

单针电极放电的发光特性

李雪辰 赵欢欢 鲍文婷 常媛媛

(河北大学物理科学与技术学院, 河北省光电信息材料重点实验室, 河北 保定 071002)

摘要 采用单针电极放电装置在氩气中产生了稳定的均匀等离子体。利用光学方法对单针放电特性进行了研究, 结果表明单针放电等离子体的长度随外加电压峰值、气压的增大而增大, 随空气含量的增大而减小。利用光电倍增管对单针电极放电等离子体羽的发光信号进行了空间分辨测量, 发现靠近单针电极的羽头和等离子体羽其余部分放电行为不同。其中羽头源于针尖附近的电晕放电, 它仅在外加电压负半周期的发光较强, 正半周期发光几乎探测不到。而等离子体羽其余部分的放电在外加电压正、负半周期均存在, 且正半周期强于负半周期。研究表明, 外加电压正半周期的等离子体羽是源于发光光层(等离子体子弹)的传播, 而负半周期等离子体羽的不同位置几乎同时放电。

关键词 光学器件; 等离子体喷枪; 等离子体羽; 电晕放电; 空间分辨测量; 等离子体子弹

中图分类号 O432.1⁺1; O461.2 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.0104001

Light Emission Properties Generated by a Single Electrode Discharge

Li Xuechen Zhao Huanhuan Bao Wenting Chang Yuanyuan

(Key Laboratory of Photo-Electronics Information Materials of Hebei Province, College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding, Hebei 071002, China)

Abstract A stable plasma is generated in argon by using a single needle discharge device. The characteristics of the discharge are investigated by optical methods. Results show that the plasma plume length increases with increasing the peak value of the applied voltage or gas pressure, decreases with increasing the air content. Spatially resolved measurement of light emission is conducted on the plasma plume with photomultiplier tubes. It has been found that the discharge near the needle point has a different behavior with other part of the plasma plume. The discharge in the plasma head originates from a corona discharge which emits light strongly at the negative half cycle, its emission is too weak to be detected in the positive half cycle. The other part of the plasma plume originates from the propagation of luminous cluster (plasma bullet) in the positive half cycle, and every position of which is almost volley in the negative half cycle.

Key words optical devices; plasma jet; plasma plume; corona discharge; spatially resolved measurement; plasma bullet

OCIS codes 350.5400; 040.5250

1 引言

低温非平衡态等离子体具有非常广泛的应用, 例如在医疗领域可用于处理伤口和龋齿^[1-2], 在工业领域和生活领域可用于薄膜沉积^[3]、表面改性^[4]、

杀菌^[5]、光源^[6]和显示^[7]以及军事领域中飞行器的等离子体隐身^[8]等。

从应用角度而言, 如何在大气压下产生一定尺度的均匀放电具有重要意义。这种放电称为大气压

收稿日期: 2013-07-30; **收到修改稿日期**: 2013-08-21

基金项目: 国家自然科学基金(10805013, 51077035)、教育部科学技术研究计划重点项目(210014)、河北省杰出青年基金(A2012201045)、河北省自然科学基金(A2011201132)、河北省教育厅优秀青年项目(T2011120)、河北大学青年基金(2011Q14)

作者简介: 李雪辰(1976—), 男, 博士, 教授, 主要从事气体放电等离子体诊断等方面的研究。

E-mail: plasmalab@126.com

均匀放电,是低温等离子体研究的热点。目前一般采用介质阻挡放电装置产生大气压均匀放电,由于电极间距在大气压下一般很小,使得待处理材料的尺寸也受到限制。相比较而言,等离子体喷枪可以在空气环境中产生一定长度的均匀等离子体羽,从而摆脱了电极间距对待处理材料尺寸的限制。因此关于等离子体喷枪的研究受到了越来越多关注。等离子体喷枪主要有单针电极喷枪^[9-10]、同轴介质阻挡放电喷枪^[11-12]、筒-板介质阻挡放电喷枪^[13]等。Walsh等^[14]提出按照气流方向与电场方向的关系将喷枪分为交叉场喷枪和平行场喷枪。交叉场喷枪的电场与气流方向垂直,而平行场喷枪的电场与气流方向平行。Kogelschatz^[15]对比研究了平行场喷枪和交叉场喷枪的特性,发现平行场喷枪比交叉场喷枪具有更高的化学活性^[16],因此平行场喷枪更有利于应用。

单针电极喷枪属于典型的平行场喷枪。关于单针电极喷枪的研究,始于2004年Kieft等^[17]利用射频激励的单针电极放电,研究发现单针电极喷枪可以在氩气中产生毫米大小的等离子体,并对其在生物医疗领域的应用进行了研究^[1]。2007年Li等^[18]利用单针电极喷枪在氩气中产生了长度达到2 cm的均匀等离子体羽。2009年,Sun等^[19]利用单针电极制作的微等离子体喷枪在氩气中产生了稳定的均匀等离子体。2009年,Xiong等^[20]利用亚微秒脉冲激励氩气中的单针电极喷枪,在空气环境中产生了厘米大小的等离子体羽。目前对喷枪机制进行的研究一般采用增强型电荷耦合器件(ICCD)。利用ICCD研究放电机制,需要具有很好的周期性和一定的时间宽度。提出利用一套光学成像系统来研究氩气喷枪的放电机制,该系统虽然结构简单,但对喷枪放电机理研究具有普适性。2010年,Li等^[21-22]利用该光学系统对单针电极喷枪在空气中产生了2.3 cm的等离子体羽进行了研究。以上研究表明利用单针电极作为喷枪可以在多种气体中产生一定长度的均匀等离子体羽,但关于单针电极喷枪的放电机制还不十分清楚。针对于此,本文采用单针电极放电装置,研究不同参数(电压、气压、空气含量)下的放电特性,并利用光学方法对放电机理进行了研究。

2 实验装置

实验装置如图1所示,其中钨针电极作为高压电极与交流电源(频率为40 kHz)的高压输出端相

连接。钨针长约为6 cm,直径为1 mm,针尖直径约为50 μm 。钨针用绝缘材料固定,针尖部分裸露(此部分钨针长约2 cm),将其放在真空室内。真空室经由阀门与真空泵、氩气和空气相连相通,这样可以达到真空室内需要的气压和空气含量。放电电压通过高压探头(Tektronix P6015A)测量,并利用数字示波器(Tektronix DPO4104)显示和记录。为了分析放电机理,对放电的总发光信号利用光电倍增管(PMT, ET 9085SB)进行了探测。此外,还对放电发光进行了空间分辨测量,放电发光经过凸透镜成等大的像,在像平面利用光阑(光阑开口直径约为1 mm)选择某些位置的发光信号,经过光阑的发光进入PMT转化为电信号,输入数字示波器(Tektronix DPO4104)显示和记录,通过这样的办法可以实现对不同位置发光信号的比较。放电照片用数码相机(Canon EOS 7D)记录和储存,曝光时间为8 ms。

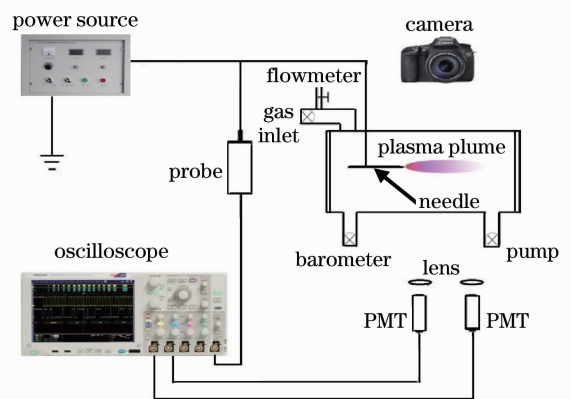


图1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental setup

3 实验结果与讨论

图2给出了氩气单针放电的照片。图2(a)外加电压峰值 U_p 为5.0 kV,仅在针尖附近很小的区域有电晕放电,电晕放电尺寸为几个毫米。随着电压升高,电晕亮度变大,但尺寸几乎不变。当电压增大到一定数值,放电长度突然增大(几个厘米长),为均匀的等离子体羽。图2(b)~(d)为等离子体羽放电的照片。由图2(b)、(c)可以看出当 U_p 较低,等离子体羽中心部分较明亮,而其周围部分较弥散。沿远离针尖距离增大,弥散放电的直径减小。当电压进一步增加,放电等离子体羽开始出现分叉,如图2(d)所示。

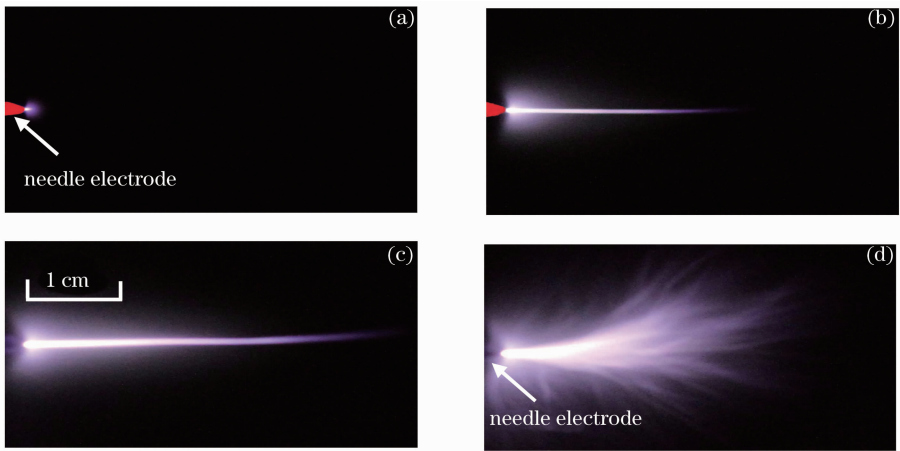


图 2 氩气单针放电照片。(a)电晕放电,(b),(c)和(d)为等离子体羽放电。 U_p 依次为 5.0,6.5,7.8,8.8 kV
 Fig. 2 Discharge images of single needle discharge in argon. (a) Corona discharge, (b), (c) and (d) plasma plume discharge. U_p is 5.0, 6.5, 7.8, 8.8 kV, respectively

从图 2 可以发现,等离子体羽长度随电压的变化而变化。图 3(a)和(b)分别给出了不同气压和不同空气含量下等离子体羽长度随 U_p 的变化关系。从图中可以看出,随 U_p 的增加等离子体羽长度先增加而后减小。其中拐点对应于放电等离子体羽出现分叉,如图 2(d)所示,即在等离子体羽没有出现

分叉前,等离子体羽长度随外加电压增大而增大。图 3 还可以看出,等离子体羽长度随着气压的增加而增加,随着空气含量的增加而减小,其中图 3(a)为纯氩的情况,图 3(b)为一个大气压的情况,1 atm = 1.01×10^5 Pa。

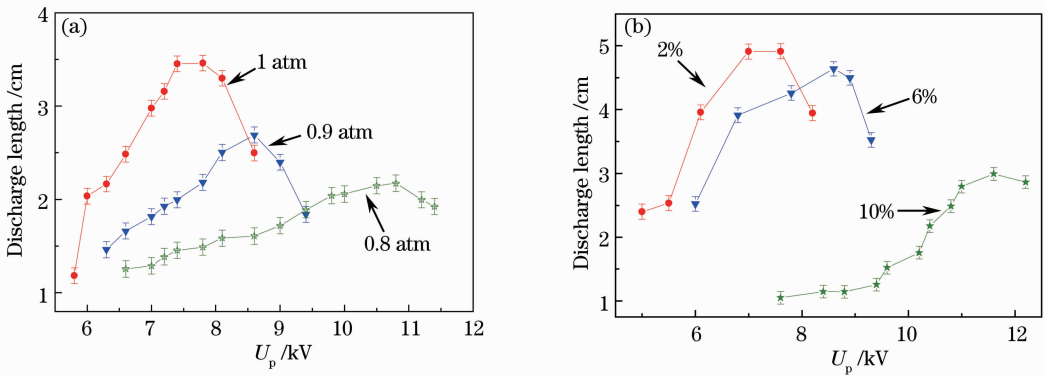


图 3 不同(a)气压和(b)空气含量下的等离子体羽长度随 U_p 的变化关系

Fig. 3 Length of plasma plume as a fraction of U_p under different (a) pressures and (b) air contents

图 4 为不同 U_p 下的外加电压、等离子体羽的总发光信号、等离子体羽头部(针尖附近大约 3 mm 范围内)的发光信号和等离子体羽其余部分的发光信号(即远离针尖 3 mm 外等离子体羽的发光信号),其中图 4(a)、(b)、(c)的 U_p 依次增大,分别为 5.8,6.6,8.0 kV。从图 4 可以看出,外加电压正半周期的放电脉冲(对应总光信号的脉冲)个数随着 U_p 的增大而增多,但不论 U_p 如何变化,负半周期放电脉冲均是两个,其中第一个脉冲宽度较窄而第二个脉冲宽度较大,且第二个脉冲的持续时间随着 U_p 的增大而增大。通过图 4 还可以发现,负半周期第一个脉冲与等离子体羽头部(针尖附近)的发光信号

对应,而负半周期第二个脉冲与等离子体羽其余部分的发光信号对应。由于负半周期第一个窄脉冲只出现于针尖附近,这说明负半周期的第一次放电来自于针尖附近的电晕放电,而负半周期第二个脉冲来源于等离子体羽其他部分的发光信号。正半周期针尖附近的电晕放电发光与负半周期相比不明显,但等离子体羽其余部分脉冲个数随外加电压增大而增多。

如前所述,较低电压下的单电极放电(如 $U_p = 6.2$ kV),等离子体羽其余部分的发光信号正负半周期只有一个放电脉冲。为了研究等离子体羽的放电机理,在 $U_p = 6.2$ kV 时利用 PMT 对正、负半周

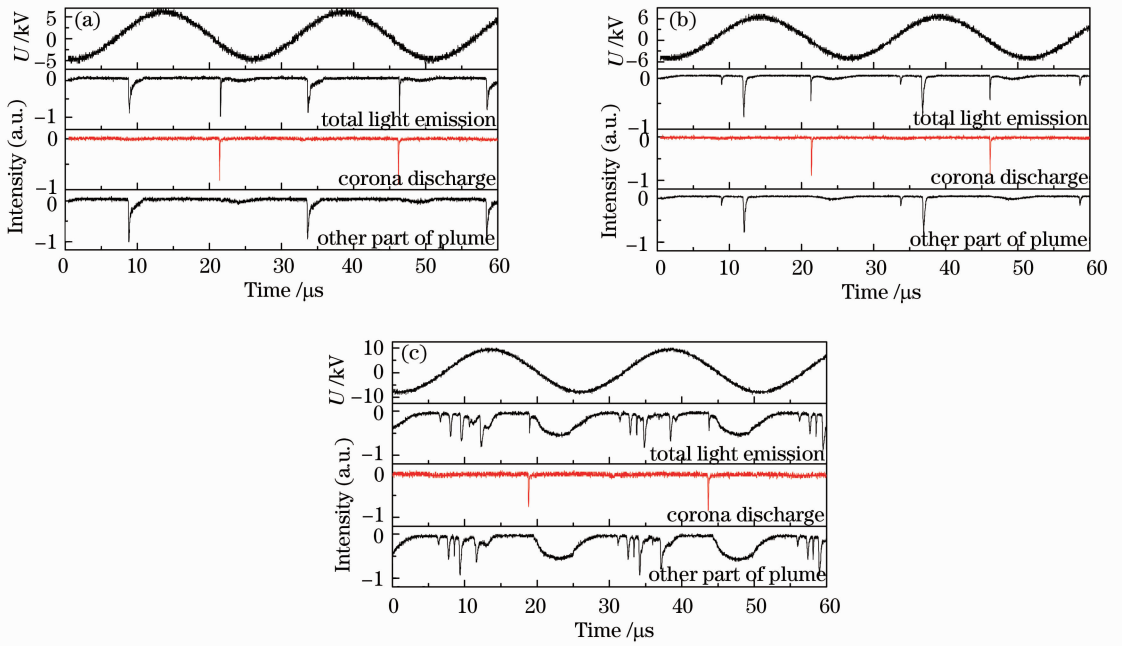


图 4 不同外加电压下电压波形、总光信号、羽头光信号和除羽头外光信号

Fig. 4 Total light emission, light emission from the plasma plume head and light emission from discharge except the plasma plume head under different applied voltages waveform

期,等离子体羽除针尖外不同位置的发光信号进行了空间分辨测量。电压正半周期的测量结果如图 5(a)所示。图中顶端的曲线是等离子体羽其余部分的发光信号,位置 A、B、C、D、E、F 依次远离针尖。其中 A 点对应针尖外 3 mm 的位置,而 \overline{AB} 、 \overline{BC} 、 \overline{CD} 、 \overline{DE} 和 \overline{EF} 距离都是 2 mm。从图可以看出,每个点的放电起始时刻不同,最接近针尖的 A 点最先放电,随着离针尖距离增大,放电延迟也增加。这表明外加电压正半周期,单针放电等离子体羽是以发光光层的形式(等离子体子弹)向远离针尖方向传播,这和文献 [16,23]所报道的氦气等离子体喷枪中的等离子体子弹类似,因此等离子体子弹对应流光传播过程,即空间正

电荷层从针尖向远处的传播,其中光电离对等离子体子弹传播起着重要作用。基于这一理论,当电场达到击穿电场后,引起电子雪崩向着针尖发展,由于电子和离子的迁移速度不同,会在雪崩路径上遗留空间正电荷。这些空间正电荷层的电场会加强初始电子雪崩后方(即电场方向空间电荷层前方)的电场。紫外光离化产生的种子电子在此加强场作用下向着空间正电荷层移动,进入该空间正电荷层并发生复合。因此虽然是电子雪崩逆着电场移动,但其产生的效果却是空间正电荷层沿着电场远离针尖传播。当空间正电荷的电场和外加电场不足以在流光传播前方产生新的电子雪崩,则流光传播过程结束。由于这些空间正电荷的屏

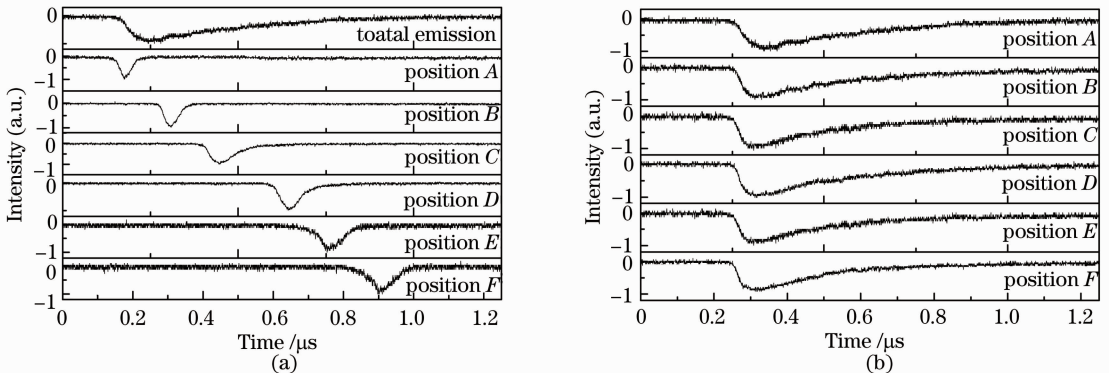


图 5 等离子体羽(a)正、(b)负半周期发光信号的空间分辨测量

Fig. 5 Temporal resolution measurement of the light emissions of the plasma plume (a) in the positive half cycle and (b) in the negative half cycle

蔽作用,针尖到空间正电荷层的电场不能产生新的雪崩过程,因此当流光传播结束后,放电过程结束。随着时间推移,外加电压不断增加,外加电场也不断增加。同时,上次流光遗留的空间正电荷也不断衰减,因此针尖附近的总电场不断增强,当再次达到击穿条件,又会出现一个放电脉冲。所以图4中正半周期脉冲个数随着外加电压增大而增多。图5(a)还表明,不同位置的脉宽不同(放电维持时间不同所造成的),距离针尖越远放电持续时间越长。

利用同样方法对电压负半周期的等离子体其余部分的放电发光进行了空间分辨,结果如图5(b)所示。从图中可以看出,负半周期的放电脉冲几乎同时出现,且脉冲宽度几乎相同。表明电压负半周期的等离子体羽不同位置的放电几乎同时出现同时消失。负半周期放电机制分析如下:正半周期放电会在空间遗留大量活性粒子,这些活性粒子可以释放出电子。因此在负半周期放电开始前,放电空间存在大量种子电子。当电压增加,电场达到击穿值,则许多小电子雪崩同时从不同位置向着远离针尖发展,而正离子向着针尖移动。针尖附近是强场区,经过这个区域加速,正离子具有足够能量轰击阴极产生二次电子发射。这些二次电子引发新的电子雪崩维持放电,使得负半周期放电可以持续几个微秒。

4 结 论

利用光学方法对氩气单针放电的特性进行了研究。发现随着外加电压增大,单电极放电从外貌上可以分成低电压下的电晕放电和高电压下的等离子体羽放电。重点对等离子体羽模式的放电特性进行了研究。等离子体羽长度随着 U_p 和气压的增加而增大,随着空气含量的增加而减小。利用PMT对等离子体羽发光信号进行了空间分辨测量。发现针尖附近和等离子体羽其余部分的放电形式不同。进一步的分析发现,除去针尖附近的电晕放电外,等离子体羽其余部分正半周期是以等离子体子弹从针尖向远处传播,而外加电压负半周期等离子体羽不同位置几乎同时放电。

参 考 文 献

- 1 E Stoffels, I E Kieft, R E J Sladek, *et al.*. Plasma needle for in vivo medical treatment: recent developments and perspectives [J]. *Plasma Sources Sci Technol*, 2006, 15(4): S169-S180.
- 2 E Stoffels, A Y Gonzalvo, T D Whitmore, *et al.*. A plasma needle generates nitric oxide [J]. *Plasma Sources Sci Technol*, 2006, 15(3): 501-506.
- 3 J Kim, D Byun, J S Kim, *et al.*. Low-temperature growth of

- GaN by atomic nitrogen based on a dielectric barrier discharge [J]. *J Crystal Growth*, 2000, 210(4): 478-486.
- 4 G Nicolas, M Steve, M Françoise. A new approach to SiO₂ deposit using a N₂-SiH₄-N₂O glow dielectric barrier-controlled discharge at atmospheric pressure [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2000, 33(19): L104-L108.
- 5 M G Kong, G Kroesen, G Morfill, *et al.*. Plasma medicine: an introductory review [J]. *New J Phys*, 2009, 11(11): 115012.
- 6 H Y Luo, Z Liang, B Lü, *et al.*. Observation of the transition from a Townsend discharge to a glow discharge in helium at atmospheric pressure [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(22): 221504.
- 7 H S Uhm, E H Choi, Y Lim. Secondary electron emission in a mixed gas for application to the plasma display panel [J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(5): 737-739.
- 8 K Takaki, M Hosokawa, T Sasaki, *et al.*. Production of atmospheric-pressure glow discharge in nitrogen using needle-array electrode [J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 86(15): 151501.
- 9 P D Park, S K Dhali. Generation of atmospheric pressure plasma with a dual-chamber discharge [J]. *Appl Phys Lett*, 2000, 77(14): 2112-2114.
- 10 B Qi, C S Ren, D Z Wang, *et al.*. Uniform glow like plasma source assisted by preionization of spark in ambient air at atmospheric pressure [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 89(13): 131503.
- 11 S Kiriu, M Hiroyuki, T Fumitoshi, *et al.*. Development of a dielectric-barrier discharge enhanced microplasma jet [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(19): 191502.
- 12 J Tang, S Li, W Zhao, *et al.*. Development of a stable dielectric-barrier discharge enhanced laminar plasma jet generated at atmospheric pressure [J]. *Appl Phys Lett*, 2012, 100(25): 253505.
- 13 J L Walsh, F Iza, N B Janson, *et al.*. Three distinct modes in a cold atmospheric pressure plasma jet [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2010, 43(7): 075201.
- 14 J L Walsh, M G Kong. Contrasting characteristics of linear-field and cross-field atmospheric plasma jets [J]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93(11): 111501.
- 15 U Kogelschatz. Filamentary, patterned, and diffuse barrier discharges [J]. *IEEE Trans Plasma Sci*, 2002, 30(4): 1400-1408.
- 16 J J Shi, F C Zhong, J Zhang, *et al.*. A hypersonic plasma bullet train traveling in an atmospheric dielectric-barrier discharge jet [J]. *Phys Plasmas*, 2008, 15(1): 013504.
- 17 I E Kieft, E P Laan, E Stoffels. Electrical and optical characterization of the plasma needle [J]. *New J Phys*, 2004, 6(1): 149.
- 18 X C Li, L F Dong, N Zhao, *et al.*. A simple device of generating glow discharge plasma in atmospheric pressure argon [J]. *Appl Phys Lett*, 2007, 91(16): 161507.
- 19 J K Sun, T H Chung, S H Bae, *et al.*. Bacterial inactivation using atmospheric pressure single pin electrode microplasma jet with a ground ring [J]. *Appl Phys Lett*, 2009, 94(14): 141502.
- 20 Q Xiong, X Lu, K Ostrikov, *et al.*. Length control of He atmospheric plasma jet plumes: effects of discharge parameters and ambient air [J]. *Phys Plasmas*, 2009, 16(4): 043505.
- 21 X C Li, N Yuan, P Y Jia, *et al.*. A plasma needle for generating homogeneous discharge in atmospheric pressure air [J]. *Phys Plasmas*, 2010, 17(9): 093504.
- 22 Li Xuechen, Yuan Ning, Jia Pengying, *et al.*. Characteristics of atmospheric pressure air uniform discharge generated by a plasma needle [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(12): 125204.
- 李雪辰,袁宁,贾鹏英,等.大气压等离子体针产生空气均匀放电特性研究[J]. *物理学报*, 2011, 60(12): 125204.
- 23 E Karakas, M Koklu, M Laroussi. Correlation between helium mole fraction and plasma bullet propagation in low temperature plasma jet [J]. *J Phys D: Appl Phys*, 2010, 43(15): 155202.