

doi:10.3788/gzxb20184712.1214002

# 氮稀释剂连续波 DF 激光器输出光谱分析

王杰, 郭建增, 颜飞雪, 杨珍, 任晓明, 赵海涛

(中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027)

**摘 要:**为获得氮稀释剂燃烧驱动连续波 DF 激光器输出光谱特性,利用傅里叶红外光谱仪对 Z 型折叠非稳定光学谐振腔 DF 激光器的外传输光路高反射镜散射激光进行了光谱分析.结果表明:采用 N<sub>2</sub> 稀释剂的 DF 激光输出谱线向长波偏移,有效输出波长大于 4.0 μm 的 3P10~3P13 谱线,且各振动能级跃迁谱线为更高转动量子数跃迁谱线.各支谱线存在谱带间和谱带内竞争,且在一定程度上体现级联效应.改变燃烧室反应氧化剂过量系数,能够在一定程度上调节 DF 激光输出谱线分布.过量的副燃料主要为满足气动性能需求,在合适范围内变化的副燃料比对输出谱线及分布影响较小.研究结果可为燃烧驱动连续波 DF 激光技术研究及应用提供参考.

**关键词:**光谱学;DF 激光器;非稳腔;氮稀释剂;输出光谱

中图分类号:TN248.5

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)12-1214002-5

## Analysis of Output Spectrum in Nitrogen Diluted Continuous Wave DF Laser

WANG Jie, GUO Jian-zeng, YAN Fei-xue, YANG Zhen, REN Xiao-ming, ZHAO Hai-tao

(The 718th Research Institute of CSIC, Handan, Hebei 056027, China)

**Abstract:** In order to acquire characteristic of the output spectrum in nitrogen diluted combustor driven continuous wave deuterium fluoride laser, the spectrum analysis was accomplished based on Z-model unstable optical resonator, which used Fourier infrared spectrum analyzer measuring scatter of the reflector mirror in out optical path. The results show that the output lines of nitrogen diluted DF laser transfer to long wavelength, and 3P10~3P13 lines with wavelength larger than 4.0 μm are brought out efficiently. Also, the transition lines of each vibrational energy level take on higher rotational quantum number. The output spectra of DF laser compete intensely existing in self and different band, and cascade effect appears among them. The distribution of DF laser output spectra can be regulated partly by adjusting the combustor oxidant excess index. It satisfies pneumatic performance with excess second fuel, and the distribution or output spectra is affected faintly with the appropriate second fuel ratio range. The results have a reference to research and application of the combustion driven continuous wave DF laser.

**Key words:** Spectroscopy; Deuterium fluoride chemical laser; Unstable cavity; Nitrogen diluents; Output spectrum

**OCIS Codes:** 300.6170; 140.1550; 070.4790; 310.6188

## 0 引言

燃烧驱动连续波氟化氘(DF)化学激光器是高功率激光器的典型代表之一,由于其良好的工程放大性、较好的大气传输性能及 3.5~4.3 μm 的中红外输出波段,在强激光、光电对抗等领域有广泛的应用前景<sup>[1-4]</sup>.经典燃烧驱动 DF 化学激光器主要采用 NF<sub>3</sub>-C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>-D<sub>2</sub>-He 或 N<sub>2</sub> 反应体系(其中 NF<sub>3</sub> 为含氟氧化剂、C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 为主燃料、D<sub>2</sub> 为副燃料、He 或 N<sub>2</sub> 为稀释剂),通过主燃烧反应和冷泵浦反应产生激活介质,在合适的光学谐

基金项目:国家高技术发展计划(No.AA8027038)资助

第一作者:王杰(1982-),男,研究员,博士,主要研究方向为气体与化学激光技术.Email: wangjie\_24@163.com

收稿日期:2018-08-24;录用日期:2018-10-11

<http://www.photon.ac.cn>

振腔提取下输出激光.就激光器功率而言,所有的因素均有利于 He 作稀释剂,且对于给定的喷管组件,以 He 作为稀释剂所得的最高实验功率要比以  $N_2$  作为稀释剂的功率约大一倍<sup>[1]</sup>.但以  $N_2$  为稀释剂的 HF/DF 激光器可采用低温吸附泵代替传统真空球罐和引射式压力恢复系统,大幅降低激光器系统体积和重量<sup>[5]</sup>.对于  $N_2$  稀释剂连续波 HF 激光器,通过优化结构参数和调整反应配方,可实现输出谱线向长波的转移,在一定程度上拓宽了 HF 激光实用光谱范围<sup>[6]</sup>.陈金宝<sup>[7]</sup>等采用光栅扫描方法对 He 稀释剂燃烧驱动连续波 DF 化学激光器输出光谱进行了测量与分析.有关电激励连续波 HF/DF 激光器输出光谱、非链式脉冲 DF 激光器光谱特性等的研究工作也有开展.罗威<sup>[8]</sup>等研究了外腔式结构对电激励 HF/DF 激光器输出光谱的影响,发现大气传输损耗对 HF 激光输出光谱有较大影响.Panchenko<sup>[9]</sup>等研究了不同激励条件和谐振腔损耗下 DF 激光光谱特性,以  $SF_6-D_2$  为工作物质获得的激光能量主要集中在  $\nu(2-1)$  和  $\nu(1-0)$  两个谱带上.潘其坤<sup>[10]</sup>等对自引发放电非链式脉冲 DF 激光器光谱进行了测试,通过优化工作气体参数可有效提升级联谱线输出时增益提取效率.但以  $N_2$  作为稀释剂的燃烧驱动连续波 DF 激光输出光谱的系统研究鲜见报道.为获得  $N_2$  稀释剂燃烧驱动连续波 DF 激光器光谱特性,本文设计了 Z 型折叠非稳定光学谐振腔,通过实验研究和理论分析对连续波 DF 激光器输出光谱进行分析和讨论.

## 1 Z 型折叠非稳腔及测试光路

图 1 是 Z 型折叠非稳腔及测试光路示意图,Z 型折叠非稳腔由凹镜、上平面反射镜、下平面反射镜、凸镜和输出镜(刮刀镜)组成.由输出镜输出的强激光经  $45^\circ$  全反镜后从输出窗口传出,再经过腔外的  $45^\circ$  全反镜反射进入全吸收能量计.光谱仪放置于外光路  $45^\circ$  全反镜前约 0.5 m 处,测量强激光散射而获得光谱.实验中使用的光谱仪为 D&P 公司的傅里叶红外光谱仪,响应波段为  $2\sim 5\ \mu\text{m}$ ,分辨率为  $4\ \text{cm}^{-1}$ ,实验前用  $3\ 039\ \text{nm}$  标准光源进行标定.

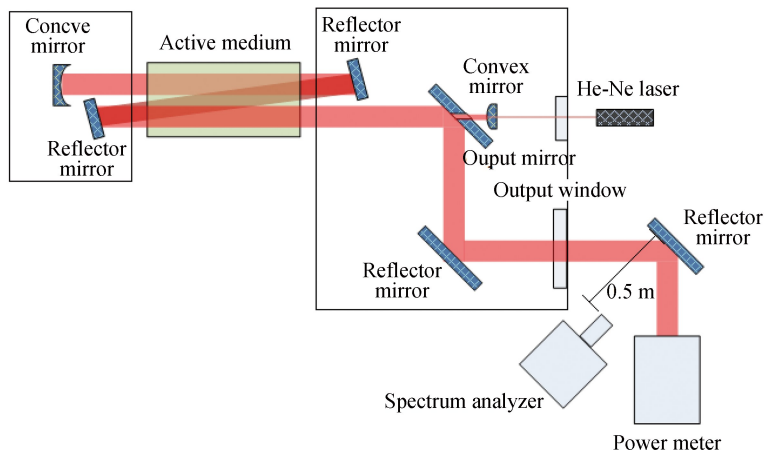


图 1 Z 型非稳腔及测试光路示意图

Fig.1 Schematic of Z-model unstable cavity and testing optical path

## 2 输出光谱及分析

图 2 是 Z 型折叠非稳腔条件下  $N_2$  稀释剂燃烧驱动连续波 DF 激光实测光谱.由图可知,输出光谱包含 13 支谱线,分别是基于一能级跃迁的 1P9、1P10、1P11、1P12 谱线,二能级跃迁的 2P9、2P10、2P11、2P12 谱线和三能级跃迁的 3P9、3P10、3P11、3P12、3P13 谱线,且三簇谱线分别以 1P11、2P10 和 3P10 为中心趋于拟“正态”分布.激光器输出的 13 支谱线波长在  $3.7\sim 4.2\ \mu\text{m}$  范围内,波长大于  $4.0\ \mu\text{m}$  的 3P10~3P13 谱线有效输出.

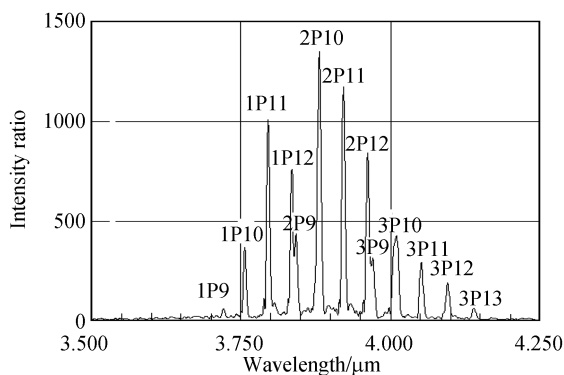


图 2 DF 激光器实测光谱

Fig.2 Actual measuring spectrum in DF laser

图3是He稀释剂条件下DF激光实测光谱.激光器输出的13支谱线,包含基于一能级跃迁的1P6~1P9谱线、二能级跃迁的2P6~2P9谱线和三能级跃迁的3P5~3P9谱线.激光谱线波长在3.6~4.0 μm范围,波长大于4.0 μm谱线未能输出.对比图2可知,采用N<sub>2</sub>稀释剂的燃烧驱动连续波DF激光输出光谱向长波偏移超过160 nm,且各振动能级跃迁谱线均为更高转动量子数跃迁谱线.

根据HF/DF激光快速弛豫理论,输出谱线及分布在一定程度上反应激射腔增益介质的温度属性<sup>[6,11]</sup>,且较高的腔静温有利于高转动量子数谱线跃迁.对于燃烧驱动连续波DF化学激光器,相比于He稀释剂,采用N<sub>2</sub>稀释剂时燃烧反应产生的含氟原子主气流比热比由1.45减小至1.28.根据面积比、等熵流动温度比、压强比与马赫数关系,对于同样的总压、总温及主喷管面积比,N<sub>2</sub>稀释剂含氟原子主气流在喷管出口(激射腔入口)的静温、静压显著升高,因此激射反应产生的增益介质静温、静压相应提高,最终导致了N<sub>2</sub>稀释剂条件下DF激光输出谱线向高转动量子数跃迁的长波谱线偏移(如表1),且基于一、二振动能级跃迁的中心谱线所占比重有效增加,基于三振动能级跃迁的波长大于4.0 μm的3P10~3P13谱线所占比重之和达到13.7%.

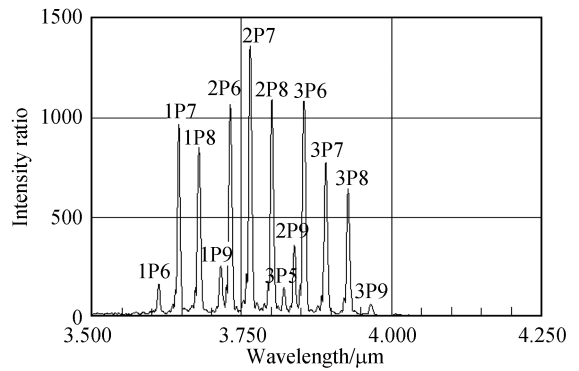


图3 He稀释剂DF激光器实测光谱  
Fig.3 Actual measuring spectrum in helium diluents DF laser

表1 不同稀释剂条件下DF激光器输出谱线及平均占比  
Table 1 Ratio of spectral lines in DF chemical laser at different diluents

Diluents		Ratio of spectral lines							
Helium diluents	Spectral lines	1P6	1P7	1P8	1P9	2P6	2P7	2P8	
	Average ratio/%	1.8	11.0	9.5	2.9	12.1	15.6	12.2	
	Spectral lines	2P9	3P5	3P6	3P7	3P8	3P9		
	Average ratio/%	4.1	1.7	12.3	8.8	7.3	0.7		
Nitrogen diluents	Spectral lines	1P9	1P10	1P11	1P12	2P9	2P10	2P11	
	Average ratio/%	0.6	5.2	13.6	10.7	5.8	18.5	16.4	
	Spectral lines	2P12	3P9	3P10	3P11	3P12	3P13		
	Average ratio/%	11.1	4.4	6.4	4.0	2.5	0.8		

图4是N<sub>2</sub>稀释剂DF激光器在1s出光过程中输出的各支谱线相对强度分布.图中横坐标是激光器输出的各支谱线,纵坐标是由各支谱线峰值强度计算获得的比例权重.光谱仪的采样频率为12 frame/s,曲线表征的是DF激光输出各支谱线随时间变化情况.由图可知,激光器输出谱线总体分布相对稳定,但各支谱线存在一定波动.1P10和2P9谱线比重分别由4.6%和5.5%增加至5.7%和6.2%,1P12和2P11谱线比重分别由9.8%和14.9%增加至12.7%和18.8%,3P11和3P12谱线比重分别由7.8%和4.0%下降至3.6%和2.6%,1P11和2P10谱线比重先增加后减小,这正是DF激光器各支谱线谱带间和谱带内相互竞争的体现,且竞争表现出中心谱线竞争激烈,边缘谱线向中心谱线转移的趋势.

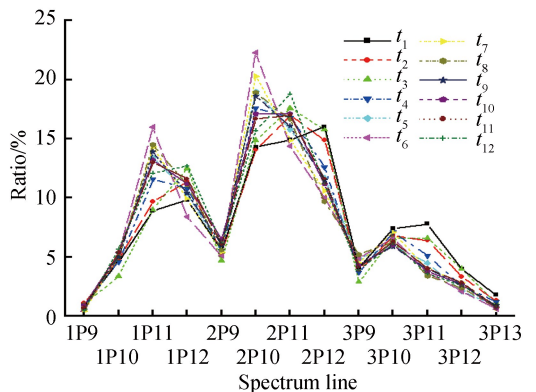


图4 DF激光各支谱线强度分布  
Fig.4 Intensity distribution of each spectral line in DF laser

图5是两组典型级联谱线强度随时间分布.图中横坐标对应光谱仪采样点数,纵坐标是谱线所占比重.由图可以看出,互相级联的1P11和2P10、1P12和2P11谱线所占比重变化趋势相同.而从同一振动能级跃

迁的两支谱线来看,1P11 和 1P12、2P10 和 2P11 谱线所占比重变化情况相反,这也是谱带内相互竞争的体现.从 1 s 出光过程来看,1P11 和 1P12 谱线、2P10 和 2P11 谱线所占比重之和分别由 18.7% 和 29.2% 增加至 24.8% 和 34.5%,并逐渐趋于稳定.

图 6 是不同相对氧化剂过量系数条件下 DF 激光输出的各支谱线强度分布.相对氧化剂过量系数是指实验中实际氧化剂过量系数与标准配方条件下氧化剂过量系数的比值.对各振动能级跃迁谱线而言,相对氧化剂过量系数为 0.92 时,1P9~1P11、2P9、3P9 等转动量子数较小的短波谱线所占比重较大,相对氧化剂过量系数为 1.07 时,1P12、2P12、3P10~3P13 等转动量子数较大的长波谱线所占比重较大,即在一定范围内提高相对氧化剂过量系数有利于高转动量子数跃迁的长波谱线输出.对每一支谱线而言,随着氧化剂过量系数的变化(对应与激光器主反应配比的变化),各支谱线所占比重变化规律不同,即在光学参数不变情况下各单一谱线存在最佳的主反应配比.同时,进一步考察了激光器副反应比对输出谱线影响,结果表明:副燃料比在合适范围内变化对输出谱线及分布影响较小,主要原因是 DF 激光器中副燃料是过量的,过量的副燃料主要为满足气动(与含氟原子主气流的快速高效混合)性能需求,并可在一定程度上充当副稀释剂调节反应温度.

### 3 结论

设计了 Z 型折叠非稳定光学谐振腔,对  $N_2$  稀释剂燃烧驱动连续波 DF 激光器输出光谱特性进行了研究分析.结果表明,相对于 He 稀释剂,采用  $N_2$  稀释剂的 DF 激光输出光谱向长波偏移,波长大于  $4.0 \mu m$  的 3P10~3P13 谱线有效输出,且各振动能级跃迁谱线为更高转动量子数跃迁谱线.DF 激光器输出的各支谱线存在谱带间和谱带内竞争,且竞争表现出中心谱线竞争激烈,边缘谱线向中心谱线转移的趋势.改变燃烧室反应氧化剂过量系数,能够在一定程度上调节 DF 激光输出谱线分布,在光学参数不变的情况下各单一谱线存在最佳的主反应配比.过量的副燃料主要为满足气动性能需求,在合适范围内变化的副燃料比对输出谱线及分布影响较小.

#### 参考文献

- [1] GROSS R W F, BOTT J F. Handbook of chemical laser[M]. Beijing: Science Press, 1987.  
格罗斯 R W F, 博特 J F. 化学激光手册[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [2] SUN Xu, YUAN Sheng-fu, LUO Wei, et al. Influence of photon absorption of ground state molecules in resonator cavity of HF-DF dual-band chemical laser output performance[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2013, **40**(8): 0802004.  
孙旭, 袁圣付, 罗威, 等. HF-DF 双波段激光器腔内基态分子光吸收对输出性能的影响[J]. *中国激光*, 2013, **40**(8): 0802004.
- [3] WILSON L E, HOOK D L. Deuterium fluoride CW chemical lasers[C]. AIAA 9th Fluid and Plasma Dynamics Conference, San Diego, California, 1976: 76-344
- [4] WANG Hong-yan, ZHANG Xuan-zhe, LI Qiang, et al. Efficient nitrogen diluted discharge-drive continuous wave HF/DF chemical laser[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(2): 304-309.  
王红岩, 张焯喆, 李强, 等. 氮稀释剂高效电激励连续波 HF/DF 化学激光器[J]. *光学精密工程*, 2011, **19**(2): 304-309.
- [5] YU Jin-biao, CHEN Xing, WANG Hong-yan, et al. Small signal gain measurement for supersonic nitrogen diluted

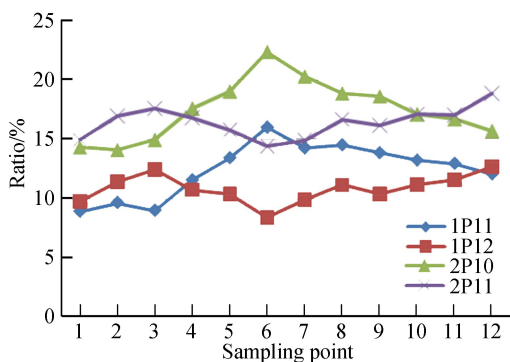


图 5 典型级联谱线分布

Fig.5 Distribution of typical cascade lines in DF laser

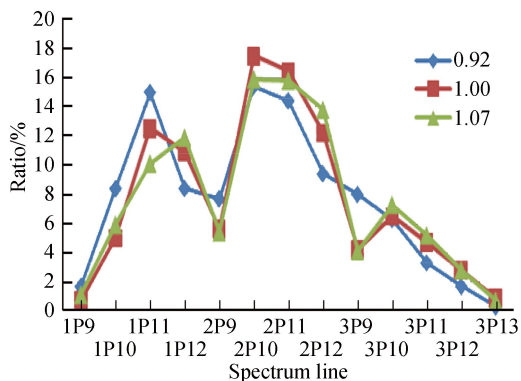


图 6 不同氧化剂过量系数下激光谱线强度分布

Fig.6 Intensity distribution of spectrum lines at different oxidant excess coefficient

continuous wave HF chemical laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, **23**(10): 2569-2572.

于金标,陈星,王红岩,等.超音速氮稀释剂连续波 HF 化学激光器小信号增益测量[J].*强激光与粒子束*,2011,**23**(10): 2569-2572.

- [6] WANG Jie, GUO Jian-zeng, LI Shao-hua, *et al.* Study on gain characteristic of the long wave spectral line in hydrogen fluoride laser [J].*Chinese Journal of Lasers*, 2017, **44**(4): 0411002.  
王杰,郭建增,李少华,等.氟化氢激光长波谱线增益特性研究[J].*中国激光*,2017,**44**(4):0411002.
- [7] CHEN Jin-bao, ZHAO Yi-jun, LIU Ze-jin, *et al.* Spectrum of combustion-driven DF chemical lasers[J]. *Journal of National University of Defense Technology*, 1998, **21**(3): 29-33.  
陈金宝,赵伊君,刘泽金,等.燃烧驱动连续波 DF 化学激光器的输出光谱[J].*国防科技大学学报*,1998,**21**(3):29-33.
- [8] LUO Wei, YUAN Sheng-fu, ZOU Qian-jin, *et al.* Influence of outer cavity on emission spectrum of the HF/DF chemical laser[J]. *Laser & Infrared*, 2012, **42**(7): 758-761.  
罗威,袁圣付,邹前进,等.外腔式结构对 HF/DF 激光器输出光谱的影响[J].*激光与红外*,2012,**42**(7):758-761.
- [9] PANCHENKO A N, ORLOVSKY V M, TARASENKO V F. Spectral characteristics of non-chain HF and DF electric-discharge lasers in efficient excitation modes[J]. *Quantum Electronics*, 2004, **34**(4): 320-324.
- [10] PAN Qi-kun, XIE Ji-jiang, SHAO Chun-lei. Spectral characteristics of non-chain pulsed deuterium fluoride laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2015, **42**(2): 0215001.  
潘其坤,谢冀江,邵春雷.非链式脉冲氟化氘激光器光谱特性[J].*中国激光*,2015,**42**(2):0215001.
- [11] WANG Hong-yan, YUAN Sheng-fu, LI Qiang, *et al.* Choosing cavity axis for a discharge driven CW line-selected HF/DF chemical laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, **18**(8): 1257-1260  
王红岩,袁圣付,李强,等.电激励连续波 HF/DF 选线化学激光器光轴的选择[J].*强激光与粒子束*,2006,**18**(8):1257-1260.

**Foundation item:** The National High Technology Research and Development Program of China (No.AA8027038)

引用格式:WANG Jie, GUO Jian-zeng, YAN Fei-xue, *et al.* Analysis of Output Spectrum in Nitrogen Diluted Continuous Wave DF Laser [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2018, **47**(12): 1214002

王杰,郭建增,颜飞雪,等.氮稀释剂连续波 DF 激光器输出光谱分析[J].*光子学报*,2018,**47**(11):1214002