

DF/HF 化学激光器高振动态基频谱线机理分析

罗威, 袁圣付, 邹前进, 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:在采用冷泵浦反应体系的 DF/HF 化学激光器中多次观察到了 DF 分子 4-3 振动能级跃迁的谱线以及 HF 分子 3-2 振动能级跃迁的谱线. 给出了几幅典型的光谱图, 并理论计算了高振动态基频谱线的增益曲线. 实验和理论分析显示, 上述高振动态基频谱线并非直接产生于冷泵浦反应, F 原子复合和热泵浦反应起到了重要作用. 最后讨论了热泵浦反应和链泵浦反应对采用冷泵浦反应 DF/HF 激光器输出光谱、增益及增益区长度的影响.

关键词:化学激光器; 光谱分析; 冷泵浦反应; 热泵浦反应; 链泵浦反应

中图分类号:TN248.5 **文献标识码:**A

Kinetics of the spectral lines of high vibration state in DF/HF Lasers

LUO Wei, YUAN Sheng-Fu, ZOU Qian-Jin, LU Qi-Sheng
(College of Opto-electronic Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Unusual spectral lines of the 4-3 vibration state transitions of DF molecules and the 3-2 vibration state transitions of HF molecules have been observed in the DF/HF lasers operated with cold pumping reaction. Several typical spectrums were given, and the gain coefficients of these fundamental spectral lines of the high vibration state were calculated. Experimental results and theoretical calculations have shown that the kinetics process of these lines can not be explained by the cold pumping reaction only. The fluorine atom recombination and hot pumping reaction subsequently may be the main factors. The influences of hot pumping reaction and chain pumping reaction on the emission spectrum, gain and gain zone length of DF/HF lasers operated with the cold pumping reaction were discussed.

Key words: chemical laser; spectral analysis; cold pumping reaction; hot pumping reaction; chain pumping reaction

PACS: 42.55. Ks, 42.72. Ai, 33.20. Ea

引言

经过四十多年的发展, DF/HF 化学激光器理论和技术上渐趋成熟, 目前仍然是输出功率最高的激光, 也是具有广泛应用前景的中红外光源. DF/HF 激光的多谱线输出与激光器内的动力学过程关系密切, 输出光谱测量是激光器诊断的重要手段. 在采用冷泵浦反应的连续波 DF/HF 激光器中, 一般而言, 在 DF 激光器中仅能观察到振动能级 3-2、2-1 和 1-0 跃迁的 3 个输出谱带, 在 HF 激光器则仅能观察到振动能级 2-1 和 1-0 跃迁的两个谱带. 然而在对我国研制的电激励 DF/HF 激光器进行输出光谱测量时, 却多次观察到了 DF 分子 4-3 振动能级跃迁的谱

线以及 HF 分子 3-2 振动能级跃迁的谱线. 虽然这个现象很少出现, 但在之前的文献中也曾分别观察到 DF 激光的 4-3 跃迁谱线^[1]以及 HF 激光的 3-2 跃迁谱线^[2-3]. 对于谱线的产生机理, 一般认为是冷泵浦反应体系在特殊条件下产生的, 如文献[2]认为仅在非常靠近 D₂/H₂ 注入孔的位置才能观察到这个现象. 本文给出了含有高振动态基频谱线的典型光谱测量结果, 理论分析和实验结果显示仅利用冷泵浦反应相关理论不能解释这些谱线的产生机理, 经分析认为 F 原子复合和热泵浦反应是这些谱线形成激射的主要原因, 并指出适量的热泵浦反应和链泵浦反应有可能会提高采用冷泵浦反应 DF/HF 化学激光器的输出性能. 目前 DF/HF 化学激光器领域

收稿日期: 2011-04-20, 修回日期: 2012-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(10974255)

Foundation item: Supported by the National Natural Science Foundation of China(10974255)

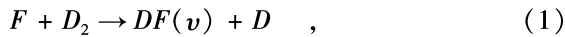
作者简介: 罗威(1985-), 男, 湖北随州人, 博士研究生, 主要研究领域为化学激光器、高能激光技术. E-mail: luowei8786@163.com.

Received date: 2011-04-20, revised date: 2012-02-20

的主要研究方向为通过技术手段进一步提高激光器的效率和输出功率,如对喷管、燃烧室等的研究,本文则从反应动力学角度对此问题进行了探讨.

1 理论分析

DF/HF 激光器有链式和非链式两类泵浦方式,非链式中包括热泵浦和冷泵浦两种泵浦方式,大部分激光器中采用冷泵浦反应,反应式如下^[2]:



冷泵浦反应中,DF 分子最高到 $\nu = 4$ 振动态, $\nu = 0 \sim 4$ 的 DF 分子分布比例为 0:0.1:0.35:1.2:0.7^[4];HF 分子最高到 $\nu = 3$ 振动态, $\nu = 0 \sim 3$ 的 HF 分子分布比例为 0.00:0.15:0.55:0.30^[5].

冷泵浦反应刚完成时,DF 分子除 $\nu = 4 \rightarrow \nu = 3$ 之外、HF 分子除 $\nu = 3 \rightarrow \nu = 2$ 之外的振动能级都处于完全反转状态,此时 DF/HF 分子的能量将以极快速度重新分布,通过能量交换过程 ($V \rightarrow V, R \rightarrow R, T \rightarrow T, R \rightarrow T$) 进入部分反转状态,此过程的特征时间约为 $10^{-10} \sim 10^{-8} \text{ s}$ ^[6]. 大部分 DF/HF 激光器中采用冷泵浦反应,并工作在部分反转状态,由于高振动能级的弛豫速率更快,故在 DF/HF 激光器中一般不会出现 DF 分子 4-3 振动能级跃迁的谱线以及 HF 分子 3-2 振动能级跃迁的谱线. 但若在冷泵浦反应刚完成时提取增益形成激射,就有可能产生高振动态基频 DF/HF 谱线,这时还可以观察到 R 支谱线的自发辐射^[7],甚至形成激光出射^[8]. 但由于增益区长度极短(微米量级),仅能在超音速喷管出口处才能观察到粒子数全反转^[2],高振动态基频 DF/HF 谱线也很难形成激射.

2 DF/HF 激光光谱

在对我们自研的一系列电激励连续波 DF/HF 化学激光器进行输出光谱测量时,多次观察到了高振动态基频谱线,这一系列激光器均采用高压直流辉光放电电离含氟气体产生氟原子, D_2/H_2 从喷管中注入与 F 原子发生冷泵浦反应,产生 DF/HF 激光器增益介质,并利用稳定腔提取增益形成激射,激光器有超音速或亚音速、单模块或多模块等多种运行方式.

图 1 为 DF 激光器在不同光轴处的输出光谱, ω 表示波数, I 表示谱线强度. 光轴分别位于 D_2 注入孔下游 1.6 mm 和 3 mm 处,在 3 mm 光轴处激光器输出功率最大. 在 1.6 mm 光轴处出现了 DF 激光的

4P5 和 4P6 两支高振动态基频谱线,在 3 mm 光轴处则有 4P6、4P7、4P8 三支高振动态基频谱线. 光谱测量仪器为德国 Bruker 公司 Tensor37 型 FTIR 遥测光谱仪,对激光打在磨砂铝板上的漫反射光进行测量.

图 2 为 HF 激光器在不同光轴处的输出光谱,光轴分别位于 H_2 注入孔下游 1 mm 和 2.5 mm 处,在 2.5 mm 光轴处激光器输出功率最大. 在 1 mm 光轴处没有出现高振动态基频谱线,在 2.5 mm 光轴处则有 3P3、3P4、3P5 三支高振动态基频谱线. 测量仪器为赛凡光电仪器有限公司生产的 7ISW501 型三光栅单色仪(BEIJING 7-STAR OPTICAL INSTRUMENTS CO),激光经过衰减后直接导入单色仪. 图 2 (b) 中 1P4、1P5、1P6、1P7、2P5 几支谱线的高度基本相同,是因为激光衰减比率不够,导致扫描到上述几支谱线时探测器饱和.

在多次输出光谱测量中,高振动态能级跃迁谱线并非每次都会出现,其出现与否与输出功率、光轴、气流介质组成等均有关. 分析多次光谱测试的结

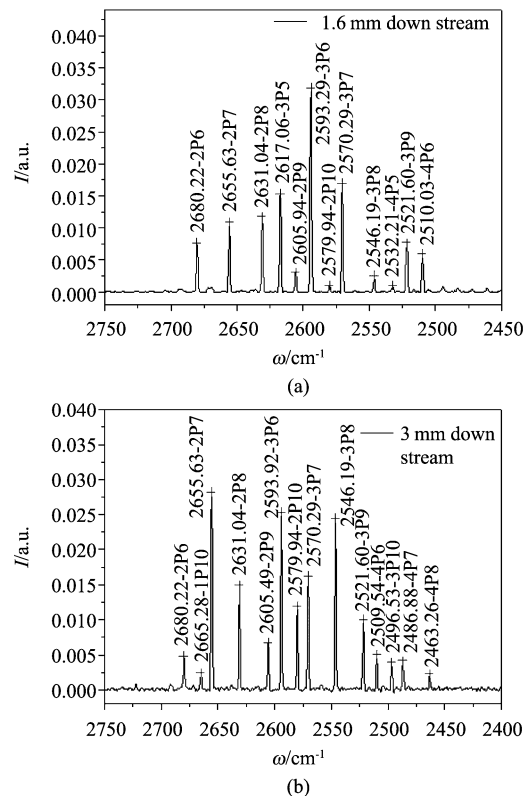


图 1 DF 激光器在不同光轴位置处的输出光谱 (a) 光轴位于 D_2 注入孔下游 1.6 mm 处, (b) 光轴位于 D_2 注入孔下游 3 mm 处

Fig. 1 Emission spectrum of a DF laser on different optical axes, (a) 1.6 mm downstream from D_2 injection orifices, (b) 3 mm downstream from D_2 injection orifices

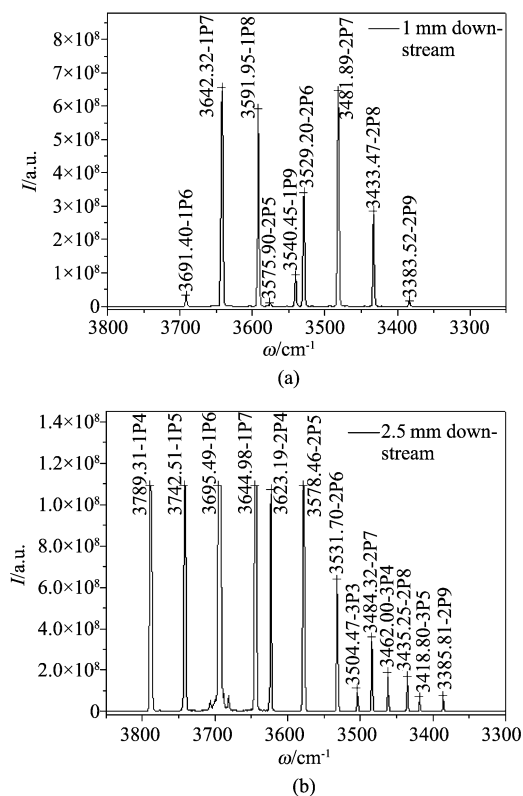


图2 HF 激光器在不同光轴位置处的输出光谱(a)光轴位于 H_2 注入孔下游 1 mm 处,(b)光轴位于 H_2 注入孔下游 3 mm 处

Fig.2 Emission spectrum of a HF laser on different optical axes, (a) 1 mm downstream from H_2 injection orifices, (b) 2.5 mm downstream from H_2 injection orifices

果可以发现,高振动态基频谱线如果出现,则在激光器功率最大的光轴处谱线更多,强度更大,在更加靠近 D_2/H_2 注入孔的位置,高振动态基频谱线反而会减少或消失,这与第 1 节中的理论是不符合的。

3 高振动态基频谱线增益计算

本节通过增益系数计算,来论证由冷泵浦反应直接产生高振动态基频谱线的可能性.对于电激励连续波 HF/DF 化学激光器,谱线的增益系数可表示为^[2]

$$\alpha(v, J, m) = \frac{hcN_A}{4\pi} \left(\frac{W}{2N_A \pi kT} \right)^{1/2} B(v, J, m) (2J + 1) \times \left[\frac{n(v')}{Q_{rot}^{(v')}} \exp\left(-\frac{hc E_{v', J+m}}{kT}\right) - \frac{n(v)}{Q_{rot}^{(v)}} \exp\left(-\frac{hc E_{v, J}}{kT}\right) \right] \quad (3)$$

式中, v 和 J 分别为下能级的振动和转动量子数, v' 和 $J + m$ 分别为上能级的振动和转动量子数,对于 P

支跃迁,参数 $m = -1$, h 为普朗克常数, N_A 为阿伏加德诺常数, W 为增益介质分子质量, $B(v, J, m)$ 为爱因斯坦吸收系数, $n(v)$ 为振动能级 v 的摩尔浓度, $Q_{rot}^{(v)}$ 为转动配分函数, c 为光速, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度, $E_{v, J}$ 为态 v, J 的能量。

DF/HF 分子各振动态粒子数分布取冷泵浦反应刚完成、快速弛豫过程发生之前的分布比例,即对于 DF 分子, $n(v=3):n(v=4) = 1.2:0.7$; 对于 HF 分子, $n(v=2):n(v=3) = 0.55:0.30$. 代入式(3)计算得到在光谱测量中出现的各支高振动态基频 DF/HF 谱线的增益系数曲线,分别如图 3 和图 4 所示.式(3)中其它各参数的值可参考文献[2],图 3 和图 4 中对增益系数进行了归一化处理。

由图 3 和图 4 可以看出,在电激励 DF/HF 激光器典型的光腔温度范围内(300 ~ 800 K),DF 分子 4P5 谱线和 HF 分子 3P3 谱线的增益系数都为负,其它谱线在较大温度范围为负.可见即使不考虑冷泵浦反应完成后极快的弛豫过程,仅依靠冷泵浦反

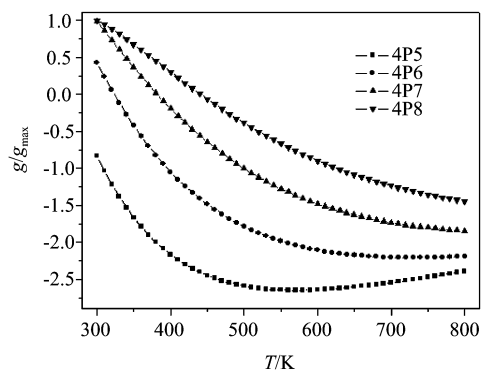


图3 DF 激光 4P5,4P6,4P7,4P8 谱线增益系数曲线
Fig.3 Gain coefficient curves of the 4P5, 4P6, 4P7, 4P8 lines of DF laser

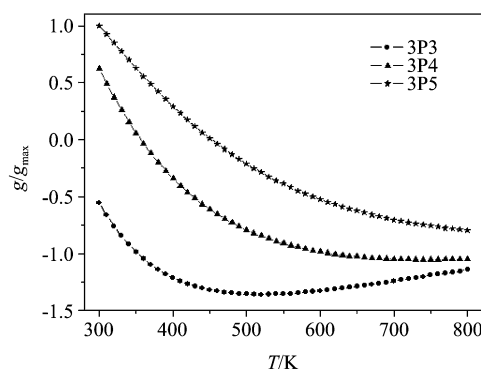
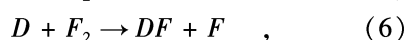
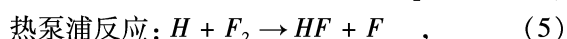
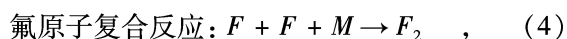


图4 HF 激光 3P3,3P4,3P5 谱线增益系数曲线
Fig.4 Gain coefficient curves of the 3P3, 3P4, 3P5 lines of HF laser

应是不会产生在图 1 和图 2 出现的 DF 分子 4P5 谱线和 HF 分子 3P3 谱线。

4 高振动态基频谱线机理分析

由上述实验测量和理论分析可看出,上述高振动态基频谱线,并非产生于冷泵浦反应和靠前的光轴位置,我们推测除冷泵浦反应外,如下动力学过程也起到了重要的作用^[2]:



其中 M 指壁面或其他粒子, F 原子来自于氟源气体放电解离, $D(H)$ 原子产生于冷泵浦反应, 即热泵浦反应在冷泵浦反应之后发生, 但受制于混合过程, 发生热泵浦反应和冷泵浦反应的区域是有很大一部分是混合在一起的. 热泵浦反应中, DF 分子最高到 $v=9$ 振动态, $v=0 \sim 9$ 的 DF 分子分布比例为 0:0.16:0.27:0.40:0.57:0.72:0.86:1:0.97:0.61^[9]; HF 分子最高到 $v=9$ 振动态, $v=0 \sim 9$ 的 HF 分子分布比例为 0.01:0.02:0.04:0.06:0.11:0.22:0.28:0.14:0.08:0.04^[5]. F 原子复合反应和热泵浦反应使冷泵浦反应减少, 即产生的低振动态 DF/HF 分子数减少, 同时又产生了很多高振动态 DF/HF 分子, 高振动态 DF/HF 分子在向低振动态弛豫时, 较大地改变了振动态粒子数的分布, 从而最终形成 DF 分子 4-3 振动能级跃迁谱线以及 HF 分子 3-2 振动能级跃迁谱线的出射. 这一过程与采用链泵浦反应体系的 DF/HF 激光器有些类似, 实际上在此类激光器中实现过更高振动能级基频谱线的激射^[10]. 此外, 作者在对激光器光腔流场中可见光荧光进行光谱分析时, 也曾观察到 HF 分子第六振动态的泛频自发辐射^[11]. 这些现象都证明了上述分析是十分合理的.

在所有采用冷泵浦反应体系的 DF/HF 激光器中, 基本上都避免不了发生氟原子复合反应和热泵浦反应, 然而高振动态基频谱线却很少出现, 这是因为氟原子复合比例较低时, 热泵浦反应产生的高振动态 DF/HF 分子也很少, 对总体振动态粒子数分布比例产生的影响较少, 或者说高振动态基频谱线的增益很低, 不足以起振并形成激光出射.

在我们自研的系列 DF/HF 激光器中较多次观察到了高振动态基频谱线, 这说明激光器中 F 原子复合比例较高, 经分析有两点原因: 一、气流温度相对较低. F 原子主要在喷管的收缩段发生复合, 高功

率 DF/HF 激光器中一般采用燃烧、电弧等方式解离出 F 原子, 燃烧室温度一般在 2000 K 左右, 而我们研制的 DF/HF 激光器特点是小型化、低功率、能长时间稳定运行, 因此选用高压直流辉光放电产生的冷等离子体来解离 F 原子, 放电管内温度不超过 1000 K, 低温有利于 F 原子复合. 二、壁面没有做过特殊处理. 激光器放电管出口处材料为不锈钢, 喷管的材料为黄铜并表面镀镍, 没有覆盖氟化物材料来减少 F 原子复合.

冷泵浦反应、热泵浦反应、链泵浦反应一般被作为三种独立的泵浦方式, 应用于不同的 DF/HF 激光器中. 本文研究结果显示, 在采用冷泵浦反应的 DF/HF 激光器中, 存在的少量比例的热泵浦反应及链泵浦反应. 当热泵浦反应及链泵浦反应的比例增加时, 激光器的输出性能将会发生变化, 具体来说: 一、激光器的输出功率将分布到更多的振动能级跃迁谱带上, 如增加 DF 激光的 4-3 跃迁谱带以及 HF 激光的 3-2 跃迁谱带; 二、 F 原子复合使冷泵浦反应产生的增益减少, 但热泵浦反应又提供了额外的增益; 三、热泵浦反应和冷泵浦反应可能有助于拉伸增益区的长度. 总而言之, 适量的热泵浦反应和链泵浦反应是有可能提高激光器输出性能的, 文献[10]也对这一可能性进行了讨论. 在输出功率高达 2.2 MW 的先进中红外化学激光器(MIRACL)的输出光谱中也包含了 DF 激光的 4-3 跃迁谱线^[1], 这可能是利用适量热泵浦反应和链泵浦反应来提高采用冷泵浦反应 DF 化学激光器的输出性能的一个例证.

5 结论

在采用冷泵浦反应体系的 DF/HF 化学激光器中多次观察到了 DF 分子 4-3 振动能级跃迁的谱线以及 HF 分子 3-2 振动能级跃迁的谱线. 实验和理论分析显示, 上述高振动态基频谱线并非直接产生于冷泵浦反应, 后续的 F 原子复合和热泵浦反应起到了重要作用, 它们共同改变了增益介质的振动态粒子数分布, 而且激光器中 F 原子复合的比例很高. 适量的热泵浦反应和链泵浦反应有可能会提高采用冷泵浦反应 DF/HF 化学激光器的输出性能.

REFERENCES

- [1] Frank T Kantrowitz. Vertical molecular absorption coefficient profiles and associated meteorological data at the high energy laser systems test facility for 20 august 1991 [C]. AD Report, 1992, A257 353, 1-27.

化趋势比较明显. 根据相位的变化情况可以计算出目标的横向尺寸约为 58 m.

4 结论

系统地研究了毫米波 InSAR 的运动目标成像、探测与定位问题, 并给出了计算机仿真和实际数据的处理结果. 实现了对低信噪比运动目标成像的同时完成目标探测并获取目标速度, 进一步利用干涉处理获取目标的高精度位置信息. 该方法在微弱运动目标成像探测、尺寸估计和航迹预测方面具有重要的应用价值.

REFERENCES

- [1] ZHANG Qun, Yeo T S. Three-Dimensional SAR Imaging of a Ground Moving Target Using the InSAR Technique[J]. *IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing*. 2004, **42**(9): 1818 - 1828.
- [2] WANG Gen-Yuan, XIA Xiang-Gen, Chen V C. Three-Dimensional ISAR Imaging of Maneuvering Targets Using Three Receivers [J]. *IEEE Trans. Imaging Processing*. 2001, **10**(3): 436 - 447.
- [3] GAO Zhao-Zhao, XING Meng-Dao, ZHANG Shou-Hong. 3D Image Reconstruction Using the InSAR Technique[J]. *Journal of Xidian University*(高昭昭, 邢孟道, 张守宏. 基于 InSAR 技术的三维成像. *西安电子科技大学学报*), 2008, **35**(5): 883 - 888.
- [4] TANG Li-Bo, LI Dao-Jing, HONG Wen, *et al.* Three-dimensional Imaging of Moving Ship with 3D Motion Based on Three Antennas InSAR; *EUSAR2006*[C], April 2006, Germany.
- [5] LI Dao-Jing, LIU Bo, YIN Jian-Feng, *et al.* Analysis and Design of Spaceborne MMW Radar for Space Debris Observation System[J]. *Journal of Astronautics*(李道京, 刘波, 尹建凤, 等. 天基毫米波空间碎片观测雷达系统分析与设计. *宇航学报*), 2010, **31**(12): 2746 - 2753.
- [6] Cumming I G, Wong F H. Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation[M]. Boston: Artech House Inc, 2005: 84 - 90.
- [7] Perry R P, Dipietro R C, Fante R L. SAR Imaging of Moving Targets[J]. *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*. 1999, **35**(1): 88 - 199.
- [8] YIN Jian-Feng. Research on the Method of SAR High-Speed Moving Target Detection and Imaging[D]. Beijing: Institute of Electronics, Chinese Academy of Sciences (尹建凤. SAR 高速运动目标检测与成像方法研究. 北京: 中国科学院电子学研究所), 2009.
- [9] XING Meng-Dao, BAO Zheng. Motion Parameter Estimation Based SAR Imaging[J]. *Acta Electronica Sinica*(邢孟道, 保铮. 基于运动参数估计的 SAR 成像. *电子学报*), 2001, **29**(12): 1824 - 1828.
- [10] YIN Jian-Feng, LI Dao-Jing, WU Yi-Rong. Space Targets Detection and Imaging Based on Spaceborne Millimeter-wave Radar[J]. *Journal of Astronautics*(尹建凤, 李道京, 吴一戎. 基于星载毫米波雷达的空间目标探测与成像. *宇航学报*), 2007, **28**(6): 1683 - 1688.
- [2] Gross R W F, Bott J F. Handbook of Chemical Laser[M]. Yin Houming, Xie Xingbin, Luo Jingyuan, Transl. Beijing: Science Press, 1987.
- [3] Davis S J, Rawlins W T, Oakes D B, *et al.* Dynamics of HF(v, j) chemiluminescence and lasing by infrared hyperspectral imaging[C]. *34th AIAA Plasmadynamics and Lasers Conference*, Orlando; AIAA, 2003, 1 - 7.
- [4] Basov N G, Bashkin A S, Igoshin V I, *et al.* *Chemical lasers*[M]. Berlin; Springer-Verlag, 1990.
- [5] Manke II G C, Hager G D. A Review of Recent Experiments and Calculations relevant to the kinetics of the HF Laser[C]. *33rd AIAA Plasmadynamics and Lasers conference*, Hawaii; AIAA, 2002, 1 - 10.
- [6] Kompa K L. *Chemical lasers*[M]. Berlin; Springer-Verlag, 1973.
- [7] Rowlins W T, Oakes D B, Mulhall P A, *et al.* Imaging spectroradiometer for HF laser studies[C]. *SPIE Proceedings, Gas and Chemical Lasers and Intense Beam Applications III*, San Jose: SPIE, 2002, 1 - 8.
- [8] Injeyan H, Wang H S. CW HF R-branch laser; U. S., 4598409[P]. July 1, 1986.
- [9] Kerber R L, Cohen N, Emanuel G. Kinetic Model and Computer Simulation for a pulsed DF-CO₂ Chemical Transfer Laser[J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1973, **9**(1): 94 - 113.
- [10] Detweiler G L, Sentman L H, Carroll D L, The Possibility of Hot Reaction Enhancement of CW HF Laser Performance [C]. *AIAA 36th Plasma Dynamics and Lasers Conference*, Toronto; AIAA, 2005, 1 - 14.
- [11] LUO Wei, YUAN Shengfu, YAN Baozhu, *et al.* Kinetics Analysis of the Chemiluminescence in Discharge Driven HF Chemical Lasers [J]. *Chin. Opt. Lett*, 2011, **9**(8): 081403.

(上接 242 页)