

大气压等离子体针产生空气均匀放电特性研究*

李雪辰[†] 袁宁 贾鹏英 常媛媛 嵇亚飞

(河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

(2011年1月26日收到; 2011年7月18日收到修改稿)

大气压空气放电由于脱离了真空装置, 易于实现流水线生产, 因而在工业上具有广泛的应用. 采用等离子体针装置在空气中产生了稳定的大气压均匀放电. 利用光谱法对等离子体的相关参数进行了空间分辨率测量, 并通过光学方法对放电机理进行了研究. 结果表明, 等离子体针产生的放电存在电晕放电和等离子体羽放电两种模式. 在稳定的等离子体羽放电模式中, 发光分为强光区和弱光区. 弱光区放电的发展速度远大于强光区的发展速度, 电子能量和电子密度均是弱光区比强光区大. 对均匀放电的气体温度和振动温度的研究表明, 强光区放电遵循汤生击穿机理而弱光区为流光放电. 这些结果对大气压空气放电的工业应用具有重要意义.

关键词: 大气压均匀放电, 等离子体针, 发射光谱, 放电机理

PACS: 52.80.Hc, 52.80.Mg, 52.80.Tn

1. 引言

气体放电产生的低温等离子体具有非常广泛的应用, 例如在工业领域中用于薄膜生长、臭氧合成, 在环境保护领域中用于尾气处理、废气的脱硫脱氮, 在生物医疗领域中用于伤口杀菌消毒, 在光源与显示领域可制作等离子体灯、等离子体显示器、气体激光器等^[1-3], 在军事领域中可用于飞行器隐身^[4]、毒气(如芥子气)处理等. 大气压均匀放电与低气压放电相比具有操作简单、消耗低、无需真空装置等优势, 因此近年来该领域的研究备受瞩目. 特别是在文献[1]报道了氦气中的大气压均匀放电之后, 大气压均匀放电已成为低温等离子体研究的一个热点. 目前利用介质阻挡放电装置在惰性气体中已实现了大气压均匀放电, Luo等^[2]利用快照方法观察到了汤生放电到辉光放电的转化.

相比较而言, 空气中的均匀放电更具有应用价值. 2005年Staack等^[5]利用针板放电装置, 采用直流电源激励在间距3 mm的气隙中实现了大气压空气均匀放电. 研究发现该放电属于反常辉光模式, 增大电流或者气隙后放电都会过渡到弧光放电. 同年, Machala等^[6]利用相距5 mm的铂针作为直流放

电电极, 通过微波等离子体炬预热空气到2000 K后吹入放电区, 从而在气流方向产生了大气压空气均匀放电. 为了阻止均匀放电过渡到弧光放电, 2008年Staack等^[7]将针板放电装置的气隙减小到400 μm , 分别在氦气、氩气、氮气和空气中实现了大气压直流均匀放电. 2008年Machala等^[8]利用气隙为6 mm的针板放电装置研究直流大气压空气放电, 发现放电有流光电晕模式、火花放电模式, 在特定的负载电阻下放电甚至可以出现无脉冲的辉光放电模式. 以上研究表明, 只有在特定条件下才能产生直流激励大气压空气均匀放电, 条件变化后很容易过渡到火花放电或者弧光放电. 为了阻止辉光放电到弧光放电的过渡, 2005年Takaki等^[9]采用针阵列-平板电极放电装置, 利用10 ns上升时间的脉冲高压激励大气压氮气放电, 由于大量流光同时出现阻止了辉光到弧光的过渡, 在1 cm的气隙中产生了大气压均匀放电. Stoffels^[10]制作了针放电装置, 该放电针利用射频激励能在氦气中产生长度为若干毫米的大气压均匀等离子体. 2009年, 卢新培等^[11]利用亚微秒脉冲激励针放电产生了大气压空气等离子体, 并对其在生物医疗领域的应用开展了一定的探索.

上述方法产生的大气压空气均匀等离子体的

* 国家自然科学基金(批准号:10805013, 51077035)、教育部科学技术研究计划重点项目(批准号:210014)和河北省自然科学基金(批准号:A2009000149)资助的课题.

[†] E-mail: plasmalab@126.com

长度一般仅为若干毫米. 本文采用特殊的等离子体针在开放空气中产生了长达若干厘米的均匀放电, 在不同外加电压峰值下等离子体长度会发生变化. 通过对外加电压和放电发光信号进行分析, 并对等离子体羽的电子温度和气体温度等参数的空间分布进行测量, 探讨了等离子体针两种放电模式的产生机理.

2. 实验装置

图 1 所示为放电实验装置. 作为放电电极的等离子体针由金属钨制作而成, 钨针长度为 6 cm, 直径为 1.5 mm, 针尖半径大约为 100 μm . 高压电源产生 40 kHz 的正弦信号输出, 该高压输出接入等离子体针. 为防止高电压下整根针附近产生电晕放电, 可以在等离子体针表面覆上一层玻璃, 这样只有针的两端裸露. 等离子体针用一块橡皮固定, 针尖到橡皮的距离是 4 cm.

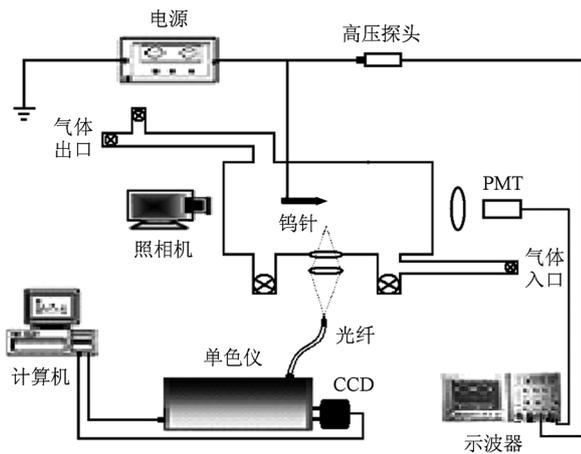


图 1 实验装置示意图

利用美国泰克公司生产的 P6015A 型高压探头来测量等离子体针上的电压, 并用泰克公司生产的采样频率为 500 MHz 的 DPO4054 型示波器来存储. 用 Konica 公司生产的 Minolta Dimage Z2 型相机拍摄放电照片, 该相机具有 420 万像素, 拍摄曝光时间为 8 ms. 为了实现空间分辨率测量, 利用透镜对放电进行成像, 通过移动像平面处的光阑实现对不同位置处的发光进行测量. 通过光阑的发光信号可以输入 RCA7265 型光电倍增管并利用示波器记录, 也可以输入美国 Princeton 仪器公司生产的 ACTON SP2785 型光栅光谱仪进行光谱测量.

3. 实验结果及讨论

图 2 所示为不同电压峰值 U_p 下的放电照片. 从图 2 可以看出, 当 U_p 刚达到击穿电压时放电发生在针尖附近的很小区域. 当增大外加电压时, 放电的尺度和亮度均随之增大. 当 $U_p > 9500$ V 时, 放电尺度突然变大. 放电类似于等离子体喷枪中的等离子体羽. 该放电可分为以下两个区域: 针尖附近发光较亮的区域(强光区)和远离针尖发光较暗的区域(弱光区). 继续增加 U_p , 等离子体羽长度和强光区的长度也随之变大, 如图 2(d) 所示. 由此可知, 不同电压下等离子体针放电分为 $U_p \leq 9500$ V 的电晕放电模式和 $U_p > 9500$ V 的等离子体羽放电模式. 当放电从电晕模式过渡到等离子体羽模式时, 放电等离子体长度会发生突变.

对应图 2(a)–(d) 的外加电压和放电发光信号波形如图 3 所示, 可见不同电压下的发光信号也不同. 图 3(a), (b) 对应的是电晕放电模式, 它的发光信号由一些窄脉冲组成. 当外加电压峰值刚刚达到击穿电压时, 一个周期内仅有一个放电脉冲而且是发生在外加电压负半周期的上升沿. 当增加外加电压时, 放电脉冲数也随之增加, 而且在外加电压的正半周期出现了微弱的光信号. 图 3(c) 对应等离子体羽模式, 显见正半周期出现了持续时间 t 分别为 7 和 3 μs 的两个宽脉冲, 负半周期出现一个持续时间 t 为 7 μs 的宽脉冲. 继续增大外加电压, 放电在外加电压的正负半周期均出现了许多脉冲.

由上述电压和发光信号的波形可以对放电机理加以分析. 在电晕放电模式中, 针尖附近是强电场区域, 其他位置的电场都很弱, 电离和激发只能发生在强电场区. 在这种放电模式中, 放电脉冲宽度约为几十纳秒, 由于放电时间很短, 所以可以认为正离子不动. 在外加电压的负半周期, 电子向远离针尖的方向运动到弱场区后迁移速度变慢. 这些滞留在强场区的正离子及弱场区的电子构成空间电荷. 空间电荷的电场将使得强场区总电场减小, 若此电场低于一定的数值则放电熄灭, 所以放电的光信号是窄脉冲. 当外加电压峰值足够高时, 在外加电压负半周期产生的电子将在外加电压正半周期向针尖移动, 在此过程中产生激发和电离, 因此当外加电压峰值达到一定值时也可以在外加电压正半周期采集到微弱的光信号.

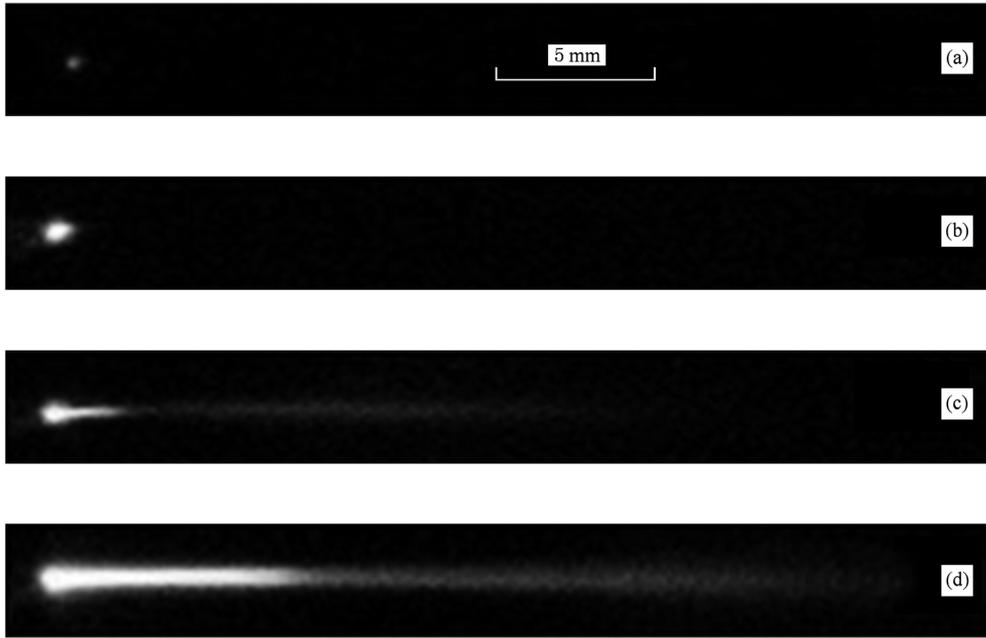


图2 不同外加电压峰值下的放电照片 (a) $U_p = 4.4$ kV, (b) $U_p = 6$ kV, (c) $U_p = 10$ kV, (d) $U_p = 16.5$ kV

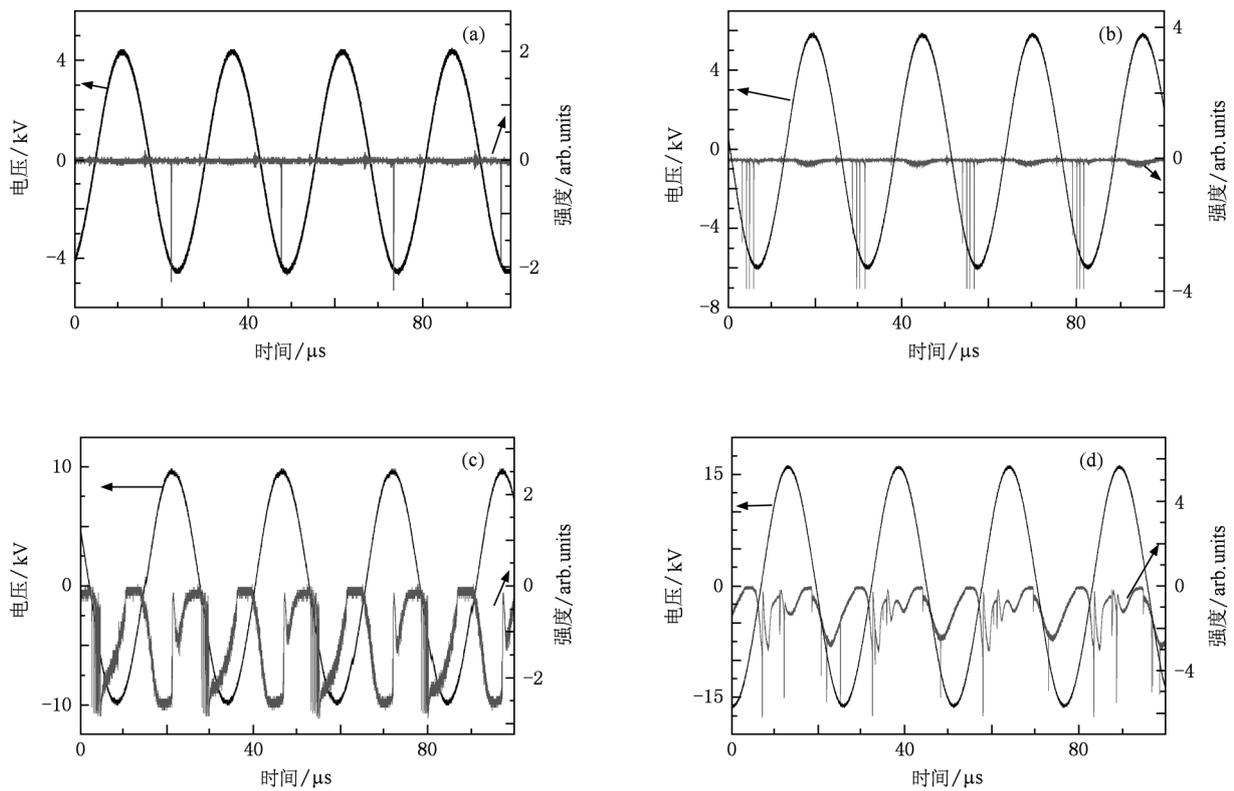


图3 不同 U_p 下的电压和发光信号波形 (a) $U_p = 4.4$ kV, (b) $U_p = 6$ kV, (c) $U_p = 10$ kV, (d) $U_p = 16.5$ kV

为了分析等离子体羽的放电机理,对 $U_p = 15$ kV 产生的等离子体羽不同位置的发光信号进行了测量,所得结果如图 4 所示. 本文关于等离子体羽

空间分辨率测量均是对应 $U_p = 15$ kV. 从图 4 可以看出:强光区和弱光区的光信号是不同的. 强光区的光信号是正负半周期宽度为若干微秒的脉冲;弱

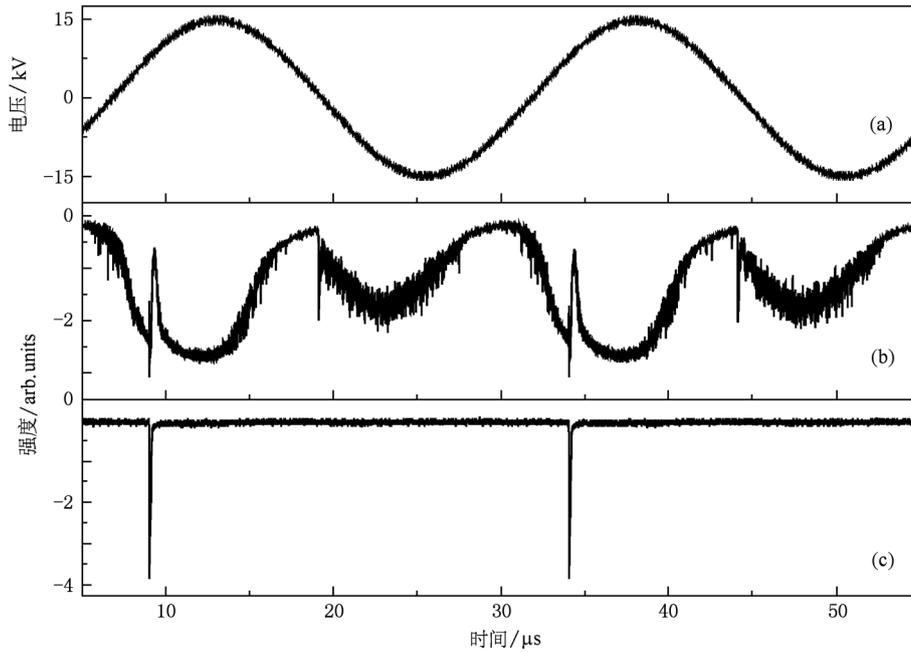


图4 外加电压及强光区和弱光区的放电发光信号波形 (a)外加电压信号,(b)强光区发光信号,(c)弱光区发光信号

光区的光信号仅出现在外加电压的正半周期,并且放电脉冲宽度很窄,约为 160 ns. 窄脉冲类似于空气介质阻挡放电的光信号,说明弱光区的放电与空气介质阻挡放电机理类似,属于流光放电. 强光区和弱光区光信号的不同表明这两个区域放电机理不同. 强光区遵循汤生放电机理而弱光区为流光放电机理. 对此可以分析如下:由于针尖附近强光区的电场比较强,根据汤生击穿机理,在外加电压负半周期正离子经过该强场区加速能够轰击针尖产生二次电子发射,从而维持针尖附近的放电. 而外加电压正半周期,上半周遗留的电子或者放电光电离产生的电子向着针尖运动亦会引发电子雪崩产生放电. 也就是针尖附近的强光区放电遵循传统的汤生击穿机理. 但对于弱光区放电仅出现在外加电压正半周期,电子雪崩向针尖移动并进入电极,正离子远离针尖方向移动并在远处聚集形成空间电荷. 总电场会受到该空间正电荷场的影响. 根据 Meek 判据^[12],当空间电荷的电场和外加电场相差不大时,将产生流光放电. 在流光放电中,紫外光电离对等离子体羽弱光区的放电起到了很重要的作用. 紫外电离产生的电子向空间正电荷移动并产生小的电子雪崩,这些电子进入空间电荷层并中和了部分正离子,则这些小电子雪崩遗留下来的离子又组成了新的空间电荷层,结果使得空间电荷层快速

向远离针尖方向发展.

为了计算等离子体羽模式下放电的发展速度,采集了强光区两个点的光信号,结果如图 5 所示,其中 A 点位于针尖处,B 点沿着放电方向与 A 点相距 0.3 cm. 图 6 是弱光区沿着远离针尖的方向依次采集的五个点的发光信号,其中 A 点距离强光区最近,A 点、B 点、C 点、D 点、E 点相邻两点间距离均为 0.4 cm. 利用两点间的距离除以两点发光信号的延迟时间可以得到放电的发展速度,利用这种方法对不同位置处的放电发展速度进行了计算,所得结果

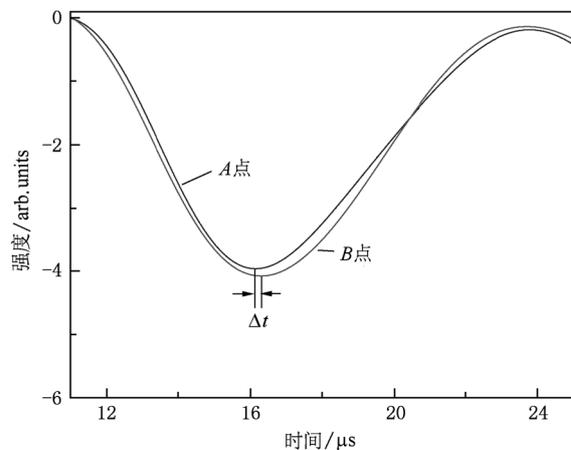


图5 等离子体羽强光区两个点的光信号

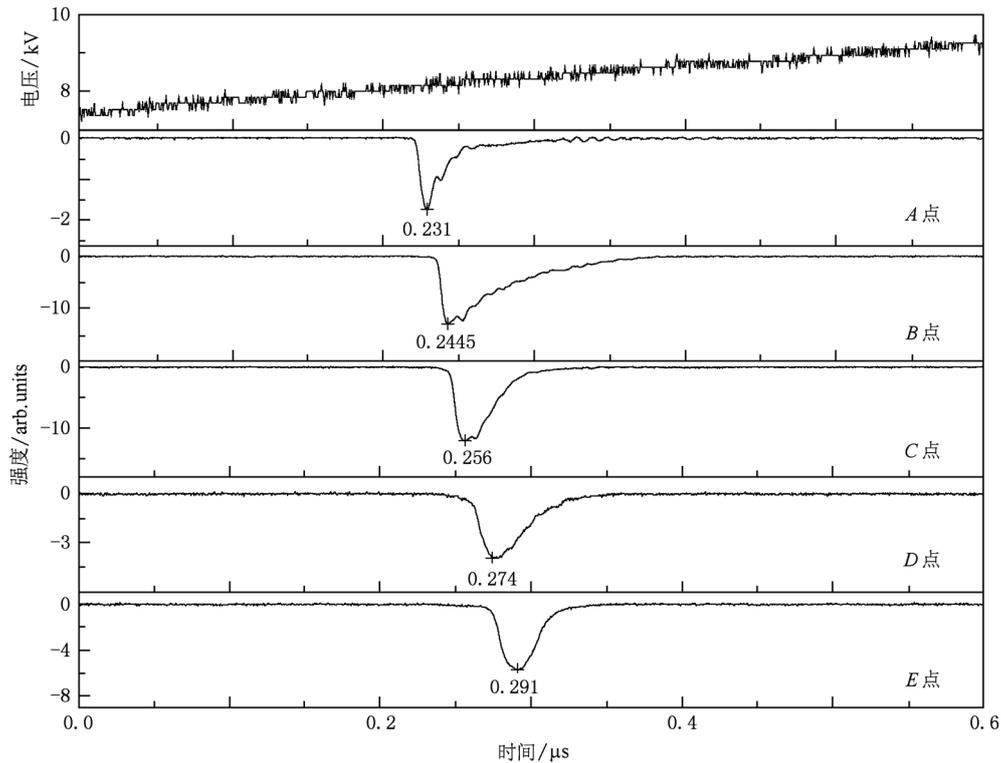


图6 等离子体羽弱光区五个点的光信号

如图7所示. 本文图中均以针尖位置作为距离坐标的零点. 由图7可以看出: 强光区放电发展速度大约为 2.1×10^6 cm/s, 而弱光区的放电发展速度在误差允许的范围内基本保持不变, 大约为 2.5×10^7 cm/s, 弱光区的放电发展速度比强光区高一个数量级. 强光区和弱光区的放电发展速度不同就是缘于击穿机理的不同. 强光区的放电遵循汤生击穿机

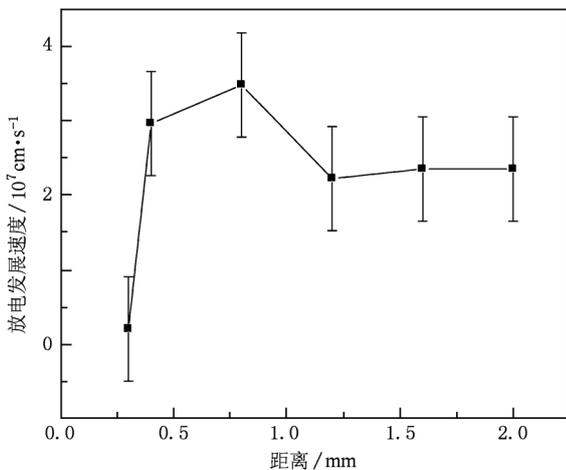


图7 不同位置处的放电发展速度

理, 因此放电的发展速度由电子在电场中的漂移速度决定. 而弱光区是流光放电, 因此放电发展速度为流光传播速度, 而流光传播速度要远大于电子漂移速度.

为了研究放电在等离子体羽放电模式下的等离子体参数, 采集了放电的发射光谱, 在波长 300—420 nm 区间放电的发射光谱如图 8(a) 所示. 光谱中包含 N_2 的 337.1 nm 和 N_2^+ 的 391.4 nm 谱线. 391.4 与 337.1 nm 的谱线强度比 $I_{391.4}/I_{337.1}$ 的变化常用来表征电子能量的变化^[13]. 利用这种方法, 采集了从针尖到等离子体羽的尾部不同位置处的谱线强度比 $I_{391.4}/I_{337.1}$, 结果如图 8(b) 所示. 从图 8(b) 可知, 等离子体羽弱光区强度比 $I_{391.4}/I_{337.1}$ 大约是强光区 $I_{391.4}/I_{337.1}$ 的三倍多.

通过对空气均匀放电中掺入少量氩气, 采集氩原子的发射谱线. 利用斯塔克展宽^[14] 测量了等离子体羽的电子密度, 结果如图 9 所示. 从图 9 可以看出, 强光区(前三个数据点)的电子密度较低, 弱光区的电子密度较高. 电子温度和电子密度的测量结果表明强光区的电子温度和电子密度均比弱光区低, 这是由于强光区和弱光区的击穿机理不同造

成的. 如上所述, 强光区为汤生击穿, 放电电场约为气体的击穿电场, 因此电场较低. 弱光区是流光击穿, 总电场为外加电场和空间电荷场的叠加, 总电场为气体击穿电场阈值的数倍, 因此对应的放电电场较强. 电场的强弱直接决定了等离子体的电子温

度和电子密度, 因此强光区的电子温度和电子密度都比弱光区低. 但是, 由于所拍摄照片为时间积分的结果, 而强光区的发光时间要远大于弱光区的发光时间, 因此照片中所显示针尖附近的汤生击穿机理下的区域发光较强.

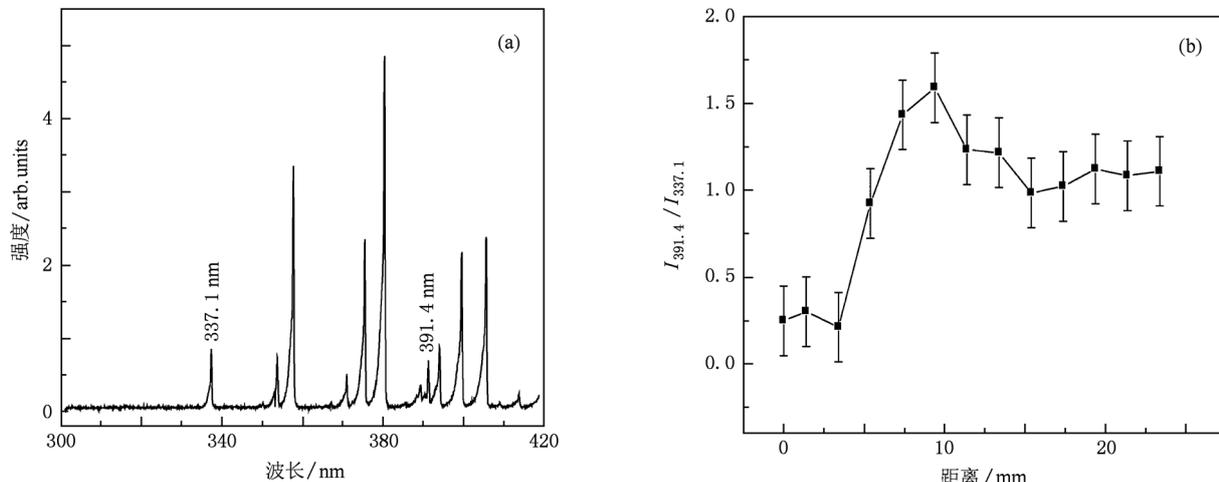


图 8 波长为 300—400 nm 范围的放电发射光谱和不同位置处的谱线强度比 $I_{391.4}/I_{337.1}$ (a) 300—400 nm 的放电发射光谱, (b) 不同位置处的谱线强度比 $I_{391.4}/I_{337.1}$

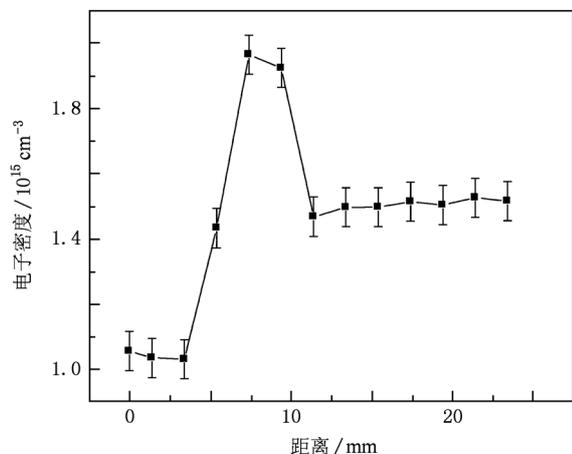


图 9 等离子体羽不同位置处的电子密度

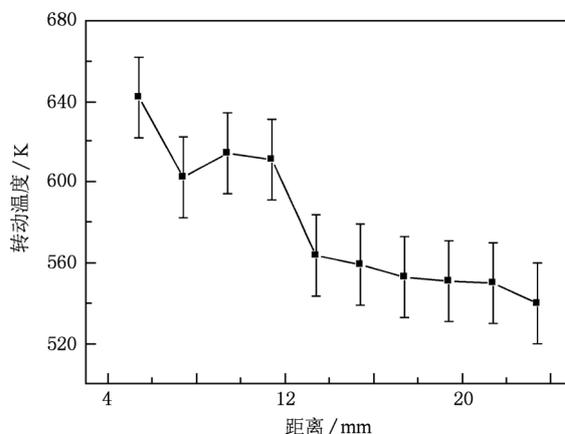


图 10 等离子体羽不同位置处的转动温度

本文还对等离子体羽不同位置处的振动温度和转动温度进行了空间分辨率测量. 通过采集氮分子离子(391.4 nm)的转动谱, 利用玻尔兹曼图解法测量气体温度. 由于强光区采集的谱线信噪比很差, 难以对其进行拟合, 因此仅对弱光区的谱带进行空间分辨率测量, 结果如图 10 所示. 从图 10 可以看出, 离开针尖的距离越大, 放电的气体温度越低.

通过采集不同位置处的等离子体羽的氮分子

振动谱线, 对实验结果进行拟合可以得到氮分子振动温度, 结果如图 11 所示. 从图 11 可以看出, 强光区的振动温度比较高, 随着离开针尖的距离增大振动温度呈上升趋势, 在 5 mm 左右有极大值, 在弱光区随着离开针尖的距离增大振动温度呈下降趋势.

以上实验结果表明, 强光区的电子温度低于弱光区, 强光区的分子振动温度却高于弱光区. 一般情况下, 电子温度越高振动温度也越高, 可是本文得到的结果却与此不一致. 分析其中可能的原因主

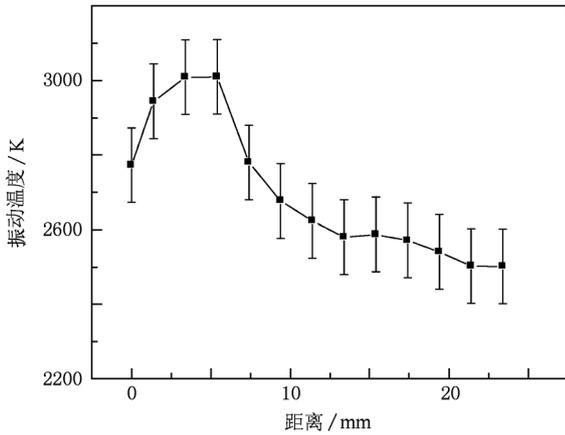


图 11 等离子体羽不同位置处的振动温度

要有以下两个:一是强光区的电子温度较低,大多数电子与 N_2 产生非弹性碰撞,可能的主要激发碰撞是 $N_2 + e \rightarrow N_2^* + e$, N_2^* 退激发产生 N_2 光谱. 而在弱光区,由于电子温度高,大多数电子与 N_2 非弹性碰撞可能是电离碰撞, $N_2 + e \rightarrow N_2^+ + 2e$. 这个过程对 N_2 的发射光谱不会产生影 响,因此通过 N_2 的光谱测量得到强光区的振动温度比弱光区高. 另

外,电子将能量传递给 N_2 各振动能级需要一定时间,虽然放电的强光区电子温度较低,但是电子具有足够的时间将能量传递给 N_2 各振动能级(强光区放电时间为若干微秒). 相比较而言,弱光区的放电脉冲宽度仅为 160 ns,在如此短的时间内电子尚不能将能量充分传递给 N_2 各振动能级.

4. 结 论

大气压等离子体针产生的空气放电分为电晕放电和等离子体羽放电两种模式. 在电晕放电模式中,放电仅仅发生在针尖附近;在等离子体羽放电模式中,强光区为汤生放电而弱光区为流光放电. 不同的放电机理导致等离子体羽长度的突变. 光学发射谱的研究结果表明,强光区电子能量和电子密度较低,远离针尖处的弱光区电子能量和电子密度较高. 转动温度随着离开针尖距离的增加有所降低. 振动温度随着离开针尖距离的增加而逐渐变大,并在 5 mm 处有极大值,此后在弱光区逐渐降低.

[1] Kanazawa S, Kogoma M, Moriwaki T, Okazaki S 1988 *J. Phys. D* **21** 838

[2] Luo H Y, Liang Z, Lü B, Wang X X, Guan Z C, Wang L M 2007 *Appl. Phys. Lett.* **91** 221504

[3] Kieft I E, Laan E P, Stoffels E 2004 *New J. Phys.* **6** 149

[4] Vidmar R J 1990 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **18** 733

[5] Staack D, Farouk B, Gutsol A, Fridman A 2005 *Plasma Sour. Sci. Technol.* **14** 700

[6] Machala Z, Laux C O, Kruger C H 2005 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** 320

[7] Staack D, Arouk B F, Gutsol A, Fridman A 2008 *Plasma Sour. Sci. Technol.* **17** 025013

[8] Machala Z, Jedlovsky I, Martisovits V 2008 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **36** 918

[9] Takaki K, Hosokawa M, Sasaki T, Mukaigawa S, Fujiwara T 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 151501

[10] Stoffels E 2006 *Plasma Sour. Sci. Technol.* **15** S169

[11] Lu X P, Xiong Z, Zhao F, Xian Y, Xiong Q, Gong W, Zou C, Jiang Z, Pan Y 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 181501

[12] Yang J J 1983 *Gas Discharge* (Beijing: Science Press) p118 (in Chinese) [杨津基 1983 气体放电 (北京: 科学出版社) 第 118 页]

[13] Kozlov K V, Wagner H E, Brandenburg R, Michel P 2001 *J. Phys. D* **34** 3164

[14] Dong L F, Ran J X, Mao Z G 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 161501

Characteristics of atmospheric pressure air uniform discharge generated by a plasma needle*

Li Xue-Chen[†] Yuan Ning Jia Peng-Ying Chang Yuan-Yuan Ji Ya-Fei

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

(Received 26 January 2011; revised manuscript received 18 July 2011)

Abstract

Cold plasma generated by atmospheric air discharge has wide application prospect in industry because it does not need vacuum equipment and mass production is possible. In this paper, a stable uniform discharge is generated in open air by a plasma needle. Discharge mechanism is investigated by optical method, and plasma parameters are given by the spatially resolved measurement of emission spectrum from the discharge. Results show that the discharges have two modes. One is a corona discharge mode and the other is plasma plume mode. In the stable plasma plume mode, a strong emission area and a weak emission one can be distinguished from each other. The development velocity of the weak emission area is much faster than that of the strong emission area. Furthermore, the electron energy and the plasma density in the weak emission area are also bigger than those in the strong emission area. Therefore, the discharge in the strong emission area is dominated by Townsend mechanism, while that in the weak emission area is dominated by streamer discharge. Gas temperature and vibration temperature are also studied in this paper. The experimental results are of great importance to the industrial applications of atmospheric pressure discharge.

Keywords: atmospheric pressure uniform discharge, plasma needle, emission spectrum, discharge mechanism

PACS: 52.80.Hc, 52.80.Mg, 52.80.Tn

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10805013, 51077035), the Key Program of Science and Technology Research of Ministry of Education, China (Grant No. 210014), and the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. A2009000149).

[†] E-mail: plasmalab@126.com