文章编号 2095-1531(2015)03-0340-10

非链式 HF/DF 激光器的研究进展

王 旭[1,2],谢冀江[1*],潘其坤[1],王春锐[1],邵春雷[1],邵明振[1]
(1. 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;2. 中国科学院大学,北京 100049)

摘要:HF/DF 激光器是中红外波段能提供最高能量输出的激光光源,也是中红外波段应用非常广泛的相干光源。本文介绍了近几年国内外关于非链式 HF/DF 激光器的研究进展及其成果应用,分析了非链式 HF/DF 激光器在应用方面的优缺点,总结了实现非链式 HF/DF 激光输出的关键技术和存在的问题,指出了该技术的未来发展方向。

关 键 词:HF/DF 激光器;非链式;放电引发方式;激光应用
中图分类号:TN248.2 **文献标识码**:A doi:10.3788/CO.20150803.0340

Research progress of non-chain HF/DF laser

WANG Xu[1,2], XIE Ji-jiang[1*], PAN Qi-kun[1], WANG Chun-rui[1], SHAO Chun-lei[1], SHAO Ming-zhen[1]
(1. *State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130033, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: laserxjj@163.com*

Abstract: HF/DF laser is a laser light source offering the highest output energy in the mid-infrared wave band. It is also a coherent source with wide application prospect. The research production and application of the non-chain HF/DF laser are reviewed in this paper. The advantages and disadvantages of the non-chain HF/DF laser are analyzed in the application field. The key techniques and problems generating the non-chain HF/DF laser are concluded and analyzed. The future development directions of the non-chain HF/DF laser are pointed out.

Key words: HF/DF laser; non-chain; discharge initiate; laser application

收稿日期:2014-12-16;修订日期:2015-02-11
基金项目:科技部国际合作专项基金资助项目(No. 2011DFR10320);国家重点实验室自主基础研究课题(No. SKLLIM1310-01)

1　引　言

辐射波段 2.7 ~ 3.1 μm(HF),3.5 ~ 4.2 μm(DF)的 HF/DF 化学激光器[1-3],由于其易于实现高功率输出、光束质量好、辐射光谱丰富等特点被广泛地应用于光电对抗、环境检测、激光雷达、激光化学、激光光谱学等领域[4-11]。HF/DF 激光的产生方式主要有链式和非链式两种反应类型。链式反应激光器一般采用 H_2(或 D_2)与 F_2的混合物作为反应介质,利用闪光、放电、燃烧等方式使气体分子裂解实现混合气体链式反应。非链式反应激光器一般使用含氟化合物与 H_2(或 D_2)或者是碳氢化合物(碳氘化合物)在放电引发或光解引发等条件下发生非链式化学反应。

链式的 HF/DF 激光器多采用燃烧驱动的方式,产生高能态的 HF(DF)分子,理论上可以在 $v=1\rightarrow10$ 的各个振动能级上跃迁。该类激光器是化学激光器,利用放热的化学反应产生粒子数反转,因此激光的输出功率不受注入能量的限制,可以较为容易地实现大功率和高效率的输出。但这类激光器缺点也很明显,即燃烧驱动的链式反应,由于存在支链反应而有爆炸的危险。

非链式的 HF/DF 激光器大多采用放电引发的方式,主要有预电离放电技术、自引发放电技术和电感引发放电技术等。放电引发的非链式反应利用高能电子碰撞解离含氟化合物(SF_6)中的氟原子,氟原子和 H_2(D_2)或碳氢化合物(碳氘化合物)反应生成高能态的 HF(或 DF)分子。非链式反应释放的能量较链式反应小,反应生成的 HF/DF 分子布局在 $v=1\rightarrow4$ 振动能级上。非链式 HF/DF 激光器反应物质无毒、无腐蚀性且没有支链反应,克服了链式激光器重频运转下易爆炸和不可控的缺点,同时其光束质量更好,结构紧凑便于实现小型化。但由于 F 原子需要高能电子碰撞解离含氟化合物才能生成,因而激光器的输出功率受外界引发条件的限制,造成非链式 HF/DF 激光器的电光转换效率不高[12]。

目前,随着新型放电方式及其他技术的改进,非链式 HF/DF 激光器的输出功率及电光转换效率有了很大的提高,所以近年来非链式 HF/DF 激光器的技术的发展受到广泛关注。本文主要介绍近年来非链式 HF/DF 激光器的发展状况,并对 HF/DF 激光器的发展现状、关键技术和存在的问题进行综合分析,在此基础上指出该技术的未来发展方向。

2　非链式 HF/DF 激光器的放电引发技术

非链式 HF/DF 化学激光器问世于 20 世纪 60 年代,由于其特殊的波段及广泛的应用范围吸引了许多研究者的目光[13-15]。1967 年美国科学家 Deutsch 利用纵向放电形式首次得到了 HF 激光输出[1]。同年德国科学家 Kompa 等人利用闪光光解引发方式在 UF_6和 D_2的混合物中得到 DF 激光辐射[2]。一直以来提高激光能量都是激光技术非常重要的研究内容,HF/DF 激光技术的发展主要是从改进引发方法和工作介质两方面提高激光能量。

2.1　预电离放电技术

在众多的含氟化合物(UF_6、N_2F_4、NF_3、SF_6)中 SF_6由于其无毒、无腐蚀性、化学性质稳定(室温条件下不会分解)且可以使 HF/DF 激光器得到最大的脉冲能量输出和电效率,因而在非链式 HF/DF 激光器中是最好的 F 原子施主[16]。虽然 SF_6是最好的 F 原子施主,但是 SF_6具有很强的电子吸附能力,不容易得到均匀稳定大体积的辉光放电,使得反应物质中的能量沉积率较低,整个激光器的输出功率难以提高。20 世纪 60、70 年代为了解决这一问题,在CO_2激光器的放电技术的

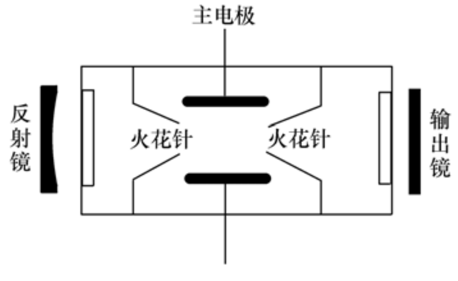


图 1　紫外预电离示意图

Fig. 1　Schematic plot of UV preionization

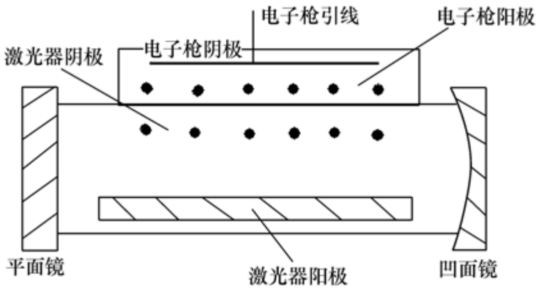


图2 电子束预电离示意图

Fig. 2 Schematic plot of electron-beam preionization

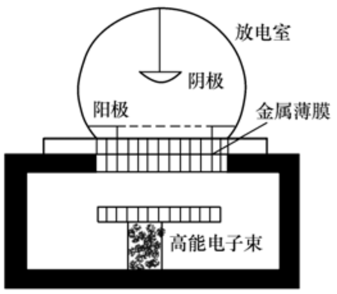


图3 X射线预电离示意图

Fig. 3 Schematic plot of X-ray preionization

基础上提出了紫外预电离[17-18]、电子束预电离[19-20]、X射线预电离[21-22]等放电技术,其放电示意图分别如图1～3所示。运用这些技术,成功将激光器的输出能量提高到了焦耳量级。

紫外预电离技术是在主放电发生之前利用紫外光照射主放电区域,产生一定浓度的初始电子,进而产生均匀无弧的辉光放电。电子束预电离是在激光器放电区中注入高能电子束,产生维持放电电流所必须的电离度,以便产生大体积的辉光放电。X射线预电离是利用高能电子束通过金属箔,形成高密度金属等离子体,发射X射线,进入放电区使气体预电离,最终形成大体积的辉光放电。预电离放电技术虽然解决了强电负性气体大体积辉光放电的难题,但是预电离条件下的放电不够均匀,预电离器件体积大、寿命短、箔膜材料可靠性低等缺陷制约了该技术的发展。而对于HF/DF激光器来说,预电离技术产生的辉光放电均匀性较差,输出功率难以提高,且电光转换效率低,限制了HF/DF激光器性能的提高。

2.2 自引发放电技术

2000年左右俄罗斯科学院普通物理所的Firsov等人提出了自引发放电技术,实验得到了单脉冲能量403 J的HF激光输出与325 J的DF激光输出[23],是目前报道的最高单脉冲能量输出。

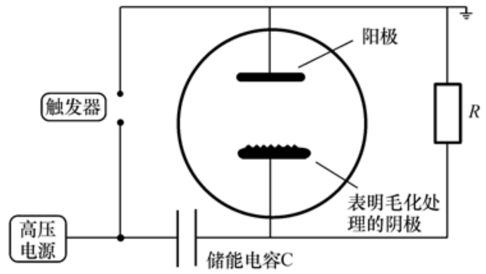


图4 自引发放电示意图

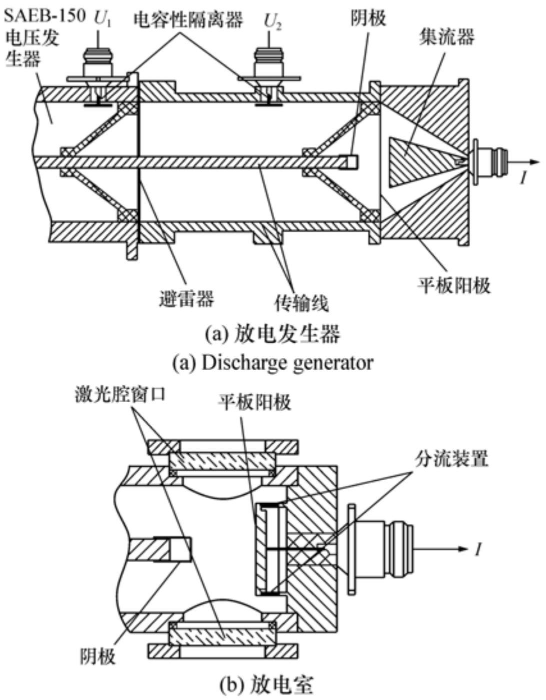
Fig. 4 Schematic plot of self-initiated volume discharge

自引发放电技术是在传统预电离和自持体放电技术的基础上研发而成,利用均匀粗糙度表面的阴极而无需预电离就能得到均匀稳定的辉光放电,图4给出了放电示意图。其特点是可以极大地增加激光器的激活体积和能量的沉积(注入能量可达到200 J/L),而且对于电极面型没有特殊要求,易于加工。迄今为止自引发放电中的许多物理过程还没有统一的物理模型,对于其研究还处于摸索阶段。相信随着对自引发放电现象物理原理认识的加深,利用这一技术可以得到更高能量的激光输出[24-26]。

2.3 逃逸电子弥漫放电技术

近年来又出现了一种新型的放电方式—逃逸电子弥漫放电(Diffuse Discharge Formed by Run-Away Electrons 简称REP DD)。2010年俄罗斯的Tarasenko等人对REP DD[27-28]做了大量的研究。利用这种放电方式可以得到几纳秒到几十纳秒的超短放电脉冲,其特点是能量沉积率高(可达90%以上),可以应用于大间隙的气体放电,且不需要附加电离源。图5是REP DD放电实验放电腔示意图。该放电装置利用SAEB-150电压发生器产生幅度为150 kV,上升时间为0.3 ns的高电压短脉冲,此电压脉冲击穿放电腔中的混合气体产生脉宽极窄的激光。2014年,Panchenko等人利用上述的放电方式得到最大脉冲能量为55 mJ,内效率为10%的高效短脉冲HF激光输出和脉冲

能量为 40 mJ,内效率为 8% 的 DF 激光输出[29]。



(a) 放电发生器
(a) Discharge generator

(b) 放电室
(b) Discharge chamber

图5　REP DD 放电示意图

Fig. 5　Schematic plot of REP DD

2.4　电感放电技术

为了提高 HF/DF 激光器中体积放电的均匀性,俄罗斯的 Razhev 等人提出了利用电感引发[30-31] HF 化学反应的技术。利用电磁线圈产生的电磁场能量激励 SF_6 和 H_2 混合物发生化学反应产生 HF 激光。其实验电路如图6所示。

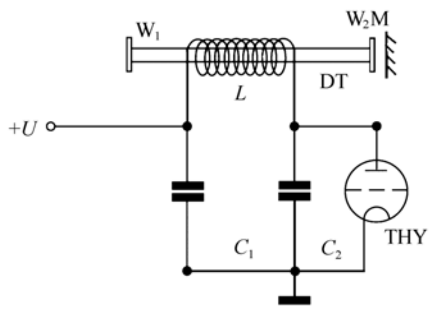


图6　电感式放电引发电路图

Fig. 6　Schematic plot of inductive discharge initiation

图中 L 是引发电感,其长度就是激活体积的长度;THY 是实现高压开关脉冲的闸流管;C_1、C_2 是两个储能电容;DT 是内充混合气体的陶瓷放电管;W_1 和 W_2 是 MgF_2 窗口;M 是镀金反射镜,W_1 和 M 组成谐振腔输出激光。电感放电方式避免了电极放电中由于电场的不均匀性造成的放电收缩进而降低输出激光能量,还大幅减小了激光脉冲间振幅的波动,而且避免了电极腐蚀产物对放电腔的污染。利用上述引发方式于 2013 年实验得到单脉冲能量 10 mJ,峰值功率 5 kW,脉冲持续时间 5 μs 的 HF 激光输出[32]。

3　非链式 HF/DF 激光器研究进展及应用

3.1　非链式 HF/DF 激光器的研究进展

20 世纪 90 年代,法国的 Brunet 等人提出利用光触发放电技术引发 SF_6 混合物的化学反应以产生 HF/DF 激光。Brunet 等人利用光触发放电技术研究了各种含 H/D 化合物对激光输出能量的影响,发现 C_2H_6 代替 H_2 可以得到更均匀的放电和更大的激光能量输出,同理利用碳氘化合物代替 D_2 也可以提高输出激光能量,性价比最高的是 C_6H_{12}。在 SF_6 和 C_2H_6 的混合气体中得到了单脉冲 12J 的 HF 激光输出,在 SF_6 和 C_6D_{12} 中得到了单脉冲 8 J 的 DF 激光输出[33-34]。

从 2003 年开始俄罗斯科学院强流所 Tarasenko 等人对非链式脉冲 HF/DF 激光器的电光转换效率进行了大量实验研究。通过改变储能放电电路以减小放电后的电能残余,达到提高能量沉积率提高电光转换效率的目的。并对放电电场均匀性、预电离强度、放电脉冲时间以及混合物组分和特性对电光转换效率的影响做了研究,发现放电间隙间电场越均匀最终的输出能量越高;强烈的预电离可以避免放电收缩,提高输出能量;泵浦脉冲时间越短输出能量越大。在优化以上实验条件下总的电光转换效率可达 5% ~6%[35]。

近年来关于非链式 HF/DF 激光器的研究主要集中在重复频率运转方面。对于脉冲激光器来说重复频率运转是衡量激光器性能的重要指标,化学激光器由于在反应过程中会消耗反应物质,在重复频率运转方面一直很难做出突破。俄罗斯联邦原子能中心的 Velikanov 等人,经过研究发现影响 HF/DF 激光器重频运转能力的原因,除了化

学反应生成物中基态的 HF/DF 分子对激光的消激发作用(已于 20 世纪 90 年代,由法国的 H. BRUNET 等人通过增加分子筛或碱性吸附剂的方法得到解决)之外,最重要的原因是激光器中的声波扰动,会使放电间隙内的反应物不均匀,从而引起放电的不均匀,最终导致激光器的功率和频率的下降。解决方法是引入结构组件来抑制声波,还可以添加缓冲气体和增大风速以提高清洗系数,来达到增加重复频率的目的。在 2009 年研制出了输出功率为 40 W、重复频率超过 2 000 Hz、电光转换效率约为 2% 的 HF 激光器和输出功率为 33 W、重复频率超过2 200 Hz、电光转换效率约为 1.6% 的 DF 激光器[36]。

我国的 HF/DF 激光器的研究工作起步较晚,与先进国家相比还存在较大的差距,还处于理论学习和技术积累阶段。目前只有少数单位开展了这方面的研究,主要的研究单位有中科院电子所、西北核技术研究所、长春光机所、大连化物所等。中科院电子所在 2007 年采用侧面滑闪预电离技术研制了一台重复频率为 1 ~ 3 Hz,最大激光脉冲能量为 1.6 J(1.2 J)的 HF(DF)激光器[37],在 2010 年又利用紫外预电离自持放电技术得到 350 mJ的 HF 激光脉冲输出,激光峰值功率达到了1.4 MW,电光转换效率为 1.6%[38]。西北核技术研究所在 2011 年研制出了最大单脉冲能量为 0.6 J,峰值功率为 3 MW,重复频率为 50 Hz,平均功率为13 W,电光转换效率为 2.4% 的非链式 HF 激光器[41]。长春光学精密机械与物理研究所在 2014 年获得了单脉冲最大能量为4.95 J,峰值功率为 33.27 MW 的 DF 激光输出[44]。近年来国内外关于 HF 激光的重要成果见表 1。

表 1 非链式 HF 激光器的研究进展

Tab. 1 Research progress of non-chain HF laser

时间	研究单位	工作物质	引发方式	激光性能
2007	中科院电子所	SF_6 和 C_2H_6	侧面滑闪预电离	最大脉冲能量 1.6 J,重频 1 ~ 3 Hz[37]
2009	俄罗斯联邦核中心	SF_6 和 $H_2(D_2)$	紫外预电离自持体放电	重频 2 000 Hz(HF),2 200 Hz(DF)输出功率 40 W(HF)、33 W(DF),电光转换效率 2%(HF)、1.6%(DF)
2010	中科院电子所[38]	SF_6 和 D_2	紫外预电离自持放电	单脉冲 350 mJ,峰值功率 1.4 MW,电光转换效率 1.6%
2011	俄罗斯科学院,西伯利亚分院,高电流电子学研究所	SF_6 和 $H_2(D_2)$	双放电[42](电感储能) GIES	脉冲能量 1.4 J(HF)、1.2 J(DF),电光转换效率 9% ~10%(HF)、6% ~7%(DF)
2011	西北核技术研究所	SF_6 和 C_2H_6	电子束激励和放电激励	单脉冲能量 0.6 J,50 Hz 重频运转平均功率 13 W,电光转换效率 2.4%[39-41]
2013	俄罗斯科学院,西伯利亚分院,激光物理研究所	SF_6 和 H_2,Ne	电感式放电激发	单脉冲能量 10 mJ,峰值功率 5 kW,脉冲持续时间 5 μs
2013	长春光学精密机械与物理研究所[43-48]	SF_6 和 D_2	自引发放电	单脉冲 3.6 J,电光转换效率 3.1%;50 Hz 重频,最大功率 150 W,电光转换效率 2.58%
2014	俄罗斯科学院,西伯利亚分院,高电流电子学研究所	SF_6 和 $H_2(D_2)$	REP DD 放电	放电时间 10 ns, 能量 55 mJ(HF)、40 mJ(DF),内效率 10%(HF)、8%(DF)

3.2　非链式 HF/DF 激光器的应用

中红外波段是许多气体分子的吸收峰所在的波段,所以利用 HF/DF 激光可以很容易探测多种气体污染物(CO、NO、硫化物等),也可以利用 HF/DF 激光泵浦其他激励物质,从而获得其他波段的激光。

2005 年 Agroskin 等人利用基于 DF 激光器雷达系统检测气溶胶颗粒背向散射光谱的实验,实验检测了煤油、蒸馏水、工业用油(石油产品)和二丁胺(DBA)的相对后向散射系数,DF 激光雷达系统可以精确地鉴别出这几类物质[6]。

2003 年 Yuri N. Frolov 等人研究了利用 DF 激光探测地下矿道中甲烷浓度的方法,制作出了激光雷达系统模型和地下环境模拟实验模型,在湿度大于 90%、粉尘浓度为 10 mg/m^3 条件下,检测了甲烷浓度在 0.1% ~3% 区域内 DF 激光各支激光能量的吸收系数,实验证明甲烷浓度为 0 ~0.75% 最大吸收系数在 $P_1(9)$ 支;浓度为 0.75 ~2.75% 最大吸收系数在 $P_2(5)$ 支[7]。

2004 年俄罗斯的 Burtsev 等人利用 DF 激光的 2P9 线泵浦 HBr 气体,得到了转换效率为 2%、辐射波长为 4 μm 的 HBr 激光[4-5]。

2014 年俄罗斯的 Firsov 等利用 HF 激光在室温下泵浦 $ZnSe:Fe^{2+}$ 晶体,得到了中心波长为 4.5 μm,转换效率为 40% 的 $ZnSe:Fe^{2+}$ 激光[49-51],其实验光路示意图如图 7 所示,其中 F 是滤波器,L 是透镜,W 是 BaF_2 光楔,M_1、M_2 是激光腔镜,C_1、C_2、C_3 是能量计。

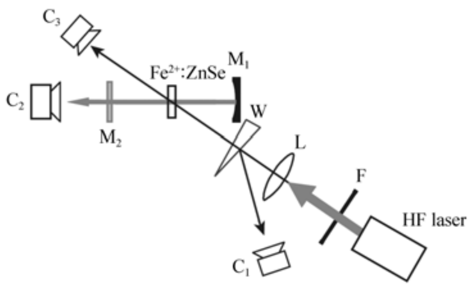


图 7　$ZnSe:Fe^{2+}$ 激光生成示意图

Fig. 7　Schematic plot of $ZnSe:Fe^{2+}$ laser

用于环境监测的激光雷达要求激光脉冲的能量波动尽可能小从而可以精确地检测污染物的浓度,还要求脉冲输出以实现实时监控。现有的 HF/DF 激光器在稳定运转方面还存在许多问题,由于放电不均匀、反应生成物的消激发作用等原因脉冲能量波动很明显,对于监测的精确度和实时性有相当大的不良影响;另外影响 HF/DF 激光器实际应用更重要的一点是其庞大的体积,这对探测系统的灵活性造成致命的影响,这是 HF/DF 激光器走向实用亟待解决的问题。

基于 HF/DF 激光辐射波段的特点,伴随着技术的发展,更高功率和更长时间稳定运行的 HF/DF 激光器还可能在军事红外探测、激光生物、高精度激光手术等领域得到应用。

4　非链式 HF/DF 激光器存在的问题及未来发展展望

化学激光器最大的优势是易于实现高功率输出,因为其形成粒子数反转不需要外界激励源不断泵浦,依靠化学反应释放的能量泵浦粒子以实现粒子数反转,因而其能量转换效率很高甚至可以超过 100%(如链式 HF 激光器能量转换效率可以高达 200%)。但非链式 HF 激光器的电光转换效率普遍较低(一般不超过 5%),是由于电能全部用来解离含氟化合物以产生 F 原子,而化学反应释放的能量也不是全部转化为 HF/DF 激光的能量,与注入总能量相比最终转化为激光的能量只占很小的一部分。同时也造成激光脉冲能量难以大幅度提高。另外,非链式 HF/DF 激光器实现激光输出的同时不断的消耗反应物质,造成激光器不能持续稳定的输出激光脉冲。

引发方式是非链式 HF/DF 激光器的核心技术,是对输出功率和电光转换效率影响最大的技术,可以从泵浦源方面提高激光器的工作能力。寻找更加均匀稳定的放电方式是提高非链式 HF/DF 脉冲激光器功率的最重要方法,自引发放电技术是目前获得 HF/DF 激光脉冲能量最高的引发方式,实验已经获得单脉冲能量为 300 ~400 J 的能量输出,预期可达到上千焦耳的单脉冲输出,是目前最有潜力的引发方式之一,代表着非链式 HF/DF 激光器放电引发方式的发展方向。

另外非链式 HF/DF 激光器也向着高重复频率和脉冲能量稳定方面发展,反应生成物的清除

和反应气体的补充以及合理的气体流道设计是解决重频运转问题的关键技术。目前清除反应生成物的方法主要有化学吸附和物理吸附两种，化学吸附是利用碱性材料与反应生成的 HF(DF)分子发生化学反应以去除 HF(DF)分子。物理吸附是利用分子筛、活性炭等物质将 HF(DF)分子束缚在吸附材料中以清除激光腔中的 HF(DF)。现有的非链式 HF/DF 激光器由于没有对腔内气体组成成分的定量分析的技术，所以很难对气体进行精确的补充。如果能够对激光腔内的气体组分做到精确的分析，激光器的重频工作能力将得到很大的提升。

中红外激光是一特殊波段的激光，无论是大气窗口可以用于激光雷达中，还是许多化学分子的吸收峰值所在波段可以用于许多激光物理化学实验之中，或是人体骨骼可以强烈吸收的波段可以用于高精度的激光手术中，非链式 HF/DF 激光器是中红外波段少数能够提供高功率输出的激光器之一。鉴于 HF/DF 激光波段的重要性，及激光器的输出能量和重频运转能力的不断提升，国内外研究者对它的关注程度日益提高。我国对 HF/DF 激光器的研究工作已经取得了许多成果，但与国际水平相比还存在许多不足。近年来国内越来越多的研究机构开展了 HF/DF 激光项目的研究，相信随着研究工作的深入，我国该类激光器技术将取得巨大的成果。

5 结束语

非链式脉冲 HF/DF 激光器是中红外波段最容易实现高功率输出的激光光源，正越来越多地受到研究者的关注。从目前的 HF/DF 激光器的发展来看，引发方式是 HF/DF 激光器的核心技术，自引发放电技术是最有可能突破 kJ 量级能量输出的引发方式，REP DD 放电技术在短脉冲放电方面占据优势，电感放电方式得到的激光能量更加稳定。目前，非链式 HF/DF 激光器最大单脉冲已达到 300 J，重复频率运转已超过2 000 Hz，被应用在大气监测、激光泵浦源等方面。基于该类激光器高能量、高光束质量和人体组织对中红外激光选择吸收的特点，未来在光电对抗和高精度激光手术中也可能得到应用。今后非链式 HF/DF 激光器向着高功率、低重频，或低功率、高重复频率、高稳定性方面发展。

参考文献：

[1] DEUTSCH T F. Laser emission from HF rotational transitions[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1967, 11(1): 18-20.

[2] KOMPA K L, PIMENTEL G C. Hydrofluoric acid chemical laser[J]. *J Chem. Phys.*, 1967, 47(2): 857-858.

[3] PLNNLER H, KOMPA K L. Investigation of l-J pulsed discharge-initiated HF laser[J]. *App. Phys. Lett.*, 1972, 20: 356-357.

[4] BURTSEV A P, BURTSEVA I G, MASHENDZHINOV V I, *et al.*. New HBr-laser with resonant optical pumping by DF-laser radiation[J]. *SPIE*, 2004, 5479: 174-176.

[5] BURTSEV A P, BURTSEVA I G, MASHENDZHINOV V I, *et al.*. Lasing of molecular HBr in the four micron region pumped by a DF-laser[J]. *SPIE*, 2005, 5777: 528-530.

[6] AGROSKIN V Y, BRAVY B G, CHERNYSHEV Y A, *et al.*. Aerosol sounding with a lidar system based on a DF laser [J]. *Applied Physics B*, 2005, 81: 1149-1154.

[7] FROLOV Y N, VELIKANOV S D, LAZARENKO V I, *et al.*. Remote laser analyzer for methane sensing in the air of subterranean spaces[J]. *SPIE*, 2003, 4882: 540-547.

[8] APOLLONOV V V. High power lasers for space debris elimination[J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(2): 187-195.

[9] KOOSNER M, WU C, HELLER D F. Mid-IR laser system for advanced neurosurgery[J]. *SPIE*, 2014, 8928: 1-13.

[10] 罗威，董文锋，杨华兵，等. 高功率激光器发展趋势[J]. 激光与红外，2013，43(8)：845-852.
LUO W, DONG W F, YANG H B, *et al.*. Development trend of high power lasers[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(8): 845-852. (in Chinese)

[11] 周伟，张丹丹. 美国海基激光武器的发展[J]. 航天电子对抗，2014，30(3)：8-11.
ZHOU W, ZHANG D D. The development of US sea-based laser weapons[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2014, 30

(3):8-11.(in Chinese)

[12] 阮鹏.放电引发非链式脉冲 DF 激光机理研究[D].长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2014.
RUAN P. Research on mechanism of non-chain pulsed electric-discharge DF laser[D]. Changchun:Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics,Fine Mechanics and Physics),2014.(in Chinese)

[13] 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): 304-305.
KE CH J,WAN CH Y. Status and prospect of electric-discharge non-chain pulsed HF laser[J]. *Laser & Infrared*,2003,33(4):304-305.(in Chinese)

[14] 郭汝海,施龙,王思雯,等.HF/DF 化学激光器的研究进展[J].光机电信息,2010,03:30-35.
GUO R H,SHI L,WANG S W,*et al.*. Development review of HF/DF chemical lasers[J]. *OME Information*,2010,03:30-35.(in Chinese)

[15] 谭改娟,谢冀江,张来明,等.中波红外激光技术最新进展[J].中国光学,2013,6(4):501-512.
TAN G J,XIE J J,ZHANG L M,*et al.*. Recent progress in mid-infrared laser technology[J]. *Chinese Optics*,2013,6(4):501-512.(in Chinese)

[16] RICHEBOEUF L,PASQUIERS S,LEGENTIL M,*et al.*. The influence of H_2 and C_2H_6 molecules on discharge equilibrium and F-atom production in a photo-triggered HF laser using SF_6[J]. *J Phys. D:Appl Phys.*,1998,31:373-389.

[17] MARCHETT R,PENCO E,SALVETTI G. Relative influence of hydrogen/deuterium donors and driving circuit parameters on the performance of a UV preionized pulsed HF/DF laser[J]. *J Appl. Phys.*,1981,52(12):7047-7051.

[18] BRUNET H,MABRU M,SERRA J R,*et al.*. Pulsed HF chemical laser using a VUV photo-triggered discharge[J]. *SPIE*,1990,1397:273-276.

[19] ORLOWSKII V M,POTERYAEV A G,TARASENKO V F. CO_2-lasers pumped by E-beam controlled discharge and E-beam ignited discharge[C]. International Conference on Lasers,McLean,USA,1997:754-760.

[20] INAGAKI H,KANNARI F,SUDA A,*et al.*. High efficiency multikilojoule deuterium fluoride(DF) chemical lasers initiated by intense electron beams[J]. *J Appl. Phys.*,1986,59(2):324-326.

[21] ARAI T,OBARA M,FUJIOKA T. A cw X-ray preionizer for high-repetition-rate gas lasers[J]. *Appl. Phys. Lett.*,1980,36(4):235-237.

[22] LETARDI T,LAZZARO P D,GIORDANO G,*et al.*. Large area X-Ray preionizer for electric discharge lasers[J]. *Appl. Phys. B*,1989,48(1):55-58.

[23] APOLLONOV V V,FIRSOV K N,KAZANTSEV S Y,*et al.*. Scaling up of non-chain HF(DF)-laser initiated by self-sustained volume discharge[J]. *SPIE*,2000,3886:370-381.

[24] BELEVTSEV A A,KAZANTSEV S Y,KONONOV I G,*et al.*. Detachment instability of self-sustained volume discharge in active media of non-chain HF(DF) lasers[J]. *Quantum Electronics*,2010,40(6):484-489.

[25] BELEVTSEV A A,FIRSOV K N,KAZANTSEV S Y,*et al.*. Electron detachment instability and self-organization of gas discharge plasma in working mixture of chemical non-chain HF(DF) lasers[J]. *Chinese Optics*, 2011,4(1):31-40.

[26] ZHANG G,KE C J,ZHANG S J. Diffuse volume-discharges without pre-ionization formed in SF_6 and C_2H_6 mixtures[J]. *J. Electronics*(China),2014,31(3):267-270.

[27] TARASENKO V F,BAKSHT E K,BURACHENKO A G ,*et al.*. High-pressure runaway-electron -preionized diffuse discharges in a nonuniform electric field[J]. *Techn. Phys.*,2010,55 (2):210-218.

[28] LOMAEV M I,SOROKIN D A,TARASENKO V F. VUV radiation of binary mixtures of argon and helium with xenon accompanying a diffuse nanosecond discharge in an inhomogeneous electric field[J]. *Opt. Atmos. Okeana*,2012,25:253.

[29] PANCHENKO A N,PANCHENKO N A,LOMAEV M I,*et al.*. UV, visible, and IR lasers pumped by the diffuse discharge formed by run-away electrons[J]. *Atmos. Ocean. Opt.*,2014,27 (2):200-203.

[30] RAZHEV A M,CHURKIN D S,ZHUPIKOV A A. Study of the UV emission of an inductive nitrogen laser[J]. *Quantum Electron*,2009,39(10):901-905.

[31] RAZHEV A M,CHURKIN D S. Pulsed inductive discharge CO_2 laser[J]. *Opt. Commun.*,2009,282:1354-1357.

[32] RAZHEV A M, CHURKIN D S, KARGAPOLTSEV E S, *et al.*. Chemical HF laser with pulsed inductive discharge initiation[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2013, 10: 075002(4pp).

[33] BRUNET H. Improved DF performance of a repetitively pulsed HF/DF laser using a deuterated compound[J]. *SPIE*, 1997, 3092: 494-497.

[34] BRUNET H, MABRU M. VOIGNIER F. High-energy high-power pulsed HF/DF chemical laser[J]. *Gas Flow and Chemical Lasers*, *SPIE*, 1994, 2502: 388-392.

[35] TARASENKO V F, PANCHENKO A N. Efficient discharge-pumped non-chain HF and DF lasers[J]. *SPIE*, 2006, 6101: 1-9.

[36] VELIKANOV S D, EVDOKIMOV P A, ZAPOLSKY A F, *et al.*. Pulse periodic HF(DF)-laser of atmospheric pressure with pulse repetition rate up to 2200 Hz[J]. *SPIE*, 2009, 7131: 71310.

[37] 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,2007,36:36-38.
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: 36-38. (in Chinese)

[38] 柯常军,李晨,谭荣清,等.电引发非链式脉冲DF激光器实验研究[J].光电子·激光,2010,22(2):172-174.
KE C J, LI CH, TAN R Q, *et al.*. Experimental research on electric2discharge non2chain pulsed DF lasers[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2010, 22(2): 172-174. (in Chinese)

[39] 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.
YI A P, LIU J R, TANG Y, *et al.*. Discharge pumped repetition-rate non-chain HF laser[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2011, 23(7): 1763-1766. (in Chinese)

[40] 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(2):1-5.
TANG Y, HUANG K, YI A P, *et al.*. Experimental study on stable output of discharge-pumped repetition rate HF laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, 39(2): 1-5. (in Chinese)

[41] 易爱平,刘晶儒,唐影,等.电激励重复频率非链式HF激光器[J].光学 精密工程,2011,19(2):360-366.
YI A P, LIU J R, TANG Y, *et al.*. Electrically initiated repetitive-pulsed non-chain HF lasers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(2): 360-366. (in Chinese)

[42] TARASENKO V F, PANCHENKO A N. Discharge lasers pumped by double-discharge generators based on inductive energy storage[J]. *SPIE*, 2011, 7994: 1-6.

[43] 阮鹏,谢冀江,张来明,等.非链式脉冲氟化氘激光器的动力学模拟和实验研究[J].中国激光,2013,40(7):7-11.
RUAN P, XIE J J, ZHANG L M, *et al.*. Dynamical simulation and experimental study of non-chain pulsed DF laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2013, 40(7): 7-11. (in Chinese)

[44] 潘其坤.放电引发非链式DF激光器关键技术研究[D].长春:中国科学院研究生院(长春光学精密机械与物理研究所),2014. L
PAN Q K. Research on key technologies of non-chain electric-discharge DF laser[D]. Changchun: Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2014. (in Chinese)

[45] 阮鹏,谢冀江,张来明,等.紫外预电离放电引发的非链式脉冲DF激光器[J].发光学报,2013,4:450-455.
RUAN P, XIE J J, ZHANG L M, *et al.*. UV-preionized electric-discharge non-chain pulsed DF laser[J]. *Chinese J. Luminescence*, 2013, 4: 450-455. (in Chinese)

[46] 阮鹏,谢冀江,潘其坤,等.非链式脉冲DF化学激光器反应动力学模型[J].物理学报,2013,09:199-206.
RUAN P, XIE J J, PAN Q K, *et al.*. Dynamical model of non-chain pulsed DF laser[J]. *Acta. Phys. Sin.*, 2013, 09: 199-206. (in Chinese)

[47] 潘其坤,谢冀江,阮鹏,等.非链式脉冲DF激光器放电特性[J].中国激光,2013,05:51-56.
PAN Q K, XIE J J, RUAN P, *et al.*. Discharge parameters of non-chain pulsed DF laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2013, 05: 51-56. (in Chinese)

[48] RUAN P, ZHANG L M, XIE J J, *et al.*. Key technologies of pulsed non-chain DF lasers[J]. *Chinese Optics*, 2011, 03: 313-318.

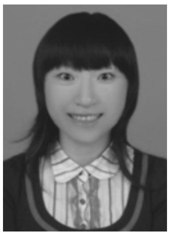
[49] FIRSOV K N, GAVRISHCHUK E M, KAZANTSEV S Y, *et al*.. Spectral and temporal charateristics of a ZnSe:Fe^{2+} laser pumped by a non-chain HF(DF) laser at room temperature[J]. *Laser Phys. Lett.*, 2014, 11, 125004:1-9.

[50] GAVRISHCHUK E M, KAZANTSEV S Y, KONONOV I G, *et al*.. Room-temperature high-energy Fe^{2+}:ZnSe laser[J]. *Quantum Electronics*, 2014, 44(6):505-506.

[51] VELIKANOV S D, DANILOV V P, ZAKHAROV N G, *et al*.. Fe^{2+}:ZnSe laser pumped by a nonchain electric-discharge HF laser at room temperature[J]. *Quantum Electronics*, 2014, 44(2):141-144.

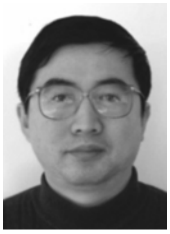
作者简介:

王　旭(1990—),男,内蒙古鄂尔多斯市人,硕士研究生,2013 年于吉林大学获得学士学位,主要从事激光技术及其应用的研究。E-mail: 584886974@163.com



王春锐(1983—):女,吉林长春人,博士,助理研究员,2006 年于大连理工大学获得学士学位,2012 年于中科院大连化物所获得博士学位,主要从事激光器及其应用技术方面的研究。E-mail: Crwang@ciomp.ac.cn

谢冀江(1959—),男,江苏镇江人,学士,研究员,硕士生导师,1983 年于哈尔滨科学技术大学获得学士学位,主要从事激光器及其应用技术方面的研究。E-mail: laserxjj@163.com



邵春雷(1963—),男,黑龙江牡丹江人,研究员,硕士生导师,1984 年于东北工学院获得学士学位,主要从事高功率脉冲气体激光器技术的研究。E-mail: sclem@sina.com

潘其坤(1985—):男,河南开封人,博士,2009 年于东北林业大学获学士学位,2014 年于中国科学院大学长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事中长波红外激光器及其应用技术方面的研究。E-mail: panqikun2005@163.com

邵明振(1985 -):男,山东菏泽人,博士,2009 年于济南大学获学士学位,2014 年于中国科学院大学长春光学精密机械与物理研究所获得博士学位,主要从事高功率气体激光器的研究。E-mail: smz2050@163.com