

流场均匀性对重频 HF 激光能量稳定输出的影响

黄珂, 黄超, 赵柳, 马连英, 唐影, 朱峰, 易爱平, 钱航, 李高鹏, 冯国斌, 赵军

(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: 放电引发重频 HF/DF 激光器具有的波长和功率优势使其成为当前中红外激光技术研究的热点之一。介绍了在利用紫外预电离横向放电结构建立的放电引发重频 HF 激光装置上, 通过对气体循环系统增益区流场结构分析和注入管道结构的优化设计开展的重频能量稳定输出实验研究。实验结果表明, 通过管道结构的优化设计, 放电增益区流场均匀性得到明显改善, 气体置换的最低流速达到 6.5 m/s, 激光器稳定运行频率由 60 Hz 提高到 100 Hz, 且稳定体放电的单位体积放电沉积能量由 1.6 J/(ml·atm)(1 atm=1.013×10⁵ Pa) 提高到 2.0 J/(ml·atm), 激光平均功率达到 40 W。

关键词: 脉冲 HF 激光; 放电引发; 重复频率; 放电稳定性; 气体循环

中图分类号: TN248.5 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0106007

Effects of flow field uniformity on energy stability of discharge initiated repetitively pulsed HF laser

Huang Ke, Huang Chao, Zhao Liu, Ma Lianying, Tang Ying, Zhu Feng, Yi Aiping, Qian Hang, Li Gaopeng, Feng Guobin, Zhao Jun

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

Abstract: For the characteristics of wavelength and output power, discharge initiated repetitively pulsed HF laser has become the hotspot in mid-infrared laser device technology research field. In this paper, numerical simulation of flow field in discharge region and structure design of inject pipeline with repetitively pulsed HF laser device was described. Under the investigation of discharge characteristics in SF₆/C₂H₆ gas mixture and output characteristics of laser pulse, the flow field uniformity and repetitively pulsed laser energy stability were researched. It is shown that with the optimized design of inject pipeline, the flow field uniformity improved obviously. The minimum flow velocity for gas circulation is elevated to 6.5 m/s. The deposited energy per unit volume gas with stable volum discharge increased from 1.6 J/ml·atm to 2.0 J/ml·atm. The maximal running frequency of 100 Hz and the average power of 40 W are obtained. The system operating stability keeps well.

Key words: pulsed HF laser; discharge initiated; repetition-rate; discharge stability; gas circulation

收稿日期: 2015-05-25; 修订日期: 2015-06-12

基金项目: 激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLM1110; SKLLM1211)

作者简介: 黄珂(1979-), 男, 副研究员, 博士生, 主要从事激光技术及应用研究。Email: Huangke @nint.ac.cn

0 引言

可实现重复频率运行的放电引发脉冲 HF 激光装置,其非链式的温和化学反应过程使器件运行安全可控,易于实现小型化和机动运输,且具有光束质量好、输出峰值功率和平均功率兼顾等优点,是获得 2.7 μm 中红外波段激光输出的理想光源,在激光医学、大气污染监测和军事领域都有广阔的应用前景^[1-4]。

放电引发重频 HF 激光装置通常采用 SF₆ 和 C₂H₆ 混合气体作为工作介质,SF₆ 作为 F 原子的施主可获得较高的激光能量和电学效率,C₂H₆ 作为反应物的同时还可以有效抑制气体放电的不稳定性。混合气体通过均匀体放电产生的高能电子与 SF₆ 碰撞解离出化学反应所需的 F 原子,随后 F 原子与含 H 化合物发生放热化学反应生成激发态的 HF 获得激光输出。由于 SF₆ 分子具有较强的电负性,实现均匀体放电过程较为困难,且重频运行过程中气体物理状态变化容易引发电弧放电使激光能量明显降低,因此利用气体置换实现放电区气体介质物理特性的快速恢复,是获得重频激光能量稳定输出所采用的主要技术手段之一^[5-7]。

近年来,作者所在的研究小组对 SF₆/C₂H₆ 混合气体的放电特性进行了研究,对不同条件下的放电均匀性、能量沉积和转换效率等特性参数进行了分析,并开展了气体介质循环置换,重频体放电等关键技术研究,建立了可 60 Hz 重频稳定运行的 HF/DF 激光装置^[8-10]。此文主要介绍了在上述激光装置上开展的重频能量稳定输出技术研究,通过对气体循环系统增益区流场结构的分析和注入管道结构的优化设计,有效改善了增益区流场均匀性,HF 激光器稳定运行频率由 60 Hz 提高到 100 Hz,平均功率达到 40 W。

1 气体循环系统

对于脉冲放电气体激光器,形成工作介质大体积均匀体放电和避免电弧放电的产生是实现放电能量有效沉积的前提,但是由于脉冲放电对增益区气体物理特性的影响,特别是温度均匀性和密度均匀性的改变,导致在下一脉冲放电过程中过早出现电

弧放电而抑制了体放电的发展,从而使激光能量明显降低^[11-12]。为了避免这一现象的产生,需要利用气体循环装置在两个连续放电脉冲之间对增益区气体介质进行充分置换,并保证快速流动过程中整个增益区截面流场的均匀性,避免在电极表面等区域形成流场分离产生涡旋,影响置换效果,并获得相同体积流量条件下的最大置换率。

重频 HF 激光装置的气体置换采用气室外循环方式,结构如图 1 所示。循环系统由大功率轴流风机、包含冷却系统的分子筛吸附室和气体循环管道与激光气室相连组成闭环回路,循环管道均采用直径 100 mm 的圆形管道,回路总容积约 45 L。轴流风机由直流高速电机、叶轮和导流叶片组成,风机最高转速 8 000 r/min,可通过电压控制实现转速和流量调节。为了实现在放电脉冲间隔时间内实现 2~3 倍增益区体积的有效气体置换,放电增益区的气体循环结构类似于气流喷嘴,通过对增益区注入段管道结构的优化设计,可以避免增益区流场不均匀和在电极表面的流场分离,实现大纵横比截面和高重频条件下气体流速和流场均匀性的优化。图 2 是增益区的流场结构示意,为了获得最佳的气体置换效率,增益区的气体流向、放电泵浦方向和激光输出方向相互垂直。

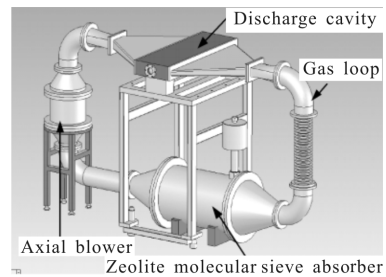


图 1 激光器气体循环系统结构

Fig.1 Gas circulation structure

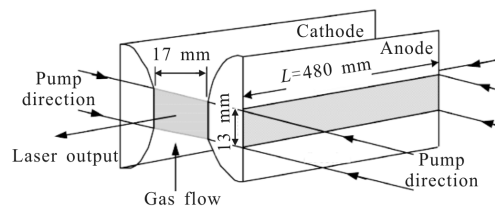


图 2 放电增益区的流场结构

Fig.2 Gas flow structure in gain region

2 注入段结构优化

重频气体激光器通常采用注入段收缩结构的方法来保证增益区较高流速和较小的边界层厚度,实现流场分布均匀。但是由于增益区采用了大纵横比的放电截面,在实际设计中为了减小系统体积,在尺寸较小的电极间隙方向采用了收缩比为 5 的双三次曲线收缩结构,而在尺寸较大的电极纵向采用了一定扩张比的扩张结构;同时为了减小流场截面剧烈变化导致的压力损失,圆形管道到矩形增益区进行了光滑过渡,并减少弯头的使用,图 3 是增益区注入段的圆转方设计结构。

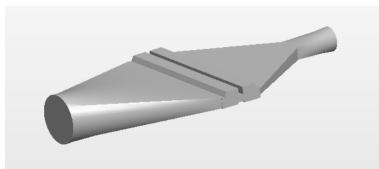


图 3 注入段管道设计结构

Fig.3 Designed inject pipeline structure

由于扩张结构本身无法实现均匀流场,而激光器整体结构又限制了注入段管道的长度,因此如何在有限的来流尺度内改善增益区的流场均匀性就成为注入段管道结构设计的关键。图 4 是利用有限元方法在固定增益区尺寸和注入段管道长度的条件下,对不同入口管道直径对应的增益区流场分布的计算结果,其中二维图给出的是增益区中心截面的流速分布,曲线图是对应的截面中心沿电极纵向的流速分布。

可以看出,对于不同的管道直径,由于在电极间隙方向采用了双三次曲线收缩结构,流场均匀性都非常理想。而在电极纵向,当管道直径小于 200 mm 时(见图 4(a)~(b)),增益区中心流速明显高于两端流速;随着管道直径的增加,流场均匀性不断改善,在 200 mm 时最为理想(见图 4(c)),此时圆形管道截面积与放电增益区截面积比约为 3:1;继续增加管道直径,增益区两端流速明显高于中心流速(见图 4(d)),流场均匀性下降。上述计算结果说明,激光器采用的入口直径 100 mm 的原注入段管道设计结构不够合理。

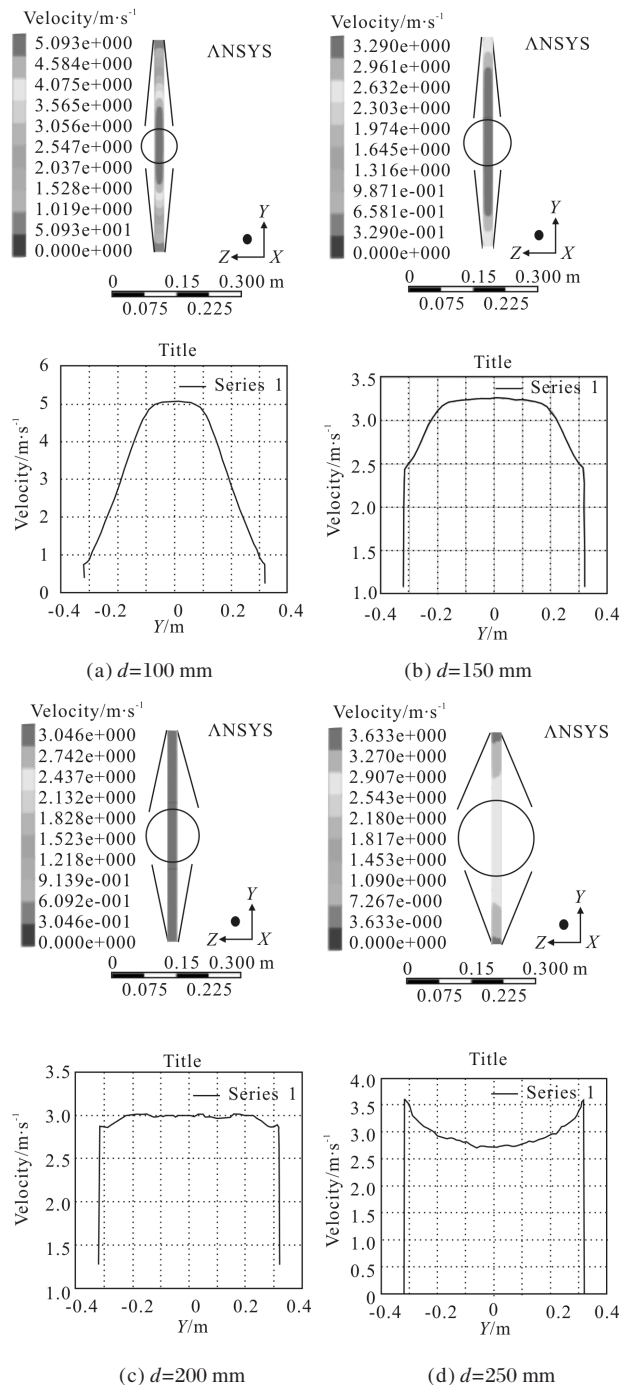


图 4 不同注入管道的增益区流场分布

Fig.4 Flow field distribution in pump region with different inject pipeline structure

3 实验结果及分析

为了检验流场计算的结果,按照设计结构加工了入口直径 200 mm 的注入段管道并与循环系统连接,利用热敏风速计测量了增益区中心截面 16 个均

布的测量点流速分布，并与入口直径 100 mm 的管道流速进行了比较，其结果如图 5 所示。可以看出，对于两种管道在转速 4 000 r·min⁻¹ 和 8 000 r·min⁻¹ 条件下，流场分布与计算结果都吻合得较好，其中原管道在增益区的流场呈现中间凹陷的山峰状结构，在±225 mm 的有效放电区域内流场分布极不均匀，特别是在激光器运行过程中常用的 8 000 r·min⁻¹ 条件下，最低流速只有 2.5 m/s，与最大流速相差近 7 倍，同时在中心区域形成的凹陷主要是由于对轴流风机出口不均匀流速分布没有实现较好的补偿所致。而对于入口直径 200 mm 的注入管道，两种流速条件下的流场分布都比较理想，且对风机出口不均匀流速分布都进行了很好的补偿，在 8 000 r·min⁻¹ 条件下，有效放电区域内流速均大于 6.5 m/s，较原管道有大幅提高。

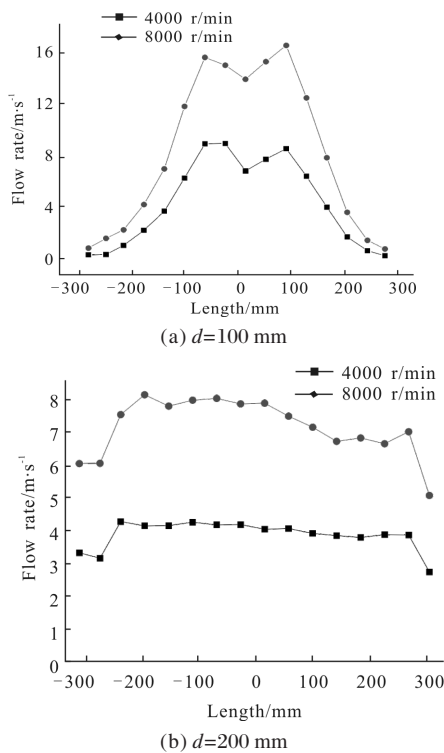
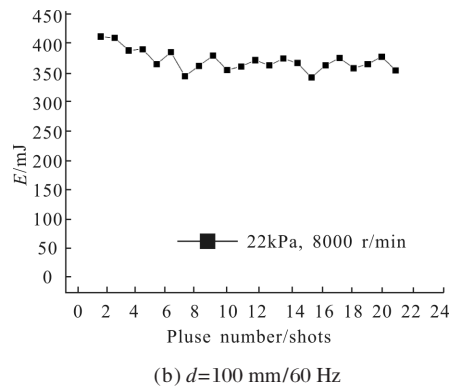
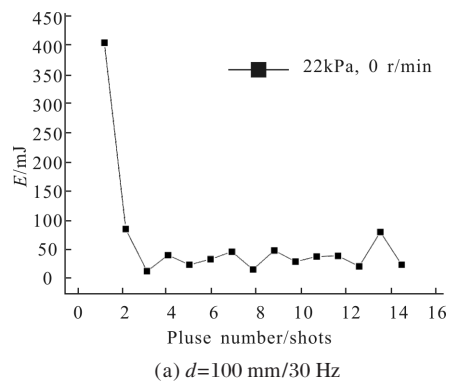


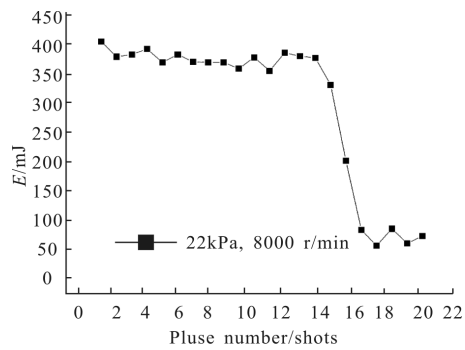
图 5 增益区中心截面的流场分布测量

Fig.5 Measured flow field distribution in pump region with different inject pipeline

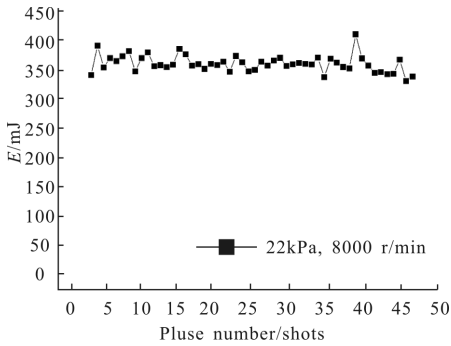
为了对新管道改善放电和激光能量稳定性的效果进行验证，利用两种注入段管道分别开展了激光器重频运行实验，图 6 是在充电电压 29 kV 条件下，两种管道在改变流速和气压条件的输出能量变化情况。可以看出，在风机静止条件下，激光器 30 Hz 重

频运行时(见图 6(a))，第二个激光脉冲能量已由初始的 400 mJ 下降到 100 mJ 以下，放电过程也由体放电转变为电弧放电。在风机以 8 000 r·min⁻¹ 运转时，原管道在气压 22 kPa 条件下最高可实现 60 Hz 稳定输出(见图 6(b))；在 70 Hz 运行时(见图 6(c))，第 16 个放电脉冲后激光能量明显下降，此时电弧放电现象严重。在使用入口直径 200 mm 的注入段管道后，激光器实现了 100 Hz 稳定运行(见图 6(d))，由于受高压充电电源工作频率的限制，没有进一步开展更高频率的能量稳定性实验，但是为了说明均匀流场对能量稳定性的改善作用，在 100 Hz 运行频率下，降低气室气压到 18 kPa(见图 6(e))，即将单位体积气体的放电沉积能量由 1.6 J/(ml·atm)(1 atm=1.013×10⁵ Pa) 提高到 2.0 J/(ml·atm)，激光器仍能够实现稳定的体放电泵浦过程和能量输出，进一步降低气室气压到 16 kPa(见图 6(f))，即放电沉积能量 2.2 J/(ml·atm) 时，放电过程才由体放电转变为电弧放电，激光能量明显降低。图 7 是激光器利用新管道在充电电压 29 kV、气室气压 20 kPa 条件下 100 Hz 连续运行 10 s 的激光能量变化情况，可以看出，能量没有出现跳跃式突变，重频体放电状态维持较好，能量的整体降低是由于反应物不断消耗导致的。

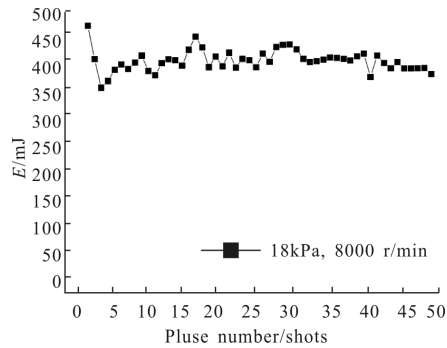




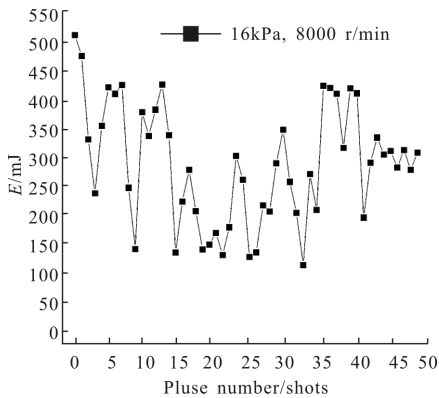
(c) $d=100\text{ mm}/70\text{ Hz}$



(d) $d=200\text{ mm}/100\text{ Hz}$



(e) $d=200\text{ mm}/100\text{ Hz}$



(f) $d=200\text{ mm}/100\text{ Hz}$

图 6 激光器重频运行的能量稳定性

Fig.6 Energy stability under repetition rate mode

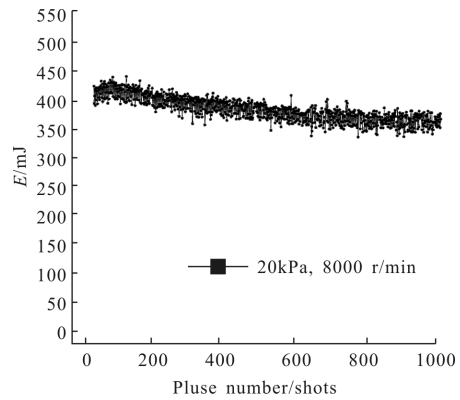


图 7 激光器 100 Hz 连续运行 10 s 能量稳定性

Fig.7 Energy stability of continuous running for 10 s with 100 Hz

4 结束语

通过对气体循环系统增益区流场结构的分析和注入管道结构的优化设计,有效改善了重频 HF 激光器放电增益区的流场均匀性,提高了气体置换流速,通过重频放电和激光输出实验对流场均匀性改善的效果进行了验证,激光器稳定运行频率由 60 Hz 提高到 100 Hz,实现重频均匀体放电的单位体积放电沉积能量也得到明显提高,激光器平均输出功率达到 40 W。

参考文献:

- [1] Apollonov V V, Belevtsev A A, Firsov K N, et al. High-power pulse and pulse-periodic nonchain HF(DF) lasers[C]// Proc of SPIE, 2002, 4747: 31-43.
- [2] Lacour B, Pasquiers S, Postel C, et al. Comparison of performance of chain and non-chain HF phototriggered lasers [C]//Proc of SPIE, 2001, 4184: 158-161.
- [3] Rickwood K R. A comparison of methods of electrically exciting small pulsed HF lasers suitable for medical applications[J]. *Opt Commun*, 1997, 136: 480-486.
- [4] Pan Qikun. Progress of mid-infrared solid-state laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 557-566. (in Chinese)
潘其坤. 中红外固体激光器研究进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(4): 557-566.
- [5] Harris M R, Morris A V, Gorton E K. A closed-cycle 1kHz pulse repetition frequency HF (DF) laser [C]//SPIE, 1998, 3268: 247-251.

- [6] Wang Xu, Xie Jijiang, Pan Qikun, et al. Research progress of non-chain HF/DF laser [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(3): 340-349. (in Chinese)
王旭, 谢冀江, 盘其坤, 等. 非链式 HF/DF 激光器的研究进展[J]. 中国光学, 2015, 8(3): 340-349.
- [7] Ruan P, Xie J J, Zhang L M, et al. Computer modeling and experimental study of non-chain pulsed electric-discharge DF laser[J]. *Optics Express*, 2012, 20(27).
- [8] 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.
- [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] Huang Ke, Yi Aiping, Zhu Feng, et al. Discharge initiated non-chain high power repetitively pulsed HF/DF laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27 (4): 041010. (in Chinese)
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.
- [11] Inheyan H, Goodno G D. High Power Laser Handbook[M]. New York : McGraw-Hill Companies, 2011: 23-25.
- [12] Pan Qikun, Xie Jingjiang, Xie Jijiang, 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, 谢京江, 谢冀江, 等. 非链式脉冲 DF 激光器增益分布特性[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(2): 360-364.