

高功率放电引发非链式脉冲DF激光器

潘其坤 谢冀江 邵春雷 邵明振 王春锐 张来明 郭 劲

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

摘要 研制了一台放电激励重复频率运转的高功率非链式脉冲氟化氘(DF)激光器,采用倍压式储能电路及自引发体放电激励方式,在SF₆和D₂的混合气体中实现了体积为1.65 L的均匀辉光放电;凭借大流量离心风机提供的8.5 m/s风速实现了电极间工作气体的快速更新;运用介孔碱性分子筛完成对放电产物的吸附处理。实验研究了工作气体参数及充电电压对激光器输出性能的影响,在总气压8.1 kPa, SF₆与D₂工作气体配比为8:1,充电电压为43 kV时,获得了3.46 J的单脉冲能量,电光转换效率为3.12%,脉冲宽度为135 ns。在50 Hz时,获得了平均功率为150 W的激光输出,其脉冲幅值差优于±8%。实测远场发散角在水平方向和垂直方向分别为7.92 mrad和9.58 mrad,并采用DF激光谱线分析仪测试获得了22条激光谱线。结果显示,放电激励非链式脉冲DF激光器是获得高功率中红外激光的有效途径。

关键词 激光器;高功率;工作参数优化;输出特性

中图分类号 TN248.2

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0702001

High Power Electric-Discharge Non-Chain Pulsed DF Laser

Pan Qikun Xie Jijang Shao Chunlei Shao Mingzhen

Wang Chunrui Zhang Laiming Guo jin

State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China

Abstract The studies of a repetitively pulsed deuterium fluoride (DF) laser based on electric-discharge and closed cycle are presented. Using double-pressure tank circuit and a rough cathode, the self-sustained volume discharge of 1.65 L is obtained in SF₆-D₂ mixtures. A centrifugal fan provides adequate gas flow to refresh mixture gas quickly. The gases pass through a scrubber cell in which ground state DF molecules are eliminated from the gas stream. The influences of gas parameters and charging voltages on the output characteristics of non-chain pulsed DF laser are investigated experimentally. At the charging voltage of 43 kV, under the optimum working condition (the working gas ratio is 8:1, the total pressure is 8.1 kPa), a maximum output energy of 3.46 J, an electro-optical conversion efficiency of 3.12% and a pulsed width of 135 ns are got. At an operating repetition rate of 50 Hz, a maximum average output power of 150 W is obtained, whose amplitude difference of laser pulses is less than 8%. The far-field divergence angles in horizontal and vertical directions are 7.92 mrad and 9.58 mrad, respectively. 22 P-branch transition lines are achieved using DF laser spectrum analyzer. The result show that the pulsed electric-discharge DF laser is an effective technology to obtain high power mid-infrared laser.

Key words lasers; high power; optimization for working parameters; output performance

OCIS codes 140.1550; 140.3070; 140.3538

1 引 言

放电引发非链式脉冲氟化氘(DF)激光器输出波段处于大气传输窗口,在3.5~4.2 μm范围内拥有数十条激光谱线,对应多种大气污染物的吸收峰,因而在用于大气污染远程监控的激光雷达方面具有独特的优势^[1-2]。

收稿日期: 2014-12-17; 收到修改稿日期: 2015-02-14

基金项目: 科技部国际合作专项基金(2011DFR10320)、激光与物质相互作用国家重点实验室基金(SKLLIM 1310-01)

作者简介: 潘其坤(1985—),男,博士,助理研究员,主要从事高功率中红外脉冲激光器技术方面的研究。

E-mail: panqikun2005@163.com

另外,该激光器采用无毒、无腐蚀性气体为工作介质,且操作方便无爆炸危险,是中红外波段实现高功率激光输出的有效手段,在激光与物质相互作用领域具有重要的应用前景^[1]。

近年来,围绕提升非链式脉冲DF激光器单脉冲输出能量、电光转换效率、输出功率、重复频率等开展了大量的研究。Apollonov等^[4-5]采用自引发放电方式在SF₆与D₂的工作介质中实现了大体积均匀放电,获得了高达325 J的单脉冲DF激光输出。Tarasenko等^[6-7]通过优化工作气体参数、储能放电电路等参数,将非链式DF激光器电光转换效率提升至5%,单脉冲输出能量为1.5 J。Harris等^[8]采用电晕预电离放电技术,以SF₆和D₂为工作物质,实现了DF激光器1 kHz重复频率运转,获得了平均功率为2.5 W的DF激光输出。Velikanov等^[9]向工作气体中通入辅助气体He以降低增益区的声波扰动,在重复频率为2200 Hz时实现了33 W的DF激光输出。Aksenov等^[10]采用3个串联的放电模块,以SF₆和D₂为工作物质,在10 Hz运转条件下实现了平均功率为400 W的DF激光输出。上述研究显示,通过增大放电体积可提升单脉冲能量,但在输出能量为焦耳量级时,提升激光器重复频率以获得较高的平均功率十分困难,主要原因:1)高重复频率运转时,放电区气体流场均匀性很难保证;2)添加分子筛化学吸附剂后工作气体流阻变大,很难实现放电区工作介质快速更新。

本课题组采用速率方程理论研究了非链式脉冲DF激光器的辐射机理^[11],并采用紫外预电离放电引发方式获得了4.95 J的单脉冲能量^[12]。本文研究一种可在高重复频率下运转的高功率非链式脉冲DF激光器。通过引进自引发放电方式提升放电均匀性,并采用大流量离心风机及高效率换热器,通过合理的流道设计有效解决DF激光器难以重复频率运转的难题,进而通过工作气体参数优化,在重复频率为50 Hz时,实现了平均功率为150 W的DF激光输出,并对激光脉冲波形、远场发散角、输出谱线等参数进行测试。

2 激光器结构及实验装置

非链式脉冲DF激光器主机结构如图1所示。它主要由气体循环系统、真空系统、冷却系统、放电产物处理系统、激光头、储能系统6部分组成。气体循环系统主要包括风机与流道,风机采用流量为550 L/s、压比为1.8的两台离心风机并联形式,流道采用多段拼接的形式以优化流场均匀性,实测放电区风速为8.5 m/s,流场不均匀性小于±2%。真空系统主要包括真空泵与真空罐,真空罐体积为1.68 m³,罐内真空度可达0.1 Pa,工作状态漏率小于1 Pa·m³/h。冷却系统包括两台板翅式换热器及冷水机组,冷却水温度不超过15℃,重频运转时实测工作气体温度低于20℃。放电产物处理采用介孔碱性分子筛,孔道直径为2~10 nm,相比孔道直径为0.3~0.5 nm的中性沸石分子筛,它的气体阻力更小、吸附效率更高^[13]。激光头包括放电系统与光学谐振腔,放电系统采用粗糙的放电阴极与光亮的阳极,其结构如图2所示,放电触发后边缘电场集中而率先形成放电通道,放电通道内工作气体的解离及DF分子的生成将导致阻抗增加,限制单通道放电向弧光放电转化,随着能量继续注入,放电逐渐横向扩展形成体放电,即无需预电离装置即可形成稳定的放电,相比紫外预电离放电引发系统,其单次放电消耗的工作物质可降低至30%,因此该放电系统的引用大大降低了放电区工作物质快速更新的难度;光学谐振腔采用了凹型腔,腔长为1.9 m,平面输出镜反射率为30%,凹面反射镜反射率为99%、曲率半径为16 m。储能系统采用倍压式反转电路,总储能电容量为120 nF,最大储能量可达121 J。

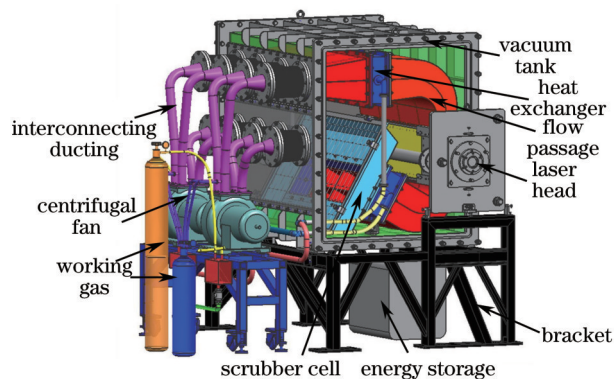


图1 非链式DF激光器主机结构

Fig.1 Schematic diagram of the non-chain DF laser

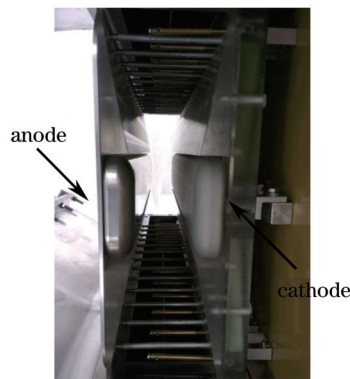


图2 自引发体放电电极

Fig.2 Electrode of self-initiated volume discharge

实验测试光路如图3所示,自引发体放电电极采用平板铝电极,工作面尺寸为65 cm×5 cm,边缘圆角半径为1 cm,电极间隙为5 cm。实验中采用室温型HgCdTe探测器和带宽为500 MHz的示波器测试输出激光脉冲波形;采用QE50-LP-H-MB型能量计测量输出激光能量,将之更换为UP60N-300F-H9型功率计可测量激光平均功率;采用刀口法测量输出激光远场发散角,刀口12可沿着垂直光束方向精确移动;采用激光光谱仪测试激光输出谱线,光路中插入缩束望远镜14以提升进入光谱仪的能量密度。

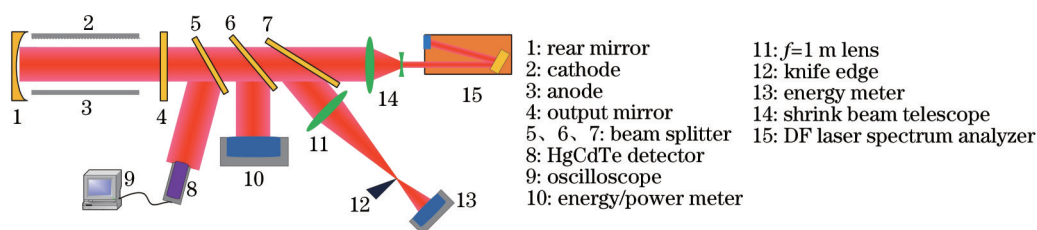


图3 实验测试光路图

Fig.3 Optical schematic of the experimental setup

3 实验结果与讨论

3.1 单脉冲运转优化

为了提升非链式脉冲DF激光器输出能量,首先研究工作气体配比、总气压、充电电压、工作气体温度对激光器脉冲输出能量的影响。

在充电电压为43 kV时,实验测试了不同工作气体配比及总气压条件下激光输出能量,结果如图4所示。

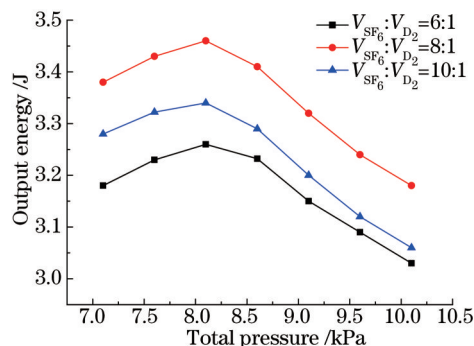


图4 单脉冲输出能量随工作气体参数的变化关系

Fig.4 Relationships of the output energy and the working gas parameters

在相同工作气体配比条件下,激光器单脉冲能量随总气压的升高呈现出先上升后下降的变化趋势,且在8.1 kPa时,激光器输出能量最高。因而总气压为8.1 kPa时电极间气体阻抗与储能电路参数匹配良好,此时最佳的 E/P_{total} 值为106.17 V/mPa,这与Ruan采用速率方程理论计算得出的单脉冲输出能量随总气压变化关系相符^[12]。在相同总气压条件下, $V_{SF_6} : V_{D_2} = 8:1$ 时,激光器输出能量最高,此时电极间放电电离 SF_6 分子产生的F原子数密度与 D_2 分子数密度相匹配,显著减弱了其他配比时过量 SF_6 对高能电子吸附或 D_2 对激发态DF分子的消激发作用,有利于增益能量提取。

在最佳工作气体配比及总气压($P_{total}=8.1$ kPa, $V_{SF_6} : V_{D_2} = 8:1$)条件下,实验测试了不同充电电压条件下激光器的输出能量与效率,结果如图5所示。当充电电压小于等于43 kV时,单脉冲输出能量随充电电压呈线性上升,继续升高充电电压,输出能量虽继续上升,但上升幅度显著下降,获得的最大单脉冲输出能量达到3.6 J。电光转换效率随充电电压的升高呈先上升后下降趋势,且在43 kV时,电光效率达到3.12%,与能量随充电电压变化趋势相符。短时间(百纳秒级)内注入大能量(百焦耳级)引起的局部不均匀放电是导致该现象的主要原因。该电光转换效率高于本课题组之前报道的2.95%^[11-12]。

不均匀放电对电极具有明显的烧蚀作用,尤其是高重复频率放电情况下电极烧蚀尤为严重。为了保护激光器,应使其工作在均匀放电状态下,因而重复频率运转实验中将充电电压设定为43 kV。

图6给出了激光器输出能量随工作气体温度的变化关系。结果显示,温度高于25℃时,单脉冲能量随气体温度的升高不断下降,且温度达到40℃时,单脉冲能量衰减了13%。温度较高时,电子在工作气体中的平均自由程显著下降,从而导致放电区高能电子数密度显著下降,另外,温度升高将加快激发态DF分子的消激发速率,这两种因素是导致激光输出能量下降的主要因素。自引发放电非链式脉冲DF激光器工作气体温度应控制在25℃以内。

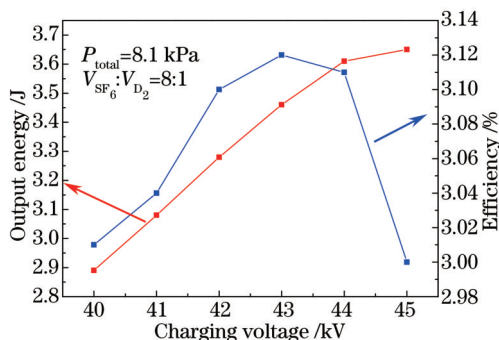


图5 能量及电光转换效率随充电电压的变化关系

Fig.5 Relationships of the output energy and electric efficiency and the charging voltage

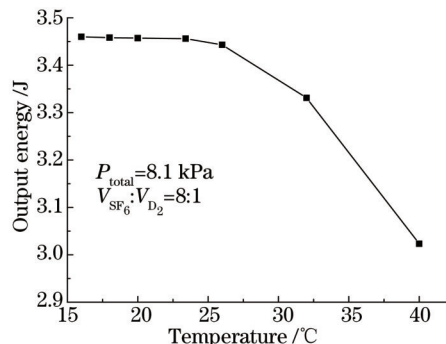


图6 激光器输出能量随放电区温度的变化关系

Fig.6 Relationship between the output energy and the gas temperature

3.2 重复频率运转优化

在自引发放电非链式脉冲DF激光器单脉冲稳定运转的基础上,对该激光器重复频率运转性能进行优化以提升其输出功率。在工作气体配比 $V_{SF_6} : V_{D_2} = 8:1$, 充电电压为43 kV时,激光器输出功率随工作气体总气压的变化关系如图7所示。

图7给出了激光器重复频率为50 Hz时,输出功率随工作气体总气压的变化关系。对比图4可知,功率与能量随工作气体总气压的变化关系一致。但激光器输出功率低于相应条件下单脉冲能量与重复频率的乘积^[8-10,14],引起该现象的原因可能为: 1) 高重复频率连续放电将引起放电电极表面发热,导致电极表层与电极间气体温度分布不均匀,进而在放电区局部出现湍流,影响增益区放电稳定性与均匀性; 2) 激光器高重复频率运转时具有较强的放电噪声,该放电噪声将在谐振腔内形成声波场,从而引起放电区气压波动以及气体折射率改变,降低单脉冲输出能量; 3) 放电区工作气体逆向膨胀距离具有不可预测性,虽然设计时所取的清洗系数大于2,但仍无法避免少量放电残余气体遗留在放电区参与二次放电; 4) 增益系数随着介质温度的升高而变小。改善气体流场设计以减小放电区湍流、向工作气体中添加辅助气体以降低声波扰动、增大放电区气体流速以避免放电气体残留是提升该激光器重复输出功率的有效技术途径。

在50 Hz时,测量的激光脉冲波形如图8所示。重复频率运转时,激光脉冲能量存在随机的波动,但整体稳定性较好,没有脉冲丢失现象,重复频率激光脉冲幅值差优于±8%。测得的单脉冲激光宽度为135 ns(见图8中单个脉冲的时间展宽波形),此时测得的单脉冲输出能量为3.46 J,由此计算可得DF激光脉冲输出峰

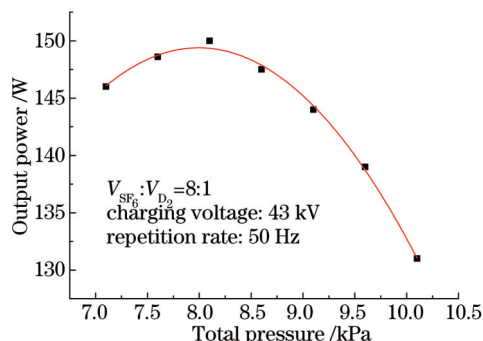


图7 激光器输出功率随工作气体总气压变化关系

Fig.7 Relationship between the average output power and the total pressure

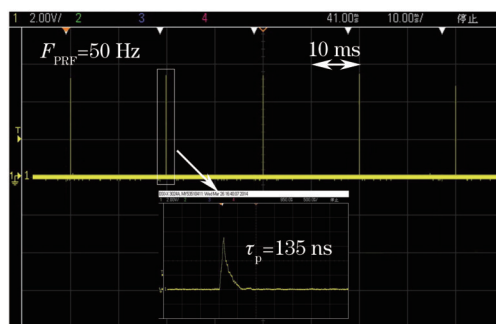


图8 DF激光脉冲波形

Fig.8 Pulse trains and typical shapes of the DF laser

值功率为 25.63 MW。

3.3 远场发散角及光谱测试

激光远场发散角是表征激光输出特性的重要参数,透镜聚焦光斑直径除以透镜焦距是实验测量高功率激光远场发射角的常用方法^[15]。图9给出了刀口法测量的透镜($f=1\text{ m}$)焦平面上激光能量随刀口位置的变化曲线。聚焦光斑直径为归一化能量0.9和0.1间刀口位置差乘以换算系数1.56。由图9可知,聚焦后 x (水平)方向和 y (竖直)方向焦斑直径为7.92 mm和9.58 mm,因而实测 x 和 y 方向的远场发散角分别为7.92 mrad和9.58 mrad。采用烧蚀法测得的激光近场光斑如图10所示,由此可看出,激光能量分布较为均匀。

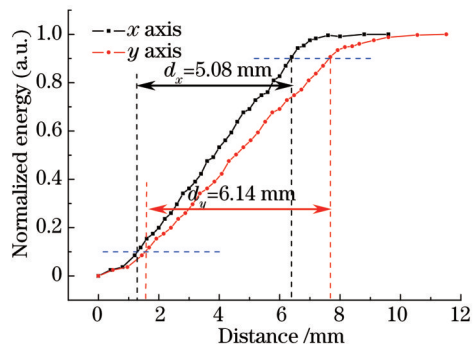


图9 归一化能量随刀口位置的变化曲线

Fig.9 Normalized energy versus knife edge position at focal plane of lens

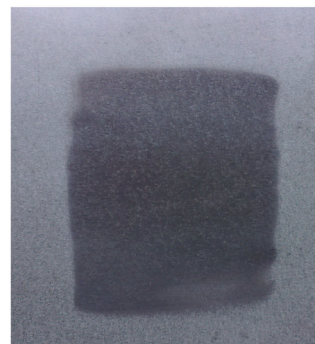


图10 DF激光近场光斑

Fig.10 Near-field spot of DF laser

图11给出了采用DF激光谱线分析仪和狭缝能量计获得的非链式DF激光器输出谱线,在 $3.5\sim 4.2\ \mu\text{m}$ 间共获得了22条激光谱线,且能量主要集中在 $3.8\ \mu\text{m}$ 附近,各振动能级上谱线的能量分布为 $E(P_1):E(P_2):E(P_3)=4:5:3.5$,且该激光器振动能级间量子级联效应显著,存在量子级联效应的 $P_3(7)\rightarrow P_2(8)\rightarrow P_1(9)$ 3支谱线占总输出能量的21.2%。

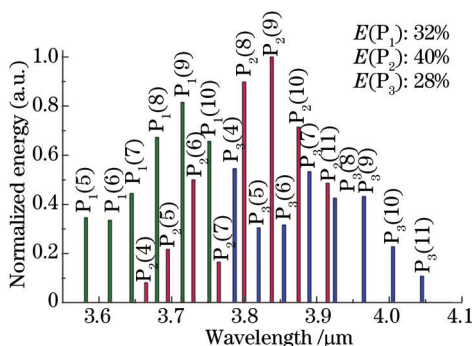


图11 非链式DF激光器输出谱线

Fig.11 Laser spectra of non-chain DF laser

4 结 论

采用大流量离心风机驱动放电区气体增益介质快速更新实现了非链式脉冲DF激光器重复频率运转。通过工作气体参数优化,获得的最佳脉冲运转条件为:工作气体总气压 $8.1\ \text{kPa}$,气体配比 $V_{\text{SF}_6}:V_{\text{D}_2}=8:1$,放电电压 $43\ \text{kV}$,此时测得的单脉冲能量为 $3.46\ \text{J}$,电光转换效率为 3.12% ,光脉冲宽度为 $135\ \text{ns}$,峰值功率高达 $25.63\ \text{MW}$ 。在 $50\ \text{Hz}$ 时实现了平均功率为 $150\ \text{W}$ 的DF激光输出,功率稳定性优于 $\pm 8\%$ 。采用刀口法测量的 x 和 y 方向的远场发散角分别为 $7.92\ \text{mrad}$ 和 $9.58\ \text{mrad}$ 。采用DF激光谱线分析仪实验测得22条DF激光振转跃迁谱线,且能量主要集中在 $3.8\ \mu\text{m}$ 附近。下一步工作将致力于提升非链式脉冲DF激光器重复频率运转稳定性。

参 考 文 献

1 V Y Agroskin, B G Bravy, Y A Chernyshev, *et al.*. Aerosol sounding with a lidar system based on a DF laser[J]. Appl Phys B, 2005,

- 81: 1149–1154.
- 2 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.
- 3 B K Deka, P E Dyer, D J James, *et al.*. Gas breakdown threshold measurements using a pulsed HF/DF laser[J]. Optics Communications, 1976, 19(2): 292–296.
- 4 V V Apollonov, S Y Kazantsev, A V Saifulin, *et al.*. Discharge characteristics in a non-chain HF (DF) laser[J]. Quantum Electronics, 2000, 30(6): 483–485.
- 5 V V Apollonov, A A Belevtsev, K N Firsov, *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.
- 6 V F Tarasenko, A N Panchenko. Efficient discharge-pumped non-chain HF and DF lasers[C]. SPIE, 2006, 6101: 1–9.
- 7 A N Panchenko, V F Tarasenko. Brief communications on the efficiency of nonchain electric-discharge HF(DF) lasers[J]. Russian Physics Journal, 2004, 47(5): 571–573.
- 8 M R Harris, A V Morris, E K Gorton. A closed-cycle, 1 kHz pulse repetition frequency, HF (DF) laser[C]. SPIE, 1998, 3268: 247–251.
- 9 S D Velikanov, P Evdokimov, A F Zapolsky, *et al.*. Pulse periodic HF (DF) – laser of atmospheric pressure with pulse repetition rate up to 2200 Hz[C]. SPIE, 2009, 7131: 71310V.
- 10 Y N Aksenov, V P Borisov, V V Burtsev, *et al.*. A 400-W repetitively pulsed DF laser[J]. Quantum Electronics, 2001, 31(4): 290–292.
- 11 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. 非链式脉冲氟化氙激光器的动力学模拟和实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(7): 0702002.
- 12 Peng Ruan, Jijiang Xie, Laiming Zhang, *et al.*. Computer modeling and experimental study of non-chain pulsed electric-discharge DF laser[J]. Optics Express, 2012, 20(27): 28912–28922.
- 13 Qikun Pan. Research on Key Technologies of Non-Chain Electric-Discharge DF Laser[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2014.
潘其坤. 放电引发非链式 DF 激光器关键技术研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2014.
- 14 I L Butsykin, S D Velikanov, P A Evdokimov, *et al.*. Repetitively pulsed DF laser with a pulse repetition rate up to 1200 Hz and an average output power of ~25 W[J]. Quantum Electronics, 2001, 31(11): 957–961.
- 15 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.
谭该娟, 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.

栏目编辑: 张 雁