

文章编号: 1000-7032(2018)10-1405-05

利用光学方法研究单针射流等离子体的产生和发展机制

李永辉^{1*}, 甘延标¹, 董丽芳²

(1. 北华航天工业学院 基础部, 河北 廊坊 065000; 2. 河北大学 物理科学与技术学院, 河北 保定 071002)

摘要: 对单针电极射流等离子体产生和发展过程中的光信号进行了研究。首先发现等离子体的长度并不是随外加电压升高而增加,而是和驱动电源的能量在正半周放电脉冲之间的分配有关。通过研究等离子体通道内不同位置的发光信号,发现正半周期第一次放电脉冲是在针尖电极处产生,而第二个脉冲是在等离子体通道中部产生,电子激发温度也是在等离子体中部达到最高。通过分析发现,空间电荷产生的附加电场对于等离子体的产生和发展有着重大影响。

关键词: 射流等离子体; 单针电极; 电子激发温度; 空间电荷

中图分类号: O461.2 文献标识码: A DOI: 10.3788/fgxb20183910.1405

Optical Investigation on Generation and Propagation of Single Needle Plasma Jet

LI Yong-hui^{1*}, GAN Yan-biao¹, DONG Li-fang²

(1. Department of Basic Science, North China Institute of Aerospace Engineering, Langfang 065000, China;

2. College of Physics Science and Technology, Hebei University, Baoding 071002, China)

* Corresponding Author, E-mail: liy_hui@163.com

Abstract: The light signal in the generation and propagation of plasma jet produced by the single needle electrode was studied. It is found that the length of plasma jet does not increase with the applied voltage, but relates to the distribution of energy between pulse discharges (PD) in the positive half-cycle. The first PD is produced at the needle electrode, the second PD is produced in the middle of plasma channel where the electron excitation temperature reaches its highest value. We conclude that the additional electric field generated by space charge has great influence on the generation and development of plasma jet.

Key words: plasma jet; single needle electrode; electronic excitation temperature; space charge

1 引 言

大气压射流等离子体具有化学活性高、温度低等特点,并且可以将产生的等离子体直接喷射

到空气当中,摆脱了放电电极结构的限制,因此近年来受到广泛关注。产生大气压射流等离子体的装置很多,例如单针电极、针-板电极、针-筒电极、同轴电极等^[1-3]。其中单针电极因结构简单、外

收稿日期: 2018-01-20; 修订日期: 2018-03-22

基金项目: 国家自然科学基金(11602162, 11875001); 河北省自然科学基金(A2017409014); 河北省教育厅重点项目(ZD2017001); 河北省人才工程培养经费(A201500111); 北华航天工业学院博士基金(BKY-2015-05)资助项目
Supported by National Natural Science Foundation of China(11602162, 11875001); Hebei Natural Science Foundation(A2017409014); Key Project of Hebei Education Department(ZD2017001); Training Funds for Talent Engineering of Hebei Province(A201500111); Doctoral Fund of Beihua Institute of Aerospace Technology(BKY-2015-05)

加电场方向和气流方向一致、更容易产生大尺度的等离子体而备受关注。另外单针电极的曲率比较大,可以在较低的电场下得到缓慢发展的电子崩,从而获得高电子密度的等离子体。2007年,韩国的 Hong 等利用空心针电极在介质管内得到了 60 cm 长的射流等离子体,并且利用喷出的等离子体对老鼠组织进行了处理^[4]。2007年, Li 在大气压氩气中利用单针电极实现了辉光放电^[5], 2009年,卢新培利用脉冲电源激励的空心针电极在开放的空气中得到射流等离子体^[6], 2011年,李雪辰小组利用单针电极在大气压空气中产生了均匀放电^[7]。2016年,本小组利用单针电极在介质管内得到了上百厘米的射流等离子体^[8]。可见,单针电极对于实现大尺度均匀放电具有一定的优势。一般认为射流放电等离子体是以“等离子子弹”^[9-10]的方式向前传播,等离子子弹其实是放电通道内电子崩头部向前传播所形成,因此射流等离子体的长度主要是由电子崩头部的能量决定。本工作利用光学方法研究了单针放电射流等离子体的传播机制,发现放电通道内的电子崩所形成的空间电荷不仅影响等离子体的长度,而且影响着二次放电甚至三次放电的产生。

2 实验装置

实验装置如图 1 所示,其主体为一根内径 0.7 mm、外径 0.8 mm 的空心针管,针管与交流高压电源的输出端连接,工作气体为氩气,从空心针管喷出参与放电。高压电源能够输出交流电的频率 40 ~ 60 kHz(可调),输出电压幅值 0 ~ 15 kV(可调)。电源输出电压由高压探头(Tektronix P6015A 1000X)分压后,连接示波器(Agilent, DSO6054A, 500 MHz)测量记录,另外放电光信号由光电倍增管(PMT:滨松 H7826)采集,通过示波器记录存储,

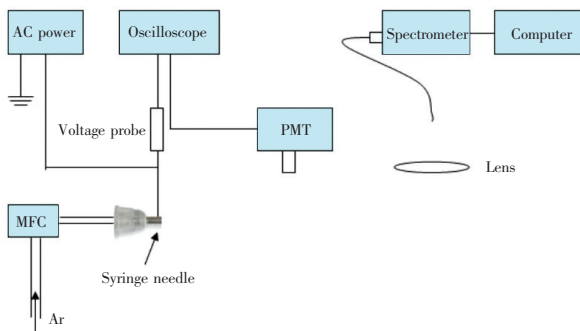


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experiment setup

放电发射光谱通过 CCD 光谱仪采集(ACTON SP2750),连接电脑存储记录。

3 结果与讨论

3.1 等离子长度与外加电压的关系

影响等离子体长度的因素很多,例如电极结构、外加电压、气流等。本文主要研究了外加驱动电压对等离子体长度的影响。随着驱动电压的升高,放电通道内电子崩头的能量应越高,等离子体的长度也应该越长,但是实验中发现,等离子体长度与外加电压并不是简单的线性关系。固定气体流量为 0.4 L/min(对于本装置,该流速为层流状态),外加电压频率固定为 50 kHz,逐渐升高电压,等离子长度与外加电压关系如图 2 所示。电压较低的情况下(8 ~ 9.3 kV),放电只在针尖周围发生,等离子体长度约为 1.75 cm。随着电压升高,等离子长度略有增加。当外加电压升高到 9.9 kV 时,等离子体长度迅速增加到约 3.25 cm,随着电压继续升高到 10.4 kV,等离子体长度逐渐增加到 3.3 cm。但是当电压升高到 10.6 kV 时,等离子体长度突然缩短。电压继续升高等离子体长度又开始增加。但是升高电压到 11.4 kV 之后,随着电压增加等离子体长度逐渐变短。可见等离子体长度并不是单纯地随着电压的升高而增加,在有些情况下,虽然外加电压增加,但是等离子体的长度反而变短了。

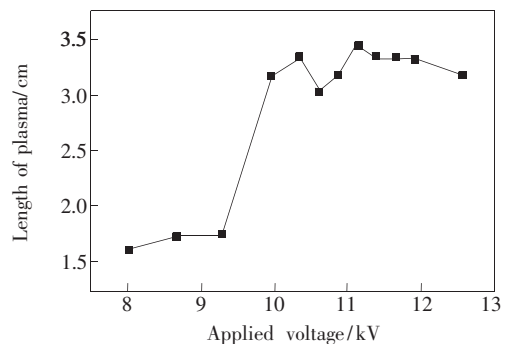


图 2 等离子体长度与外加电压幅值的关系

Fig. 2 Plasma jet length with different applied voltage

为了澄清在升高电压的过程中等离子体长度的变化机制,我们利用光电倍增管采集了不同电压下的等离子体发光信号,如图 3 所示。从图中可见,当电压较低时(8 ~ 9.3 kV),在外加电压的正负半周各有一次放电,正半周放电光信号明显,而且相邻正半周信号长短交替,为“倍周期”模

式。当电压升高到 9.9 kV, 正半周放电脉冲数增加为两个, 而且第一个光信号强度增加, 该电压下我们观察到等离子体长度突然增加。当电压继续升高到 10.6 kV 时, 正半周第一个光信号强度逐渐减小, 第二个光信号强度增加, 此时我们观察到的等离子体长度逐渐减小。随着电压继续升高, 第一个光信号强度增加, 观察到的等离子体长度也逐

渐增加。电压继续升高到 11.4 kV, 从光信号可以看出, 在正半周出现第三个放电脉冲, 等离子体长度略有下降, 随电压继续升高, 第三个脉冲光信号逐渐增加, 我们观察到的等离子体长度逐渐减小。综上所述, 等离子体长度与外加电压不是单纯的线性关系, 等离子体长度与正半周放电脉冲数目有关, 另外还与能量在放电脉冲之间的分配有关。

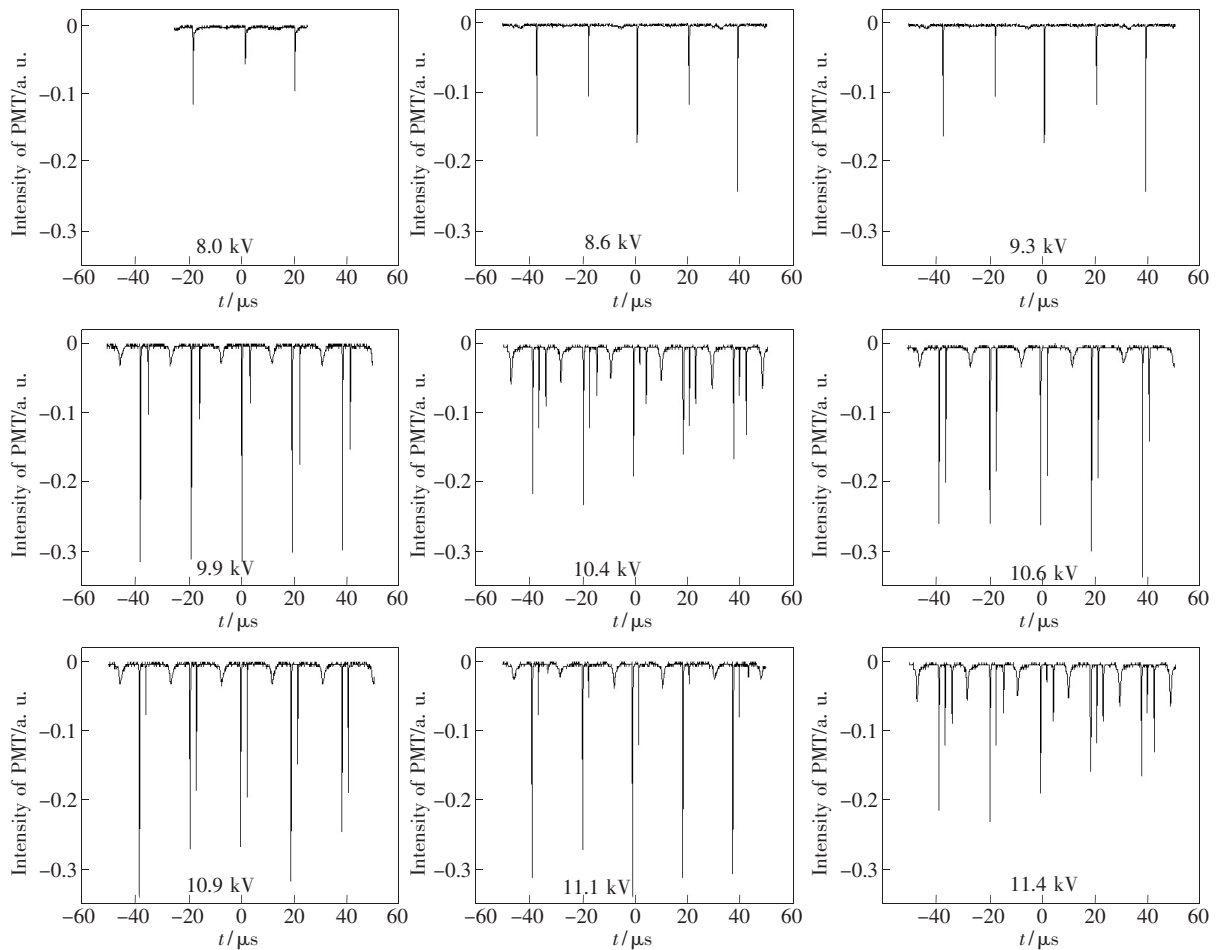


图 3 不同外加电压下等离子体的发光信号, 外加电压频率都为 50 kHz。

Fig. 3 Light emission of plasma with different applied voltage, the frequency of applied voltage is 50 kHz.

3.2 等离子体光信号的空间分布

随着电压升高, 在外加电压的正半周会出现多个放电脉冲, 脉冲之间相互作用, 影响着等离子体的产生和向前发展机制。为了研究脉冲之间的相互作用, 我们测量了等离子体通道内不同位置的光信号。我们自制了一个圆柱形光阑, 在筒的底部开一个 1.5 mm 宽的竖直狭缝, 然后将光阑套装在光电倍增管上。将发光等离子体利用凸透镜成一个放大的实像, 然后将光电倍增管摆放在实像所在平面的位置, 移动倍增管的位置, 等离子体内不同位置的光信号就可以进入到倍增管当

中, 经过示波器记录存储。本实验分析了正半周有两个放电脉冲的情况, 不同位置的光信号如图 4 所示。从图 4 中可以看出, 负半周只有一个脉冲, 负半周脉冲强度沿着等离子体轴向逐渐减弱, 在 3.0 cm、3.5 cm 处, 负半周脉冲消失。正半周放电包含有两个脉冲, 这两个脉冲有明显的区别。第一个脉冲在针尖位置产生, 沿着等离子体轴向, 脉冲强度逐渐增大, 到达 2.0 cm 处, 强度达到最大值, 然后脉冲强度逐渐减小, 在 3.5 cm 处, 脉冲消失。第二个脉冲并不是在针尖处产生, 而是在距离针尖 1.5 cm 处开始出现, 沿着等离子体轴

向,脉冲强度逐渐增大,到达 3.0 cm 处,强度达到最大值,然后减小。可见正半周第二个放电脉冲

并不是从针尖电极处开始产生,而是在等离子体通道内某个位置产生。

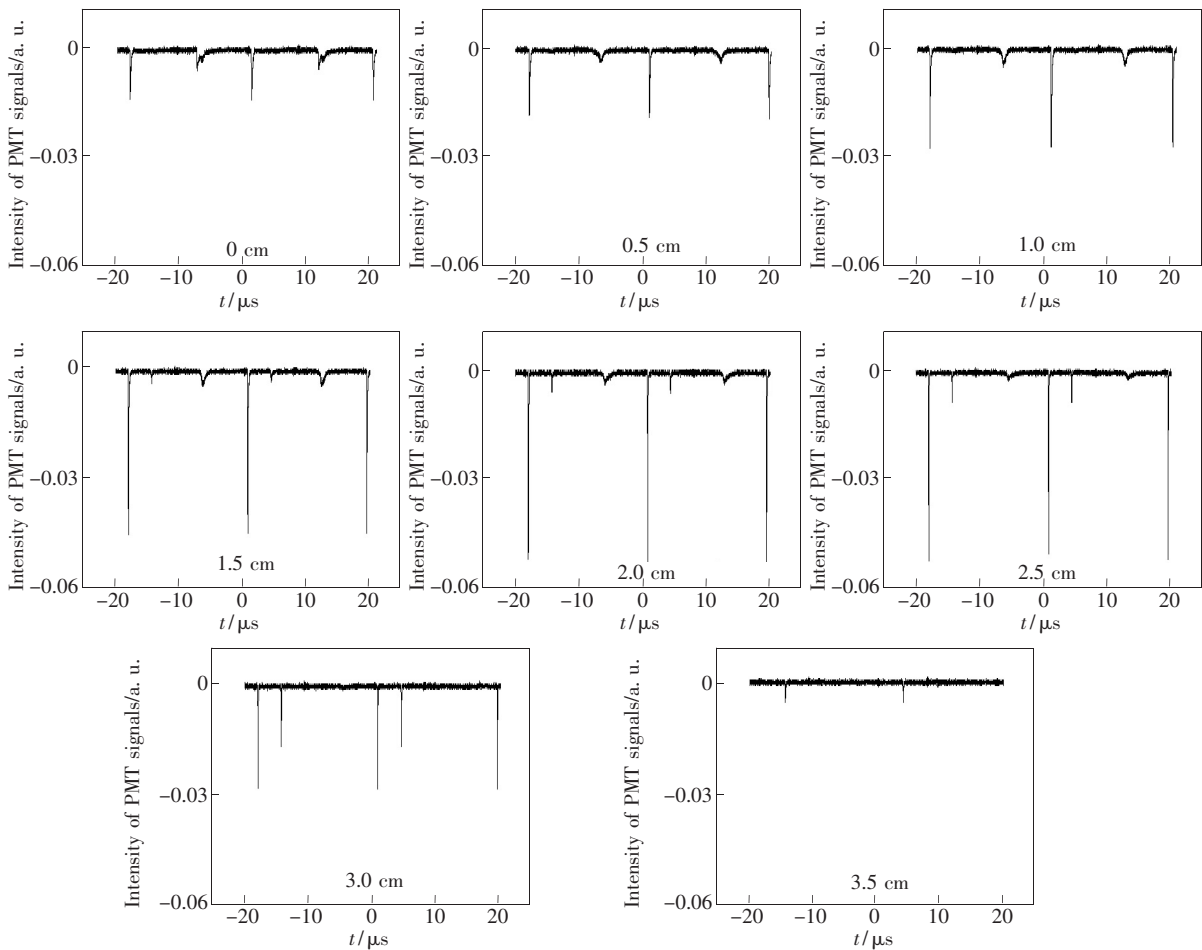


图 4 等离子体通道内不同位置的光信号

Fig. 4 Signals of PMT at different positions along the plasma jet

3.3 电子激发温度的空间分布

电子激发温度是等离子体的一个重要物理参量。本实验中采集到的光谱主要为氮分子第二正带谱线(300 ~ 400 nm)和氩原子谱线(600 ~ 800 nm)。我们利用氩原子 763 nm 和 772 nm 两条谱线强度比计算了电子激发温度,进一步研究了电子激发温度沿着等离子体轴向的空间分布。电子激发温度的空间分布情况如图 5 所示。在针尖位置电子激发温度约 1 900 K,沿着等离子体轴向,电子激发温度逐渐升高,在等离子体中部达到最高约 2 500 K,然后电子激发温度逐渐降低,在等离子体尾部达到最小约 1 750 K。在本装置放电中,负半周放电发光微弱,因此光谱仪采集的光谱主要反映的是正半周放电的情况。同理,我们得到的电子激发温度反映的也是正半周放电的情况。电子激发温度代表着电子能量的高低,在正半周放电中,电子能量在等离子体中部达到最大,而不是在针电极附近。

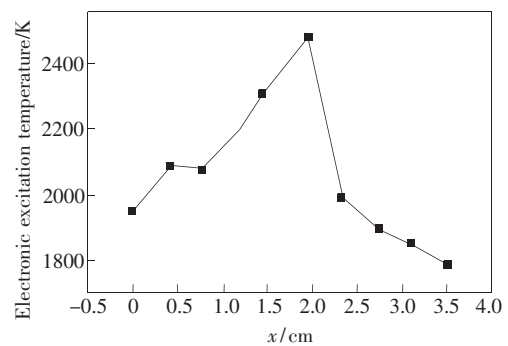


图 5 等离子体内电子激发温度的空间分布情况

Fig. 5 Distribution of electron excited temperature along the plasma jet

在单针电极系统中,由于缺少了壁电荷的影响,电子激发温度主要受到外加电场和空间电荷形成的附加电场的影响。在外加电压的正半周,针电极为阳极,随着电压升高,针尖附近的气体被电离,电子向着阳极移动,最终被金属的针电极吸收。正离子

由于质量大,移动速度慢,在针电极附近就会积累形成正极性的空间电荷。在远离针电极的区域,此时外加电场的方向与空间电荷所形成附加电场的方向是一致的,所以可以促进放电继续向前发展,因此电子激发温度也逐渐升高。但是随着距离针电极的距离增大,外加电场会逐渐减小,最终外加电场和空间电荷附加电场形成的叠加场也会逐渐减小,因此电子激发温度也会逐渐降低。随着第一次放电的向前发展,空间就会积累正的空间电荷。在针电极和积累的空间电荷之间的区域,外加电场方向与空间电荷形成的附加电场的方向是相反的,因此在这个区域,净电场会减小。在远离针电极的区域,外加电场和空间电荷形成的附加电场方向一致,随着外加驱动电压的升高,在这个区域就可以形成二次放电,甚至三次放电。

4 结 论

本实验研究了单针射流等离子体的产生和发展机制,在射流等离子体发展过程中,空间电荷有着重要的作用,空间净电场由外加电场和空间电荷产生的附加电场共同决定。在靠近针电极的区域,空间电荷限制了放电的再次发生,而在远离针电极的区域,空间电荷促进了二次放电甚至三次放电的产生。外加驱动电源输入能量在多次放电脉冲之间进行分配,这也导致了等离子体的长度并不是简单地随外加电压升高而增长。由此可见,空间电荷对于等离子体的空间电场、电子激发温度以及新的放电的产生有着重要的影响,通过研究改变空间电荷分布,对于实现大尺度等离子体有着重要的意义。

参 考 文 献:

- [1] PEI X, LIU J, XIAN Y, *et al.*. A battery-operated atmospheric-pressure plasma wand for biomedical applications [J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2014, 47(14):145204-1-6.
- [2] 董丽芳, 李永辉. 大气压氩气射流等离子体放电发展速度研究 [J]. *发光学报*, 2014, 35(4):476-480.
DONG L F, LI Y H. Propagation velocity in hollow needle to plate discharge [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2014, 35(4):476-480. (in Chinese)
- [3] XIONG Q, LU X, OSTRIKOV K, *et al.*. Length control of He atmospheric plasma jet plumes: effects of discharge parameters and ambient air [J]. *Phys. Plasmas*, 2009, 16:043505-1-6.
- [4] HONG Y C, CHO S C, KIM J H, *et al.*. A long plasma column in a flexible tube at atmospheric pressure [J]. *Phys. Plasmas*, 2007, 14:074502/1-5.
- [5] LI X C, DONG L F, ZHAO N, *et al.*. A simple device of generating glow discharge plasma in atmospheric pressure argon [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91:161507-1-3.
- [6] LU X, XIONG Z, ZHAO F, *et al.*. A simple atmospheric pressure room-temperature air plasma needle device for biomedical applications [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009, 95:181501-1-3.
- [7] LI X C, YUAN N, JIA P Y. A plasma needle for generating homogeneous discharge in atmospheric pressure air [J]. *Phys. Plasmas*, 2010, 17:093504-1-5.
- [8] 李永辉, 董丽芳, 甘廷标. 超长射流等离子体在介质管内的传播机制 [J]. *发光学报*, 2016, 37(5):597-602.
LI Y H, DONG L F, GAN Y B. Propagation mechanism of super long plasma jet in the dielectric tube [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(5):597-602. (in Chinese)
- [9] KIM S J, CHUNG T H, BAE S H. Striation and plasma bullet propagation in an atmospheric pressure plasma jet [J]. *Phys. Plasmas*, 2010, 17:053504-1-5.
- [10] SHI J J, ZHONG F C, ZHANG J, *et al.*. A hypersonic plasma bullet train traveling in an atmospheric dielectric-barrier discharge jet [J]. *Phys. Plasmas*, 2008, 15:013504-1-5.



李永辉(1978 -),男,河北定州人,博士,副教授,2015年于河北大学获得博士学位,主要从事放电等离子体光谱诊断方面的研究。

E-mail: liy_hui@163.com