

大气压介质阻挡辉光放电中放电电流的测量与分析

李雪辰¹, 尹增谦², 庞学霞¹, 李永辉¹, 高瑞玲¹

1. 河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002

2. 华北电力大学应用物理系, 河北 保定 071003

摘 要 介质阻挡放电产生的低温等离子体具有广泛的应用前景而成为研究热点。文章利用平行平板介质阻挡放电装置, 在流动的氦气中实现了大气压均匀辉光放电, 得到了大气压下的均匀等离子体。利用电学方法将放电电流从总电流中分离出来, 从而得到了辉光放电的放电电流。通过分析放电电流、外加电压、气隙上电压以及壁电荷电量之间的相互关系, 可以研究气体放电过程中壁电荷积累的微观动力学行为。实验结果表明壁电荷主要是在放电电流脉冲持续期间积累的, 但电流脉冲结束后, 由于气隙电压没有改变极性, 壁电荷还会逐渐积累, 气隙电压改变极性后, 壁电荷量随时间减小。这些结果对壁电荷在介质阻挡辉光放电中作用的深入研究和大气压介质阻挡辉光放电的工业应用具有重要意义。

关键词 介质阻挡放电; 大气压辉光放电; 壁电荷

中图分类号: O461.2 **文献标识码**: A **文章编号**: 1000-0593(2007)12-2403-03

引 言

气体放电产生的低温等离子体在薄膜生长、材料改性、等离子体显示等领域有许多重要的应用, 并逐渐显示出很好的经济效益^[1], 尤其是它能产生臭氧以及除去或者降解汽车尾气中的有害气体, 从而也表现了很好的环保效益^[2]。但对于大规模工业生产而言, 使用低气压放电产生等离子体存在着致命的弱点: 放电必须维持在低气压状态, 难以实现流水线连续生产。显然, 从工业应用角度而言, 人们更需要在大气压条件产生低温等离子体。在高气压下放电一般会过渡到弧光放电或者电火花, 这样产生的等离子体也是不均匀的, 因而如何实现在大气压下的均匀辉光放电(即大气压辉光放电)对工业应用是具有重要意义的。

早在1933年德国的 Von Engel 等就首次报道了大气压辉光放电的研究结果^[3]: 利用裸露的电极在大气压空气或氦气中, 使用直流或者射频电源驱动能产生辉光放电。但这种放电并不稳定, 容易过渡到电弧放电, 需要冷却阴极, 并且开始放电时必须在低气压下点燃放电, 所以它仍然离不开真空装置。在1988年日本的 Okazaki^[4]等利用介质阻挡放电装置获得了一种惰性气体中的大气压辉光放电, 世界各国就这一课题开展了更为广泛的理论和实验研究工作^[5, 6]。

目前利用介质阻挡放电装置已经在氦气、氖气、氮气、

氩气及空气中实现了大气压辉光放电, 研究发现外加电压半周期中只有一个持续时间为微秒的放电电流脉冲, 一般认为脉冲放电是由于电荷在电介质板上积累形成壁电荷造成的。可见放电电流信号是判断是否实现大气压辉光放电的一个重要参数, 它一般通过测量串联在放电电路中小电阻上的电压而得到。由于介质阻挡放电装置本身就是一个电容, 因此这样测量的放电电流一般叠加在正弦波形的位移电流上。因此将放电电流从总电流中分离出来, 从而研究辉光放电过程中壁电荷形成的动力学行为无疑具有重要价值。

针对于此, 本文对氦气中大气压辉光放电进行研究, 利用电学方法可以从总电信号中获得放电电流, 通过合理的物理模型就可以计算得到壁电荷电量、气隙电压、外加电压、放电电流的关系, 从而揭示了壁电荷形成的微观动力学过程。

1 实验装置和电流测量原理

实验装置如图1所示。长度为80 mm的有机玻璃管中装满普通自来水, 两端是厚度为1.2 mm的玻璃片, 兼作电介质层。直径为47 mm的环形电极分别浸入水中并与高压电源HV两极相接, 从而水可以充当电极。放电气隙间距可用不同厚度的玻璃作垫片来调节(本实验中 $d=1.5$ mm)。电源的电压调节范围为0~10 kV, 频率调节范围为30~60 kHz;

收稿日期: 2006-09-02, 修订日期: 2006-12-16

基金项目: 国家自然科学基金项目(10647123), 河北省教育厅项目(2006106)和河北大学自然科学基金项目(2006061)资助

作者简介: 李雪辰, 1976年生, 河北大学物理科学与技术学院副教授 e-mail: xcli@mail.hbu.edu.cn

高压探头 (Tektronix P6015A, 1000X) 用来测电压。总电流信号通过测量串联在放电回路小电阻 ($R = 50 \Omega$) 上的电压而得到, 并输入数字示波器 (Tektronix TDS3054, 500 MHz) 进行采集记录。两个水电极和测量电流的小电阻置于大气压氦气 (纯度 99.9%, 流速 $6 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) 中, 作为回路 1, 则放电时回路 1 中电阻测量的电流就是包含位移电流和放电电流的总电流信号。为了能得到放电电流信号, 相同的放电装置和测量电阻构成回路 2, 回路 2 与回路 1 并联放置, 所不同的是回路 2 放置于大气压空气中。由于氦气的击穿电场比空气低, 只有回路 1 能放电而回路 2 不能达到放电击穿条件, 因此串联在回路 2 上的小电阻中只有位移电流。将回路 1 测得的总电流减去回路 2 中得到的位移电流, 就可以得到放电电流信号。

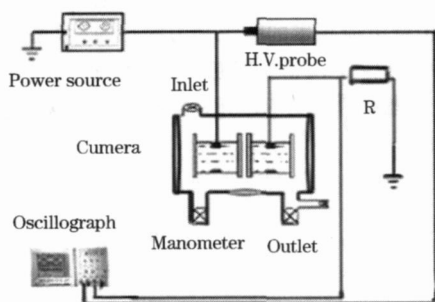


Fig 1 Schematic diagram of dielectric barrier discharge

2 实验结果及讨论

在流动的氦气中, 当外加电压峰值升高到超过 800 V 时, 气体发生击穿放电。透过水电极观察, 放电比较均匀, 如图 2 所示。图 3 给出了氦气放电时外加电压、总电流和计算得到的放电电流的波形, 显然外加电压每半个周期仅出现一个放电电流脉冲, 这是大气压辉光放电的典型特征。

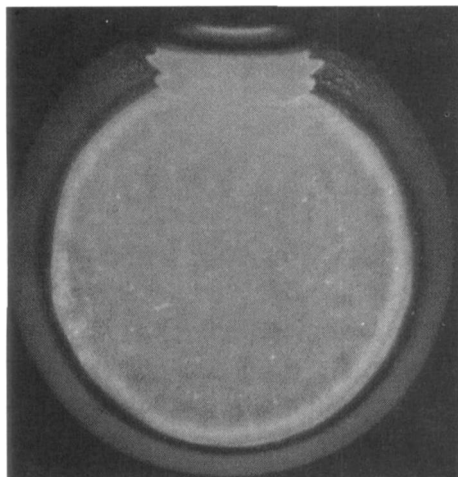


Fig 2 Photograph of atmospheric pressure glow discharge in helium (Peak value of applied voltage is 0.8 kV, frequency is 60 kHz, gap width is 1.5 mm, exposure time is 1/8 s)

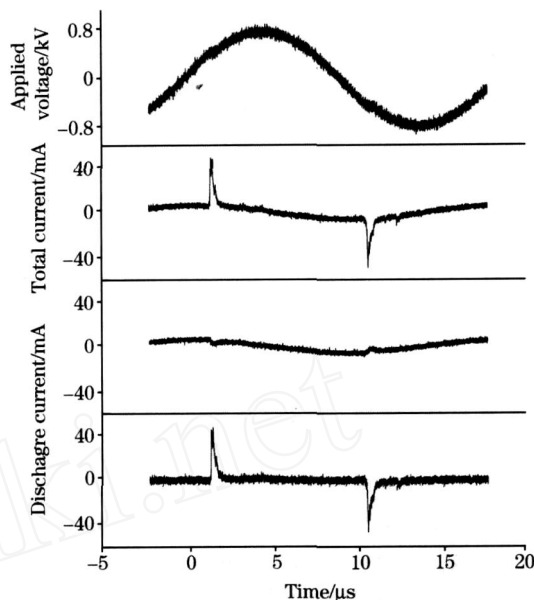


Fig 3 Waveforms of applied voltage, total current, displace current and discharge current

介质阻挡辉光放电的等效电路如图 4 所示, 水电极上的玻璃电介质层可以等效为一个电容, 通过测量两个电容值 C_{ds} 共为 37.5 pF (标准电容比对法测得), 气体隙等效为一个可变电阻 R_g , 气体未击穿放电时 R_g 趋于无穷大。外加电压 V_a 应该等于气体隙上的电压 V_g 和介质上记忆电压 V_m 之和。即有^[7, 8]

$$V_g(t) = V_a(t) - V_m(t) \quad (1)$$

记忆电压和总电流的关系可以通过下式给出^[7, 8]

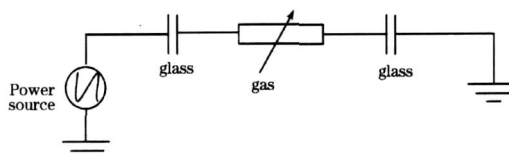


Fig. 4 Equivalent circuit of dielectric barrier discharge

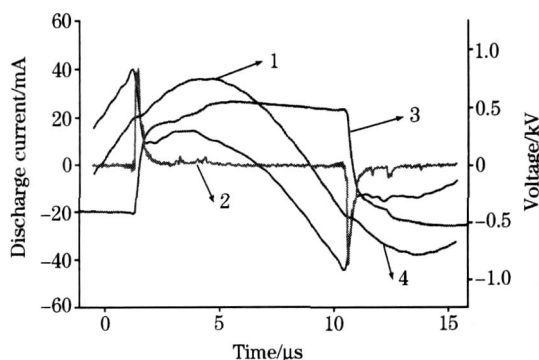


Fig. 5 Waveforms of applied voltage, memory voltage, gap voltage and discharge current curves
1: Applied voltage; 2: Discharge current;
3: Quantity of wall charges; 4: Gap voltage

$$V_m(t) = 1/C_{ds} \int_{t_0}^t I_t(t) dt + V_m(t_0) \quad (2)$$

式中 I_t 为总电流, $V_m(t_0)$ 为 t_0 时刻的记忆电压值。通过 (1) 式和 (2) 式可以得到气体上电压 $V_g(t)$, 如图 5 所示。

已知放电电流 I_d , 对放电电流积分就可以得到放电过程中传递的电荷 (壁电荷) 的情况, 即

$$Q(t) = \int_{t_0}^t I_d(t) dt + Q(t_0) \quad (3)$$

式中 $Q(t_0)$ 为 t_0 时刻的壁电荷电量。壁电荷电量的计算结果也在图 5 中给出了。

通过图 5 可以看出, 壁电荷电量在放电脉冲持续时间内发生了反向, 这说明放电过程中电介质上积累的壁电荷和上一次放电积累的壁电荷极性相反。随着壁电荷的积累, 气隙上的电压也有一个陡降, 这样使得气隙电压不能维持放电, 从而该放电结束。放电脉冲过后, 气隙电压很低, 但气体中电场仍不为零, 在该电场作用下, 放电结束时剩余的电子和离子分别向两层电介质运动, 最终也能形成壁电荷, 即表现为放电脉冲结束后, 壁电荷积累并不马上结束, 而是一直缓

慢增加, 直到气隙上电压反向后, 才不会再有壁电荷积累, 这个过程由于电场不能维持电子雪崩, 放电电流很小。此后, 由于复合等原因, 电介质上的壁电荷不断减少, 表现为记忆电压也缓慢地减小。

3 结 论

利用电学方法, 对氦气大气压辉光放电进行了研究, 获得了气体中的放电电流。通过对放电电流积分得到了壁电荷、气隙电压、外加电压的关系。结果表明放电脉冲持续时间内, 由于电子雪崩, 电介质板上会很快积累壁电荷, 这些壁电荷和上次放电积累的壁电荷极性相反, 放电脉冲结束后, 壁电荷积累并不马上结束, 而是一直持续到气隙电压反向为止, 气隙电压反向后, 壁电荷由于复合等原因而不断减少。总之, 通过对放电电流时间演化的测量, 揭示了壁电荷形成的微观动力学过程, 这些结果对大气压辉光放电的深入研究及介质阻挡放电的工业应用都具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] LI Xue-chen, LIU Zhi-hui, JIA Peng-ying, et al (李雪辰, 刘志辉, 贾鹏英, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2007, 27(10): 1939.
- [2] DONG Li-fang, RAN Jun-xia, YIN Zeng-qian, et al (董丽芳, 冉俊霞, 尹增谦, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2005, 25(8): 1184.
- [3] Von Engel A, Seeliger R, Steenback M. Zeit. Fuer. Physik., 1933, 85: 144.
- [4] Kanazawa S, Kogoma M, Moriwaki T, et al. J. Phys. D: Appl. Phys., 1988, 21: 838.
- [5] YIN Zeng-qian, DONG Li-fang, LI Xue-chen, et al (尹增谦, 董丽芳, 李雪辰, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2003, 23(3): 607.
- [6] DONG Li-fang, LIU Feng, LI Shu-feng, et al (董丽芳, 刘峰, 李树锋, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2006, 26(5): 802.
- [7] Massines F, Rabehi A, Decomps P, et al. J. Appl. Phys., 1998, 83(6): 2950.
- [8] Massines F, Gherardi N, Naude N, et al. Plasma Phys. and Control. Fusion, 2005, 47: B577.

Measurement and Analysis of Discharge Current in Dielectric Barrier Glow Discharge at Atmospheric Pressure

LI Xue-chen¹, YIN Zeng-qian², PANG Xue-xia¹, LI Yong-hui¹, GAO Rui-ling¹

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

2. Applied Physics Department, North China Electric Power University, Baoding 071003, China

Abstract Dielectric barrier discharge has become a hot issue in low temperature plasma research field because of wide prospect for its application in industry. In the present paper, an uniform glow discharge was realized in atmospheric pressure helium with a parallel planar dielectric barrier discharge device and an uniform plasma was generated in helium at atmospheric pressure. Electrical method was used to separate the discharge current from the total current signal and the waveform of discharge current could be obtained. The relations among the discharge current, applied voltage, gap voltage and wall charge during the uniform glow discharge were used to analyze the dynamical behavior of wall charges during their accumulation. The results show that the wall charges were mainly accumulated during the existence of discharge current pulse, while the quantity of wall charges continued to increase until the gap voltage changed its polarity after the disappearance of discharge current pulse, and finally the quantity of wall charges decreased until the next breakdown. These experimental results are important for the further study of wall charges' effect in the dielectric barrier glow discharge and its application in industry.

Keywords Dielectric barrier discharge; Atmospheric pressure glow discharge; Wall charges

(Received Sep. 2, 2006; accepted Dec. 16, 2006)