

文章编号 1004-924X(2011)02-0360-07

电激励重复频率非链式 HF 激光器

易爱平,刘晶儒,唐影,黄珂,黄欣,于力,马连英

(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:采用电子束和气体放电两种激励方式开展重复频率非链式 HF 激光研究。基于全固态脉冲功率源 SPG-200 建立了重复频率 HF 实验装置,探索了产生重频大面积均匀电子束的技术途径,利用法拉第筒对进入激光气室的电子束的轴向均匀性进行了诊断,开展了激光器输出特性研究和重频实验调试,在 $C_2H_6 : SF_6 = 0.035$,总气压为 35 kPa 时,激光器输出能量最大约为 4.8 mJ,并实现了最高 30 Hz 的 HF 激光稳定输出。采用峰化电容及紫外自动预电离技术设计研制了放电激励重频 HF 激光器,研究了 SF_6 气体放电特性和重频运行稳定性。研究发现 SF_6 气体放电具有典型的辉光放电、电压维持和电弧放电三阶段特征。在充电电压为 28 kV,总气压为 12 kPa, C_2H_6 含量为 8% 时,放电激励 HF 激光器最大脉冲能量约 600 mJ,比能量输出达到 8.5 J/l,激光器的电光转换效率约为 2.5%。该激光器在 1~50 Hz 实现了重频输出,首脉冲能量 >500 mJ,在 10 Hz 时稳定输出能量约为 200 mJ。

关键词:非链式 HF 激光;重复频率;电激励;气体放电

中图分类号: TN248.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20111902.0360

Electrically initiated repetitive-pulsed non-chain HF lasers

YI Ai-ping, LIU Jing-ru, TANG Ying, HUANG Ke, HUANG Xin, YU Li, MA Lian-ying

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

Abstract: The repetitive-pulsed non-chain HF lasers initiated by e-beams and fast discharges were studied respectively. The e-beam initiated HF laser characterized by an all-solid-state generator was developed. A large area repetitive uniform e-beam was obtained and the Faraday cup was used to diagnose the uniformity of e-beam into the laser gas cell. The output characteristics of the laser were studied and the maximal energy of 4.8 mJ was obtained with gas mixture $C_2H_6 : SF_6 = 0.035$. The e-beam initiated HF laser could operate at the repetition rate of 30 Hz. The discharge initiated non-chain HF laser was designed by using the technologies of peaking capacitor and UV pre-ionizing. The discharge characteristics and stability of SF_6 gas in repetition mode were studied. The results show that the discharge includes main discharge (volume discharge) and arc discharge, between which the voltage maintains and no evident discharge is visible. The maximal output energy of 600 mJ is achieved under the condition of 28 kV charging voltage and 12 kPa gas pressure with 8% C_2H_6 . Specific output energy of 8.5 J/l and laser electrical efficiency of 2.5% are obtained. In repetition mode, the laser can operate in the repetition rate from 1 Hz to 50 Hz. The first pulse energy is above 500 mJ, and the stable

收稿日期:2010-10-08;修订日期:2010-10-30.

基金项目:激光与物质相互作用国家重点实验室基金资助项目(No. SKL110902)

output energy of the laser at the repetition rate of 10 Hz is about 200 mJ.

Key words: non-chain HF laser; repetition rate; e-beam initiating; discharge

1 引言

脉冲 HF 激光波长为 $2.5 \sim 3.1 \mu\text{m}$, 广泛地应用在激光雷达、激光光谱学、激光化学、生物化学和大气探测等领域。HF 激光依 F 原子的产生方式可分为链式和非链式两种。与链式 HF 激光器相比,非链式化学反应所需的 F 原子来源于高能电子对含氟化合物价键的断裂,激光能量通过电能转换而来,因而电效率较低,最大约为 10% 左右。非链式 HF 激光器发射脉冲峰值功率大,光束质量好,结构紧凑,便于小型化,无腐蚀和爆炸的危险,重复频率高,并且能长时间持续运转,因而在国际上受到了广泛的关注。非链式 HF 激光可通过电子束激励和放电激励两种技术途径实现。电子束激励重频非链式 HF 激光可实现大能量、高平均功率输出,但技术复杂,涉及重频开关、重频高压脉冲功率源、重频电子束产生及高效传输、气体循环及补给等技术,由于电子束产生及传输技术环节中阴极材料及压力膜寿命的限制,激光器重复频率不能太高,在功率较低时一般为百赫兹^[1-2]。研制放电激励重频非链式 HF 激光器相对来说技术要较为简单一些,由于可以省去电子束产生及传输环节,且所需脉冲电源输出的电压幅值也大大降低,激光器重复频率可达千赫兹^[3]。放电激励高重频 HF 激光器的关键在如何在强电负性气体(NF_3 、 SF_6 等)中获得均匀稳定的体放电,以提高能量沉积效率和激光提取效率,此时通常需要采用紫外或 X 射线预电离技术。另外,激光介质消耗及补给、基态 HF 分子的排除、长寿命高压开关及放电电极研制等也是需要解决的关键技术。

近年来,国际上对非链式 HF 脉冲激光器开展了大量的理论和实验研究^[3-9]。由于高功率重频脉冲功率源的限制,很少见到有关电子束激励非链式 HF 激光器重频运行的报道,而采用放电激励方式开展非链式 HF 激光研究则取得了良好的进展。目前,法国巴黎大学等离子体物理实验室 B. Lacour 等研制的重频 HF 激光器,运行频率超过 10 Hz,单脉冲能量大于 $20 \text{ J}^{[6]}$ 。美国

Henri Brunet 等人研制的放电激励 HF 脉冲激光器,其重复频率已大于 100 Hz,单次脉冲能量在 10 J 以上,平均功率为千瓦量级^[7]。英国国防研究与评估机构 M. R Harris 等人研制的闭环重频 HF 激光器运行频率超过 1 kHz,但平均输出功率还较低,约 10 W 左右^[3]。国内开展非链式 HF 激光研究较晚,中科院电子所 2003 年利用放电激励已获得了 HF 激光输出,最大能量约 $3 \text{ J}^{[10]}$ 。西北核技术研究所 2005 年开始进行重频非链式 HF 激光的研究工作,2006 年实现了电子束激励 30 Hz HF 激光的重频输出。2009 年采用放电激励方式实现了 50 Hz HF 激光输出,脉冲能量最高约 0.6 J,目前正在进行提高重频和运行稳定性的研究。本文主要介绍利用电子束和放电两种激励方式开展重复频率非链式 HF 激光的研究情况。

2 电子束激励重频 HF 激光器

2.1 实验装置

图 1 为利用 SPG-200 脉冲功率源激励 HF 激光的实验装置结构示意图,主要由 SPG-200、二极管和激光气室 3 部分组成。SPG-200 是基于二极管断路开关(SOS)的全固态重复频率脉冲功率源,由晶闸管充电单元、磁脉冲压缩器及 SOS 等几部分组成。其输出参数受负载影响较大,输出电压随负载增加而增加,输出电流随负载增加而减少,开路电压大于 350 kV。负载为 $50 \sim 400 \Omega$ 时,输出电压为 $80 \sim 280 \text{ kV}$,输出电流为 $0.7 \sim 1.7 \text{ kA}$,输出脉宽(FWHM)为 $30 \sim 50 \text{ ns}$ 。SPG-200 脉冲功率源的具体参数及性能描述详见参考文献^[11]。

真空二极管以天鹅绒作为阴极发射材料,阴极发射面积为 $290 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$,采用无阳极箔结构,栅网平面作为阳极面,阴阳极之间的距离(即 A-C 间隙)在 $0 \sim 49 \text{ mm}$ 可调。栅网平面上每隔 1.5 mm 开有一长 30 mm、宽 20 mm 的矩形栅孔共 14 个。采用 Ti 箔或 Kapton 膜作为压力膜用于隔离激光气室与二极管真空室,阴极发射的电子束通过压力膜进入激光气室,对激光介质

进行均匀激励。

天鹅绒阴极的基座采用黄铜材料,基座长 294 mm,宽 24 mm,两头均为半径为 12 mm 的半圆,阴极和基座通过螺钉固定。在制作天鹅绒阴极时,将天鹅绒平铺在阴极托上,用一铝制压框将绒布压紧,四周用螺钉固定,以保证绒布平整及其与阴极托的电接触,并防止天鹅绒向真空室四周放电。

激光气室采用箱体结构,箱体材料为硬铝,气室内部长 352 mm、宽 70 mm、高 82 mm,电子束输出窗口为 290 mm×20 mm,气室窗口的有效尺寸为 36 mm×50 mm。

质增益极不均匀,激光提取效率降低,激光输出能量减少。

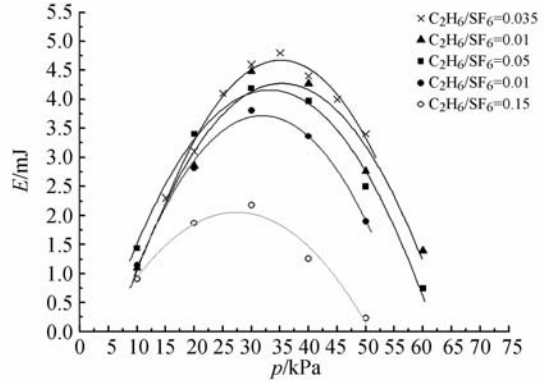


图 2 激光输出能量随气压的变化曲线

Fig. 2 Output energy vs. pressure

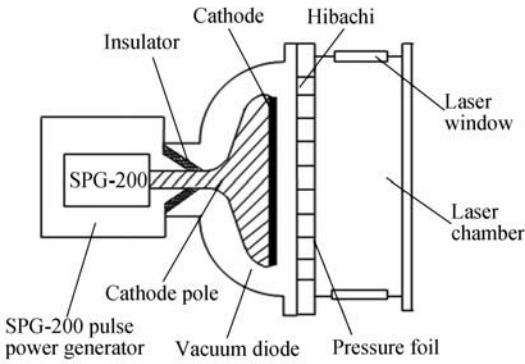


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

2.2 激光器输出特性

激光器谐振腔为 98% 的凹面反射镜和透过率为 30% 的输出镜组成的平凹腔,研究了在不同气压和不同气体混合比例条件下激光的输出特性。图 2 为相应的激光输出能量随气压变化的规律曲线。从中可以看出,在 $C_2H_6 : SF_6 = 0.035$, 总气压为 35 kPa 时激光器输出能量最大约 4.8 mJ,所采用的几种比例的激光介质,随着总气压的升高,激光器输出能量先上升后下降,存在最佳工作气压(约为 30~40 kPa)。这是因为气压较低时,电子大部分穿过激光介质而被气室后壁吸收,沉积在激光介质中的电子束能量较少,电子束沉积效率低,导致激光输出能量较少。随着气压的增加,电子束沉积效率升高,激光增益不断增强,激光输出能量增大。当气压超过最佳值后,随着气压增加,尽管电子束能量大部分都沉积在激光介质中,但是由于电子在 SF_6 气体中射程小,到达气室窗口远端的电子数目减少,致使激光介

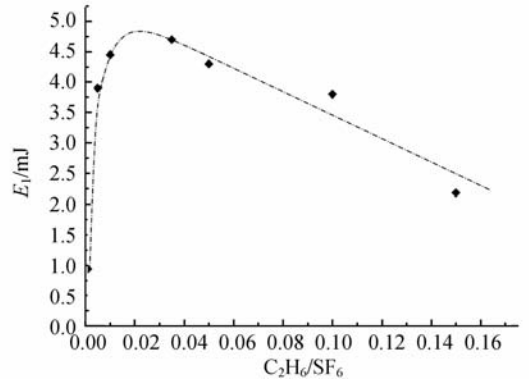


图 3 激光输出能量随混合气体比例的变化曲线

Fig. 3 Output energy vs. C_2H_6/SF_6 ratio

图 3 为平凹腔在混合气体气压为 30 kPa 的条件下,激光输出能量随混合气体比例的变化曲线。由图可知,激光器最佳气分比出现在 $C_2H_6 : SF_6 = 0.025$ 附近。激光器存在最佳气分比的主要原因是,在一定的电子束能量下,断裂 SF_6 价键获得的 F 原子数量不变,随着 C_2H_6 浓度的增加,化学反应产生的高能态 HF^* 分子越多,激光增益增大,激光输出能量增加;而当 C_2H_6 浓度超过最佳值后,激光介质中大量 C_2H_6 分子使 HF^* 振动弛豫,激光增益系数减小,激光输出能量降低。

2.3 激光器重频调试

均匀稳定的大面积电子束是激光器重频稳定输出的关键。实验中采用 50 μm Ti 箔为压力膜,在 10~50 Hz 内进行了重频电子束实验调试,用法拉第筒测量电子束的均匀性。图 4 是 50 Hz 时

1145 炮的典型二极管电流及膜后电子束流包络波形,表明在 50 Hz 时获得了大面积电子束输出,且二极管运行稳定性较好,图中出现的两次波形偏差对应于脉冲功率源启动和结束时刻。压力膜改用 50 μm Kapton 膜后进行了重频 10~30 Hz 的激光输出实验研究。实验条件为:谐振腔为由 98% 的全反镜和透过率 30% 的输出镜组成的平行平面腔;二极管采用天鹅绒阴极,阴阳极间隙 26 mm,阳极为铜丝网。激光器输出单脉冲能量约 5 mJ,脉宽约 30 ns。图 5 是重频 30 Hz 条件下,气分比为 $\text{C}_2\text{H}_6 : \text{SF}_6 = 0.035$,气室气压 30 kPa 时 90 个激光波形的包络图,表明获得了重频 30 Hz 的激光输出,且能量稳定性较好。

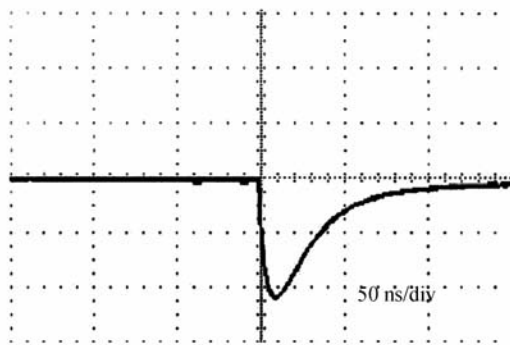


图 5 30 Hz 运行时 90 个激光波形的包络图

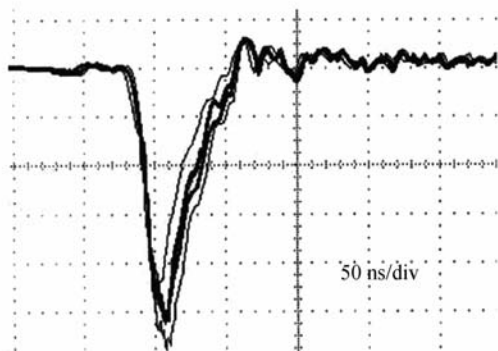
Fig. 5 Overlapped 90 laser pulses at 30 Hz

3 放电激励重频 HF 激光器

3.1 实验装置

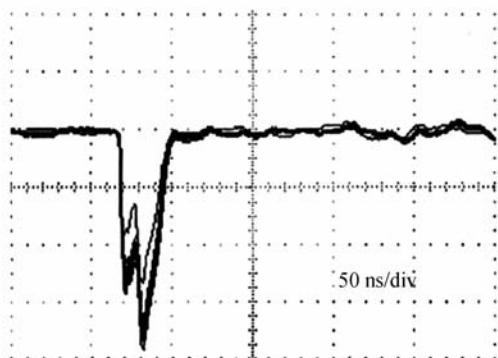
实验用激光装置采用电容储能的横向放电结构,其等效电路如图 6 所示。主电极为一对不锈钢材料加工的长 480 mm、宽 30 mm 的条形电极,为了消除边缘效应导致的电场不均匀,在电极两侧做了半径 10 mm 的圆滑处理,电极间距 15 mm,有效增益区体积约为 0.07 L。主电容 C 由 11 个 5.6 nF 的陶瓷电容并联组成,最高充电电压 28 kV,触发开关采用三电极火花开关。为了在强电负性气体中获得稳定均匀的辉光放电,装置中采用了火花隙紫外预电离技术,其实现结构是在阳极两侧均匀分布了 24 对电容耦合的不锈钢预电离针,与电极间隔 2 mm,每个峰化电容(预电离电容) C_p 为 0.4 nF,总的峰化电容量与储能电容量比值约为 1:3。当主开关导通时,预电离针与电极边缘发生火花放电产生强烈的紫外光辐射电离混合气体,为主放电提供大量均匀分布的初始电子,实现预电离功能^[6-7]。主放电回路的连线采用 1 mm 厚紫铜片,并且系统结构设计紧凑以减小回路电感 L ,放电电压和放电电流信号分别由自制的电阻分压器 R_1/R_2 和电阻分流器 R_c 进行取样测量。

激光器的谐振腔采用内腔式的稳定腔结构,后腔镜使用曲率半径为 3 m、反射率为 99% 的镀银球面反射镜,输出镜采用未镀膜的 CaF_2 平板玻璃。实验中利用示波器记录放电的电压电流波形,能量计和红外探测器记录激光脉冲能量和激光信号波形,中红外热像仪记录激光近场光斑的空间分布。



(a) 二极管电流

(a) Diode current



(b) 膜后电子束流

(b) Current behind foil

图 4 50 Hz 运行时 1145 个典型波形包络图

Fig. 4 Overlapped 1145 diode current waveforms at 50 Hz

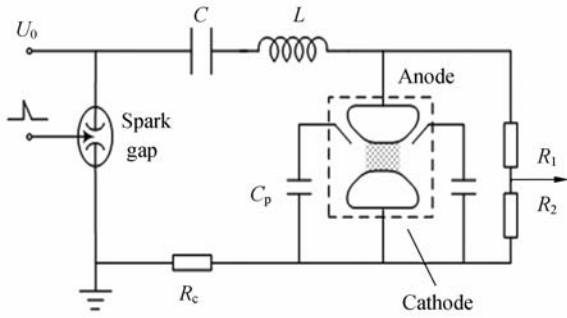


图 6 激光器等效电路

Fig. 6 Schematic diagram of discharge circuit



图 7 电极间隙放电图像

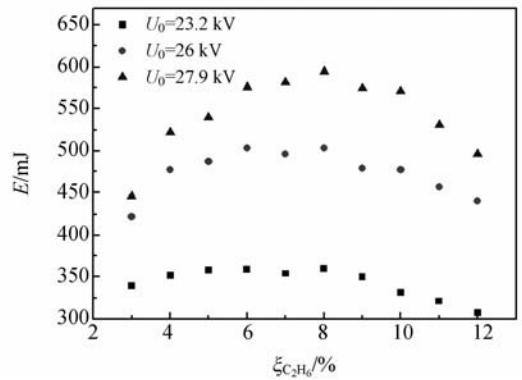
Fig. 7 Integrated photograph of discharge

3.2 实验结果与分析

气体介质均匀体放电(辉光放电)是实现放电激励 HF 激光输出的关键,而预电离对气体介质均匀体放电有重要影响^[12-13]。充电电压的大小决定了预电离的强弱,也直接影响了辉光放电和电弧放电的强度。对一定气压的 SF₆ 气体,通过改变充电电压研究了其放电过程及特性。研究发现, SF₆ 气体放电具有主放电、剩余电压维持和电弧放电明显的三阶段特征^[14]。在放电开始的主放电阶段,放电形式为辉光放电。随着充电电压的升高,放电等离子体荧光亮度不断增强,放电均匀性更好。由于 SF₆ 气体的强电负性,当激光电极间隙电压下降至一定值时,放电中断,主放电结束进入电压维持阶段。电压维持一定时间后,出现贯穿电极间隙的电弧,此时电压维持阶段消失。实验结果表明,随着充电电压的提高,辉光放电强度不断增加,而剩余电压不断降低,并且电压维持阶段的维持时间也在缩短,电弧放电不断提前,直到起弧时间出现在主放电阶段时,极间电压降为 0,此时电压维持阶段完全消失。图 7 为电极间隙的辉光放电图像,其中图像下部为阴极表面的放电亮斑,中部为均匀体放电。

实验中保持混合气体总压为 12 kPa 不变,在 C₂H₆ 含量为 3%~12% 内研究了 C₂H₆ 含量对激光输出的影响,激光能量随 C₂H₆ 含量的变化曲线如图 8 所示。可以看出,当 C₂H₆ 含量低于 3% 时,激光能量明显较低,这主要是由于较小的 C₂H₆ 含量使其与 F 原子的碰撞几率降低,影响激发态 HF 分子的产生^[9];当 C₂H₆ 含量增加到 10% 以后,能量也有明显下降,这主要是由于过量的 C₂H₆ 会引起激发态 HF 分子的快速弛豫。实验结果表明,混合气体中的 C₂H₆ 含量在 6%~

8% 时,对于不同的充电电压都能获得较好的激光输出能量。在充电电压为 28 kV、总气压为 12 kPa、C₂H₆ 含量为 8% 时激光器最大脉冲能量约为 600 mJ,比能量输出达到 8.5 J/l,激光器的电光转换效率约为 2.5%。

图 8 不同 C₂H₆ 含量的激光能量变化情况 ($p=12$ kPa)Fig. 8 Laser pulse energy for various C₂H₆ concentration ($p=12$ kPa)

气室中激光介质 SF₆ 和 C₂H₆ 混合气体总气压为 10.5 kPa, C₂H₆ 含量为 8%, 充电电压为 27 kV, 在 5~50 Hz 不同运行频率时研究了激光器重频输出特性。研究表明激光器在 5~50 Hz 范围实现了重频输出, 激光器首脉冲能量大于 500 mJ, 在 10 Hz 时激光器输出稳定性较好, 稳定输出能量约为 200 mJ。图 9 是 10 Hz 时 20 个激光脉冲波形的叠加图, 图 10 是 10 Hz 时 100 个激光脉冲时间系列。随着频率的上升, 激光输出能量衰减较快。分析认为, 激光能量衰减较快的主要原因是气体介质未进行循环处理, 导致一方面激光电极间隙(泵浦区)介质补充不足, 激光增益减小; 另一方面生成物排出不及时, 损耗增加, 使

得激光器输出能量下降。频率越高时,这一效应越为明显。

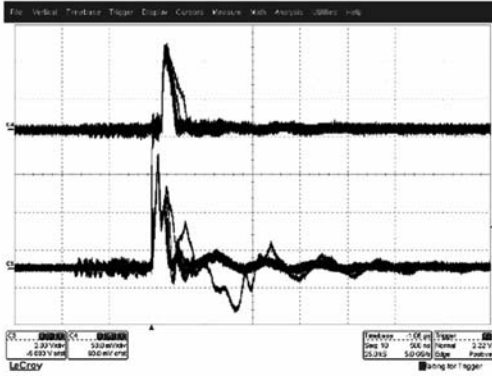


图9 10 Hz时20个激光脉冲波形的包络图
Fig.9 Overlapped 20 laser pulses at 10 Hz

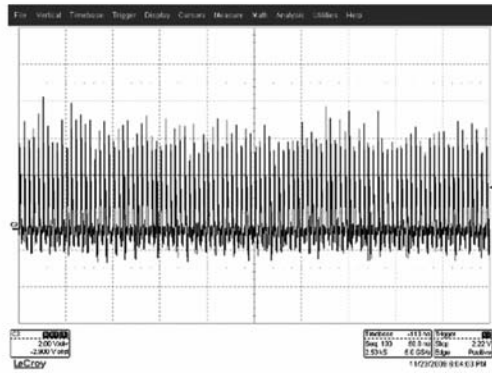


图10 10 Hz时100个激光脉冲时间系列
Fig.10 Series of 100 laser pulses at 10 Hz

4 结 论

采用电子束激励和放电激励两种方式开展重复频率非链式 HF 激光研究。在电子束激励方面,基于全固态脉冲功率源 SPG-200 建立了重复频率 HF 激光器,开展了重频电子束实验调试,获得了大面积均匀电子束;研究了激光最佳输出条件,获得了激光器输出能量随气体介质比例和总气压的变化规律,在 $C_2H_6 : SF_6 = 0.035$,总气压为 35 kPa 时单脉冲最高输出能量为 4.8 mJ,实现了 30 Hz 重频稳定输出。在放电激励方面,采用峰化电容及紫外自动预电离技术设计了放电激励重频 HF 激光器,研究了低压 SF_6 气体放电特性,实现了均匀体放电;实验研究获得了气体最佳工作条件,在充电电压为 28 kV、总气压为 12 kPa、 C_2H_6 含量为 8% 时激光器最大脉冲能量约为 600 mJ,激光器的电光转换效率约为 2.5%;并实现了 5~50 Hz 重频输出,激光器首脉冲能量大于 500 mJ,在 10 Hz 时激光器稳定输出能量约为 200 mJ。由于气体介质未进行循环处理,激光器在高重频运行时输出能量衰减较快。下一步拟开展气体介质循环条件下激光器重频实验研究,以提高其输出稳定性。

参考文献:

- [1] 张永辉,马乔生,常安碧,等. 重复频率强流电子束二极管实验研究展[J]. 强激光与粒子束,2005,16(11):1437-1440.
ZHANG Y H, MA C S, CHANG A B, *et al.*. Study of repetition rate and intense current e-beam diodes [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005,16(11):1437-1440. (in Chinese)
- [2] HEGELER F, SETHIAN J D, MYERS M C, *et al.*. Electra; repetitively pulsed 700J, 100ns electron beam pumped KrF laser[C/OL]. *Plasma Science*, 2006. <http://www.dtic.mil/cgi-bin>.
- [3] 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.
- [4] PATTERSON E L, GERBER R A, BLAIR L S. HF laser initiated by a 300 keV electron beam [J]. *Appl. Phys.*, 1974,45(4):1822-1825.
- [5] TARASKEO V F, BAKSHIE H, LOMAEV M I, *et al.*. Efficient non-chain chemical HF laser initiated by e-beam and self-sustained discharge [J]. *SPIE*, 1998,3268:228-235.
- [6] LACOUR B, GAGNOL C, PRIGENT P, *et al.*. High average power HF/DF laser [J]. *SPIE*, 1998,3574:334-340.
- [7] BRUNET H, MABBU M, VOIGNIER F. High energy, high average power pulsed HF/DF chemical laser [J]. *SPIE*, 1995,2502:388-392.
- [8] APOLLONOV V V, BELEVTSSEV A A, FIRSOV K N, *et al.*. High-power pulse and pulse-periodic nonchain HF(DF) lasers[J]. *SPIE*, 2002,4747:31-43.
- [9] RICHEBOEUF L, PASQUIERS S, DOUSSIET F, *et al.*. Dynamics and correlated performance of a photo-triggered discharge-pumped HF laser using

- SF₆ with hydrogen or ethane [J]. *Appl. Phys. B*, 1999, 68:45-53.
- [10] 柯常军, 万重怡. 放电引发非链式脉冲 HF/DF 激光器的研究进展[J]. *激光与红外*, 2003, 33(4): 304-306.
KE C J, WANG C Y. Status and prospect of electric-discharge non-chain pulsed HF laser[J]. *Laser & Infrared*, 2003, 33(4):304-306. (in Chinese)
- [11] 苏建仓, 刘国治, 丁臻捷, 等. 基于 SOS 的脉冲功率源技术新进展[J]. *强激光与粒子束*, 2005, 17(8): 1195-1200.
SU J C, LIU G Z, DING Y Z, *et al.*. Experiment and applications of SOS-based pulsed power [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2005, 17(8):1195-1200. (in Chinese)
- [12] LACOUR B, PASQUIERS S, POSTEL C, *et al.*. Importance of pre-ionization for the non-chain discharge-pumped HF laser [J]. *Appl. Phys. B*, 2001, 72:289-299.
- [13] BYCHKOV Y, GORTCHAKOV S, LACOUR B, *et al.*. Two-step ionization in non-equilibrium SF₆ discharges at high current density [J]. *J. Phys. D*, 2003, 36:380-388.
- [14] 朱峰. 非链式 HF 激光器气体体放电和输出能量影响因素实验研究[D]. 西安:西北核技术研究所, 2008:19-24.
ZHU F. *Experimental investigation on influence factors of gas discharge and output energy of non-chain HF laser*[D]. Xi'an: Northwest Institute of Nuclear Technology, 2008:19-24. (in Chinese)

作者简介:

易爱平(1969—), 男, 江西东乡人, 副研究员, 1991 年于厦门大学获学士学位, 2002 年于国防科技大学获硕士学位, 现主要从事激光技术及应用、脉冲功率技术等方面的研究。E-mail: aiping0707007@hotmail.com

刘晶儒(1945—), 女, 辽宁沈阳人, 研究员, 博士生导师, 1967 年毕业于哈尔滨工业大学, 主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: liujingru2k3@vip.sina.com

唐影(1974—), 女, 上海人, 助理研究员, 1998 年于四川联合大学获学士学位, 2009 年于南开大学获硕士学位, 现主要从事激光技术及应用、脉冲功率技术等方面的研究。E-mail: tang.y1012@163.com

黄珂(1979—), 男, 山东青岛人, 副研究员, 2000 年、2006 年于国防科技大学分别获学士和硕士学位, 现主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: xahk_cs@126.com

黄欣(1972—), 男, 江苏泰兴人, 助理实验师, 1991 年毕业于马兰中专, 现主要从事电气自动化控制方面的研究。E-mail: huangxin72@yeah.net

于力(1969—), 男, 陕西西安人, 博士, 副研究员, 1991 年于陕西师范大学获学士学位, 1998 年、2007 年于西北核技术研究所分别获硕士和博士学位, 现主要从事激光技术及应用方面的研究。E-mail: yuli057@163.com

马连英(1966—), 女, 陕西三原人, 副研究员, 1989 年于清华大学获学士学位, 2000 年于西北核技术研究所获硕士学位, 现主要从事机械设计和脉冲功率技术方面的研究。E-mail: yzima@163.com