

介质阻挡放电中的局域态六边形结构^{*}

贺亚峰 董丽芳[†] 刘富成 范伟丽

(河北大学物理科学与技术学院, 保定 071002)

(2004 年 9 月 30 日收到, 2004 年 11 月 22 日收到修改稿)

在氩气介质阻挡放电中得到了稳定的局域态六边形结构, 并对其进行了时空动力学的测量. 发现位于中心的放电丝的放电时刻总是领先, 相邻两次放电的时间间隔表现出长短交替的周期性. 利用壁电荷放电模型对上述结果进行了分析, 表明微放电丝在放电过程中不仅受自身场的作用, 还受到周围其他微放电丝的影响.

关键词: 介质阻挡放电, 壁电荷, 自组织, 局域态结构

PACC: 5280P, 7750, 0565, 0547

1. 引 言

近年来, 非线性耗散介质中的局域态结构(类分子结构)及其时空动力学模型已成为非线性科学中的一个研究热点^[1,2]. 它宏观上类似于微观中的原子、分子结构, 但在本质上却显示出了复杂的动力学过程. 这种结构已在生物^[3]、化学^[4,5]及气体放电^[6]等系统中被发现. Purwins 等人在直流气体放电系统中 pd 值约为 13Pa·m 时观察到了局域态六边形结构^[6,7]. 这种局域态六边形结构是从均匀态演化而来, 即当系统达到均匀态后, 再增加电压, 系统会出现局域态结构. 他们把单个的放电细丝看作准粒子(耗散孤子), 这种准粒子通过相互作用形成类分子团簇, 即局域态结构. 通过引入第三个变量(壁电荷作为第二个禁阻子)来建立三变量反应-扩散模型对这种局域态结构的动力学过程进行了初步的分析.

介质阻挡放电是一种典型的非平衡态交流气体放电, 其主要特点是至少有一个电极被介质层覆盖. 气体在外场的作用下击穿, 在大气压强下以放电细丝——微放电通道的形式存在, 它们可持续几十至几百纳秒^[8]. 这些微放电丝之间存在着相互作用, 可形成自组织斑图^[9,10].

本文在大气压氩气介质阻挡放电中观察到了局域态结构, 这种局域态结构是气体击穿稳定后形成

的, 并非由均匀态演化而来. 对其进行时空动力学测量后发现其动力学机理与 Purwins 等人观察到的局域态结构的不同.

2. 实验装置

实验装置如图 1 所示. 放电电极由内径为 4.7 cm, 外径为 5.5 cm 的两个盛有水的有机玻璃管平行相对组成, 两端的介质层是 1.7 mm 厚的玻璃片. 整个水电极置于一密封的有机玻璃容器内, 实验气体为氩气, 气压维持在 10^5 Pa. 驱动电源(HV)峰值电压 U 为 0—10 kV, 频率 f 调节范围为 10—40kHz, 放电气隙宽度 d 可在 0.2—2mm 之间调节. 气隙间的放电斑图由数码相机(Canon Powershot G1)记录. 通过透镜和光阑可选特定的放电丝进行测量, 光信号由光电倍增管(PMT(RCA 7625))采集并由示波器(Tektronix TDS 3054B)记录、存储, 然后进行分析.

3. 结果与讨论

气体在击穿稳定后放电功率较小, 只出现少量局部分布的放电丝, 这些放电丝在适当条件下由于相互作用可自组织成规则的局域态结构, 比如菱形、五边形、六边形、七边形等, 甚至是‘双原子分子’结构. 这些结构各有其稳定性, 其中尤以六边形结构为

^{*} 国家自然科学基金(批准号: 10375015)、教育部科学研究重点项目(批准号: D2020)、河北省自然科学基金(批准号: A2004000086)和河北省科技攻关项目(批准号: D1212180)资助的课题.

[†] E-mail: Donglf@mail.hbu.edu.cn

最佳.

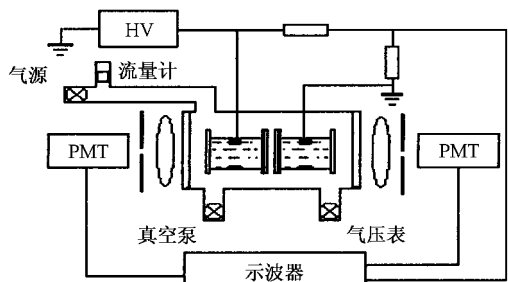


图 1 实验装置示意图

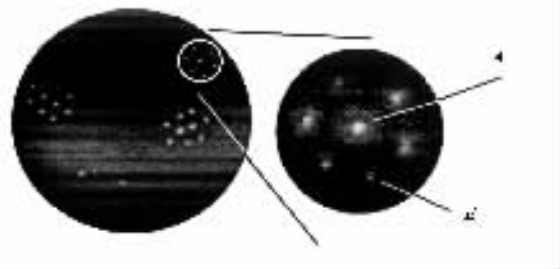


图 2 放电的斑图 ($U = 2.2\text{ kV}$, $f = 27\text{ kHz}$, $d = 1.8\text{ mm}$, $p = 10^5\text{ Pa}$, 照片曝光时间 $1/10\text{ s}$)

由于放电丝的发光强度正比于微放电电流密度^[11], 因此照相机记录的照片可表示微放电的分布情况. 图 2 是一幅氩气击穿稳定后放电丝自组织的照片, 可将其分为三个区域: 左边的 10 个点为一组, 它实际包含了两个六边形结构, 所以结构相对稳定. 这 10 个点斜向排成三列, 外侧两列的情况一致, 中间一列与外侧两列做相对微小振动, 振幅约为放电丝直径大小. 右下角的 9 个点为一组, 由于此结构未包含稳定结构所需放电丝数目, 最终结构破坏, 放电丝数目减少, 形成较简单的结构. 右上角 7 个点分为一组, 此六边形十分稳定, 所以对这一组可实现放电时间特性测量. 因为此结构有明显的对称性, 把对称中心以 *A* 标识, 周围任意一点以 *B* 标识, 然后对这 7 个点进行总光测量, 得到波形如图 3 所示.

从图中可以看到, 在每个电压的上升沿, 光信号只有一个脉冲, 说明这 7 个点放电具有很强的协同性. 但是对光信号进行局部放大后发现, 每个脉冲实际是由两个脉冲组成, 而且前边一个脉冲的幅度总是小于后边一个的. 这两个脉冲的宽度相同, 大约为 50 ns, 时间间隔约为 150 ns. 由此我们猜想前边的脉冲对应着 *A* 点放电, 由于 *A* 点只有一个, 相对亮度较低, 所以脉冲幅值较小; 后边的脉冲对应着 *B* 点,

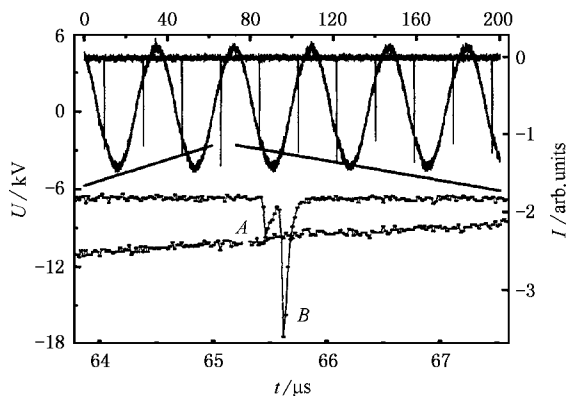


图 3 放电丝光信号随电压的变化波形 ($U = 2.2\text{ kV}$, $f = 27\text{ kHz}$, $d = 1.8\text{ mm}$, $p = 10^5\text{ Pa}$)

其幅值较高是由于六个 *B* 点同时放电造成的. 对此, 只要分别对 *A* 点和任一 *B* 点单独测量就可以证明.

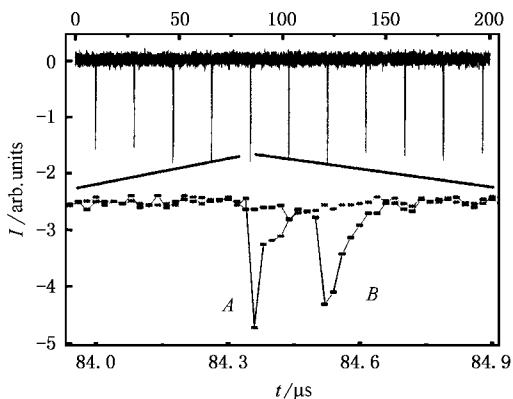


图 4 *A* 与 *B* 点的光信号 ($U = 2.2\text{ kV}$, $f = 27\text{ kHz}$, $d = 1.8\text{ mm}$, $p = 10^5\text{ Pa}$)

利用透镜成像及光阑选择使两道光电倍增管分别取到 *A*, *B* 两点的光信号, 测量结果如图 4 所示. 对任一脉冲局部放大后发现 *A* 点的光信号脉冲总是先于 *B* 点的, 时间间隔约为 150 ns, 它们的脉冲宽度都约为 50 ns, 与总光波形中时间特性相同. 由此得出结论: *A* 点总是先于 *B* 点放电. *A* 点连续放电时间间隔为 18.76, 18.58, 18.76, 18.58... μs, 相应的 *B* 点连续放电时间间隔为 18.78, 18.56, 18.78, 18.56... μs. 另外, *A* 与 *B* 点放电时刻在连续的半周期内分别相差 140, 160, 140, 160 ns. 它们都表现出长短间隔的规律性, 这是介质阻挡放电中的时间对称性破缺现象.

由于水电极覆盖着电介质, 放电所产生的电荷

积累在电介质表面上,形成壁电荷,其产生的内建电场与外加电场方向相反,当达到一定量时,净电场低于维持电场,放电熄灭,所以放电电流是脉冲的.在下一个半周期来临时,上述内建电场与外加电场同向,可对放电起促进作用.由于图 2 圈出区域内的 7 个点相邻较近,且有先后放电,那么它们的内建电场会对其他点的击穿和熄灭造成很大影响.

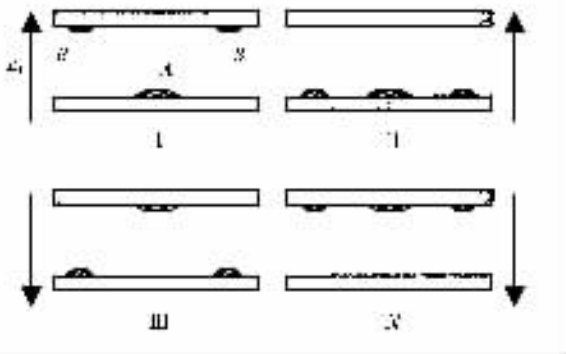


图 5 A, B 点的放电模型图

图 5 给出了放电丝 A 及 B 在一个周期(I — IV)内壁电荷的分布示意图.设 E_A, E_B 分别为 A, B 点的内建电场对自身的有效作用电场, E_B' 为 6 个 B 点对 A 点的有效作用电场, E_A' 为 A 与其他 5 个 B 对另一个 B 的有效作用电场. E_0 是电源外加电场,方向如图中箭头所指, E_m 为放电维持电场, E_b 为击穿电场, ω 是电源角频率.图 5 中 I 是本半周期 A 点熄灭后 B 点还未击穿时的状态, II 是本半周期 A, B 点都熄灭后电场方向还未翻转前的状态, III 是电场反向后 A 点已熄灭、B 点还未击穿时的状态, IV 是 III 后 A, B 都熄灭后的状态.所以 A, B 点的熄灭、击穿方程^[12, 13]分别为

$$A \begin{cases} E_0 \sin \omega t_1 + E_B' - E_A = E_m, \\ E_0 \sin \omega t_2 + E_B' + E_A = E_b, \end{cases}$$

$$B \begin{cases} E_0 \sin \omega \tau_1 - E_A' - E_B = E_m, \\ E_0 \sin \omega \tau_2 - E_A' + E_B = E_b. \end{cases}$$

由于放电持续时间相对于电压周期非常小,所以可认为击穿和熄灭发生在同一时刻.设 t_1, t_2 为 A 点熄灭、击穿时刻, τ_1, τ_2 为 B 点熄灭、击穿时刻.联立上述两组方程得到

$$\begin{aligned} & (\sin \omega \tau_2 - \sin \omega \tau_1) E_0 + 2E_B \\ & = (\sin \omega t_2 - \sin \omega t_1) E_0 + 2E_A. \end{aligned}$$

放电丝大小与沉积的壁电荷多少成正比.从斑图中放电丝直径的大小可以看到 A 点比 B 点大而

且亮度较高,所以有 $E_A > E_B$, 因此得到

$$\begin{cases} (\sin \omega \tau_2 - \sin \omega \tau_1) > (\sin \omega t_2 - \sin \omega t_1), \\ (\sin \omega \tau_2 - \sin \omega \tau_2) > (\sin \omega \tau_1 - \sin \omega t_1). \end{cases}$$

由于放电的周期性,即 $t_3 - t_1 = \tau_3 - \tau_1 =$ 放电周期,且 $\tau_2 - t_2 > \tau_1 - t_1$, 必然推得 $\tau_3 - t_3 < \tau_2 - t_2$, 所以 A, B 间放电间隔具有长短周期性.对于 A, B 点在每个电压上升沿的放电时刻也有类似结果^[12, 13].

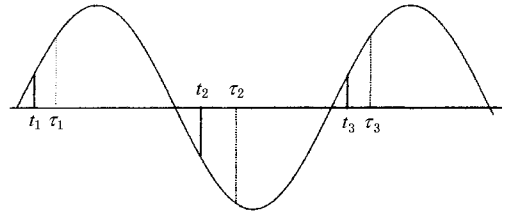


图 6 A, B 放电丝时间特性过程模拟

图 6 是根据上述推导结果进行放电丝时间特性过程模拟的结果.其中 t 对应 A 点放电, τ 对应 B 点放电,由图可以看出 A 点总是先于 B 点放电,而且 A, B 点放电时刻都具有时间平移不对称性,其放电时间特性与实验中得到的结果非常符合.

由实验测量结果可以看出,六个 B 点放电具有很强的协同性,即它们是合作相关的.因为 A 点直径较大,亮度较高,即 A 点处较 B 点处积累较多的壁电荷,若这种差别达到一定程度就会造成 A 点本半周期内率先击穿,在下半周期也将因其壁电荷较多,只需较低的电压而再次率先击穿.这种壁电荷的差别主要是由局域结构中电场的不均匀性造成的.由于 A 点总是先于 B 点放电,那么 B 点对 A 点起到促进的作用,而 A 点对 B 点起着抑制的作用.因此微放电丝在放电过程中不仅受自身场的作用,还受到周围其他微放电丝的影响.从结构上看, A 点处于 B 点(六个)的对称中心,即势场最弱的地方,易于维持这种放电结构.而且六边形结构具有很高的对称性,因此先行自组织形成的五边形、七边形最终将会由于局部的涨落而再次自组织成稳定的六边形结构.

4. 结 论

本工作在氩气介质阻挡放电中得到了稳定的局域态六边形结构,并对其进行了时空动力学的测量.发现位于六边形结构中心的放电丝的放电时刻总是

领先于周围其他放电丝的放电时刻,而且相邻两次放电的时间间隔表现出长短交替的周期性.根据击穿-熄灭方程给出了壁电荷放电模型,并对上述结果进行了分析,表明微放电丝在放电过程中不仅受自

身场的作用,还受到周围其他微放电丝的影响.这种局域态结构的物理起因需进一步的实验和理论研究.

-
- [1] Cross M C and Hohenberg P C 1993 *Rev. Mod. Phys.* **65** 851
- [2] Couillet P, Riera C and Tresser C 2000 *Phys. Rev. Lett.* **84** 3069
- [3] Meinhardt H 1994 *The Algorithmic Beauty of Sea Shells*(Berlin, Springer)
- [4] Lee K L, McCormick W D, Ouyang Q *et al* 1993 *Science* **261** 189
- [5] Vanag V K and Epstein I R 2004 *Phys. Rev. L* **92** 128301
- [6] Ammelt E, Astrov Yu A and Purwins H G 1998 *Phys. Rev. E* **58** 7109
- [7] Astrov Yu A and Logvin Yu A 1997 *Phys. Rev. Lett.* **79** 2983
- [8] Dong L F, Mao Z G, Yin Z Q *et al* 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 5142
- [9] Dong L F, Yin Z Q, Wang L *et al* 2003 *Thin Solid Films* **435** 120
- [10] Dong L F, He Y, Yin Z Q *et al* 2004 *Plasma Sources Sci. Tech.* **13** 164
- [11] Brauer I, Punset C and Boeuf J P 1999 *J. Appl. Phys.* **85** 7569
- [12] Yin Z Q, Wang L, Dong L F *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 929 [Chinese] [尹增谦、王 龙、董丽芳等 2003 物理学报 **52** 929]
- [13] Yin Z Q, Chai Z F, Dong L F *et al* 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 925 [Chinese] [尹增谦、柴志方、董丽芳等 2003 物理学报 **52** 925]

Localized hexagonal structure in dielectric barrier discharge *

He Ya-Feng Dong Li-Fang Liu Fu-Cheng Fan Wei-Li

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

(Received 30 September 2004 ; revised manuscript received 22 November 2004)

Abstract

Stable localized hexagonal structure is obtained in Ar dielectric barrier discharge. Its spatiotemporal dynamics is measured. It is found that the discharge moment of the middle filament always precedes that of others. The interval between two adjacent discharges of one micro-discharge varies between a long interval and a short one alternatively. The experimental results are analyzed and explained by a discharge model of wall charges. It is shown that the filament is affected not only by its own field but also by other filaments during the discharge.

Keywords : dielectric barrier discharge, wall charges, self-organized, localized structure

PACC : 5280P, 7750, 0565, 0547

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China(Grant No. 10375015), the Key Project of Chinese Ministry of Education(Grant No. 02020), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China(Grant No. A2004000086) and by the Committee of Science and Technology, Hebei Province, China(Grant No. 01212180).