

放电引发非链式 DF 激光器脉冲特性研究

阮 鹏^{1,2}, 谢冀江², 潘其坤², 王春锐², 刘春玲¹, 柴 源¹

(1. 吉林师范大学 信息技术学院, 吉林 四平 136000;
2. 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)

摘 要: 研究了工作气体分压比、总气压、充电电压及输出镜反射率对激光单脉冲能量、脉冲宽度及峰值功率的影响。实验结果表明: 对于输出能量, 工作介质 SF₆ 和 D₂ 的分压比为 10:1 及输出镜反射率为 30% 时最佳, 正常辉光放电状态下提高充电电压有利于增加单脉冲能量, 且对于每个电压存在使能量最大的最佳气压值。激光脉冲宽度随工作气体分压比及总气压的增大不断变窄, 但随充电电压和输出镜反射率的升高不断变宽。综合考虑输出能量和激光脉宽, 激光峰值功率的总体变化趋势与能量一致, 但二者取得最大值所对应的气体参数及输出镜参数存在差别。

关键词: 中红外激光; 非链式 DF 激光器; 脉冲特性

中图分类号: TN248.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)12-3554-05

Research on pulse characteristics of non-chain pulsed DF laser

Ruan Peng^{1,2}, Xie Jijiang², Pan Qikun², Wang Chunrui², Liu Chunling¹, Chai Yuan¹

(1. College of Information & Technology, Jilin Normal University, Siping 136000, China;
2. State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: The effects of mixture gas ratio, gas pressure, charging voltage and output mirror reflectivity on laser pulse characteristics were studied. High energy was achieved when the ratio and output mirror reflectivity are 10:1 and 30%, respectively. The energy can be increased by raising charging voltage under the normal glow discharge condition, and there exists an optimum gas pressure for each voltage to obtain the highest energy. As for laser pulse width, it can be shortened by increasing mixture ratio and total gas pressure, while stretched by increasing charging voltage and output mirror reflectivity. Taking both laser energy and pulse width, the variation trend of laser peak power is similar with the output energy on the whole, but the parameters of mixture gas and output mirror which make the energy or the peak power reaching maximum are different.

Key words: mid-infrared laser; non-chain DF laser; pulse characteristics

收稿日期: 2015-04-04; 修订日期: 2015-05-01

基金项目: 科技部国际合作专项基金(2011DFR10320)

作者简介: 阮鹏(1985-), 女, 博士, 主要从事脉冲激光器及其应用技术研究。Email: eagle_laser@163.com

0 引言

3~5 μm 中红外波段是大气重要的红外传输窗口之一,其优越的传输效率使得该波段的激光在光谱学、激光雷达、激光测距、大气监测及军事等诸多领域具有重要的应用价值和前景^[1-5]。鉴于该波段的重要性,国内外激光研究机构对该波段的激光进行了大量的研究^[6-12]。

目前,中红外激光主要通过线性光学和非线性光学两大途径产生,其中线性光学方法包括:气体激光器、化学激光器、固体激光器、自由电子激光器以及半导体量子级联激光器;而非线性光学方法主要利用物质的非线性效应,通过倍频、差频等频率转换方式产生中红外光源,如 CO_2 气体激光倍频技术、差频激光技术和 OPO 非线性光学变换技术。众多中红外激光光源各有优缺点,但在高功率、高能量中红外激光光源的选择上,氟化氘(DF)化学激光器占据绝对优势。

DF 激光器按化学反应类型分为链式和非链式两类,其中链式 DF 激光器建立在工作物质的链式反应基础上,其输出能量并不直接受注入能量的限制,因而能够实现高功率、高能量、高效率输出,曾被美国及以色列军方作为高能激光战术武器用在军事对抗领域。但链式 DF 激光器可能存在支链反应,在气体配置和存放方面存在安全隐患。非链式 DF 激光器采用无毒、无腐蚀性的 SF_6 和 D_2 作为激光介质且用于泵浦的化学反应不存在支链反应,因而具有反应可控不易爆炸、结构紧凑、操作简单等优点,并能达到与链式 DF 激光器相当的峰值功率。目前,非链式脉冲 DF 激光器能够实现百焦耳量级、兆瓦水平的激光输出,而其他中红外激光光源受各种技术条件的限制,无论是能量还是功率水平远远落后 DF 激光器。因而 DF 激光器从诞生至今将近 50 年的时间里一直备受国内外研究者的青睐。

单脉冲能量和峰值功率都是非链式脉冲 DF 激光器在各项应用中的重要指标,但受激光脉冲宽度的影响二者通常不能同时达到最大,且在众多应用中,有的对激光能量有较高的要求,有的则需要较高的峰值功率,因而对 DF 激光器的脉冲输出特性进行分析具有重要的实际意义。文中在实验室经过改造的 TEA CO_2 激光器平台上,通过实验研究了气体

参数、充电电压及输出镜反射率对非链式 DF 激光器脉冲输出特性的影响。

1 实验装置

图 1 为放电引发非链式脉冲 DF 激光器脉冲特性实验装置示意图。

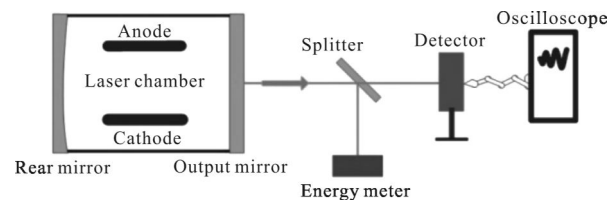


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Scheme of experimental device

激光器采用紫外光预电离横向放电结构,主电极为对称放置的改进型 Chang 氏不锈钢电极,预电离电极为双侧火花针阵列,放电区尺寸为 $120\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 4\text{ cm}$,能够提供 1.92 L 的增益体积。激光器储能放电系统采用倒腔式 LC 反转电路,能够提供 0~50 kV 范围的充电电压。光学谐振腔采用内腔式结构,由反射率为 99% 的凹面镀金反射镜和 CaF_2 平面输出耦合镜对激光腔两端进行密封,腔长 2.2 m。激光器输出的光束经分束镜分成两路,其中一路由能量计进行激光能量检测,另一路进入 PC 型室温 HgCdTe 探测器进行脉冲波形探测,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。为了避免环境中强烈的电磁场对激光脉冲波形测量的干扰,激光脉冲波形测量过程放在屏蔽室中进行。为了减小误差,对于激光输出能量和脉宽的每个测量点测量次数大于 5 次,最后取平均结果。激光峰值功率采用计算方式获得,即每个测量点的激光峰值功率等于该测量点的单脉冲能量除以脉冲宽度。

2 实验结果与分析

2.1 工作气体分压比对脉冲特性的影响

为了消除气压变化对激光脉冲特性的影响,实验中保持总气压为 11 kPa,通过改变 SF_6 和 D_2 的分压比来研究激光单脉冲能量和脉宽随工作气体分压比的变化情况。实验中的输出镜反射率为 30%,选取的工作电压为 37 kV 和 39 kV,总气压为 11 kPa 时工作气体在这两个充电电压下放电状态比较好。对实

验数据进行处理,得到 37 kV 和 39 kV 时激光单脉冲能量、脉宽及峰值功率随气体分压比的变化关系如图 2 所示。

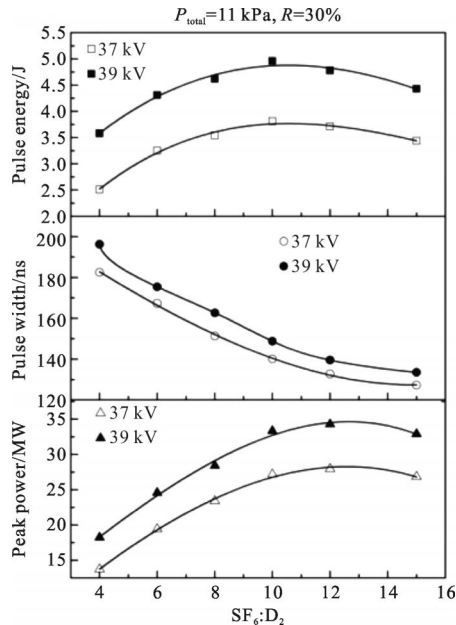


图 2 激光脉冲特性与工作气体分压比的关系

Fig. 2 Relationship between laser pulse characteristics and mixture gas ratio

研究发现,两个电压下的激光能量随工作气体分压比的变化并不是单调的,而是在中间存在一个最大值,即 $SF_6:D_2=10:1$ 时激光能量最高。这主要是激发态 DF 分子的抽运和弛豫效应相互竞争的结果,在工作气体分压比为 10:1 时 F 原子产额与 D_2 含量匹配,此时抽运过程和弛豫过程的速率差最大。就激光脉冲宽度而言, SF_6 与 D_2 的比例越大脉宽反而越窄,电压为 39 kV 时当气体分压比从 4:1 提高到 15:1 时,激光脉冲宽度从 197 ns 降到 113 ns。这可以从 SF_6 的强电负性对放电区的放电稳定性来解释。由于一定电压下的注入电能为定值,当气体分压比较低时, SF_6 含量相对较低,电子与 SF_6 分子碰撞的平均自由程较大,电子平均能量相对较高,电子对 SF_6 的电离作用大于吸附作用,稳定放电维持时间较长,因而脉宽较宽;随着分压比的增大,混合气体中的 SF_6 含量不断增加,电子碰撞平均自由程下降导致电子携带的平均能量也下降, SF_6 的电离过程相对于吸附过程不断减弱,放电维持时间变短,因而脉宽不断缩短。

综合气体分压比对 DF 激光单脉冲能量和脉冲宽度的影响,对于该实验装置,当能量在最大值附近

1 J 范围内变动时,提高气体分压比有利于提高激光峰值功率。但气体分压比不能过高,脉宽在过高的比例下将趋近饱和而激光能量不断下降,最终反而导致激光峰值功率下降。

2.2 总气压对脉冲特性的影响

保持输出镜反射率 $R=30\%$, 在最佳气体分压比条件下研究了激光脉冲特性随总气压的变化关系,实验结果如图 3 所示。实验过程中总气压变化范围为 7~12 kPa, 根据该气压范围选用的工作电压为 33 kV 和 35 kV,在这两个充电电压下所有气压的气体都能正常工作。

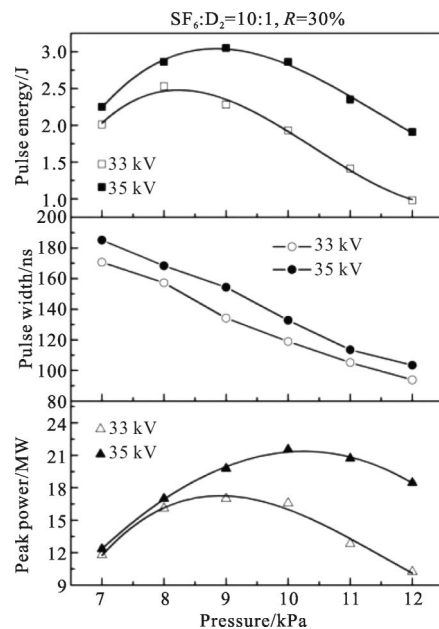


图 3 最佳气体分压比下的激光脉冲特性与总气压的关系

Fig. 3 Relationship between laser pulse characteristics and total gas pressure under the optimum gas ratio

由图 3 可以看出,激光能量对混合气体总气压的变化非常敏感,对于每一个电压均存在一个最佳气压使激光能量最大,且不同电压下使激光能量达到最大值所对应的总气压也不相同。由于激光能量主要受 F 原子产额以及 F 与 D_2 比例两个因素的影响,在最佳气体分压比情况下,激光能量只受 F 原子产额影响。而 SF_6 浓度和高能电子数目是影响 F 原子产额的关键所在,理论上 SF_6 浓度越高 F 原子产额也越高,但增加浓度会导致总气压增加,使气体分子碰撞加剧,弛豫过程增强,从而导致激光能量下降。而在 SF_6 浓度一定情况下,电压太低无法形成大量的高能电子,从而不能有效产出 F 原子;电压太

高,注入的电能除了将 SF_6 解离为 F 原子外,有相当一部分能量会将 SF_6 电离为 F^+ , 导致 F 原子产额变低,激光能量反而下降。因此,对于特定气压的混合气体,存在最佳充电电压使放电状态和 F 原子产率达到最佳,即工作气体存在最佳 E/P 值。

不同电压下的激光脉冲宽度都是随总气压的升高不断变窄。这是由于混合气体的总气压增大时,参与碰撞的气体分子增多,导致气体间的平均碰撞时间缩短,加快了激发态 DF 分子的碰撞弛豫过程,因此激光脉宽逐渐缩短。另外,总气压增大将使 SF_6 浓度增加,导致放电维持时间变短,从而缩短激光脉宽。

激光峰值功率和单脉冲能量变化一样,也存在一个最佳气压值,但不同的是:使峰值功率达到最大值的气压点与使能量达到最大值的气压点存在偏差,如 35 kV 充电电压下激光能量在气压为 9 kPa 时最大,而峰值功率则在 10 kPa 时最大。这个偏差主要源于激光脉冲宽度的变化,且当激光能量在最大值附近的小范围变动时,提高气压能够提升激光峰值功率。

2.3 充电电压对脉冲特性的影响

保持 SF_6 分压为 10 kPa, 输出镜反射率为 30%, 在最佳工作气体分压比下通过改变充电电压研究了激光单脉冲能量、脉宽、峰值功率随充电电压的变化关系,实验结果如图 4 所示。

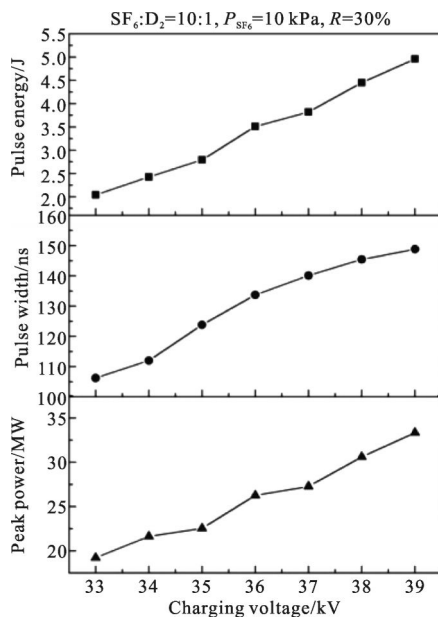


图 4 激光脉冲特性与充电电压的关系

Fig.4 Relationship between laser pulse characteristics and charging voltage

激光输出能量和脉冲宽度随充电电压的变化趋势一致,即电压越高激光能量和脉宽越大。这主要与 F 原子产率有关,而 SF_6 浓度和放电区高能电子数是影响 F 原子产率的关键因素,当 SF_6 浓度一定时就只有高能电子数这唯一的影响因素。当充电电压较低时,注入到放电区的电能很少,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 分子解离为 F 原子的能量阈值,能量相对较低的电子被电负性极强的 SF_6 分子吸附损耗掉,F 原子产率受到限制,导致生成的激发态 DF 分子数密度下降,即反转粒子数密度减少,故激光辐射过程很快停止,单脉冲能量较低且激光脉宽较窄。随着充电电压的升高,注入能量不断增加使高能电子数得以提高,因而生成的 F 原子数及化学反应生成的激发态 DF 分子数也随之增多,反转粒子数密度不断增加,故激光辐射过程得以持续发展,激光能量不断增加而脉宽不断展宽。

由能量和脉宽数据计算出的激光峰值功率随充电电压的变化趋势也是递增的,虽然增大电压会使激光脉宽拉长,但脉宽的变化量小于激光能量的增加量,因而最终会使激光峰值功率提高。

2.4 输出镜反射率对脉冲特性的影响

在最佳工作气体分压比下, SF_6 分压为 10 kPa、充电电压为 39 kV 时,实验研究了输出镜反射率对激光器输出能量和脉冲宽度的影响。选用的 CaF_2 输出镜镀膜后的反射率分别为 10%、20%、30%、40%、50%和 60%,实验结果如图 5 所示。

在其它条件保持不变的情况下,输出镜反射率越大光在腔内的增益损耗比越大,激发态 DF 分子粒子数反转密度也越大,脉冲建立时间缩短,能够尽可能多的利用激发态 DF 分子,从而使脉冲前沿上升。另外,高反射率下光子的单次输出量减小,因此激光输出时间变长,即激光脉宽拉长。就激光能量而言,存在最佳输出镜反射率 30%。反射率对激光能量的影响主要受反转粒子束增益维持时间与光子在光腔衰荡时间的影响,当二者达到一致时激光输出能量达到最佳值。低反射率时增益维持时间大于光子衰荡时间,而高反射率时情况恰好相反,因而存在一个最佳输出镜反射率使单脉冲输出能量达到最大。关于激光峰值功率的计算结果表明:当输出镜反射

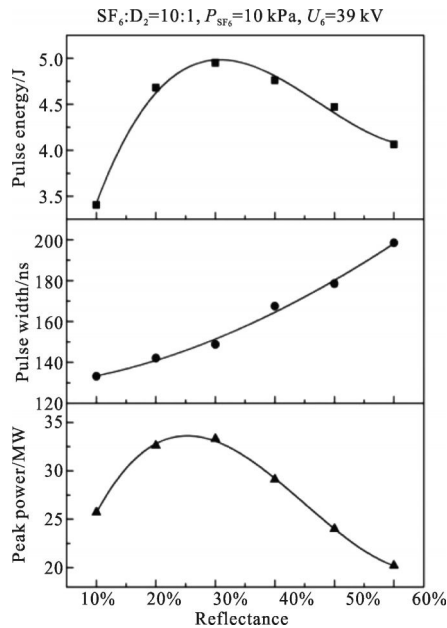


图 5 激光脉冲特性与输出镜反射率的关系

Fig.5 Relationship between laser pulse characteristics and output mirror reflectivity

率处于 20%~30% 范围内时激光峰值功率最大。在实际应用中,应根据需要选择合适的反射率参数。

3 结论

文中通过实验研究了气体参数、电压参数和输出镜参数对非链式 DF 激光脉冲特性的影响。优化气体参数和光学参数都能使激光输出能量达到最大值,前者影响的是 F 原子产率及由此产生的激发态 DF 分子密度;后者通过平衡增益维持时间与光子衰荡时间来达到能量最大化。对于文中的实验条件,存在最佳气体分压比 10:1 及最佳输出镜反射率 30% 使激光输出能量最大。提高充电电压可以使单脉冲能量、脉宽、峰值功率同时增加,但电压过高反而使放电由于产生弧光而降低均匀性和稳定性,能量、脉宽及峰值功率均下降。虽然增加工作气体分压比和总气压都能缩短脉宽,但由于气体参数变化引起的能量的变化量小于脉宽的变化量,因而峰值功率的总体变化趋势与能量一致,只是最大值点对应的气体参数值存在一定偏差。在实际应用中,可以根据需要进行气体参数、电压参数和光学参数的设置,使其处于最佳工作状态。

参考文献:

[1] 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.

- [2] Serafetinides A A, Rickwood K R, Papadopoulos A D. Performance studies of novel design atmospheric pressure pulsed HF/DF laser[J]. *Appl Phys*, 1991, B(52): 46-54.
- [3] Moore H. Laser technology update: pulsed impulsive kill laser[C]//NDIA 2000 Joint Services Small Arms Symposium, 2000: 18-25.
- [4] Beaulieu A J. A practical DF laser for ranging applications[C]//SPIE, 1986, 663: 8-13.
- [5] Velikanov S D, Elutin A S, Kudryashov E A, et al. Use of a DF laser in the analysis of atmospheric hydrocarbons[J]. *Quantum Electronics*, 1997, 27(3): 273-276.
- [6] Tarasenko V F, Panchenko A N. Efficient discharge-pumped non-chain HF and DF lasers[C]//SPIE, 2006, 6101: 1-9.
- [7] 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[C]//SPIE, 2003, 5120: 529-541.
- [8] 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.
- [9] Ke Changjun, Li Chen, Tan Rongqing, et al. Experimental research on electric-discharge non-chain pulsed DF lasers [J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2010, 21 (2): 172-174. (in Chinese)
- 柯常军, 李晨, 谭荣清, 等. 电引发非链式脉冲 DF 激光器实验研究[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(2): 172-174.
- [10] Huang Ke, Tang Ying, Yi Aiping, et al. Characteristics of non-chain discharge-pumped pulse HF laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1026-1029. (in Chinese)
- 黄珂, 唐影, 易爱平, 等. 非链式电激励脉冲 HF 激光器[J]. *红外与激光工程*, 2010, 39(6): 1026-1029.
- [11] Ruan Peng, Xie Jijiang, Pan Qikun, et al. Dynamical model of non-chain pulsed DF laser [J]. *Acta Phys Sin*, 2013, 62 (9): 094208. (in Chinese)
- 阮鹏, 谢冀江, 潘其坤, 等. 非链式脉冲 DF 化学激光器反应动力学模型[J]. *物理学报*, 2013, 62(9): 094208.
- [12] Pan Qikun, Xie Jijiang, Zhang Laiming, et al. Investigation on gain distribution characteristic of non-chain pulsed DF laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 360-364. (in Chinese)
- 潘其坤, 谢冀江, 张来明, 等. 非链式脉冲 DF 激光器增益分布特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 360-364.