

氩气介质阻挡放电不同放电模式的电学特性研究^{*}

董丽芳[†] 毛志国 冉俊霞

(河北大学物理科学与技术学院,保定 071002)

(2004 年 8 月 6 日收到,2004 年 9 月 13 日收到修改稿)

采用水电极介质阻挡放电装置,在气压为 40kPa 的氩气中实现了弥散、流光和斑图三种不同模式的放电,并对其光电特性进行测量.通过测量测试电容上的电压,从而将气隙电压计算出来,发现随外加电压增加,放电起始时刻不断提前,放电占空比增加,对应放电时刻,气隙电压减小、输运电荷突增,使得气隙电压和电量波形都远远偏离正弦.气隙电压与输运电荷成非线性关系,给出了外加电压零点对应的气隙电压随外加电压峰值的变化关系.讨论了壁电荷在放电中的作用及对气隙电压和电量波形的影响.

关键词:介质阻挡放电,气隙电压,自组织斑图,输运电荷

PACC:5280P,5270,0565

1. 引 言

介质阻挡放电(DBD),又叫无声放电,是一种典型的非平衡态交流气体放电,其装置主要包括两个平行的平板电极,在两个电极之间至少有一个电介质层存在.当两电极间加上交流高压后,极板间的气体将被击穿形成放电.由于其独特的性质,DBD被广泛地应用于臭氧合成、聚合物表面改性、控制污染及平面等离子体显示技术等领域^[1].近年来,人们发现介质阻挡放电是一个典型的非线性系统,为斑图动力学提供一个很好的研究对象,已经获得许多类型的斑图^[2-9].在不同的放电参数下,DBD可呈现三种放电模式:弥散放电、流光模式和斑图模式.DBD的放电模式主要取决于气压 p 与气隙厚度 d 的乘积 pd 值和电压.在低 pd 值或电压很低时,放电工作在汤森模式,一般表现为均匀的弥散放电;在高 pd 值或电压过高时,放电一般为流光模式,即放电区充满大量的狭窄的微放电通道(又称放电丝).在合适的条件下,这两种模式都能形成稳定的自组织斑图,即出现斑图模式.

在DBD的应用和斑图动力学研究中,将决定气体放电性质的气隙电压部分计算出来,已成为一个

重要问题.例如,在工业应用领域,为了增加生成物(如臭氧)的产额、提高效率降低成本,希望把电压主要加在气体上而不要降到他处,这就需要首先将气隙电压部分计算出来研究.在DBD中,斑图的形成起源于放电电流与放电电压之间的非线性,因此为了搞清斑图的形成,更需要将气隙电压部分计算出来.另一方面,当将理论研究(包括数值模拟)与实验进行比较时,需要将气体和介质分开来研究,获得各自的信息,因而也需要在实验中将气隙电压部分计算出来.Mangolini等人通过将气隙电压从外加电压中计算出来,研究了氩气大气压辉光放电中介质对电流的限制^[10].

本工作利用水电极介质阻挡放电装置,在氩气中实现了三种不同模式的放电,并对其光电特性进行了测量.通过将气隙电压计算出来,研究了气隙电压和电量波形随时间的演化.讨论了壁电荷在放电中的作用及对气隙电压和电量波形的影响.

2. 实验装置与实验方法

实验装置如图1所示.放电电极由内径为47mm的两个有机玻璃管平行相对组成,两端的介质层是1.5mm厚的玻璃片.管内盛有水,水中的线圈

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10375015)教育部重点科研项目(批准号:02020),河北省教育厅博士基金(批准号:B2001112)和河北省自然科学基金(批准号:A2004000086)资助的课题.

[†]E-mail: Donglf@mail.hbu.edu.cn

与高压交流电源相连构成水电极. 整个水电极置于一密封有机玻璃容器内. 驱动电源峰值电压为 0—30 kV, 频率调节范围为 10—40 kHz, 放电气隙宽度可在 0.2—5 mm 之间调节. 外加电压用高压探头 (Tektronix P6015A, 1000X) 来测量; 用一个 $C_{\text{test}} = 5600 \text{ pF}$ 的测试电容来测量电容上的电压, 从而得到运输电荷; 放电发出的光信号由一个光电倍增管 (RCA7265) 来探测. 以上三个信号均由数字示波器 (TDS3054, 500MHz) 来采集并存储. 放电斑图通过数码相机 (Canon Powershot G1: 1024 × 768 pixels) 来记录.

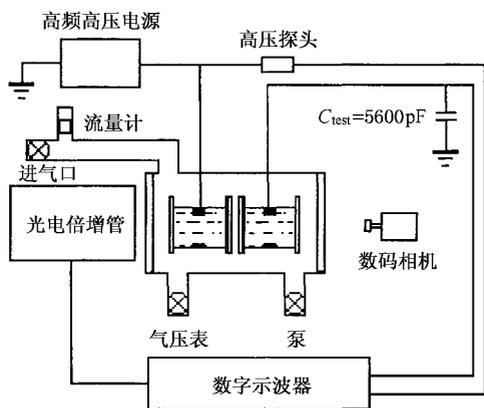


图1 实验装置示意图

3. 结果与讨论

经过多次实验发现, 如果 pd 值很低, 则放电模式仅出现弥散放电. 若 pd 值较高 (如为 $13.3 \text{ kPa} \cdot \text{cm}$) 则放电模式还与气压有关: 当气压为一个大气压时, 通过改变电压可出现丝状放电和斑图模式; 当气压在 10—50 kPa, 可得到弥散放电、丝状放电和斑图模式三种不同的放电模式. 为此本工作将气压保持为 40 kPa, 气隙宽度为 3 mm, 以使在同一放电参数下得到三种不同的放电模式.

图 2 给出了气压 $p = 40 \text{ kPa}$ 、气隙厚度 $d = 3.0 \text{ mm}$ 、频率 $f = 26 \text{ kHz}$ 时, 放电模式随外加电压的变化. 当电压达到气体击穿阈值时, 出现了低亮度、未充满整个放电区的弥散放电, 如图 2(a) 所示. 与低 pd 值弥散放电不同, 后者一般充满整个放电区. 随着电压的升高, 在均匀背景上有很多明亮的放电丝产生, 称为丝状放电模式, 如图 2(b) 所示. 这与在大气压高 pd 值放电不同, 后者是一击穿就是丝状放电^[5-7]. 电压继续升高, 在适当的电压条件下, 放电

丝排列成规则的同圆心结构, 称为同心圆斑图, 如图 2(c) 所示. 若继续增加外加电压, 中心大部分均匀、外圈稍暗、最外圈是明亮放电丝的放电斑图形成, 如图 2(d) 所示. 进一步升高外加电压, 均匀的类辉光放电充满整个放电区, 如图 2(e) 所示. 在此基础上, 继续大幅度增加外加电压, 在强烈的均匀背景上产生了更为明亮的放电丝, 有些排列为正方形, 如图 2(f) 所示. 这与大气压高 pd 值放电中出现正方形斑图的情况不同, 在大气压高 pd 值放电中, 先出现正方形斑图, 再出现类辉光放电, 继而出现六边形和条纹斑图^[9].

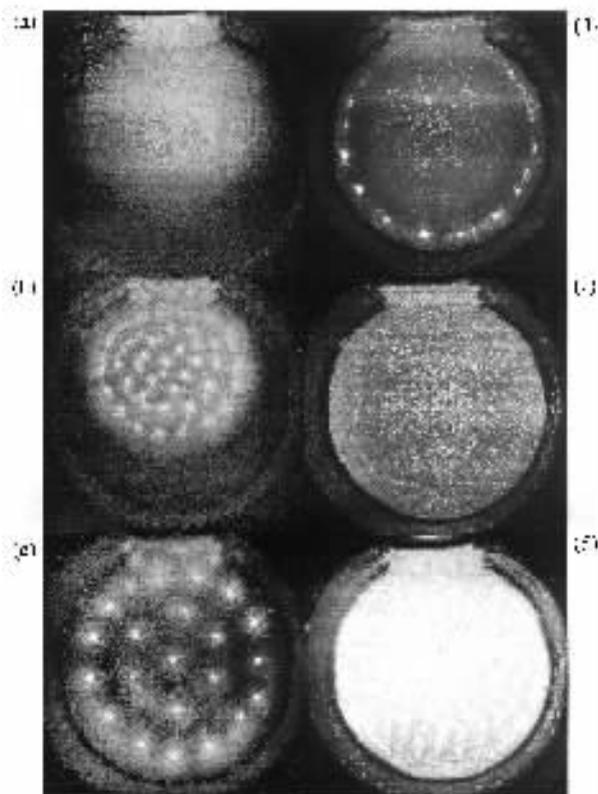


图2 不同外加电压 U_a 条件下氙气介质阻挡放电的斑图 (a) $U_a = 1463 \text{ V}$ (b) $U_a = 1735 \text{ V}$ (c) $U_a = 2289 \text{ V}$ (d) $U_a = 2508 \text{ V}$ (e) $U_a = 3344 \text{ V}$ (f) $U_a = 6940 \text{ V}$. 其他参量: 气压 $p = 40 \text{ kPa}$, 气隙厚度 $d = 3.0 \text{ mm}$, 频率 $f = 26 \text{ kHz}$, 曝光时间为 (1/50)s

为了进一步了解放电过程及其放电特性, 下面对放电的光电特性 (包括运输电荷、气体放电光电流和气隙上的电压) 进行研究.

在实验中, 通过测量外加电压、电容上的电压将气隙上的电压计算出来. 很显然, 外加电压等于介质上的电压、气隙上的电压和测试电容上的电压之和. 由于介质上的运输电荷与测试电容上的运输电荷相等, 介质上的电压与测试电容上的电压成正比, 因此

介质上的电压为 $V_{\text{diel}} = V_{\text{test}}(C_{\text{test}}/C_{\text{diel}})$. 从而气隙上的电压可通过下式得到^[10]

$$\begin{aligned} V_g &= V_a - V_{\text{diel}} - V_{\text{test}} \\ &= V_a - V_{\text{test}}(1 + C_{\text{test}}/C_{\text{diel}}), \end{aligned} \quad (1)$$

这里, C_{test} 和 C_{diel} 分别是测试电容和介质层电容的电容值, C_{diel} 是将两块本实验中作为电介质的玻璃并在一起测量得到的电容值为 37.5 pF, V_{test} 为测试电容两端的电压. 放电过程中每一个放电脉冲产生的运输电荷为

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} i(t) dt, \quad (2)$$

其中 $i(t)$ 是放电回路中的电流, t_1, t_2 分别为放电脉冲的起始、终止时刻.

图 3 给出了放电的光电特性. 如图 3(a) 所示, 刚击穿后, 在低亮度弥散放电中, 放电后电量波形有一突增, 气隙电压和电量波形都远远偏离正弦, 气隙

电压与外加电压幅度差不多, 但气隙电压在放电发生后反而下降, 放电熄灭后仍不能超过放电前的最大值, 放电持续时间为 1.69 μs . 如图 3(b) 所示, 对于丝放电, 气隙电压增加了, 但比外加电压幅度稍小, 放电持续时间却减小为 1.29 μs . 如图 3(c) 所示, 在同心圆斑图放电中, 放电脉冲数增加, 放电持续时间增加, 对应每一个脉冲, 气隙电压有下降且电量波形有一突增. 如图 3(d) 所示, 不完全弥散放电脉冲数继续增加, 放电持续时间继续增长, 气隙电压比外加电压幅度小多了. 如图 3(e) 所示, 类辉光放电的脉冲数与不完全弥散放电脉冲数差不多, 但一个脉冲的宽度比不完全弥散放电脉冲宽度宽, 约是其二倍. 如图 3(f) 所示, 辉光背景上出现正方形, 放电脉冲数更多, 持续时间更长为 14.23 μs , 时间占空比为 75%, 只有放电刚开始时, 在气隙电压和电量波形上看到明显的变化.

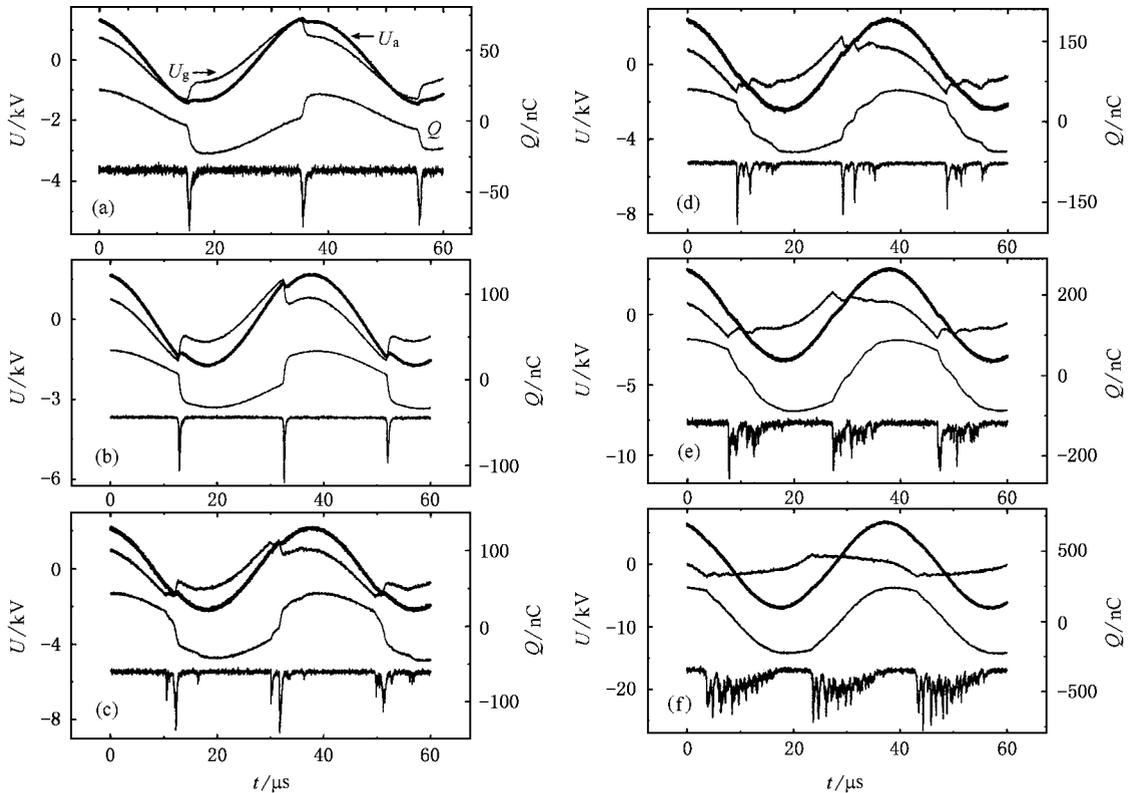


图 3 不同外加电压 U_a 条件下氩气介质阻挡放电的波形图(对应图 2). 其中: U_a 为外加电压; U_g 为气隙电压; Q 为运输电量; I_e 为光信号

从图 3 中还可以看出, 随外加电压的增加, 放电的起始时刻不断提前, 从接近于外加电压的峰, 继而变到外加电压的零点, 然后变到接近于外加电压的谷. 外加电压从 1450V 到 6950V 变化时, 而气隙上电

压从 1335V 变化到 1758V, 气隙电压增加与外加电压增加并不成比例, 这是壁电荷造成的. 在介质阻挡放电中, 由于电介质的存在, 放电产生的电荷积累在介质层的表面, 形成壁电荷. 壁电荷产生与外加电场

方向相反的内建电场,其作用是熄灭本次放电,但当下一个半周来临时,外加电压改变方向,内建电场与外加电场方向相同,因而其作用是促进放电,因此本次放电积累的壁电荷越多,下次放电需要的外加电压越低。当外加电压较高时,熄灭本次放电所需要的壁电荷较多,若壁电荷足够多,使得当外加电压降低时内建电场足以克服外加电场,形成反向放电,此时放电能够发生在下降沿,也就是所说的“过零放电”,这也就是随着外加电压的增加,放电的起始时刻不断提前的原因。

气隙电压本应随外加电压增加而成比例增加,但由于壁电荷的存在,使得气隙内的净电场是两部分之差,一部分是由外加电压产生的电场,另一部分是由壁电荷形成的内建电场,其中外加电场与外加电压成正比,内建电场与外加电压是非线性关系,所以净电场与外加电压并不成正比,因而气隙电压并不随外加电压成比例变化。

结合图 2、图 3,可分析不同放电模式的时空分布特性。对低亮度弥散放电而言,空间上是弥散的、时间上放电脉冲比较宽,这是典型的汤森放电的主要特征。在这种模式下,壁电荷很少,所以壁电荷对放电的影响可以忽略。关于丝放电,空间上是明亮的细丝且时间上放电脉冲比较窄,表现为流光放电的主要特征。这种情况中,壁电荷对放电特性的影响很大。如上所述,由于壁电荷在本半周和下半周的作用不同,使得放电一旦在某处发生将始终在一个地方发生,这就是壁电荷的记忆效应。由于壁电荷的记忆效应,每个放电丝几乎保持在同一个位置,所以能够形成稳定的自组织斑图。类辉光的时空特点是:空间上均匀、持续时间比较长且单个脉冲较宽,这些特征与低亮度弥散放电相同,但其脉冲数为多个且发光相当强,此点又与低亮度弥散放电不相同。而以后的正方形斑图发光更强而且有很强的均匀背景,时间占空比很高,电量波形接近于正弦。后两种放电既有汤森放电的特征也有流光放电的特征。

放电发生后,不但有位移电流而且有气体放电电流(其变化可从光电流变化看出),从而使得运输电荷突增,导致壁电荷也突增,新产生的壁电荷形成的内建电场与当前外加电场方向相反,净电场减弱,使气隙电压减小,并且由于放电发生后运输电荷突增、气隙电压减少,使得气隙电压和电量波形都远远偏离正弦。

图 4 给出了气隙电压与运输电荷的关系,以及

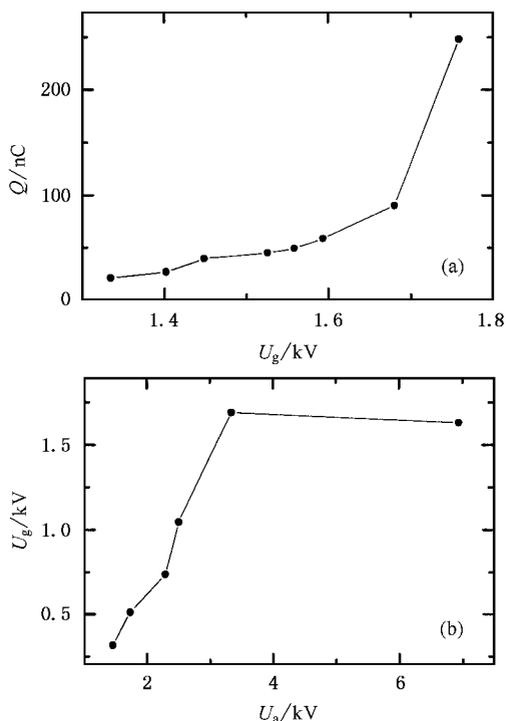


图 4 (a)气隙电压与运输电荷的关系 (b)外加电压为零时对应的气隙电压值随外加电压峰值的变化关系

外加电压为零时对应的气隙电压值随外加电压峰值的变化关系。显见气隙电压与运输电荷的关系是非线性的,说明气隙电容是一个非线性电容。外加电压零点对应的气隙电压体现了此时壁电荷的多少,从图中可看出,随外加电压峰值的增加,外加电压零点对应的壁电荷先增加后减小。这是由于在类辉光放电以前,放电的起始时刻都发生在外加电压的上升沿,外加电压克服壁电荷放电,所以壁电荷随外加电压的增加而增加。在类辉光放电及以后,放电的起始时刻都发生在外加电压的下降沿,壁电荷可克服外加电压放电,这样壁电荷虽然在上升沿放电时积累了很多,但在下降沿有一部分壁电荷在克服外加电压放电时被消耗掉了,所以壁电荷随外加电压的增加又出现了减少。

4. 结 论

本工作利用水电极介质阻挡放电装置,在氩气中实现了三种不同模式的放电,并对其光电特性进行了测量,发现随外加电压的增加,放电起始时刻不断提前,从接近于外加电压峰到接近于外加电压谷,将气隙电压计算出来,发现外加电压在很大范围内

变化,而气隙电压变化很小,但放电的时间占空比大多了,大部分外加能量仍能耦合到气体放电中.对应放电时刻,气隙电压减小、运输电荷突增,使得气隙电压和电量波形都远远偏离正弦.气隙电压与运输电荷是非线性的关系,表明气隙电容是一个非线性

电容.壁电荷是影响放电起始时刻、放电占空比、气隙电压以及运输电荷的关键因素.外加电压为零时刻的气隙电压体现了此时壁电荷的多少.实验结果对深入研究斑图动力学及在应用上的研究有着重要参考价值.

- [1] Kogelschatz U 2002 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **30** 1400
- [2] Breazael W, Flynn K M and Gwinn E G 1995 *Phys. Rev. E* **52** 1503
- [3] Muller I *et al* 1999 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **27** 20
- [4] Gurevich E L *et al* 2003 *Phys. Rev. Lett.* **91** 154501
- [5] Dong L F *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **51** 2296 [董丽芳等 2002 物理学报 **51** 2296]
- [6] Yin Z Q *et al* 2002 *Acta Phys. Sin.* **52** 925 [尹增谦等 2002 物理学报 **52** 925]
- [7] Dong L F *et al* 2003 *Thin Solid Films* **435** 120
- [8] Dong L F *et al* 2003 *Plasma Sources Sci. Technol.* **12** 380
- [9] Dong L F *et al* 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 5142
- [10] Mangolini L *et al* 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 1021

Study on the electrical characteristic of different modes of dielectric barrier discharge in argon^{*}

Dong Li-Fang[†] Mao Zhi-Guo Ran Jun-Xia

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

(Received 6 August 2004; revised manuscript received 13 September 2004)

Abstract

Three modes of discharges, including diffuse, streamer, and patterned discharges, are achieved in dielectric barrier discharge in argon at 40 kPa gas pressure by using a dielectric barrier discharge device with water electrodes. The electrical and optical characteristics of the discharges are investigated. The voltage drop across discharge gap is obtained by measuring the voltage drop across the test capacitor. Results show that the moment of discharge initiation is shifted earlier and duty ratio of the discharge increases as the applied voltage increases. At the moment of discharge initiation, the voltage drop across the discharge gap decreases and the transported charges abruptly increase. So the waveforms of the voltage drop across the discharge gap and the transported charges deviate from sinusoidal. The relationship between the voltage drops across the discharge gap and the transported charges is nonlinear. Also the relationship between the voltage drops across the discharge gap corresponding to zero applied voltage and the applied voltage is given. The function of wall charges and the influence of them on the voltage drops across the discharge gap and the transported charges are discussed.

Keywords: dielectric barrier discharge, the voltage drop across discharge gap, self-organized pattern, transported charges

PACC: 5280P, 5270, 0565

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 10375015), the Key Project of Chinese Ministry of Education (No. 02020), Bureau of Education, Hebei Province, China (B2001112), and the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant No. A2004000086).

[†] E-mail: Donglf@mail.hbu.edu.cn