

# 非链式脉冲 DF 激光器放电特性

潘其坤<sup>1,2</sup> 谢冀江<sup>1</sup> 阮 鹏<sup>1,2</sup> 张来明<sup>1</sup> 谢京江<sup>1</sup> 李殿军<sup>1</sup> 邵春雷<sup>1</sup> 杨贵龙<sup>1</sup> 谭改娟<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 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)  
<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要** 为了提高非链式脉冲 DF 激光器注入能量和放电稳定性, 研究了火花针紫外预电离放电引发非链式脉冲 DF 激光器的电路特性。通过分析工作气体中 SF<sub>6</sub> 分子的碰撞解离及其对电子的吸附过程, 得到了电子连续性方程, 结合放电回路基尔霍夫方程建立了描述 DF 激光器放电特性的数学模型。运用该模型模拟了预电离放电电压、主放电电压及电流随时间的变化关系, 模拟结果较真实地反映了预电离放电与主放电之间的时间延迟、主电极间的击穿及自持放电等物理过程。利用非链式脉冲 DF 激光器样机对模拟结果进行了相应的实验验证, 测量得到的主、预放电电压波形与修正后的模拟电压波形一致。进而运用该模型研究了主储能电容、延迟电感、锐化电容对放电特性的影响, 得到了有助于提高 DF 激光器放电性能的电路参数。

**关键词** 激光器; 气体放电; 数值模拟; 火花针紫外预电离

**中图分类号** TN248.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0502009

## Discharge Parameters of Non-Chain Pulsed DF Laser

Pan Qikun<sup>1,2</sup> Xie Jijiang<sup>1</sup> Ruan Peng<sup>1,2</sup> Zhang Laiming<sup>1</sup> Xie Jingjiang<sup>1</sup>  
Li Dianjun<sup>1</sup> Shao Chunlei<sup>1</sup> Yang Guilong<sup>1</sup> Tan Gaijuan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130033, China  
<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

**Abstract** The circuit parameters of spark pin ultraviolet (UV) pre-ionization discharge non-chain pulsed DF laser is researched to improve its discharge uniformity and electric energy depositions. Through analysis the process of dissociation of SF<sub>6</sub> molecules and the attachment of electrons to SF<sub>6</sub> molecules, the continuity-equations for electrons is obtained. Combination with the Kirchhoff equations for discharge circuit, the mathematical model is established to describe the discharge parameters of DF laser. Based on this model, the voltage waveforms of pre-ionization and main discharge, also the current waveform of main discharge are solved numerically. The results display some physical processes correctly, such as the delay time between pre-ionization and main discharge, breakdown of the main electrode and the self-maintained discharge. Then the corresponding experiments are carried out to verify the results of this model. The measured pre-ionization and main discharge voltage waveforms are consistent with the simulation results. Using this model, the influences of main store capacitance, delay inductance, peak capacitance on the discharge are researched individually, and the circuit parameters of DF laser are obtained that is useful to improve the discharge stability.

**Key words** lasers; gas discharge; numerical simulation; spark pin ultraviolet pre-ionization

**OCIS codes** 140.1550; 250.3140; 000.4430

收稿日期: 2012-12-10; 收到修改稿日期: 2013-01-29

基金项目: 科技部国际合作专项基金(2011DFR10320)资助课题。

作者简介: 潘其坤(1985—), 男, 博士研究生, 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

导师简介: 谢冀江(1959—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事激光器及其应用技术等方面的研究。

E-mail: Laserxjj@163.com



$$\frac{di_{L_1}}{dt} = \frac{u_d}{L_1}, \quad (3)$$

$$\frac{di_{L_2}}{dt} = \frac{u_d - u_1 + u_2}{L_2}, \quad (4)$$

$$\frac{du_d}{dt} = \frac{i_L}{C_3} - \frac{i_{L_2}}{C_3} - \frac{i_{L_1}}{C_3} - \frac{i_d}{C_3} - \frac{u_d - u_1 + u_2}{R_{pre}C_3}, \quad (5)$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{u_1}{L} - \frac{i_L R_{SG}}{L} - \frac{u_d}{L}, \quad (6)$$

式中  $u_1$ 、 $u_2$ 、 $u_d$  分别为主储能电容、预电离储能电容和主放电极两端的电压,  $i_{L_1}$ 、 $i_{L_2}$ 、 $i_L$  分别为流经电感  $L_1$ 、 $L_2$ 、 $L$  的支路电流。旋转火花开关变值电阻表达式为  $R_{SG} = 1 + 100\exp[-t/(5 \times 10^{-9})]$  [8]。  $i_d$  为主电极间电流, 表达式为

$$i_d = en_e u_e S, \quad (7)$$

式中  $e$  为电子电量,  $S$  为主电极阴极有效面积,  $u_e$  为电子漂移速率。Apollonov 等 [9] 在研究 DF 激光准静态击穿电压时得出如下结论: 注入能量不超过 200 J/L, 放电时间不超过 200 ns 时, 可以忽略阶段电离、潘宁过程、杂质电离对自持放电过程的影响, 认为只有电子碰撞引起的  $SF_6$  分子的解离和  $SF_6$  分子对电子的吸附过程才是自持放电必不可少的过程。在  $SF_6$  气体自持放电过程中, 电子-离子重组速率常数  $\beta_{ei}$  和电子碰撞引起的电子从负离子分离的速率常数  $k_d$  基本相等 ( $\beta_{ei} \approx k_d = 3 \times 10^{-7} \text{ cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), 模拟过程中可以忽略它们对电子浓度 (单位:  $\text{cm}^{-3}$ ) 的影响 [10]。因此电子浓度  $n_e$  由电流中电子成分连续性方程表示为

$$\frac{dn_e}{dt} = n_e \alpha u_e - n_e \eta u_e + k \frac{u_d - u_1 + u_2}{R_{pre}}, \quad (8)$$

式中  $\alpha$  为碰撞电离系数,  $\eta$  为吸附系数,  $u_e$  为电子漂移速率。  $k(u_d - u_1 + u_2)/R_{pre}$  表示由火花针预电离产生的电子数,  $k$  为常数 (数值计算中取为电子电量  $e$  的倒数)。求解微分方程 (1)~(8) 式, 即可得到非链式脉冲 DF 激光器放电特性的数值解。

### 3 模拟结果与实验结果对比分析

#### 3.1 理论计算结果

储能电容充电结束后, 在旋转火花开关被击穿前, 储能电容两端电压为额定的充电电压, 电路中各支路电流均为零。由于电路中的电感限制了端电流的跃变、电容限制了端电压的跃变, 此时的电压、电流值即为旋转火花开关打开时的初始值。非链式脉冲 DF 激光器实际电路参数及相关基本数据为: 工作气压  $p = 10 \text{ kPa}$ ,  $S = 320 \text{ cm}^2$ , 主电极间距  $d_1 =$

4 cm, 预电离电极间距  $d_2 = 2.5 \text{ mm}$ , 充电电压  $u_0 = 34 \text{ kV}$ ,  $C_1 = 227 \text{ nF}$ ,  $C_2 = 52 \text{ nF}$ ,  $C_3 = 30 \text{ nF}$ ,  $L = 2 \mu\text{H}$ ,  $L_1 = 600 \mu\text{H}$ ,  $L_2 = 200 \mu\text{H}$ ,  $T = 300 \text{ K}$ ,  $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$ , 单位体积内  $SF_6$  分子数  $N = 7.24 \times 10^{16} \times p/T \text{ cm}^{-3}$ ,  $k = 6.25 \times 10^{18}$ ,  $\alpha/N = 11.269 \times (E/N)^{1.159}$ ,  $\eta/N = 7.0 \times 10^{21} \exp[-2.25 \times 10^{18} (E/N)]$ ,  $u_e = 1.027 \times 10^{19} \times (E/N)^{0.7424}$  [11]。  $E = u_d/d_1$  为主电极间电场强度。

基于龙格库塔算法, 运用 Matlab 软件进行数值计算, 得到了主放电极电压  $u_d$ 、预电离放电极电压  $u_{pre}$ 、主放电极电流  $i_d$  随时间的变化关系, 如图 3 所示。预电离电极的端电压迅速达到其临界击穿电压 (17 kV), 实现火花放电击穿, 击穿后预放电极电压下降到其维持电压 (7 kV)。在维持电压的作用下, 预电离电极实现 50 ns 的弧光放电, 之后预放电极电压经过几次 LC 谐振衰减后降为零。预电离电极击穿后, 经过 250 ns 的延迟, 主电极的端电压达到其临界击穿电压 (33 kV), 主电极被击穿, 击穿后主放电极电压迅速下降到其维持电压 (21 kV), 实现自持放电。经历 150 ns 的持续放电后, 主放电极电压经过 LC 谐振过程衰减。主电极被击穿的瞬间, 主放电极电流开始上升, 当自持放电结束时, 放电电流达到最大值, 随后下降为零。在非链式脉冲 DF 激光器放电过程中, 注入能量为主放电极电压与电流的乘积在时间上的积分, 故有效的主放电集中在自持放电过程, 主放电残余电压将由电路中的电阻性元件消耗。

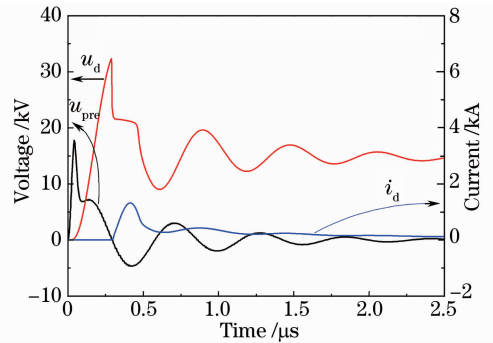


图 3 DF 激光器主放电极电压、电流和预放电极电压波形  
Fig. 3 Waveforms of main discharge voltage, current and pre-discharge voltage of DF laser

#### 3.2 实验结果与分析

取六氟化硫与氙气的气体分压比为 10:1, 对上述理论计算结果进行了实验验证。将两个 60 kV 的高压探头分别接到图 1 所示的 A、B 测试点上, HgCdTe 光电探测器放置于主光路中, 输出电压、光脉冲波形由带宽为 500 M 的 TDS3054C 型数字示波

器显示,测量的波形如图 4 所示。通道 1 为 DF 激光脉冲波形;通道 2 为预电离放电电压波形,高压探头 2000:1,图中每格表示实际电压为 10 kV;通道 3 为主放电电压波形,高压探头 1000:1,图中每格表示实际电压为 10 kV。预电离电极击穿电压 15 kV,没有观察到典型的放电持续阶段。预电离放电结束后,经过 220 ns 的延迟,主电极的端电压达到其临界击穿电压 (35 kV),击穿后主放电电压迅速下降到其维持电压 (20 kV),经历 100 ns 的持续放电后,主放电电压经过 LC 谐振过程衰减。主电极被击穿的瞬间,能量开始注入到增益区,高能电子碰撞 SF<sub>6</sub> 分子解离出 F 原子, F 原子与 D<sub>2</sub> 分子迅速发生化学反应生成激发态的 DF 分子,激发态的 DF 分子向低能态跃迁辐射激光。放电电压降低到其维持电压的瞬间激光脉冲开始输出(此前通道 1 显示的信号为通道 2、3 的线间干扰信号),输出激光脉冲宽度为 200 ns。主电极间自持放电照片如图 5 所示。

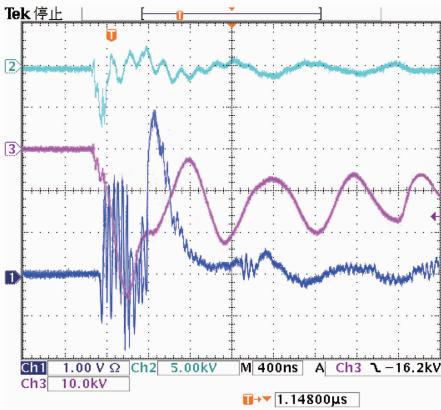


图 4 放电电压及光脉冲波形

Fig. 4 Waveforms of discharge voltage and laser pulse

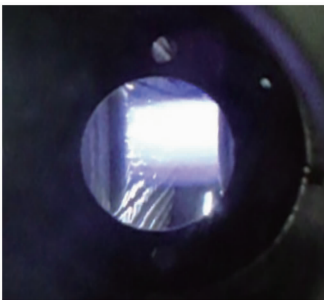


图 5 放电照片

Fig. 5 Discharge photo

比较图 3 和 4 可知,理论计算和实验测量的预电离及主放电电压波形基本一致;实验测量的激光脉冲与理论计算的注入能量起始时间相符。实验测量的预电离放电电压波形没有明显的放电持续阶段,而理论计算结果显示有 50 ns 的放电持续时间,产生这种

偏差的原因:理论计算值采用的基本常数( $\alpha, \eta, u_e$ )忽略了 D<sub>2</sub> 对放电的影响,而 D<sub>2</sub> 对电子的吸附能力较 SF<sub>6</sub> 低很多,这将导致工作气体中电子浓度的理论计算值偏低,电极间电流偏小,注入相同能量的时间偏长,因此理论计算的放电持续时间偏长。同时理论计算比实验测量的主放电电压持续时间也长 50 ns,这一结果证实了上述计算偏差的存在。为了获得更准确的放电持续时间,数值计算结果应减去 50 ns 的修正值。理论计算与实验测量的放电参数对比结果如表 1 所示。该模型修正后的理论计算值与实验结果基本相符,因而可以运用该模型在理论上探索非链式脉冲 DF 激光器的放电特性。

表 1 放电特性参数理论计算与实验测量结果比较

Table 1 Comparison of calculations and experimental results with discharge parameters

Comparing results	Calculations	Experimental results
Breakdown voltage of pre-ionization /kV	17	15
Maintaining voltage of pre-ionization /kV	7	Not obvious
Maintaining time of pre-ionization /ns	50	Not obvious
Breakdown voltage of main discharge /kV	33	35
Maintaining voltage of main discharge /kV	21	20
Maintaining time of main discharge /ns	150	100
Delay time /ns	250	220

#### 4 电路参数对放电特性的影响

采用上述模型,分别研究主储能电容 C<sub>1</sub>、延迟电感 L、锐化电容 C<sub>3</sub> 对放电特性的影响,得到的相关电路参数随时间的变化关系分别如图 6~8 所示。图 6 给出了主储能电容 C<sub>1</sub> 对放电特性的影响。由于数值计算的过程中, d<sub>1</sub>、p、u<sub>0</sub> 等基本参数未变,主电极间击穿电压、维持电压值没有明显的变化。储能电容 C<sub>1</sub> 值越大(相同充电电压时,初始储能量越大),主放电电极的端电压上升越快,电极间自持放电持续时间越长,放电电流也越强,因此注入能量越大。C<sub>1</sub> 是决定注入能量值的关键因素之一,较大的储能电容有助于提高注入能量。

图 7 给出了延迟电感 L 对放电特性的影响。在理论计算中发现延迟电感对预电离电极的击穿时间及其电压峰值没有明显的影响,因此仅给出了 L=2 μH 时预放电压波形以便观察主、预放电压的时间延迟,其波形如图 7(a)中虚线所示。延迟电

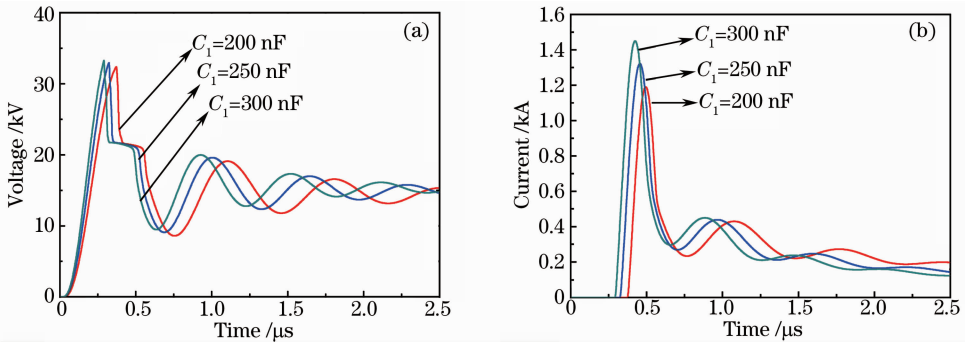


图 6 不同  $C_1$  下主放电(a)电压和(b)电流随时间的变化关系

Fig. 6 Main discharge (a) voltage and (b) current versus time with different  $C_1$

感对主放电电压波形影响较大： $L$  值越小，电压波形前沿越陡，预放电与主放电间延迟时间越短。在气体参数不变的情况下，它对主放电击穿电压、维持电压及持续放电时间没有明显的影响。如图 7(b)所示：延迟电感不仅影响主放电电流的延迟时间，它还对放电电流峰值有影响。依据气体放电理论<sup>[12]</sup>，预电离产生紫外光照射导致气体电离，开始照射后，气

体中带电粒子浓度逐渐增加直到最大值，随后由于照射的停止、离子间复合及  $SF_6$  对电子的吸附等作用，带电粒子浓度逐渐降低。当带电粒子浓度达到最大值时，电极间开始主放电最有益于形成均匀的辉光放电，此时放电电流存在最大值。理论计算结果显示，当延迟电感值为  $8 \mu H$  时，放电延迟时间为  $420 \text{ ns}$ ，主放电电流较大，注入能量较多。

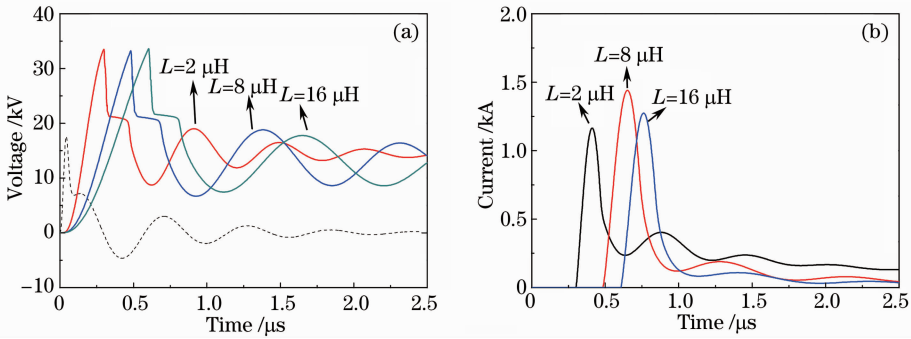


图 7 不同  $L$  下主放电(a)电压和(b)电流随时间的变化关系

Fig. 7 Main discharge (a) voltage and (b) current versus time with different  $L$

对于非链式脉冲 DF 激光器，给定一个储能电容  $C_1$  的值，就存在一个最佳的锐化电容值，该锐化电容值由电路特性决定<sup>[13]</sup>。图 8 给出了  $C_1 = 227 \text{ nF}$  时，锐化电容  $C_3$  对放电特性的影响。 $C_3$  对主放电电压、电流的影响较为明显， $C_3$  越小，放电电压上升前沿越

陡峭，放电电流越大。对比理论计算的三条曲线可知：放电电压持续时间与  $C_3$  成非线性关系， $C_3 = 42 \text{ nF}$  时，放电持续时间最长，放电电流适中，有利于能量注入； $C_3 = 22 \text{ nF}$  时，放电电流较大，但放电电压持续时间短，短时间内注入较大能量很容易导致不稳定放

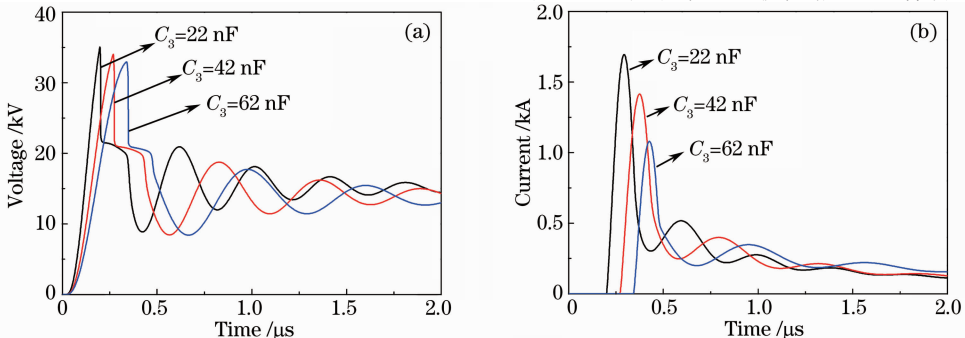


图 8 不同  $C_3$  下主放电(a)电压和(b)电流随时间的变化关系

Fig. 8 Main discharge (a) voltage and (b) current versus time with different  $C_3$

电。对于固定的  $C_1$  值,最佳的锐化电容值要靠实验确定,理论计算结果可以为实验提供参考。

## 5 结 论

采用理论与实验相结合的技术手段研究了非链式脉冲 DF 激光器的放电特性。在非链式脉冲 DF 激光增益介质中,得到了预电离放电击穿、主放电击穿及主放电持续过程在时间刻度上的演变关系。在理论上研究了主储能电容、延迟电感、锐化电容对放电特性的影响并得到如下结论:1)较大的主储能电容有助于提高注入能量;2)延迟电感决定了预放电与主放电之间的延迟时间,与气体放电特性相匹配的延迟时间有助于获得较大的放电电流;3)锐化电容值与主储能电容值存在一定匹配关系,相匹配的锐化电容有助于提高激光输出性能。

本文建立的数值模型可以用来研究非链式脉冲 DF 激光器的放电特性,数值计算结果直观地显示了放电电压、电流随时间的变化关系。作为研究 DF 激光器放电电路特性的一种辅助手段,该数值模型有着逼真、不受客观条件限制的优点,因而具有重要的实际意义。

## 参 考 文 献

- 1 V. V. Apollonov, S. Y. Kazantsev, V. F. Oreshkin *et al.*. Non-chain electron-discharge HF (DF) laser with a high radiation energy. pdf [J]. *Quantum Electron.*, 1998, **28**(2): 116~118
- 2 Tang Ying, Huang Ke, Yi Aiping *et al.*. Experimental study on stable output of discharge-pumped repetition rate HF laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2012, **39**(2): 0202004  
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): 0202004
- 3 Yi Aiping, Liu Jingru, Tang Ying *et al.*. Electrically initiated repetitive-pulsed non-chain HF lasers[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2011, **19**(2): 360~366  
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
- 4 A. A. Serafetinides, K. R. Rickwood, A. D. Papadopoulos. Performance studies of a novel design atmospheric pressure pulsed HF/DF laser[J]. *Appl. Phys. B*, 1991, **52**(1): 46~54
- 5 N. Anderson, T. Bearpark, S. J. Scott. An X-ray preionised self sustained discharge HF/DF laser[J]. *Appl. Phys. B*, 1996, **63**(6): 565~573
- 6 H. Brunet, M. Mabru, F. Voignier. High energy-high average power pulsed HF/DF chemical laser [C]. *SPIE*, 1995, **2505**: 388~392
- 7 V. V. Apollonov, K. N. Firsov, S. Y. Kazantsev *et al.*. Scaling up of non-chain HF (DF) laser initiated by self-sustained volume discharge [C]. *SPIE*, 2000, **3886**: 370~381
- 8 T. Y. Tou, K. K. Tham, W. O. Siew *et al.*. Circuit modeling of a two-stage Blumlein-driven TEA-N<sub>2</sub> laser[J]. *Meas. Sci. Technol.*, 1998, **9**(8): 1247~1251
- 9 V. V. Apollonov, A. A. Belevtsev, K. N. Firsov *et al.*. High power pulse and pulsed periodic nonchain HF/DF lasers[C]. *SPIE*, 2002, **4747**: 31~43
- 10 A. A. Belevtsev, S. Y. Kazantsev, I. G. Kononov *et al.*. Detachment instability of self-sustained volume discharge in active media of non-chain HF (DF) lasers[J]. *Quantum Electron.*, 2010, **40**(6): 484~489
- 11 K. D. Shirshak, K. P. Anup. Numerical simulation of streamers in SF<sub>6</sub> [J]. *J. Appl. Phys.*, 1988, **63**(5): 1355~1362
- 12 Yang Jinji. Gas Discharge[M]. Beijing: Science Press, 1983. 105~125  
杨津基. 气体放电[M]. 北京: 科学出版社, 1983. 105~125
- 13 Ke Changjun, Wan Chongyi, Wu Jin. Influence of mixture component and peaking capacitor on the performance of an UV preionized pulsed HF laser[J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1): 1~4  
柯常军, 万重怡, 吴 谨. 气体组份和峰化电容对脉冲 HF 激光输出特性的影响[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1): 1~4

栏目编辑: 何卓铭