

氟化氢激光长波谱线增益特性研究

王 杰, 郭建增, 李少华, 陈 晶, 康蓉娣

中国船舶重工集团公司第七一八研究所, 河北 邯郸 056027

摘要 通过优化激光器结构参数和调整反应体系配方, 实现了传统氟化氢(HF)激光输出光谱向长波的转移和波长大于 $2.87 \mu\text{m}$ 谱线的高效输出。实验和理论结果表明, 随着光轴由 11 mm 移至 15 mm, 2P8 谱线所占比重不断减小, 1P10、2P10 等谱线所占比重逐渐增加。HF 激光输出谱线存在激烈的谱带内竞争和各谱带间竞争, 且在竞争中呈现出一定的级联效应。研究结果拓宽了 HF 激光实用输出光谱范围, 使某些长波谱线得以高效输出, 对 HF 激光选线技术研究及应用具有重要的指导意义。

关键词 光谱学; 氟化氢; 化学激光器; 输出光谱; 增益特性

中图分类号 TN248.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201744.0411002

Study on Gain Characteristic of Long Wave Spectral Line in Hydrogen Fluoride Laser

Wang Jie, Guo Jianzeng, Li Shaohua, Chen Jing, Kang Rongdi

The 718th Research Institute of China Shipbuilding Industry Corporation, Handan, Hebei 056027, China

Abstract The transfer of output spectrum of traditional hydrogen fluoride (HF) laser to long wave and high efficient output of spectral lines, whose wavelength is more than $2.87 \mu\text{m}$, is realized by optimizing structure parameters and adjusting reaction system formula. The results of experiment and theory show that the proportion of 2P8 spectral line decreases ceaselessly, and the ratio of spectral lines, such as 1P10, 2P10, increases gradually as the optical axis moving from 11 mm to 15 mm. Moreover, the output spectra of HF laser compete intensely in self and different bands, and cascade effect appears among them. All results extend the utility output spectrum range of HF laser, and make some long wave spectral lines output efficiently, which has an important guiding significance to research and application of the line selected techniques in HF laser.

Key words spectroscopy; hydrogen fluoride; chemical laser; output spectrum; gain characteristic

OCIS codes 300.6170; 140.1550; 070.4790; 310.6188

1 引 言

氟化氢(HF)化学激光器的出光物质为激发态 HF 分子, 其多振动/转动能级结构决定了输出激光的多谱线特征。理论上, HF 激光器输出激光波长在 $2.5 \sim 3.1 \mu\text{m}$ 范围, 中心波长靠近 $2.7 \mu\text{m}$ ^[1-3]。燃烧驱动型 HF 激光器主要采用冷抽运反应产生激活介质, 其输出光谱一般仅能观察到振动能级 2-1 和 1-0 的两个谱带, 且转动能级较低, 波长大于 $2.87 \mu\text{m}$ 谱线难以高效输出^[4-6]。邹前进等^[7]在研究激光器增益系数与光腔静温及上下能级粒子数关系中, 实测 HF 激光输出光谱包含 6 条谱线, 其中 5 条谱线波长小于 $2.87 \mu\text{m}$ 。于金标等^[8]在超音速氮稀释剂连续波 HF 化学激光器小信号增益测量中获得的 1P4、1P6 和 2P4~2P6 谱线波长均小于 $2.87 \mu\text{m}$ 。罗威等^[9]在电激励 HF 激光器输出光谱测量中多次观察到 HF 分子 3-2 振动能级的跃迁谱线, 但长波谱线所占比重较小。本文通过优化激光器结构参数和调整激光反应配方, 使传统 HF 激光输出光谱向长波转移, 并通过实验和理论分析对 HF 激光器输出的各支谱线增益特性进行研究和讨论。

收稿日期: 2016-11-15; 收到修改稿日期: 2016-12-28

作者简介: 王 杰(1982—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事化学激光器方面的研究。E-mail: wangjie_24@163.com

2 HF 激光光谱

为实现对 HF 激光器输出谱线和增益特性的研究,在某小型燃烧驱动连续波 HF 激光器上开展了相关实验。图 1 是实验中 HF 激光器光学谐振腔及测试光路示意图。光学谐振腔采用单通平凹稳定腔,输出耦合率为 3%。激光器输出的强激光经 45°全反镜后进入全吸收功率计。光谱仪测量 45°全反镜上强激光散射而获得光谱。实验中使用的光谱仪为 D&P 公司的傅里叶光谱仪,实验前用 3039 nm 标准光源进行标定。

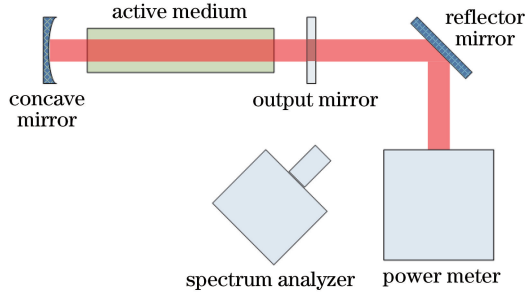


图 1 光学谐振腔及测试光路示意图

Fig. 1 Schematic of optical resonator and testing optical path

图 2 为传统 HF 激光器实测光谱。所谓传统 HF 激光器,特指采用 $\text{NF}_3\text{-D}_2\text{-H}_2$ 反应体系,全 He 稀释剂配方。由图 2 可知, HF 激光器输出光谱主要包含 6 条谱线,其中 1P5、1P6、1P7、2P5 和 2P6 谱线波长小于 $2.87\ \mu\text{m}$, 2P7 谱线波长为 $2.8706\ \mu\text{m}$,其输出光谱与邹前进等^[7]实验测试光谱相同。

基于传统经典 HF 激光器反应体系配方,采用某特殊方法提高燃烧室绝热反应总温和光腔静温,并优化激光器增益发生器结构参数,实现 HF 激光器输出谱线向长波转移。图 3 为新结构和配方条件下 HF 激光实测光谱。由图 3 可知,相比于传统经典 HF 激光光谱,输出谱线向长波方向“平移”了约 $0.18\ \mu\text{m}$,波长大于 $2.87\ \mu\text{m}$ 的 2P8、2P9、2P10 谱线高效输出,并获得了 HF 分子 3-2 振动能级跃迁的 3P8 谱线。实验和理论分析表明,3P8 谱线的产生可能主要是 F 原子复合和热抽运反应^[9]共同作用的结果。

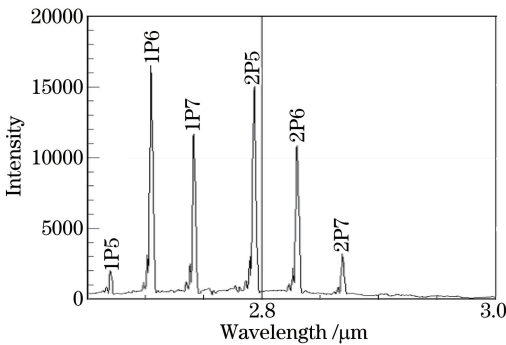


图 2 HF 激光器实测光谱

Fig. 2 Actual measuring spectrum of HF laser

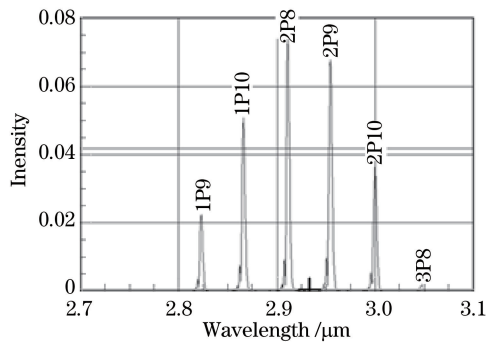


图 3 HF 激光器主要光谱

Fig. 3 Main measuring spectrum of HF laser

3 谱线分布及特性

图 4 是光轴 13 mm 条件下,1 s 出光过程中 HF 激光输出谱线相对强度分布图。图 4 中横坐标的采样点数表示光谱仪采样频率,纵坐标是由各支谱线峰值强度计算获得的比例权重。由图 4 可知, HF 激光输出的 6 条谱线所占比重存在一定的起伏变化,3-2 振动能级跃迁的 3P8 谱线所占比重(约 0.9%)相对稳定,2-1 振动能级跃迁的 2P8、2P9 和 2P10 谱线所占比重由 68.2%增至 72.2%,1-0 振动能级跃迁的 1P9 和 1P10 谱线所占比重由 30.7%降至 26.8%,表明 HF 激光各能级之间(谱带间)谱线存在竞争。同时,对于同一能级的 1P9 和 1P10 谱线,1P9 谱线所占比重由 10.7%降至 5.2%,1P10 谱线所占比重由 20.0%增至 21.6%,即 HF 激光同一能级(谱带内)的各支谱线也存在竞争。

为进一步研究 HF 激光输出谱线分布特性,在反应配比不变的前提下将光轴沿气流方向前移至 11 mm,

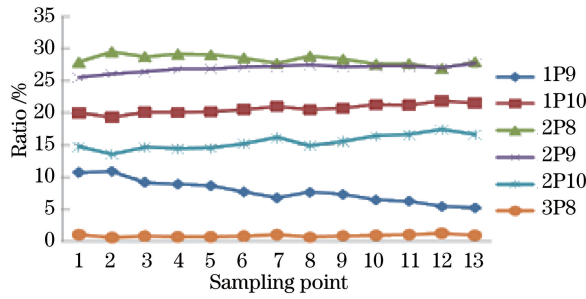


图 4 HF 激光谱线相对强度分布

Fig. 4 Relative intensity distribution of spectral lines in HF laser

激光器输出谱线及相对强度分布如图 5 所示。与光轴 13 mm 时激光输出谱线相比,3-2 振动能级跃迁的 3P8 谱线消失,2-1 振动能级跃迁的 2P7 谱线产生,表明光轴在 11 mm 时 3P8 谱线增益小于损耗,而 2P7 谱线损耗小于增益。同时,在 1 s 出光中,1P9 和 2P8 谱线所占比重减小,1P10 和 2P9 谱线所占比重增加,这既是 HF 激光输出谱线谱带间和谱带内竞争的结果,也是输出谱线级联效应^[10](1P9 和 2P8、1P10 和 2P9 为两组相互级联谱线)的体现。

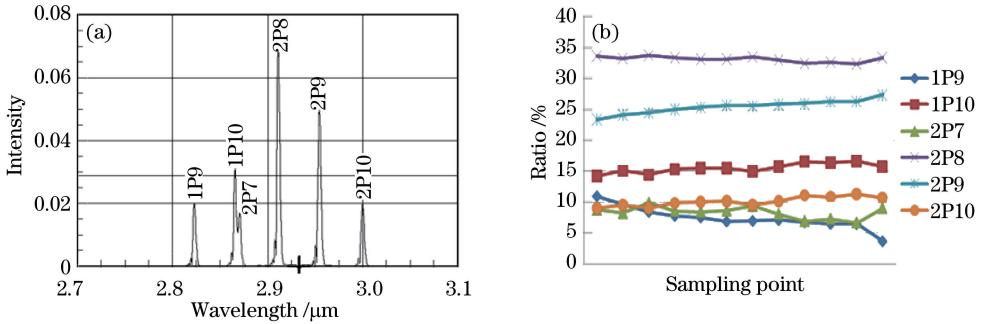


图 5 光轴 11 mm 时 HF 激光(a)实测光谱和(b)各支谱线强度分布

Fig. 5 (a) Actual measuring spectrum and (b) intensity distribution of each spectral line in HF laser with optical axis at 11 mm

图 6 是光轴 15 mm 条件下 HF 激光输出谱线及相对强度分布图。对比图 5 可知,光轴移至 15 mm 后, HF 激光输出谱线中 2P7 谱线消失,3P8 谱线再次出现。由各支谱线强度分布可知, HF 分子 3-2 能级跃迁的 3P8 谱线所占比重相对稳定(不存在其他谱线竞争),1P9 谱线所占比重由 8.8% 降至 4.9%,2P10 谱线所占比重由 17.7% 增至 19.1%。

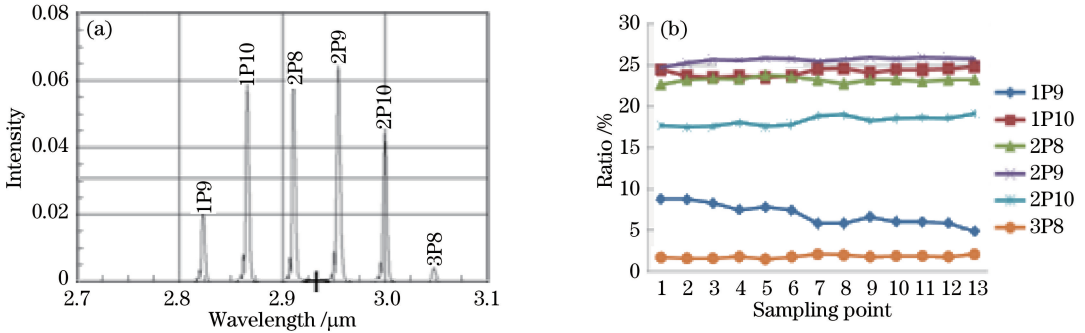


图 6 光轴 15 mm 时 HF 激光(a)实测光谱和(b)各支谱线强度分布

Fig. 6 (a) Actual measuring spectrum and (b) intensity distribution of each spectral line in HF laser with optical axis at 15 mm

图 7 是不同光轴位置 HF 激光输出的各支谱线所占比重分布图。随着光轴由 11 mm 移至 15 mm, 1P10 和 2P10 谱线所占比重逐渐增加,2P8 谱线所占比重不断减小,2P9 谱线所占比重先增加后减小,2P7 谱

线从有到无,3P8 谱线从无到有,表明 HF 激光各支谱线的高效输出与光轴位置相关,各支谱线增益沿气流方向分布不同。根据 HF 激光快速驰豫理论,输出光谱及分布在一定程度上反映了增益介质的温度属性^[1,5]。HF 激光增益介质由含氟原子主气流和燃料副气流在光腔中的快速混合激射反应产生,随着混合激射过程的进行,光腔温度沿气流方向是变化的。因此,对 HF 激光器而言,某支谱线的最大输出功率存在最佳光轴位置和光腔静温。

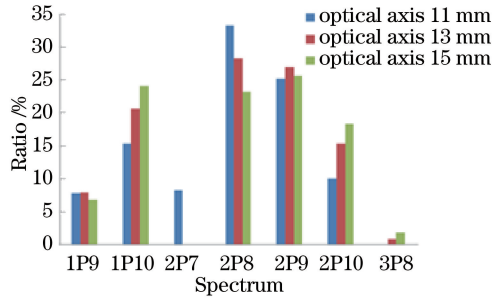


图 7 不同光轴位置 HF 激光各支谱线所占比例

Fig. 7 Spectrum proportion of HF laser spectral lines at different optical axis positions

4 增益特性及分析

将 HF 激光输出功率乘以各支谱线所占比重,并进行无量纲处理即可获得各支谱线相对增益系数与分布。图 8 是 HF 激光输出的各支谱线增益沿气流方向分布曲线。由图 8 可知,沿气流方向远离喷管列阵出口平面的有效增益区内,1P10、2P10 和 3P8 谱线相对增益系数增大,2P7 和 2P8 谱线相对增益系数减小,1P9 和 2P9 谱线相对增益系数先增大后减小。在现有增益发生器结构参数和反应体系配方条件下,HF 激光输出光谱中的 2P8 和 2P9 谱线增益较强。

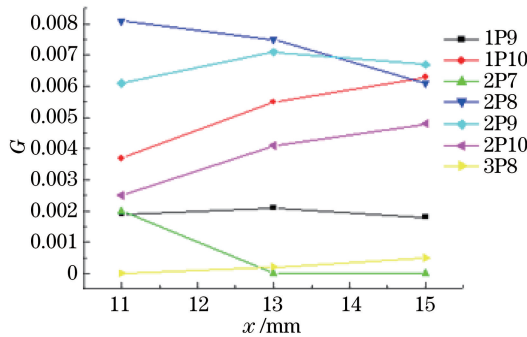


图 8 HF 激光各支谱线增益沿气流方向分布

Fig. 8 Gain distribution along airstream of HF laser spectral lines

对于 HF 化学激光器而言,光腔中存在高超音速气流的快速混合激射反应过程,一方面,随着超音速含氟原子主气流与副燃料氢气射流的混合,反应逐渐增强,混合初始反应相对较弱,反应放热少,增益较小;越往下游,混合越充分,反应变得剧烈,反应放热多,增益显著增大;进一步往下游,反应变弱,去激活效应开始显现,增益大幅减小。光腔中的整个混合激射过程伴随着气流的温升效应。另一方面,从喷管列阵喷出的高超音速氧化剂气流具有高总温、低静温特点,随着混合反应过程的进行,气流马赫数减小,流速降低,静温逐渐恢复升高。实验及光谱测量结果表明,对于某一固定的 HF 化学激光器,要获得高转动态跃迁的 HF 激光谱线,需要将光轴适当下移,同时通过调节激光反应配方来提高腔温,虽然激光器总的输出功率降低,但更有利于某些长波谱线的高效输出。

5 结 论

通过优化增益发生器结构参数和调整激光反应体系配方,HF 激光输出谱线向长波“平移”约 0.18 μm ,

波长大于 $2.87\ \mu\text{m}$ 的 2P8、2P9、2P10 谱线高效输出。随着光轴由 11 mm 移至 15 mm, 2P8 谱线所占比重不断减小, 1P10、2P10 等谱线所占比重逐渐增加。HF 激光器输出谱线存在激烈的谱带内竞争和各谱带间竞争, 且在竞争中呈现出一定的级联效应。在现有增益发生器结构参数和反应体系配方条件下, HF 激光输出光谱中的 2P8 和 2P9 谱线增益较强。研究结果拓宽了燃烧驱动型 HF 激光实用输出光谱范围, 对 HF 激光选线技术研究及应用具有重要的指导意义。

参 考 文 献

- [1] Gross R W F, Bott J F. Handbook of chemical laser[M]. Beijing: Science Press, 1987.
格罗斯, 博特. 化学激光手册[M]. 北京: 科学出版社, 1987.
- [2] Manke G C, Hager G D. A review of recent experiments and calculations relevant to the kinetics of the HF laser[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2001, 30(3): 713-733.
- [3] Cao Bailing, Wu Chengjiu, Rao Ruizhong, *et al.* Atmospheric attenuation of the HF and DF laser radiation[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2003, 15(1): 17-20.
曹百灵, 邬承就, 饶瑞中, 等. HF/DF 激光传输的大气衰减特性[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(1): 17-20.
- [4] Zou Qianjin. The measurement and application analysis of time-space distribution for continuous wave HF/DF chemical laser spectrum[D]. Changsha: Graduate School of National University of Defense Technology, 2011.
邹前进. 连续波 HF/DF 化学激光器光谱时间空间分布测量及应用分析[D]. 长沙: 国防科学技术大学研究生院, 2011.
- [5] Wang Hongyan, Yuan Shengfu, 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.
- [6] Rawlins W, Oakes D, Mulhall P, *et al.* Advanced optical diagnostics for HF laser development[C]. AIAA, 2002.
- [7] Zou Qianjin, Yuan Shengfu, Luo Wei, *et al.* Application of spectrum measurements in working status diagnosis of chemical lasers[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2011, 48(9): 091401.
邹前进, 袁圣付, 罗 威, 等. 光谱测量在化学激光器运转状态诊断中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2011, 48(9): 091401.
- [8] Yu Jinbiao, Chen Xing, Wang Hongyan, *et al.* Small signal gain measurement for supersonic nitrogen diluted 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.
- [9] Luo Wei, Yuan Shengfu, Zou Qianjin, *et al.* Kinetics of the spectral lines of high vibration state in DF/HF lasers[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2012, 31(3): 239-242.
罗 威, 袁圣付, 邹前进, 等. DF/HF 化学激光器高振动态基频谱线机理分析[J]. 红外与毫米波学报, 2012, 31(3): 239-242.
- [10] Sentman L, Cassibry J, Wootton B, *et al.* CW HF laser line selected performance[C]. AIAA, 1999.