

文章编号: 1000-7032(2013)04-0450-06

紫外预电离放电引发的非链式脉冲 DF 激光器

阮 鹏^{1,2}, 谢冀江^{1*}, 张来明¹, 潘其坤^{1,2},
杨贵龙¹, 郭 劲¹, 李世明¹, 高 飞^{1,2}, 谭改娟^{1,2}

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 激光与物质相互作用国家重点实验室, 吉林 长春 130033;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 采用紫外预电离的横向放电方式和稳定光学谐振腔, 使用无毒无腐蚀性的六氟化硫(SF₆)和氘气(D₂)作为工作物质, 研究了工作气体配比、总气压对放电引发非链式脉冲氟化氘(DF)激光器输出能量的影响。实验发现 SF₆与 D₂ 的最佳比例为 10:1, 最佳总气压为 10.5 kPa。使用 DF 激光谱线分析仪对激光输出谱线进行了测量, 得到了 17 条 P 支跃迁谱线, 激光能量集中在 3.876 μm 附近的几条谱线。利用烧蚀光斑的方法测得输出激光束水平方向、垂直方向的发散角均为 1 mrad。在最佳工作条件下, 充电电压为 39 kV 时, 激光单脉冲输出能量达到最大值 3.58 J, 此时激光脉冲宽度为 215 ns, 峰值功率为 16.65 MW, 电光转换效率为 2.08%。

关键词: 脉冲 DF 激光器; 紫外预电离; 放电引发; 非链式; 输出特性

中图分类号: TN248.5

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20133404.0450

UV-preionized Electric-discharge Non-chain Pulsed DF Laser

RUAN Peng^{1,2}, XIE Ji-jiang^{1*}, ZHANG Lai-ming¹, PAN Qi-kun^{1,2},
YANG Gui-long¹, GUO Jin¹, LI Shi-ming¹, GAO Fei^{1,2}, TAN Gai-juan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding Author, E-mail: laserxj@163.com

Abstract: Using non-toxic and non-corrosive sulfur hexafluoride (SF₆) and D₂ as working gas, the influence of the ratio and total pressure of the mixture gas on the performance of non-chain pulsed DF laser with a stable optical resonator is investigated. The research is based on UV-preionized transverse discharge method. The results show that the optimum ratio and total pressure of the SF₆-D₂ mixture gas, are 10:1 and 10.5 kPa, respectively. By using the DF laser spectrum analyzer to measure the output spectrum of DF laser, 17 P-branch transition lines are attained, which the laser energy concentrates in several lines near the 3.876 μm line. The laser beam divergence angles in both horizontal and vertical directions are 1 mrad, which is obtained by using the laser ablation method. The maximum single pulse energy of 3.58 J, pulse duration of 215 ns, peak power of 16.65 MW, and electro-optical conversion efficiency of 2.08% are achieved under the best working conditions when the charging voltage is 39 kV.

Key words: pulsed DF laser; UV-preionized; electric-discharge; non-chain; output characteristics

收稿日期: 2013-01-05; 修订日期: 2013-02-21

基金项目: 国家科技部国际合作专项(2011DFR10320); 中科院创新基金(CXJJ-11-Q80)资助项目

作者简介: 阮鹏(1985-), 女, 湖北宜昌人, 主要从事非链式 DF 激光器理论及技术方面的研究。

E-mail: ruanpeng911@yahoo.com.cn

1 引言

基于化学反应的DF激光器输出波段为3.5~4.2 μm,处于大气传输窗口,因其覆盖了众多原子及分子的吸收峰,所以在光谱学、激光雷达、大气监测及军事等诸多领域都有重要的应用价值和前景^[1-4]。

放电引发非链式脉冲DF激光器采用无毒无腐蚀性的SF₆和D₂或碳氮化合物作为工作物质,通过光触发、紫外预电离、自引发等引发方式,实现工作气体均匀辉光放电,进而引发非链式化学反应,实现DF分子粒子数反转,获得激光输出。链式DF激光器建立在链式化学反应上,其激光输出能量并不直接受注入能量的限制,因而能实现高能量、高效率激光输出;但是链式反应激光器存在支链反应,有爆炸的危险。相反,非链式脉冲DF激光器具有无腐蚀性、反应可控不易爆炸、结构紧凑、操作简单、光束质量好等优点,并能实现高功率高能量激光输出。由于形成激发态DF分子所必须的F原子来源于高能电子对SF₆分子的碰撞解离,而高能电子数密度受注入能量密度限制,因此非链式脉冲DF激光器的电光转换效率通常较低。

鉴于非链式脉冲DF激光器的特殊用途,近年来,国内外对非链式脉冲DF激光器开展了大量的理论及实验研究^[5-6]。法国Brunet研究小组采用光触发放电技术,研究了D原子施主种类对非链式脉冲DF激光器输出能量的影响,采用C₆D₁₂作为D原子施主,获得了能量为8J的单脉冲DF激光输出^[7]。俄罗斯科学院强流所Tarasenko等对非链式脉冲DF激光器的电光转换效率进行了大量实验研究,通过改变储能放电电路参数将DF激光器电光转换效率提高到6%,这是放电引发非链式脉冲DF激光器目前达到的最高电光转换效率^[8]。俄罗斯科学院普通物理所的Firsov研究团队采用新型的自引发放电技术,获得的非链式DF激光单脉冲能量高达325J,电光转换效率为3.4%^[9]。国内北京电子所、西北核技术所等单位对非链式脉冲HF/DF激光器进行了相关研究。其中,北京电子所的柯常军等通过采用紫外预电离放电引发方式获得了1.2J单脉冲DF激光输出^[10]。西北核技术研究所的易爱平等采用电子束和放电两种激励方式进行

非链式HF激光研究,实现了单脉冲能量0.6J的HF激光输出^[11-12]。

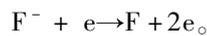
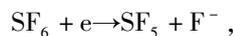
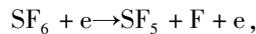
本文首先分析了非链式脉冲DF激光产生机理,然后采用紫外预电离放电引发方式,对非链式脉冲DF激光器的输出特性进行了实验研究。通过改变工作气体SF₆与D₂的比例和总气压,获得了不同比例、不同总气压下能量随充电电压的变化关系,并测量了DF激光光谱分布、近场光斑及光脉冲波形,为下一步实现非链式脉冲DF激光重复频率输出及提高电光转换效率奠定了技术基础。

2 放电引发非链式脉冲DF激光产生机理及实验装置

2.1 非链式脉冲DF激光产生机理

非链式脉冲DF激光一般采用含氟化合物和氖气或碳氮化合物在放电引发方式下产生。注入到增益区的能量主要用来解离含氟化合物中的F原子,F原子与碳氮化合物进行非链式化学反应生成DF分子,反应释放的化学能促成DF分子形成粒子数反转,上能级DF分子受激辐射并由光学谐振腔使其形成激光振荡输出。本文选取高纯度的SF₆和D₂作为工作物质,在放电引发条件下,非链式脉冲DF激光产生的机理如下:

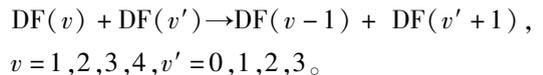
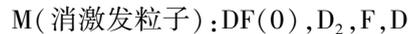
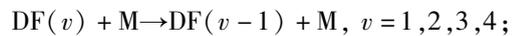
(1)高能电子碰撞SF₆分子解离出F原子的过程:



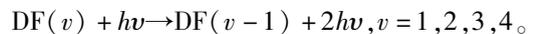
(2)F原子与D₂发生非链式化学反应生成DF分子过程:



(3)激发态DF分子振动弛豫过程:



(4)受激辐射产生激光过程:



从上述反应过程可知,激发态DF分子的生成速率和振动弛豫速率是影响激光输出能量的关键因素。激发态DF分子的生成速率受F原子的产出速率及D₂的含量限制,为了获得高能量激光

输出,应考虑增大 F 原子的产出速率和 D_2 的含量。另外, D_2 分子、反应生成的基态 DF 分子、F 原子、D 原子对激发态的 DF 分子具有消激发作用,因而会减弱 DF 激光输出能量。要获得最大 DF 激光脉冲能量输出,必须对加入到放电增益区的工作气体总气压及混合气体比例进行合理设置。

2.2 实验装置

实验所用 DF 激光器由经过改造的横向放电激励大气压 (TEA) CO_2 激光器构成,主要包括高压储能放电系统、控制系统、气体循环系统和光学谐振腔。图 1、图 2 分别为实验装置示意图和实物图。激光器采用紫外光预电离横向放电结构,主电极为长 120 cm、宽 4 cm 对称放置的改进型 Chang 氏不锈钢电极,电极间距 4 cm,预电离电极由双侧火花针阵列组成,光学谐振腔由反射率为 99% 的凹面镀金反射镜和反射率为 80% 的 CaF_2 平面输出耦合镜组成,腔长为 2.2 m。使用 3 片分光镜将输出激光分成 4 路,实现对脉冲能量、近场光斑形状、脉冲波形和 DF 激光光谱分布的同时测量和记录。

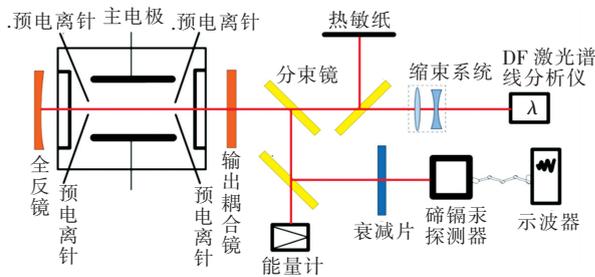


图 1 非链式脉冲 DF 激光器实验装置示意图。

Fig. 1 Experimental setup of non-chain pulsed DF laser

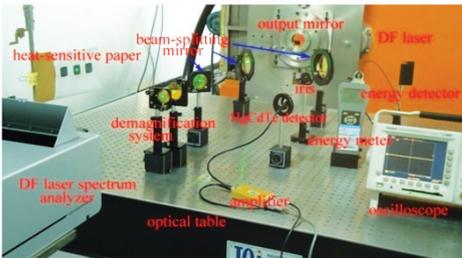


图 2 DF 激光器实验装置照片

Fig. 2 Photo of DF laser experiment device

3 实验结果和分析

3.1 混合气体比例对激光脉冲能量的影响

SF_6 、 D_2 混合气体的比例变化和混合气体的

总气压对激光脉冲能量都有很大影响,文献 [13-14] 采用固定 SF_6 气体的含量、通过改变 D_2 含量的实验方法研究了混合气体配比对激光输出能量的影响,但该方案忽略了由于逐渐添加 D_2 引起的总气压的升高对激光输出能量的影响。本文采用单一变量法,在混合气体总气压保持不变的情况下研究了混合气体比例对激光脉冲能量的影响。实验中保持总气压为 10 kPa,在 $P(SF_6):P(D_2) = 4:1, 6:1, 8:1, 10:1, 12:1, 15:1$ 情况下,分别测量了激光输出能量随充电电压的变化关系。图 3、图 4 分别为不同充电电压下激光能量和电光转换效率随混合气体比例的变化曲线。

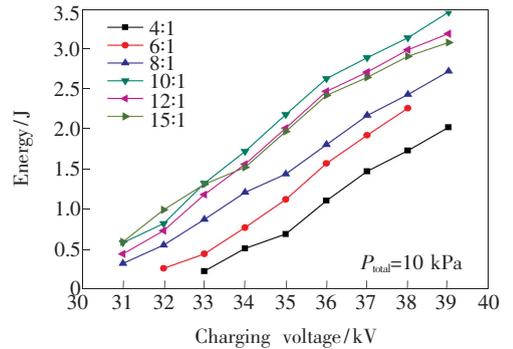


图 3 激光输出能量随混合气体比例的变化关系

Fig. 3 Dependence of the laser output energy on the mixing ratio at different charging voltage

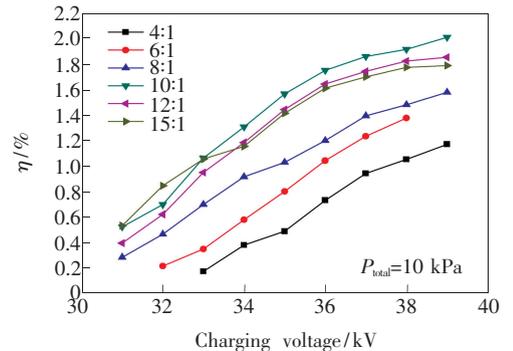


图 4 电光转换效率随混合气体比例的变化关系

Fig. 4 Dependence of the electro-optical conversion efficiency on the mixing ratio at different charging voltage

从图 3、图 4 中可以看出,在同一气体配比时,激光能量和电光转换效率随充电电压的升高而逐渐变大。这是由于当充电电压较低时,由阴极辐射的电子在平均自由程内获得的电场能较小,此时大量的电子能量达不到 SF_6 分子解离的能量阈值,能量相对较低的电子被电负性极强的 SF_6 分子吸附损耗,F 原子产出速率受到限制,因

此,此时单脉冲能量及电光转换效率均较低。随着充电电压的升高,电子获得的电场能逐渐增大,F原子的产出速率逐渐升高,单脉冲能量及电光转换效率得到提升。在相同电压下,激光能量先是随混合气体中SF₆与D₂比例的增大迅速增加,并在P(SF₆):P(D₂)=10:1时达到最大值,之后随着气体比例的增大而逐渐减小。在相同的充电电压下,保持总气压不变,混合气体中SF₆与D₂比例较低(4:1)时,SF₆含量比混合气体比例较高时的少,一方面,从SF₆分子中解离出的F原子数量偏少将造成化学反应生成的激发态DF分子数偏低,另一方面,大量剩余的D₂分子对激发态的DF分子的消激发作用将导致反转粒子数密度降低,因而在混合气体比例较低时激光能量、电光转换效率较低。随着P(SF₆):P(D₂)的增大,SF₆含量变大,SF₆分子解离出的F原子数量增加,D₂含量减少使激发态DF分子的消激发作用减弱,F原子数量与D₂分子数量逐渐接近匹配值,所以激光能量逐渐增加。当P(SF₆):P(D₂)升高到一定比例(10:1)时,F原子数量与D₂分子数量相匹配,此时输出能量及电光转换效率达到最大值。随着混合气体比例的进一步增大,SF₆含量逐渐增加而D₂含量逐渐降低,缺乏与F原子数量相匹配的D₂分子来产生激发态的DF分子,因此,激光能量、电光转换效率逐渐降低。

此外,值得注意的是,与CO₂激光器一样,当放电电压过高或气体比例严重失配时,会产生弧光放电的现象,影响激光器正常工作。这是由于弧光放电时的电流密度极高,对工作气体裂解十分严重,它将产生大量的消激发粒子,严重时将影响DF激光器单次充气的工作寿命,尤其当DF激

光重频输出时,该影响更为明显,因此应避免放电区出现弧光放电。图5所示为辉光放电状态下最大能量随混合气体比例的变化关系。从图5中可以看出,最佳比例P(SF₆):P(D₂)=10:1对应的稳定辉光放电激光能量最大,达到3.45 J,此时充电电压为39 kV,注入总能量为172 J,激光器电光转换效率为2.01%。

3.2 混合气体总气压对激光脉冲能量的影响

在最佳比例P(SF₆):P(D₂)=10:1条件下,通过改变混合气体总气压研究激光脉冲能量随混合气体总气压的变化关系,图6为对实验数据进行分析整理得到的激光脉冲能量随混合气体总气压变化关系的拟合曲线。

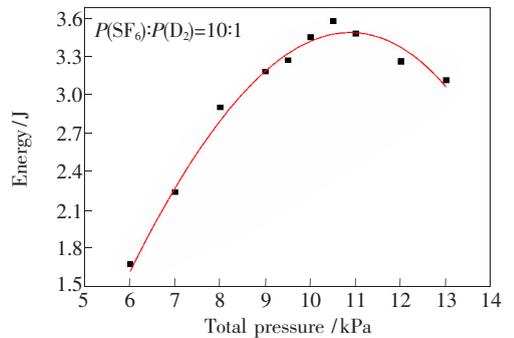


图6 激光输出能量随混合气体总气压的变化关系
Fig. 6 Dependence of the laser output energy on the total pressure of mixture gas

从图6可以看出,激光脉冲能量随混合气体总气压的增加先是迅速增大,在总气压为10.5 kPa时激光能量达到最大值,之后随总气压的增加能量逐渐减小,且低气压时能量增大趋势比高气压时能量减小趋势更明显。总气压较低时气体分子数密度小,击穿电压和起弧电压都很低,当强制注入大能量时,在放电区观察到明显的弧光放电现象,弧光放电将产生大量的消激发粒子导致激光能量迅速下降,因此低气压时所能注入的能量很小,而激光脉冲能量随注入能量线性增加,因而低气压时DF激光输出能量较低。这与特定气压的混合气体存在最佳充电电压使放电状态达到最佳,即存在最佳的E/P值相符^[15-16]。此外,由于激光脉冲能量与化学反应生成的激发态DF分子数密度成正比,而低气压时SF₆和D₂分子数密度较低,生成的激发态DF分子数密度也较低,所以激光能量相对较低。随着总气压的增大,SF₆和D₂分子数密度逐渐提高,所能注入的能量也增

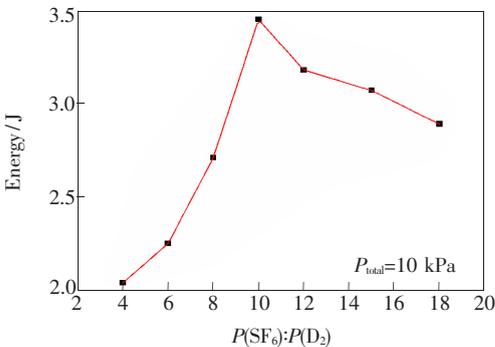


图5 辉光放电时的最大能量随混合气体比例的变化关系
Fig. 5 Dependence of the maximum laser output energy on the mixing ratio at glow discharge condition

大,激光能量随之升高。总气压较高时激发态 DF 分子的振动弛豫速率加快,导致上能级寿命缩短,随着混合气体总气压持续增加,激发态 DF 分子的生成速率与振动弛豫速率的差值逐渐变小,即反转粒子数密度逐渐降低,因此激光能量缓慢下降。

在 $P(\text{SF}_6):P(\text{D}_2) = 10:1$ 、总气压为 10.5 kPa 条件下,使用 PC 型室温 HgCdTe 探测器对单脉冲激光输出进行探测,探测信号经放大器放大后由带宽为 500 MHz 的 TDS3052B 型示波器显示,整个测量过程在屏蔽室中进行。图 7 是充电电压为 39 kV 时的激光脉冲波形,激光脉冲宽度为 215 ns,此时由 QE50LP-H-MB 型 Gentec 能量计测得的激光单脉冲能量为 3.58 J,由此计算出激光脉冲峰值功率为 16.65 MW。

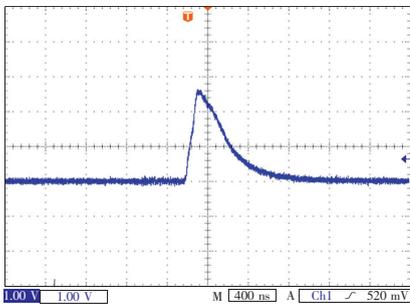


图 7 DF 激光脉冲波形

Fig. 7 Shape of the DF laser pulse

3.3 激光光谱分布和近场发散角测量

在混合气体比例和总气压都处于最佳条件下,即 $P(\text{SF}_6):P(\text{D}_2) = 10:1$ 、 $P_{\text{total}} = 10.5$ kPa,利用 DF 激光谱线分析仪对激光输出光谱进行了测量,结果如图 8 所示,在 3.5 ~ 4.2 μm 范围内共获得了 17 条 P 支 DF 激光输出谱线。从分布情况看, P_{2-1} 、 P_{3-2} 振转能级间的谱线较多,输出能量较

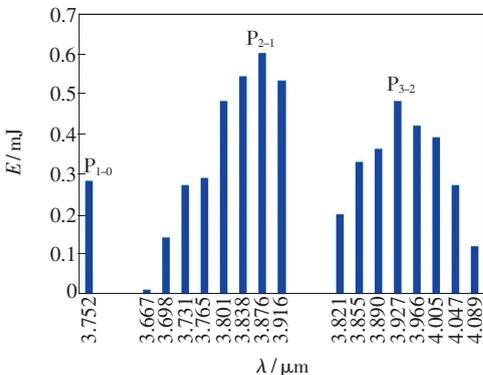


图 8 激光输出谱线

Fig. 8 Laser spectral lines

高,最大能量所对应的谱线波长为 3.876 μm ;而 P_{1-0} 只有一条谱线输出,且能量相对较低。DF 激光由激发态 DF 分子的振转能级跃迁形成,输出光谱线的强度与跃迁几率和激发态分子数的初始分布有关。DF 分子在各振动能级的转动能级上服从玻耳兹曼分布规律,通过非链式化学反应生成的激发态 DF 分子在 2、3 振转能级上的初始分布较多,且跃迁几率大^[17],所以输出激光谱线能量也较大。

在光轴方向上距离输出镜 50, 100, 150 cm 处分别放置热敏纸来测量 DF 激光近场光斑,得到的光斑图形如图 9 所示,DF 激光能量分布均匀。按水平方向和垂直方向分别对光斑大小进行测量,得到结果见表 1。

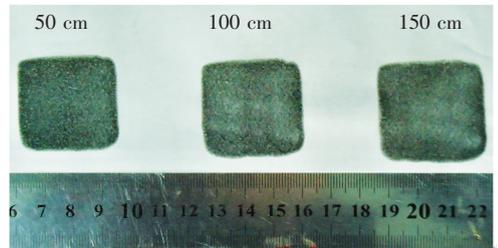


图 9 DF 激光辐射近场光斑

Fig. 9 Near field spot of laser emission

表 1 近场光斑大小

Table 1 Size of the near field spot

Distance/cm	Horizontal size/mm	Vertical size/mm
50	35	34
100	35.5	34.5
150	36	35

根据表 1 中的数据计算出激光水平、垂直方向的近场发散角均为 1 mrad。激光增益区横截面尺寸 40 mm × 40 mm,由热敏纸显示的近场光斑尺寸小于增益区横截面尺寸,这是由于电极间放电不均匀和未放电等离子体对电极边缘激光的屏蔽造成输出激光光斑边缘能量密度非常低,以至于在热敏纸上无法响应,激光中心振荡体积约占增益体积的 77%。

4 结 论

利用改造的 TEA CO₂ 激光系统实现了放电引发非链式脉冲 DF 激光器的运转,通过紫外预电离的方式可实现 DF 激光器的大体积辉光放

电。激光输出能量随注入能量线性增加,但注入能量过大时将引起弧光放电现象,该现象将导致DF激光器输出性能降低,同时缩短激光器单次充气的工作寿命,因而对于特定的气压存在最佳充电电压使激光能量达到最大值。在工作气体比例 $P(\text{SF}_6):P(\text{D}_2)=10:1$ 、总气压10.5 kPa、充电电压为39 kV时,激光器性能最佳,此时的注入能量为172 J,获得的单脉冲输出能量为3.58 J,激光

脉冲宽度为215 ns,峰值功率为16.65 MW,电光转换效率为2.08%。实验得到了17条振转能级跃迁谱线,其中2、3振动能级谱线密集,且能量较大。根据不同位置的光斑尺寸计算出的近场发散角约为1 mrad,且能量分布均匀。上述实验研究为进一步开展非链式脉冲DF激光器的重复频率输出技术研究奠定了基础。

参 考 文 献:

- [1] Greiner N R. Rapid recording of infrared spectra from pulsed chemical lasers [J]. *J. Appl. Phys.*, 1973, 44(7):3202-3204.
- [2] Clayton H B, Frank A. Analysis of differential absorption lidar technique for measurements of anhydrous hydrogen chloride from solid rocket motors using a deuterium fluorine laser [R]. NASA, TN D-8390, 1977.
- [3] Serafetinides A A, Rickwood K R, Papadopoulos A D. Performance studies of a novel design atmospheric pressure pulsed HF/DF laser [J]. *Appl. Phys. B*, 1991, 52(1):46-54.
- [4] Moore H L. Laser technology update: Pulsed impulsive kill laser [C]//NDIA 2000 Joint Services Small Arms Symposium, 2000:18-25.
- [5] Ruan P, Zhang L M, Xie J J, et al. Key technologies of pulsed non-chain DF lasers [J]. *Chinese Optics* (中国光学), 2011, 4(3):313-318 (in Chinese).
- [6] Keng C J, Wang C Y. Status and prospect of electric-discharge non-chain pulsed HF Laser [J]. *Laser & Infrared* (激光与红外), 2003, 33(4):304-306 (in Chinese).
- [7] Brunet H. Improved DF performance of a repetitively pulsed HF/DF laser using a deuterated compound [J]. *SPIE*, 1997, 3092:494-497.
- [8] Tarasenko V F, Panchenko A N. Efficient discharge-pumped non-chain HF and DF lasers [J]. *SPIE*, 2006, 6101:1-9.
- [9] Apollonov V V, Belevtsev A A, Firsov K N, et al. Advanced studies on powerful wide-aperture non-chain HF(DF) lasers with a self-sustained volume discharge to initiate chemical reaction [J]. *SPIE*, 2003, 5120:529-541.
- [10] Ke C J, Zhang K H, Sun K, et al. A periodically pulsed HF/DF gas discharge laser [J]. *Infrared and Laser Engineering* (红外与激光工程), 2007, 36(z1):36-38 (in Chinese).
- [11] Yi A P, Liu J R, Tang Y, et al. Electrically initiated repetitive-pulsed non-chain HF lasers [J]. *Opt. Precision Eng.* (光学精密工程), 2011, 19(2):360-366. (in Chinese)
- [12] Huang K, Tang Y, Yi A P, et al. Characteristics of non-chain discharge-pumped pulse HF laser [J]. *Infrared and Laser Engineering* (红外与激光工程), 2010, 39(6):1026-1029 (in Chinese).
- [13] Ke C J, Li C, Tan R Q, et al. Experimental research on electric-discharge non-chain pulsed DF lasers [J]. *J. Optoelectronics · Laser* (光电子·激光), 2010, 21(2):172-174 (in Chinese).
- [14] Borisov V P, Burtsev V V, Velikanov S D, et al. Electric-discharge DF laser with a pulsed energy of the order of 10 J [J]. *Quantum Electronics*, 2000, 30(3):225-228.
- [15] Keng C J, Wang C Y, Wu J. Influence of mixture component and peaking capacitor on the performance of an UV preionized pulsed HF laser [J]. *Chin. J. Lasers* (中国激光), 2003, 30(1):1-4 (in Chinese).
- [16] Apollonov V V, Firsov K N, Kazantsev S Y, et al. Scaling up of non-chain HF (DF) laser initiated by self-sustained volume discharge [J]. *SPIE*, 2000, 3886:370-381.
- [17] Cohen N. A review of rate coefficients in the $\text{D}_2\text{-F}_2$ chemical laser system [R]. TR-0077(2603)-3, The Aerospace Corporation, El Segundo, California, 1972.