

# 宽谱脉冲 HF 激光在空气中的吸收衰减

朱峰\*, 黄珂, 黄超, 李高鹏, 栾昆鹏, 沈炎龙

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** 放电引发非链式脉冲 HF 激光器在全谱输出条件下典型的输出谱线约 16 条, 谱线集中在 2.65~3  $\mu\text{m}$  波段, 大气中  $\text{H}_2\text{O}$  分子在 2.7  $\mu\text{m}$  附近的吸收带对 HF 激光能量衰减有较大影响。利用放电引发非链式脉冲 HF 激光器, 获得了宽谱脉冲 HF 激光在空气中的吸收衰减规律。实验结果表明, 全谱输出条件下脉冲 HF 激光在激光器出口处的吸收系数约为 0.066  $\text{m}^{-1}$ , 传输 40 m 后吸收系数降低到 0.01  $\text{m}^{-1}$  附近。吸收系数随着传输距离的增加而减小, 并趋于常数。通过对非链式脉冲 HF 激光 2.8  $\mu\text{m}$  以下输出光谱的抑制, 在激光器出口处吸收系数减小到原来的 1/3, 约为 0.022  $\text{m}^{-1}$ , 一定程度上降低了空气吸收对激光能量的衰减。

**关键词** 激光器; 中红外激光; HF 激光; 输出光谱; 吸收衰减

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.011402

## Absorption Attenuation of Wide Spectrum Pulsed HF Laser in Air

Zhu Feng\*, Huang Ke, Huang Chao, Li Gaopeng, Luan Kunpeng, Shen Yanlong

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

**Abstract** There are about 16 spectral lines emitted from discharge initiated non-chain pulsed HF laser, covering from 2.65  $\mu\text{m}$  to 3  $\mu\text{m}$ , when the laser is working in full spectrum output. The absorption of  $\text{H}_2\text{O}$  molecules at about 2.7  $\mu\text{m}$  in air has a great influence on the laser pulse energy. The absorption attenuation rules of wide spectral band pulsed HF laser in air are obtained by using discharge initiated non-chain pulsed HF laser. The experimental results show that the absorption coefficient is about 0.066  $\text{m}^{-1}$  just at the output window of the laser device in full spectrum output, and then decreases to around 0.01  $\text{m}^{-1}$  after 40 m propagation. The absorption attenuation coefficient reduces when the propagation distance increases, and tends to be constant. By suppressing the laser wavelength below 2.8  $\mu\text{m}$  of non-chain pulsed HF laser, the attenuation coefficient is reduced to about 1/3 of the value obtained before at the output window, i. e., about 0.022  $\text{m}^{-1}$ , and the attenuation of laser energy by air absorption is reduced to some extent.

**Key words** lasers; mid-infrared laser; HF laser; output spectrum; absorption attenuation

**OCIS codes** 140.3538; 140.3070; 140.1550

## 1 引言

中红外气体激光器具有高功率和高脉冲能量等特点, 是一类重要的激光光源。国内学者对中红外波段气体激光器的辐射光谱特性开展过一些研究。曹百灵等<sup>[1]</sup>研究了 HF/DF 激光某些特征谱线的大气传输特性差异。王杰等<sup>[2]</sup>通过优化激光器结构参数和调整反应体系配方, 研究了连续波 HF 激光输

出光谱的长波转移特性, 实现了波长大于 2.87  $\mu\text{m}$  谱线的输出。郭建增等<sup>[3]</sup>研究了连续波 HF 激光器的光谱输出特性。罗威等<sup>[4-5]</sup>测量了连续波 HF 激光不同谱线小信号增益系数, 研究了连续波激光长波谱线输出机理。王红岩等<sup>[6]</sup>研究了激光谱线与光轴位置的关系。潘其坤等<sup>[7]</sup>研究了脉冲 DF 激光光谱特征及其规律。研究多针对连续波 HF/DF 激光器, 研究内容主要为激光器的辐射光谱特征、特征谱

收稿日期: 2018-06-21; 修回日期: 2018-07-13; 录用日期: 2018-07-18

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1511-02)

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

线辐射机理以及光谱结构优化。相比连续波激光器,放电引发脉冲 HF 激光器具有较高的瞬时抽运功率,输出光谱范围更宽,并且容易产生  $2.8 \mu\text{m}$  以上的高振动跃迁谱线<sup>[8-11]</sup>。本文针对放电引发的脉冲 HF 激光器,研究了空气吸收对宽谱脉冲 HF 激光能量衰减的影响规律。

## 2 激光光谱特征

实验所用的放电引发脉冲 HF 激光器,利用紫外预电离方式产生均匀体放电,生成激发态 HF 分子形成激光输出<sup>[12]</sup>。激光器增益区体积为  $0.08 \text{ L}$ ,腔内充  $\text{SF}_6$  和  $\text{C}_2\text{H}_6$  作为工作气体。激光器谐振腔采用外腔式结构,腔长约为  $0.9 \text{ m}$ 。利用光谱仪在距离激光器约  $1 \text{ m}$  处测量输出光谱,并利用能量计测量不同距离处的激光脉冲能量,分析空气对激光能量的吸收规律。

图 1 给出了全谱输出条件下典型的脉冲 HF 激光输出谱线。由于放电引发脉冲 HF 激光器输出光谱来自激发态 HF 分子振转能级间的跃迁,分子的振转能级结构决定了激光的多谱线输出特征,在  $2.65 \sim 3 \mu\text{m}$  测得 16 条主要的辐射谱线。在不同工作条件下,谱线强弱和条数略有差别。激光输出能量主要来自  $v_1, v_2, v_3$  三个振动能级的跃迁辐射,与连续波激光器光谱相比<sup>[2-4]</sup>,脉冲体制的非链式 HF 激光器的激光输出光谱范围较宽、光谱谱线较多,可以明显观察到高振动能态跃迁产生的  $2.8 \mu\text{m}$  波段以上的输出谱线。

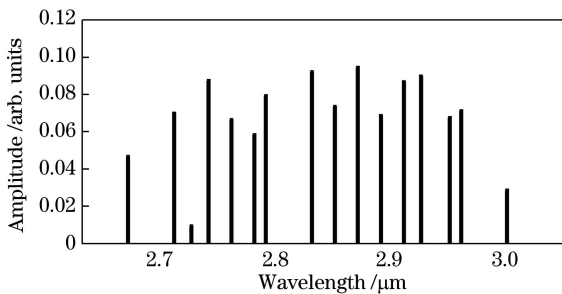


图 1 脉冲 HF 激光器输出光谱

Fig. 1 Output spectrum of pulsed HF laser

## 3 吸收衰减分析

### 3.1 全谱输出条件下实验结果分析

在实验室环境里,利用非稳腔<sup>[13]</sup>研究了空气对脉冲 HF 激光吸收的影响规律。图 2 给出了在全谱输出条件下激光脉冲能量随距离的变化规律。图中实心点为实验测得的归一化脉冲激光能量,图中虚

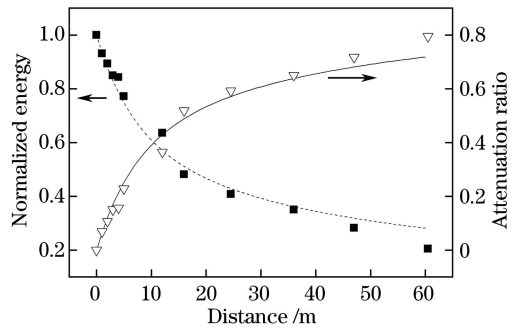


图 2 全谱输出条件下脉冲 HF 激光吸收衰减情况  
Fig. 2 Absorption attenuation of pulsed HF laser in full spectrum output

线为计算得到激光脉冲能量衰减变化情况,计算值和测量值两者符合的较好。图中实线为不同距离处激光脉冲能量相对初始脉冲能量的衰减比例。在全谱输出条件下随着传输距离的增加,激光脉冲能量逐渐下降,呈近指数衰减。具体表现为,与激光器出口处的能量相比,在  $10 \text{ m}$  处激光脉冲能量下降  $39.0\%$ ,  $20 \text{ m}$  处激光脉冲能量下降  $53.3\%$ ,  $30 \text{ m}$  处的能量下降  $60.7\%$ ,  $60 \text{ m}$  处能量下降  $71.8\%$ 。在前  $10 \text{ m}$  激光脉冲能量下降较为严重,随着距离的增加,能量衰减趋势逐渐变缓。在实验室环境中空气对激光的散射可以忽略,分析认为激光脉冲能量衰减主要来自大气中  $\text{H}_2\text{O}$  分子和  $\text{CO}_2$  分子对激光吸收的影响,尤其空气中的  $\text{H}_2\text{O}$  分子在  $2.7 \mu\text{m}$  附近的吸收带恰好处于 HF 激光辐射光谱范围内,对激光吸收衰减严重,是造成激光脉冲能量衰减的主要因素。

由实验结果可以进一步分析得到吸收系数的变化规律。图 3 给出了全谱输出条件下脉冲 HF 激光的吸收系数随传输距离的变化情况,可以看出,吸收系数与传输距离密切相关,并非常数。吸收系数随着传输距离的增加而逐渐降低。在激光器出口附近

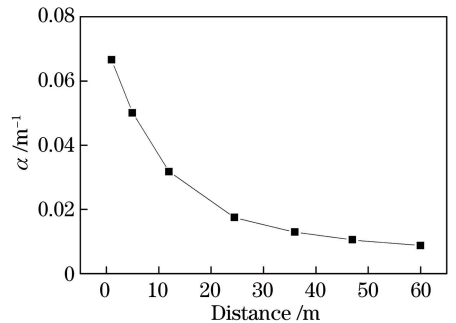


图 3 全谱输出条件下脉冲 HF 激光在空气中的吸收系数  
Fig. 3 Absorption coefficient of pulsed HF laser in full spectrum output in air

吸收系数最大,约为  $0.067 \text{ m}^{-1}$ ;随着传输距离的增加,在 5 m、12 m 处的吸收系数依次降为  $0.050 \text{ m}^{-1}$ 、 $0.032 \text{ m}^{-1}$ ;传输 40 m 之后吸收系数降到  $0.010 \text{ m}^{-1}$  附近。

全谱输出脉冲 HF 激光吸收系数在激光器出口处最大,随着传输距离的增加而逐渐减小,并趋于常数。吸收系数减小说明大气对激光脉冲能量的吸收影响减弱。进一步分析可知,随着距离的增加,吸收系数的减小速率变缓,这一特性与激光的光谱结构有关。脉冲 HF 激光辐射带宽约为 400 nm,主要辐射谱线有 16 条,空气不同谱线的吸收存在一定的差异。在  $2.7 \mu\text{m}$  附近的短波波段,受空气中  $\text{H}_2\text{O}$  分子吸收带影响,衰减较大,而在  $2.9 \mu\text{m}$  以上的长波波段, $\text{H}_2\text{O}$  分子的吸收的影响减弱,因吸收造成的衰减相对短波明显减弱。在激光器出口附近,脉冲能量衰减主要来自  $2.7 \mu\text{m}$  附近的空气对短波波段的吸收,较远距离处衰减主要来自空气对长波部分的吸收,因此表现为吸收系数随传输距离的增大而减小,并且减小速率变缓,并趋于稳定。

### 3.2 谱带优化后实验结果分析

综上所述,空气对  $2.7 \mu\text{m}$  附近的 HF 激光吸收较多。为了降低空气吸收对 HF 激光能量的衰减,需要对 HF 激光的输出光谱进行控制,抑制  $2.8 \mu\text{m}$  以下的 HF 激光输出能量。较为方便的方法是对谐振腔镀具有光谱选择性的膜层,利用镀膜选谱技术控制膜层特定谱带内的反射率,调节不同波长的光在谐振腔内的损耗,达到对激光输出波长控制的目的。激光器谐振腔采用平行平面腔,图 4 为定制的反镜所镀膜层反射率测量曲线,反射率在  $3 \mu\text{m}$  以上高反,在  $2.85 \mu\text{m}$  以下高透。因为所镀膜层处于中红外,现有的技术无法达到理想的截止条件,因此有一段较宽的过渡段。

图 5 为利用上述镀膜反射镜作为谐振腔后镜,

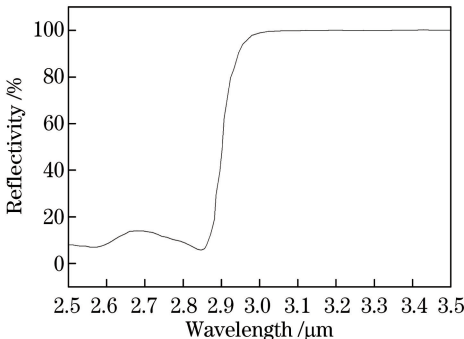


图 4 镀膜反射率曲线

Fig. 4 Reflectivity curve of the coated mirror

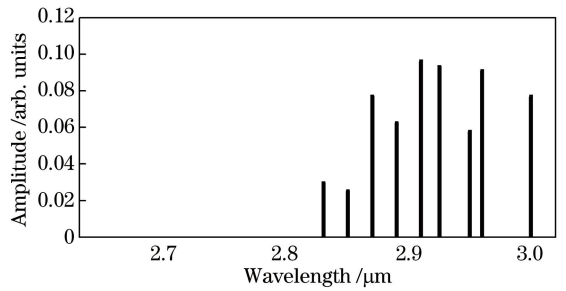


图 5 谱带优化后的输出光谱

Fig. 5 Output spectrum after the spectrum optimization

测量得到的典型激光输出光谱。可以看出,采用上述镀膜反射镜后,光谱中  $2.8 \mu\text{m}$  以下的谱线得到较好的抑制。激光辐射光谱处于  $2.8 \sim 3 \mu\text{m}$ ,激光能量大部分集中在  $2.9 \mu\text{m}$  以上。根据前面的分析,可以预期激光输出光谱优化后可以在一定程度上降低  $\text{H}_2\text{O}$  分子的吸收对激光能量衰减的影响。

图 6 给出了谱带优化后脉冲 HF 激光的吸收衰减特性,实验结果表明,5 m 处激光脉冲能量下降约 9.6%,10 m 处下降约 16.5%。相比谱带优化前(10 m 处下降约 39.0%),激光能量衰减明显减小。谱带优化后的实验结果也进一步说明,在全谱输出条件下脉冲 HF 激光在激光器出口附近的衰减主要由  $2.7 \mu\text{m}$  附近大气中水气的吸收带造成。对  $2.8 \mu\text{m}$  以下激光输出波长进行抑制,在一定程度上降低了空气中水气的吸收对激光能量的衰减。

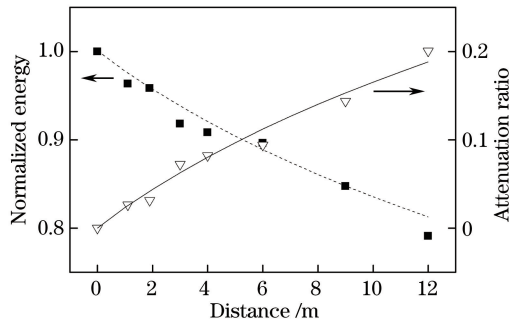


图 6 谱带优化后的吸收衰减

Fig. 6 Absorption attenuation after the spectrum optimization

图 7 给出了谱带优化后测量得到的吸收系数,在激光器出口附近吸收系数为  $0.022 \text{ m}^{-1}$ ,吸收系数显著减小,约为谱带优化前的  $1/3$ ,传输 10 m 吸收系数降低为  $0.015 \text{ m}^{-1}$ 。空气吸收对激光脉冲能量的衰减减小。

## 4 结 论

利用实验室放电引发非链式脉冲 HF 激光器研

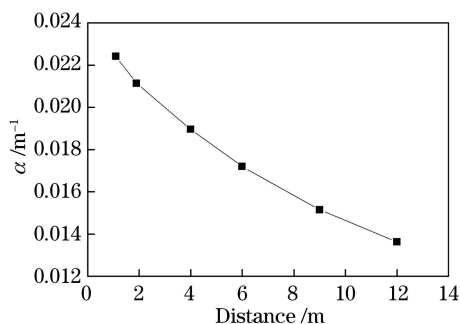


图7 谱带优化后的吸收系数

Fig. 7 Absorption coefficient after the spectrum optimization

究了宽谱脉冲 HF 在空气中的吸收衰减规律。研究表明,在全谱输出条件下 HF 激光器的典型输出谱线约为 16 条,谱线集中分布在  $2.6\sim 3\ \mu\text{m}$  波段。空气中的  $\text{H}_2\text{O}$  分子在  $2.7\ \mu\text{m}$  附近的吸收带对激光能量衰减影响严重。在全谱输出条件下激光吸收系数与传输距离密切相关,在激光器出口附近较大,约为  $0.066\ \text{m}^{-1}$ ,随着距离的增加,吸收系数逐渐降低,并且趋于稳定,激光传输 40 m 后,吸收系数降低到  $0.010\ \text{m}^{-1}$  附近。采用镀膜法优化了激光器输出光谱,抑制了  $2.8\ \mu\text{m}$  以下的光谱输出,优化后激光器出口处吸收系数降为优化前的 1/3,约为  $0.022\ \text{m}^{-1}$ ,传输 10 m 后降低到  $0.015\ \text{m}^{-1}$  附近,在一定程度上降低了空气吸收对激光能量的衰减。

## 参 考 文 献

[1] Cao B L, Wu C J, Rao R Z, *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, 郭承就, 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.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] Wang H Y, Yuan S F, Li Q, *et al.* Chosing 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.

[7] 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.

[8] Gross R W F, Bott J F. Handbook of chemical lasers [M]. Yin H M, Xie X B, Luo J Y, Transl. Beijing: Science Press, 1987.  
格罗斯, 博特. 化学激光手册[M]. 尹厚明, 谢行滨, 罗静远, 译. 北京: 科学出版社, 1987.

[9] Lacour B, Gagnol C, Prigent P, *et al.* High average power HF/DF laser[J]. Proceedings of SPIE, 1998, 3574:334-340.

[10] Apollonov 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.

[11] 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.

- [12] Yi A P, Liu J R, Tang Y, *et al.* Electrically initiated repetitive-pulsed non-chain HF lasers[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] Zhu F, Huang K, Zhou S Q, *et al.* Laser beam quality optimization of no-chain pulsed HF laser using unstable resonator [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(4): 0401002.  
朱峰, 黄珂, 周松青, 等. 基于非稳腔的非链式脉冲 HF 激光光束质量优化[J]. *中国激光*, 2017, 44(4): 0401002.