

一种放电引发非链式氟化氘脉冲激光器研究

游利兵 尹广玥 王庆胜 方晓东*

中国科学院安徽光学精密机械研究所安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031

摘要 设计了一种紧凑型放电引发非链式氟化氘(DF)脉冲激光器,引入基于闸流管的一级磁脉冲压缩高压快上升沿放电引发回路,形成 39.5 kV、100 ns 上升沿高压快脉冲。紧凑型张氏放电电极结合紫外(UV)火花预电离,在电极间距为 30 mm 激活区形成均匀辉光放电,注入能量密度达 190 J/L。激光谐振腔选用平平腔结构,激光工作气体采用 SF₆ 和 D₂,其气体配比优化为 10:3,此时获得最大能量输出为 877 mJ,电光转换效率为 1.9%,脉宽约 200 ns,光斑为 30 mm×9 mm。

关键词 激光器; 化学激光; 非链式氟化氘激光; 磁脉冲压缩开关; 张氏电极; 工作气体配比

中图分类号 TN248.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0502003

Study on Non-Chain Discharge-Pumped Pulse Deuterium Fluoride Lasers

You Libing Yin Guangyue Wang Qinsheng Fang Xiaodong

Anhui Province Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China

Abstract The compact non-chain discharge-pumped pulse deuterium fluoride (DF) laser is studied, the discharge trigger circuit is introduced based on one-stage thyatron magnetic pulse with fast rise time. Discharging voltage of 39.5 kV and pulse rise time of 100 ns are achieved. With the condition of 190 J/L energy depositions, a uniform glow discharge is formed using compact Chang-electrode combined with ultraviolet (UV) spark pre-ionization, and the distance between the cathode and anode is 30 mm. With flat-flat cavity laser resonators, mixture gas of SF₆ and D₂ is investigated. By optimizing the gas ratio to 10:3, the laser pulse energy is up to 877 mJ. The electro-optic conversion efficiency is about 1.9% and the pulse width is 200 ns with the beam dimensions of 30 mm×9 mm.

Key words lasers; chemical lasers; non-chain deuterium fluoride laser; magnetic switch; Chang-electrode; mixture gas ratio

OCIS codes 140.1550; 140.5560; 140.3538

1 引 言

非链式脉冲氟化氘(DF)激光器输出波段在 3.5~4.2 μm,处于大气传输窗口,可实现大能量、大功率、高重频运转,在激光光谱学、大气监测和光电对抗等领域有很好的应用前景^[1-4],特别是采用放电引发模式工作的非链式 DF 激光器体积小、操控性好,在脉冲能量和输出平均功率方面相比固体和光纤激光器具有明显优势。

DF 激光器诞生于 20 世纪 60 年代末期,随着 CO₂激光器技术的发展,预电离技术、放电引发技术等引入,非链式脉冲 DF 激光技术发展迅速。1975 年,Fradin 等^[3]研制了第一台封闭循环的 DF/HF 化学激光器,在重复频率为 10 Hz 时获得了 0.13 W 的 DF 激光输出功率。1982 年,Rudko 等^[4]研制了一台高重频脉冲 HF/DF 激光器,在重复频率为 3 kHz 时获得了 2.5 W 的 DF 激光输出功率。1995 年,Brunet 等^[5]采用折叠腔结构,获得 DF 激光单脉冲能量为 3 J,输出光斑为 35 mm×35 mm。1997 年,该研究小组^[6]在重复频率

收稿日期: 2015-10-27; **收到修改稿日期:** 2015-01-07

基金项目: 国家自然科学基金(61205138)

作者简介: 游利兵(1981—),男,博士,副研究员,主要从事气体激光技术方面的研究。E-mail: lbyou@aiofm.ac.cn

* **通信联系人。** E-mail: xdfang@aiofm.ac.cn

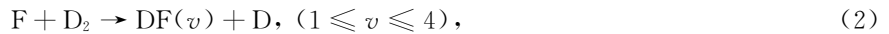
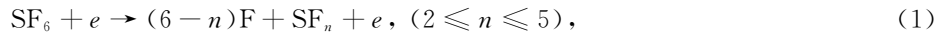
为 65 Hz 时使 DF 激光单脉冲输出能量达到了 8 J、平均功率达到 450 W。2001 年, Bulaev 等^[7]采用电晕预电离放电引发方式在重复频率为 110 Hz 时实现了单脉冲能量为 13 J、平均功率为 1300 W 的非链式 DF 激光输出。2003 年, Firsov^[8]采用新型的自引发放电技术, 获得的非链式 DF 激光单脉冲能量高达 325 J, 电光转换效率达到 3.4%; Tarasenko 等^[2]对非链式脉冲 DF 激光器的储能放电电路参数进行了大量研究, 实现 DF 激光器电光转换效率达到 6%, 这是放电引发非链式脉冲 DF 激光器目前达到的最高电光转换效率。

国内对非链式脉冲 DF 激光器的研究开展得较晚, 中国科学院电子学研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所、西北核技术研究所等单位进行了相关研究。其中柯常军等^[9-11]通过采用紫外预电离放电引发方式获得了 1.2 J 的单脉冲 DF 激光输出, 并对新型放电引发方式开展了较多研究。谢冀江等^[12-18]采用紫外预电离引发方式在改造的 CO₂ 激光器装置上实现了最大能量为 4.95 J 的单脉冲 DF 激光输出, 并对 DF 激光动力学模型、放电特性、光谱特性、谐振腔结构等方面开展了较为系统的研究。黄珂等^[19]利用紫外预电离横向放电结构和工作气体循环系统建立高功率重复频率 HF/DF 激光装置, 实现了 50 Hz、28 W 的 HF 激光输出。

现有文献报道中, DF 激光放电引发电路采用基于旋转火花开关的 C-C 转移回路居多, 工作气体循环多采用轴流风机外置循环风路。本文设计了一种紧凑型的 DF 激光器, 采用基于闸流管的一级磁脉冲压缩放电引发回路, 循环风路采用横流风机内置方式, 整机体积较小, 适合大气监测和光电对抗等领域应用。

2 放电引发非链式脉冲 DF 激光器基本原理

非链式脉冲 DF 激光器的工作介质通常为 SF₆、D₂ 混合气, 或者 SF₆、C_xD_y 碳氢化合物混合气。高压放电引发回路注入的电脉冲能量在电极两端产生大量高能电子, 高能电子与 SF₆ 气体分子发生碰撞, 使 SF₆ 分子分解, 解离出的 F 原子作为强氧化剂与 D₂ 或 C_xD_y 分子发生化学反应生成 DF 分子。化学反应过程中快速释放的大量热使 DF 分子有选择地分布到各个振动能级上, 从而形成粒子数反转。激发态的 DF 分子通过能级间跃迁发射光子, 加上谐振腔从而形成激光辐射。由于 SF₆ 是电负性极强的惰性气体, 高压放电引发回路放电结束后便没有新的 F 原子产生, 后续的化学反应过程也随之终止, 相对于链式反应化学激光器, 该类型激光器反应过程可控。在 SF₆、D₂ 激光混合气体工作时发生的主要反应有^[20]



(1) 式是 F 原子的产出反应, 放电电极之间的高能电子与 SF₆ 分子发生碰撞, 通过碰撞解离出 F 原子。F 原子的数量及生成速率影响后续的化学反应, 进而影响激光输出性能, 因此提升 F 原子产出率对提高激光输出参数性能有重要作用。(2) 式是激发态 DF 生成反应, 其中 v 表示不同的振动能级。该反应属放热反应, F 原子和 D₂ 产生的化学能使 DF 分子跃迁到不同激发态, 并通过能级间的跃迁产生受激辐射。(3) 式是碰撞弛豫过程, 处于激发态的 DF(v) 与反应生成物 M 作用, 碰撞弛豫到低能态。M 属于消激发物质, 包括如基态的 DF、SF_n、D₂ 等, 其中基态 DF 作用最强。由于该碰撞弛豫过程无光子辐射, 该反应会削减粒子数反转, 降低激光输出。(4) 式是受激辐射跃迁过程, 处于不同振转能级的激发态 DF(v) 粒子受激跃迁产生激光输出。由于振转能级的多样性, DF 激光输出谱线丰富, 范围覆盖宽达 3.5~4.2 μm 。

上述反应动力学方程对 DF 激光器设计有重要的指导意义。通过(1)式的分析可知, 提高 F 原子的产出有利于提高激光输出, 因此放电引发回路的注入能量宏观上决定了激光输出能量。电极间工作气体无拉弧的均匀放电有利于形成高的 F 原子产出, 因此提高放电引发回路的电压上升速度、设计匀场放电电极、增加预电离结构、优化工作气体配比能提高放电的均匀性和稳定性, 从而提高 F 原子产出。通过对(3)式的分析表明, 消激发粒子 M 不利于激光输出, 特别是基态 DF 粒子对激光输出影响巨大。由于基态 DF 是激光器的反应产物, 因此, 放电电极间的工作气体需要及时更新。伴随激光工作次数的增加, 封闭激光腔内的基态 DF 浓度增大不可避免, 需要添加必要的清除装置, 如化学分子筛等, 用以吸收反应生成的消激发物质, 维持激光器的高能量输出。

3 高压快放电引发回路设计

DF 激光器所用的工作气体 SF₆ 具有极强的电负性, 均匀辉光放电的形成和维持相对困难, 为此设计了高压快上升沿放电引发回路。回路中, 引入了一级磁脉冲压缩开关设计, 可以有效地提高电极两端放电电压, 并能大大降低闸流管负荷, 延长闸流管使用寿命。引发回路如图 1 所示, 高压脉冲电源通过止回二极管 D1 对储能电容 C1、C2 充电。充电完成后, 闸流管被触发导通, C2 与电感 L1、闸流管构成封闭回路, 形成 LC 振荡, 在半周期时, C2 电压极性反转达到反向最高电压。C1、C2 电压叠加, 磁脉冲压缩开关 MS 此时承受的电压约为 C1、C2 最初充电电压的 2 倍左右。通过合理设计 MS 的参数, 使磁开关在此时正好饱和导通, 储能电容 C1、C2 串联后对放电电容 Cd 进行充电。在充电过程中, 回路电流流经紫外(UV)预电离系统, 在阴极两侧形成火花预电离, 当 Cd 电压上升到接近最大值时, 阴极和阳极之间的激光工作气体被击穿, 形成均匀的辉光放电, 从而产生激光输出。储能电容 C1、C2 均为 60 nF、40 kV 高压陶瓷电容; 放电电容(峰化电容)Cd 为 30 nF、50 kV 高压陶瓷电容; 闸流管为型号 TDI1-50k/50 的栅极接地管。

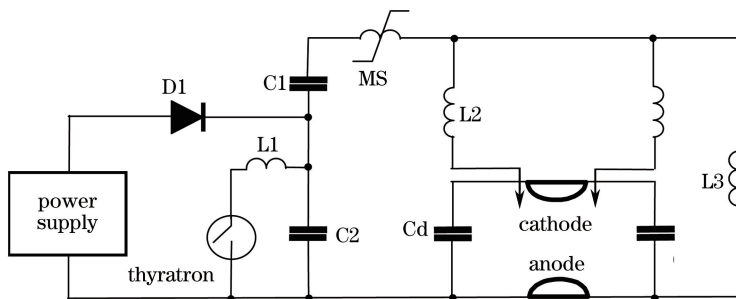


图 1 激光引发回路示意图

Fig. 1 Schematic of laser trigger circuit

激光系统横截面如图 2 所示, 闸流管、磁脉冲压缩开关和储能电容分布在顶端, 往下是放电电容、预电离、放电电极和储气腔。由于放电区较大, 设计了双排火花预电离针分布在阴极两侧, 间距为 50 mm, 两预电离针之间距离为 16 mm。放电电极为对称匀场电极, 均采用小纵横比的紧凑型张氏面型, 电极长为 510 mm、宽为 40 mm、高为 15 mm、间距为 30 mm。储气腔内安装横流风机对放电区气体进行更新, 通过磁耦合隔离传动, 并在风道中安装热交换器, 能有效带走化学反应产生的大量热量。

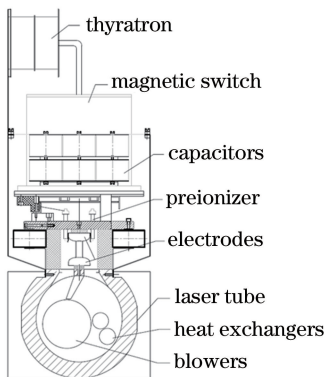


图 2 激光系统横截面

Fig. 2 Cross-section of laser system

如图 3 所示, 激光谐振腔位于放电电极两端, 采用平平腔结构。后腔镜采用镀金全反膜, 前腔镜采用不镀膜氟化钙, 前后腔距离为 915 mm。

4 实验结果

搭建完成的 DF 激光实验装置如图 4 所示。激光工作气体选用 SF₆ 和 D₂ 混合气, 参照相关文献描述, 选取 SF₆ 和 D₂ 工作气配比为 10:1, 总气压为 10 kPa。储能电容 C1、C2 充电电压为 28 kV 时, 电极两端放电

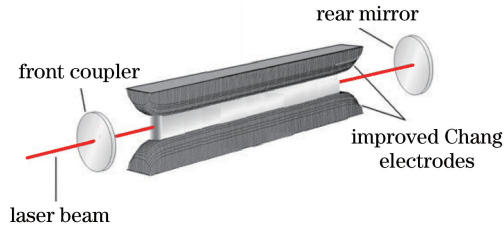


图 3 激光谐振腔

Fig. 3 Laser resonator

电压波形如图 5 所示,放电电压峰值为 39.5 kV,电压上升时间约 100 ns,经计算,注入能量密度 190 J/L。电压探测使用 PVM-5 高压探头结合 DPO7254 数字示波器。

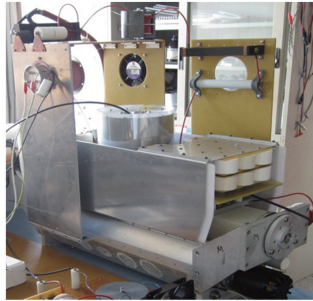


图 4 DF 激光实验装置照片

Fig. 4 Photograph of DF laser experimental setup

激光脉冲探测选用 PVM-10.6 红外探测器,测得激光脉冲如图 6 所示,脉冲宽度约 200 ns,经计算,峰值脉冲功率约 4 MW。

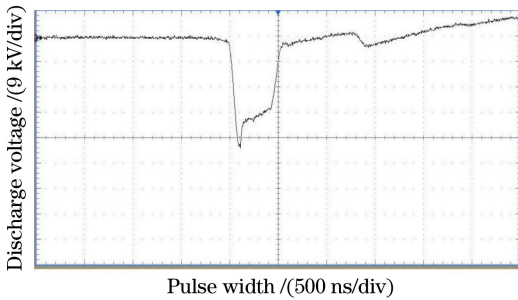


图 5 电极两端电压波形

Fig. 5 Voltage waveform of electrode both ends

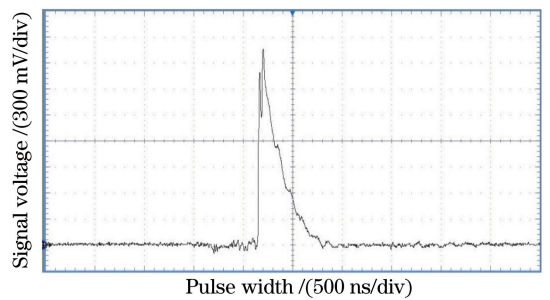


图 6 激光脉冲波形

Fig. 6 Waveform of laser pulse

对激光器的工作气体组分进行了优化,在 SF₆ 保持 10 kPa 恒定条件下,调节 D₂ 气的含量,输出激光能量如图 7 所示。图 7 中,D₂ 的含量在 1.8 kPa 左右获得较高能量输出。脉冲能量检测使用 Ophir 公司的 L30A 热释电探头。

在 D₂ 保持 1.8 kPa 恒定条件下,调节 SF₆ 的含量,输出激光能量如图 8 所示。SF₆ 的含量在 6 kPa 左右获得较高能量输出。

根据前述实验结果,SF₆ 和 D₂ 工作气配比为 10:3 时获得较大能量输出,因此,在工作气配比为 10:3 保持恒定情况下,进行了总气压调节实验。如图 9 所示,结果表明,在总气压 9 kPa 附近激光输出能量最大。

由于高压气体击穿满足帕邢曲线右支规律,即击穿电压正比于气压 p 同放电间距 d 的乘积,因此在工作气压处于较低时, pd 值较低,工作气体在电极两端电压还未达到最高值时就已经击穿,电能量对工作气体注入效率低,多余能量只能在气体击穿后形成的通路中形成残余振荡,此时激光输出能量偏低。随着工作气压逐渐升高,击穿电压也随之提高,电能量的注入效率越来越高,在某一气压工作点达到能量注入效率最高,此时,激光输出能量也达到最大。当工作气压继续提高时,气体击穿电压升高,此时由于放电引发系统能够提供的电压有限,电子平均能量降低,导致 F 原子产出效率降低,从而使化学反应生成的激发态 DF 分子

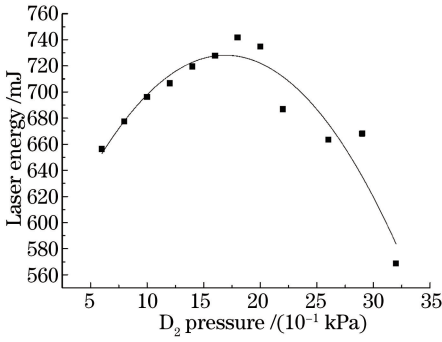


图 7 激光器输出能量随 D₂ 压强的变化关系

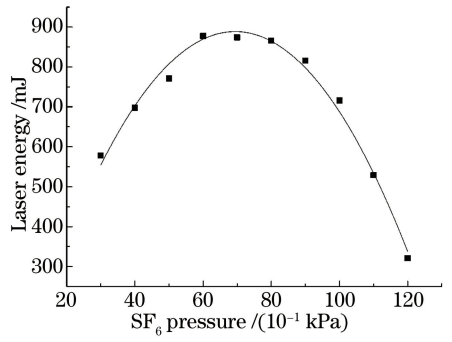


图 8 激光器输出能量随 SF₆ 压强的变化关系

Fig. 7 Relationship between output energy and D₂ pressure

Fig. 8 Relationship between output energy and SF₆ pressure

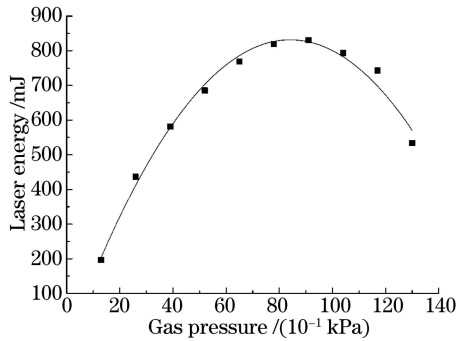


图 9 激光器输出能量随气压的变化关系

Fig. 9 Relationship between output energy and gas pressure

密度降低;此外,气体分子密度的提高导致激发态 DF 分子的振动弛豫速率加快,激发态 DF 分子的生成速率与振动弛豫速率的差值逐渐变小,即反转粒子数密度逐渐降低。因此,激光能量随着总气压的进一步提高开始不断下降。

通过气体优化实验,该激光器在 SF₆ 和 D₂ 工作气配比为 10:3 时获得最大能量输出,测得单脉冲能量为 877 mJ,此时的电光转换效率为 1.9%。经热敏相纸测试,输出近场光斑大小为 30 mm×9 mm,分布均匀。

5 结 论

采用闸流管结合一级磁脉冲压缩开关的高压快放电引发回路,在闸流管承受的电压仅为 28 kV 时,放电电极两端高压达到 39.5 kV,注入能量密度达到 190 J/L,在闸流管负荷较小条件下实现了较好的放电引发。采用紧凑型张氏面型对称匀场电极结合紫外火花预电离,实现了 30 mm 间距的大体积均匀辉光放电,横流循环风机和磁耦合隔离传动等设计使激光头结构紧凑。采用 SF₆ 和 D₂ 混合气作为激光工作气体,经过配比优化,在 SF₆ 和 D₂ 工作气配比为 10:3 时获得最大单脉冲能量为 877 mJ,电光效率为 1.9%。此放电引发非链式 DF 脉冲激光器所采用的放电回路、激光头结构设计、谐振腔参数等与公开发表的放电引发非链式 DF 器件有较大差异,相关技术为实用紧凑型 DF 激光器件研制提供了一定参考。

参 考 文 献

- 1 Apollonov V V, Belevtsev A A, Firsov K N, *et al.*. Advanced studies on powerful wide-aperture non-chain HF (DF) lasers with a self-sustained volume discharge to initiate chemical reaction[C]. SPIE, 2003, 5120: 529-541.
- 2 Tarasenko V F, Panchenko A N. Efficient discharge-pumped non-chain HF and DF lasers [C]. SPIE, 2006, 6101: 61011P.
- 3 Frandin D W, Chenausky P P, Freiberg R J. Recirculating, self-contained DF/HF pulsed laser[J]. IEEE J Quantum Electron, 1975, 11(8): 631-633.
- 4 Rudko R I, Drozdowicz Z, Linhares S, *et al.*. High-repetition-rate, recirculating hydrogen fluoride/deuterium fluoride

- laser[J]. Review of Scientific Instruments, 1982, 53(4): 452-457.
- 5 Brunet H, Mabru M, Voignier F. High energy-high average power pulsed HF/DF chemical laser[C]. SPIE, 1995, 2505: 388-392.
- 6 Brunet H. Improved DF performance of a repetitively pulsed HF/DF laser using a deuterated compound[C]. SPIE, 1997, 3092: 494-497.
- 7 Bulaev V D, Kulikov V V, Petin V N, *et al.*. Experiment study of a nonchain HF laser on heavy hydrocarbons[J]. Quantum Electronics, 2001, 31(3): 218-220.
- 8 Apollonov V V, Belevtsev A A, Firsov K N, *et al.*. Advanced studies on powerful wide-aperture non-chain HF (DF) lasers with a self-sustained volume discharge to initiate chemical reaction[C]. SPIE, 2003, 5120: 529-541.
- 9 Ke Changjun, Zhang Kuohai, Sun Ke, *et al.*. A periodically pulsed HF/DF gas discharge laser[J]. Infrared and Laser Engineering, 2007, 36(z1): 304-306.
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(z1): 304-306.
- 10 Ke Changjun, Tan Rongqing, Wu Jin, *et al.*. A new discharge type for non-chain pulsed HF/DF laser[J]. Laser Technology, 2008, 32(2): 119-121.
柯常军, 谭荣清, 吴 谨, 等. 非链式脉冲 HF/DF 激光的新型引发技术[J]. 激光技术, 2008, 32(2): 119-121.
- 11 Ke Changjun, Li Chen, Tan Rongqing, *et al.*. Experimental research on electric-discharge non-chain pulsed DF lasers [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2010, 219(2): 172-174.
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, 219(2): 172-174.
- 12 Ruan Peng, Xie Jijiang, Pan Qikun, *et al.*. Dynamical model of non-chain pulsed DF laser[J]. Acta Physica Sinica, 2013, 62(9): 094208.
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, 62(9): 094208.
- 13 Ruan Peng, Zhang Laiming, Xie Jijiang, *et al.*. Key technologies of pulsed non-chain DF lasers[J]. Chinese Optics, 2011, 4(3): 313-318.
阮 鹏, 张来明, 谢冀江, 等. 非链式脉冲 DF 激光器的关键技术[J]. 中国光学, 2011, 4(3): 313-318.
- 14 Ruan Peng, Xie Jijiang, Zhang Laiming, *et al.*. Dynamical simulation and experimental study of non-chain pulsed DF laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(7): 0702002.
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): 0702002.
- 15 Pan Qikun, Xie Jijiang, Shao Chunlei, *et al.*. High power electric-discharge non-chain pulsed DF laser[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(7): 0702001.
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, 42(7): 0702001.
- 16 Wang Xu, Xie Jijiang, Pan Qikun, *et al.*. Discharge characteristic of non-chain pulsed deuterium fluoride lasers [J]. Chinese Journal of Luminescence, 2015, 36(9): 1041-1046.
王 旭, 谢冀江, 潘其坤, 等. 非链式脉冲氟化氘激光器的放电特性[J]. 发光学报, 2015, 36(9): 1041-1046.
- 17 Pan Qikun, Xie Jijiang, Ruan Peng, *et al.*. Discharge parameters of non-chain pulsed DF laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(5): 0502009.
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, 40(5): 0502009.
- 18 Tan Gaijuan, Xie Jijiang, Pan Qikun, *et al.*. Design and experimental investigation on unstable resonator for non-chain pulsed DF laser[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(1): 0102004.
谭改娟, 谢冀江, 潘其坤, 等. 非链式脉冲 DF 激光器非稳腔设计与实验研究[J]. 中国激光, 2014, 41(1): 0102004.
- 19 Huang Ke, Yi Aiping, Zhu Feng, *et al.*. Discharge initiated non-chain high power repetitively pulsed HF/DF laser[J]. High Power Laser and Partical Beams, 2015, 27(4): 04010.
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): 04010.
- 20 Yang Jinji. Gas discharge[M]. Beijing: Science Press, 1993: 114-115.
杨津基. 气体放电[M]. 北京: 科学出版社, 1993: 114-115.