

# 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

孙 旭 袁圣付 罗 威 闫宝珠

(国防科技大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 开展了 HF/DF 激光器谐振腔内基态分子光吸收对其输出性能影响的实验研究, 测量并分析了从不同位置注入  $H_2/D_2$  时激光器的输出功率和光谱变化。结果表明: 振动基态 HF( $\nu=0$ )/DF( $\nu=0$ ) 分子通过单光子共振机制吸收 1P 支谱线, 通过双光子共振机制吸收 2P 支谱线; 振动-转动激射带间存在一定程度的级联跃迁效应; 在基态分子与激发态分子数量相当(1:1)的情况下, HF 激光器输出功率降低了 50% 左右, DF 激光器输出功率降低了 90% 左右; 利用传统的燃料组合研制燃烧驱动 HF-DF 双波段化学激光器是不可行的。

**关键词** 激光器; 氟化氢激光器; 氟化氘激光器; 光吸收; 双波段激光

**中图分类号** O. 433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0802004

## Influence of Photon Absorption of Ground State Molecules in Resonator Cavity of HF-DF Dual-Band Chemical on Laser Output Performance

Sun Xu Yuan Shengfu Luo Wei Yan Baozhu

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

**Abstract** Influence of photon absorption of ground state molecules in resonator cavity on HF-DF dual-band chemical laser output performance is investigated through experiments. Variations of spectra and output powers of HF laser and DF laser operated with different positions of  $H_2/D_2$  injection are measured and analyzed. The results show that the spectral lines of 1P (the P-branch transition between vibrational states of  $\nu=1 \rightarrow \nu=0$ ) are absorbed by the ground state molecules through the mechanism of single-photon resonance absorption. The spectral lines of 2P (the P-branch transition of  $\nu=2 \rightarrow \nu=1$ ) are absorbed by the ground state molecules through the mechanism of double-photon resonance absorption one by one. Cascading transition effect of lasing band between vibration-rotational states exists in some extent. Output power of HF laser decreases by approximately 50%, and output power of DF laser decreases by approximately 90% when the amount of ground state molecules and the amount of excited state molecules are equivalent. Traditional fuel compositions are not applicable for developing combustor-driven HF-DF dual-band chemical lasers.

**Key words** lasers; HF laser; DF laser; photon absorption; dual-band laser

**OCIS codes** 140.1550; 140.3460; 140.3515; 140.4130

## 1 引 言

随着红外焦平面器件和探测技术的快速发展<sup>[1-2]</sup>, 特别是基于可变间距法布里-珀罗(F-P)干涉型可变波长红外滤光片微阵列的引入<sup>[3]</sup>, 使得与之相应的定向红外光电对抗光源需要具有大功率、

宽波段等特性。美、俄等国都曾对 HF、DF、 $CO_2$ 、HCl、HBr 等多个复合波段激光器进行过专利申请<sup>[4-5]</sup>和相关研究<sup>[6-8]</sup>。基于双原子分子振动-转动跃迁激射的 HF/DF 激光器输出的 2~5  $\mu m$  的中红外波段激光, 具有光束质量好、输出功率大、谱线

**收稿日期**: 2012-12-30; **收到修改稿日期**: 2013-03-10

**基金项目**: 国家自然科学基金(10304025、10974255)

**作者简介**: 孙 旭(1987—), 男, 硕士研究生, 主要从事高能激光技术方面的研究。E-mail: gfkd\_sunsx@163.com

**导师简介**: 袁圣付(1975—), 男, 副教授, 硕士生导师, 主要从事高能激光及其应用技术等方面的研究。

E-mail: shengfuyuan\_bb@163.com(通信联系人)

数量多、波段范围宽等特点,能够对特定目标进行复合波段的干扰。因此,同一谐振腔输出的 HF-DF 双波段共光轴激光在远距离传输、激光红外对抗等领域有着广泛的应用前景。

燃烧驱动连续波 HF-DF 双波段化学激光器的典型实现途径之一是采用 DF 增益介质模块和 HF 增益介质模块的并列组合,再通过同一个谐振腔提取 HF-DF 双波段激光<sup>[8]</sup>。但燃烧驱动 HF/DF 激光器传统燃料组合为  $(\text{NF}_3 + \text{D}_2 + \text{He}) + (\text{H}_2 + \text{He}) / (\text{NF}_3 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{He}) + (\text{D}_2 + \text{He})$ , 在传统燃料体系下, HF 模块燃烧室中产生大量基态 DF( $\nu=0$ ) 分子, DF 模块燃烧室中产生大量基态 HF( $\nu=0$ ) 分子。这些基态 HF( $\nu=0$ )/DF( $\nu=0$ ) 分子进入到谐振腔后,会对腔内振荡的激发态 HF/DF 分子振动-转动跃迁产生的光子进行共振吸收,从而导致双波段激光器的输出能量特性下降。理论计算结果<sup>[8]</sup>表明:采用  $\text{NF}_3$  作为主氧化剂时,含 H 的主燃料( $\text{H}_2$ 、 $\text{C}_2\text{H}_4$  等)较不含 H 的主燃料(如  $\text{CO}$ 、 $\text{CS}_2$  等)对应

的双波段激光器输出能量下降 30%~40%,但谐振腔内基态分子光吸收的相关实验研究未见报道。

本文开展了 HF-DF 双波段激光器谐振腔内基态分子光吸收对激光器输出性能影响的实验研究,测量了激光器输出功率和光谱成分在基态分子光吸收前后的变化,主要解决两个问题:研究谐振腔内基态分子光吸收对化学激光器输出功率和光谱的影响;探明谐振腔内基态分子的光吸收机理,从而为燃烧驱动 HF-DF 双波段激光器的设计提供参考实验数据。

## 2 实验装置及测试方法

本实验所用装置是由一台电激励连续波中、远红外双波段激光器试验台改制而成的,该装置实物和详细结构描述见文献<sup>[9]</sup>。装置主体由一个吸收模块和一个增益模块组成,如图 1 所示,吸收模块内部副燃料氢气/氘气( $\text{H}_2/\text{D}_2$ )可以从 30、22、14、6、-2 mm 五个位置处的注气孔阵列独立注入,增益模块的  $\text{H}_2/\text{D}_2$  只能从 0 位置处的注气孔阵列注入。

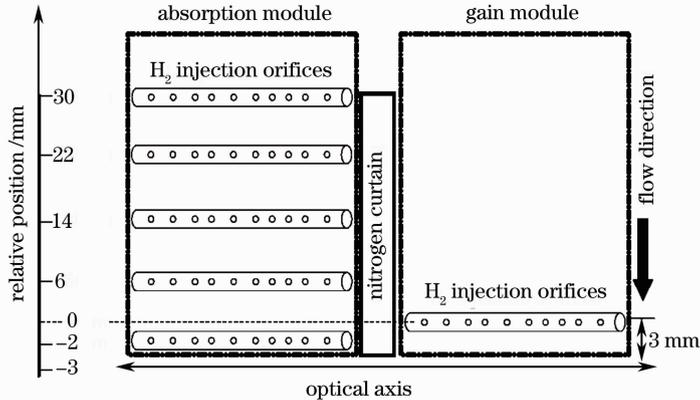


图 1 双模块实验装置副燃料注入位置示意图

Fig. 1 Positions of secondary fuel injection orifices in dual-module experimental equipment

由于实验所用电激励 DF/HF 激光器的激光区长度为 10 mm 左右<sup>[10]</sup>,因此,当吸收模块中的  $\text{H}_2/\text{D}_2$  在增益模块  $\text{H}_2/\text{D}_2$  注气孔上游 10 mm 以上位置的 30、22、14 mm 处注入时,吸收模块中抽运反应产生的振动激发态 HF( $\nu \geq 1$ )/DF( $\nu \geq 1$ ) 分子在到达增益模块的激光区域时,已经通过自发辐射等途径弛豫回到了基态,由于吸收模块和增益模块的气流由  $\text{N}_2$  气幕相互隔离,吸收模块中的振动基态分子对增益模块中的振动激发态分子不存在碰撞弛豫问题,但这些基态分子会对增益模块中激发态分子跃迁产生的振荡光子存在共振吸收,从而起到了“吸收模块”的作用。

为了确定改制实验装置的良好工作状态,采用

HF-DF 双波段腔镜元件进行了出光验证。全反镜尺寸  $\Phi 30 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ,曲率半径为 1 m,硅基底,镀金膜;输出镜为  $\Phi 40 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$  平面输出镜,镀制了 HF-DF 双波段膜层, HF 波段透射率  $T=6\% \sim 8\%$ , DF 波段透射率  $T=3\% \sim 5\%$ ;输出窗口为  $\Phi 35 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  氟化钙平面镜。光轴定于增益模块注气孔下游 -3 mm 处,增益模块的注气孔注入  $\text{D}_2$ ,吸收模块 -2 mm 位置的注气孔注入  $\text{H}_2$ ,两个模块的放电管中都注入  $\text{NF}_3$  和 He 混合气,获得了 9 W 的 HF-DF 双波段激光输出。需要说明的是,在实验装置的改制过程中,谐振腔全反镜不是采用  $\text{ThF}_4 + \text{ZnSe}/\text{CdTe}$  膜层体系<sup>[8]</sup>,因为  $\text{ThF}_4$  具有放射性,国内尚无此镀膜供应商。

HF 波段腔内光吸收实验的测试方法是:光轴定于增益模块的注气孔下游 $-3\text{ mm}$ 处,以相同的气体燃料流量和放电电压、电流参数启动两个模块的放电管,单独开启增益模块的副燃料  $\text{H}_2$  输出 HF 激光,测量得到吸收模块不注入副燃料  $\text{H}_2$  情况下的输出功率和光谱成分;然后保持各气体燃料流量不变,吸收模块分别从  $30, 22, 14, 6\text{ mm}$  位置注气孔注入相同流量的副燃料  $\text{H}_2$ ,测量增益模块和吸收模块同时工作情况下的输出功率和光谱。改变两个模块的气体燃料流量,在增益模块不同输出功率水平下,重复测量相应的输出功率和光谱成分变化。DF 波段腔内光吸收实验的测试方法与 HF 波段完全相同,只是把图 1 中注气孔注入的气体种类由  $\text{H}_2$  改为  $\text{D}_2$ 。

在测量仪器方面,采用北京物科光电技术有限公司 LP-3C 型功率计测量输出功率;采用余姚银环流量计生产的浮子流量计测量气体流量,其入口压力设置为  $3 \times 10^5\text{ Pa}$ ;采用德国 Bruker 公司的 Tensor37 红外遥测傅里叶变换红外 (FTIR) 光谱仪

对输出光谱成分进行测量,其标称指标为:波段为  $700 \sim 6500\text{ cm}^{-1}$ ,光谱分辨率为  $0.6\text{ cm}^{-1}$ ,波数精度为  $0.1\text{ cm}^{-1}$ ,关于该谱仪标定和评估的详细情况见文献[11]。

### 3 实验结果与分析

#### 3.1 实验结果

在放电管注入的  $\text{NF}_3$  和 He、副燃料  $\text{H}_2$ 、气幕  $\text{N}_2$  的流量分别为  $0.32, 1.2, 0.8, 1.0\text{ m}^3/\text{h}$ ,放电电压、电流分别为  $4\text{ kV}, 175\text{ mA}$  运行条件下,增益模块单独工作的输出 HF 激光功率为  $10.7\text{ W}$ ,对应的输出谱线如图 2(a)所示。在其他运行参数相同的条件下,当吸收模块在  $30, 22, 14, 6\text{ mm}$  位置处注入相同流量的  $\text{H}_2$  时,对应输出功率变为  $4.5, 4.6, 5.6, 8.5\text{ W}$ ,对应的光谱成分变化如图 2(b)~(d)所示。

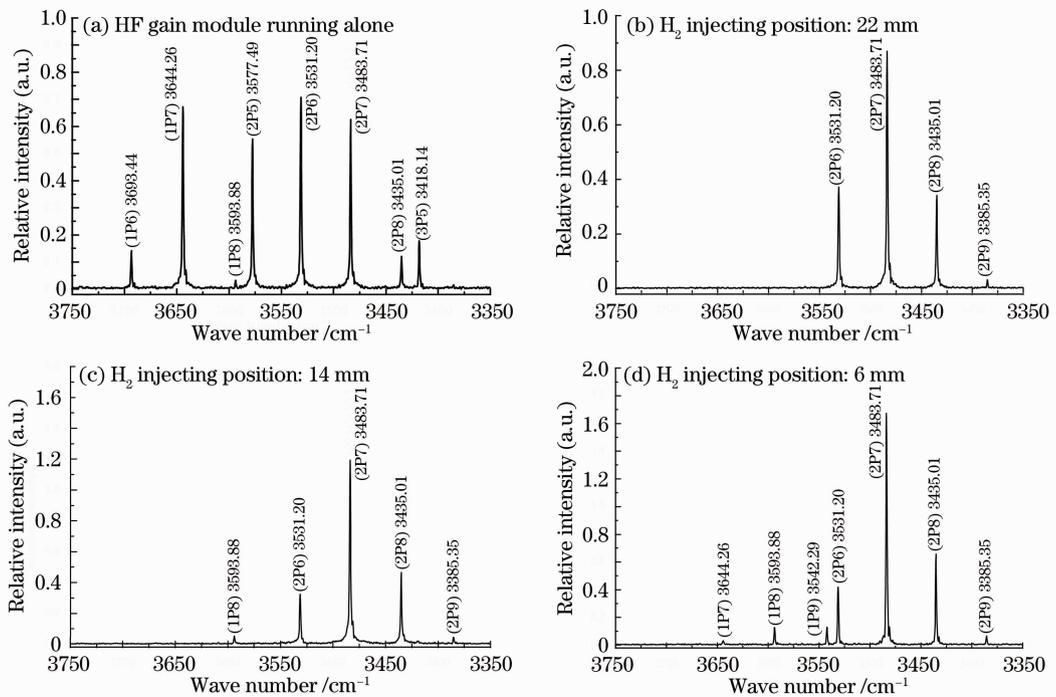


图 2 吸收模块在不同位置处注入  $\text{H}_2$  时 HF 激光器(增益模块)的输出光谱

Fig. 2 Spectra of HF laser (gain module) with different positions of  $\text{H}_2$  injection for absorption module

在放电管注入的  $\text{NF}_3$  和 He、副燃料  $\text{D}_2$ 、气幕  $\text{N}_2$  的流量分别为  $0.4, 1.0, 0.44, 1.0\text{ m}^3/\text{h}$ ,放电电压、电流分别在  $5.5\text{ kV}, 125\text{ mA}$  运行条件下,增益模块单独工作的输出 DF 激光功率为  $3.6\text{ W}$ ,对应的输出谱

线如图 3(a)所示。在其他运行参数相同的条件下,当吸收模块在  $30, 22, 14, 6\text{ mm}$  位置处注入相同流量的  $\text{D}_2$  时,对应输出功率变为  $0.3, 0.4, 0.65, 1.8\text{ W}$ ,对应的光谱成分变化如图 3(b)~(d)所示。

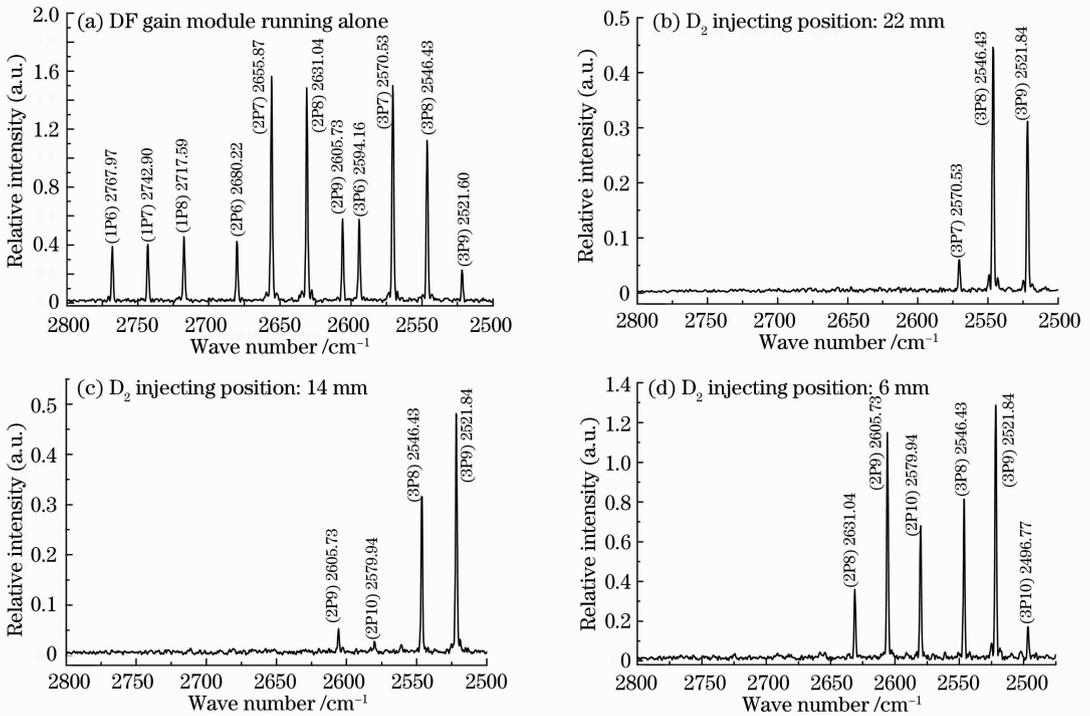


图3 吸收模块在不同位置处注入 D<sub>2</sub> 时 DF 激光器(增益模块)的输出光谱

Fig. 3 Spectra of DF laser (gain module) with different positions of H<sub>2</sub> injection for absorption module

需要说明的是:1) 由于 30 mm 注气位置测量得到的光谱成分与 22 mm 位置对应的的光谱成分完全相同,不再重复列出。2) 实验中还测量了吸收模块在 -2 mm 位置注气对应的光谱成分和输出功率大小,但相关结果及分析已偏离了本文光吸收的讨论范围,不再赘述。3) 在 DF 光谱测量过程中,由于 3.6 W 已能让光谱仪输出很强的信号,因此,没有进一步调高 DF 波段的输出功率。

调节气体燃料的流量设置和放电参数,改变增益模块独立工作时的输出功率,重复上述输出功率和光谱的测量过程。图 4 给出了不同初始 HF 激光功率、在不同位置注入 H<sub>2</sub> 对应的功率变化曲线,图 5 给出

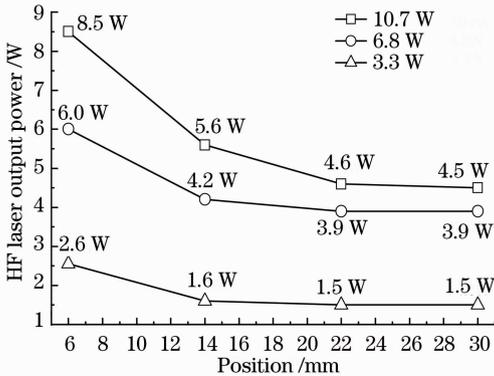


图4 不同位置注入 H<sub>2</sub> 对应的 HF 激光功率变化曲线  
Fig. 4 Variation of output power of HF laser operated with different positions of H<sub>2</sub> injection

了 3.6 W 初始功率、不同位置注入 D<sub>2</sub> 所对应的 DF 激光功率变化曲线。输出光谱成分与前面列出结果的变化规律基本相同,限于篇幅,不再给出。

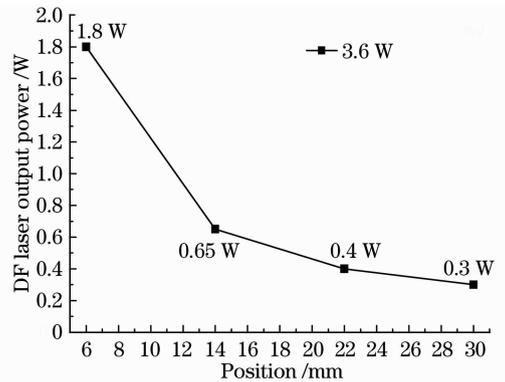


图5 不同位置注入 D<sub>2</sub> 对应的 DF 激光功率变化曲线  
Fig. 5 Variation of output power of DF laser operated with different positions of D<sub>2</sub> injection

### 3.2 结果分析

由图 2(a)和图 3(a)可知:电激励 HF 化学激光器增益模块单独工作时主要有 1P 支和 2P 支两个激射带,输出谱线为 1P6~8、2P5~8,共 7 支主要谱线;电激励 DF 化学激光器增益模块单独工作时有 1P 支、2P 支和 3P 支三个激射带,输出谱线为 1P6~8、2P6~9、3P6~9,共 11 支谱线,都属于典型的冷反应抽运体系的激射带谱线。

由图 2(b)和图 3(b)可知,当吸收模块在增益模

块副燃料注气孔上游足够远的位置注入  $H_2/D_2$  来产生基态 HF( $\nu=0$ )/DF( $\nu=0$ )时,增益模块产生的激发态分子跃迁激射的光子对吸收模块产生的基态( $\nu=0$ )分子进行了“光泵”,1P 支谱线完全被基态分子通过光子共振吸收而消失。图 3(b)对应的 DF 增益模块输出的 2P 激射带谱线也完全被 DF( $\nu=1$ )振动态上分子再通过共振吸收而消失,即 DF( $\nu=0$ )基态分子通过双光子共振吸收而使得 DF 激光的 1P 支和 2P 支谱线消失。

由图 2(b)~(d)和图 3(b)~(d)对比分析可知:DF 与 HF 腔内光吸收表现出大致相同的规律,随着吸收模块注气位置向下游移动,基态分子的共振吸收有所减弱,HF 激光逐渐输出了 1P 支谱线,DF 激光逐渐输出了 2P 支谱线;吸收模块注入副燃料  $H_2/D_2$  后,反应放出的热量会通过气体膨胀间接导致增益模块内介质气体的静温有所升高,使得各激射带的最强谱线向高转动量子数  $J$  移动,且注入位置越接近光轴,随  $J$  移动效应越明显。对于 HF 来讲,2P 激射带最强谱线也由 2P6 变为 2P7;对于 DF 来讲,2P 激射带最强谱线由 2P7 变为 2P9,3P 激射带最强谱线由 3P7 先变为 3P8,再变为 3P9。通过 22 mm 和 14 mm 两排孔注入  $H_2/D_2$ ,相应的光共振吸收带来的光谱变化结果表明:HF/DF 激光的增益区长度都不超过 14 mm,反应生成的激发态 HF/DF 到达光轴位置时,基本上已经全部回到了基态。

由图 2(c)和(d)可知:HF 激光的 2P 激射带和 1P 激射带间存在一定的级联跃迁效应,如图 2(c)中的 2P 带的最强谱线 2P7( $\nu=2, J=6 \rightarrow \nu=1, J=7$ )跃迁下能级与 1P 带的 1P8( $\nu=1, J=7 \rightarrow \nu=0, J=8$ )谱线跃迁上能级是对应的,正是因为 2P7 谱线最强,其跃迁下能级粒子转为 1P8 谱线跃迁上能级粒子才使得 1P8 能够存在。这种级联跃迁效应在图 2(d)中表现更加明显,2P 带的 2P6、2P7、2P8 三根谱线与 1P 带的 1P7、1P8、1P9 三根谱线之间存在完全对应的级联跃迁效应。1P 支谱线也因为级联跃迁而不能被完全吸收。

由图 3(c)和(d)可知:DF 激光的 3P 激射带和 2P 激射带间存在一定的级联跃迁效应,如图 3(c)中 3P 带的谱线 3P8( $\nu=3, J=7 \rightarrow \nu=2, J=8$ )与 2P 带的 2P9( $\nu=2, J=8 \rightarrow \nu=1, J=9$ )谱线是对应的,3P 带的谱线 3P9( $\nu=3, J=8 \rightarrow \nu=2, J=9$ )与 2P10( $\nu=2, J=9 \rightarrow \nu=1, J=10$ )谱线是对应的。这种级联跃迁效应在图 3(d)中也有所体现,3P 带的 3P8、3P9 两根谱线与 2P 带的 2P9、2P10 也存在对应的

级联跃迁效应,但与图 2(d)的 HF 光谱表现不同的是,图 3(c)和(d)表现的级联跃迁谱线强度间无对应关系,可能原因是 DF 激光器的激发态分子弛豫较慢,两个模块的激射区有所重叠。

由图 4 和图 5 给出的激光器输出功率随吸收模块不同位置注入  $H_2/D_2$  的变化规律可知:从 30、22、14、6 mm 位置注入相同流量  $H_2/D_2$  后,在基态分子与激发态分子数量相当(1:1)的情况下,HF 激光器输出功率降低了 50%左右,DF 激光器输出功率降低了 90%左右;激光输出功率随注气位置的下移而逐渐增大,特别是从 6 mm 位置注入  $H_2$  时,比 30、22、14 mm 位置注入  $H_2$  对应的吸收强度减弱,功率有明显增大。HF 激光增益模块单独在 6.8 W 和 3.3 W 初始输出功率水平时的情况基本类似(图 4)。这也说明从 30、22、14 mm 位置注入  $H_2/D_2$  后,生成的激发态 HF( $\nu \geq 1$ )/DF( $\nu \geq 1$ )分子在到达增益模块注气孔下游后基本回到基态( $\nu=0$ )。

## 4 结 论

在电激励双模块实验装置上,研究了谐振腔内基态分子光吸收对其出光性能的影响。主要得到以下两个结论。

1) HF-DF 双波段激光器腔内基态分子光吸收的机理是:基态 HF( $\nu=0$ )/DF( $\nu=0$ )分子通过单光子共振机制吸收 1P 支谱线,DF 波段还通过双光子共振机制吸收 2P 支谱线;振动-转动激射带间存在一定程度的级联跃迁效应,级联效应使得 HF 激光的 1P 支谱线、DF 激光的 2P 支谱线不能被完全吸收;腔温升高使谱线整体及最强谱线都向高  $J$  值移动。

2) 在基态分子与激发态分子数量相当(1:1)的情况下,10 W 级功率水平 HF 激光器的输出功率降低到无吸收情况下对应值的 50%左右;瓦级功率水平 DF 激光器输出功率降低到无吸收情况下对应值的 90%左右。

由此可知,当 HF 激光增益模块采用  $(NF_3 + D_2 + He) + (H_2 + He)$  等燃烧时会产生 DF( $\nu=0$ )的燃料体系,DF 激光增益模块采用  $(NF_3 + C_2H_4 + He) + (D_2 + He)$  等时会产生 HF( $\nu=0$ )的燃料体系时,导致两个模块相互间存在光子共振吸收问题,本文的实验结果表明,利用传统的燃料组合研制燃烧驱动 HF-DF 双波段化学激光器是不可行的。

## 参 考 文 献

- 1 A Rogalski. Infrared detectors for the future[J]. Acta Physica Potonica A, 2009, 116(3): 389–406.
- 2 Ni Guoqiang, Hao Qiwei, Zhang Huaili, *et al.*. Applications of multicolor FPA from the DSP and SBIRS space early warning systems[J]. Laser and Infrared, 2006, 36(11): 1016–1019.  
倪国强, 郝琦玮, 张怀利, 等. 从 DSP 与 SBIRS 空间预警系统看多色焦平面阵列的应用[J]. 激光与红外, 2006, 36(11): 1016–1019.
- 3 William S Chan. Fabry-Perot Interferometer Array [P]. US patent: 0049228. 2008-2-28.
- 4 T V Jacobson. Dual Wavelength Infrared Laser[P]. US patent: 4367552. 1983-01-04.
- 5 R A Meinzer, Gregory M Dobbs. Multi-Species CW Combustion Driven Laser Employing Hydrogen Bromide[P]. US, 4517676. 1985-5-14.
- 6 B P Aleksandrov, B I Katorgin, A A Stepanov. Simulation of a two-frequency cw chemical HF-HBr laser [J]. Quantum Electronics, 2008, 38(10): 903–908.
- 7 S D Velikanov, A S Elutin, A F Zapol'skii, *et al.*. Wide-band chemical laser utilizing both HF\* and DF\* excited molecules[J]. Kvantovaya Elektron, 1991, 18: 186–188.
- 8 A S Bashkin, L V Gurov, B I Katorgin, *et al.*. On the possibility of simultaneous emission of an autonomous cw HF-DF chemical laser in two spectral ranges[J]. Quantum Electronics, 2008, 38(5): 429–435.
- 9 Shengfu Yuan, Wei Luo, Baozhu Yan, *et al.*. Research on a middle infrared and long infrared dual-band laser[J]. Chin Opt Lett, 2012, 10(3): 031404.
- 10 Luo Wei, Yuan Shengfu, Zou Qianjin, *et al.*. Gain medium matching for mid- and far-infrared dual-band laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 3279–3282.  
罗威, 袁圣付, 邹前进, 等. 中、远红外双波段激光器增益介质匹配[J]. 强激光与粒子束, 2011, 23(12): 3279–3282.
- 11 Yuan Shengfu, Luo Wei. Measurement and evaluation of middle infrared and long infrared dual-band laser emitting spectrum[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2012, 32(1): 83–87.  
袁圣付, 罗威. 中远红外双波段激光器光谱模拟测量与评估[J]. 光谱学与光谱分析, 2012, 32(1): 83–87.

栏目编辑: 宋梅梅