

# 小型电激励连续波 HF/DF 化学激光器研究进展

罗 威,袁圣付,陆启生

(国防科技大学光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘 要:**小型电激励连续波 HF/DF 化学激光器具有广泛的用途和重要基础研究价值,本文介绍了四种放电类型的小型电激励连续波 HF/DF 化学激光器的研究工作,并对各类型激光器的优缺点进行了讨论。

**关键词:**化学激光器;HF/DF;电激励;连续波

**中图分类号:**TN248.5 **文献标识码:**A

## Research development of small scale discharge driven continuous-wave HF/DF chemical laser

LUO Wei, YUAN Sheng-fu, LU Qi-sheng

(College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** Small scale discharge driven continuous-wave HF/DF chemical laser has extensive usage and important value of fundamental research. This paper introduces the research work on four different discharge types of this kind of laser. The advantages and disadvantages of the different types are also discussed.

**Key words:** chemical laser; HF/DF; discharge driven; continuous-wave

### 1 引言

“光速防御(Defense at the Speed of Light)”的美好设想<sup>[1]</sup>,让激光武器成为热门的新概念武器。高功率激光器是激光武器的核心器件之一,在美国的激光武器体系中,战术激光武器(THEL)、机动战术激光武器(MTHEL)、天基激光武器(Alpha 激光器)、海军舰载激光武器(MIRACL)等,使用的激光器均为高能燃烧驱动 HF/DF 化学激光器<sup>[1-5]</sup>。

小型电激励连续波 HF/DF 化学激光器因为消耗小且适宜于长时间的稳定运转,是一种可靠的红外光源,具有广泛的用途和重要基础研究价值。如高能化学激光器的诊断工作<sup>[6]</sup>,大气传输测量实验<sup>[7]</sup>,医学应用<sup>[8]</sup>,MOPA 结构中的振荡器或放大器<sup>[9-10]</sup>,泛频 HF 激光器<sup>[11]</sup>、全气相碘化学激光器<sup>[12]</sup>(AGIL)、电激励氧碘化学激光器<sup>[13]</sup>(Electri COIL)等新型化学激光器的研究等。小型电激励化学激光器的地位不断得到提升,但相比高能化学激光器而言,小型电激励化学激光器得到的关注是远

远不够的。本文对小型电激励化学激光器的部分代表性工作进行了归纳概括,希望能对相关领域研究有所帮助,以便更好地为高能化学激光器研究工作服务。

### 2 电激励连续波 HF/DF 化学激光器

与燃烧驱动 HF/DF 激光器通过高温热解离含氟气体不同,电激励 HF/DF 激光器通过放电方式电离含氟气体。工业上常用的引发等离子体的方法,如电弧、直流辉光、空心阴极、射频、微波放电等,基本都被运用到了电激励 HF/DF 激光器中,下面分别加以介绍。

#### 2.1 电弧放电

首次验证连续波化学激光器概念、成为化学激光器发展史上经典器件的就是美国宇航公司的

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 10974255/A040403)资助。

作者简介:罗 威(1985-),男,博士研究生,主要研究方向为高能激光技术。E-mail:luowei8786@163.com

收稿日期:2010-11-08

D. J. Spencer 等人 1969 年研制成功的电弧驱动连续波 HF/DF 化学激光器<sup>[14-15]</sup>,其结构图如图 1 所示。电弧加热器是由水冷钨阴极和水冷圆环状铜质阳极组成。激光器采用 36 狭缝列阵超音速喷管,电弧功率为 27.6 kW 时, HF 激光的峰值功率为 475 W,化学能效率为 12%,电效率为 1.7%, DF 激光的峰值功率为 340 W,化学能效率为 8%,电效率为 1.2%。

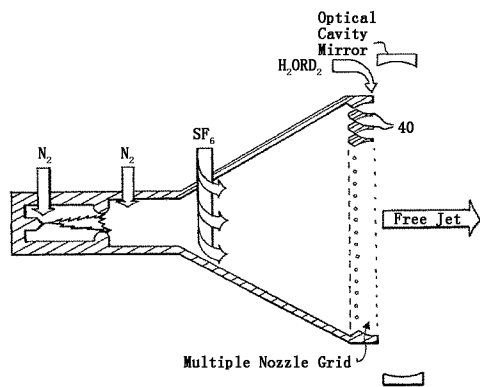


图1 电弧驱动连续波 HF/DF 化学激光器典型结构图

南斯拉夫的 Z. Babarogic 等采用水冷钨阴极和圆阳极实现了峰值功率为 120 W 的电弧驱动 HF 激光输出<sup>[16]</sup>。在激光器系统中,由于没有采用超音速喷管,使反应室内的温度很高 (> 1000 K),总电效率仅为 0.8%。1986 年,我国的王世柏和刘德泉等人进行了电弧驱动 HF 化学激光器的实验研究,其结构与 Spencer 的激光器<sup>[14-15]</sup>类似,由于注入功率限制,仅获得了 10 W 的激光输出,总电效率小于 0.25%<sup>[17]</sup>。

法国的 A. Sontag 等人研制的电弧驱动连续波 HF 激光器,电弧加热装置的功率为 40 kW,基频输出大于 1 kW,泛频输出达到 220 W,激光器总电效率可达 2.5%。放电气体介质有 Ar, SF<sub>6</sub>, He 和 O<sub>2</sub>,其中 Ar 气的引入是为了保护由钨材料阴极尖端不被 F 原子腐蚀。使用超音速喷管技术控制增益区气流的温度及流速。由于真空系统的限制,激光器连续运行时间限制在 30 s<sup>[18]</sup>。

## 2.2 直流辉光放电

J. J. Hinchin 等人最先研制出直流辉光放电驱动 HF/DF 激光器,工作介质为 SF<sub>6</sub>, He, N<sub>2</sub>, 放电管为长度 60 cm,内径 5.0 cm 水冷耐热玻璃管。氢气注入孔直径为 0.25 mm,位于光腔上游一根可以移动的管子上,混合、化学反应、激光振荡在宽 30 cm、高 1.25 cm 的通道内产生。HF 峰值功率为 5.5 W,总电效率约 0.1%,DF 峰值功率为 HF 的 50%<sup>[19]</sup>。

之后 J. J. Hinchin 等对激光器进行了改进,工作介质改为 SF<sub>6</sub>, He, 放电管长度 55 cm,内径 2.5 cm。阴极使用 10 根独立长 10 cm、直径 0.3 cm 镍杆,每根镍杆连接 400 kΩ 的电阻,其目的是形成多路放电以充分利用整个气体体积。阳极为长 5 cm、内径 1.9 cm,水冷铜管。注入功率为 11 kV, 0.125 A。氢气/氖气由混合通道上下各 30 个直径 0.025 cm 的小孔注入,通道宽 10 cm、高 0.3 cm,亚音速流动。利用光栅进行了 HF 和 DF 激光的选线, HF 单谱线的峰值功率一般在 0.2~0.3 W 之间, DF 单谱线的峰值功率一般在 0.05~0.07 W 之间,并测量了一台相同激光器 1P4 谱线的小信号增益系数<sup>[20]</sup>。

D. J. Spencer 等人也参与到直流辉光放电驱动 HF/DF 激光器的研制当中。工作介质为 SF<sub>6</sub>, He, O<sub>2</sub>, 放电管为内径 2.54 cm 水冷耐热玻璃管,有两种长度 30.48 cm, 60.96 cm, 分别对应 10 kV, 20 kV 的功率供应。对称均匀分布的 8 根直径为 0.16 cm、长 15.24 cm 的镍丝,每根镍丝独立连接镇流电阻。阴极:水冷铜环电极,孔内径 1.9 cm,在阴极与耐热管结合处插入 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 柱形壳,使放电终止于铜阴极的表面。发现用镍丝做阴极时会导致金属损失和输出功率下降,电极处气流注入的均匀性极大的影响放电均匀性。混合通道截面宽 10 cm,高 0.3 cm,亚音速流动,氢气由上下壁面各 40 个 0.034 cm 的孔对称注入。HF、DF 激光输出功率分别为 12 W, 7 W, 对应总电效率分别为 0.5%, 0.3%<sup>[21]</sup>。

W. Q. Jeffers 等使用 Helios 公司标准商业化放电管,在电注入功率为 390 mA/7.45 kV,增益长度为 15 cm 时, HF 激光基频和泛频功率分别为 97 W 和 21 W;在电注入功率为 750 mA/7.82 kV,增益长度为 30 cm 时, HF 激光基频和泛频功率分别为 180 W 和 56 W。泛频效率在当时是最高的。放电管结构据称与 D. J. Spencer 等人所研制的激光器<sup>[21]</sup>类似,基频电效率超过 3%<sup>[22]</sup>。

大连化学物理研究所进行了直流辉光放电电离含氟气体的研究,放电管由石英玻璃组成,长度为 1000 mm,内径为 21 mm,电极为不锈钢棒式阳极和环状阴极,分别进行水冷,为了放电稳定和提高注入功率,在放电管和阳极之间加上镇流电阻,电阻值可调。电极间距 400 mm,匹配电阻 2.096 kΩ 时,一个 NF<sub>3</sub> 分子能解离出 1.3~1.5 个 F 原子<sup>[12]</sup>。并研究了电极材料与形状、放电管长度、气体流量、镇流电阻大小等与放电特性及 F 原子产量的关系<sup>[23]</sup>。

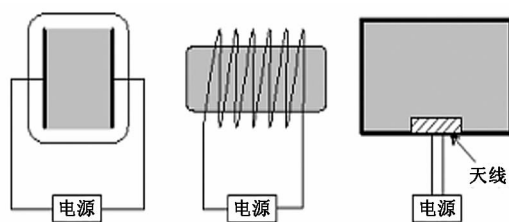
国防科技大学研制的直流辉光放电驱动 HF/DF 激光器,单放电管输出功率近 30 W,四放电管并联时输出功率可达 140 W,电效率为 0.7% 左右<sup>[24]</sup>。放电管结构也与 D. J. Spencer 等人激光器<sup>[21]</sup>类似,一个  $\text{NF}_3$  分子约解离出一个 F 原子<sup>[25]</sup>。

### 2.3 空心阴极放电

由圆筒型空心阴极和圆形板状阳极构成的高压直流放电管为空心阴极放电管,空心阴极放电实质上是一种特殊的辉光放电。1981 年 D. J. Brink 研制的空心阴极放电 HF 激光器中,工作介质为  $\text{SF}_6$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{O}_2$ , 阴极为长 30 mm、直径 6 mm 的水冷铜管,后面连接长 20 mm 的易更换的石英玻璃管,以防止含 F 气体对器壁的腐蚀,并防止放电通过壁面到达阳极。氢气由间隔 2 mm、直径 0.25 mm 的小孔注入。采用多模块并联结构,输入功率 2.5 kW 时,激光器峰值输出功率 4 W,电效率 0.16%<sup>[26]</sup>。

### 2.4 射频、微波放电

射频、微波均属于高频电磁波,微波频率高于射频频率,但两者频率范围划分存在多种方式,在本文中沿用文献定义。射频、微波放电的三种天线耦合方式如图 2 所示。用这些天线耦合方式所生成的等离子体,在图 2(a)的情况下叫电容耦合等离子体;图 2(b)中无磁场时叫做感应耦合等离子体、有磁场时叫做螺旋波等离子体;图 2(c)中无磁场时叫做表面波等离子体、有磁场时叫做 ECR 等离子体<sup>[27]</sup>。



(a) 静电耦合 (b) 感应耦合 (c) 电磁波耦合

图 2 射频、微波放电的三种天线耦合方式

J. A. Glaze 对射频放电驱动 HF/DF 激光器进行了研究。使用的射频源频率为 21 MHz, HF 和 DF 的多谱线输出功率分别为 0.3 W 和 0.12 W, 并利用光栅选线同类型 HF/DF 激光器作为探测源, 测量了激光器的小信号增益系数<sup>[28]</sup>。

L. Bertrand 等人对微波放电驱动 HF 激光器进行了研究。使用的微波源频率为 2.45 GHz, 功率为 0~2.5 kW, 由长 30 cm 的慢波结构将能量注入到气冷石英玻璃放电管中, 生成电容耦合等离子体(对应图 2(a)情况), 解离  $\text{SF}_6$  作为氟源,  $\text{H}_2$  由通道上

下壁面各 48 个直径为 0.15 mm 小孔注入, 氢气气流与 F 原子气流夹角为  $72^\circ$ 。在有效输入功率为 1590 W 时, 加入  $\text{O}_2$  峰值功率为 11.3 W, 不加  $\text{O}_2$  峰值功率为 10.3 W<sup>[29]</sup>。

之后, L. Bertrand 等人又利用微波放电生成表面波等离子体(对应图 2(c)无磁场情况), 解离  $\text{SF}_6$  气体作为氟源, 通过光栅选线, 进行了 HF/DF 激光单谱线研究, 所用微波源为频率 915 MHz, 功率可调 1 kW 磁控管。微波输入功率为 275~450 W 之间时, 得到 HF 单谱线功率均为几毫瓦<sup>[30]</sup>。

2002 年, S. J. Davis 等人开展了化学激光器 F 原子源的研究工作, 利用微波放电产生的感应耦合等离子体来解离含氟气体(对应图 2(b)无磁场情况), 所用装置工作气体压强覆盖近大气压到超过 10 个大气压范围。报道了对含 5%  $\text{F}_2$  的 He 进行了微波放电试验研究, 在注入功率约 3.5 kW 时, F 原子摩尔数与 F 原子、 $\text{F}_2$  分子摩尔数和之比达 80.7%, F 原子流量达 3 mmol/s, 没有进行激光器出光试验。对于正在建造的输入功率达 25 kW 的同类型设备, 根据平衡条件理论计算显示,  $\text{F}_2$  和  $\text{NF}_3$  的解离率分别能达到 95% 和 90%<sup>[31]</sup>。

### 3 各种放电方式优缺点对比

小型电激励 HF/DF 化学激光器的用途决定了其性能要求与发展方向: 首先能够长时间稳定工作; 其次应提高输出功率以满足不同的需求, 输出功率很大程度取决于注入功率的大小; 最后应尽量提升激光器效率。下面对各种放电方式的优缺点加以对比。

电弧放电的特点是低电压、低电流, 产生的为热等离子体(热平衡态), 通过放电产生的高温来解离含氟气体, 因此含氟气体解离效率高。电弧放电激光器高温高压的特性本质上与燃烧驱动激光器是一致的, 因此激光器一般也运转于超音速状态。为防止氟原子腐蚀阴极, 一般都采取加热  $\text{N}_2$ ,  $\text{Ar}$ ,  $\text{He}$  等气体, 再将热量传递给含氟气体的方式, 含氟气体的完全热解离所需的温度均很高( $\text{F}_2$ : >1500 K,  $\text{NF}_3$ : >1900 K,  $\text{SF}_6$ : >2000 K), 因此对电弧加热器的温度及激光器器件的耐热能力均要求很高, 连续运转能力较差。

直流辉光放电的特点是高电压、低电流, 产生的为冷等离子体(非热平衡态), 具有相对低温的特性, 适合长时间稳定运行, 而且注入功率提升方便, 因此是电激励 HF/DF 激光器使用最多的放电方式之一。其缺点是由于使用内部电极, 必须考虑工作

气体对电极的腐蚀<sup>[30]</sup>,另外含氟气体的解离效率不高<sup>[12,25]</sup>,总电效率也不高。

空心阴极放电气体压力和电流密度都比较高,放电电压较低,但单放电管结构尺寸及放电方式限制了注入功率的增大,在激光器中的实际应用也较少。

射频、微波放电的优点在于采用外部电极,可以避免氟原子对电极的腐蚀;而且可以在很宽的气压范围内产生高密度等离子体<sup>[27]</sup>。但射频、微波能量供给源的功率提升较困难,且射频、微波源设备结构较复杂,射频、微波源对其他试验设备的影响也需要加以考虑。

#### 4 总结

本文对小型电激励 HF/DF 化学激光器研究中的部分代表性工作进行了简要总结,然而近年来一些高性能激光器中所使用的放电管(含氟气体解离效率及 F 原子产量较高),如多家研究单位使用的 Helios 公司生产的放电管<sup>[6,22,33-34]</sup>等,其具体结构甚至放电方式我们都不得而知,国外单位对相关技术的保密措施从侧面证明了小型电激励 HF/DF 化学激光器研究的重要性,放电管各方面性能仍然有很大的提升空间,国内仍然有很多研究工作需要完善。

#### 参考文献:

- [1] James A Horkovich. Directed energy weapons: Promise & Reality [C]. 37<sup>th</sup> AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference 5-8 June 2006, San Francisco, California. AIAA 2006, 3753: 1-17.
- [2] Yuan Dafa, Tang Yong. Development of high-energy laser weapon systems in the united states [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2004, 41(12): 15-18. (in Chinese)  
袁大发,唐勇. 美国研制的高能激光武器系统 [J]. 激光与光电子学进展, 2004, 41(12): 15-18.
- [3] Ji Hanshan, Qin Zhiyuan, Zhao Dongxin. Experience and prospects of foreign laser weapons [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2006, 43(5): 14-19. (in Chinese)  
姬寒珊,秦致远,赵东新. 国外激光武器发展的经验与前景 [J]. 激光与光电子学进展, 2006, 43(5): 14-19.
- [4] She Hui, Tan Sheng. Development and application prospects of high-energy laser weapon [J]. Infrared and Laser Engineering, 2002, 31(3): 267-271. (in Chinese)  
余辉,谭胜. 高能激光武器的发展和前景 [J]. 红外与激光工程, 2002, 31(3): 267-271.
- [5] Lei Jing, Lai Lin, Wang Zhenguo. A review on critical technologies of DF/HF chemical laser [J]. Electronics

Optics & Control, 2007, 14(6): 106-112. (in Chinese)  
雷静,赖林,王振国. DF/HF 化学激光器关键技术研究状况评析 [J]. 电光与控制, 2007, 14(6): 106-112.

- [6] R E Waldo, J A Betts, J S Hartlove. New method for HF small signal gain measurements [C]. 32<sup>nd</sup> AIAA Plasma-dynamics and Lasers Conference, 2001, 2864: 1-8.
- [7] Wang Hongyan, Yuan Shengfu, Li Qiang, et al. A discharge driven continuous wave single line DF/HF chemical laser for atmospheric absorption measurement [J]. Chinese Journal of Lasers, 2008, 35(7): 997-1000. (in Chinese)  
王红岩,袁圣付,李强,等. 用于大气吸收测量的小型电激励连续波 DF/HF 选线化学激光器 [J]. 中国激光, 2008, 35(7): 997-1000.
- [8] K R Rickwood. A comparison of methods of electrically exciting small pulsed HF lasers suitable for medical applications [J]. Optics Communications, 1997, 136: 480-486.
- [9] R E Waldo, L H Sentman, P T Theodoropoulos, et al. hydrogen fluoride chemical laser multi-pass amplifier performance [J]. AIAA Journal, 1994, 32(1): 130-136.
- [10] R A Chodzko, J M Bernard, J G Coffey, et al. CW HF selected-line integral master oscillator power amplifier (IMOPA) [J]. SPIE, 1994, 2117: 119-127.
- [11] Charles F Wisniewski, Kevin B Hewett, et al. Hydrogen fluorine overtone laser: experimental methods of characterization [J]. SPIE, 2004, 5448: 242-250.
- [12] Yu Haljun, Tang Shukai, Wang Jian, et al. DC discharge for the all gas-phase iodine laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2006, 18(5): 746-748. (in Chinese)  
于海军,唐书凯,汪健,等. 全气相化学激光体系的直流放电研究 [J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(5): 746-748.
- [13] Carroll D L, Verdeyen J T, King D M, et al. Continuous wave laser oscillation on the 1315 nm transition of atomic iodine pumped by O<sub>2</sub> produced in an electric discharge [J]. Appl. Phys. Lett., 2005, 8(6): 40-44.
- [14] D J Spencer, H Mirels, T A Jacobs, et al. preliminary performance of a cw chemical laser [J]. Appl. Phys. Lett, 1970, 16(6): 235-237.
- [15] D J Spencer, H Mirels, T A Jacobs. comparison of HF and DF continuous chemical lasers: I. power [J]. Appl. Phys. Lett, 1970, 16(10): 384-386.
- [16] Z Babarogic, I Belic, I Mendas, et al. Design and performance characteristics of a cw subsonic HF chemical laser with 120 W power output [J]. Sci. Instrum, 1982, 53(7): 949-951.

- [17] Wang Shibo, Liu Dequan, Wang Anzhou, et al. Research of a continuous wave chemical laser [J]. *Journal of Applied Lasers*, 1986, 6(1-2): 74-78. (in Chinese)  
王世柏, 刘德泉, 王安周, 等. 连续波化学激光器的研制 [J]. *应用激光联刊*, 1986, 6(1-2): 74-78.
- [18] A Sontag, R Joeckle, et al. Driven supersonic cw HF chemical laser [J]. *SPIE*, 1992, 1810: 286-289.
- [19] J J Hinchey, C M Banas. CW HF electric-discharge mixing laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1970, 17(9): 386-388.
- [20] J J Hinchey. Operation of a small single-mode stable cw hydrogen fluoride laser [J]. *Journal of Applied Physics*, 1974, 45(4): 1818-1821.
- [21] D J Spencer, J A Beggs, H Mirels. Small-scale cw HF (DF) chemical laser [J]. *Journal of Applied Physics*, 1977, 48(3): 1206-1211.
- [22] W Q Jeffers. Short wavelength chemical laser [J]. *AIAA Journal*, 1989, 27(1): 64-66.
- [23] Liping Duo, Shukai Tang, Haijun Yu, et al. DC discharge characteristics and fluorine atom yield in  $\text{NF}_3/\text{He}$  [J]. *Chinese Optics Letter*, 2006, 4(3): 170-172.
- [24] Wang Hongyan. Study of discharge driven continuous wave infrared multi-band chemical laser [D]. Changsha: College of Optoelectronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, 2006. (in Chinese)  
王红岩. 电激励连续波红外多波段化学激光器的研究 [D]. 长沙: 国防科技大学, 2006.
- [25] Luo Wei, Li Wenyu, Wang Hongyan, et al. A novel method of measuring fluorine atom flow rate for discharge driven HF/DF chemical laser [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2009, 36(6): 1407-1410. (in Chinese)  
罗威, 李文煜, 王红岩, 等. 用于电激励 HF/DF 化学激光器的 F 原子流量检测新方法 [J]. *中国激光*, 2009, 36(6): 1407-1410.
- [26] D J Brink, A small-scale cw HF laser based on a hollow-cathode discharge [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1981, 14: 985-992.
- [27] Hideo Sugai. *Electronic engineering of the plasma* [M]. Beijing: Science Press, 2005. (in Chinese)  
菅井秀郎. 等离子体电子工程学 [M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [28] J A Glaze. Gain and spectral characteristics of a cw HF/DF chemical laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1971, 19(5): 135-136.
- [29] L Bertrand, J M Gagne, B Mongeau, et al. A continuous HF chemical laser; production of fluorine atoms by a microwave discharge [J]. *Journal of Applied Physics*, 1977, 48(1): 224-229.
- [30] L Bertrand, J P Monchalin, R Pitre. Design of a compact cw chemical HF/DF laser using a microwave discharge [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1979, 50(6): 708-713.
- [31] S J Davis, D B Oakes, M J Read, et al. Atomic fluorine source for chemical lasers [J]. *SPIE Paper January San Jose, CA*, 2002, 4631(29): 20-25.
- [32] H Conrads, M Schmidt. Plasma generation and plasma source [J]. *Plasma Sources Sci. Technol.*, 2000, 9: 441-454.
- [33] L H Sentman, A J Eyre, B P Wootton, et al. Comparison of cw HF laser performance of several nozzles [C]. *AIAA 30<sup>th</sup> Plasmadynamics and Laser Conference*, 1999, 3469: 1-11.
- [34] G C Manke II, C B Cooper, S C Dass, et al. A multiwatt all gas phase iodine laser (AGIL) [J]. *IEEE J. Q. E.*, 2003, 39(8): 995-1002.