

表面电荷对介质阻挡放电发展的影响

黄寅, 孟永鹏*, 马鑫哲, 吴锴, 成永红

(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省 西安市 710049)

Influence of Surface Charge on Development of Dielectric Barrier Discharge

HUANG Yin, MENG Yongpeng*, MA Xinzhe, WU Kai, CHENG Yonghong

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University),

Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: The dielectric surface charge distribution in the atmospheric pressure dielectric barrier discharge (DBD) has an important influence on the discharge characteristics and morphology evolution. In this paper, a high-speed surface charge measurement system based on Pockels effect is established to study the dynamic development process of dielectric surface charge in continuous cycle after the initiation of discharge. And the effect of surface charge distribution on the formation process of discharge form is analyzed. The results show that the position of the surface charge spot is not fixed in several cycles after the initial discharge. The diameter of the charge spot varies from 1.5 to 2.5 mm, and the surface charge of the first discharge is higher than that of the subsequent discharge. As the discharge progresses, the positive surface charge density decreases and the negative surface charge density increases. In the process of gradually stabilizing the discharge, the positive and negative surface charges neutralize each other, and the charge distribution gradually concentrates. Finally, the position, size and discharge amount of the charge spot are maintained in a stable state. The positive and negative surface charges are fixed in position and have a high degree of coincidence. The memory effect of surface charge plays an important role in maintaining the stability of the discharge filament in the flat electrode. The results are helpful to understand the mechanism of surface charge in the evolution of discharge morphology.

KEY WORDS: surface charge; dielectric barrier discharge; discharge development; atmospheric pressure helium; pockels effect

摘要: 大气压介质阻挡放电(dielectric barrier discharge, DBD)中介质表面电荷分布对放电特性和放电形态演变具有重要

影响, 该文通过建立基于 Pockels 效应的高速表面电荷测量系统, 研究放电起始后连续周期内介质表面电荷动态发展过程, 并分析表面电荷分布对放电形态演化过程的影响。研究表明: 在起始放电后几个周期内表面电荷斑位置不固定, 电荷斑直径变化范围为 1.5~2.5mm, 且首次放电的表面电荷量高于后续放电; 随着放电的发展, 正表面电荷密度降低, 负表面电荷密度升高, 在放电逐渐稳定的过程中, 正负表面电荷相互中和, 电荷分布逐渐集中, 最终使得电荷斑的位置、大小与放电量维持在一种稳定状态, 正负表面电荷位置固定且重合度高, 即表面电荷的记忆效应对平板电极中放电丝的稳定起到了重要作用。研究结果有助于理解表面电荷在放电形态演化中的作用机制。

关键词: 表面电荷; 介质阻挡放电; 放电发展; 大气压氦气; Pockels 效应

0 引言

大气压介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge, DBD)能产生大量非平衡低温等离子体, 在等离子体工业领域得到了广泛的应用^[1-3], 如臭氧制造^[4]、废气处理^[5]、生物医学^[6]、薄膜沉积^[7]等。对放电形态形成与演化过渡过程的深入分析有助于加深对相关放电特性的理解并改善 DBD 调控方法, 对其在工业中应用具有重要的实际意义。

丝状放电作为大气压 DBD 中最为常见的放电形式^[8], 在探究丝状放电的演化过程时, 有学者报道过某种稳定放电形态的实验结果, 其放电电流为单个脉冲波形并在多个放电周期内较为稳定, 表面电荷积聚在阻挡介质的某一区域, 称之为“自稳定放电丝”^[9]。国内也有学者在研究放电模式演化时观测到该种放电形式, 其特点同样是放电集中在电极中心位置, 每半周期内仅有一个放电脉冲, 且在多个周期内保持稳定, 并认为其属于斑图放电^[10]。

基金项目: 国家自然科学基金项目(51677143, 52130703)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51677143, 52130703).

在之前相关研究中, 由于缺乏有效的测量手段, 对于这种放电形态的形成原因鲜有报道。

在 DBD 放电演化的研究过程中, 真实测量放电间隙与介质表面的电场与电荷分布可为现象解释提供有力的支撑, 国内外学者尝试了多种测量方法, 如 Lichtenberg 图法^[11]、静电探头法^[12]、Pockels 效应法^[13]、斯塔克分裂法^[14]、电场诱导二次谐波效应(electric-field-induced second harmonic, EFISH)^[15]等。近年来, 非介入式的电场测量手段 EFISH 以其高灵敏度、不影响气隙电场、适用性广等优势得到了广泛关注^[15-17]。而现阶段在 DBD 中实现介质表面电荷观测通常是依靠光电效应晶体^[13], 实验条件较为苛刻, 测量难度较大, 国内相关的报道较少。在 DBD 放电过程中, 间隙中的残余电荷与介质表面积累的电荷都将对放电产生影响。Yurgelenas Y V 等认为介质表面电荷是导致丝状放电产生记忆效应的原因, 且表面电荷的分布不影响放电丝通道直径, 但会影响放电丝的二维结构^[18]。Bogaczyk M 等也在实验中通过表面电荷的二维分布图像随时间的变化情况证明了表面电荷是导致丝状放电出现记忆效应的主要原因^[19]。而 Yuri Akishev 等认为放电过程中放电通道的残余等离子体是导致放电丝出现空间记忆效应的原因, 介质表面电荷则是导致放电丝出现时间记忆效应的原因^[20]。

针对表面电荷对于放电形态形成及其演化机理的研究, Tschiersch R 等对大气压 2kHz 方波电压下产生的表面电荷进行测量, 定量解释了不同电压幅值下的放电形态转变现象, 对稳定丝状放电的实验室产生途径、击穿机制和表面电荷记忆效应等机理性的问题进行了研究^[21]。杜燕等在不同气氛和不同气体流速下对表面电荷动态分布进行测量, 研究了不同气氛中气体流速对放电特性和介质表面电荷密度分布均匀性的影响机理^[22]。Wild 等对介质表面电荷衰减过程进行了研究, 结果表明, 电荷衰减过程中阻挡介质电导率、电荷极性和气隙中气体的相关参数(气压、气体组分等)均会对表面电荷衰减产生影响^[23]。Golibovskii 等通过理论模拟认为介质表面存在大量的浅陷阱, 能够吸附放电过程中产生的带电粒子、振动激发态分子等, 引起介质表面带电粒子的解吸附, 从而为下一次放电提供大量的种子电子, 最终导致交流驱动下弥散放电的产生^[24]。即一般认为是放电过程产生的带电粒子积聚在阻挡介质表面, 形成与外加电场相反的电场, 与空

间中残余的带电粒子共同对下次放电产生影响^[25-26]为从表面电荷角度揭示大气压 DBD 放电形态的形成机理, 本文基于 Pockels 效应建立时间分辨率达 μs 级的大气压 DBD 高速表面电荷测量系统, 测量了起始放电后第 1 至第 3 个连续周期与放电稳定时的放电特性与表面电荷密度, 分析其中介质表面电荷的密度概率分布、电荷总量与电荷占有率的变化, 探究了表面电荷对放电发展过程的影响。实验结果有助于理解表面电荷分布在放电形态演化中作用机制, 为 DBD 工业应用中的放电调控提供理论支持。

1 实验系统与测量方法

1.1 测量系统结构

大气压 DBD 中表面电荷测量系统的结构图如图 1 所示, 由电极装置、光学测量系统、实验腔体、触发系统和电源系统组成。电源部分由 CTP-2000K 和调压器组成。光学测量单元起到入射光的产生、光斑直径调整、和反射光光强记录等作用, 由氦氖激光器、光束放大器、偏振分束器等光学元件、分幅系统等组成。光学元件用于实现线偏光的产生和反射光的干扰滤除。分幅系统由分幅镜头与 ICCD 相机构成, 用于实现高时间分辨率的表面电荷密度分布测量。

1.2 表面电荷测量原理

实现表面电荷的二维分布观测的关键是具有 Pockels 效应的硅酸铋晶体(bismuth silicon oxide, BSO)^[27], 受到外加电场的作用时, 晶体的折射率将呈现线性变化。当放电发生时, 所产生的电荷将积聚在介质表面, 分布的表面电荷将在阻挡介质与 BSO 晶体上产生电场。当入射光穿过晶体时, 由于其折射率的改变, 将产生光的相位延迟。光的相位延迟 Φ 和表面电荷密度 σ 之间的线性关系如下所示:

$$\Phi = \frac{2\pi n_0^3 \gamma_{41} d}{\lambda \epsilon_0 \epsilon_{\text{BSO}}} \sigma \quad (1)$$

式中: n_0 为无外加电场时的折射率; γ_{41} 为电光系数; λ 为光的波长; d 、 ϵ_0 、 ϵ_{BSO} 分别为晶体厚度、真空介电常数与晶体介电常数。光强和相位延迟之间的关系式可以通过琼斯矩阵^[27]进行计算, 可得两者之间关系为

$$I = I_0 \sin^2 \Phi \quad (2)$$

式中 I 和 I_0 分别为反射光强度和最大入射光强度。通过在光路中加入 1/8 波片, 改变光的偏振状态,

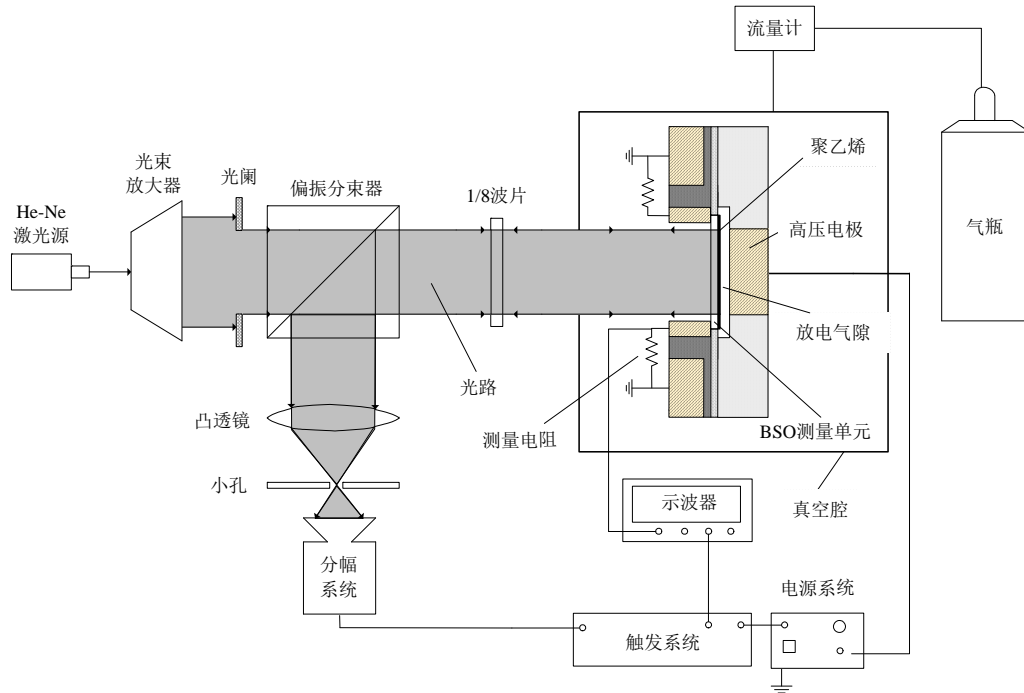


图1 表面电荷测量系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of surface charge measurement system

从而区分晶体与介质表面积聚电荷的极性^[28]，此时式(2)变为

$$I = I_0 \sin^2\left(\Phi + \frac{\pi}{4}\right) \quad (3)$$

实验中，为实现起始放电时刻的表面电荷拍摄，通过 DG645 首先触发高频电源，当示波器采集到气隙首次放电的电流信号时，通过 Aux 端口输出一触发信号给两台 ICCD 相机，并可通过相机配套软件设置其曝光的延迟时间，从而实现起始放电后任意时刻的表面电荷拍摄，其中 ICCD 相机曝光时间设置为 $5\mu\text{s}$ 。最后，通过计算机分析 ICCD 相机测得的放电发生前后的反射光光强分布，利用式(3)可算得延迟相位二维分布，再利用式(1)可进一步得到表面电荷的二维分布。

1.3 放电单元

DBD 放电单元的结构图如图 2 所示。其中高压电极直径为 10mm，BSO 尺寸为 $20\text{mm} \times 20\text{mm} \times 0.16\text{mm}$ ，表面加工为 $(6 \pm 2)^\circ$ 的倾角，用于区分晶体两面的反射光线^[29]，并覆盖有 $6\mu\text{m}$ 的聚乙烯薄膜，背面粘贴在一块 0.8mm 厚的 BK7 玻璃上，为 BSO 提供支撑与保护，并在其底面镀有一层(indium tin oxide, ITO)透明电极。为保证测量激光能够顺利通过下电极并穿过 BSO 单元，测量电极和地电极均设计成有通孔的铜环，4 个 200Ω 的无感电阻跨接在两者之间，用以测量放电电流。

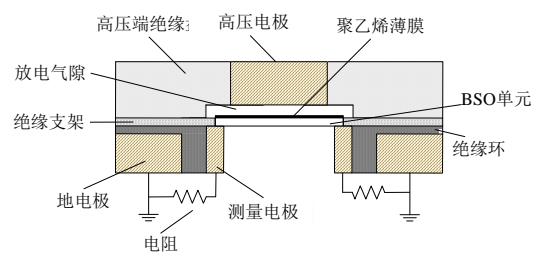


图2 DBD放电单元结构图

Fig. 2 Structure diagram of DBD discharge cell

1.4 表面电荷分析方法

本文采用表面电荷占有率和表面电荷密度概率分布两个量来对电荷密度二维分布做定量分析。介质表面电荷占有率定义为介质表面电荷覆盖面积与电极面积的比率，即电荷斑对应的像素数与光斑对应像素数的比率，可以反映出电荷斑占整个电极区域的百分比，从电荷占有面积方面反映电荷分布的均匀性。介质表面电荷密度概率分布定义为不同电荷密度区间对应的像素点数占整个光斑像素点数的比值，可以反映出电荷密度在不同区间的分布百分比，从电荷密度在不同区间的分布情况反映电荷分布的均匀性。

2 稳定放电的形成

在大气压氦气介质阻挡放电的实验过程中，通过调整实验参数，在气隙高度为 1mm、电压频率为 46kHz、幅值为 600V 下，实现了放电位置固定、电流波形稳定的稳定放电形态。相应的表面电荷分布

和电流电压波形如图 3 所示。在该种放电形态下，从电极底面透过 BSO 晶体可以看到一个明亮的放电斑，其位置和半径不随时间发生变化。电流波形在多个周期保持稳定，为典型的单脉冲放电波形，电流的幅值、脉宽和相位在不同的周期内保持稳定。正负电流脉冲的幅值分别为 4.5、-4.9mA，电流脉宽约为 1μs。正负放电的相位均在电压上升沿过零点附近。正负放电斑的位置重合度较高，形状均接近圆形，直径分别约为 2.39、2.76mm。

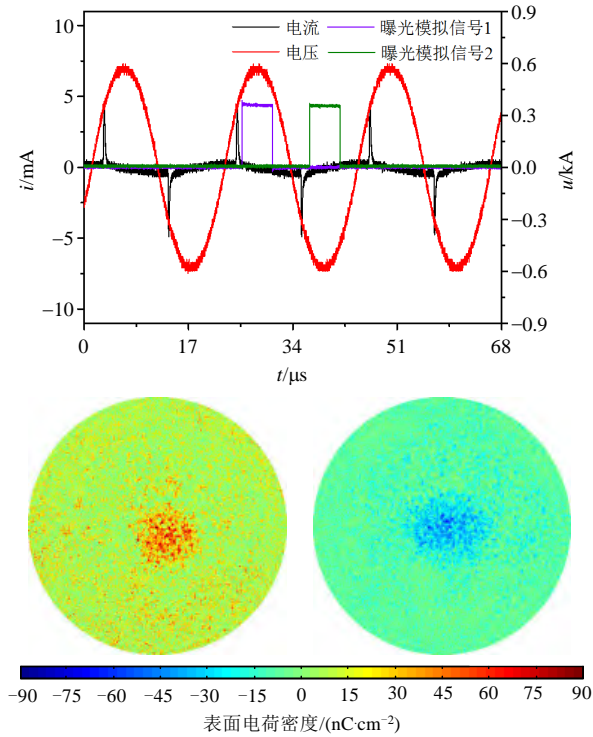


图 3 稳定放电的放电波形与表面电荷分布
Fig. 3 Discharge waveform and surface charge distribution of stable discharge

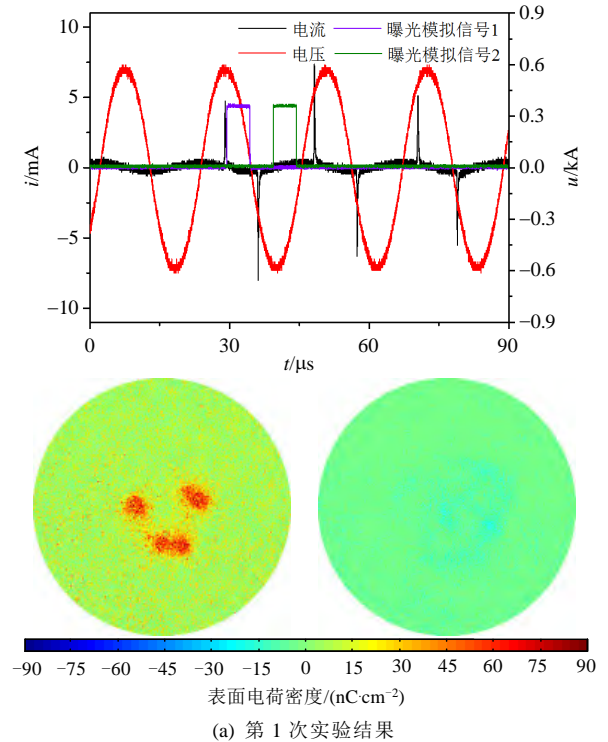
而在该实验参数下，放电开始后的几个周期内，放电并未稳定，为进一步探究该种稳定放电的形成过程，在上述实验参数下测量了初次放电后连续周期内介质表面电荷动态发展过程，并分析了放电稳定后表面电荷密度分布规律。

3 起始放电后连续周期内表面电荷分布

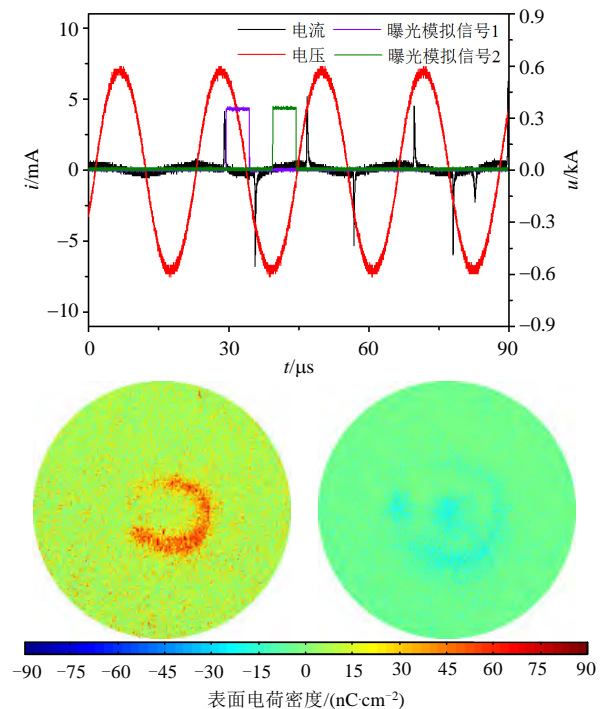
在上文的实验参数条件下，通过改变两台 ICCD 相机的触发时延，以实现放电任意放电周期内正负放电后的表面电荷密度分布进行测量。在高频 DBD 表面电荷测量系统中，二分幅相机一次触发只能对一个周期内正、负放电产生的表面电荷进行测量，无法同时对多个周期内的表面电荷分布进行测量。因此实验中采用了多次触发的方式，对不同周期内的表面电荷分次进行测量。

3.1 初次放电表面电荷分布

研究发现，正电荷从初始密度 0.32nC/mm² 衰减到 0 需要 30ms，负电荷从同样的初始密度衰减到 0 需要 150ms^[25,30]。在相同条件下进行 3 次重复实验，相邻两次实验测量之间的时间间隔在半分钟以上，因此上一次放电产生的表面电荷不会残留到下一次实验，不会对下一次表面电荷实验测量产生影响。实验测得的初次放电周期内的电流电压波形和表面电荷密度分布的测量结果如图 4 所示。



(a) 第 1 次实验结果



(b) 第 2 次实验结果

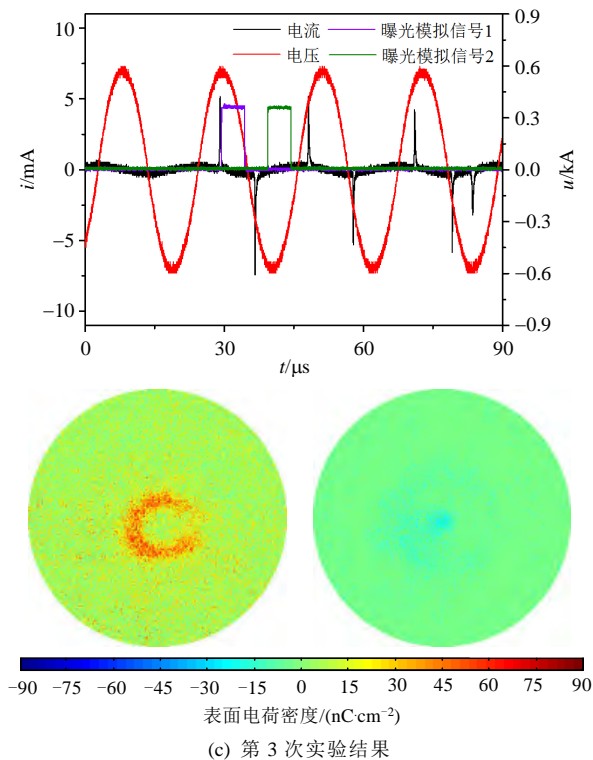


图4 第1个周期的放电波形和表面电荷分布

Fig. 4 Discharge waveforms and surface charge distribution of the first cycle

由图4可知,在进入稳定放电阶段前的初次放电始终为正放电,且第1个放电周期内的放电特性为单脉冲放电,正放电发生的时刻在正弦电压正半周峰值附近,负放电发生在正弦波形过零点附近。由于初次放电发生前,介质表面没有残余电荷沉积以增强气隙电场,只能通过外加电压的升高使得气隙电压达到击穿电压,因而正放电的放电相位靠近峰值。放电发生后,介质表面累积了大量的正电荷,可以在下一次负放电前增强气隙电场,因而在外加电压较低的过零点附近即可发生负放电。

对放电电流进行统计分析,发现初次放电的电流脉宽在区间 $0.95\sim 1.4\mu\text{s}$ 。3次正负放电电流幅值分别为 4.72 、 4.12 、 5.18mA 和 -8.03 、 -6.64 、 -7.44mA 。正负电流幅值的波动较大,即初次放电的稳定性较差,具有较大的随机性。由表面电荷密度分布测量结果可知,3次测量得到的表面电荷形状不一,正电荷形状分斑点状和月牙形两种,正负电荷的形状和位置并不一致。这是因为初次放电之前介质表面没有残余电荷的作用,因此表面电荷分布的形状和密度都呈现较大的随机性。

图4中表面电荷的占有率和电荷总量如表1所示。3次实验结果表面电荷占有率均在15%左右,正表面电荷的总量大于负表面电荷。正表面电荷总

表1 第1个周期内表面电荷占有率和电荷总量

Table 1 Surface charge occupancy and total charge of the first cycle

实验	正电荷斑 占有率/%	负电荷斑 占有率/%	正电荷 总量/nC	负电荷 总量/nC
第1次	14.8	15.22	2.63	-0.84
第2次	17.09	11.61	3.03	-0.55
第3次	11.9	14.11	2.11	-0.77

量位于 2 和 3nC 之间,负表面电荷总量位于 -1nC 以内。

对3次实验结果测得的表面电荷分布进行概率密度分析,得到的结果如图5所示。3次实验测得的表面电荷密度概率分布曲线具有相似的变化趋势,取 $[10, 70]$ 的中点 $40\text{nC}/\text{cm}^2$ 将该区间分为低电荷密度和高电荷密度区间,来对比电荷密度分布的变化情况,不同密度区间上的电荷分布概率如表2所示。初次放电产生的表面电荷密度分布主要位于 $[10, 40]$,分布概率在60%左右。由于初次正放电时没有残余负电荷的表面电荷记忆效应对放电形态产生影响,放电随机性较大,因此不同次放电产生的表面正电荷斑电荷密度概率分布在各区间上的波动较大,在区间 $[10, 40]$ 上的概率分布波动可达

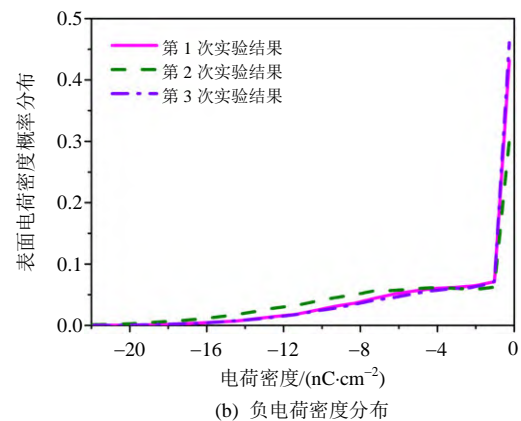
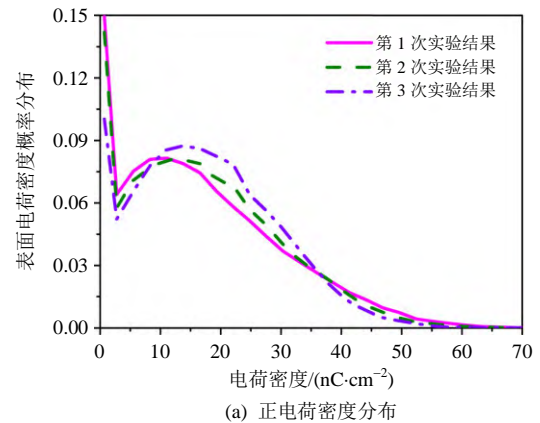


图5 第1个周期内表面电荷密度概率分布

Fig. 5 Probability distribution of surface charge density of the first cycle

表 2 第 1 个周期内不同密度区间上的电荷分布概率

Table 2 Probability of charge distribution on different density intervals of the first cycle

实验	密度区间/ (nC/cm ²)	正电荷概率 分布/%	密度区间/ (nC/cm ²)	负电荷概率 分布/%
第 1 次	[10, 40]	57.07	[-15, -5]	23.93
	[40, 70]	5.94	[-30, -15]	1.51
第 2 次	[10, 40]	60.69	[-15, -5]	34.99
	[40, 70]	4.58	[-30, -15]	4.5
第 3 次	[10, 40]	67.13	[-15, -5]	22.23
	[40, 70]	3.28	[-30, -15]	1.47

10%。与正电荷密度分布相同，负电荷密度分布也出现了较大的波动。负电荷主要分布在区间[-5, 0]上，其电荷密度总体要比正电荷小一个数量级。

3.2 残余电荷分布对后续放电的影响

第 2 个放电周期内的表面电荷测量结果和电流电压波形如图 6 所示。可知，第 2 个放电周期内的放电特性仍为单脉冲放电，但该电流波形相较于初次放电后第 1 个周期内的电流波形更为稳定。3 次实验的正负放电电流幅值分别为 5.38、5.31、5.18 和 -4.98、-4.78、-5.8mA。电流幅值波动较小，脉宽在 1μs 左右。相比于初次放电，正电流脉冲的相位由正弦电压峰值附近提前至正弦电压上升沿区间上，放电相位在不同次放电中仍具有较大的随机性，波动较大。在正放电前，上一次放电产生的负表面残余电荷会增强气隙电场，使得在更低的电压下就能达到击穿场强，进而使得放电发生的相位提

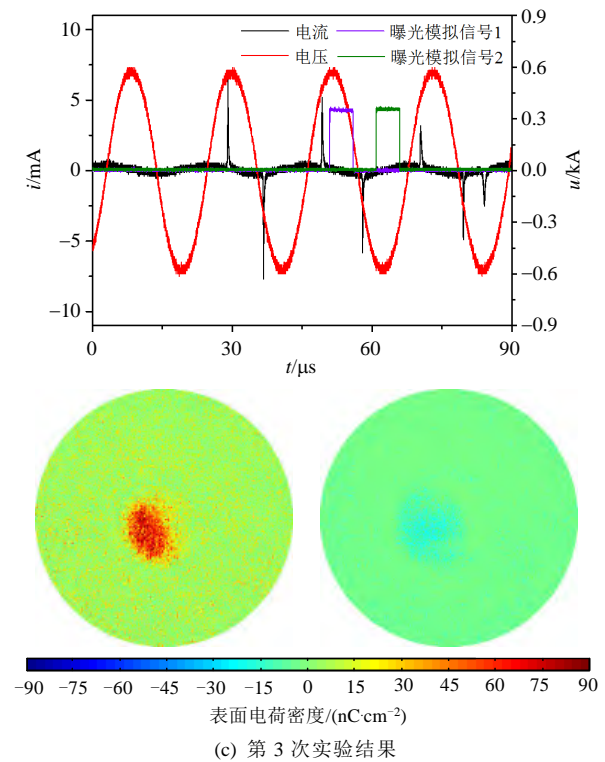
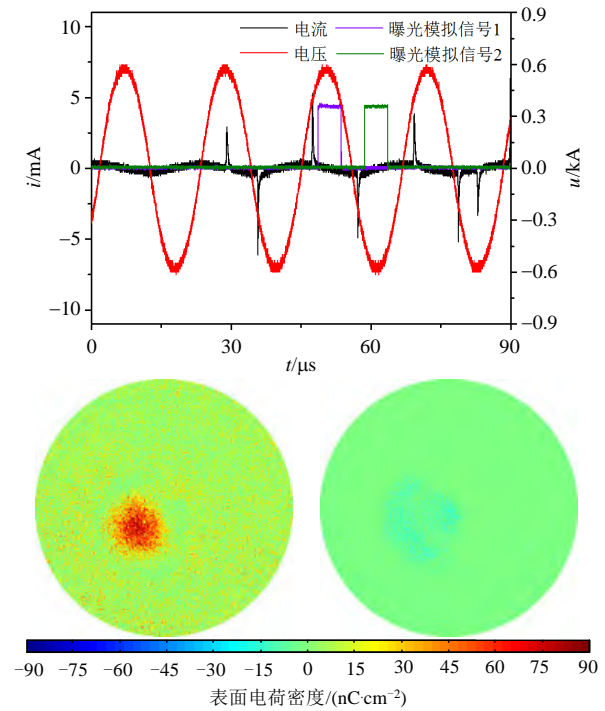
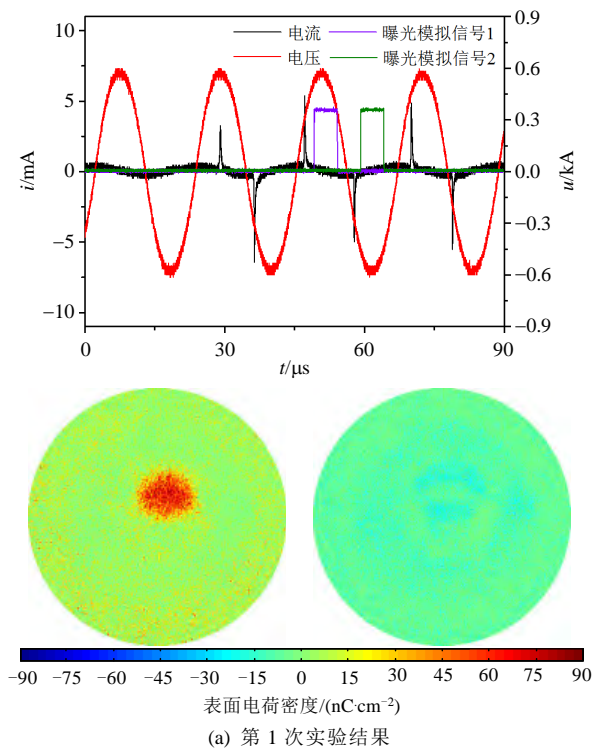


图 6 第 2 个周期的放电波形和表面电荷分布
Fig. 6 Discharge waveform and surface charge distribution of the second cycle

前。由于前两次负放电前总有正表面残余电荷增强气隙电场，加之放电前气隙中残余的空间带电粒子降低了放电的难度，使得负放电总能在过零点附近发生，其相位并没有太大变化。

由图 6 知，第 2 个放电周期内的正表面残余电荷形状相对固定，但电荷斑的具体大小仍会发生变

化。图 6(a)中的正电荷为椭圆形电荷斑，其长短轴分别为 2.5、2mm；图 6(b)中的正电荷为圆形电荷斑，其直径为 2mm；图 6(c)中的正电荷为椭圆形电荷斑，长短轴分别为 2.5、1.5mm。在不同次的放电中电荷斑的具体位置会发生变化，但都位于电极区域中心位置附近。图 6 中表面电荷的占有率和电荷总量如表 3 所示。

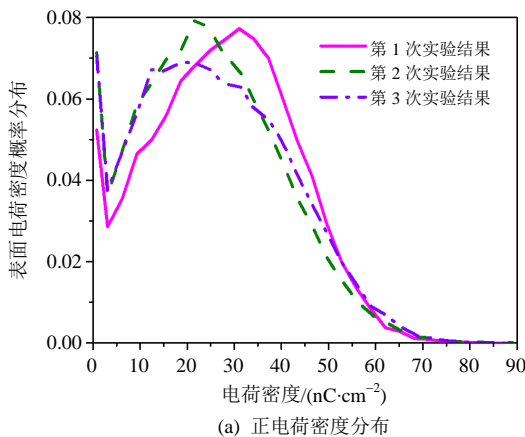
表 3 第 2 个周期内表面电荷占有率和电荷总量

Table 3 Surface charge occupancy and total charge of the second cycle

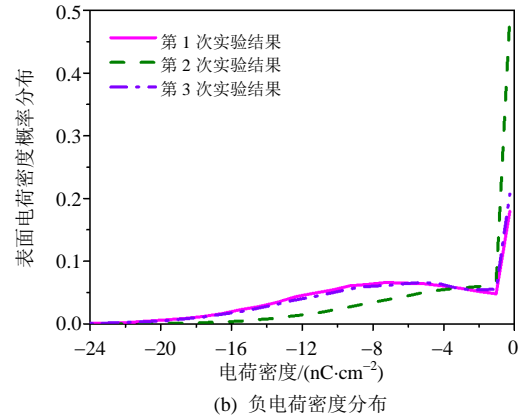
实验	正电荷斑 占有率/%	负电荷斑 占有率/%	正电荷 总量/nC	负电荷 总量/nC
第 1 次	6.85	8.71	1.85	-0.67
第 2 次	7.39	6.97	1.81	-0.38
第 3 次	7.91	6.4	2.01	-0.48

正负电荷的占有率在 7%左右，相比于初次放电有所降低，即第 2 次放电产生的电荷斑的面积减小，放电区域收缩。负表面电荷总量仍远小于正电荷，正表面电荷总量在 1.9nC 左右，负表面电荷总量位于-1nC 以内，电荷量相比于初次放电有所降低。在图 6(b)、6(c)中可以看到正负表面电荷斑的位置重合，但图 6(a)中这一现象并不明显。因此第 2 个周期已出现了正负表面电荷斑重合的情况，而这一现象在初次放电中并不明显。

图 7 为第 2 个周期中表面电荷密度概率分布。将图 7(a)和图 5(a)对比可知，相比于放电第 1 个周期内的正表面残余电荷分布情况，在 10nC/cm² 以内范围内，第 2 个放电周期内的正电荷概率密度分布减小。电荷在不同密度区间上的分布概率如表 4 所示。在高数值密度区间[40, 70]上的分布概率在多次实验中变化较小。3.1 节对同样的区间计算了概率密度分布。通过对比可知，在电荷密度区间[10, 40] 上，前两个周期的正表面残余电荷分布概率相近；在电荷密度区间[40, 70]上，第 2 个放电周期表面电荷



(a) 正电荷密度分布



(b) 负电荷密度分布

图 7 第 2 个周期内表面电荷密度概率分布

Fig. 7 Probability distribution of surface charge density of the second cycle

表 4 第 2 个周期内不同密度区间上的电荷分布概率

Table 4 Probability of charge distribution on different density intervals of the second cycle

实验	密度区间/ (nC/cm ²)	正电荷 概率分布/%	密度区间/ (nC/cm ²)	负电荷 概率分布/%
第 1 次	[10, 40]	66.68	[-15, -5]	46.24
	[40, 70]	17.05	[-30, -15]	7.63
第 2 次	[10, 40]	65.63	[-15, -5]	20.95
	[40, 70]	13.01	[-30, -15]	1.24
第 3 次	[10, 40]	62.79	[-15, -5]	42.85
	[40, 70]	16.05	[-30, -15]	6.88

分布概率约是第 1 个周期的 3 倍。

将二分幅系统触发信号和示波器触发的时间预先设置为两个电压周期，调整触发延迟时间，测得的第 3 个放电周期内的表面电荷分布和电流电压波形如图 8 所示。

由图 8 可知，第 3 个放电周期内，正半周的电流波形为单脉冲，负半周期的电流波形为双脉冲。图 4 和图 6 中第 3 个放电周期内的电流波形也大多呈现出这样的特点。正放电脉冲的相位仍处于正弦电压的上升沿，负放电的相位靠近过零点。两次实验中，正负放电电流幅值分别为 3.62、4.97 和-5.01、-6.05mA。电流脉宽同样在 1μs 左右。电流波形在不同次放电中仍不稳定，即第 3 个放电周期内放电依然没有稳定。图 8 中表面电荷占有率和电荷总量如表 5 所示。第 3 次放电的表面电荷占有率在 7%左右，正表面电荷总量在 1.8nC 左右，负表面电荷总量在-1nC 以内，与第 2 次放电的情况接近。

由表面电荷测量结果可知，正电荷斑接近圆形，形状相比于第 2 周期更为固定。两次实验结果测得的放电斑位置虽然并不重合，但直径均为 1.8mm。因此第 3 周期表面电荷斑的形状和大小相

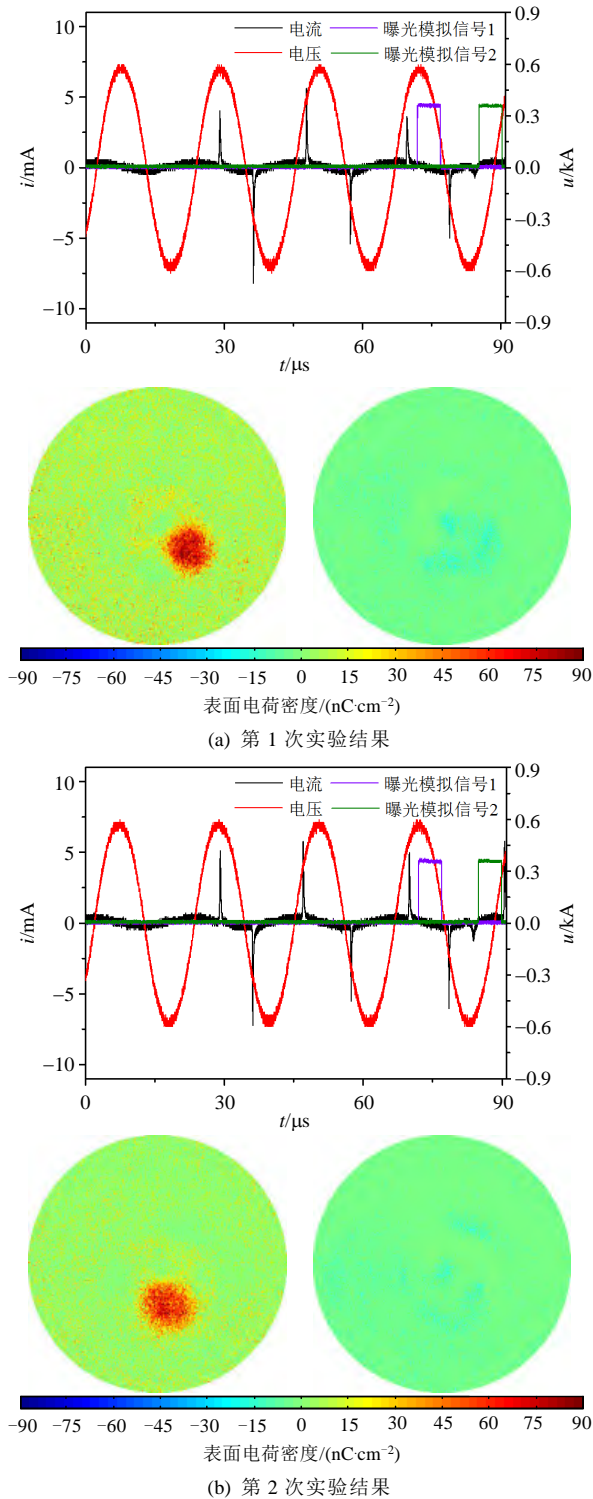


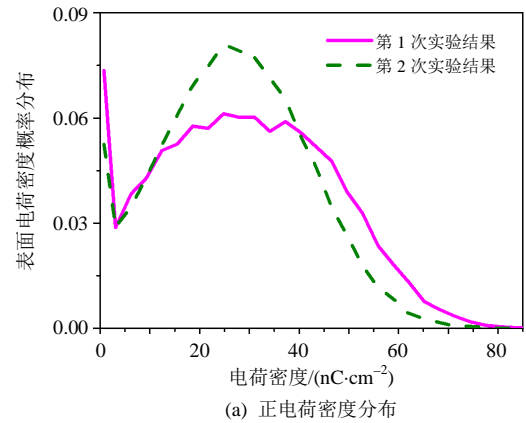
图 8 第 3 个周期的放电波形和表面电荷分布
Fig. 8 Discharge waveform and surface charge distribution of the third cycle

比于前 2 个周期更为稳定。与前 2 个周期的情况类似，第 3 个周期的负电荷密度仍然较小。

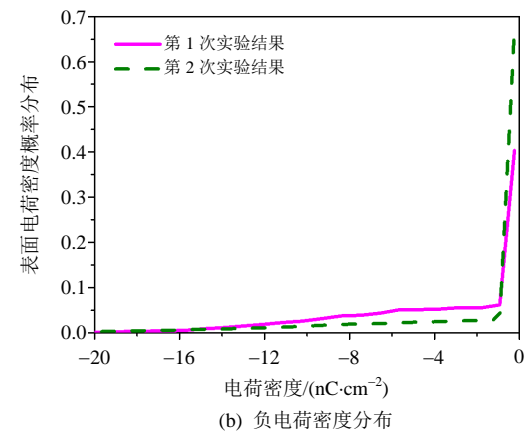
第 3 个放电周期的表面电荷密度概率密度分布图如图 9 所示。正表面电荷密度主要分布在大于 10 nC/cm² 的密度区间。电荷在不同密度区间上的分布概率如表 6 所示。相比于第 2 个放电周期，第

表 5 第 3 个周期内表面电荷占有率和电荷总量
Table 5 Surface charge occupancy and total charge of the third cycle

实验	正电荷斑 占有率/%	负电荷斑 占有率/%	正电荷 总量/nC	负电荷 总量/nC
第 1 次	6.2	7.43	1.81	-0.44
第 2 次	6.99	7.6	1.85	-0.49



(a) 正电荷密度分布



(b) 负电荷密度分布

图 9 第 3 个周期内表面电荷密度概率分布
Fig. 9 Probability distribution of surface charge density of the third cycle

表 6 第 3 个周期内不同密度区间上的电荷分布概率
Table 6 Probability of charge distribution on different density intervals of the third cycle

实验	密度区间/ (nC/cm ²)	正电荷概率分 布/%	密度区间/ (nC/cm ²)	负电荷 概率分布/%
第 1 次	[10, 40]	57.06	[-15, -5]	68.63
	[40, 70]	24.57	[-30, -15]	15.45
第 2 次	[10, 40]	30.26	[-15, -5]	14.71
	[40, 70]	1.78	[-30, -15]	0.50

3 个放电周期内的正残余电荷密度在[40,70]密度区间上的分布概率增大。第 3 个放电周期内负电荷密度依然远小于正电荷。

4 稳定放电时的表面电荷分布

在经过多个放电周期后，此时放电电流将在多

个周期内维持稳定,认为其处于稳定放电状态。相比于前3个放电周期的情况,放电稳定时,负电荷斑的密度明显增大。受电荷在介质表面迁移率的影响,负电荷斑的直径大于正电荷斑。表面电荷总量和表面电荷占有率如表7所示。表面电荷斑占有率相比于第2和第3个放电周期略有增加,相比于前3个放电周期,正表面电荷总量减少,而负表面电荷总量有所增加。

表7 稳定放电时的表面电荷占有率和电荷总量

Table 7 Surface charge occupancy rate and total charge during stable discharge

电荷极性	表面电荷占有率/%	表面电荷总量/nC
正放电残余	7.93	1.59
负放电残余	8.5	-1.44

稳定放电时的表面残余电荷密度概率分布如图10所示,电荷在不同密度区间上的分布概率如表8所示。相比于前3个放电周期的情况,正电荷斑密度在[40,70]电荷密度区间上的分布概率降低,而负电荷在区间[-30,-15]上的分布概率提高。正电荷在[0,40]上的分布概率可达90.58%,负电荷在[-30,0]上的分布概率可达90.91%。正负残余电荷密

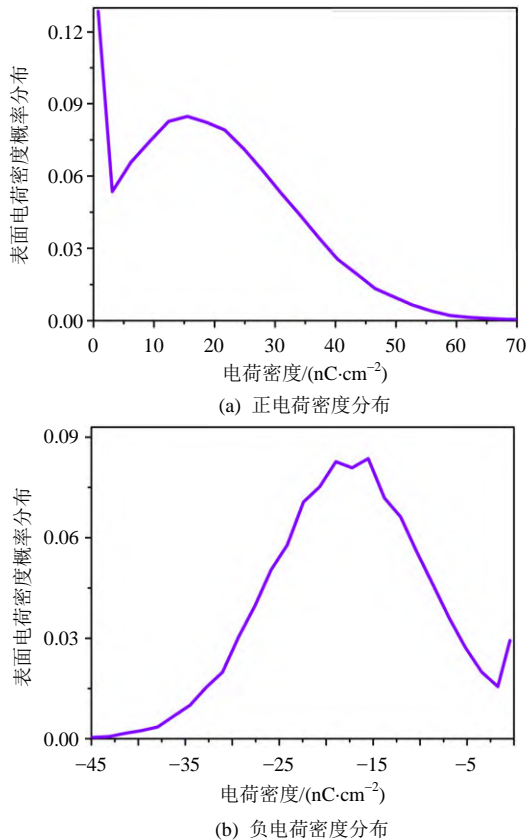


图10 稳定放电时表面电荷密度概率分布
Fig. 10 Probability distribution of surface charge density during stable discharge

表8 稳定放电时不同密度区间上的电荷分布概率

Table 8 Probability of charge distribution in different density intervals during stable discharge

密度区间/ (nC/cm ²)	正电荷概率 分布/%	密度区间/ (nC/cm ²)	负电荷 概率分布/%
[10, 40]	67.9	[-15, -5]	30.29
[40, 70]	5.87	[-30, -15]	62.23

度总体接近。

5 表面电荷变化过程分析

通过对放电起始过程及稳定放电时的测量结果比较可知,在稳定放电的演化过程中,表面电荷在形状、大小、位置和电荷密度概率分布等方面经历了一个从不稳定到稳定的演变过程,且表面电荷动态分布对起始过程中的放电特性产生了重要的影响。放电在经历了一段时间的起始过程后才逐渐稳定,最终保持了放电位置和电流波形的稳定性。

如图11(a)所示,在气隙的首次正放电后,介质表面积累的电荷斑呈现出月牙形状分布,积聚的正电荷产生的电场表示为 E_Q ,在外加电压过零点后

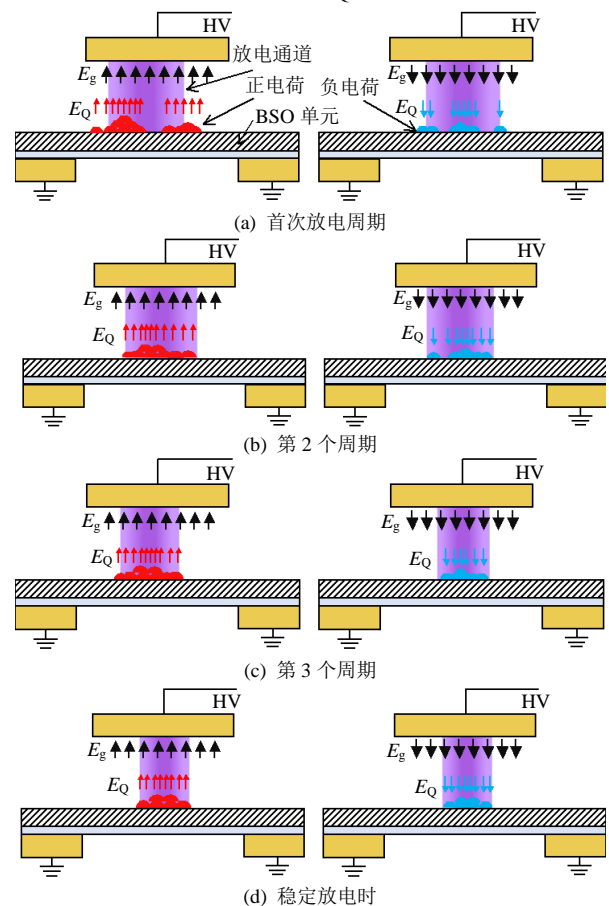


图11 表面电荷分布变化示意图
Fig. 11 Schematic diagram of surface charge distribution changes

将与气隙电场 E_g 方向一致(图 11(a)中红色箭头越集中代表电场强度越强),使得这些区域的气隙电场增强,则负放电更容易发生在这些区域。在负放电发生后,之前积累的正电荷将被中和消散,此时负电荷主要分布在之前月牙型正电荷斑的中心区域与外围边界区域,从电荷斑在电极表面的占有率也能看出,第 1 次负放电后,电荷斑分布范围较大,相对于正放电,负放电在介质表面的电荷量较少,但能发现在电极的中心区域负电荷密度明显高于周围。此外值得注意的是,首次负放电的放电脉冲幅值一般较大,而介质表面积累的电荷量却很少,这首先是因为放电产生的负电荷大部分中和了之前正放电中介质表面积累的正电荷,其次是因为负电荷(电子)质量小,其在介质表面的消散速度比正电荷(离子)更快^[31]。

如图 11(b)所示,在放电进入第 2 个周期后,放电斑的电极表面占有率明显减小,此时虽然电荷量有所降低,但电荷在高密度区间上的分布概率有明显增大,即电荷分布更为集中。正是由于团聚在介质表面的首次负放电产生的负电荷与在气隙的放电通道残存的带电粒子的共同作用^[30],产生的反向内建电场有利于正电荷在放电间隙的扩散运动而到达介质表面,使得第 2 次正放电通道更容易出现在该位置,表现出一定的“电荷记忆”效应,第 2 周期的多次实验结果均观测到介质表面确定位置团聚,说明了表面残余电荷对稳定放电丝形成过程的影响。同样,第 2 周期的负放电积聚的电荷斑也开始出现团聚现象,这直接影响到下一个周期的正放电。从第 3 个周期直到放电稳定时,如图 11(c)、(d)所示,此时正、负放电后的电荷斑均呈现出团聚现象。负电荷斑的团聚更为显著。在团聚区域,较大的电荷密度在下次放电时对气隙电场产生较大的增强作用,促使放电在同一位置反复发生,有利于保证放电电流幅值和相位的稳定性。

从首次放电到放电丝稳定的演化过程中,放电电流脉冲幅值在开始时稳定性低,变化具有一定的随机性,但随着放电次数的增加,正、负电荷斑在内建电场的作用下沿介质表面分布逐渐集中,表面残余电荷使得同极性的放电量较首次放电降低,最终发展为比较稳定的值,且正、负放电量与电荷在电极表面的占有率基本相同,表面电荷“记忆效应”在整个放电演化过程中起到了引导放电向稳定发展的重要作用。

6 结论

本文在气隙高度为 1mm,电压频率为 46kHz,幅值为 600V 下,观测到大气压氦气 DBD 稳定放电形态,并探究起始放电连续周期内和稳定放电的表面电荷分布特性及其对放电特性的影响,主要结论如下:

1) 稳定放电形成过程中的电流脉宽为微秒量级,初次放电为正放电,且相位在电压峰值时刻附近。后续正放电的放电时刻处于电压波形上升沿,负放电的放电相位总在电压过零点附近,初次放电的表面电荷占有率和表面电荷总量大于后续放电。

2) 在整个稳定放电形成过程中,起始放电后几个周期内表面电荷斑位置和形状不固定,正负电荷位置不重合,正电荷斑直径变化范围为 1.5~2.5mm,在放电稳定后,正负电荷斑重合度较高,积聚电荷量基本相同,分别为 1.59 与 -1.44nC;

3) 介质表面积聚的电荷在放电的发展过程中,使得放电丝的产生位置更为固定,减少了电荷在介质表面的分散,在多次放电后,正负表面电荷相互中和,最终使得电荷斑的位置、大小与放电量维持在一种稳定状态。即表面电荷的记忆效应是平板电极中放电丝处于稳定的关键机制。

参考文献

- [1] 戴栋, 宁文军, 邵涛, 等. 大气压低温等离子体的研究现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 1-9.
Dai Dong, Ning Wenjun, Shao Tao, et al. A review on the state of art and future trends of atmospheric pressure low temperature plasmas[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 1-9(in Chinese).
- [2] 梅丹华, 方志, 邵涛. 大气压低温等离子体特性与应用研究现状[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1339-1358.
MEI Danhua, FANG Zhi, SHAO Tao, et al. Recent progress on characteristics and applications of atmospheric pressure low temperature plasmas [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1339-1358(in Chinese).
- [3] Cui Weisheng, Liu Wenzheng, Wang Tahan, et al. The application of atmospheric pressure dielectric barrier discharge plasma on the cleaning of photovoltaic panels[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(2): 328-335.
- [4] 于大海, 叶齐政. 旋转电极 5kHz 介质阻挡放电臭氧制备[J]. 高电压技术, 2016, 42(2): 439-445.
Yu Dahai, Ye Qizheng. Ozone generation using 5kHz

- dielectric barrier discharge with rotating electrode[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(2): 439-445(in Chinese).
- [5] A. Madhukar, B. S. Rajanikanth. Waste foundry sand/bauxite residue for enhanced NO_x reduction in diesel exhaust pretreated with plasma/O₃ injection[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2019, 47(1): 376-386.
- [6] Gutiérrez-León D G, López-Callejas R, Peña-Eguiluz R, et al. Experimental evaluation of DBD reactor applied to bacterial inactivation in water flowing continuously [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(11): 2653-2659.
- [7] 海彬, 章程, 王瑞雪, 等. 等离子体沉积类 SiO₂ 薄膜抑制环氧树脂表面电荷积聚[J]. 高电压技术, 2017, 43(2): 375-384.
Hai Bin, Zhang Cheng, Wang Ruixue, et al. Plasma depositing SiO₂-like film to suppress surface charge accumulation on epoxy resin[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 375-384(in Chinese).
- [8] 郝艳捧, 韩玉英, 黄之明, 等. 大气压氦气介质阻挡柱状放电的形成条件[J]. 高电压技术, 2019, 45(04): 1323-1331.
HAO Yanpeng, HAN Yuying, HUANG Zhiming, et al. Forming conditions of dielectric barrier columnar discharges in atmospheric-pressure helium[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(04): 1470-1477(in Chinese).
- [9] Tschiersch R., NemschokmichaL S., Bogaczyk M., et al. Surface charge measurements on different dielectrics in diffuse and filamentary barrier discharges[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2017, 50(10): 105207.
- [10] 郝艳捧, 郑彬, 刘耀阁. 大气压氦气介质阻挡斑图放电与辉光放电的转换条件及其演化过程[J]. 高电压技术, 2012, 38(07): 1568-1575.
HAO Yanpeng, ZHENG Bin, LIU Yaoge. Conversion and evolution process of patterned discharges to glow discharges in atmospheric-pressure helium dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(07): 1568-1575(in Chinese).
- [11] Murooka Y, Koyama S. Nanosecond surface discharge study by using dust figure techniques[J]. Journal of Applied Physics. 1973, 44(4): 1576-1580.
- [12] 邓军波, 王涵, 薛建议, 等. 基于静电探头法的表面电荷密度分布及电场分布改进反演算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(4): 1239-1247.
Deng Junbo, Wang Han, Xue Jianyi, et al. Improved reverse algorithm of surface charge density distribution and electric field distribution based on electrostatic probe[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4): 1239-1247(in Chinese).
- [13] Zhang B, Xue JY, Chen XY, et al. Review of surface transient charge measurement on solid insulating materials via the Pockels technique[J]. High Voltage, 2021, 6(4): 608-624.
- [14] 欧阳帆, 吴淑群, 刘旭晖, 等. 管内氦等离子体的电场诊断与传播过程研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 6116-6127.
OUYANG Fan, WU Shuqun, LIU Xuhui, et al. Study on the Electric Field Measurement and Propagation of Helium Plasma in the Tube[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 6116-6127(in Chinese).
- [15] Huang B, Zhang C, Adamovich I, et al. Surface ionization wave propagation in the nanosecond pulsed surface dielectric barrier discharge: the influence of dielectric material and pulse repetition rate[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(4): 044001.
- [16] Orr K, Yang X, Gulko I, et al. Formation and propagation of ionization waves during ns pulse breakdown in plane-to-plane geometry[J]. Plasma Sources Science and Technology, 2020, 29(12): 125022.
- [17] 白晗, 黄邦斗, 丘锦涛, 等. 基于场致激光二次谐波产生原理的纳秒脉冲电场非介入测量方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5700-5706.
BAI Han, HUANG Bangdou, QIU Jintao, et al. Investigation on non-intrusive measurement of nanosecond-pulsed electric field based on electric field induced second harmonic generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5700-5706(in Chinese).
- [18] Yurgelenas Y V, Wagner H E. A computational model of a barrier discharge in air at atmospheric pressure: The role of residual surface charges in microdischarge formation [J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2006, 39(18): 4031-4043.
- [19] Bogaczyk M, Wild R, Stollenwerk L, et al. Surface charge accumulation and discharge development in diffuse and filamentary barrier discharges operating in He, N₂ and mixtures[J]. Journal of Physics D Applied Physics, 2012, 45(46): 465202.
- [20] Akishev Y, Aponin G, Balakirev A, et al. 'Memory' and sustention of microdischarges in a steady-state DBD: volume plasma or surface charge?[J]. Plasma Sources Science Technology, 2011, 20(2): 024005.
- [21] Tschiersch R, NemschokmichaL S, Bogaczyk M, et al. Self-stabilized discharge filament in plane-parallel barrier discharge configuration : formation , breakdown mechanism, and memory effects[J]. Journal of Physics D Applied Physics. 2017, 50(41): 415206.
- [22] Du Y, Meng Y, Wu K, et al. Influence of gas flow on partial discharge behaviors in air and nitrogen[J]. IEEE Transactions on Plasma Science. 2019, 47(1): 136-144.
- [23] Wild R, Benduhn J, Stollenwerk L. Surface charge

- transport and decay in dielectric barrier discharges [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2014, 47(43): 435204.
- [24] Golubovskii Y B, Maiorov V A, Behnke J, et al. Influence of interaction between charged particles and dielectric surface over a homogeneous barrier discharge in nitrogen [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2002, 35(8): 751.
- [25] K. Wu, C. Pan, Y. P. Meng, et al. Dynamic behavior of surface charge distribution during partial discharge sequences[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2013, 20(2): 612-619.
- [26] 万海容, 郝艳捧, 房强, 等. 大气压氦气介质阻挡放电单-多柱演化动力学[J]. *物理学报*, 2020, 69(14): 169-178.
Wan Hai-Rong, Hao Yan-Peng, Fang Qiang, et al. Evolutionary dynamics of single-multiple columns in atmospheric helium dielectric barrier discharge[J]. *Acta Physica Sinica*, 2020, 69(14): 169-178(in Chinese).
- [27] Y. L. Sam, Surface charge measurement by Pockels effect[D] Ph.D. Thesis University of Southampton, Southampton, 1993.
- [28] Kawasaki T, Terashima T, Suzuki S, et al. Ac surface discharge on dielectric materials observed by advanced Pockels effect technique[J]. *Journal of Applied Physics*. 1994, 76(6): 3724-3729.
- [29] 高翀. 大气压介质阻挡放电中介质表面电荷测量系统的研制[D]. 西安交通大学, 2018.
GAO Chong. Development of Measurement System for Dielectric surface charges in atmospheric dielectric barrier discharge[D]. Xi'an Jiaotong University, 2018(in Chinese).
- [30] K. Wu, C. Pan, Y. P. Meng, et al. Study on the Characteristics of partial discharges in voids under square voltage by detecting light emission intensity[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2011, 18(5): 1651-1657.
- [31] BLAISE G, GRESSUS C L. Charging and flashover induced by surface polarization relaxation process [J]. *Journal of Applied Physics*, 1991, 69(9): 6334-6339.



黄寅

在线出版日期: 2022-04-14。

收稿日期: 2021-11-11。

作者简介:

黄寅(1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为大气压介质阻挡放电与等离子体, huangyin0818@qq.com;

*通信作者: 孟永鹏(1976), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为介质阻挡放电与等离子体, 电力设备状态监测与故障诊断等, mypphd@mail.xjtu.edu.cn。

(编辑 胡琳琳)

Influence of Surface Charge on Development of Dielectric Barrier Discharge

HUANG Yin, MENG Yongpeng*, MA Xinzhe, WU Kai, CHENG Yonghong

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University))

KEY WORDS: Surface charge; Dielectric barrier discharge; Discharge development; Atmospheric pressure helium; Pockels effect

Atmospheric pressure dielectric barrier discharge (DBD) has been widely used in the plasma industry because of its ability to generate a large amount of non-equilibrium low-temperature plasma. The in-depth analysis of the formation and evolution of the discharge morphology will help to deepen the understanding of the relevant discharge characteristics and improve the DBD control method, which has important practical significance for its application in industry.

To reveal the formation mechanism of discharge from the perspective of surface charge, this paper establishes an atmospheric pressure DBD high-speed surface charge measurement system with a time resolution of μs based on the Pockels effect. The structure of the observation system is shown in Fig. 1. The effect of surface charge on the formation and development of stable discharge under atmospheric pressure helium is investigated.

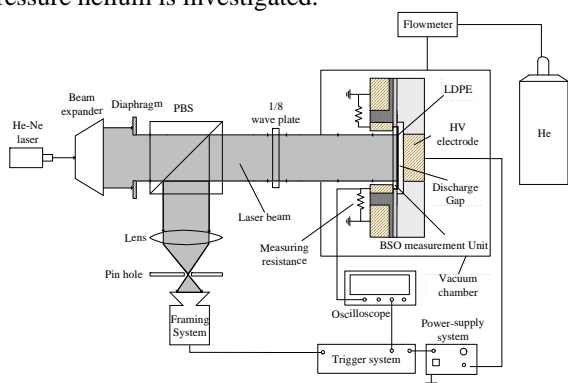


Fig. 1 Structure diagram of surface charge measurement system

The surface charge distribution of self-stable discharge is shown in Fig. 2. In this kind of discharge mode, the positions of the positive and negative discharge spots are fixed and have high coincidence. The shapes are close to a circle, and the diameters are about 2.39mm and 2.76mm, respectively. The discharge capacity is 1.59nC and -1.44nC respectively. The discharge current is a typical single pulse discharge waveform, and the amplitude, pulse width and phase remain stable in different cycles.

The surface charge distribution in the three cycles after the initial discharge is shown in Fig. 3. After the first positive discharge of the air gap, the charge spots show a crescent-shaped distribution, and the amount of charge accumulated on the surface of the dielectric is relatively large. After the negative discharge occurs, the accumulated positive charge will be neutralized and dissipated. At this time, the negative charge is mainly distributed in the central area and the outer boundary area of the crescent-shaped positive charge spot. After the

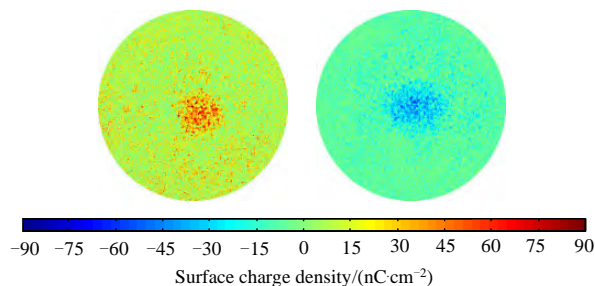


Fig. 2 Surface charge distribution of self-stabilizing discharge

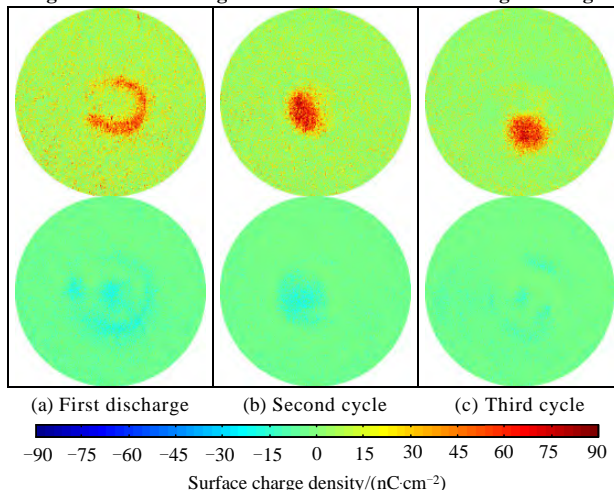


Fig. 3 Surface charge distribution of the three cycles after the first discharge

discharge enters the second cycle, as shown in Fig. 3(b), the charge distribution is more concentrated at this time, which will directly affect the positive discharge in the third cycle. From the third cycle until the discharge is stable, the charge spots after positive and negative discharges all show agglomeration. In the agglomeration area, the larger charge density will have a greater enhancement effect on the air gap electric field during the next discharge, making the position of the discharge wire more fixed and the phase of the discharge more stable.

In the evolution process from the first discharge to the stable discharge wire, although the amplitude of the discharge current fluctuates and has a certain randomness, the overall change is that the distribution of positive and negative charge spots gradually concentrates. The discharge volume is lower than the first discharge, and finally a relatively stable value, and the positive and negative discharge volume is basically the same as the occupancy rate. The surface charge memory effect plays an important role in guiding the discharge to a stable development during the entire discharge evolution process.