

200 W 重复频率中红外氟化氢化学激光器

黄超*, 黄珂, 易爱平, 马连英, 朱峰, 李高鹏

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 为了获得高重复频率高功率中红外氟化氢(HF)激光输出,采用自动紫外预电离和对称 Chang 氏电极结构,制备了闭环的非链式重复频率 HF 激光器,并对其进行了详细介绍。实验研究了激光器的输出特性和重复频率运行特性,获得了激光能量随重复频率的变化规律。在增益区气体流速为 16 m/s,工作电压为 25 kV,总气体压强为 8.5 kPa、物质的量分数分别为 92%和 8%的 SF₆和 C₂H₆混合气体条件下,实现了重复频率为 150 Hz、平均功率为 200 W 的 HF 激光输出。

关键词 激光器;中红外激光;化学激光;非链式 HF 激光;放电引发;紫外预电离

中图分类号 TN249

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.0801005

200 W Mid-Infrared HF Chemical Laser with Repetition Rate

Huang Chao*, Huang Ke, Yi Aiping, Ma Lianying, Zhu Feng, Li Gaopeng

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

Abstract To obtain a mid-infrared HF laser with high repetition rate and high power, a closed-circle pulse-periodical non-chain HF chemical laser with self-acting ultraviolet pre-ionization and a pair of symmetrical Chang electrodes is developed. The design and performance of the developed laser are described in detail. An experimental study on the laser output and repetition rate operation characteristics demonstrates the effect of repetition rate on pulse energy. The average power for a HF laser with a repetition rate of 150 Hz is approximately 200 W when the gas flow speed is 16 m/s in the gain region, working voltage is 25 kV, and the total mole fraction pressure of 92% SF₆ and 8% C₂H₆ gas mixture is 8.5 kPa.

Key words lasers; mid-infrared laser; chemical laser; non-chain HF laser; electric discharge; ultraviolet pre-ionization

OCIS codes 140.3070; 140.1550; 140.3538

1 引 言

中红外激光在激光大气探测、激光光谱、激光医学和光电对抗等领域具有良好的应用前景。目前中红外激光的主要输出设备有氟化氢/氟化氙(HF/DF)化学激光器^[1-5]、一氧化碳(CO)和二氧化碳(CO₂)倍频气体激光器^[6]、固体块状激光器^[7-8]、半导体激光器^[9]和光纤激光器^[10]。其中 HF 化学激光器可运行在放电引发非链式模式,具有高峰值功率、大能量、高重复频率等优点,是现阶段脉冲红外激光领域的研究热点之一。

放电引发非链式 HF 激光器起源于 20 世纪 60 年代,通过改进放电引发方式和优化气体介质,单脉冲能量得到了明显提升,已达到数十焦耳至数百焦耳,有望突破 1000 J 的量级。从应用需求和实用化考虑,要求激光器具有良好的重复频率运行特性,但是同时获得高能量和高重复频率激光输出的难度非常大。自 20 世纪 90 年代起,学者们致力于高功率高重复频率放电引发非链式 HF 激光的研究。典型的研究成果有:20 世纪 90 年代法国 Brunet 等^[11]利用内循环模式以及网状电极紫外预电离结构,实现了放电激励 HF 激光器高功率高重复频率运行,单

收稿日期: 2018-12-14; 修回日期: 2019-01-21; 录用日期: 2019-03-04

基金项目: 国防科技创新特区项目、激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM1610)

* E-mail: huangchao@nint.ac.cn

脉冲能量超过 5 J,工作频率为 100 Hz;2000 年,法国巴黎大学等离子体物理实验室的 Lacour 等^[12]也成功研制出大脉冲能量的重复频率 HF 激光器,他们采用外部循环方式和网状电极紫外预电离结构,单脉冲能量大于 20 J,工作频率为 12 Hz;2003 年,俄罗斯大电流所的 Alekseev 等^[13]利用紫外预电离和平板电极,研制出单脉冲能量大于 1 J、重复频率为 1~2 Hz 的 HF 激光器;2010 年,俄罗斯的 Bulaev 等^[14]研制出高功率重复频率 HF 激光器,在没有预电离的情况下,通过自引发体放电技术,实现了脉冲能量为 67 J、重复频率为 20 Hz 的 HF 激光输出;2015 年,Bulaev 等^[15]采用新型全固态电源技术,在储能为 880 J 的情况下获得了 25 Hz 高功率重复频率 HF 激光输出,但是没有报道激光能量的具体数值。

国内在放电引发非链式 HF 化学激光器方面的研究工作起步较晚,主要有西北核技术研究所、中国科学院安徽光学精密机械研究所和中国科学院电子学研究所^[16-19]等单位开展了相关研究工作。目前仅西北核技术研究所获得了 100 Hz 高重复频率的 HF 激光输出,但是单脉冲能量还比较低,只有几百毫焦。

纵观国内外的研究情况,脉冲能量在焦耳级以上重复频率为 100 Hz 量级的高功率高重复频率 HF 激光器的报道比较少,仅 Brunet 等^[11]报道了相关工作,但是其采用的网状电极寿命较短,不满足激光器长时间应用的要求。本文利用自动紫外预电离电荷转移电路和 Chang 氏电极结构,建立紧凑型高功率高重复频率放电引发 HF 激光器,并针对激光器的输出特性和重复频率展开了实验研究,获得了重复频率为 150 Hz、脉冲能量为 1.35 J 的 HF 激光输出。

2 激光装置

激光器采用电容储能的电荷转移型电路及紫外自动预电离结构,其原理电路见图 1。为了获得较大的脉冲能量输出,激光器的储能电容 C_0 由 20 个电容值为 10 nF 的无感陶瓷电容并联组成。主电极采用一对对称的长条形 Chang 氏不锈钢电极,电极长 600 mm,宽 30 mm(其平顶部分为 20 mm),电极间隙为 25 mm,放电增益区的体积约为 600 mm×20 mm×25 mm。为了保证激光器的电气绝缘,激光器放电腔室两端均设计有 80 mm 长的电气绝缘区,放电腔室长约为 760 mm。

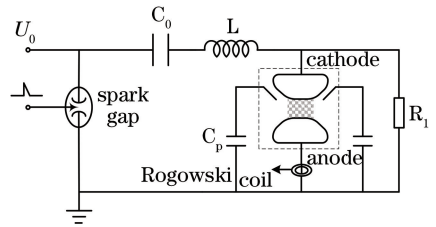


图 1 放电引发 HF 激光器的原理电路

Fig. 1 Principle circuit of electric discharge HF laser

为了在增益区获得均匀体放电,实现均匀抽运,预电离结构尤为重要,激光器采用 64 个独立放电单元作为紫外预电离光源,它们均匀分布在增益区两侧,采用这 64 个独立放电单元产生的紫外光同步照射增益区,以获得均匀预电离效果。每个独立放电单元由一个针形预电离电极和高压电极组成,间隙距离为 3 mm;预电离电极的另一端通过峰化电容 C_p 耦合接地, C_p 为 2 nF 的高压陶瓷电容。采用文献^[16]报道的方法,考虑光子能量为 5~10 eV 的紫外光,数值模拟了激光器的预电离效果,如图 2 所示,其中 x 表示沿电极宽度方向的尺寸, y 表示沿电极长度方向的尺寸, z 表示垂直于阴极表面方向的高度。在模拟过程中,紫外光源由 64 个独立的预电离放电单元组成,将每个预电离放电单元简化为一个点光源。激光介质选择压强为 8.5 kPa 六氟化硫(SF_6)和乙烷(C_2H_6)混合气体,由于 C_2H_6 气体的物质的量分数较小(8%),该模型可简化为紫外光电离 SF_6 分子的过程,主要包括 SF_6 分子的光电离和光吸收、 SF_6 分子的电子吸附、 SF_6^+ 和电子的复合,以及 SF_6^- 解离成为 SF_6 分子和自由电子等过程。由图 2(a)可知,增益区两侧越靠近预电离放电单元位置的预电离电子浓度(n_e)越大,在光轴位置($x=0$)处,预电离电子浓度最小,平局值约为 $1.2 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$;图 2(b)展现出距离阴极表面越远,预电离电子浓度越小,阳极表面附近预电离电子浓度的平均值约为 $1.0 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$,另外沿着光轴方向的预电离电子浓度随预电离放电单元空间分布呈周期性变化。模拟结果表明,激光器设计 64 个独立放电单元作为预电离点光源,在整个增益区内产生的预电离电子浓度达到了 10^9 cm^{-3} 量级,预电离效果较为明显,对大体积均匀放电形成具有积极作用,有利于输出高重复频率大脉冲能量的放电引发非链式 HF 激光。

激光器运行时,主开关被击穿,主电容的电压反向,并迅速作用到激光器放电腔室的高压电极上,各个预电离间隙同步导通,形成 64 个独立的放电单元,在激光器放电腔内形成良好的预电离效果。同

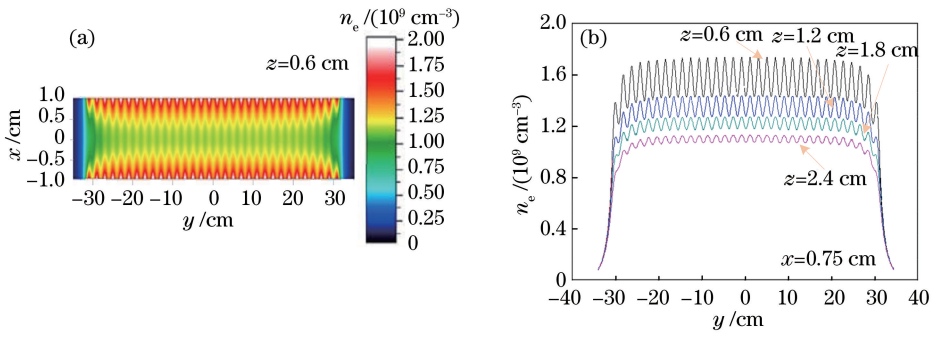


图 2 增益区电子浓度分布。(a) $z=0.6$ cm; (b) $x=0.75$ cm

Fig. 2 Electronic concentration distributions of gain region. (a) $z=0.6$ cm; (b) $x=0.75$ cm

时,采用储能电容给峰化电容 C_p 充电,然后激光器主电极导通,在放电腔室形成均匀体放电。当激光

器形成均匀体放电时,放电等离子体的荧光照片和典型放电波形见图 3。

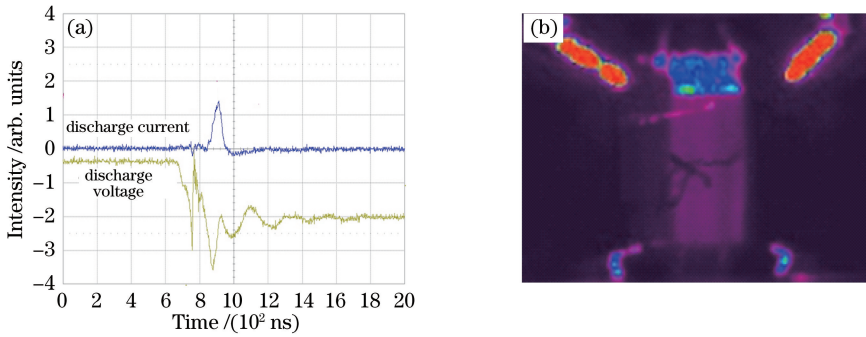


图 3 放电波形和体放电照片。(a)放电波形;(b)体放电照片

Fig. 3 Waveform of discharge and corresponding photograph of volume discharge.

(a) Discharge waveform; (b) photograph of volume discharge

激光器的光学谐振腔为一对平平镜组成的介稳腔,全反镜为镀金平面镜,耦合输出镜为平面 GaF₂ 玻璃。实验中采用波兰 VIGO 公司生产的响应光谱为 $3\sim 5 \mu\text{m}$ 的 PDI-2TE-5 型碲锌铬光电探测器

测量激光输出信号波形,利用热敏纸记录 HF 激光的近场光斑,典型实验结果如图 4 所示。激光器输出的激光脉冲宽度约为 150 ns,近场光斑强度分布均匀,尺寸约为 $22 \text{ mm} \times 23 \text{ mm}$ 。

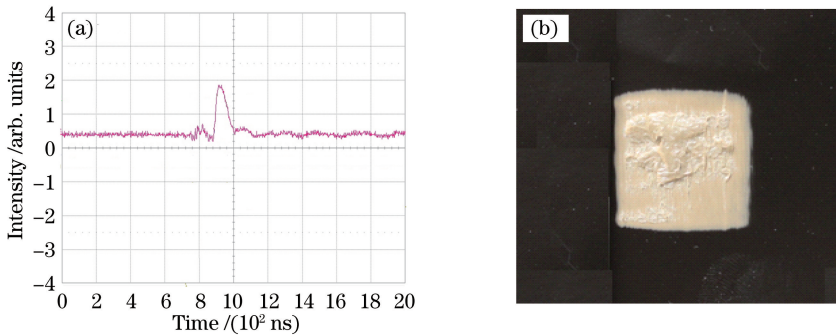


图 4 激光波形和光斑形貌。(a)激光波形;(b)近场光斑

Fig. 4 Laser waveform and near field light spot. (a) Laser waveform; (b) near field light spot

由于 HF 激光介质属于消耗型激光介质,且放电过程中大量的废热沉积在气体中,因此在激光器重复频率运行过程中,需要对增益区气体进行快速置换,为后续脉冲提供新的激光介质气体,同时实现对增益区气体的热处理,避免介质升温对激光能量

的影响。根据文献[17]的研究结果,要想实现增益区气体介质的有效置换,流经增益区气体的流速必须满足

$$v \geq k_1 l f, \quad (1)$$

式中: v 为增益区气体流速; k_1 为气体置换率,通常

选择 2~3 倍; l 为放电区宽度; f 为激光器的重复频率。(1) 式为经验公式, 与放电腔的结构有直接关系, 对于所设计的放电腔结构, 放电区宽度应包括两侧预电离结构的宽度, 故 l 约为 36 mm。为了在增益区形成大体积流量的均匀气流, 激光器采用闭环流动方式, 其外形结构如图 5 所示, 选用两台轴流风机作为气体流速驱动装置, 并联驱动激光器内部混合气体快速流动, 单台轴流风机的最大体积流量为 150 L/s, 总流量可达到 300 L/s。利用皮托管测量增益区气流的总压强和静态压强差 Δp , 进而可计算得到增益区的气体流速, 即

$$v = k_2 \sqrt{2\Delta p / \rho}, \quad (2)$$

式中: k_2 为皮托管系数, 约为 0.99; ρ 为气体密度。增益区沿光轴方向的气体流速分布见图 6, 可以看到, 激光器增益区的气体流速可达到 16 m/s, 且流场均匀性较好, 计算得到激光器重复频率达到 150 Hz 时增益区的气体置换率为 3 倍。

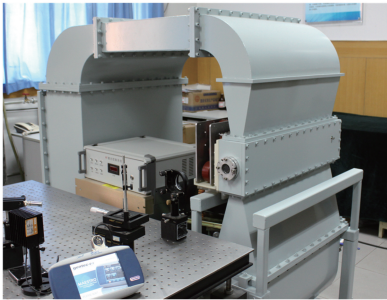


图 5 放电引发 HF 激光器的结构图

Fig. 5 Structural diagram of electric discharge HF laser

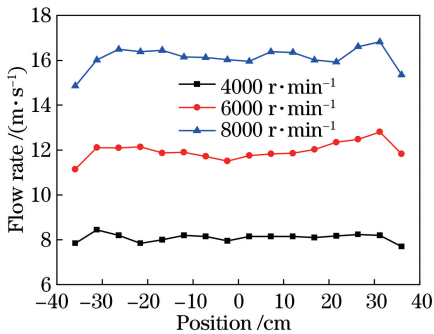


图 6 增益区气体流速分布

Fig. 6 Flow speed distribution in gain region

3 激光输出特性

非链式脉冲 HF 激光器采用 SF_6 和 C_2H_6 混合气体作为工作介质, 其中 C_2H_6 气体的物质的量分数为 8%, 不同电压和气压条件下的激光能量见图 7。激光器的电光效率可表示为

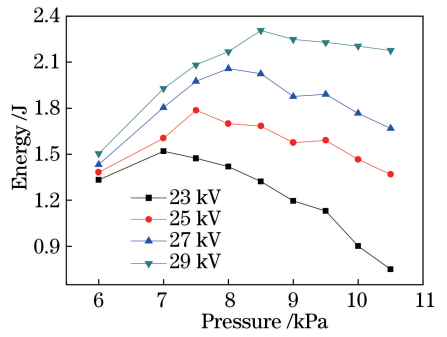


图 7 不同条件下的激光能量

Fig. 7 Pulse energies under different conditions

$$\eta = \frac{2W}{C_0 U_0^2} \times 100\%, \quad (3)$$

式中: W 为激光脉冲能量; U_0 为储能电容的充电电压。各实验条件下激光器的电光效率 η 如图 8 所示。从图 7 可以看出, 当电压一定时, 改变激光器混合气体气压, 激光能量先增大后减小, 存在一个最大值。这可能是因为当气压较低时, 电弧放电融入体放电阶段, 致使沉积到体放电阶段的能量显著降低, 产生的 F 原子和激发态的 HF 分子的数量较少, 激光能量较小; 随着气压逐渐增大, 电弧放电效应逐渐减弱, 沉积在体放电中的能量随之增加, 解离的 F 原子和生成的激发态 HF 分子的数量增多, 激光能量增大; 当气压达到特定值时, 电弧放电效应基本消除或与体放电完全分离, 沉积到体放电阶段的能量最大, 激光能量最高, 定义此处的气压为该电压下的最佳气压, 其所对应的折合场强 E/p (激光器主电极间电场强度 E 与气压 p 的比值) 为临界 E/p_{opt} ; 继续提高气压, 电子的平均自由程减小, 电场加速电子的作用减弱, SF_6 气体吸附电子的能力加强, 导致体放电强度降低, 剩余电压增大, 沉积到体放电阶段的能量减少, 从而降低 F 原子产额和

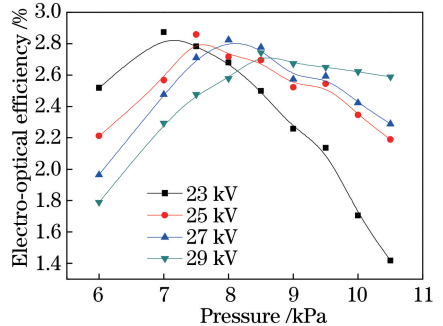


图 8 不同条件下 HF 激光器的电光效率曲线

Fig. 8 Electro-optical efficiency curve of HF laser under different conditions

减少激发态 HF 分子的数量,致使激光能量降低,最终激光能量随气压的增大呈现出先增大后减小的趋势。提高电压,激光器的最佳气压随之增加,激光能量迅速增大,最大能量约 2.3 J,对应的峰值功率约为 12.7 MW。从图 8 可以看出,在临界 E/p_{opt} 条件下,激光器的电光效率最佳,但是激光器的最佳电光效率却随电压的增加略有降低。例如:当工作电压为 23 kV 时,激光器的最佳电光效率约 2.87%;而当电压为 29 kV 时,激光器的最佳电光效率约为 2.75%。从图 9 可以看出,在激光器工作电压范围内,不同电压下的临界 E/p_{opt} 基本相同,约为 $1.32 \text{ kV}/(\text{cm}\cdot\text{kPa})$,因此认为激光器处于临界 E/p_{opt} 状态时,各电压下激光器的储能均被沉积到体放电阶段。但是当电压较高时,放电电子碰撞离解 SF_6 分子时产生的 F 离子的概率有所增加,同时随着混合气体气压的增大, SF_6 等气体分子碰撞淬灭的概率增大,故激光器的最佳电光效率会有所降低。

4 重复频率运行结果

为了实现高重复频率的激光输出,理想情况下放电引发非链式脉冲 HF 激光器应选择运行在临界 E/p_{opt} 状态下,然而在激光器重复频率运行过程中,放电腔室很难实现完全恢复,难以保证临界 E/p_{opt} 条件下激光器重复频率运行中每个脉冲均形成稳定的体放电,这不利于激光能量稳定输出。为此当激光器重复频率运行时,通常会降低 E/p 值,实验中

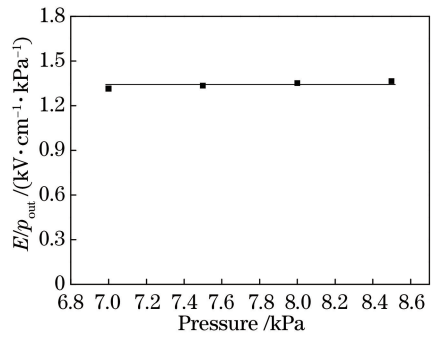


图 9 不同气压下的 E/p_{opt}

Fig. 9 E/p_{opt} under different gas pressures

选择 25 kV 电压和 8.5 kPa 的混合气体压强来开展 HF 激光重复频率输出特性的研究。当增益区气体流速约为 16 m/s 时,激光器不同重复频率连续输出 50 个脉冲的能量曲线见图 10;激光器重复频率为 150 Hz 时连续输出 50 个脉冲的放电叠加波形和激光信号波形序列如图 11。从图 10 可以看出,在当前的实验条件下,HF 激光器在重复频率为 50~150 Hz 范围内均实现了稳定输出,但是随着重复频率的增大,激光器的平均能量有所下降,当激光器重复频率达到 150 Hz 时,激光器的平均能量约为 1.35 J,比 50 Hz 重复频率运行的平均能量(1.55 J)降低了 12.9%。这可能是因为是在放电引发非链式 HF 激光器重复频率运行过程中,除气体置换速率外,脉冲能量还与单位体积内的沉积能量有关。在相同的重复频率下,单位体积内沉积的能量越多,实

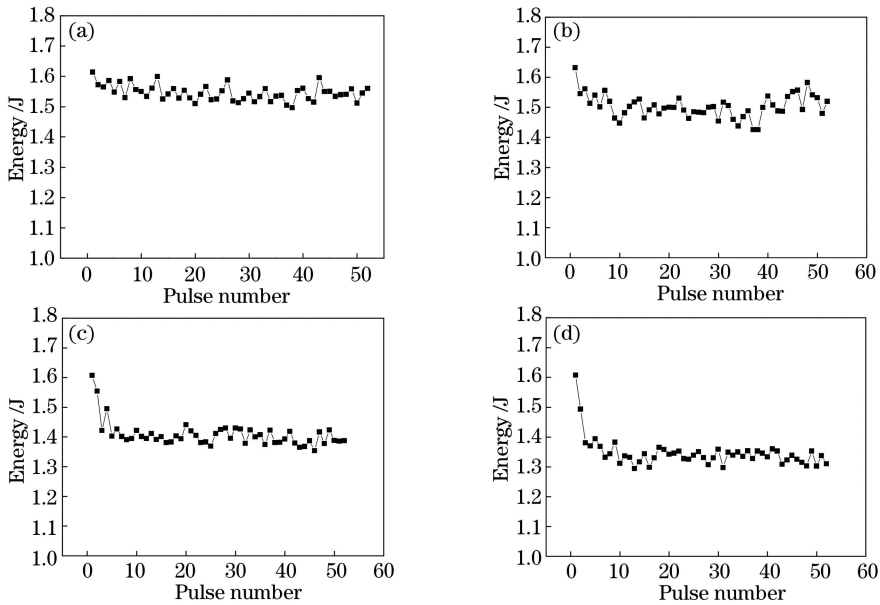


图 10 不同重复频率时 HF 激光器的能量曲线。(a) $f=50 \text{ Hz}$; (b) $f=100 \text{ Hz}$; (c) $f=120 \text{ Hz}$; (d) $f=150 \text{ Hz}$

Fig. 10 Curves of pulse energy for HF laser with different repetition rates.

(a) $f=50 \text{ Hz}$; (b) $f=100 \text{ Hz}$; (c) $f=120 \text{ Hz}$; (d) $f=150 \text{ Hz}$

现激光器脉冲能量稳定输出需要的气体置换率越大。黄珂等^[18]和 Brunet 等^[11]所报道的激光器单位体积内沉积能量分别为 $2 \text{ J}/(\text{mL} \cdot \text{atm})$ 和 $1.67 \text{ J}/(\text{mL} \cdot \text{atm})$, atm 表示标准大气压, $1 \text{ atm} = 101.325 \text{ kPa}$, 且以上两台激光器实现 100 Hz 重复频率能量稳定输出相应的气体置换率分别为 5 倍和 3 倍。本实验中激光器单位体积内沉积能量为 $2.45 \text{ J}/(\text{mL} \cdot \text{atm})$, 较文献^[18]和文献^[11]的报道结果分别提升了 22.5% 和 46.7%。当激光器的重复频率为 50 Hz 时, 气体置换率约为 8.8 倍, 明显大于文献^[18]和文献^[11]报道的气体置换率, 增益区气体置换

较为充分, 后续脉冲能量与初始脉冲能量差异较小, 平均能量大; 当重复频率增大时, 脉冲间隔时间变短, 气体置换速率降低; 当激光器重复频率达到 150 Hz 时, 气体置换率降至 2.9 倍, 低于上述两篇文献报道的气体置换率, 由图 11(a) 可知, 此时激光器的气体流速达到了高压放电绝缘恢复要求, 激光器 150 Hz 重复频率放电稳定, 考虑到激光器单位体积内沉积能量较大, 受脉冲放电影响, 增益区气体状态(气压和气体成份)不能恢复到初始状态, 使得后续脉冲激光能量有所降低, 平均能量降低, 但在增益区气体状态达到动态平衡后, 激光能量可稳定在平均值附近。

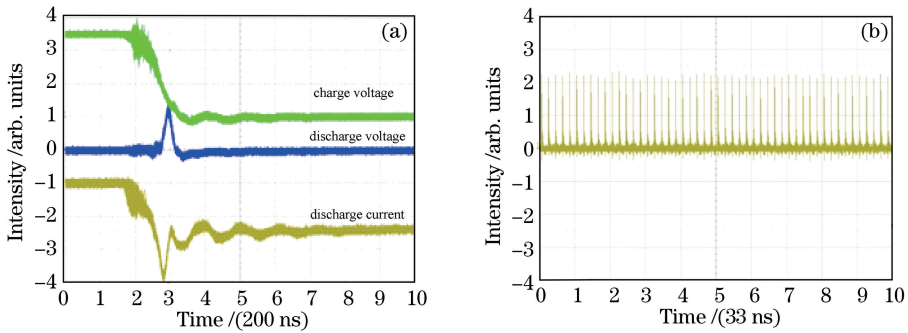


图 11 放电引发 HF 激光器重复频率为 150 Hz 时 50 个脉冲的实验波形。(a) 叠加的放电波形; (b) 激光脉冲序列

Fig. 11 Experimental waveforms of 50 pulses for electric discharge HF laser with repetition rate of 150 Hz .

(a) Overlaid discharge waveform; (b) pulse sequence waveform

5 结 论

利用自动紫外预电离放电引发方式和 Chang 氏电极结构, 建立闭环重复频率焦耳级 HF 激光器。理论分析了激光器的紫外预电离效果, 当增益区预电离电子浓度达到了 10^9 cm^{-3} 量级时, 预电离效果较为明显, 可以促进激光器在强电负性气体(SF_6 和 C_2H_6 混合气体)中实现大体积均匀体放电。

在 $23 \sim 29 \text{ kV}$ 电压范围内获得了 HF 激光器的输出特性, 发现在每个电压下均存在一个气压使得激光器的电光效率最高, 即此时激光器工作在临界 E/p_{opt} 状态, 且在所研究的条件下激光器的临界 E/p_{opt} 基本不变, 约为 $1.32 \text{ kV}/(\text{cm} \cdot \text{kPa})$ 。保持激光器处于临界 E/p_{opt} 状态, 提高电压, 激光器的电光效率略有降低, 但激光能量迅速增大, 故选择 HF 激光器运行在高电压的临界 E/p_{opt} 状态, 能有效提升激光器的输出能量。实验中, 当激光器运行在 29 kV 电压的临界 E/p_{opt} 条件时, 激光能量达到 2.3 J , 脉冲宽度约为 150 ns , 峰值功率约为 15.3 MW , 电光效率为 2.73%。

增益区气体快速均匀置换是 HF 激光器重复频

率稳定输出的重要技术途径, 利用两台并联快轴流风机驱动激光器内部气体介质快速循环流动, 使得增益区气体流速达到 16 m/s , 激光器的 150 Hz 重复频率对应的气体置换率为 2.9 倍。在电压为 25 kV 、气体压强为 8.5 kPa 的条件下, HF 激光器实现了 $50 \sim 150 \text{ Hz}$ 重复频率稳定运行。由于所设计的激光器单位体积沉积能量较大, 重复频率运行过程中增益区气体状态(气压和气体成份)不能恢复到初始状态, 平均能量随重复频率的增大而降低; 当重复频率为 150 Hz 时, 激光器的平均能量约为 1.35 J , 对应的平均功率约为 200 W 。

参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] Li L C, Duo L P, Wang Y H, *et al.* Cavity enhanced absorption spectroscopy measurements for chemical lasers[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(2): 0239003.

- 李留成, 多丽萍, 王元虎, 等. 用于化学激光器的腔增强吸收光谱测量[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 0239003.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Zhao J C, Wang C R, Xie J J. Treating technology of discharge products in no-chain pulsed DF laser [J]. Chinese Optics, 2017, 10(2): 241-248.
赵建川, 王春锐, 谢冀江. 非链式脉冲 DF 激光器放电生成物处理技术 [J]. 中国光学, 2017, 10(2): 241-248.
- [6] Wu S S, Zhang H Y, Wang T F, *et al.* Single longitudinal mode TEA CO₂ laser based on transmissive unstable resonator [J]. Optics and Precision Engineering, 2018, 26(2): 293-299.
吴世松, 张合勇, 王挺峰, 等. 基于透射式非稳腔的单纵模 TEA CO₂ 激光器[J]. 光学精密工程, 2018, 26(2): 293-299.
- [7] Kong X Y, Ke C J, Hu C F, *et al.* 65 mJ Fe²⁺:ZnSe mid-infrared laser at room temperature [J]. Chinese Journal of Lasers, 2018, 45(1): 0101011.
孔心怡, 柯常军, 胡呈峰, 等. 65 mJ 室温 Fe²⁺:ZnSe 中红外激光器[J]. 中国激光, 2018, 45(1): 0101011.
- [8] Yu G Q, Wang P, Song W, *et al.* Fiber laser pumped multi-wavelength mid-infrared optical parametric oscillator [J]. Infrared and Laser Engineering, 2018, 47(4): 0404003.
余光其, 王鹏, 宋伟, 等. 光纤激光泵浦的多波长中红外光参量振荡器[J]. 红外与激光工程, 2018, 47(4): 0404003.
- [9] Cai J, Li S S. Analysis and measurement of beam quality of quantum cascade laser [J]. Electro-Optic Technology Application, 2018, 33(3): 13-16.
蔡军, 李森森. 量子级联激光器光束质量分析及测量 [J]. 光电技术应用, 2018, 33(3): 13-16.
- [10] Yang Y, Jin D Y, Li D Y, *et al.* Study on properties of Yb³⁺ doped bismuth gallium glass fiber core materials [J]. Journal of Changchun University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 41(3): 64-67.
杨杨, 金丹晷, 李丹阳, 等. 掺 Yb³⁺ 铋镓酸盐玻璃光纤芯材料的性能研究 [J]. 长春理工大学学报(自然科学版), 2018, 41(3): 64-67.
- [11] Brunet H, Mabru M, Vannier C. Repetitively-pulsed HF/DF chemical laser with high average power [J]. Proceedings of SPIE, 1993, 1810: 273-276.
- [12] Lacour B. High average power HF/DF lasers [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4071: 9-16.
- [13] Alekseev S B, Wang L J, Erofeev M V, *et al.* A periodically pulsed HF(DF) gas-discharge laser [J]. Instruments and Experimental Techniques, 2003, 46(2): 222-224.
- [14] Bulaev V D, Gusev V S, Kazantsev S Y, *et al.* High-power repetitively pulsed electric-discharge HF laser [J]. Quantum Electronics, 2010, 40(7): 615-618.
- [15] Velikanov S D, Domazhirov A P, Zaretskiy N A, *et al.* High-power pulse repetitive HF(DF) laser with a solid-state pump generator [J]. Quantum Electronics, 2015, 45(11): 989-992.
- [16] Yi A P, Zhu F, Tang Y, *et al.* Design and effects evaluation of pulsed HF laser preionization [J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(6): 0605005.
易爱平, 朱峰, 唐影, 等. 脉冲 HF 激光器预电离设计及效果评估 [J]. 红外与激光工程, 2017, 46(6): 0605005.
- [17] Huang K, Yi A P, Zhu F, *et al.* Discharge initiated non-chain high power repetitively pulsed HF/DF laser [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(4): 041010.
黄珂, 易爱平, 朱峰, 等. 放电引发的非链式高功率重复频率 HF/DF 激光器 [J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(4): 041010.
- [18] Huang K, Huang C, Zhao L, *et al.* Effects of flow field uniformity on energy stability of discharge initiated repetitively pulsed HF laser [J]. Infrared and Laser Engineering, 2016, 45(1): 0106007.
黄珂, 黄超, 赵柳, 等. 流场均匀性对重频 HF 激光能量稳定输出的影响 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(1): 0106007.
- [19] Ke C J, Wan C Y, Zhou J W, *et al.* High peak power pulsed HF laser [J]. Laser Technology, 2004, 28(5): 480-481.
柯常军, 万重怡, 周锦文, 等. 高峰值功率脉冲氟化氢激光器 [J]. 激光技术, 2004, 28(5): 480-481.