

文章编号 1004-924X(2019)05-1060-09

长时间运转 100 Hz 放电引发非链式 HF 激光器

黄超*, 黄珂, 马连英, 朱峰, 易爱平

(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: 为了获得稳定的、大能量重频中红外 HF 激光输出, 基于紧凑型、闭环放电引发非链式 HF 中红外化学激光器, 从能量影响因素、解决措施和实验验证三个方面系统性地研究了 100 Hz 重频 HF 激光的能量稳定性。首先结合非链式 HF 化学激光动力学过程和静态重频实验, 分析发现了影响重频放电引发非链式 HF 化学激光器脉冲能量稳定性的三个主要因素, 包括均匀体放电难以维持、基态 HF 分子强的消激发效应和工作气体的持续消耗。然后利用工作气体循环流动置换增益区气体, 当增益区气体流速为 9 m/s 时激光器 100 Hz 重频运行的放电状态维持良好, 获得 100 Hz/55 W 的激光输出。最后, 采用分子筛吸附分离基态 HF 分子纯净工作气体以及实时补给工作气体, 提升了重频 HF 激光器长时间运行的能量稳定性。实验结果表明: 100 Hz 重频放电引发非链式 HF 激光器获得了 30 s 的长时间稳定输出, 激光能量下降率可优于 10%。综合工作气体循环流动、分子筛吸附基态 HF 分子和工作气体实时补给, 放电引发非链式 HF 激光器实现了高重频长时间的稳定输出。

关键词: 中红外激光; 化学激光; HF 激光; 放电引发; 能量稳定性

中图分类号: TP245 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20192705.1060

Hundred-Hertz nonchain HF laser with long operation period based on initiated discharge

HUANG Chao*, HUANG Ke, MA Lian-ying, ZHU Feng, YI Ai-ping

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

* Corresponding author, E-mail: huangchao@nint.ac.cn

Abstract: The aim of this investigation was to achieve stable and high-energy repetitive pulsed mid-infrared HF laser operation. A systemic study of pulsed energy stability based on a compact, closed-circle, electric-discharge nonchain HF chemical laser with a repetition frequency of 100 Hz was performed. Initially, the three main factors that influence pulse energy stability in an electric-discharge nonchain HF chemical laser were identified based on chemical reaction kinetics and experimental results without gas flow. In part, the experiments involved the nonmaintenance of uniform volume discharge and the intense de-excitation effect of excited HF molecules via collision deactivation with ground state HF molecules, in addition to the consumption of the working gas. Then, using circular flow, the working gas in the gain region was replaced. Moreover, by maintaining a uniform volume

收稿日期: 2018-12-05; 修订日期: 2019-01-21.

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资助项目 (No. SKLLIM1610)

discharge, a 100 Hz repetition-rate HF laser was realized when the gas flow rate in the gain region was 9 m/s. This resulted in an average laser power of approximately 55 W at this repetition rate. Finally, the pulse energy stability of the laser was notably improved when the molecular sieve only absorbed ground-state HF molecule to purify the working gas, which is replenished in real-time. The experimental results show that the pulse energy stability of the HF laser was feasible for operation periods of 30 s, and the average decrease in energy is less than 10%. It is possible to operate for longer periods at a high repetition rate with little loss of the average energy via a combination of recirculation gas flow, selective removal of the ground state HF molecules using a molecular sieve, and by allowing a small replenishment of the working gas.

Key words: mid-infrared laser; chemical laser; HF laser; discharge initiation; energy stability

1 引言

由于波长特殊性,中远红外波段激光倍受关注^[1-7],并在军事领域和工业应用方面有着广泛的需求。氟化氢(HF)化学激光的波长为 2.6~3.1 μm ,是现阶段重要的中红外激光源之一。

HF 化学激光引发方式包括链式^[8-9]和非链式^[10-11]两种。链式 HF 激光器是通过工作介质发生链式化学反应形成粒子束反转,其输出激光不受外部引发能量的限制,效率高,可实现高能输出;但由于存在不可控的分支反应,有爆炸危险,且运行腔压较低,需要复杂的压力恢复系统,体积庞大。非链式 HF 化学激光器通常利用放电产生的 F 原子与含 H 化合物进行的放能化学反应形成粒子数反转,获得激光输出,尽管其电光效率较低,但是相比于链式 HF 化学激光器,放电引发非链式 HF 激光器在大脉冲能量高峰值功率输出、小型化和安全可控性方面具有明显优势。自 20 世纪 60 年代非链式 HF 化学激光器诞生以来,俄罗斯、美国等世界强国在激光动力学过程、激光光谱和放电引发方面开展了大量研究工作,脉冲能量从毫焦级提升到焦耳,甚至可达数百焦耳。20 世纪 90 年代后,得利于脉冲功率技术的发展以及工业应用的需求,非链式 HF 化学激光器的重频运转技术得到了重视,在高重频运转和大平均功率输出两个方面均取得了较大的进展。在高重频方面,1998 年英国防御评估与研究局的 HARRIS 研究小组^[12]报道了闭环 1.5 kHz 的重频 HF 激光器,单脉冲能量为毫焦级;2009 年俄罗斯联邦原子能中心 Velikanov 研究小组^[13]研制了一台高重频脉冲 HF 激光器,运行频率为 2.2 kHz,平

均功率为 40 W。在大功率方面,1993 年法国马克西斯激光工业公司 Brunet 研究小组^[14]实现了重频为 110 Hz、平均功率为 500 W 的 HF 激光输出;1998 年法国的 Lacour 研究小组^[15]获得重频为 12 Hz、单脉冲能量为 20 J 的 HF 激光输出;2010 年俄罗斯的 Bulaev 研究小组^[16]采用自引发体放电技术获得了重频为 20 Hz、脉冲能量为 67 J、平均功率为 1 300 W 的 HF 激光输出。我国对放电引发非链式 HF 激光的研究较晚,西北核技术研究所、中科院电子学所、安徽光机所等多家科研机构已经开展了相关研究^[17-21],并获得了焦耳级脉冲能量,其中仅西北核技术研究所实现了 100 Hz 的重频运转。

上述研究重点关注怎样实现高重频和大平均功率输出,但在光电对抗等应用中,还需要 HF 化学激光器可长时间连续稳定运转。Brunet 等^[14]采用化学吸附方法去除反应产物,获得了 100 Hz 级重频非链式 HF 激光 1 min 连续输出,但是没有详细报道激光能量的稳定性。2016 年周松青等^[22]采用分子筛吸附技术去除激光反应产物,实现了重复频率为 50 Hz、脉冲能量约为 400 mJ 的 HF 激光连续输出 20 s,激光能量下降率优于 10%。在重频连续长时间运行方面,国外尝试了 100 Hz 的重频运行,但无具体的能量数据;国内也探索了 HF 激光稳定运行技术,可是运行频率还比较低。鉴于此,本文重点开展了非链式 HF 化学激光重频 100 Hz 长时间运转稳定输出技术的研究。

2 激光装置

放电引发非链式 HF 化学激光器采用闭环方

式,总体积约为 150 L,其结构如图 1 所示。激光泵浦源采用紫外光预电离结构,储能电容器 C_0 约为 100 nF;激光器的放电增益区体积为 $480 \text{ mm} \times 14 \text{ mm} \times 17 \text{ mm}$ 。轴流风机用于驱动激光器内部工作介质沿循环管道闭环流动,风机最大体积流量约为 80 L/s,气流均匀流过放电区,最大平均流速约为 9 m/s,放电区横截面气体流场分布的实验测量结果如图 2 所示。分子筛吸附装置用于去除反应产物,分子筛吸附装置沿气流方向安装在放电区和轴流风机之间,由多个圆盘状分子筛床组成,每个圆盘分子筛床被均分为 8 个扇区,分子筛放置于扇区内,为了减小分子筛吸附装置的气流阻力,圆盘状分子筛床的填充率为 50%,结构见图 3。气体补给系统给激光器内部实时补给工作气体,气体流量由流量计控制,最大量程为 10 SLM。

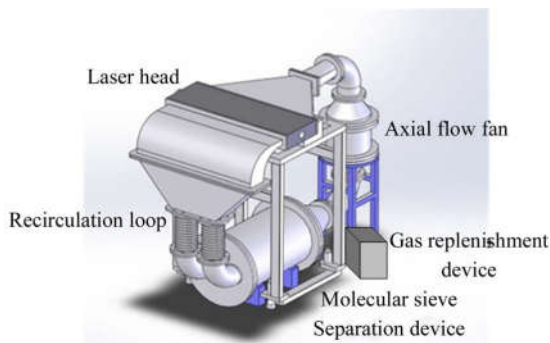


图 1 放电引发 HF 化学激光器的外形结构

Fig. 1 Schematic diagram of electric-discharge HF chemical laser

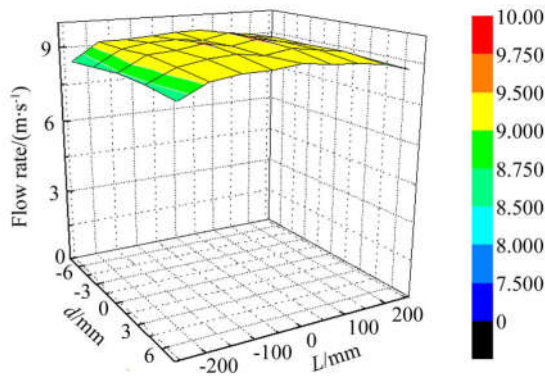


图 2 放电引发 HF 化学激光器增益区的气体流场分布
Fig. 2 Flow rate distribution in gain region of electric-discharge HF chemical laser

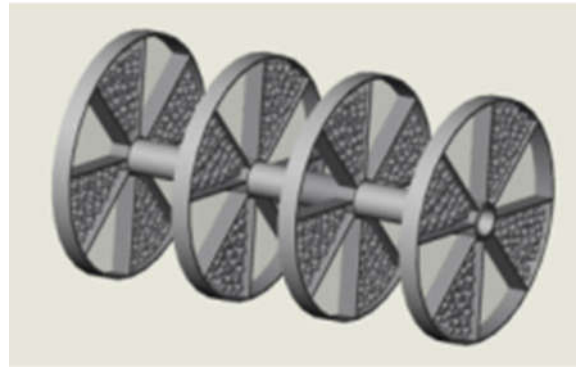


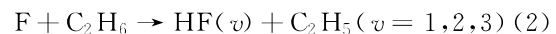
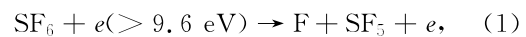
图 3 分子筛吸附装置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of molecular sieve separation device

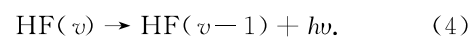
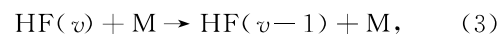
采用罗氏线圈测量放电电流,比例系数为 0.35 kA/V;使用美国北星公司的 PVM-5 型压器测量放电电压,分压比为 1 000 : 1。利用波兰 VIGO 公司的 PDI-2TE-5 型碲锌铬光电探测器记录激光信号,响应波长为 $3 \sim 5 \mu\text{m}$,响应时间小于 20 ns。应用加拿大京泰科公司的 QE50-LP 型中性石墨能量计测量脉冲能量,最大量程为 10 J,最大平均功率为 20 W,数据记录频率为 200 Hz。

3 激光能量的影响因素

100 Hz 放电引发非链式重频 HF 化学激光器采用六氟化硫(SF_6)和乙烷(C_2H_6)的混合气体作为工作气体, C_2H_6 摩尔比为 10%。放电产生的高能电子与 SF_6 碰撞解离出化学反应所需的 F 原子,随后 F 原子与 C_2H_6 发生放热化学反应生成激发态的 HF 分子,激发态的 HF 分子跃迁至低能态形成激光输出,其反应动力学过程可表示为:



$$\Delta H = -31.5 \text{ kcal/mol},$$



式(1)为放电产生 F 原子的过程,其中电子能量大于 9.6 eV;式(2)为生成激发态 HF 分子的化学反应过程,化学反应放热为 31.5 kcal/mol;式(3)为消激发过程,其中 M 代表 SF_6 , C_2H_6 和基态 HF 分子等;式(4)为激射过程。

从上述反应动力学可见,放电引发高能 HF

激光脉冲形成过程中,必须在放电区获得均匀高效的 F 原子产出,且放电区应有充足的 C₂H₆。另外,光化学过程会产生新物质——基态 HF 分子,对激光具有强烈的去激发效应。

均匀的 F 原子产出与激光器的放电状态密切相关。在气体介质静止状态下对 HF 激光器重频放电状态和输出能量稳定性进行了分析,图 4 为实验测量结果,实验条件为:激光器充电电压 24 kV,工作气体总压 $p=16$ kPa。图 4 表明,激光器以 2 Hz 重频运行时,激光器放电状态较好,每个脉冲均实现了均匀体放电,此时激光能量稳定较好;提升激光器的重复频率到 10 Hz 时,部分脉冲放电过程中出现了电弧放电,对应的脉冲能量大幅降低;当激光器的重复频率达到 100 Hz 时,除首脉冲实现均匀体放电外,其余脉冲均呈现出严重的电弧放电,激光能量则迅速下降,第二个脉冲能量降至首脉冲的 20% 以下,后续脉冲能量维持在很低水平。由此可以看出,激光器重频运行期间中,稳定的均匀体放电过程是获得稳定的激光能量输出的首要因素。

在放电引发非链式 HF 激光器中,每个脉冲均会产生一定量的基态 HF 分子。特别地, HF 激光器闭环运行时,各脉冲产生的基态 HF 分子会不断积累,浓度将不断升高。然而,基态 HF 分子对激光具有强烈的消激发效应,这将导致重频过程中激光能量不断降低,故基态 HF 分子积累是影响重频 HF 激光器能量稳定性的又一因素。

根据激光动力学过程可知,放电引发非链式 HF 激光化学过程不可逆行,每个脉冲均会消耗一定量的 SF₆ 和 C₂H₆ 混合气体。对于闭环脉冲重频 HF 激光器,随着脉冲数的累积,激光器内部的 SF₆ 和 C₂H₆ 混合气体浓度不断降低。文献 [19] 指出,放电引发 HF 激光器存在一个最佳的气分比,当激光器内部的 C₂H₆ 浓度低于某一特定值时,激光能量将出现降低。另外, SF₆ 气体浓度影响激光器的放电状态,在运行电压不变的条件下,随着 SF₆ 浓度的降低,激光器均匀体放电越来越难以维持。基于以上两个方面的原因,激光器内部混合气体中 SF₆ 和 C₂H₆ 气体浓度的保持是影响闭环重频 HF 激光器稳定输出的第三个因素。

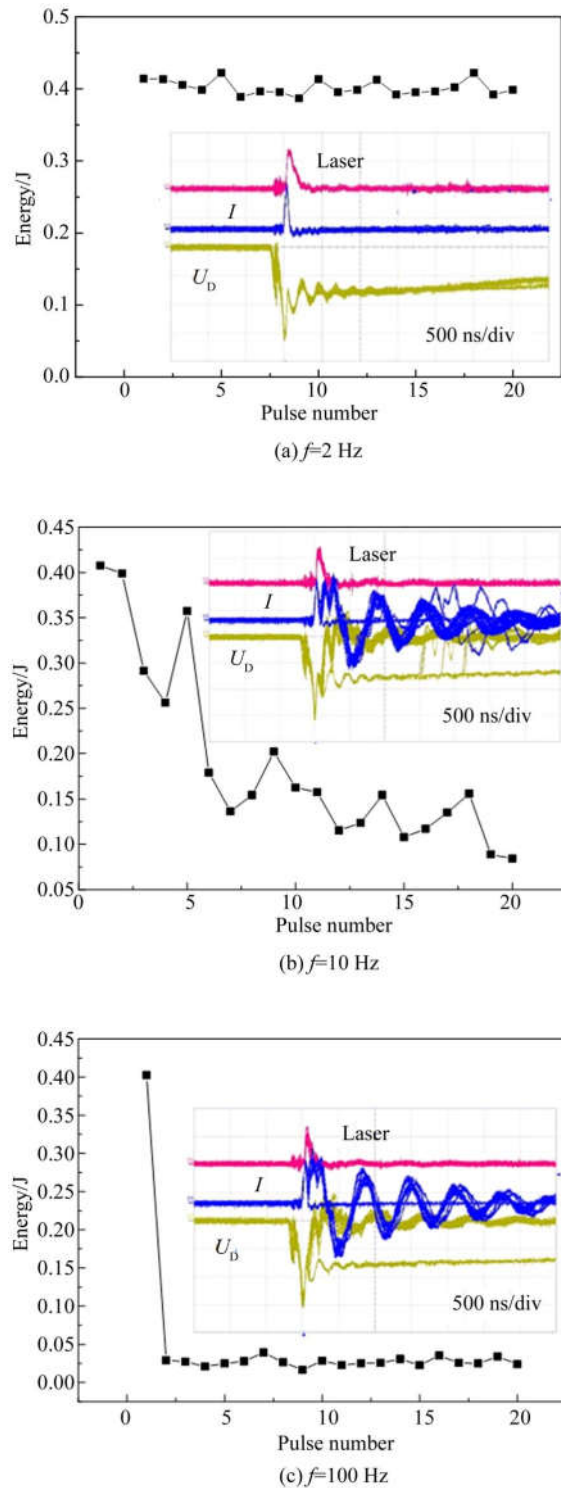


图 4 静态条件下 HF 激光器不同重复频率运行的能量曲线和放电波形

Fig. 4 Energy curve and discharge waveforms of HF laser without gas flow state under different repetitive rates

4 实验结果及分析

4.1 重频均匀体放电维持

HF 激光器重频运行时,由于前脉冲放电对增益区气体介质绝缘特性的影响,后续脉冲形成均匀体放电的难度大大增加,甚至不能形成均匀体放电,导致激光能量降低或不能产生激射。为了解决这一问题,采用了增益区气体介质快速流动置换技术,加快增益区气体的绝缘恢复,保持激光器的重频放电状态。图 5 给出了充电电压 $U_0=24$ kV,混合气体总压 $p=16$ kPa,重频为 100 Hz 时,不同流气条件下的激光能量曲线。可以看出,随着气体流速的增加,重频运行的能量稳定性得到改善;当气体流速达到一定阈值(7 m/s)后,重频运行的能量衰减得到有效抑制,激光能量稳定性明显变好,此时激光器重频放电状态良好,每个脉冲都形成了均匀体放电,相应的放电波形见图 6;继续提升气体流速至 9 m/s,激光能量稳定性进一步改善,不稳定性优于 1.5% (RMS)。其原因在于:激光能量的大幅降低主要缘于放电不稳定,气体流速达到阈值(7 m/s)后,气体流速满足放电区气体绝缘恢复的要求,激光器放电稳定,能量降低被抑制,但气体状态恢复并不充分,激光能量仍然有较大的波动,继续提高气体流速,气体状态恢复得越好,能量越趋于稳定。

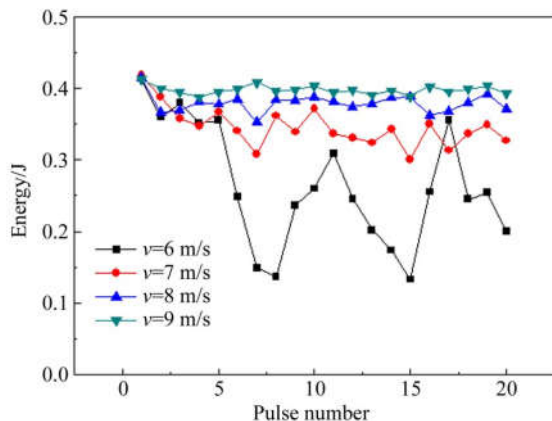


图 5 不同流速下 HF 激光器 100 Hz 重频输出的能量曲线

Fig. 5 Energy curve of HF laser at 100 Hz repetition rate under different gas flow rates

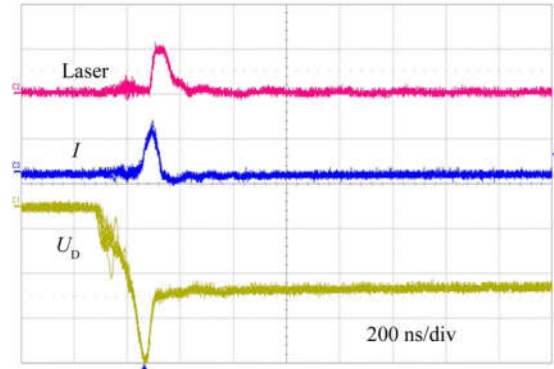


图 6 7 m/s 流速下 HF 激光器 100 Hz 重频的实验波形
Fig. 6 Oscillograph waveform of 100 Hz HF laser with gas flow of 7 m/s

文献[20]指出,放电引发重频 HF 激光器的放电状态还与充电电压和混合气体总气压相关。选择高的混合气体气压有利于改善气体的绝缘恢复性能,改善激光器的放电状态和激光能量的稳定性,但是高的气压将降低激光能量。另外,增加激光器的工作电压,激光能量增大,然而电压的增加也增大了气体绝缘恢复的难度,不利于激光器均匀体放电的维持和能量的稳定输出。闭环重频 HF 激光器的最大气体流速为 9 m/s,为了探寻激光器 100 Hz 重频运转的最佳工作条件,实现高功率稳定的 HF 激光输出,定义某气压下激光器 100 Hz 重频稳定运行的最大电压为该气压的临界电压。气压 12~20 kPa 内 HF 激光器 100 Hz

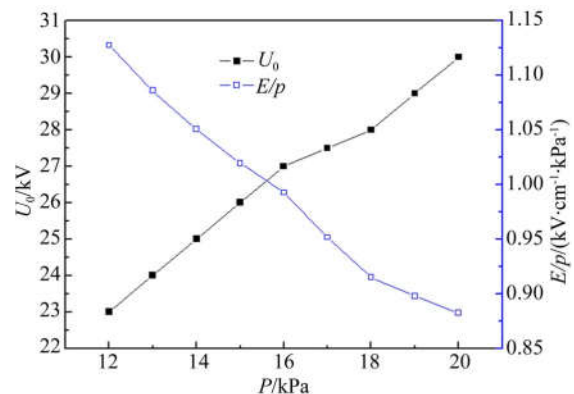


图 7 不同气压条件下 HF 激光器 100 Hz 重频稳定输出的临界电压以及相应的 E/p

Fig. 7 Critical voltage and its corresponding E/p of 100 Hz repetition rate HF laser with stable pulse energy under different total pressures of gas mixture

重频稳定输出的临界电压以及相应的折合场强 (E/p , E 为主电极间的电场强度) 如图 7 所示。可以看出,随着气压的增大,临界电压不断提高,而对应的 E/p 则不断降低。这是因为充电电压越高,单位体积下放电沉积能量密度越大,放电恢复越困难,需要提高混合气体气压来促进气体的绝缘恢复。图 8 给出了上述几个典型的临界条件下激光器 100 Hz 连续输出 20 个脉冲的能量曲线,可以看到随着气体气压的提高,激光器 100 Hz 稳定输出能量逐渐增大,在气压 20 kPa、电压 30 kV 时,激光器 100 Hz 重频输出的平均能量达到了 550 mJ。

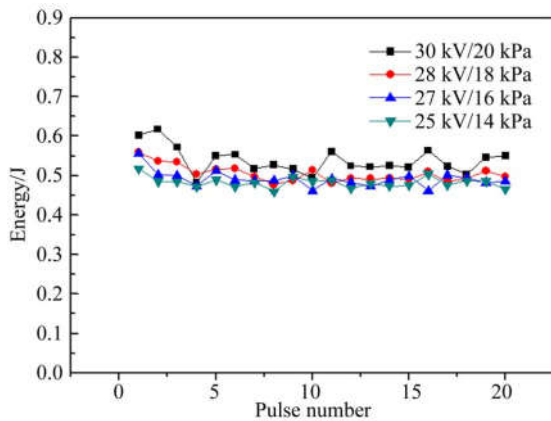


图 8 不同气压条件下 HF 激光器临界电压 100 Hz 运行的能量曲线

Fig. 8 Energy plots of 100 Hz HF laser at critical voltage under different total pressures of gas mixture

4.2 基态 HF 去除技术

放电引发 HF 激光器中储存有一定量的工作气体,激光器短时间运转时,由于产生的基态 HF 分子较少,来不及扩散,循环置换到增益区的气体可视为纯净的 SF_6 和 C_2H_6 混合气体,只要形成良好的放电状态,就能实现激光能量稳定。然而随着运转时间的增加,基态 HF 分子积累增多,激光器循环置换过程中增益区将受到基态 HF 分子的影响。分子筛具有吸附小于孔径的分子,允许大于孔径分子通过的选择吸附性能。依据基态 HF 的分子直径约为 2.8×10^{-10} m, SF_6 和 C_2H_6 的分子直径均大于 3×10^{-10} m 的特征,采用 3A 型沸石分子筛对基态 HF 分子进行吸附分离,净化激光介质气体。图 9 为工作电压为 27 kV,混合气体压强为 16 kPa 时,有无分子筛条件下 HF 激光

器 100 Hz 连续运行 10 s 时激光能量的归一化曲线。没采用分子筛时,激光能量的下降趋势十分明显,平均能量降低了 50%;加入 6 层分子筛吸附床后,激光器重频输出能量的稳定性得到了改善,能量下降率约为 30%;加入 9 层分子筛床,激光能量的下降率进一步减小,约为 20%。实验结果表明,3A 分子筛吸附了基态 HF 分子,对激光的工作介质进行净化,使得激光器重频输出的稳定性得到较大的提高,增加分子筛数量,吸附效果得到了提升,HF 激光的能量稳定性进一步改善。但是 HF 激光重频 100 Hz 连续运转 10 s 的能量仍在持续降低,其原因可能是分子筛吸附基态 HF 分子不充分和工作气体持续消耗。

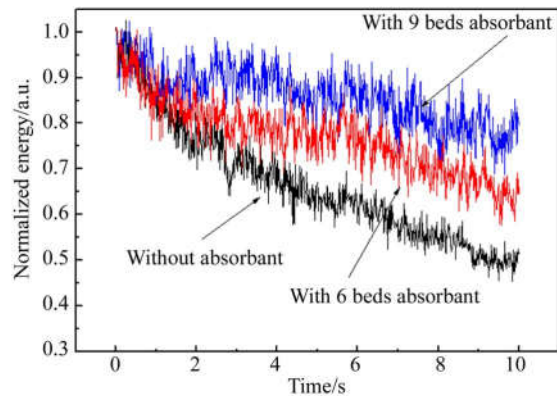


图 9 有无分子筛条件下 HF 激光器 100 Hz 连续运行 10 s 的能量归一化曲线

Fig. 9 Normalized energy plots of 100 Hz/10 s HF laser with a burst mode with and without molecular sieve

4.3 工作气体补给技术

放电引发 HF 激光器长时间重频运转过程中,除了不断产生基态 HF 分子外,由于化学反应过程不可逆,工作气体 (SF_6 和 C_2H_6 混合气体) 也在不断消耗。因此,实现放电引发 HF 激光长时间稳定输出,还需要对工作气体进行实时补给。激光工作气体中 SF_6 和 C_2H_6 的摩尔分数比为 10 : 1, SF_6 的量足够,因此实验中仅补给了 C_2H_6 气体。另外,实验发现激光器运行 10 s 后,其内部工作气体总压下降约 300 Pa,气压下降速率为 30 Pa/s。由于激光能量对工作气体总压是敏感的,为了减小工作气体气压变化对激光能量的影响, C_2H_6 气体的腔内补给速率设定为 30 Pa/s,换

算为体积流量即为 45 mL/s。图 10 展示了补给 C_2H_6 气体情况下放电引发 HF 激光器 100 Hz 重频连续运行 30 s 的激光能量曲线,相对应的实验条件为:充电电压 27 kV,混合气体总压 16 kPa 或 20 kPa,装有 9 层分子筛,气体流速 9 m/s。图 10 中,工作气体总气压 16 kPa 对应的能量曲线的下降率为 30%,在 10 s 处的能量下降率约为 14%,较没补给情况下(下降率为 20%)的能量下降速率明显减小,表明补给 C_2H_6 气体可有效提升放电引发 HF 激光器 100 Hz 重频运行的能量稳定性。提高激光器内工作气体的总气压,有利于改善激光能量的稳定性,当工作气体总压为 20 kPa 时,激光器的能量下降率约为 9.5%,较 16 kPa 时的能量稳定性有显著提升。

提高激光器工作气体的总气压,不仅增加了激光器内的气体总量,同时降低了激光器的放电强度,减小了单脉冲激光介质的消耗量和反应产物的产量,降低了对吸附系统的要求,因此激光能量的稳定性得以提升,但是激光的脉冲能量却有所下降。

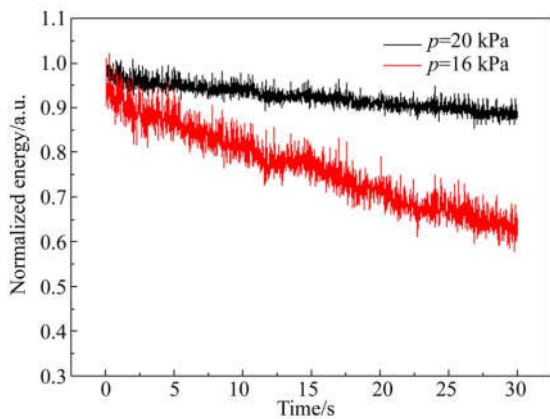


图 10 补给 C_2H_6 气体情况下 HF 激光器 100 Hz 连续运行 30 s 的能量曲线

Fig. 10 Normalized energy plots of 100 Hz/30 s HF laser with a burst mode under replenishment of C_2H_6

参考文献:

- [1] 李殿军,杨贵龙,谢冀江,等. 9.3 μm 脉冲 CO_2 激光倍频实验[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2684-2691.
LI D J, YANG G L, XIE J J, et al.. Experiments of second harmonic generation of 9.3 μm pulsed

5 结 论

本文利用紧凑型闭环放电引发非链式 HF 激光器,研究了 100 Hz 重频 HF 激光器的长时间运行特性。结合放电引发非链式 HF 激光的反应动力学过程和静态重频实验,分析获得了影响放电引发非链式 HF 激光重频稳定输出的三个主要因素。其中,重频均匀体放电的维持是激光器稳定输出的首要因素;化学反应产物——基态 HF 分子分离去除是激光能量稳定的重要因素;激光工作气体的实时补给是激光稳定输出的第三因素。利用轴流风机驱动工作气体快速循环流动(增益区的最大气体流速为 9 m/s),实现了增益区气体均匀快速置换,使激光器 100 Hz 重频运转过程中均匀体放电得以很好的维持。采用 3A 分子筛分离去除化学反应产物,有效吸附基态 HF 分子,降低了激光器腔内基态 HF 分子的浓度,激光能量稳定性得到了明显的提升。激光器连续运行 10 s 的能量稳定性较未吸附情况下提升了 50%。通过实时补给 C_2H_6 工作气体,进一步改善了放电引发非链式 HF 激光器长时间输出能量的稳定性。采用增益区气体快速置换、分子筛吸附和工作气体实时补给三项措施,放电引发 HF 激光器实现了长时间稳定运行。在工作气压为 20 kPa、充电电压为 27 kV 的条件下,激光器一次触发连续运转 30 s 的能量下降率约为 9.5%。

非链式脉冲 HF 化学激光器在高能输出,重频运转和长时间稳定运行方面均取得了明显的进步,但是目前仍未见能兼顾上述几个方面的激光器的报道,另外现阶段非链式 HF 化学激光器的电光效率较低。因此,高效、高能量、长时间重频稳定运转仍然是其发展的方向,相应的放电引发能量高效注入、高效 F 原子产出、新型激光介质探索、激光介质精细控制等技术亟待攻克。

- CO_2 lasers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2009, 17(11):2684-2691. (in Chinese)
[2] 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.
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. (in Chinese)
- [3] 苏辉,李志平,段延敏,等. 基于掺镁周期极化铌酸锂晶体的内腔单共振连续可调谐光参量振荡器[J]. 光学精密工程, 2013, 21(6):1404-1409.
SU H, LI ZH P, DUAN Y M, *et al.*. Intra-cavity singly resonant optical parametric oscillator based on magnesium-doped periodically poled lithium niobate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(6):1404-1409. (in Chinese)
- [4] 陶蒙蒙,黄珂,吴涛涛,等. Fe : ZnSe 晶体吸收光谱测量及计算[J]. 现代应用物理, 2018, 9(2):020302.
TAO M M, HUANG K, WU T T, *et al.*. Measurement and calculation of the absorption spectrum of Fe : ZnSe crystal[J]. *Modern Applied Physics*, 2018, 9(2):020302. (in Chinese)
- [5] 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.
WU SH S, ZHANG H Y, WANG T F, *et al.*. Single longitudinal mode TEA CO₂ laser based on transmissive unstable resonator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(2):293-299. (in Chinese)
- [6] 宋丹丹,左强,武红,等. 利用相位啁啾单色中红外激光场产生高次谐波[J]. 原子与分子物理学报, 2018, 35(3):466-472.
SONG D D, ZUO Q, WU H, *et al.*. High-order harmonic generation with single mid-infrared laser field by a phase-chirping[J]. *Journal of Atomic and Molecular Physics*, 2018, 35(3):466-472. (in Chinese)
- [7] 李充,谢冀江,潘其坤,等. 中红外光学参量振荡器技术进展[J]. 中国光学, 2016, 9(6):615-624.
LI CH, XIE J J, PAN Q K, *et al.*. Progress of mid-infrared optical parametric oscillator [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(6):615-624. (in Chinese)
- [8] 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.
WANG J, GUO J Z, LI SH 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. (in Chinese)
- [9] 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.
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. (in Chinese)
- [10] 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.
KONG X Y, KE CH J, HU CH F, *et al.*. 65 mJ Fe²⁺ : ZnSe mid-infrared laser at room temperature[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1):0101011. (in Chinese)
- [11] 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.
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. (in Chinese)
- [12] HARRIS M R, MORRIS A V, GORTON E K. A closed-cycle 1 kHz pulse repetition frequency HF (DF) laser[J]. *SPIE*, 1998, 3268:247-251.
- [13] VELIKANOV S D, EVDOKIMOV P, ZAPOLSKY F, *et al.*. Pulse periodic HF(DF)-laser of atmospheric pressure with pulse repetition rate up to 2 200 Hz[J]. *SPIE*, 2009, 7131:71310.
- [14] BRUNET H, MABRU M, VANNIER C. Repetitively-pulsed HF/DF chemical laser with high average power[J]. *SPIE*, 1993, 1810:273-276.
- [15] LACOUR B. High average power HF/DF lasers [J]. *SPIE*, 2000, 4071:9-16.
- [16] BULAEV V D, GUSEV V S, KAZANTSEV S Yu, *et al.*. High-power repetitively pulsed electric-discharge HF laser[J]. *Quantum Electronics*, 2010, 40:(7):615-618.
- [17] 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(6):36-38.
KE CH J, ZHANG K H, SUN K, *et al.*. A periodically pulsed HF/DF gas discharge laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(6):36-38. (in Chinese)
- [18] 王庆胜,游利兵,尹广玥,等. 焦耳级放电激励紫外预电离 HF 激光器[J]. 强激光与粒子束, 2016, 28(8):081003.
WANG Q SH, YOU L B, YIN G Y, *et al.*. Discharge-pumped joule-level HF laser with ultraviolet spark pre-ionization[J]. *High Power Laser and Par-*

- ticle Beams*, 2016, 28(8):081003. (in Chinese)
- [19] 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.
HUANG K, TANG Y, YI A P, *et al.*. Characteristics of non-chain discharge-pumped pulse HF laser[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(6): 1026-1029. (in Chinese)
- [20] 唐影, 黄珂, 易爱平, 等. 放电激励重复频率 HF 激光器稳定输出实验研究[J]. 中国激光, 2012, 39: 0202004.
TANG Y, HUANG K, YI A P, *et al.*. Experimental study on stable output of discharge-pumped repetition rate HF laser[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2012, 39: 0202004. (in Chinese)
- [21] 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.
HUANG K, HUANG CH, ZH 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. (in Chinese)
- [22] 周松青, 马连英, 黄珂, 等. 非链式脉冲 HF 激光器激光介质净化技术[J]. 光子学报, 2016, 45(3): 0314004.
ZHOU S Q, MA L Y, HUANG K *et al.*. Purify technology of laser medium in non-chain pulsed HF laser[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(3): 0314004. (in Chinese)

作者简介:



黄超(1979—),男,重庆万州人,硕士,助理研究员,2002年于四川大学获得学士学位,2009年于西北核技术研究所获得硕士学位,现主要从事激光技术及应用和脉冲功率技术方面的研究。
E-mail:huangchao@nint.ac.cn



黄珂(1979—),男,山东青岛人,硕士,副研究员,2000年于国防科技大学获得学士学位,2006年于国防科技大学获得硕士学位,现主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail:huangke@nint.ac.cn