

# 放电引发非链式脉冲 HF 激光器输出光谱特性研究

朱峰\*, 黄珂, 李高鹏, 栾昆鹏, 黄超, 马连英, 沈炎龙, 易爱平

西北核技术研究所激光与物质相互作用国家重点实验室, 陕西 西安 710024

**摘要** 利用项目组研制的放电引发脉冲 HF 激光器, 测量并研究了激光输出光谱的特性。结果表明: 放电引发脉冲 HF 激光光谱的能量主要集中于  $\nu(3-2)$ ,  $\nu(2-1)$  以及  $\nu(1-0)$  三个振动跃迁辐射带, 在  $2.65\sim 3.05\ \mu\text{m}$  波长范围内测量得到了 13~16 条主要的输出谱线, 其中  $\nu(2-1)$  振动跃迁输出能量占比最大, 在 40%~50% 之间。适当改变充电电压和工作气体总压力可以调节各个振动带输出能量的比例:  $\nu_3$  振动能级输出能量的比例随着激光器充电电压的增加而增大, 随着工作气体总压力的升高而减小, 这与  $\nu_1$  振动能级的情况相反。

**关键词** 激光器; 中红外激光光源; HF 激光; 光谱特性

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.1114001

## Output Spectral Characteristics of Discharge Initiated Non-Chain Pulsed HF Laser

Zhu Feng\*, Huang Ke, Li Gaopeng, Luan Kunpeng, Huang Chao,  
Ma Lianying, Shen Yanlong, Yi Aiping

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology,  
Xi'an, Shaanxi 710024, China

**Abstract** The laser output spectral characteristics are measured and studied with the discharge initiated pulsed HF laser developed by our project team. The results show that the spectral energy of the discharge initiated pulsed HF laser is mainly concentrated in three vibrational transition bands of  $\nu(3-2)$ ,  $\nu(2-1)$  and  $\nu(1-0)$ . The 13-16 main output spectral lines are obtained by the measurements in the wavelength range of  $2.65\sim 3.05\ \mu\text{m}$ , in which the  $\nu(2-1)$  vibrational transition band has the highest output energy ratio, about 40%-50%. The output energy ratio in each vibrational transition band can be tuned via the suitable adjustment of charging voltage and total working gas pressure. The output energy ratio in the  $\nu_3$  vibrational transition band increases with the increase of laser charging voltage, but decreases with the increase of total working gas pressure, which is opposite to those for the  $\nu_1$  vibrational transition band.

**Key words** lasers; mid-infrared laser; HF laser; spectral characteristics

**OCIS codes** 140.3460; 140.4130

## 1 引 言

放电引发非链式脉冲 HF 激光器具有结构紧凑、运行安全可靠、可小型化等优点, 还具有较大的单脉冲能量和较好的光束质量, 是一类重要的中红外激光光源。以往的研究重点大都集中于提高激光器的出光能量和工作频率这两方面<sup>[1-5]</sup>。国内对于 HF 激光光谱的研究主要集中在对连续波激光器光谱的测量上, 如: 王红岩等<sup>[6]</sup>对电激励连续波 HF/DF 激光进行选线, 并研究了输出光轴对选线的影

响; 王杰等<sup>[7]</sup>研究了激光长波谱线的增益特性; 邹前进等<sup>[8-9]</sup>对放电激励连续波 HF/DF 激光光谱进行了测量和分析; 于金标等<sup>[10]</sup>对超音速氮稀释连续波 HF 化学激光器的光谱进行了研究, 并测量了低振动跃迁支的增益; 潘其坤等<sup>[11]</sup>测量了脉冲 DF 激光器的光谱特征。据目前所查资料看, 国内鲜有人针对脉冲放电引发模式下非链式 HF 激光器的输出光谱进行研究。鉴于此, 本文针对放电引发非链式脉冲 HF 激光器开展激光光谱测量方面研究, 获得了激光器工作条件对激光输出光谱特性的影响规律。

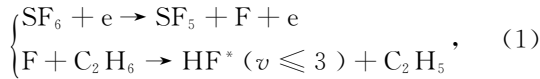
收稿日期: 2018-04-19; 修回日期: 2018-05-27; 录用日期: 2018-06-03

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1309)

\* E-mail: zhufeng@nint.ac.cn

## 2 基本原理和实验布局

放电引发非链式脉冲 HF 激光器一般将 SF<sub>6</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> 作为工作气体, 利用均匀辉光放电分解 SF<sub>6</sub> 产生化学反应所需的 F 原子, 发生的化学反应如下:



HF\*(*v*) 为反应生成的激发态 HF 分子, *v* 为分子的振动能级。分子在不同的振动能级之间跃迁, 形成 HF 激光谱线, 谱线增益可以表示为<sup>[1]</sup>

$$\alpha(v, j, m) = \frac{hN_A\omega\beta\rho}{4\pi} B(v, j, m)(2j+1) \times \left[ \frac{n(v+1)}{Q_{rot}^{v+1}} \exp\left(-\frac{hcE_{v+1, j+m}}{kT}\right) - \frac{n(v)}{Q_{rot}^v} \exp\left(-\frac{hcE_{v, j}}{kT}\right) \right], \quad (2)$$

式中: *h* 为普朗克常量; *N<sub>A</sub>* 为阿伏伽德罗常数;  $\omega$  为

波数;  $\beta$  为线型函数;  $\rho$  为气体密度; *B* 为爱因斯坦系数; *j* 为转动量子数; 对于脉冲 HF 激器, 参数 *m* 一般取 -1, 对应 *P* 支跃迁光谱。 *n* 为物质的量浓度;  $Q_{rot}^v$  为配分函数; *c* 为光速; *T* 为温度; *k* 为玻尔兹曼常数;  $E_{v, j}$  为 (*v, j*) 态的转动能。谱线的辐射强度与激发态粒子数分布、温度, 以及各个激发态的激发速率和弛豫速率有关。

为获得激光器输出光谱随着激光器工作条件的变化规律, 利用实验室自建的放电引发非链式脉冲 HF 激光器开展相关光谱测量的实验研究(激光器结构参考文献[12])。激光器采用紫外预电离的方式形成大面积体放电, 储能电容为 82.5 nF(7.5 nF × 11), 峰化电容为 48 nF, 增益区体积为 0.08 L。激光器谐振腔采用平凹腔, 腔长 68 cm, 输出耦合为 92%。工作气体采用 SF<sub>6</sub> 和 C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>。利用 Macken 光谱仪测量各个谱线的强度信息, 光谱测量实验布局如图 1 所示。

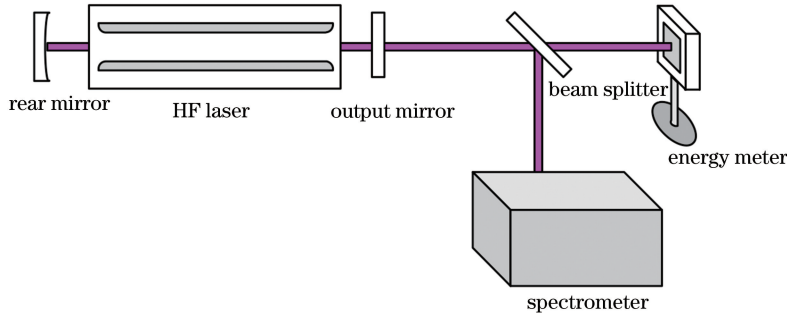


图 1 HF 激光器光谱测量实验布局

Fig. 1 Experimental layout of spectral measurement of HF laser

## 3 实验结果与讨论

图 2 给出了激光器在不同充电电压下的输出光谱(激光器工作气体总压力为 10 kPa), 实验观察到振动能级间 *v*(3-2)、*v*(2-1)、*v*(1-0) 的三组跃迁。从图 2 中可看出, 在激光器充电电压较低时测量得到了 13 支谱线, 在充电电压较高时测量得到了 16 条谱线。与文献[7, 13]中给出的连续波 HF 激光器光谱相比, 脉冲体制的非链式 HF 激光器光谱的谱线数量较多, 并且可以明显观察到高振动能态 *v*<sub>3</sub> 能级的长波谱线跃迁辐射。这主要是因为放电引发非链式脉冲 HF 激光器在 100 ns 量级的较短时间内完成了放电引发和激光出光过程, 在一定程度上减小了高激发态弛豫的影响, 有效地利用了化学反应生成的高激发态粒子数。

当充电电压为 21 kV 时, 在振动跃迁 *v*(3-2) 辐射带上只观察到 4 支谱线。随着充电电压提高,

*v*<sub>2</sub> 和 *v*<sub>3</sub> 振动能级输出光谱的支数增多: 当充电电压为 25 kV 时, *v*(3-2) 振动辐射带上的谱线由 4 支光谱增加到 5 支; 当充电电压为 29 kV 时, *v*(3-2) 振动辐射带上的谱线增至 6 支。随着充电电压由 21 kV 增加到 29 kV, *v*(2-1) 振动辐射带上的谱线由 5 支增加到 6 支。由不同充电电压下激光输出光谱的特征可以看出, 提高充电电压后, 高振动能级输出光谱支数增多。通过比较还可以看出, 随着充电电压提高, 在各振动跃迁谱带内, 最强辐射谱线的转动量子数有增大的趋势。

在上述实验结果的基础上进一步分析充电电压对各个振动跃迁谱带能量分布的影响, 计算不同充电电压下各个振动带激光输出能量的占比, 如图 3 所示。从图 3 中可以看出: 在实验条件下, 激光输出能量主要集中于振动跃迁 *v*(2-1) 辐射带上, 占比为 40% ~ 45%; 随着充电电压提高, 振动跃迁 *v*(1-0) 辐射带输出能量占输出总能量的比例逐渐

减小,由 21 kV 充电电压下的 31.7% 下降为 29 kV 充电电压下的 23.6%; 振动跃迁  $v(3-2)$  辐射带输出能量占输出总能量的比例逐渐增加,由 21 kV 充电电压下的 28.0% 提高到 29 kV 充电电压下的 34.7%; 振动跃迁  $v(2-1)$  辐射带输出能量在激光

器充电电压为 25 kV 时所占比最高,为 45.7%。

由以上实验结果可以看出,通过调节激光器的充电电压,可以改变放电引发非链式脉冲 HF 激光器的输出光谱,进而调节各个辐射带输出能量的比例。

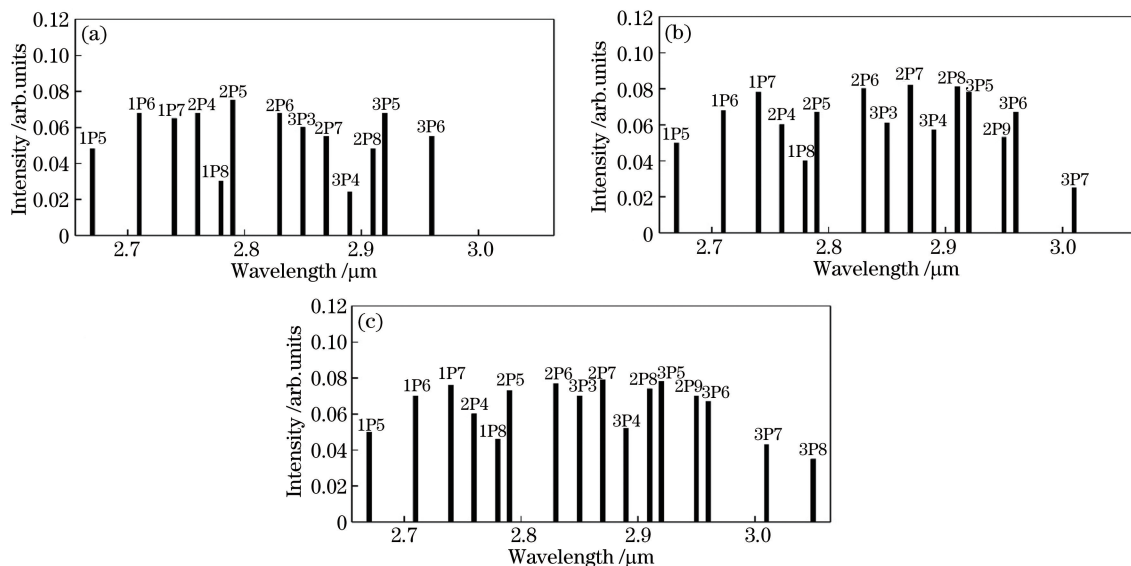


图 2 不同充电电压下 HF 激光器的输出光谱。(a) 21 kV; (b) 25 kV; (c) 29 kV

Fig. 2 Output spectra of HF laser at different charging voltages. (a) 21 kV; (b) 25 kV; (c) 29 kV

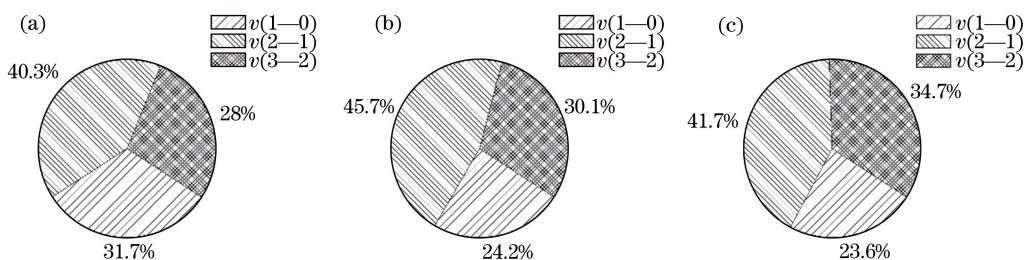


图 3 不同充电电压下各振动带的激光能量占比。(a) 21 kV; (b) 25 kV; (c) 29 kV

Fig. 3 Laser energy ratio in each vibration band at different charging voltages. (a) 21 kV; (b) 25 kV; (c) 29 kV

通过分析可知, HF 激光输出谱线强度与激发态分子的分布有关。当充电电压较低时, 激光器电极间的电场较弱, 自由电子在平均自由程内获得的能量较小, 部分电子达不到  $\text{SF}_6$  分子分解的阈值, 放电分解产生的 F 原子数量有限, F 原子与  $\text{C}_2\text{H}_6$  发生的化学反应较弱, 限制了 HF 分子向高振动能级的布居。随着充电电压增加, F 原子的产额增大, F 原子与  $\text{C}_2\text{H}_6$  发生的化学反应增强, 有利于激发态 HF 分子向高振动能级布居。同时, 随着充电电压增加, 放电沉积能量增大, 腔内温度升高, 各振动跃迁谱带内最强辐射谱线向高转动量子数转移。

以 2P8 谱线为例, 通过对上面测量得到的光谱进行进一步分析可以看出: 当激光器充电电压为 21 kV 时, 2P8 谱线占激光输出总能量的 6.6%; 当

充电电压为 25 kV 时, 占比达到 8.2%; 当充电电压为 29 kV 时, 占比达到 7.3%。由此可见, 由于受到激发速率、激发态分子带间竞争和带内竞争等多重因素的影响, 激光器充电电压不仅会影响各个振动带的激光能量分布, 还会影响到各条谱线在激光输出总能量中的占比。

图 4 给出了工作气体总压力对脉冲 HF 激光器输出光谱影响的实验结果 (激光器充电电压为 25 kV)。从光谱分布特征可以看出: 激光输出能量主要集中于振动跃迁  $v(2-1)$  辐射带, 测量得到了 6~7 支光谱; 随着激光器工作气体的总压力从 11 kPa 增大为 17 kPa,  $v(3-2)$  振动辐射带光谱强度减弱得最为明显, 谱线由 5 支减少为 4 支。从能量分布上分析, 在气体总压力为 11 kPa 的情况下,

振动带  $v(3-2)$  的能量占输出总能量的 31.0%，而振动带  $v(2-1)$  的能量占输出总能量的 44.8%，振动带  $v(1-0)$  的能量占输出总能量的 24.2%。当气体总压力升高至 14 kPa 时，振动带  $v(3-2)$  的能量占输出总能量的 28.7%，振动带  $v(2-1)$  的能量占输出总能量的 45.5%，振动带  $v(1-0)$  的能量占输

出总能量的 25.8%。当气体总压力升至 17 kPa 时，振动带  $v(3-2)$  的能量占输出总能量的 26.0%，而振动带  $v(2-1)$  和  $v(1-0)$  的能量分别占输出总能量的 45.8% 和 28.2%。随着气体总压力的升高， $v(3-2)$  振动带输出能量的占比逐渐减小，而  $v(1-0)$  振动带输出能量的占比则逐渐提高。

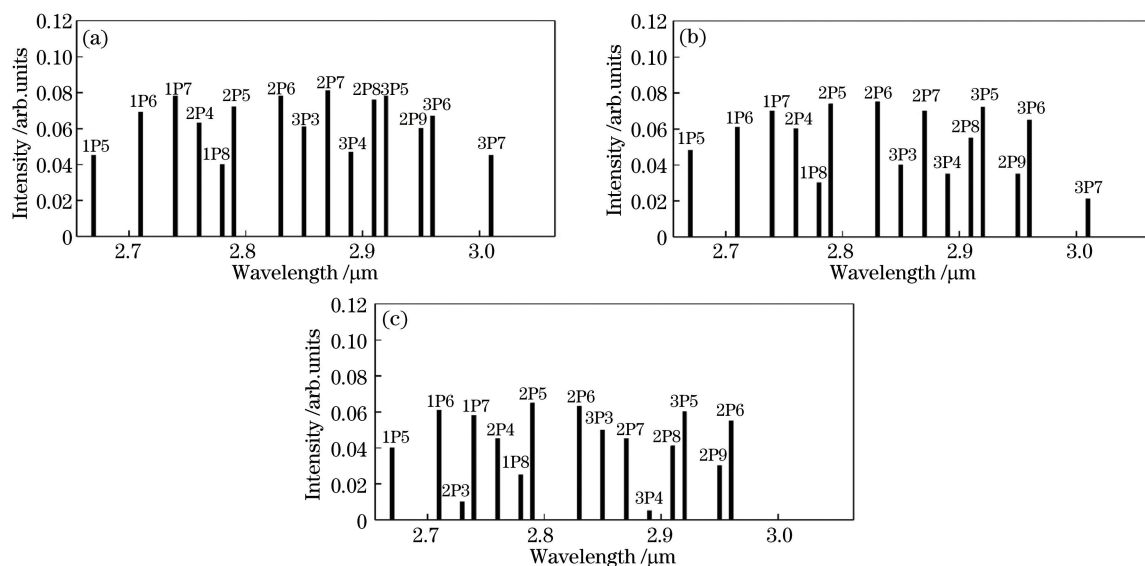


图 4 不同气体总压力下 HF 激光器的输出光谱。(a) 11 kPa; (b) 14 kPa; (c) 17 kPa

Fig. 4 Output spectra of HF laser at different total gas pressures. (a) 11 kPa; (b) 14 kPa; (c) 17 kPa

通过分析可知，随着气体总压力升高，虽然增益区内反应物的密度增加，可供反应的气体增多，但却缩短了电子的平均自由程，降低了自由电子的平均能量。同时， $\text{SF}_6$  分子的强电负性能也增加了低能电子的吸附率。一方面，电子数量和平均动能减少，降低了解离产生的 F 原子的产额，降低了高激发态 HF 的生成速率。另一方面，气体总压力的提高增大了高激发态 HF 分子向低激发态碰撞的弛豫速率。所以在实验条件范围内，随着激光器工作气体总压力提高，高振动激发态输出能量的占比减小，低振动激发态输出能量的占比增加。此外，随着气体总压力升高，气体密度增大，增益区内温升减小，同一振动支内最强辐射谱线向低转动量子数偏移。

从上述研究可以看出，通过改变激光器的工作条件，可以优化激光器输出谱线的结构，实现特定谱带或谱线输出能量比例的控制。由于 HF 激光器的级联跃迁特性，要想实现激光单一谱线的高效输出是比较困难的，但是通过对实验条件的优化可以在一定程度上提高某一谱线的输出强度。

HF 激光输出光谱处于水分子的吸收带内，空气中的水汽对激光能量有较大幅度的衰减，2.7  $\mu\text{m}$  波段的吸收较强，2.9  $\mu\text{m}$  以上波段的吸收较弱。利用

腔镜镀膜技术可以实现激光器部分谱带的输出，避开水分子的强吸收带，这可在一定程度上降低水吸收对激光脉冲能量的衰减。通过在谐振腔上镀 2.8  $\mu\text{m}$  以下波段的增透膜和 2.9  $\mu\text{m}$  以上波段的高反射膜，增加激光器短波波段谱线损耗，可以实现 HF 激光长波波段的输出，激光输出光谱如图 5 所示。从图 5 可以看出，2.8  $\mu\text{m}$  以下波段的谱线得到了很好的抑制。实际测量结果表明：全谱传输条件下激光脉冲传输 10 m 后的能量约下降 40%；抑制 2.8  $\mu\text{m}$  以下谱线后，激光脉冲传输 10 m 后的能量约下降 16%。可见，激光脉冲能量传输效率得到一定程度的改善。

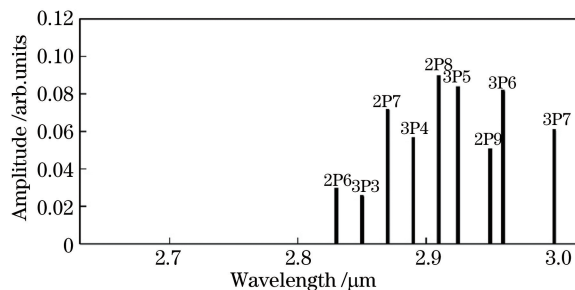


图 5 HF 激光器长波段输出光谱

Fig. 5 Output spectrum of HF laser at long-wavelength band



## 4 结 论

采用实验室研制的放电引发脉冲 HF 激光器测量了激光输出光谱的结构特征。测量结果表明,放电引发脉冲 HF 激光光谱的能量主要集中在振动跃迁 $v(3-2)$ 、 $v(2-1)$ 以及 $v(1-0)$ 三个辐射带,其中 $v(2-1)$ 振动能级的输出能量占比最大。在 $2.65\sim 3.05\ \mu\text{m}$ 波长范围内测量得到了 $13\sim 16$ 条主要的辐射谱线。在此基础上,进一步研究了充电电压、气体压力等因素对 HF 激光光谱结构的影响,获得了相应的规律:激光器充电电压和工作气体压力不仅会影响各振动能级间的输出能量分布,还会影响某一单支谱线输出能量占总能量的比例,以及最强谱线对应的转动量子数。适当改变充电电压和气体总压力可以调节各个振动带输出能量的比例。提高激光器充电电压,高振动能级 $v_3$ 输出能量增大;提高工作气体的总压力,输出能量向低振动能级偏移。受到腔内温度的影响,提高激光器充电电压后,同一振动辐射带内辐射最强谱线对应的转动量子数有增大的趋势;而提高工作气体的总压力,辐射最强谱线对应的转动量子数则会有所减少。

## 参 考 文 献

- [1] Gross R W F, Bott J F. Handbook of chemical laser [M]. Beijing: Science Press, 1987.
- [2] Lacour B, Gagnol C, Prigent P, *et al.* High-average-power HF/DF laser[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3574: 334-340.
- [3] Appollov V V, Belevtsev A A, Firsov K N, *et al.* Advanced studies on powerful wide-aperture non-chain HF (DF) laser with a self-sustained volume discharge to initiate chemical reaction [J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5120: 529-541.
- [4] Panchenko A N, Orlovskii V M, Tarasenko V F. Efficient non-chain discharge HF and DF lasers[J]. Proceedings of SPIE, 2004, 5483: 359-365.
- [5] Ke C J, Tan R Q, Wu J, *et al.* A new discharge type for non-chain pulsed HF/DF laser [J]. Laser Technology, 2008, 32(2): 119-121.  
柯常军, 谭荣清, 吴谨, 等. 非链式脉冲 HF/DF 激光的新型引发技术[J]. 激光技术, 2008, 32(2): 119-121.
- [6] Wang H Y, Yuan S F, Li Q, *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.
- [7] Wang J, Guo J Z, Li S H, *et al.* Study on gain characteristic of 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.
- [8] Zou Q J, Yuan S F, Luo W, *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.
- [9] Luo W, Yuan S F, Zou Q J, *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, 264.  
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, 264.
- [10] Yu J B, Chen X, Wang H Y, *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.
- [11] Pan Q K, Xie J J, Shao C L, *et al.* 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, 等. 非链式脉冲氟化氘激光器光谱特性 [J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0215001.
- [12] Yi A P, Liu J R, Tang Y, *et al.* Electrically initiated repetitive-pulsed non-chain HF laser[J]. Optics and Precision Engineering, 2011, 19(2): 360-366.  
易爱平, 刘晶儒, 唐影, 等. 电激励重复频率非链式 HF 激光器[J]. 光学精密工程, 2011, 19(2): 360-366.
- [13] Guo J Z, Wang J, Zhao H T, *et al.* Output spectrum of continuous wave hydrogen fluoride laser [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2018, 55(2): 021404.  
郭建增, 王杰, 赵海涛, 等. 连续波氟化氢激光输出光谱特性研究 [J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(2): 021404.