544
- 5 G. C. Manke II, C. B. Cooper, S. C. Dass *et al.*. A multi-watt all gas-phase iodine laser[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(8): 995~1002
- 6 G. C. Manke II, C. B. Cooper, S. C. Dass *et al.*. A multi-watt all gas-phase iodine laser[C]. *SPIE*, 2004, **5334**: 1~10
- 7 G. C. Manke II, T. J. Madden, C. B. Cooper *et al.*. The measurement of gain in a supersonic combustion-driven generator for $\text{NCl}(a)$ [C]. *SPIE*, 2005, **5792**: 97~108
- 8 Tang Shukai, Li Jian, Min Xiangde *et al.*. Study of $\text{NCl}(a^1\Delta)$ and $\text{NCl}(b^1\Sigma)$ from the reaction of $\text{Cl} + \text{HN}_3$ [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2001, **13**(6): 691~693
唐书凯,李健,闵祥德等. $\text{Cl} + \text{HN}_3$ 产生 $\text{NCl}(a^1\Delta)$ 和 $\text{NCl}(b^1\Sigma)$ 的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2001, **13**(6): 691~694
- 9 L. P. Duo, S. K. Tang, J. Li *et al.*. Parametric study of $\text{NCl}(a)$ and $\text{NCl}(b)$ from the reaction of $\text{Cl}/\text{Cl}_2/\text{He} + \text{HN}_3/\text{He}$ [J]. *J. Phys. Chem. A*, 2002, **106**: 743~746
- 10 Tang Shukai, Yu Haijun, Min Xiangde *et al.*. Experimental study on $\text{NCl}(a^1\Delta)/\text{I}(^2P_{3/2})$ system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(6): 529~532
唐书凯,于海军,闵祥德等. $\text{NCl}(a)/\text{I}^*$ 传能体系的实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(6): 529~532
- 11 Duo Liping, Tang Shukai, Yu Haijun *et al.*. Experimental investigation of the reaction of $\text{Cl}/\text{Cl}_2/\text{He} + \text{HN}_3/\text{He}$ [J]. *Chinese Journal of Quantum Electronics*, 2003, **20**(4): 426~430
多丽萍,唐书凯,于海军等. $\text{Cl}/\text{Cl}_2/\text{He} + \text{HN}_3/\text{He}$ 反应体系的实验研究[J]. *量子电子学报*, 2003, **20**(4): 426~430
- 12 Duo Liping, Tang Shukai, Li Jian *et al.*. Measurements of

- dissociation efficiency of molecular chlorine through microwave discharge[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(4): 335~338
- 多丽萍,唐书凯,李 健等. 微波放电电离氯分子解离效率的测量[J]. *强激光与粒子束*, 2003, **15**(4): 335~338
- 13 Liping Duo, Shukai Tang, Jian Li *et al.*. Experimental study on the system of Cl/Cl₂/He/HN₃/I₂[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2003, **1**(2): 88~90
- 14 S. K. Tang, L. P. Duo, Y. Q. Jin *et al.*. Experimental study on the all gas-phase iodine laser using microwave discharge of Cl₂/He as a Cl atoms source[J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(27): 7126~7130
- 15 L. P. Duo, S. K. Tang, H. J. Yu *et al.*. Experimental study of discharge characteristics and fluorine atom yield on DC discharge of NF₃/He[C]. *SPIE*, 2007, **6346**: 63462s-1~6
- 16 Tang Shukai, Duo Liping, Sang Fengting. Effect of NCl(a¹Δ) self-annihilation on NCl(a¹Δ) production and transfer[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(1): 21~23
- 唐书凯,多丽萍,桑凤亭. NCl(a¹Δ)自猝灭对自身生成和传输的影响[J]. *光子学 • 激光*, 2005, **16**(1): 21~23
- 17 Tang Shukai, Duo Liping, Sang Fengting. Influence of NCl(a¹Δ) self-annihilation on energy extraction of NCl(a¹Δ)/I laser[J]. *Chineses J. Lasers*, 2005, **32**(4): 501~505
- 唐书凯,多丽萍,桑凤亭. NCl(a¹Δ)自猝灭对 NCl(a¹Δ)/I 激光能量提取的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 501~505
- 18 Hua Weihong. Numerical simulation of high energy continuous wave DF/HF chemical laser[D]. Changsha: National University of Defence Technology, 1997
- 华为红. 高功率连续波 DF/HF 化学激光器数值模拟研究[D]. 国防科技大学, 1997

《激光与光电子学进展》“光学制造”栏目征稿启事

《激光与光电子学进展》是中国科学院上海光学精密机械研究所主办的激光、光电子领域行业性期刊,中国科技核心期刊。该刊 1964 年创刊,至今已出刊 500 余期,旨在促进国内外学术交流,沟通科研单位、生产部门与用户的联系。2009 年,《激光与光电子学进展》将加大光学制造方向的报道力度,深入研讨光学制造的技术发展及其在工业、科研各方面的应用。主要涉及方向有光学元器件、光学仪器、光学加工、光学设计、光学材料、光学薄膜、光学检测等领域。

欢迎相关的科研、技术、市场人员根据我们栏目内容定位,撰写或向我们推荐涉及上述领域的优秀技术论文。来稿不收取审稿费和版面费,一经录用将优先发表并支付丰厚稿酬。

• 本栏目基本要求:

- 1) 稿件内容应为光学制造领域的最新进展、研究动态、科研和新品开发成果等方面;
- 2) 文章要求内容新颖、论点正确、论据充分、数据可靠、文理通顺;
- 3) 技术文章字数一般为 5000 字左右;综述文章字数最多不超过 10000 字,且第一作者需为副教授及以上职称。

• 投稿方式:通过网上投稿系统(<http://www.opticsjournal.net/lop.htm>)直接上传稿件(主题标明“光学制造”投稿),也可以直接将稿件 word 版发至邮箱:dingjie@siom.ac.cn(主题标明“光学制造”投稿),如有问题欢迎垂询 021-69918198 与栏目编辑丁洁联系。

《激光与光电子学进展》编辑部