

# 大气压介质阻挡放电的光谱研究

李雪辰, 刘志辉, 贾鹏英, 李树锋

河北大学物理科学与技术学院, 河北 保定 071002

**摘要** 使用水电极介质阻挡放电装置, 分别在大气压空气和氦气中实现了稳定的高压放电。通过水电极观察两种气体的放电, 发现大气压空气中放电为空间随机分布的微放电丝, 等离子体是不均匀的, 而在氦气中放电没有微放电丝, 空间分布比较均匀。比较而言, 这种均匀放电产生的等离子体具有更广泛的工业应用前景。对两种气体中放电的电流波形进行了比较, 发现空气中放电的电流脉冲在时间上是随机出现的而氦气中放电的电流脉冲在时间上具有周期性, 并且空气中放电脉冲宽度约为几十 ns 而氦气中放电的电流持续时间较长, 脉冲宽度大约为 1  $\mu$ s。文章还对两种气体中介质阻挡放电发射光谱进行了研究, 结果表明大气压氦气中均匀放电的  $N_2^+(B^2_{u^+} \rightarrow X^2_{g^+})$  谱线 391.4 nm 很强而在大气压空气放电中此光谱线很弱。这些研究结果对高压条件下均匀放电的实现和大气压辉光放电的工业应用具有重要意义。

**关键词** 介质阻挡放电; 发射光谱; 大气压等离子体

**中图分类号**: O565

**文献标识码**: A

**文章编号**: 1000-0593(2007)10-1939-03

## 引言

介质阻挡放电又叫无声放电, 是一种典型的非平衡态交流气体放电。介质阻挡放电实验装置的特点是两个电极中至少要有有一个被绝缘电介质层覆盖。由于电介质层的存在, 介质阻挡放电只能工作在交流条件下, 驱动电源的频率为几十~几百 kHz。介质阻挡放电最大的优势就是能够在高压下产生非平衡等离子体, 从而能节省去真空装置<sup>[1]</sup>, 这在工业上有很广泛的应用前景, 介质阻挡放电已经被广泛地应用于臭氧合成、杀菌消毒、聚合物表面改性、等离子体化学气相沉积、CO<sub>2</sub> 激光器、污染物控制、大功率准分子紫外及真空紫外光源以及平面等离子体显示技术等领域<sup>[2-5]</sup>。介质阻挡放电在大气压条件下一般表现为若干随机分布的微放电丝, 而这对于材料生长、表面处理等应用不利, 因为非均匀的放电必然导致材料的处理也是不均匀的。为了达到放电的均匀性, 该应用领域一般都是通过在低气压条件下实现均匀放电。介质阻挡放电的优势是能在高压下实现放电, 因而如何利用介质阻挡放电实现高压和均匀性结合的放电, 成为了介质阻挡放电的一个研究热点<sup>[6, 7]</sup>。

本工作就是利用介质阻挡放电装置, 分别在空气和氦气中放电。空气中放电为不均匀的微放电丝而氦气中放电很均匀, 对这两种放电的电压电流关系进行对比研究, 发现空气

中放电电流脉冲是没有规律随机出现的, 而氦气中放电电流脉冲具有周期性。为了研究两种气体放电的本质存在不同, 对它们的发射光谱进行了比较, 结果发现氦气弥散放电中  $N_2^+(B^2_{u^+} \rightarrow X^2_{g^+})$  谱线 391.4 nm 很强而在空气放电中此光谱线很弱。

## 1 实验装置和方法

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 1.5 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, 从而水可以充当液体(水)电极。放电气隙间距可用螺旋测微计调节(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; 放电气体分别是空气和氦气, 压强为一个大气压。高压探头 (Tektronix P6015A, 1000X) 用来测电压。放电电流信号通过测量串联在放电回路小电阻上的电压而得到, 并输入数字示波器 (Tektronix TDS3054, 500 MHz) 进行采集记录。从放电间隙发射的光用透镜组进行会聚后进入单色仪 (American, Acton, AM-566) 分光, 探测器为光电倍增管, 然后接 Boxcar (American, Stanford Research, SRS 280/255) 进行平均后由计算机进行分析存储。

收稿日期: 2006-04-25, 修订日期: 2006-07-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(10575027, 10647123), 河北省教育厅项目(2006106)和河北大学博士启动基金资助

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

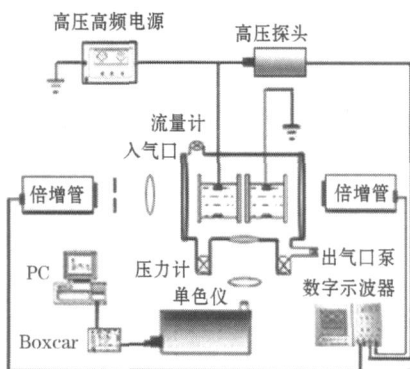
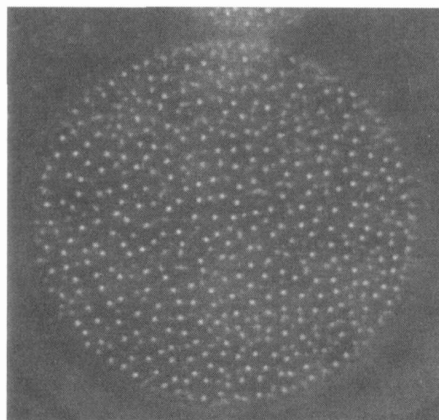


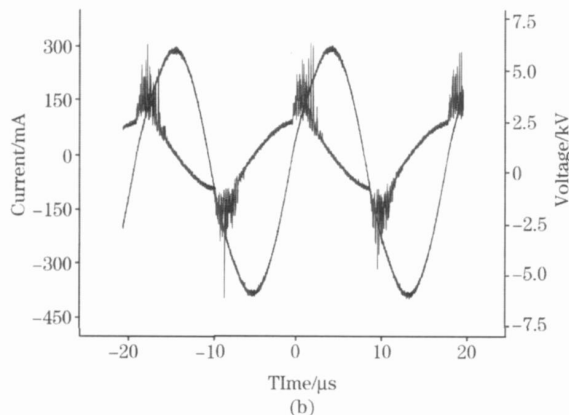
Fig 1 The experimental setup of dielectric barrier discharge

## 2 实验结果和讨论

在大气压空气中, 当驱动电压高于 5 kV 时气体隙开始击穿放电。透过水电极观察可以看见放电是分立的微放电丝, 如图 2(a) 所示, 其中的亮点对应微放电丝。放电的电压电流关系在图 2(b) 给出, 可见电流落后电压相位 90 度。电流波形中的“毛刺”就对应放电电流而叠加在电流中的正弦轮廓是由于介质阻挡放电装置的电容引起的位移电流。每个放电电流脉冲宽度为几十 ns, 其强度也各不相同。



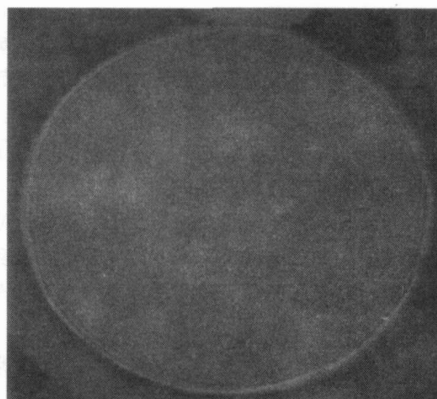
(a)



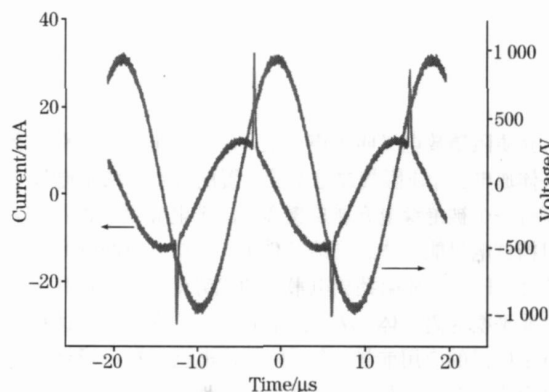
(b)

Fig 2 Photo of the discharge in air at atmospheric (a) and the waveforms of discharge current and the applied voltage (b)

当工作气体是一个大气压的氦气时, 驱动电压略高于 1 kV 气体隙开始击穿放电, 即当气体隙厚度不改变时氦气中的放电比空气中放电电压要低得多。氦气中放电很均匀, 肉眼看不到微放电丝出现, 利用曝光时间为 1 ms 的照相机拍摄放电照片也没有发现微放电丝存在, 结果如图 3(a) 所示。放电的电压电流波形如图 3(b) 所示, 可以看出氦气中放电的电流具有周期性, 外加电压一个周期只有两个很强的脉冲, 这说明外加电压一个要放电两次。在氦气中放电, 每个电流脉冲宽度约为 1 μs, 脉冲强度基本相同。



(a)



(b)

Fig 3 Photo of the discharge in helium at atmospheric pressure (a) and the waveforms of discharge current and the applied voltage (b)

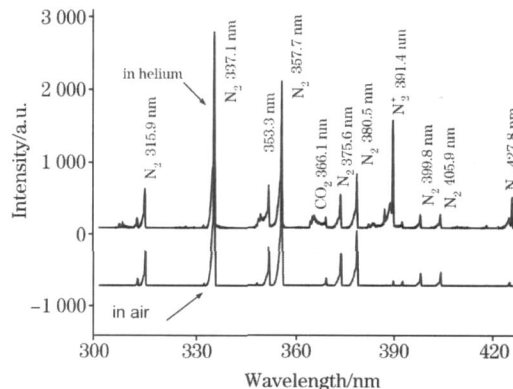


Fig 4 Emission spectra of dielectric barrier discharge in air and helium respectively

利用光谱仪对空气和氦气中放电的发射谱进行了研究, 结果如图 4 所示。在图 4 中将两种气体中放电的发射谱在 337.1 nm 进行了归一化处理, 通过比较发现, 两种不同气体中放电的发射谱谱线从 300 ~ 430 nm 基本相同, 但氮分子离子的谱线  $N_2^+(B^2_{u^+} \rightarrow X^2_{g^+})$  391.4 nm 在氦气放电中强度要比空气中放电强得多, 在空气中放电, 这条谱线强度十分弱。

不均匀的, 但比较而言氦气中放电没有观察到微放电丝因而比空气中放电空间分布均匀。当驱动电压较高时, 不同气体中放电都观察不到放电丝。通过比较放电电流波形可知, 空气中放电电流脉冲在时间上没有规律随机出现的, 而氦气中放电电流脉冲具有周期性。比较两种气体中放电的发射光谱, 发现氦气弥散放电中  $N_2^+(B^2_{u^+} \rightarrow X^2_{g^+})$  谱线 391.4 nm 很强而在空气放电中此光谱线很弱。

### 3 结 论

空气中击穿时, 放电表现为微放电丝, 放电空间分布是

### 参 考 文 献

- [1] DONG Li-fang, MAO Zhi-guo, YIN Zeng-qian, et al. Appl. Phys. Lett., 2004, 84(25): 5142.
- [2] Li Xue-chen, WANG Long. Chin. Phys. Lett., 2005, 22: 416.
- [3] 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.
- [4] SHI Jin-chao, CHEN Jin-zhong, WEI Yan-hong, et al (史金超, 陈金忠, 魏艳红, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis (光谱学与光谱分析), 2006, 26(5): 798.
- [5] Kunhardt E E. IEEE Trans. Plasma Sci., 2000, 28(1): 189.
- [6] 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.
- [7] 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.

## Study on the Characteristics of Dielectric Barrier Discharge at Atmospheric Pressure by Spectroscopic Method

LI Xue-chen, LIU Zhi-hui, JIA Peng-ying, LI Shu-feng

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

**Abstract** In the present paper, stable discharges were respectively obtained in air and helium at atmospheric pressure with a dielectric barrier discharge device consisting of water electrodes. By comparing the discharges in the two gases, it was found that the discharge in air at atmospheric pressure is not uniform and micro-discharges can be discerned which are distributed on the electrode stochastically, while the discharge in helium at atmospheric pressure is quite uniform and no discharge filament can be discerned. Comparing the two kinds of discharges, the plasma generated in helium discharge at atmospheric pressure has better prospect for application in industry because of its uniformity. The discharge current waveforms in air and helium at atmospheric pressure were compared, and the results show that the discharge current pulses in air are stochastically distributed in time, while the current pulses in helium discharge appear periodically. The discharge duration in helium is much longer than that in air at atmospheric pressure. The discharge pulse length is about tens of nanoseconds in air and is about one microsecond in helium. Meanwhile the spectra emitted from the two kinds of discharges were studied, and the results show that the spectral line of 391.4 nm emitted from  $N_2^+(B^2_{u^+} \rightarrow X^2_{g^+})$  is quite strong in helium discharge. On the contrary, the strength of 391.4 nm spectral line is very weak in air discharge. These experimental results are significant for the realization of uniform discharge at atmospheric pressure and industrial application of dielectric barrier discharge.

**Keywords** Dielectric barrier discharge; Emission spectrum; Atmospheric pressure plasma

(Received Apr. 25, 2006; accepted Jul. 28, 2006)