

文章编号: 0258-7025(2005)01-0043-06

## 低气压毛细管放电特性研究

程元丽<sup>1</sup>, 赵永蓬<sup>1</sup>, 高英建<sup>1</sup>, 肖亦凡<sup>1</sup>, 刘 鹏<sup>1</sup>, 王 骥<sup>1</sup>, 杨大为<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup> 哈尔滨工业大学可调谐激光技术国家级重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)  
<sup>2</sup> 中国原子能科学研究院, 北京 102413)

**摘要** 利用一台毛细管快放电 X 射线激光装置, 研究了预脉冲作用下氩气和氦气在 10~120 Pa 压强范围内对毛细管放电的击穿特性。实验结果表明只有 10~15 kV 放电电压才能将内径为 3 mm, 长度为 90 mm 的毛细管中 10~120 Pa 的氩气击穿, 同时电极表面的形态对击穿电位也有较大影响。对预、主脉冲作用下毛细管放电规律及 Z 箍缩过程中阻抗变化规律进行了研究, 发现不同长度的氩气柱在箍缩过程中的阻抗变化趋势基本相同。不同长度、不同放电电压情况下, 毛细管阻抗均达到最小值 5  $\Omega$  左右, 同时电流达到峰值。该结果为在相同放电电压下, 对不同长度毛细管放电获得相同的电流峰值提供了可能。

**关键词** 激光技术; 毛细管放电; 击穿特性; 阻抗特性; X 射线激光

**中图分类号** TN 248.6 **文献标识码** A

## Study on Low Pressure Discharge Character of Capillary Discharge

CHENG Yuan-li<sup>1</sup>, ZHAO Yong-peng<sup>1</sup>, GAO Ying-jian<sup>1</sup>,  
XIAO Yi-fan<sup>1</sup>, LIU peng<sup>1</sup>, WANG Qi<sup>1</sup>, Yang Da-wei<sup>2</sup>  
(<sup>1</sup> National Key Laboratory of Tunable Laser Technology,  
Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)  
<sup>2</sup> China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract** The breakdown characteristics of capillary discharge are measured in Ar and He gases within the pressure range from 120 Pa to 10 Pa, which is the range for lasing by capillary discharge. The experimental results indicate that at least  $\sim 10$  kV of discharge voltage is required for the breakdown of gas filled in a capillary of 3 mm in diameter and 90 mm in length, which is much higher than that needed in parallel electrode system. The breakdown voltage is also greatly affected by the surface shape of electrode in low pressure. Studies show that the impedances of capillary for different lengths of gas column under the different discharge voltages represent the same character. The impedances reach the same minimum of  $\sim 5 \Omega$  when the discharge currents reach the peak value, which makes it possible to obtain the same current peak value at the same discharge voltage for different lengths of capillary.

**Key words** laser technique; capillary discharge; breakdown voltage; impedance characteristics; X-ray laser

### 1 引 言

毛细管放电是指直径为毫米量级, 长度为几厘米至几十厘米的绝缘管两端加上快脉冲高电压, 最初是用作研究 X 射线光谱, X 射线光刻和 X 射线显微术的 X 射线源。1965 年 Bogen 建立的毛细管放

电装置中, 毛细管长 2 cm, 内径 2 mm, 放电电压 40 kV, 获得了软 X 射线输出。1993 年美国科罗拉多大学的 Rocca 教授, 利用毛细管快放电产生了轴向均匀等离子体柱, 证明其可作为增益介质产生软 X 射线放大<sup>[1]</sup>。近几年, 台式的毛细管放电软 X 射线激光器发展非常迅速, 已获得了 46.9 nm 激光近毫

收稿日期: 2003-07-11; 收到修改稿日期: 2004-01-05

基金项目: 国家自然科学基金(60038010)和国家 863 计划(2002AA84ts23)资助项目。

作者简介: 程元丽(1971—), 女, 蒙族, 黑龙江人, 哈尔滨工业大学博士研究生, 副教授, 主要从事 X 射线激光及等离子体诊断研究。E-mail: cy1\_ice@hotmail.com

焦量级的输出,重复频率达到了 4 Hz<sup>[2]</sup>。目前利用毛细管放电获得强极紫外辐射(EUV)作为 X 射线光刻光源又成为新的研究热点<sup>[3]</sup>。

毛细管放电能否获得强 X 射线输出,主要取决于放电参数的选取和毛细管的放电特性。国外的实验报道<sup>[1~3]</sup>,主要从激光增益的角度进行研究。对预、主脉冲作用下毛细管的放电特性,特别是毛细管的阻抗特性,报道非常少。本文获得的氩气在 10~120 Pa 压强范围内对毛细管放电的击穿特性和预、主脉冲作用下的放电规律,对毛细管放电实验装置的研制和改进以及开展物理实验是至关重要的。

## 2 毛细管快放电实验装置

毛细管放电实验装置由四部分组成<sup>[4]</sup>,如图 1 所示。第一部分是储能部分,是一个快速高压电脉冲(Marx)发生器,输出电压为 240~300 kV,为下一级电路提供几百焦耳的能量;第二部分是一低电

感回路,采用 Blumlein 传输线;第三部分是毛细管及预脉冲电路,毛细管内充入一定气压的气体或金属蒸气。先由预脉冲电离成+1,+2 价均匀等离子体;同时 Marx 发生器对脉冲形成线进行脉冲谐振充电,充电时间通常大约为 1  $\mu$ s。脉冲形成线充电到峰值电压 90%~95%时,主开关接通,脉冲形成线提供一个快前沿、短持续时间(20~100 ns)的脉冲电压加到毛细管负载上,形成快脉冲大电流;毛细管内预电离形成的等离子体在快脉冲大电流的作用下,进行箍缩,形成高密度、高温、高电离度、均匀的等离子体柱,其中的电子碰撞过程形成相应能级的粒子数反转,在适当的条件下即可产生软 X 射线的激射;第四部分是真空及检测系统。图 2 和图 3 给出了主脉冲和预脉冲对毛细管放电的等效电路图。预脉冲装置包括预脉冲电源和预脉冲电路,采用倍压电路来提高预脉冲电压,高压变压器的最大输出电压为 10 kV,预脉冲电路的最大输出电压为 20 kV。

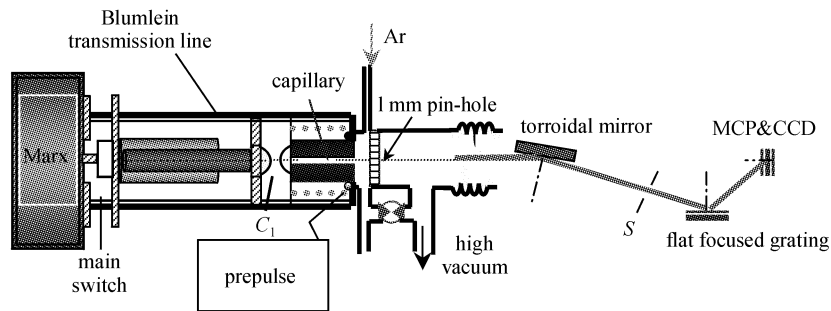


图 1 毛细管放电实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the capillary discharge setup

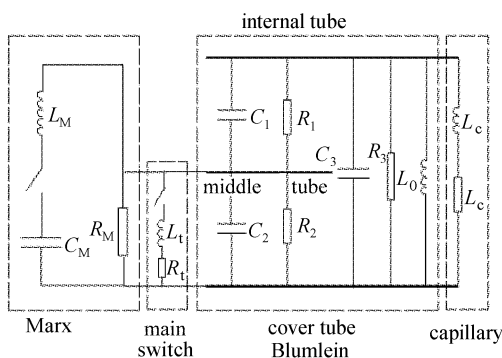


图 2 主脉冲对毛细管放电等效电路图

Fig. 2 Equivalent electrical circuit diagram of charge circuit from Marx to Blumlein line

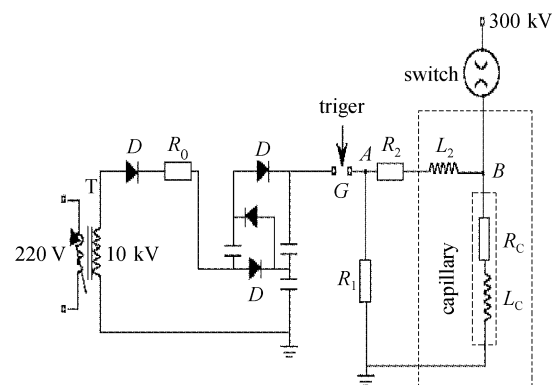


图 3 预脉冲电路图

Fig. 3 Equivalent electrical circuit diagram of pre-pulse

## 3 毛细管预脉冲的放电特性

能否获得软 X 射线激光输出,关键在于能否形

成均匀的、高温、高电离的等离子体柱。预脉冲的作用是将毛细管内的气体预先电离为+1,+2 价的离子,是毛细管中形成均匀等离子体柱、进而获得软 X

射线放大的关键。如何选择适当的预脉冲电压,需要对充气毛细管的击穿特性进行研究。

由巴申曲线可知,1 kV 的脉冲电压应该足以使充有 100 Pa 氩气的 10 cm 长毛细管击穿,但实验中发现,1 kV 的电压却未能将 10~120 Pa 的氩气击穿。这是由于毛细管放电通道小,管壁对电子繁流影响大,与平板电极系统没有管壁的结果不同。文献[5]中考虑毛细管壁的影响,通过电子繁流方程获得了毛细管放电的击穿条件

$$APde^{-BPd/V_s} - C \frac{d^2}{R^2 V_s^{1/4} (Pd)^{3/4}} = \ln\left(1 + \frac{1}{\gamma}\right), (1)$$

利用(1)式计算了低气压毛细管放电的击穿电位,结

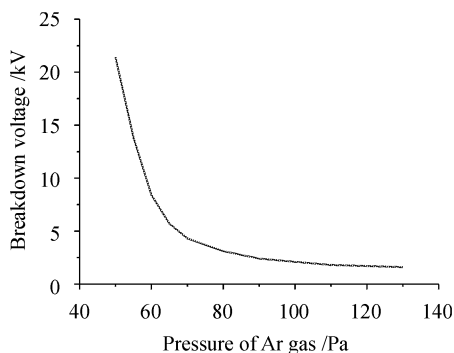


图 4 毛细管放电氩气击穿电位的理论结果  
Fig. 4 Simulated curves of breakdown voltage against pressure of Ar gas

果如图 4 所示,在产生激光的工作压强 60~70 Pa 范围内,需要 15 kV 左右的电压才能将毛细管中的氩气击穿。

毛细管放电软 X 射线激光需要预脉冲的幅值为几十安培,持续时间为几十微秒,才可产生均匀稳定的等离子体柱<sup>[6]</sup>,而不适当的预脉冲,过高(>100 A)或没有预脉冲,产生的等离子体均匀性差,可能观察不到谱线。根据以上条件建立毛细管放电的预脉冲装置,如图 3 所示。图 5 给出预脉冲电路对充 70 Pa 氩气毛细管放电的电压和电流波形。毛细管是纯度为 99.9% 的氧化铝陶瓷,内径为 1.6 mm,长度为 15 cm,电极采用黄铜电极,阴极长度分别为 10 cm,8 cm,6 cm,4 cm 和 2 cm,阳极为 2 mm 长的中空电极,中空内径  $r = 0.5$  mm,阴极和阳极外径均为 1.5 mm。

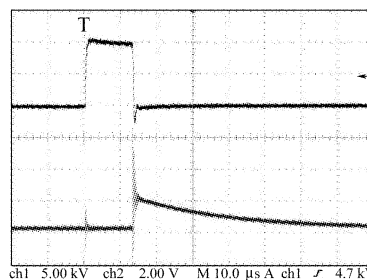


图 5 70 Pa 氩气预脉冲放电的电压和电流波形  
Fig. 5 Voltage and current waveforms of pre-pulse discharge

表 1 氩气和氦气在 10~120 Pa 范围内的击穿电位

Table 1 Comparison of breakdown voltage for different pressure of Ar and He gas

Pressure /Pa	Ar gas, the length of the column is 7 cm and the value of the current peak is 24 A		Ar gas, the length of the column is 9 cm and the value of the current peak is 26 A		He gas, the length of the column is 9 cm and the value of the current peak is 30 A	
	Breakdown voltage /kV	Duration /μs	Breakdown voltage /kV	Duration /μs	Breakdown voltage /kV	Duration /μs
130	8.5	0.3	9.0	0.28	18.0	2.0
120	8.5	0.3	9.0	0.3	18.0	2.6
110	8.5	0.3	9.0	0.3	18.0	2.8
100	8.5	0.3	9.0	0.3	18.0	3.2
90	9.0	0.4	9.0	0.32	18.0	3.4
80	9.5	0.32	9.5	0.36	18.0	4.0
70	10.0	0.35	9.8	0.36	18.0	4.5
60	12.0	0.5	12	0.5	18.0	8.0
50	13.0	0.6	12	0.52	18.0	20
40	14.0	1.0	13	1.0	18.0	>100
35	14.0	1.6	13.5	1.8		
30	14.2	2.8	13.5	3.8		
25	14.2	4.8	13.5	5		
20	14.2	7.5	13.5	11.0		
15	14.2	10.0				
10						

不同气体在不同气压下的放电实验表明(如表 1 所示),在相同的气柱长度下,随着气压从 130 Pa 降到 15 Pa,两种气体的击穿电位均逐渐增加,且气柱两端电压的持续时间也逐渐增加。氩气气压低于 60 Pa 时击穿电位增加得较快,而气压小于 10 Pa 时,在现有电压 20 kV 的情况下仍未能将其击穿。气柱长度从 3 cm 变化到 13 cm 时,击穿电位略有上升,但变化不大。

毛细管放电氩气击穿电位的实验结果同理论结果的变化趋势基本相同,但未能完全吻合,这是因为:1) 公式(1)未考虑各种逐级电离过程,多次采用了一级近似<sup>[6]</sup>。2) 电极表面的形态对击穿电位影响很大,随着放电次数的增加,同种气体在相同条件下的击穿电位上升。

实验中,预脉冲峰值为 20~30 A,持续时间 100  $\mu\text{s}$  以上,电极表面产生了熔化层,但是不产生明显的运动和变形。表面上已有的凸点被削平在熔化区内,表面变平滑了,所以击穿电位上升。实验表明预脉冲对铜电极和钨电极分别放电 50 次左右后,表面的变化开始使击穿电位上升,最后致使放电沿毛细管外壁进行而管内气体不导通。然而经主脉冲放电后的电极,却同新电极一样容易使气体击穿。原因在于主脉冲电流峰值高、上升迅速(30 kA, 26.6 ns, 见图 8),致使电极表面产生局部变形,表面变得不平整了,形成新的发射点,击穿电位下降。但预、主脉冲多次放电后,使电极形成了氧化物薄膜,击穿电位又有上升。可见电极的形态对击穿电位有很大的影响,在低气压下这种影响更为突出,可使击穿电位相差 3~4 倍。

电压加到毛细管两端之后,气体并没有立即击穿,而有一延迟,如图 5 所示,持续时间为 14  $\mu\text{s}$ 。从表 1 中可以看出,随气压的减小,在击穿电位上升的同时,电极两端电压的持续时间也明显增加。同一长度和压强的气柱,如果其两端电压低于击穿电位或电极老化,在较长的延迟后也有可能导通,但此时的延迟时间是不稳定的,在几十微秒范围内飘动。毛细管放电软 X 射线激光要求预脉冲与主脉冲之间有固定的延迟时间(几个微秒),所以如何确保气体的稳定击穿是一个关键问题。实验表明,对不同长度的气柱,当电极两端电压足够高时(击穿电压的 1~2 倍),气体击穿的延迟时间迅速缩短,0.4  $\mu\text{s}$  左右即可将气体击穿,且该延迟时间非常稳定;此外,预脉冲发生器连续触发时,第二次击穿时的电压很小(<10 kV)且延迟时间也非常短(0.4  $\mu\text{s}$  左右)。

当氩气压强为 20 Pa,气柱长 7 cm 时,第一次击穿电压为 14 kV,延迟时间 10  $\mu\text{s}$  左右,而第二次击穿电压仅为 10 kV,且延迟时间稳定在 0.4  $\mu\text{s}$  左右,如图 6 所示。二次击穿,亦能够确保预脉冲与主脉冲之间有稳定的延迟时间。

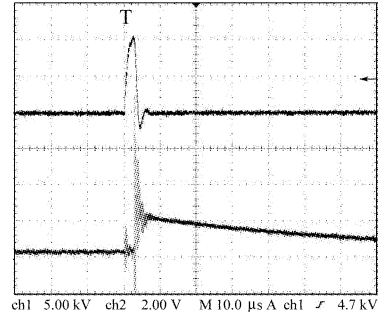


图 6 20 Pa 氩气预脉冲放电的电压和电流波形

Fig. 6 Voltage and current waveforms of pre-pulse discharge

#### 4 毛细管主脉冲放电特性

毛细管快放电激励软 X 射线激光要求主脉冲有较快的上升沿(几十纳秒)和高的峰值(几十至几百千安)。其中快前沿使等离子体与管壁快速分离,有效减少了管壁烧熔量<sup>[7]</sup>,提高能量转换效率;高峰值电流脉冲有助于产生高电离度的离子。毛细管阻抗特性决定了放电后加在毛细管上的电压、电流波形及幅值大小,对于获得激励 X 射线激光的最佳放电条件具有十分重要的作用。

毛细管放电的初始条件和假设:1) 毛细管长 10 cm,内直径  $r_0 = 3$  mm;初始氩气  $T_0 = 0.5$  eV,  $n_0 = 2.25 \times 10^{16} / \text{cm}^3$ 。系统特征电阻  $Z_0 = 5 \Omega$ ,初始时刻电感  $L_0 = 119$  nH。2) 因为毛细管十几厘米长,直径 3 mm 左右,最大压缩时刻可达 100  $\mu\text{m}$ ,轴向和径向比值非常大,可以采用一维近似。3) 主脉冲之前的预脉冲已经将毛细管内气体初步电离成 +1, +2 价等离子体。毛细管负载相当于一个电感  $L(t)$  和电阻  $R(t)$  的串连,阻抗  $Z(t) = \omega L(t) + R(t)$ 。

由等离子体电阻率计算公式

$$\eta = 5.2 \times 10^3 \frac{Z \ln \Lambda}{T^{3/2}} / (\Omega \cdot \text{cm}), \quad (2)$$

式中  $T$  的单位为 eV,  $Z$  为气体的电离度。可得负载电阻  $Z_{\text{begin}} = 18.82 \Omega$ ,  $Z_{\text{end}} = 0.01 \Omega$ 。根据公式(2),随着箍缩过程的进行,氩气进一步电离和电子温度升高,负载电阻是急剧减小的,在箍缩的最后阶段,负载电阻(0.01  $\Omega$ )与系统特征阻抗(5  $\Omega$ )相比可以忽略。

系统总电感

$$L = L_0 + \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln\left(\frac{r_0}{r}\right),$$

$L_0$  为  $t = 0$  时毛细管的总电感,包括气柱电感和电极电感。 $r_0$  为  $t = 0$  时气柱的外径,  $r_0 = 1.5 \text{ mm}$ 。气柱长  $l$  为  $11 \text{ cm}$ , 电极长为  $4 \text{ cm}$  时, 由圆柱形导体电感公式得气柱电感为  $93.2 \text{ nH}$ , 电极电感为  $25.8 \text{ nH}$ , 则  $L_0 = 119 \text{ nH}$ 。设气柱被箍缩到最小时刻  $r = 0.15 \text{ mm}$ , 则此时  $L = 170 \text{ nH}$ 。图 7 给出了不同长度气柱电感随箍缩半径  $r$  的变化。从初始状态到最后箍缩阶段,  $\omega L$  的变化范围为  $3.7 \sim 5.1 \Omega$ 。系统初始阻抗为系统特征电阻  $Z_0 = 5 \Omega$ , 系统负载电阻  $18.8 \Omega$  和系统电感项组成, 数值大约为  $30 \Omega$ 。在箍缩最后阶段,  $R(t) \ll \omega L(t), R(t) < 1 \Omega$ , 系统负载电阻项忽略不计, 此时系统阻抗为  $8 \sim 5 \Omega$ 。由以上分析可见, 系统阻抗的变化主要由电阻变化引起。

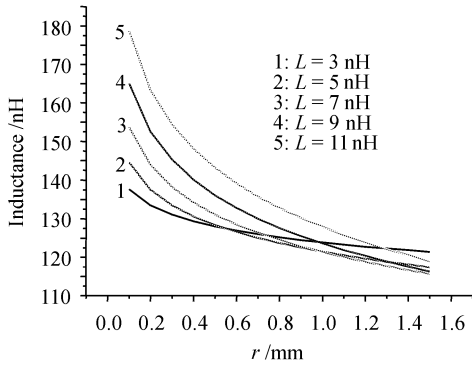


图 7 不同长度气柱电感随箍缩半径的变化  
Fig. 7 Variation of the inductance of capillary discharge against Z-pinch radius

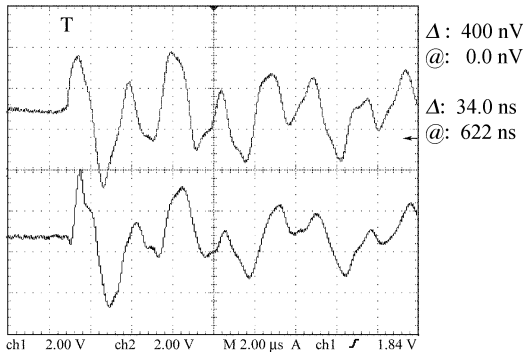


图 8 主脉冲对毛细管放电的电流和电压波形  
Fig. 8 Voltage and current waveforms of capillary discharge

Marx 发生器输出电压  $220 \text{ kV}$  时, 对充入  $70$

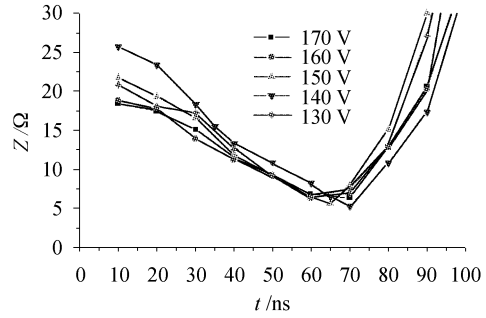


图 9 充氩气毛细管在不同放电电压下的阻抗特性  
Fig. 9 Curve of impedance characteristic of capillary at different charging voltage

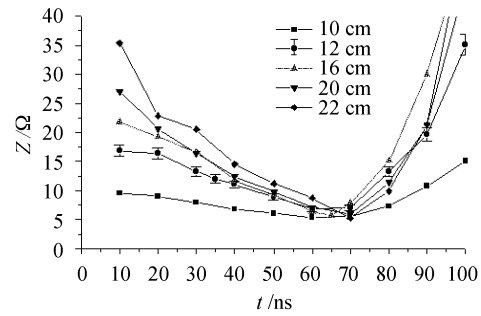


图 10 相同放电电压下不同长度毛细管的阻抗特性  
Fig. 10 Curve of impedance characteristic of capillary at different length of Ar gas

Pa 氩气的毛细管放电, 电流和电压波形如图 8 所示。放电电流峰值为  $30 \text{ kA}$ , 脉冲前沿  $26.6 \text{ ns}$ <sup>[8]</sup>。根据不同放电条件下的电压和电流数据获得的毛细管放电的阻抗特性如图 9, 10 所示。尽管不同长度毛细管的阻抗特性曲线有所不同, 但变化规律和趋势是相同的。不同长度毛细管的阻抗大小和变化速率不同, 毛细管越长, 初始阻抗越大, 其阻抗的变化速率也越大。在放电后  $60 \sim 70 \text{ ns}$ , 不同长度、不同放电电压情况下, 毛细管阻抗均达到最小值  $5 \Omega$  左右, 同时电流达到峰值。该结果为在相同放电电压下, 对不同长度毛细管放电获得相同的电流峰值提供了可能。实验结果与理论计算的系统初始和末态阻抗基本相同, 系统阻抗的变化趋势也是从高到低, 在箍缩最后阶段, 阻抗达到最小。

### 5 结论

毛细管放电与平板电极放电系统的气体击穿特性完全不同。在几厘米到十几厘米的毛细管中,  $130 \text{ Pa} \sim 15 \text{ Pa}$  的氩气柱需要  $20 \text{ kV}$  左右的电压才能将其击穿, 此时获得的电流脉冲幅值为几十安培。该

击穿条件下可在毛细管内形成均匀电离的+1,+2价等离子体,作为产生软 X 射线激光的预电离等离子体柱。在毛细管放电主电流峰值 30 kA,脉冲前沿 26.6 ns 的条件下,不同长度毛细管的阻抗特性有所不同,但变化规律和趋势是相同的。不同长度毛细管的阻抗大小和变化速率不同,毛细管越长,初始阻抗越大,阻抗的变化率也越大,但在电流峰值附近,不同长度、不同放电电压毛细管阻抗均达到 5  $\Omega$  左右。该结果为在相同放电电压下,对不同长度毛细管放电获得相同的电流峰值提供了可能。

### 参 考 文 献

- 1 J. J. Rocca, O. D. Cortazar, B. Szapiro *et al.*. Fast-discharge excitation of hot capillary plasmas for soft-x-ray amplifiers [J]. *Phys. Rev.*, 1993, **47**(2):1299~1304
- 2 C. D. Macchietto, B. R. Benware, J. J. Rocca. Generation of millijoule-level soft-x-ray laser pulses at a 4-Hz repetition rate in a highly saturated tabletop capillary discharge amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 1999, **24**(16):1115~1117
- 3 W. Neff, K. Bergmann, O. Rosier *et al.*. Pinch plasma radiation sources for the extreme ultraviolet [J]. *Contrib. Plasma Phys.*, 2001, **41**(6):589~597
- 4 Wang Qi, Cheng Yuanli, Zhang Xinlu *et al.*. Study on capillary discharge-pumped soft X-ray laser in Ne-like Ar [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2):97~100  
王 骐,程元丽,张新陆 等. 毛细管放电激励类氖-氩离子 X 光激光研究[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2):97~100
- 5 Huang Zonglin, Wang Yuzhi. Breakdown characteristics of capillary tubes [J]. *Acta Electronica Sinica*, 1985, **13**(1):72~79  
黄宗琳,王欲知. 毛细管放电击穿特性的研究[J]. *电子学报*, 1985, **13**(1):72~79
- 6 A. Ben-Kish, M. Shuker, R. A. Nemirovsky *et al.*. Initial and boundary conditions influence on z-pinch plasma for collisional excitation X-ray lasers [C]. X-ray Lasers 1998, 1999, Inst. Phys. Conf. Ser., (159). 191~194
- 7 Cheng Yuanli, Zhao Yongpeng, Xiao Yifan *et al.*. Experimental investigation on ablation character of capillary discharge [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(5):538~542  
程元丽,赵永蓬,肖亦凡 等. 毛细管快放电中的管壁烧蚀[J]. *中国激光*, 2004, **31**(5):538~542
- 8 Yang Dawei, Liu Peng, Zhao Yongpeng *et al.*. Capillary discharge device for pump soft X-ray laser [J]. *High Voltage Engineering*, 2002, **28**(120):15~20  
杨大为,刘 鹏,赵永鹏 等. 毛细管放电泵浦软 X 光激光装置 [J]. *高电压技术*, 2002, **28**(120):15~20