

介质阻挡放电中电介质参量对放电 时间特性的影响^{*}

董丽芳[†] 王红芳 刘微粒 贺亚峰 刘富成 刘书华

(河北大学物理科学与技术学院,保定 071002)

(2007 年 6 月 21 日收到,2007 年 7 月 11 日收到修改稿)

采用介质参量不对称的装置,在大气压氩气介质阻挡放电中,研究了不同电介质温度及不同电介质材料对放电时间特性的影响.实验发现,外加电压较低时,正负半周的放电时间波形没有明显的差别;外加电压较高时,正负半周的放电脉冲个数不同.分析表明,电介质温度以及材料均影响壁电荷的积累,进而使放电特性发生改变.

关键词:介质阻挡放电,时间特性,壁电荷,介电常数

PACC: 5280P, 0547, 0565

1. 引 言

介质阻挡放电(DBD)是一种典型的非平衡态交流气体放电,它通常是由两个平行电极组成,其中至少在一个电极表面覆盖上电介质.由于介质阻挡放电广泛应用于等离子显示、发光及臭氧合成等诸多工业领域,并有望应用于信息处理、等离子体光子晶体及材料的局域生长^[1-2]等方面,因此对其放电特性及其放电机理的研究引起了人们广泛地关注.

众所周知,电介质决定着 DBD 的放电特性,人们对此进行了大量研究.分析其研究现状,发现多数研究集中在对空间特性的影响方面,而少见对时间特性的影响的研究,特别是电介质对 DBD 中单个放电丝时间特性的影响尚未见报道.例如,在等离子显示方面,电介质材料对放电的空间分布特别是均匀性有很大影响.又如,德国的 Purwins 小组采用半导体介质作阴极,通过外加光照改变电介质的电导率,发现放电强度的空间分布随之改变,在合适的条件下,可以得到不同花样的放电分布(又称放电斑图)^[3].针对上述状况,本工作通过研究电介质的特性对放电特性特别是对单个放电丝放电时间特性的影响,由此深入研究了壁电荷的影响,进而对放电机

理有了进一步的认识.

所谓壁电荷,是指在电介质表面积累的放电电荷.在介质阻挡放电中,气体击穿将产生大量电荷,在外加场的作用下这些电荷分别向两极运动,由于电介质的存在,这些电荷将在介质表面积累形成壁电荷.壁电荷所产生的内建电场,方向与外加电场相反.随着介质表面集聚电荷的增多,产生的内建电场增强,从而使总电场强度减小,作用是熄灭放电.但当下一个半周期来临时,上述内建电场与外加电场变成同向,使得在外加电压很小时,总电场强度就能够达到击穿阈值,产生放电,从而对放电起促进作用.因此,壁电荷具有双重作用^[4-12],并由此导致放电的空间记忆效应和放电时间间隔的长短交替现象.空间记忆效应是放电一旦在某处发生,由于壁电荷的作用使得下次放电将优先选在此处发生,该效应被认为是产生稳定放电斑图的原因之一.放电时间间隔的长短交替现象也是由于壁电荷的作用:上半周放电时刻越靠后,放电积累的壁电荷越多,下半周放电所需的外加电压越低,由此放电时刻越提前,这就造成了放电丝放电时间间隔的长短交替^[4].此外,如果壁电荷足够多,则在外加电压的下降沿也会产生放电^[13].

在我们以前的工作中,在电介质参量对称的条

^{*} 国家自然科学基金(批准号:10575027 和 10375015),教育部高等学校博士学科点专项科研基金(批准号:20050075001),河北省自然科学基金(批准号:A2006000950 和 A2004000086)资助的课题.

[†] E-mail: Donglf@mail.hbu.edu.cn

件下,研究了放电丝的时间特性,并由此揭示了壁电荷的作用^[4,5].本工作通过改变电介质材料及电介质温度,在电介质参量不对称的条件下^[14],进一步研究了壁电荷对放电丝时间特性的影响,发现阴极上的壁电荷对放电电流脉冲数起决定性作用.

2. 实验装置

实验装置在文献[5]已有详细的介绍,现简介如下:电极由装满水的两圆柱形容器组成,其两端用厚度为1.5 mm的电介质材料封住.根据实验需要可选用不同的介质.两容器内各有一金属环引出并与高压交流电源两极相连.放电气隙间距为1.5 mm,放电区域直径为6.5 cm.整个水电极置于充有一个大气压的氩气(含量为99.99%)的容器内.放电的光信号通过光电倍增管采集并输入示波器.斑图的变化过程用数码相机记录.

3. 结果与讨论

实验首先研究了电介质温度对放电的时空特性的影响.图1给出了两电极水温相差20℃时放电的空间分布和时间特性的变化.从图中可以看出,随着外加驱动电压升高,放电的空间分布发生改变.当电压大于击穿电压时,在放电区域首先出现随机放电丝.随电压升高,放电斑图依次为四边形、带有辉光背景的四边形、带有辉光背景的六边形、混沌态、螺旋波以及带有背景的六边形.仔细观察放电电流波形及发光信号波形,发现当外加电压不太高时,正负半周中的放电电流脉冲个数无明显差异;而当外加电压较高时,两个连续半周期的放电电流脉冲个数明显不同.如图1(g)所示的高压区的六边形放电信号,两个连续半周的脉冲个数分别为2个和3个,其中3个脉冲对应的是瞬时阴极为高温的情况,而2个脉冲对应的是瞬时阴极为低温的情况.进一步,我们还研究了此时的任意单个放电丝的时间特性,如图2所示.显见,每个放电丝的时间特性与总发光信号同步,说明任意一个放电丝在相邻的两个不同极性的半周中的放电行为都是不同的.

经初步分析,我们认为上述现象可能是由于电介质温度不同引起的壁电荷积累不同而导致的.为此,我们采用不同材料的电介质进行了研究.

实验选用石英和普通玻璃作为绝缘介质,研究

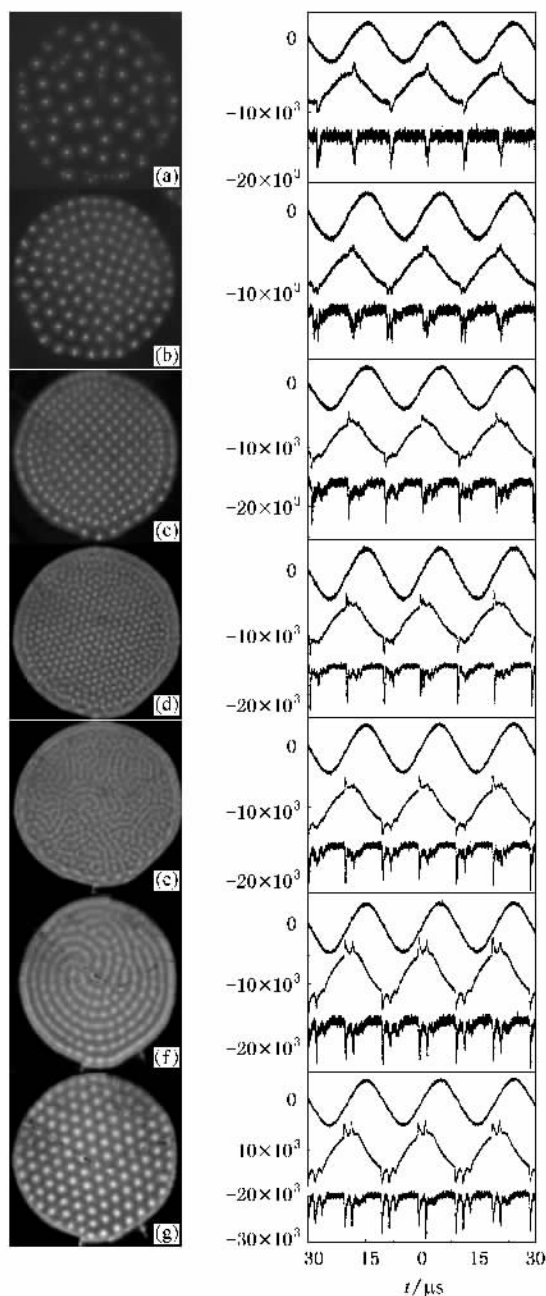


图1 电极温度相差20℃时,随电压升高放电空间特性及时间特性的变化 (a)随机放电丝, $U=2.4$ kV (b)四边形, $U=2.6$ kV (c)带有辉光背景的四边形, $U=2.8$ kV (d)带有辉光背景的小六边形, $U=3.4$ kV (e)混沌态, $U=3.8$ kV (f)螺旋波, $U=4.0$ kV (g)带有辉光背景的六边形, $U=4.5$ kV;其他实验参数: $d=1.5$ mm $p=10^5$ Pa $f=51$ kHz

了三种搭配情况:一种是两电极上一个覆盖石英介质,而另一个电极上加普通玻璃介质;另两种是两电极均覆盖石英或玻璃介质.在这几种情况中,关于放电的空间分布,随着电压的升高,其变化基本与图1所示各种情况相同.当两电极介质的不同时,高压区的六边形的电流信号,在连续两个半周的放电脉冲数

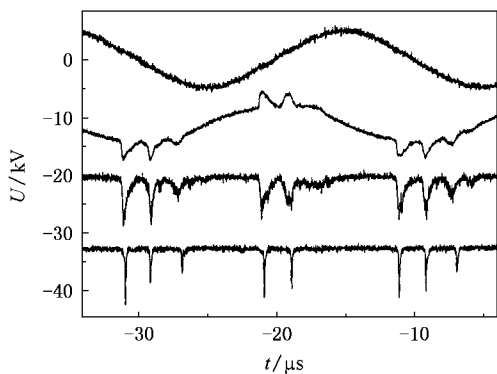


图2 电极温度相差 20℃时,高压区六边形斑图的放电时间特性(从上到下曲线依次为电压信号,电流信号,总光信号以及任意单放电丝的信号)

分别为 2 个和 3 个,如图 3(a)所示,这与图 1(g)中六边形放电情况很相似.且 3 个脉冲对应的是玻璃介质处电极为瞬时阴极的情况,与前面高温电介质处的电极为瞬时阴极的情况相同.而 2 个脉冲对应的是石英介质处电极为瞬时阴极的情况,与前面低温电介质处的电极为瞬时阴极的情况相同.同样,我们还研究了单个放电丝的时间特性,如图 3(a)下行信号曲线所示,发现其与总光放电时刻相同,表明所有放电丝是同步的.当以石英作为介质时,高压区六边形每半周期内放两次电,一次发生在电压波形的上升沿,一次对应电压波形的下降沿,如图 3(b)所示.而以玻璃作为介质时,每半周期内放电三次,其特点是两个脉冲出现在电压波形的上升沿,一个脉冲发生在电压的下降沿,如图 3(c)所示.综上所述可以看出,放电的时间特性与瞬时阴极的电介质材料有关.

众所周知,电介质材料不同,则介电常数不同.研究表明,电介质的介电常数影响壁电荷在介质表面积累的数量^[3],介电常数越大,积累于介质表面的壁电荷越多,产生的内建电场越大^[15,16].当两电极上均覆盖石英作为电介质材料时,由于其介电常数较大,一次放电后在介质表面将积累较多的壁电荷,产生较大的内建电场,因而在电压上升沿只产生一次放电,如图 3(b).而当玻璃作电介质时,由于其介电常数相对于石英要小,一次放电后产生的内建电场较小,所以当外加电压升高到一定值时,总电场强度可再次达到击穿阈值,在外加电压的上升沿产生第二次放电,如图 3(c)所示.另外,在上述两种情况中,由于壁电荷积累的较多,在外加电压的下降沿均有一次放电.在选用两种材料分别作为两极的电介

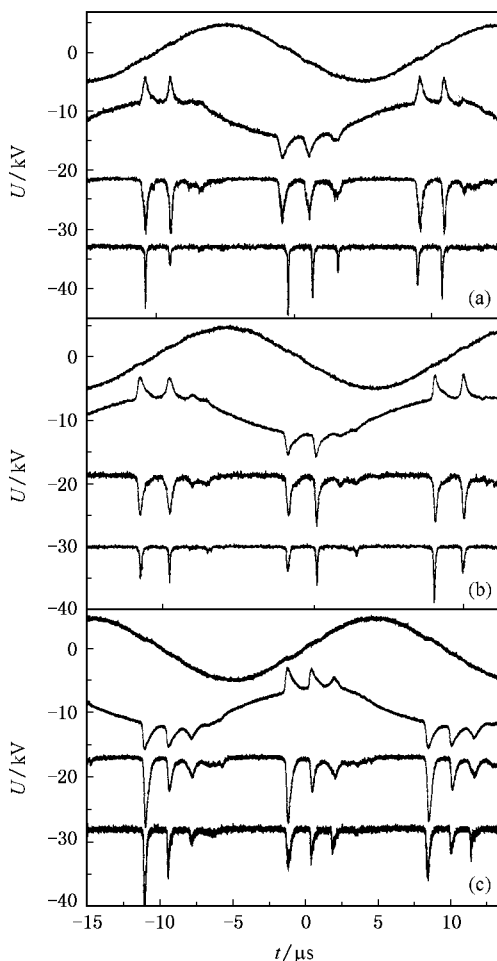


图3 两电极表面介质材料改变时,六边形斑图时间特性的变化 (a)一个电极表面覆盖玻璃介质,而另一个为石英 (b)两电极上电介质均为石英 (c)两电极上电介质均为玻璃

质时,放电脉冲的个数取决于瞬时阴极的电介质材料.当瞬时阴极处分别为玻璃和石英时,在外加电压的上升沿将分别产生 2 次和 1 次放电,对应半周内电流脉冲数分别为 3 个和 2 个.

关于电极温度不同使半周内电流脉冲数变化的原因,应该是温度影响电介质的介电常数所致.瞬时阴极温度较高时,阴极积累的壁电荷减少,形成的内建电场强度低,从而可在电压上升沿产生第二次放电.当低温端做瞬时阴极时,电介质的介电常数较大,能够积累较多的壁电荷,形成较大的内建电场,在电压上升沿不能出现第二次放电.因此,出现图 1(g)所示的结果.

至于内建电场的大小主要取决于瞬时阴极处的壁电荷的可能原因如下:研究发现,在介质阻挡放电中,微放电沿放电间隙的空间分布呈漏斗形,其颈部在阴极,开口在阳极^[17].因此,阴极的面电荷密度显

然大于阳极的面电荷密度. 由于内建电场的大小主要取决于电荷的面密度, 因而内建电场的大小主要由瞬时阴极处积累的壁电荷面密度决定.

此外, 我们还对图 3(a) 及图 1(g) 光信号的放电脉冲时刻进行了测量, 结果列在表 1 和表 2. 表中第一个半周期对应于图中电流信号的正半周期, 也就是出现两个脉冲时对应的值. 由表显见, 电流正半周期对应的两个放电脉冲时刻总是提前于负半周期的相应值. 这是由于上次放电时刻越接近电压峰值, 积累的壁电荷越多, 使得对应于电压下降沿的放电脉冲时刻越提前. 而当积累的壁电荷较多, 在电压反向时, 由于壁电荷的促进作用, 需要很小的外加电压便可以到达击穿, 从而使对应电压上升沿的脉冲时刻

表 1 图 3(a) 中每半周期内前两次放电脉冲的发生时刻

放电时刻	1	2	3	4	5
$-t_1/\mu\text{s}$	1.20	1.05	1.30	1.00	1.20
$t_2/\mu\text{s}$	0.602	0.652	0.501	0.802	0.702

也提前.

表 2 图 1(g) 中每半周期内前两次放电脉冲的发生时刻

放电时刻	1	2	3	4	5
$-t_1/\mu\text{s}$	1.40	1.31	1.26	1.20	1.31
$t_2/\mu\text{s}$	0.552	0.759	0.529	0.758	0.529

综上所述, 介质材料的改变使得覆盖在电极表面的电介质的介电常数不同, 而电极温度的改变同样使电介质的介电常数发生变化, 二者均影响壁电荷的积累, 从而使放电时间特性发生改变.

4. 结 论

本工作采用电介质参量不对称的电极装置, 在大气压氩气介质阻挡放电中, 研究了放电的时间特性. 结果发现, 电介质的温度及材料均影响介质表面壁电荷的积累, 进而影响放电特性.

- [1] Ammelt E, Astrov Yu A, Purwins H G 1998 *Phys. Rev. E* **58** 710
- [2] Jiang N, Qian S F, Wang L, Zhang X H 2001 *Thin Solid Film* **390** 119
- [3] Gurevich E L, Liehr A W, Amiranashvili Sh, Purwins H G 2004 *Phys. Rev. E* **69** 036211
- [4] Yin Z Q, Wang L, Dong L F, Li X C, Chai Z F 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 929 (in Chinese) [尹增谦、王 龙、董丽芳、李雪辰、柴志方 2003 物理学报 **52** 929]
- [5] Dong L F, Li S F, Liu F, Liu F C 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 362 (in Chinese) [董丽芳、李树锋、刘 峰、刘富成 2006 物理学报 **55** 362]
- [6] Sang H, Xu X J 2001 *Journal of Fudan University* **40** 305 (in Chinese) [桑 宏、徐学基 2001 复旦学报 **40** 305]
- [7] Dong L F, Liu S H, Wang H F, Fan W L, Gao R L, Hao Y J 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3332 (in Chinese) [董丽芳、刘书华、王红芳、范伟丽、高瑞玲、郝雅娟 2007 物理学报 **56** 3332]
- [8] Zhao Q X, Li X C, Jiang N, Wang L 2004 *Chin. Phys.* **13** 1076
- [9] Breazael W, Flynn K M, Gwinn E G 1995 *Phys. Rev. E* **52** 1503
- [10] Zhang Y T, Wang D Z, Wang Y H 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 4808 (in Chinese) [张远涛、王德真、王艳辉 2005 物理学报 **54** 4808]
- [11] Wang Y H, Wang D Z 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 5923 (in Chinese) [王艳辉、王德真 2006 物理学报 **55** 5923]
- [12] Wang Y H, Wang D Z 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 1295 (in Chinese) [王艳辉、王德真 2005 物理学报 **54** 1295]
- [13] Dong L F, Mao Z G, Yin Z Q, Ran J X 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 5142
- [14] Zhang H Y, Wang D Z, Wang X G 2007 *Chin. Phys.* **16** 1089
- [15] Li R X, Tang Q, Yin S, Sato T 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 131502
- [16] Guo B G, Wei W, Shinoda T 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 101501
- [17] Merbahi N, Sewraj N, Marchal F, Salamerio Y, Millet P 2004 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **37** 1664

Influence of dielectric parameters on temporal behavior of dielectric barrier discharge^{*}

Dong Li-Fang[†] Wang Hong-Fang Liu Wei-Li He Ya-Feng Liu Fu-Cheng Liu Shu-Hua

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

(Received 21 June 2007 ; revised manuscript received 11 July 2007)

Abstract

The Influences of different temperature and materials of dielectrics on temporal behavior of dielectric barrier discharge in argon at atmospheric pressure are studied by using a device with asymmetric dielectric parameters. It is found that the temporal waveform of discharge current in each half cycle is almost the same at lower applied voltage, whereas the number of discharge current pulses is different in half cycles of different polarity at higher applied voltage. The analysis shows that both temperature and material of dielectrics affect the accumulation of wall charges, resulting in the change of temporal behavior of discharge.

Keywords : dielectric barrier discharge, temporal behavior, accumulated charge, permittivity

PACC : 5280P, 0547, 0565

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grants Nos. 10575027 and 10375015), the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20050075001), the Natural Science Foundation of Hebei Province, China (Grant Nos. A2006000950 and A2004000086).

[†] E-mail : Donglf@mail.hbu.edu.cn