

文章编号 1004-924X(2011)02-0304-06

# 氮稀释高效电激励连续波 HF/DF 化学激光器

王红岩,张煊喆,李 强,肖 楠,华卫红,司 磊  
(国防科技大学 光电科学与工程学院,湖南 长沙 410073)

**摘要:**提出使用低温吸附泵代替传统的机械真空泵和洗消装置的设想,以大幅降低电激励连续波 HF/DF 化学激光器的体积和重量。针对该技术需将常用的氮稀释剂替换为氮稀释剂从而引起激光器效率大幅下降的问题,对超音速阵列喷管激光器进行了研究。为提高氮稀释剂激光器效率,研制了周期 4 mm 间隔排列的狭缝-列孔超音速阵列喷管,以代替传统的单通道燃料流横向注入增益发生器。以 HF 激光为例的实验表明:前者在放电管电极间距仅为后者一半的条件下,单管激励出的光功率由 25 W 提高到 90 W,电光转换效率由 0.8% 提升到 5.9%,燃料利用效率提高近 4 倍,从仅为氮稀释剂运转情形的一半变为略高于氮稀释剂情形。这些结果表明,通过专门研制的超音速阵列喷管大幅提高了氮稀释电激励连续波 HF/DF 激光器的效率。

**关键词:**化学激光;低温吸附;氮稀释剂;电激励;阵列喷管

**中图分类号:** TN248.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0304

## Efficient nitrogen diluted discharge-driven continuous wave HF/DF chemical lasers

WANG Hong-yan, Zhang Xuan-zhe, LI Qiang, XIAO Nan, HUA Wei-hong, SI Lei

(College of Opto-electric Science and Technology, National University of  
Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** A cryogenic adsorption technique was presented to replace the machinery pump and exhaust processing system, which could provide a possible way to greatly suppress the size of a discharge-driven CW HF/DF chemical laser. As the nitrogen diluent must be used instead of helium for the cryogenic adsorption pump, the efficiency of HF/DF chemical laser would be lowered down greatly. To solve the problem, a periodically arranged supersonic nozzle array composed of slit and conical holes with a 4 mm period was developed to replace the traditional single slit transverse sonic fuel injecting gain generator. Experimental results with HF laser demonstrates that the laser output and electrical-optical efficiency by designed supersonic nozzle array have been increased from 25 W to 90 W, and 0.8% to 5.9%, respectively. Furthermore, the fuel specific efficiency has a nearly fourfold increase, which is slightly higher than that from the helium diluent. Obtained results prove that the efficiency of the nitrogen diluted discharge-driven CW HF/DF chemical laser can be greatly improved by using the devel-

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2010-10-30.

基金项目:国防预研基金资助项目

oped supersonic nozzle array.

**Key words:** chemical laser; cryogenic adsorption; nitrogen diluent; discharge-driving; nozzle array

## 1 引言

电激励连续波化学激光器因为功率适中、可长时间出光、燃料消耗小,在化学激光增益介质诊断、谱线大气吸收测量、光学膜层检测、探测器辐照效应等研究领域有重要用途<sup>[1-3]</sup>;在泛频 HF 激光、全气态碘化学激光器(AGIL)、电激励氧碘激光器(DOIL)等化学激光前沿领域也被广为采用<sup>[4-6]</sup>。特别是电激励连续波 HF/DF 化学激光器,由于兼具谱线丰富(HF 激光:2.5~3.0 μm、DF 激光:3.5~4.2 μm)、光束质量好、较易获得高功率输出、可定标放大的优点,在激光医学、红外对抗等领域也有潜在用途<sup>[7]</sup>。

电激励连续波化学激光器通常采用机械真空泵来获得数托的低腔压,并持续抽除掉反应后的气体;尾气则通过吸收塔进行洗消。此排气系统振动强、体积大,限制了该激光器的进一步推广。低温吸附泵可将真空、洗消合二为一,有望大幅降低该激光器的体积,并具有零排放、无振动的优点。但由于氮气的沸点很低,几乎无法被吸附<sup>[7]</sup>,因此必须将化学激光常用的氮稀释剂更换为氦气。但一般认为,更换稀释剂会显著降低激光器的效率<sup>[8]</sup>。近年来,以氦气为稀释剂的氧碘化学激光器(COIL)获得了广泛关注,已获得了接近氮稀释剂的效率,并成功实现了与低温吸附泵的对接<sup>[10-11]</sup>。

由于燃烧驱动 HF/DF 化学激光器总温远高于 COIL,且废气中有大量难以吸附的 H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub>,采用低温吸附技术有一定难度;但考虑到电激励连续波 HF/DF 化学激光器放电管总温仅有数百开,气体流量小,综合近年来发展很快的氢存储技术<sup>[12]</sup>,很有可能将低温吸附泵用于该激光器。本文通过专门研制的超音速阵列喷管,大幅度提高了氮稀释电激励连续波 HF/DF 激光器的效率,为低温吸附泵的应用降低了负担。

## 2 基本原理和器件

### 2.1 激光器基本原理

电激励 HF/DF 化学激光器与著名的燃烧驱动 HF/DF 化学激光器相同,都是采用化学泵浦反应实现粒子数反转,不同的是通过低气压气体放电的方式来获得泵浦反应所需的自由 F 原子,而后者则是采用高温高压燃烧来获得自由 F 原子,因而具有主气流总温低、可长时间运转;总压低、无需喷管膨胀降压就可出光的特点,其结构相对来说也比较简单。

整个激光器由核心组件和附属系统组成,其中核心组件如图 1 所示,包括放电管、增益发生器、光腔和热交换管。附属系统包括高压直流电源、流量控制系统、真空和废气处理系统。其运转模式如下:高压直流电源在放电管两端施加数千伏的高压,获得低气压气体放电等离子体,含 F 分子(F<sub>2</sub>、NF<sub>3</sub>、SF<sub>6</sub> 等)在稀释剂(惰性气体、N<sub>2</sub> 等)携带下流经放电管的过程中被部分分解,获得化学泵浦反应所需的自由 F 原子;含 F 原子的主气流进入增益发生器,与喷入的 H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> 发生剧烈的化学泵浦反应:F+H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub>→HF\*/DF\*+H/D,生成振转激发的 HF/DF 分子,实现粒子数反转;光腔用以提取增益;激射后的废气被热交换管进一步冷却,酸性气体被洗消塔吸收,最后的无害废气由真空机组排放到大气。流量控制系统用于

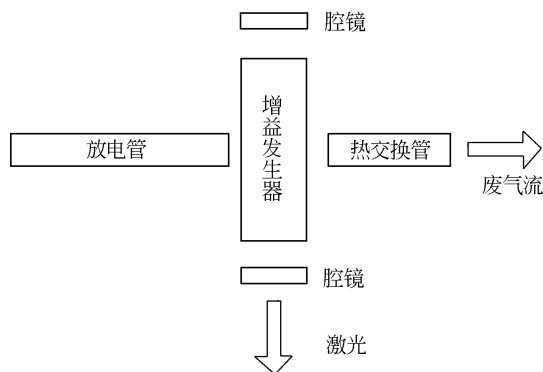


图 1 电激励连续波 HF/DF 化学激光器核心组件  
Fig. 1 Key components of discharge-driven CW HF/DF chemical laser

精确调节 F 源、 $H_2/D_2$  燃料、稀释剂、以及窗口(或腔镜)保护气幕的流量。

增益发生器和放电管是电激励连续波 HF/DF 激光器最主要的两个组件。前者为化学泵浦反应提供合适的反应空间和条件,并促成主气流和燃料流的高效混合,一直是化学激光器研究的核心;后者起 F 原子发生器的作用,从源头上限制了激光器的功率水平。

## 2.2 激光器器件

本文分别对两种增益发生器结构进行了研究,第一种激光器实物如图 2 所示,增益发生器采用单通道燃料流横向音速注入结构,简称单通道横向注入激光器。

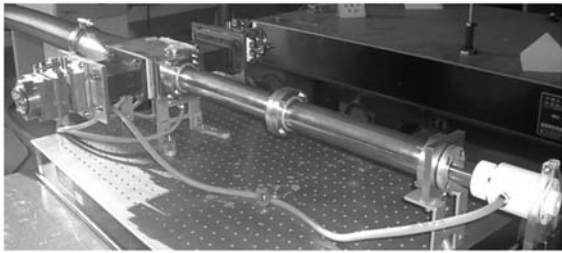


图 2 大电流、单通道横向注入激光器实物图

Fig. 2 High current, single slit transverse injecting laser

这种结构最先由 Hinchin<sup>[13]</sup> 提出,后经 Spencer 等<sup>[14]</sup> 进一步优化,最后由 Jeffers<sup>[15]</sup> 创立的 Helios 公司将其商品化,并被各地的研究者广泛采用<sup>[16]</sup>。一般单管激励激光器的功率在 20 W 左右,如果要获得更高的功率输出,则可以通过多放电管激励、多增益发生器拼接的方式实现,Helios 公司曾根据拼接数量提供 CL-II、CL-IV 等规格的激光器。

与 Spencer 器件不同的是,将宽 100 mm 高 3 mm 的窄矩形气流通道的进一步扩张到 6 mm,形成面积比为 2 的扩张型气流通道的得到的主气流实际上运行在略微的超音速状态。 $H_2/D_2$  则从扩张段起始处上下壁面间隔排列的小孔注入。根据前期研究结果<sup>[17]</sup>,放电间距从之前常用的 330 mm 提高到 660 mm,放电电流由 0.4 A 提高到 1.3 A。放电管内径 30 mm,阳极为 1 根 10 mm 粗的不锈钢棒、阴极为不锈钢环孔。激光器由基于限流变压器的恒流源供电。光腔为全内腔结构,光轴定在下游 5 mm 处。全反镜曲率半径为 5 m,输出镜曲率半径为 2 m、耦合输出率为 15%。

第二种激光器实物如图 3 所示。由于在实验中观察到大电流情形电极寿命受到影响,因此将电极间距重新调整为 300 mm,并调整了工作电流。同时对喷管上游放电管的总压和下游光腔静压进行监测,以此来判断阵列喷管的工作状态。光轴定在下游 5 mm 处,由于 5 m 曲率半径的腔镜出现了损伤,因此采用 10 m 曲率半径的全反镜;输出镜不变,曲率半径仍为 2 m,耦合输出率为 15%。全反镜曲率变化对输出功率带来的影响基本可以忽略不计,因为激光器工作在多横模状态下,这时出光功率主要由增益体积和耦合输出率决定。



图 3 阵列喷管激光器实物图

Fig. 3 Chemical laser employing nozzle array

超音速阵列喷管中的主气流喷管为周期排列的扩张型单通道狭缝,出口宽度为 2 mm,面积比为 2.5;燃料流喷管为出口直径 1.5 mm、面积比为 25 的锥孔,按高度方向周期 2 mm,宽度方向周期 4 mm 的矩阵方式排列,与主气流的狭缝喷管相交错;整个阵列喷管出口总高度为 10 mm,宽度为 120 mm,由黄铜一体化加工而成,内嵌水冷通道。

## 3 实验结果和讨论

实验中,气流量控制均采用七星华创 D07-9E 型质量流量控制器,功率监测采用北京光电所 M92 水冷型功率计,压力监测采用合肥中亚压力传感器,废气直接排入实验室的大型真空球罐,真空背压均为 0.3 kPa,在激光器运行过程中随着气流量的增加,腔压均有所上升。

两种激光器的实验结果分别见表 1 和表 2。主稀释剂指随  $NF_3$  流过放电管的稀释剂,主要起调节放电管阻抗的作用;副稀释剂指放电管末端

注入的稀释剂,主要起调节放电管出来的主气流参数的作用<sup>[18]</sup>。由于氮气和氦气的分子量差别较大,对于同样的摩尔流量,氮稀释剂的质量流量主要远大于氦稀释剂,如果以质量流量为单位,难以体现出各气体的相对真实用量,因此流量单位统一换算为 mmol/s。电压指加在放电管电极两端

的电压,电流指流过放电管的电流, $P_{\text{electric-in}}$  表示注入放电管的功率。 $p_{\text{cavity}}$  表示腔压, $p_{\text{discharge}}$  指放电管总压,在阵列喷管激光器中,可以用以判定主气流的流动状态。 $P_{\text{laser}}$  指激光器功率, $\eta_{\text{e-o}}$  指光电光转换效率。

表 1 单通道横向注入激光器的典型实验结果

Tab. 1 Typical experimental results of laser employing single slit and transverse injecting gain generator

	Mass flow rates H <sub>2</sub> /(mmol · s <sup>-1</sup> )	Mass flow rates NF <sub>3</sub> /(mmol · s <sup>-1</sup> )	Mass flow rates p-diluent /(mmol · s <sup>-1</sup> )	Mass flow rates s-diluent /(mmol · s <sup>-1</sup> )	Voltage /kV	Current /A	$P_{\text{electric-in}}$ /kW	$p_{\text{cavity}}$ /kPa	$P_{\text{laser}}$ /W	$\eta_{\text{e-o}}$
Helium	9.8	1.8	8.4	31.6	2.1	1.3	2.7	0.6	45	1.5%
Nitrogen	18.8	2.0	21	31	1.9	1.3	2.5	0.6	25	0.8%

表 2 阵列喷管激光器的典型实验结果

Tab. 2 Typical experimental results of laser employing supersonic nozzle array

	Mass flow rates H <sub>2</sub> /(mmol · s <sup>-1</sup> )	Mass flow rates NF <sub>3</sub> /(mmol · s <sup>-1</sup> )	Mass flow rates p-diluent /(mmol · s <sup>-1</sup> )	Mass flow rates s-diluent /(mmol · s <sup>-1</sup> )	Voltage /kV	Current /A	$P_{\text{electric-in}}$ /kW	$p_{\text{discharge}}$ /kPa	$p_{\text{cavity}}$ /kPa	$P_{\text{laser}}$ /W	$\eta_{\text{e-o}}$
Helium	21	5.1	5.3	51	2.7	0.48	1.3	2.2	0.5	95	7.4%
Nitrogen	21	4.0	6.2	27	3.9	0.39	1.5	2.4	0.5	90	5.9%

从表 1 可见,通过提高放电管注入电流和注入功率,单放电管激励的激光器输出功率就可达到 45 W,远大于常规 20 W 左右的功率输出。这与文献中激光器的输出功率与放电管注入功率成正比的结论相符<sup>[14]</sup>,也与作者研究发现的在同等注入功率下,大电流模式更有利于获得高功率输出的结论吻合<sup>[17]</sup>。

将氦气更换为氮气,最高仅获得 25 W 功率输出,效率较氦气有显著下降,这从一个侧面反映了这种单通道横向注入增益发生器结构的局限性。虽然结构简单、主气流和燃料流混合快,但由于高压 H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> 气流横向注入到低压的主气流中,对主气流形成压缩,实质上降低了主气流的扩张比和流速,提高了主气流的静温,因此燃料利用率不高,过量的 H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> 气将给吸附造成额外的困难。随着电流的增加,放电管焦耳热上升很快,需要更多的副稀释剂来降低主气流温度,事实上,在氮稀释剂的实验中发现,如果不添加副氮气,在仅有主氮气的情形下,激光器无法出光,这从一个侧面印证了放电管主气流的过热。

综上分析,运用超音速气动技术来隔离放电

管和光腔流场对主气流进行降温,通过阵列喷管来加强两股气流的混合就成为一个自然的选择。从表 2 可见,超音速阵列喷管对于激光器效率的提升是显著的。由于放电管电压与放电管气压成正相关,且随着气压的增高,放电会越来越具有低气压热电弧的性状,显著加热主气流。而受真空系统的限制,喷管下游腔压又不能太低,从而限制了主喷管气动膨胀的能力,也限制了主喷管气流可得到的马赫数,进而限制了主喷管的气动降温潜力。表现在表 2 中,就是副稀释剂的气流量仍然高于主稀释剂气流量。但由于燃料流的总压可以比较高,因此副喷管可得到超低温的高马赫数气流,不再需要原本在单通道横向注入激光器中部分起稀释降温作用的过量 H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> 气流,从而提高了 H<sub>2</sub>/D<sub>2</sub> 气流的使用效率,这尤其有利于降低低温吸附系统的负担。

## 4 结 论

为提高氮稀释电激励 HF/DF 化学激光器的效率,研制了超音速阵列喷管激光器。相比于传

统的单通道横向注入激光器,单管激励激光输出大幅度提升,功率从 25 W 增加到 90 W,电光效率从 0.8% 提升到 5.9%,燃料利用效率提高近 4

倍,并获得了略高于使用氦稀释剂情形的效率。下一步的工作是在此基础上对激光器的光束质量进行改进。

## 参考文献:

- [1] 江腾蛟,黄伟,齐文宗,等.表面热透镜技术测量 3.8  $\mu\text{m}$  和 2.8  $\mu\text{m}$  激光薄膜的微弱吸收 [J]. 强激光与粒子束,2004,16(21):1497-1500.  
JIANG T J, HUANG W, QI W Z, *et al.*. Thin film weak absorption of 3.8  $\mu\text{m}$  and 2.8  $\mu\text{m}$  laser measured by surface thermal lensing technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004, 16 (21):1497-1500. (in Chinese)
- [2] 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.  
WANG H Y, YUAN SH F, LI Q, *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)
- [3] WALDO R E, BETTS J A, HARTLOVE J S. New method for HF small signal gain measurements[C]. *32th AIAA Plasmadynamics and lasers conference*, 11-14 June 2001.
- [4] WISNIEWSKI C F, HEWETT K B, MANKE G C II, *et al.*. Small signal gain measurement in a small scale HF overtone laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2003,77(2):337-342.
- [5] ZIMMERMAN J W, BENAVIDES G F, PALLA A D, *et al.*. Gain recovery in an electric oxygen iodine laser[J]. *Applied Physics Letters*, 2009,94 (2):021129.
- [6] DUO L P, TANG S K, YU H J, *et al.*. DC discharge characteristics and fluorine atom yield in NF<sub>3</sub>/He [J]. *Chineses Optics Letters*, 2006,4(3): 170-172.
- [7] JHA A R. *Infrared Technology, Applications to Electro-optics, Photonic Devices, and Sensors* [M]. John Wiley & Sons inc,2000.
- [8] 赵振国.吸附作用应用原理[M].北京:化学工业出版社,2005.  
ZHAO Z G. *Application Principle of Adsorption* [M]. Beijing: Chemical Industry Press,2005.
- [9] GROSS R W F, BOTT J F. *Handbook of Chemical Lasers*[M]. John Wiley & Sons, 1976.
- [10] BOREISHO A S, BARKAN A B, VASIL'EV D N, *et al.*. Highly efficient cw chemical oxygen iodine laser with transonic iodine injection and a nitrogen buffer gas[J]. *Quantum Electronics*, 2005, 35(6):495-503.
- [11] 房本杰.以氦气为载气的氧碘化学激光器的研究 [D].大连:大连化学物理研究所,2004.  
FANG B J. *Study on a chemical oxygen iodine laser using nitrogen buffer gases*[D]. Dalian:Dalian Institute of Chemical Physics,2004. (in Chinese)
- [12] 李永锋,凌军,刘燕珍,等.高比表面积活性炭研究进展[J].热带作物学报,2008,29(3):396-401.  
LI Y F, LIN J, LIU Y ZH, *et al.*. Research advances in activated carbon with high specific surface area[J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2008,29(3):396-401. (in Chinese)
- [13] HINCHEN J J. Operation of a small single mode stable cw hydrogen fluoride laser[J]. *Journal of Applied Physics*, 1974,45(4):1818-1821.
- [14] SPENCER D J, BEGGS J A, MIRELS H. Small scale cw HF(DF) chemical laser [J]. *Journal of Applied Physics*, 1977,48(3):1206-1211.
- [15] JEFFERS W Q M. Scalable overtone HF chemical laser;United States,4,670,582[P]. 1988-7-26.
- [16] SENTMAN L H, THEODOROPOULOS P, NGUYEN T, *et al.*. An economic supersonic cw HF laser testbed[R]. AIAA,1898, 1989.
- [17] 文备,李文煜,王红岩,等.电激励连续波 HF/DF 激光器放电参数的优化[J].激光与光电子学进展,2010, 47(5):051404.  
WEN B, LI W Y, WANG H Y. Optimization of discharge parameters on discharge driven cw HF/DF chemical laser [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010,47(5):051404. (in Chinese)
- [18] 王红岩,袁圣付,张鹏,等.电激励红外多波段化学激光器中稀释剂注入方式对激光输出的影响[J].

中国激光,2005,17(3):339-342.

WANG H Y, YUAN SH F, ZHANG P, *et al.*.  
Effects of two different diluent injecting methods

on a discharge excited infrared multi-band chemical  
laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*,  
2005,17(3):339-342. (in Chinese)

#### 作者简介:

**王红岩**(1979—),男,陕西凤翔人,博士,助理研究员,2001年、2006年于国防科技大学分别获得学士、博士学位,主要从事化学激光器技术和碱金属蒸汽激光器方面的研究。E-mail: why-nudtch@163.com

**张焯喆**(1982—),男,新疆哈密人,助理研究员,2003年、2007年分别于国防科技大学获得学士、硕士学位,主要从事激光器参数诊断、光学设计方面的研究。E-mail: zhangxz\_zzh@163.com

**李 强**(1969—),男,湖南长沙人,高级实验师,1996年于国防科技大学获硕士学位,主要从事高能激光技术等方面的研究。E-mail: 2031q@sina.com

**肖 楠**(1979—),女,湖南常德人,博士,讲师,2001年、2003年、2009年于国防科技大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事新型激光器的研究。E-mail: xiangxiang\_\_99@163.com

**华卫红**(1968—),女,浙江宁波人,博士,教授,博士生导师,1990年、1997年于国防科技大学分别获学士、工学博士学位,主要从事化学激光器技术及数值模拟的研究。E-mail: rosehua@hotmail.com

**司 磊**(1971—),男,山东枣庄人,博士,研究员,1993年、2000年于国防科技大学分别获学士、博士学位,主要从事激光器及光束控制的研究。E-mail: w\_zt@163.com