

文章编号: 0258-7025(2010)07-1704-04

燃烧驱动全气相碘激光的小信号增益测试

唐书凯 多丽萍 金玉奇 于海军 汪 健 桑凤亭

(中国科学院大连化学物理研究所, 中国科学院化学激光重点实验室, 辽宁 大连 116023)

摘要 利用波长可调制的 1315 nm 二极管激光增益测试系统, 对基于 HN_3 反应的 $\text{D}_2\text{-NF}_3\text{-DCI}$ 燃烧驱动全气相碘激光进行了小信号增益测试, 获得了 $3 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 的小信号增益, 并获得了沿流动方向的小信号增益分布情况。正增益的获得, 标志着 $\text{D}_2\text{-NF}_3\text{-DCI}$ 燃烧驱动全气相碘激光取得了实质性的进展, 但就目前的增益水平来讲, 进行出光演示尚有一定的困难, 需要针对小信号增益进行全面的参数优化, 以获得尽可能大的增益信号, 而 HN_3 的大流量供给和超音速混合流场的优化是全气相碘激光获得较大增益的关键因素。

关键词 激光光学; 氧碘化学激光; 燃烧驱动全气相碘激光; 小信号增益测试; 增益分布

中图分类号 TN248. 5 **文献标识码** A **doi**: 10. 3788/CJL20103707. 1704

Small Signal Gain Measurement of Combustion-Driven All Gas-Phase Iodine Laser

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

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

Abstract The small signal gain measurement of the all gas-phase iodine laser driven by $\text{D}_2\text{-NF}_3\text{-DCI}$ combustion is taken using a wavelength tunable 1315 nm diode laser gain measurement system. A small signal gain of $3 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ and the profile of small signal gain along the flow direction are obtained. The positive gain indicates that a material progress has been made in the $\text{D}_2\text{-NF}_3\text{-DCI}$ combustion-driven all gas-phase iodine laser, but it is still difficult to demonstrate lasing as to the magnitude of the small signal gain, a detailed parameter optimization must be done in order to improve markedly the small signal gain, and the plentiful supply of HN_3 and the optimization of the supersonic mixing flow field are key factors to obtain a high small signal gain for the $\text{D}_2\text{-NF}_3\text{-DCI}$ combustion-driven all gas-phase iodine laser.

Key words laser optics; chemical oxygen iodine laser; combustion-driven all gas-phase iodine laser; small signal gain measurement; gain profile

1 引 言

氧碘化学激光(COIL)的波长为 1.315 μm , 具有良好的大气传输特性; 同时, 其能量来源为化学能, 具有较强的机动能力和环境适应能力, 因此受到国内外的广泛关注并得到了极快的发展。但是, 随着 COIL 功率和规模的不断提高, 通过氯气与碱性双氧水两相反应产生储能粒子 $\text{O}_2(\text{a})$ 的机制所造成的体积效率和重量效率限制、特殊环境的使用等问题逐渐凸现。针对这种情况, 国内外正在进行各种解决方案的探索研究, 全气相碘激光(AGIL)就是一

种非常具有发展前途的解决方案。AGIL 方案的关键是利用全气相产生储能粒子的方式, 从而提高碘激光的体积效率和重量效率, 同时解决碘激光在特殊环境下的使用等问题。1990 年 T. T. Yang 等^[1]发现 $\text{NCl}(\text{a})$ 与基态碘原子之间存在近共振传能, 引发了基于 $\text{NCl}(\text{a})\text{-I}$ 传能 AGIL 的研究进程^[2~15]。基于 $\text{NCl}(\text{a})\text{-I}$ 传能 AGIL 的具体方案中, 进展较大的有基于 HN_3 ^[2~7] 和 NCl_3 ^[8,9] 两种方案, 本研究室对这两种技术方案都进行了一些探索研究^[10~16]。

基于 HN_3 反应 AGIL 的早期机理研究和验证

收稿日期: 2009-11-12; 收到修改稿日期: 2009-12-10

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

实验主要采用放电法产生 Cl 原子,由于放电法产生 Cl 原子的效率较低,不利于 AGIL 的放大,所以,针对 AGIL 放大的研究采用了燃烧法产生 Cl 原子,简称燃烧驱动全气相碘激光。本文主要介绍本研究小组在燃烧驱动全气相碘激光研究实验方面的进展。

2 实验部分

实验装置如图 1 所示,主要包括燃烧室、超音速喷管和光腔 3 部分。燃料 D_2 和氧化剂 NF_3 在燃烧室内通过燃烧产生 F 原子,燃烧室的温度大约在 $1400\sim 2000\text{ K}$,产生的 F 原子与 DCl , CF_3I 反应分别生成 Cl 原子和基态 I 原子;超音速喷管为单狭缝喷管,喉道高度为 0.6 mm ,宽度为 100 mm ,燃烧室内产生的高温高压气体经过超音速喷管后温度和压强大幅度降低,温度降低到稍高于室温,压强降低到数百帕,其目的是把燃烧室产生的高温高压气体转化为碘激光运转所需的相对低得多的低温低压环境。在超音速喷管出口的上下方分别有一排直径为 0.5 mm 的 HN_3 加入孔,每排小孔个数为 38 个。在喷管后面的光腔部分,Cl 原子与 HN_3 通过反应生成储能粒子 $NCl(a)$,生成的 $NCl(a)$ 抽运基态碘原子 I 到激发态碘原子 I^* ,小信号增益测试即在此部分完成。原料气 D_2 和 NF_3 为商业成品, DCl , CF_3I 和 HN_3 由本研究小组合成,由于 HN_3 是有毒易爆气体,安全分压很低,出于安全的考虑,分压控制在 20 kPa 以下,储存于 1000 L 储存罐中,使用时用 He 稀释到 $3\times 101.325\text{ kPa}$ 以增加向主气流穿透的深度。本研究小组对 HN_3 的生产方法做了改进,生产效率得以大大提高^[17]。 D_2 , NF_3 , DCl 和 CF_3I 的流量由文氏管控制和计量, HN_3 的流量由 HN_3 加入孔总面积按文氏管的流量公式计算得到。

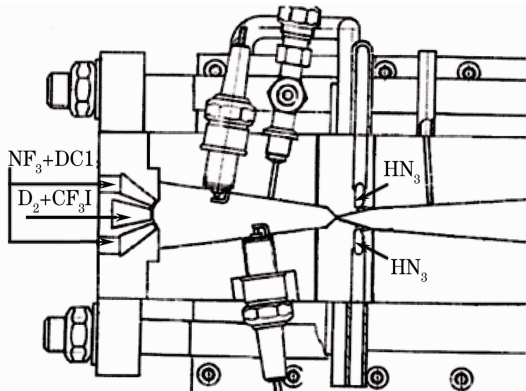


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

为了增加燃烧室内物料混合的均匀性,采用了 DCl 与 NF_3 在燃烧室前动态预混合的加入方式,由于 NF_3 生成 F 原子的过程中热解是重要的解离通道,而 DCl 与 F 原子反应会放出大量热量,所以这种加入方式无疑有利于 F 原子的生成,进而有利于 Cl 原子的产生。由于 CF_3I 的用量很小,大约只有 D_2 的百分之几,为了使 CF_3I 能与其他物料混合均匀,所以采用了与 D_2 动态预混的加入方式。

小信号增益测试系统示意图如图 2 所示。关键仪器为可以进行波长扫描的 1315 nm 二极管激光器,通过外加的直流调制信号,实现激光输出的波长扫描。二极管激光器发出的 1315 nm 激光束经第一块分束镜分成两束,一束穿过碘加热池,碘加热池中的碘分子在高温下部分解离成基态碘原子,激光束在进行波长扫描时,由 Ge 探头和示波器探测和记录碘原子的吸收信号,该吸收信号与小信号增益信号的波长位置是相同的,据此来确定小信号增益信号出现的位置;另一束再经过一个分束镜变为两束,一束由光纤收集传输到波长计,用以监测激光波长,一束穿过增益测试区,波长扫描时得到的增益信号由 PbS 探头检测并由示波器记录。信号发生器产生的直流扫描信号输入二极管激光器用作波长扫描信号,同时输入示波器用作触发和同步信号。

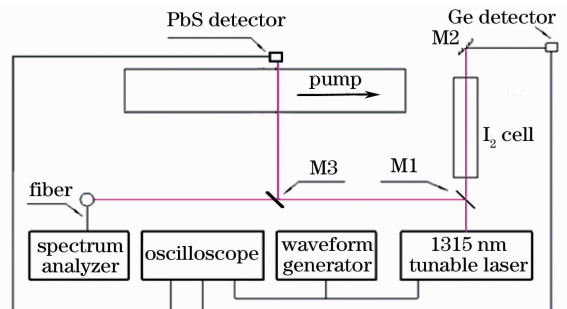


图 2 小信号增益测试系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of small signal gain measurement system

3 实验结果

首先,在基频 HF 激光出光功率作指示对燃烧室产生 Cl 原子的研究^[15]基础上,进一步用 HN_3 与 Cl 反应生成的 $NCl(a, b)$ 作指示信号,对燃烧室生成 Cl 原子的流量条件进行了验证,得到了近似的结果,所以在增益测试实验中,全部实验中 D_2 , NF_3 和 DCl 的流量比为 $1:1:1.5$,以保证较好的 Cl 原子生成效率。

由于在超音速喷管条件下,光腔的压强过低,多

次测试都未能得到明显的增益信号,改在光腔下游设置一个 20 mm×100 mm 的限流板,得到了明显的增益信号,此时光腔压强在没有加 $\text{HN}_3\text{-He}$ 混合气时为 1200 Pa,加 $\text{HN}_3\text{-He}$ 后压强为 4000 Pa,压强大幅度升高的主要原因是 $\text{HN}_3\text{-He}$ 混合气中 He 流量太大。示波器记录的小信号增益测试典型结果如图 3 所示,实验中, D_2 , NF_3 , DCI , NH_3 , CF_3I 的流量分别为 21, 20.5, 32, 35~40, 0.4 mmol/s。图中下方曲线为碘加热池的吸收信号,由于记录信号的是负信号 Ge 探头,所以吸收峰向上,上方曲线为增益测试区得到的小信号增益信号,所用探头为正信号交流耦合 PbS 探头,所以增益信号峰也向上。实现波长扫描的直流电压信号为“ \wedge ”型信号,电压范围为 0~1 V,在一个扫描周期内,电压开始由小到大完成一次正向扫描,然后电压由大到小完成一次反向扫描。图中显示的是一个扫描周期的结果,每次单向扫描可以得到 3 个峰,以左边正向扫描得到的 3 个峰为例,波长从左到右分别为 1315.211, 1315.222 和 1315.246 nm,从碘池吸收曲线可以清楚看到全部 3 个吸收峰,而增益曲线上只能看到后两个峰,发生在 1315.246 nm 的受激辐射是碘激光所需要的。小信号增益系数为

$$g = \sigma \{ [I(^2\text{P}_{1/2})] - 0.5 \times [I(^2\text{P}_{3/2})] \} =$$

$$\ln(I/I_0)/L = \ln(1 + \Delta I/I_0)/L \approx \Delta I/(I_0 L).$$

测试增益时二极管激光发出的激光经 PbS 探头转化为电信号的幅值 I_0 为 1 V, 1315.246 nm 处的增益幅值 ΔI 约为 0.3 mV, 增益区长度 L 为 10 cm, 所以小信号增益系数约为 $3 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 。从图中还看到小信号增益曲线的基线有一定的起伏,其原因来源于三方面:1)是激光器本身在波长扫描时激光功率随波长的变化有轻微波动;2)是由于波长的变化,激光穿过多个界面后到达探头的接收位置有可能发生变化;3)是工作平台的轻微振动所造成的激光与探头接收位置的轻微变化。

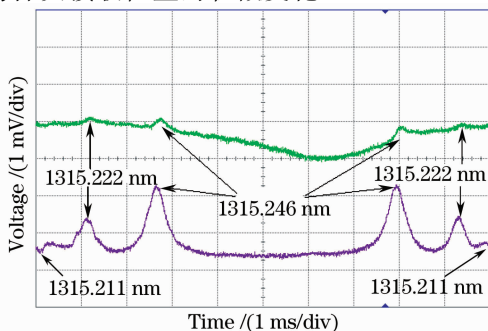


图 3 示波器记录的典型小信号增益测试结果

Fig. 3 Typical result of small signal gain measurement

保持相同的流量条件,改变沿流动方向的不同测试位置,得到了沿流动方向的增益分布(见图 4),其中横坐标表示测试点到 HN_3 加入口的距离。从图 4 可以看到,至少在距 HN_3 加入口 4~10 cm 的区域存在正增益,在 5~9 cm 的区域增益变化不大,约为 $3 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$ 。

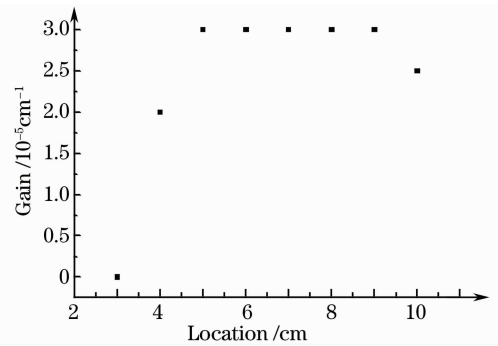


图 4 不同测试位置所得增益

Fig. 4 Small signal gain measurement at different locations

4 结 论

对 $\text{D}_2\text{-NF}_3\text{-DCI}$ 燃烧驱动全气相碘激光的增益进行了初步测试,获得了明显的正增益信号,大约是 $3 \times 10^{-5} \text{ cm}^{-1}$,并且获得了沿流动方向的增益分布。该增益结果对于出光演示还有一定的困难,需要针对小信号增益进行全面的参数优化,以获得尽可能大的增益信号。目前,对该系统有严重制约的参数是 HN_3 的流量,由于其安全分压太低,增加流量不容易,这是基于 HN_3 的全气相碘激光长久以来、也是将来持续发展所面临的主要技术难题。

参 考 文 献

- 1 T. T. Yang, R. D. Bower. $\text{I}(^2\text{P}_{1/2})$ produced from the energy transfer from $\text{NCl}(a)$ to $\text{I}(^2\text{P}_{3/2})$ [C]. *SPIE*, 1990, **1225**: 430~435
- 2 A. J. Ray, R. D. Coomber. An I^* laser pumped by $\text{NCl}(a)$ [J]. *J. Phys. Chem.*, 1995, **99**(20): 7849~7852
- 3 J. M. Herbelin, T. L. Henshaw, G. D. Hager *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**(6): 583~588
- 4 T. L. Henshaw, G. C. Manke II, G. D. Hager *et al.*. A new energy transfer chemical laser at 1.315 μm [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2000, **325**(5-6): 537~544
- 5 G. C. Manke II, C. B. Cooper, G. D. Hager *et al.*. A multi-watt all gas-phase iodine laser [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 2003, **39**(8): 995~1002
- 6 W. McDermott, R. Coombe, M. Heldt *et al.*. Flow tube studies of NCl_3 reactions [C]. *SPIE*, 2004, **5334**: 11~17
- 7 G. C. Manke II, T. J. Madden, G. D. Hager *et al.*. The measurement of gain in a supersonic combustion-driven generator for $\text{NCl}(a)$ [C]. *SPIE*, 2005, **5792**: 97~108
- 8 T. Masuda, T. Nakamura, T. Uchiyama. Achievement of positive gain in the amine-based all gas-phase iodine laser system

- [C]. *SPIE*, 2008, **7131**: 713108
- 9 T. Masuda, T. Nakamura, T. Uchiyama *et al.*. An all gas-phase iodine laser based on amine chemistry [J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2009, **476**(1-3): 25~27
- 10 L. P. Duo, S. K. Tang, B. L. Yang. Parametric study of NCl(a) and NCl(b) from the reaction of Cl/Cl₂/He + HN₃/He [J]. *J. Phys. Chem. A*, 2002, **106**(5): 743~746
- 11 S. K. Tang, L. P. Duo, F. T. Sang *et al.*. Experimental study on an all gas-phase iodine laser using microwave discharge of Cl₂/He as a Cl atoms source [J]. *Appl. Opt.*, 2006, **45**(27): 7126~7130
- 12 Tang Shukai, Duo Liping, Sang Fengting. Effect of NCl(a) self-annihilation on NCl(a) production and transfer [J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2005, **16**(1): 21~23
唐书凯, 多丽萍, 桑凤亭. NCl(a)自猝灭对其生成和传输的影响[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(1): 21~23
- 13 Tang Shukai, Duo Liping, Sang Fengting. Influence of Cl(a) self-annihilation on energy extraction of NCl(a)/I laser [J]. *Chinese J. Laser*, 2005, **32**(4): 501~505
唐书凯, 多丽萍, 桑凤亭. NCl(a)自猝灭对 NCl(a)/I 激光能量提取的影响[J]. *中国激光*, 2005, **32**(4): 501~505
- 14 Tang Shukai, Duo Liping, Yu Haijun *et al.*. Analysis and comparison of energy extraction for NCl(a)/I all gas-phase iodine laser and chemical oxygen iodine laser [J]. *Chinese J. Laser*, 2009, **36**(9): 2309~2314
唐书凯, 多丽萍, 于海军等. NCl(a)/I 全气相碘激光与氧碘化学激光能量提取的分析比较[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2309~2314
- 15 Tang Shukai, Duo Liping, Yu Haijun *et al.*. Experimental study of combustor of combustion-driven all gas-phase iodine laser [J]. *Chinese J. Laser*, 2009, **36**(6): 1403~1406
唐书凯, 多丽萍, 于海军等. 燃烧驱动全气相化学碘激光燃烧室实验研究[J]. *中国激光*, 2009, **36**(6): 1403~1406
- 16 Li Liucheng, Tang Shukai, Duo Liping *et al.*. Experimental study on NCl₃ spaying auto-decomposition [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, **19**(1): 45~48
李留成, 唐书凯, 多丽萍等. 三氯化氮气体喷射自发分解实验研究[J]. *强激光与粒子束*, 2007, **19**(1): 45~48
- 17 S. K. Tang, L. P. Duo, F. T. Sang *et al.*. Study on HN₃ production for all gas-phase iodine laser [C]. *SPIE*, 2007, **6346**: 63463L

光学界百科全书

——《光学手册》(新版)面世在即

五十年前,随着第一台红宝石激光器的问世,光学进入到一个全新的领域和崭新的发展时代。五十年间,光学界发生了史无前例、翻天覆地的变化,毫不夸张地说,光学已经深入到我们社会生活的每一个角落,影响着所有人的生活。

如今,从事光学研究的学者越来越多,光学专业的学生越来越多,应用光学的行业也越来越多。此时,一本内容丰富全面、涵盖光学领域所有学科的**光学百科全书**成为相关人士日益迫切的需求。在这种需求下,新版《光学手册》应运而生,经历六年反复酝酿,四年悉心编撰,该书将于近期与广大读者见面。

新版《光学手册》是原《光学手册》(25章,230万字)的修订版。原书出版于1986年,出版后得到了严济慈、王大珩、龚祖同等老一辈科学家的高度评价,称之为填补国内空白,“一本兼顾光学工作者和非光学科技工作者的参考书”,手册迄今仍是许多光学技术人员案头必备的权威参考书。

但是,在原《光学手册》出版后的25年间,光学理论和技术飞速发展,发生了质的飞跃,完成了从传统光学向现代光学的转变。现代光学包涵传统光学、光电子学和光子学。原书中全部章节内容需要更新,新发展起来的涉及光学的边缘学科需要增添。因此,新版《光学手册》绝非传统意义上的修订,而是一个创新的版本。

“一本有国际影响力的能反映时代脉搏的观念创新的学术性工具书”——这是编者对新版《光学手册》的定位。

新版《光学手册》包含38章、49个光学学科、460万余字,其内容精深到位,基本涵盖了目前光学领域所涉及的所有学科,为光学工作者和非光学科技人员提供了几乎所有光学分科的基本概念、基本原理、基本方法、基本公式和基本数据,翔实而新颖,实用而方便,可谓内容丰富,近乎**光学百科全书**而更为精深之,实属又一部高水平学术专著。在本书中,诸如电磁光学、纳米光子学、生物光子学、瞬态光学、同步辐射光学、太赫兹波光学、中子光学、非成像光学及自由曲面光学、近场光学和金属表面等离子体光学之类新兴光学学科也将与大家见面。