

小型化轴流式非链式脉冲氟化氘激光器

顾文珊¹, 梁小溪¹, 李红超², 田有朋², 陈 飞³, 潘其坤^{3*}

(1. 上海机电工程研究所, 上海 201100;

2. 中国人民解放军 31032 部队, 辽宁 沈阳 110020;

3. 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: 采用轴流循环流动方式更新非链式脉冲氟化氘 (DF) 激光器工作介质, 搭建了一台小型化自引发放电 DF 激光器实验装置, 开展了轴流 DF 激光器输出性能实验研究。单脉冲工作时, 在工作气体配比 $\text{SF}_6 : \text{D}_2 = 10 : 1$, 总气压 8 kPa 时, 实现单脉冲能量 800 mJ 激光输出, 全波半高宽约 120 ns, 其性能与横流放电非链式脉冲 DF 激光器相似。重复频率放电时, 实现了 DF 激光器重复频率 20 Hz 稳定运转, 得到的最大输出功率为 13.1 W, 重频脉冲幅值差优于 $\pm 5\%$, 并展望了轴流式 DF 激光器高重频工作的前景。文中提出的轴流式非链式脉冲 DF 激光器为小型化、工程化中红外光源提供了新的技术途径。

关键词: 非链式 DF 激光器; 轴流; 放电引发; 重复频率运转; 小型化

中图分类号: TN248.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20200082

Miniaturized axial flow non-chain pulsed deuterium fluoride laser

Gu Wenshan¹, Liang Xiaoxi¹, Li Hongchao², Tian Youpeng², Chen Fei³, Pan Qikun^{3*}

(1. Shanghai Institute of Mechanical and Electrical Engineering, Shanghai 201100, China;

2. Chinese People's Liberation Army 31032, Shenyang 110020, China;

3. State Key Laboratory of Laser Interaction with matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

Abstract: A compact non-chain pulse deuterium fluoride (DF) laser renewing the working gas by axial-flow has been established. The characteristics of miniaturized axial flow non-chain pulse DF laser were studied experimentally. When the ratio of working gas $\text{SF}_6 : \text{D}_2 = 10 : 1$ and total pressure=8 kPa, the output energy of DF laser was about 800 mJ and full width at half maximum was about 120 ns at single pulse mode, which was similar to transverse flow DF laser. When working at repetition rate of 20 Hz, a maximum output power of 13.1 W was reached in this laser, whose amplitude difference of laser pulses was less than 5%. Then, the possibility of high repetition rate operation of axial flow DF laser was prospected. An axial flow non-chain pulse DF laser was proposed in this paper, which provides a new technology approach for the miniaturization and engineering application of the mid-infrared laser.

Key words: non-chain DF laser; axial-flow; discharge bump; repetitively working; miniaturization

收稿日期: 2020-11-09; 修订日期: 2020-12-08

基金项目: 国家自然科学基金 (61705219); 吉林省优秀青年人才基金 (20190103133JH); 激光与物质相互作用国家重点实验室基金 (SKLLIM1611, SKLLIM1914)

0 引言

放电引发非链式脉冲氟化氙 (DF) 化学激光器输出波段处于大气传输窗口, 且它在 $3.5\sim 4.2\ \mu\text{m}$ 范围内拥有数十条激光谱线, 在大气污染远程监测、激光遥感雷达等方面具有独特的优势^[1-2]。另外, 该激光器采用无毒、无腐蚀性气体为工作介质, 且操作方便无爆炸危险, 可重复频率运转, 在国防领域也具有重要的应用前景^[3]。该体制激光器是目前中红外波段最有潜力输出高功率/能量的光源, 备受国内外关注。法国马克西斯激光工业公司的 Brunet 采用增益介质横向流动结合光触发放电技术, 以 SF_6 和 C_6D_{12} 为工作物质, 获得了 8 J 的单脉冲能量输出, 并在 65 Hz 重复频率运转时实现平均功率 450 W 的 DF 激光输出^[4]。俄罗斯激光国家实验研究中心的 Bulaev 运用各向异性的阻性电极替代金属电极, 以 SF_6 和 $\text{C}_3\text{H}_8+\text{C}_4\text{H}_{10}$ 为工作物质, 获得了 12 J 的单脉冲能量输出, 并在重复频率为 100 Hz 时获得了平均功率 1200 W 的横流 HF 激光输出^[5]。俄罗斯核物理研究所得 Aksenov 采用三个串联的放电模块, 以 SF_6 和 D_2 为工作介质, 实现了单脉冲 40 J 的能量输出, 并在工作气体横向流动时实现了平均功率 400 W、10 Hz 的 DF 激光输出^[6]。英国国防评估研究所的 Michael 采用电晕预电离放电技术, 以 SF_6 和 D_2 为工作物质, 在工作气体横向流动时实现了 DF 激光器 1 kHz 重复频率运转, 获得了平均功率为 2.5 W 的 DF 激光输出^[7]。中科院电子学研究所的柯常军采用侧面滑闪预电离放电技术, 以 SF_6 和 D_2 为工作物质, 实现了单脉冲 1.2 J 的能量输出, 并在 3 Hz 运转时实现了平均功率 3.6 W 的横流 DF 激光输出^[8]。西北核技术所的易爱平采用紫外预电离放电技术, 以 SF_6 和 C_2H_6 为工作物质, 实现了横流 HF 激光器 50 Hz 重复频率稳定运转^[9]。长春光机所在横流式非链式脉冲 DF 激光器方面开展了大量的实验研究, 实现了重复频率 50 Hz, 平均功率 100 W 量级的激光输出^[10-12]。

国内外在非链式横流脉冲 DF 激光器方面开展了大量的研究, 输出性能得到了巨大提升, 但其体积庞大是其工程化应用所面临的核心难题。文中提出了一种轴流式非链式脉冲 DF 激光器思想, 可极大压缩

系统体积, 并展望非链式横流脉冲 DF 激光器高重频稳定运转前景, 为国防与工程领域提供了一种高性能的中红外激光技术途径。

1 实验装置

实验中采用的小型化轴流非链式脉冲 DF 激光器实验装置原理示意如图 1 所示: 它由激光器泵浦单元、放电腔和谐振腔镜等核心组件组成。激光器泵浦单元采用自引发放电电路构成的脉冲激励源, 它能够为激光头提供脉宽百纳秒量级的高电压, 总储能电容量为 120 nF, 充电电压 20 kV 时的储能量约 24 J。在闸流管开关被打开的瞬间脉冲激励源输出高压击穿主放电电极, 实现能量的高效注入。放电腔为 DF 激光器高压放电提供一种真空密封环境, 且放电电极、激光谐振腔、工作气体进出口等固定在放电腔上, 放电腔内充入的工作气体为 SF_6 和 D_2 。放电电极由粗糙的阴极和光亮的阳极组成, 电极工作面尺寸为 $120\text{ cm}\times 2\text{ cm}$, 电极间距为 2 cm, 放电体积为 520 cm^3 。光学谐振腔采用了由镀金凹面全反射镜与反射率为 30% 的 CaF_2 平面输出镜构成的稳定腔, 腔长 1.8 m。气体循环系统直接决定了 DF 激光器的重频工作性能, 其主要功能为在相邻两个脉冲间, 将放电产物清除出放电区域, 确保每个脉冲的工作物质成分不受上一个脉冲的影响。文中采用了一个小型化的离心风机, 在放电腔两端侧面分别开进气口和排气口, 实现工作气体在狭窄的放电腔内轴向循环流动。相比于横流式非链式脉冲 DF 激光器, 它避开了体积巨大的循环流道结构, 工作气体在放电腔内轴向流动, 可极大压缩系统体积。

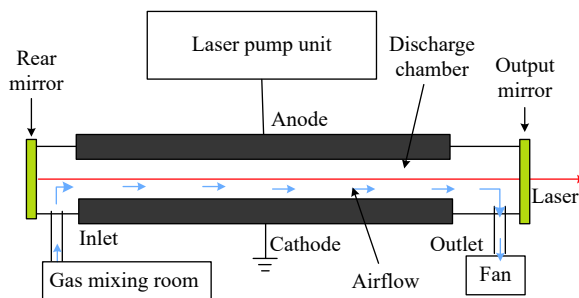


图 1 激光器系统截面示意图

Fig.1 Cross sectional drawing of the laser

2 实验结果与分析

2.1 单脉冲运转

非链式脉冲 DF 激光器脉冲能量受工作气体气压、气体配比和电压等因素影响。在前期自引发放电的工作基础,文中选取总气压为 8 kPa,混合气体分压比 $\text{SF}_6 : \text{D}_2 = 10 : 1$,研究了轴流 DF 激光器的放电特性,在充电电压在 16~20 kV 的范围内均可得到稳定的辉光放电,采用 Nikon 公司的 COOLPIX 相机拍摄的放电照片如图 2 所示。



图 2 稳定辉光放电

Fig.2 Uniform stable glow discharge

采用 Gentec-eo 公司的 QE50LP-H-MB 型能量计对输出的单脉冲能量进行测试,获得的脉冲能量与电光转换效率随充电电压的变化关系如图 3 所示。首先单脉冲输出能量随充电电压呈近似线性上升,在充电电压 20 kV 时,获得的最大单脉冲输出能量 800 mJ。电光转换效率随充电电压的升高呈明显的先上升后下降趋势,且在 19 kV 时,电光效率达到 3.4%,与能量随充电电压变化趋势相符。高电压时过大的注入能

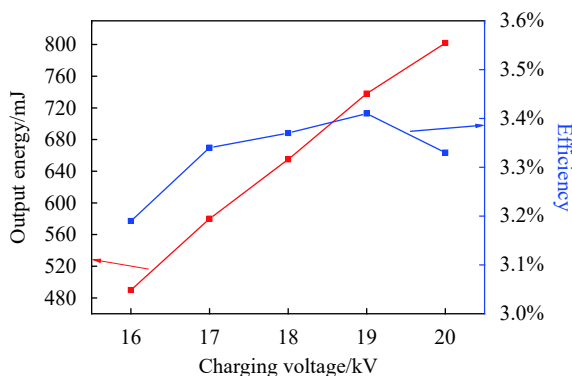


图 3 能量及电光转换效率随充电电压的变化关系

Fig.3 The relationship of the output energy and electric efficiency versus the charging voltage

量引起的工作气体过度电离导致的强烈的消激发及过高的升温可能是电光转换效率下降的主要原因。文中的电光转换效率高于之前报道的 3.12%^[10]。

2.2 重复频率运转

非链式脉冲 DF 化学激光器的工作物质一般为 SF_6 和 D_2 或碳氟化合物的混合物。其工作机理为:主电极被放电击穿后,电极间的高能电子(电子能量大于 5 eV)碰撞六氟化硫产出 F 原子,化学活性极强的 F 原子与 D_2 发生化学反应生成激发态的 DF 分子,进而受激跃迁形成震荡输出。由上述机理可知:工作物质的消耗是不可逆的,且放电产物的消激发作用严重影响电光转换效率。因此如何快速更新工作气体是实现轴流非链式脉冲 DF 激光器重复频率运转的核心问题。

放电区风速直接决定了工作气体更新速度,放电区清洗系数是表征工作气体更新能力的量化参数,它由下式给出:

$$k = v \cdot S / fV \quad (1)$$

式中: v 为流经放电区的风速; S 为放电区截面积; f 为激光器重复频率; V 为放电区体积。放电区的风速 v 可采用多普勒测试仪或皮托管等设备测试,但测试过程较为复杂。文中依据风机额定流量 ($0.016 \text{ m}^3/\text{s}$) 对风速进行估算,在激光器重复频率 20 Hz 时,计算的清洗系数约为 1.5,它表征在两次放电时间隙有 1.5 倍的放电气体被抽走,保障了每次放电之前工作区气体的更新。总气压为 8 kPa,混合气体分压比 $\text{SF}_6 : \text{D}_2 = 10 : 1$,充电电压为 19 kV 条件下,开展轴流非链式脉冲 DF 激光器重复频率运转,重复频率 20 Hz 时,采用 Gentec-eo 公司的 UP55N-300F-H12 型功率计对输出的平均功率进行测试,获得的激光器平均功率为 13.1 W,如图 4 所示。受风机性能影响,未开展更高重复频率运转实验。

在 20 Hz 时,采用 Vigo 公司的 PVM-10.6-T08 型 HgCdTe 光电探测器测试的激光脉冲波形如图 5 所示。图 5(a) 为重复频率激光波形,激光脉冲能量存在随机的波动,但整体稳定性较好,没有脉冲丢失现象,激光脉冲幅值差优于 $\pm 5\%$ 。放电区工作气体涡流引起的非均匀放电及折射率变化,吸附于器壁的残余放电产物的消激发作用等因素是导致脉冲能量抖动的主要因素。图 5(b) 为单个脉冲的波形,其全波半高宽

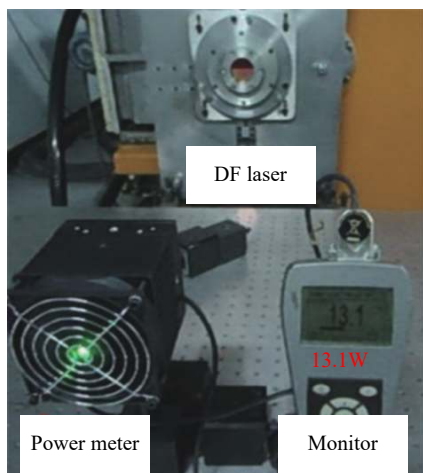


图 4 重复频率 20 Hz 时功率测试图

Fig.4 Power test at 20 Hz repetition

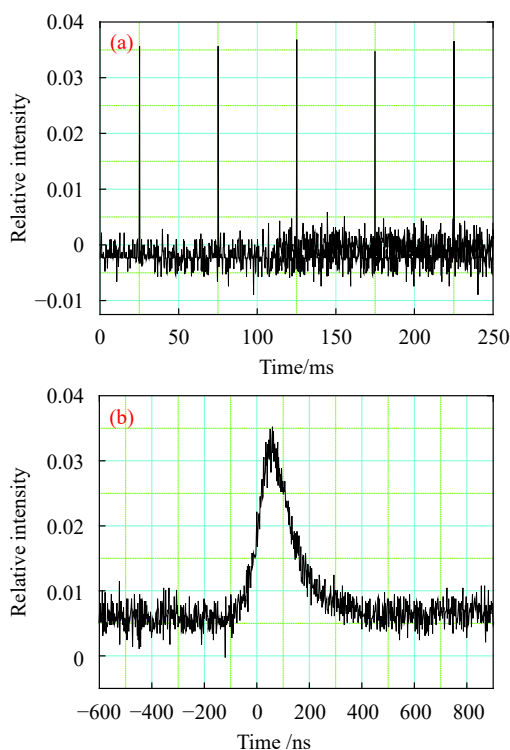


图 5 DF 激光脉冲波形: (a) 重复频率, (b) 单脉冲

Fig.5 Pulse trains (a) and typical shapes (b) of the DF laser

约为 120 ns, 由此估算该轴流 DF 激光器输出脉冲峰值功率为 6.67 MW。

3 轴流 DF 激光器高重频运转展望

放电激励是实现非链式脉冲 DF 激光器高重复频率运转的最佳方式。泵浦单元重复频率、电极间放电稳定性、放电区工作介质的流速及其稳定性是影响轴流非链式脉冲 DF 激光器重频运转的主要因素, 解决

上述问题可实现非链式脉冲 DF 激光器高重频运转。

泵浦单元重复频率主要受充电电源功率和开关的重复频率限制。泵浦单元内的储能元件 (储能电容阵列) 在放电之前由充电电源充电, 充电电源功率越大, 单个储能电容越小, 越有利于提升充电速度, 缩短充电时间。旋转火花开关或闸流管作为激光器泵浦电路常用开关, 它们工作频率可达数 kHz 量级, 能够满足轴流 DF 激光器高重频运转需求。

电极间稳定的辉光放电是实现高效率非链式脉冲 DF 激光工作的基础。DF 激光器的工作介质 SF₆ 具有较强的电负性, 实现大体积稳定辉光放电是一项技术挑战。文中采用自引发放电方式, 在无预电离的情况下可实现稳定的辉光放电, 其带来的有益效果是可成倍地降低单次放电消耗的工作气体, 有利于实现轴流脉冲 DF 激光器高重频运转。

DF 激光器实现稳定的放电后, 其重复频率输出特性主要受工作介质流速决定。将公式 (1) 变换, 重复频率可表示为: $f=v \cdot S/k V$ 。因而选用较大流量的风机以提供足够的风速是获得较高重复频率的保证。实验室现有的莱宝风机流量达到 0.550 m³/s, 在清洗系数为 1.5 时, 其支持的 DF 激光器重复频率约 700 Hz。通过优化放电区流场均匀性, 降低清洗系数到工程常用的 1.2~1.4, 并进一步提升风机流量, 轴流非链式脉冲 DF 激光器的工作频率可达 kHz 量级。

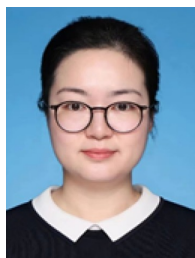
4 结 论

提出了一种新的轴流式非链式脉冲 DF 激光器, 并搭建了小型化的实验装置, 在 16~20 kV 充电电压范围内获得了正常的辉光放电, 在充电电压为 20 kV 时, 单脉冲能量 800 mJ, 电光转换效率达到 3.4%。在重复频率 20 Hz 运转条件下, 获得了平均功率为 13.1 W 的 DF 激光稳定输出, 脉冲宽度约为 120 ns。进而并从充放电、快速工作气体更新等方面展望了轴流式非链式脉冲 DF 激光器实现 kHz 量级高重频运转的可行性, 为小型化高重频大能量中波激光器提供了新的技术途径。

参考文献:

- [1] Agroskin V Y, Bravy B G, Chernyshev Y A, et al. Aerosol sounding with a lidar system based on a DF laser [J]. *Appl Phys*

- B*, 2005, 81: 1149-1154.
- [2] Ruan Peng, Xie Jijiang, Zhang Laiming, et al. Computer modeling and experimental study of non-chain pulsed electric-discharge DF laser [J]. *Optics Express*, 2012, 20(27): 28912-28922.
- [3] Gerald W A, Bruce R G, Stanley P P, et al. Deuterium fluoride laser technology and demonstrators[C]//SPIE, 2004, 5414: 41-51.
- [4] Brunet H. Improved DF performance of a repetitively pulsed HF/DF laser using a deuterated compound[C]//SPIE, 1997, 3092: 492-497.
- [5] Bulaev V D, Kulikov V V, Petin V N, et al. Experimental study of a nonchain HF laser on heavy hydrocarbons [J]. *Quantum Electronics*, 2001, 31(3): 218-220.
- [6] Aksenov Y N, Borisov V P, Burtsev V V, et al. A 400 W repetitively pulsed DF laser [J]. *Quantum Electronics*, 2001, 31(4): 290-292.
- [7] M R Harris, A V Morris, Gorton E K. A closed-cycle, 1kHz pulse repetition frequency, HF (DF) laser[C]//SPIE, 1998, 3268: 247-251.
- [8] Ke Changjun, Zhang Kuohai, Sun Ke, et al. A periodically pulsed HF/DF gas discharge laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36: 304-306. (in Chinese)
- 柯常军, 张阔海, 孙科, 等. 重复频率放电引发的脉冲HF(DF)激光器[J]. *红外与激光工程*, 2007, 36: 304-306.
- [9] Yi Aiping, Liu Jingru, Tang Ying, et al. Discharge pumped repetition-rate non-chain HF laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7): 1763-1766. (in Chinese)
- 易爱平, 刘晶儒, 唐影, 等. 放电激励重复频率非链式HF激光器[J]. *强激光与粒子束*, 2011, 23(7): 1763-1766.
- [10] Pan Qikun, Xie Jijiang, Shao Chunlei, et al. High power electric-discharge non-chain pulsed DF laser [J]. *Chinese Journal of lasers*, 2015, 43(7): 0702001. (in Chinese)
- 潘其坤, 谢冀江, 邵春雷, 等. 高功率放电引发非链式脉冲DF激光器[J]. *中国激光*, 2015, 43(7): 0702001.
- [11] Ruan Peng, Pan Qikun, Xie Jijiang, et al. Numerical simulation and experiments on unstable resonator for non-chain DF laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(2): 0205004. (in Chinese)
- 阮鹏, 潘其坤, 谢冀江, 等. 非链式DF激光器非稳腔数值仿真与实验[J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(2): 0205004.
- [12] Ruan Peng, Xie Jijiang, Pan Qikun, et al. Research on pulse characteristics of non-chain pulsed DF laser [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3554-3558. (in Chinese)
- 阮鹏, 谢冀江, 潘其坤, 等. 放电引发非链式DF激光器脉冲特性研究[J]. *红外与激光工程*, 2015, 44(12): 3554-3558.



第一作者简介：顾文珊，硕士，工程师，研究方向为通信与信息系统，曾在信息安全与通信保密，数字技术与应用、航天工业管理等期刊发表多篇学术论文。



陈飞，2011年毕业于哈尔滨工业大学，博士。现为中国科学院长春光学精密机械与物理研究所研究员，博士生导师，任职部门副主任，从事高功率激光器及其应用技术研究。2016年获吉林省中青年科技创新领军人才项目，2017年入选中国科学院青年创新促进会，2018年获长光所“旭光人才计划”资助，2018年，荣获吉林省自然科学二等奖（排名第1）。在 *Light: Science & Application*、*Optics Letters*、*Optics Express* 等期刊发表SCI检索论文73篇，授权国家发明专利10余项，出版著作3本。主持国防科技项目、国家自然科学基金、国家重点研发计划等项目。