

氦气下介质阻挡放电表面电荷分布规律

黄寅, 孟永鹏, 马鑫哲, 吴锴, 成永红

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为探究表面电荷在介质阻挡放电(DBD)放电模式转化中的作用机制,对不同电压参数下的表面电荷分布进行了实验研究。首先,根据 Pockels 效应搭建了微秒级分辨率的表面电荷测量系统,并使用该系统测量常压氦气环境中平板电极在不同电压参数下的介质表面电荷密度二维分布与放电电流波形,统计表面电荷在各密度区间中的概率分布;然后,根据得到的电流波形、表面电荷密度二维分布与概率分布,对不同电压参数下的放电模式进行了判断;最后,分析不同放电模式的电荷密度二维分布与概率分布,得到外加电压参数变化时介质表面电荷对放电模式转化的作用机制:在下次放电前,介质表面积聚的电荷与气隙中残存的带电粒子会产生反向电场,使得放电更容易在该区域发生,从而促使放电模式从均匀放电向丝状放电演化。实验结果表明:随着电压的增加,表面电荷分布从单个电荷斑逐渐向多个电荷斑转变,放电模式表现为不同形式的丝状放电;随着频率的增大,表面电荷分布由均匀分布转变为电荷斑分布,且电荷斑直径不断增大,电荷总量从 0.21 nC 增加到 0.41 nC。研究结果可为表面电荷对常压介质阻挡放电中放电模式演化的影响机制提供参考。

关键词: 介质阻挡放电;表面电荷分布;放电特性;常压氦气;Pockels 效应

中图分类号: TM85 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtuxb202210011 **文章编号:** 0253-987X(2022)10-0111-11

Distribution Rule of Surface Charge of Dielectric Barrier Discharge in Helium Environment

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, China)

Abstract: An experiment research is made on the surface charge distribution under different voltage parameters to explore the mechanism of action of the surface charge in the transformation of the discharge mode featuring dielectric barrier discharge (DBD). Firstly, a surface charge measurement system with a microsecond-level resolution is built according to the Pockels effect. The system is used to measure the two-dimensional distribution of the dielectric surface charge density and discharge current waveform of the flat electrode in atmospheric pressure helium environment under different voltage parameters, and the probability distribution of surface charge in each density interval is counted. The discharge modes under different voltage parameters are judged according to the current waveform, two-dimensional distribution and probability distribution of surface charge density. Finally, the two-dimensional distribution of charge density and probability

收稿日期: 2022-04-27。 作者简介: 黄寅(1998—),男,硕士生;孟永鹏(通信作者),男,博士,高级工程师,硕士生导师。
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51677143,52130703)。

网络出版时间: 2022-06-07

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20220606.1614.006.html>

distribution in different discharge modes are analyzed, and the mechanism of action of the dielectric surface charge on the transformation of discharge mode with the change of the applied voltage parameters is obtained. Before the next discharge, the charges accumulated on the dielectric surface and the remaining charged particles in the air gap will generate a reverse electric field, making the discharge easier occur in this area, thus promoting the evolution of the discharge mode from uniform discharge to filamentous discharge. The experimental results show that with the increase of voltage, the surface charge distribution gradually changes from a single charge spot to multiple charge spots, and the discharge mode shows different forms of filament discharge. With the increase of frequency, the surface charge distribution changes from a uniform distribution to a charge spot distribution. The diameter of the charge spot increases continuously, and the total charge increases from 0.21 nC to 0.41 nC. The results can provide a reference for the mechanism of the influence of surface charges on the evolution of discharge modes in DBD under an atmospheric pressure.

Keywords: dielectric barrier discharge; surface charge distribution; discharge characteristics; atmospheric pressure helium; Pockels effect

介质阻挡放电 (dielectric barrier discharge, DBD) 是常压下产生低温等离子体的主要方式^[1-3]。由于其不需要昂贵的真空设备, 工艺流程简单^[4-5]等诸多优点, 在臭氧合成^[6]、表面处理^[7]、生物医学^[8]、薄膜工艺^[9]等领域得到了广泛的应用, 同时也是气体放电领域的研究热点之一。常压 DBD 由体过程和面过程两部分组成^[10-11], 当放电从间隙发展到介质表面时, 带电粒子会在介质表面沉积并沿面扩展。由于表面电荷衰减和输运的时间尺度远大于放电周期, 在下一次放电前, 上次放电产生的残余电荷仍然存在, 表面电荷记忆效应影响将下次放电的放电强度和相位^[12-13]。因此, 表面电荷的分布及其对 DBD 特性的影响近年来已引起许多国内外研究者的关注。Tschiersch 等系统地测量了弥散类辉光放电的侧面发光图像和介质表面电荷, 对比了不同材料表面电荷分布的差异^[14]。Bogaczyk 等对多脉冲 DBD 产生的残余表面电荷进行了测量, 通过表面电荷分布得到的气隙电压的时空发展, 表明了表面电荷记忆效应保留了放电在空间上的不均匀性^[15]。Mu 等利用透射法探究了直流电压下针板电极结构正、负电荷二维分布的不同, 以及不同材料表面电荷分布的差异^[16]。Wild 等对介质表面电荷衰减过程进行了研究, 研究表明: 表面电荷衰减过程的时间在秒量级, 且电荷极性与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^[17]。Du 等研究了不同气氛中气流速度对放电特性和表面电荷分布的影响^[18]。但关于常压 DBD 表面电荷分布对放电特性及放电形态演变影响机制的相关报道仍然较少。

在常压氦气环境中, 放电模式更容易随外加电压条件的改变而转化, 有利于探究均匀放电与丝状放电等放电模式之间的转化规律和转化条件。本文搭建了基于 Pockels 效应的高时间分辨率表面电荷分布测量系统, 研究了在常压氦气中不同电压幅值和不同电压频率下的表面电荷分布特性, 得到了不同条件下均匀放电和丝状放电之间的转变规律以及不同放电形态下的表面电荷分布规律。研究结果有助理解表面电荷对常压氦气下 DBD 的放电形态形成与演化的作用机理。

1 实验系统与测量方法

1.1 测量系统结构

目前在交流电压驱动的常压 DBD 研究中常采用的工作周期一般为十几到几十微秒^[19-20], 这就要求基于 Pockels 效应的表面电荷测量系统的时间分辨率在微秒量级。所搭建的表面电荷测量系统如图 1 所示, 由电极单元、光学单元、触发器和电源系统等组成。驱动电源采用的是 CTP-2000K 型高频正弦电源, 光学单元由激光器 (632.8 nm)、扩束器、偏振分束器、光阑、1/8 波片、二分幅系统与 ICCD 相机等元件组成, 起到入射光的产生、光斑调整、光线分束和反射光光强记录等作用。

1.2 表面电荷测量原理

实现表面电荷的光学测量的核心是具有 Pockels 效应的硅酸铋晶体 (bismuth silicon oxide, BSO)^[21], 当气隙放电发生后, 介质表面有电荷沉积, 所形成的电场改变了 BSO 晶体对光的折射率,

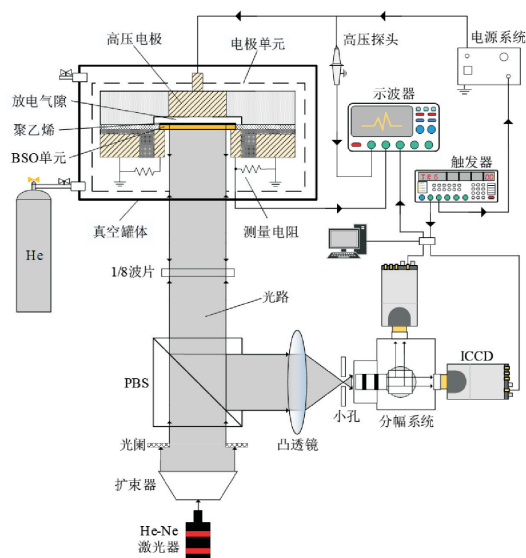


图 1 表面电荷测量系统图

Fig. 1 Diagram of surface charge measurement system

其折射率的改变,将产生光的相位延迟,从而使得 ICCD 相机接收到的光强发生改变。此外,为能在同一次放电中鉴别正负电荷,在光路中加入 $1/8$ 波片来改变光的偏振状态,从而区分介质表面积聚电荷的极性^[21],此时光强和相位延迟之间的关系式可以通过琼斯矩阵^[22]计算得出,即

$$I = I_0 \sin^2(\varphi + \frac{\pi}{4}) \quad (1)$$

光的相位延迟 ϕ 和表面电荷密度 σ 之间的线性关系为

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

式中: n_0 为无电场时的晶体折射率; γ_{41} 为电光系数; λ 为实验光的波长; d 、 ϵ_0 、 ϵ_{BSO} 分别为 BSO 晶体厚度、真空介电常数与晶体介电常数。

在表面电荷观测实验中,在电压施加在放电电极的前几十个或几百个放电周期内,放电的随机性较大,为保证在放电处于一个较为稳定状态时进行表面电荷拍摄,因此待高频正弦电压施加于放电单元 1 s 后,触发二分幅系统对表面电荷进行测量。ICCD 相机曝光时间设置为 $5 \mu\text{s}$,可调整两台相机的触发延迟,以实现正负放电结束后的介质表面残余电荷的拍摄。通过 ICCD 相机分别测得放电发生前后的反射光光强分布,利用式(1)可算得延迟相位二维分布,再利用式(2)可进一步得到表面电荷二维分布。

1.3 DBD 放电单元

放电电极单元中高压端为直径 10 mm 的铜电极,BSO 单元的结构如图 2 所示,BSO 晶体的尺寸为 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 0.16 \text{ mm}$ 。由于测量光路采

用反射式布局,实验光束通过 BSO 晶体上表面和下表面都会产生一个反射光,为区分反射光中带有放电信息的电荷斑,晶体上表面加工为 $6' \pm 2'$ 的倾角^[23],这时两束反射光通过凸镜汇聚将产生两个汇聚点,通过小孔将下表面的反射光滤除,从而得到含有介质表面电荷二维分布的反射光斑。

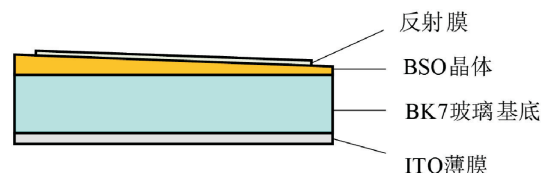


图 2 BSO 单元结构图

Fig. 2 Structure diagram of BSO cell

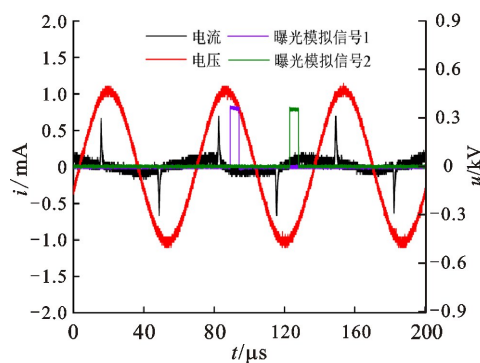
BSO 晶体上表面覆盖有 $6 \mu\text{m}$ 的聚乙烯薄膜,下表面粘贴在 0.8 mm 厚的 BK7 玻璃上,为晶体提供支撑与保护,BK7 玻璃的底面镀有一层 ITO 透明电极。测量电极与地电极之间跨接有 50Ω 的无感电阻,用以测量放电电流。

2 不同电压参数下的表面电荷分布

在 5 mm 气隙高度的条件下,将放电电极置于真空腔,对腔内抽真空至 4 Pa,然后充入纯度为 99.999% 的氦气至一个标准大气压。

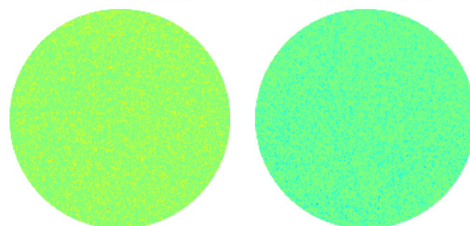
2.1 电压频率为 15 kHz 时不同幅值的表面电荷分布

固定电压频率为 15 kHz,并逐渐升高电压幅值,实验结果如图 3 所示。图 3 中的曝光模拟信号的上升沿时刻和脉宽分别对应两张表面电荷分布图的测量时刻和测量时 ICCD 的门宽。



曝光信号1拍摄

曝光信号2拍摄



(a) 450 V

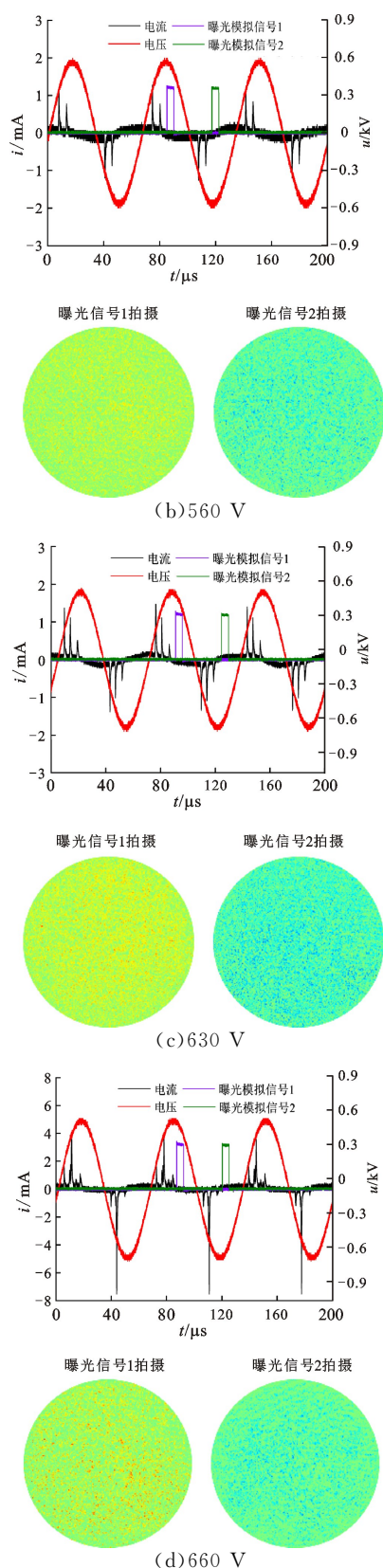


图3 频率为15 kHz时的表面电荷分布和放电波形

Fig. 3 The surface charge distribution and discharge waveform under the frequency is 15 kHz

电流脉冲的参数如表1所示。本文中电流脉宽指的是幅值最高的电流脉冲的半高宽,当放电周期中存在多个幅值较大的脉冲时,采用波动来表示放电的不稳定性。随着电压幅值的增高,电流脉宽和幅值增大。当电压幅值为450 V时,半个电压周期内只有一个电流脉冲,且电流的幅值和相位保持相对恒定,表面电荷均匀分布于介质表面。随着电压幅值的提高,电流脉冲由单脉冲向多脉冲演变,表面电荷密度增大。当电压幅值为560 V时,放电形态为双脉冲放电。电流脉冲在多个周期中具有重复性,属于时间上稳定的放电形态,表面电荷仍均匀分布于介质表面。当电压幅值为630 V时,半个电压周期内出现3个电流脉冲,电流的峰值和相位保持稳定,表面电荷分布图中出现了一些高电荷密度点。当电压幅值为660 V时,放电电流虽然仍为稳定的多个周期可重复的放电波形,但幅值最大的电流脉冲附近会有一些较小的电流脉冲,此时可明显观察到大量密集的放电丝,且表面电荷密度分布图中分散的高电荷密度点增多,放电形态已转变为丝状微放电。

表1 频率为15 kHz时4种电压下的电流脉冲参数
Table 1 Current pulse parameters with four voltages under frequency of 15 kHz

参数	数值			
	450 V	560 V	630 V	660 V
脉宽/ μs	2.0	2.4	3.1	3.4
正电流脉冲幅值/mA	0.69	1.17	1.40	3.83
负电流脉冲幅值/mA	-0.66	-1.20	-1.32	-7.16

本文采用表面电荷概率密度分布来对电荷密度二维分布做定量分析。介质表面电荷概率密度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内的分布百分比,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。

图4为正放电表面残余电荷密度分布统计分析的结果。由图4可知,在气隙宽度为5 mm时,高频正弦电压下常压氦气DBD的表面电荷密度在 nC/cm^2 量级。在电压为450~630 V时,表面电荷密度主要分布在 $20 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 以内,且随着电压的提高,在 $[6.2, 20] \text{ nC}/\text{cm}^2$ 电荷密度区间上概率密度分布曲线逐渐上移,即电荷概率密度分布向更高的电荷密度区间上移动,整个介质表面的残余电荷密度呈现增大趋势。

在450 V电压幅值下,电荷在 $[0, 10.86] \text{ nC}/\text{cm}^2$ 密度区间上的分布可达93.42%。当电压幅值增大

到630 V时,密度区间 $[0, 6.2]$ nC/cm^2 上的电荷分布从85.4%降到56.97%,密度区间 $[6.2, 20]$ nC/cm^2 上的电荷分布从14.17%增加到40.22%。当电压幅值从630 V增加到660 V时,在大于22 nC/cm^2 的电荷密度区间上概率密度分布曲线上移,在 $[3.1, 22]$ nC/cm^2 区间上概率密度分布曲线下移。

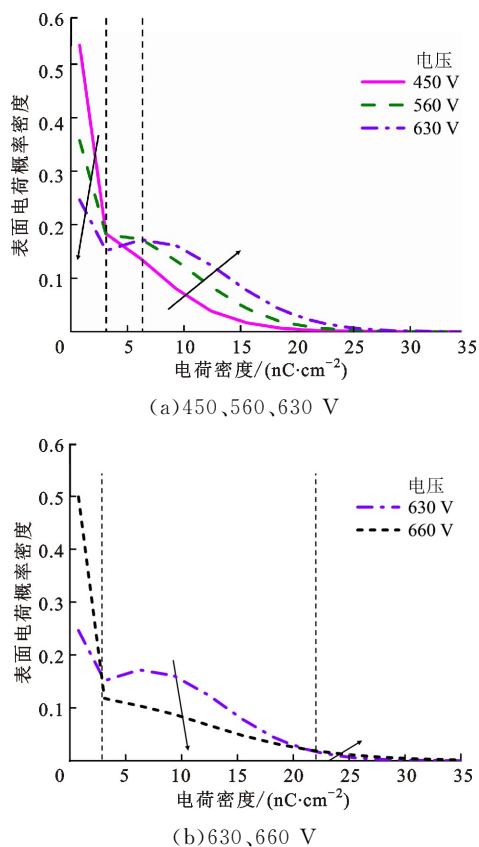
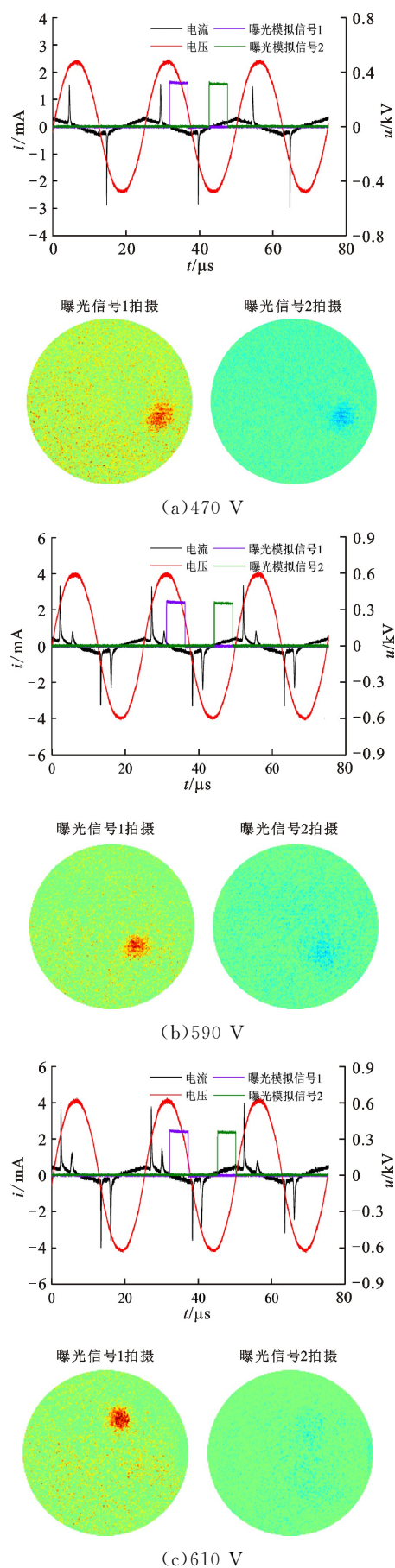


图4 频率为15 kHz时4种电压下正表面电荷概率密度分布
Fig. 4 Probability distribution of positive surface charge with four voltages under frequency of 15 kHz

2.2 电压频率为40 kHz时不同幅值的表面电荷分布

在频率为40 kHz时的实验结果如图5所示,其中电流脉冲的参数如表2所示。可以看到,随着电压幅值的升高,半个周期内的电流脉冲数增多,幅值呈增大趋势。当电压幅值为470 V时,电流波形在半个电压周期内只有一个脉冲,电流脉宽在 $2.2 \mu\text{s}$ 左右,幅值和相位在多个电压周期内保持稳定。当电压幅值增大到590 V时,放电电流波形由单脉冲演变为双脉冲,峰值保持稳定。当电压幅值为610 V时,负电流的峰值开始随时间发生波动,放电电流的脉宽仍保持在微秒量级。当电压幅值达到660 V时,电流峰值波动更加明显,正半周内仍是两个电流脉冲,而在负半周出现了3个放电脉冲。



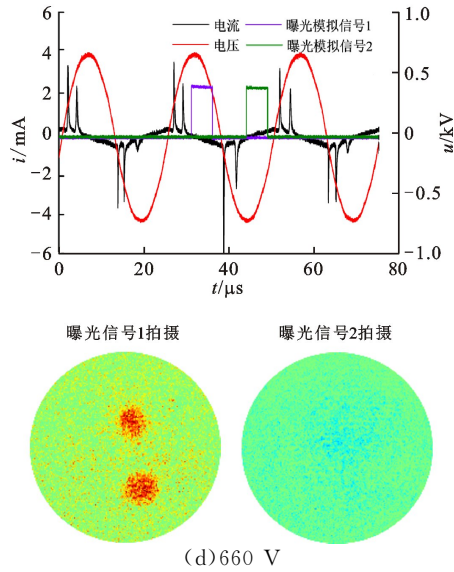


图 5 频率为 40 kHz 时的表面电荷分布和放电波形

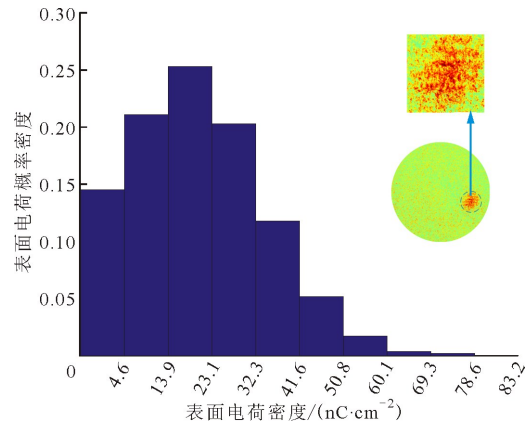
Fig. 5 The surface charge distribution and waveform under the frequency is 40 kHz

表 2 频率为 40 kHz 时 4 种电压下的电流脉冲参数
Table 2 Current pulse parameters with four voltages under frequency of 40 kHz

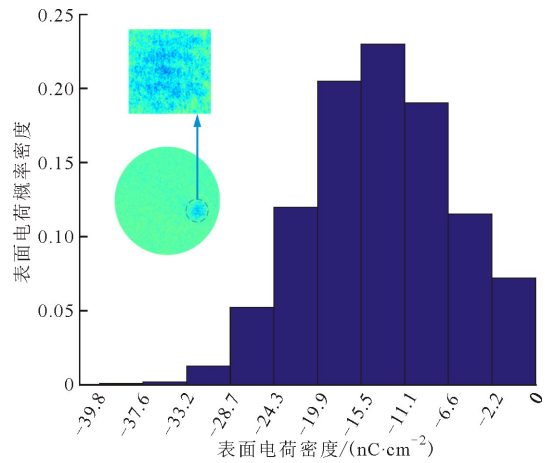
参数	数值			
	470 V	590 V	610 V	660 V
脉宽/ μs	2.2	1.4	3.1	3.4
正电流脉冲幅值/mA	1.56	3.27	3.72	波动
负电流脉冲幅值/mA	-2.82	-3.27	波动	波动

由图 5 中的表面电荷分布可知,不同电压幅值下表面残余电荷均为分立的放电斑,表现为丝状放电形态。图 5(a)、(b)、(c)中正电荷斑的直径均在 0.76 mm 左右,图 5(d)中的正电荷斑的直径为 1.06 mm。当电压为 470 V 时,电荷斑分布于电极边缘处,正负电荷斑的位置高度重合,属于位置相对固定的丝状放电形态。提取图 5(a)中丝状放电区域内固定面积的局部图像,并对图片中每个像素点的分布情况进行统计分析,得到的表面电荷概率密度分布如图 6 所示。

由图 6 可见:正电荷斑密度主要分布在区间 $[0, 41.6] \text{ nC/cm}^2$ 上,分布概率为 92.83%;负电荷斑密度主要分布在区间 $[-24.3, 0] \text{ nC/cm}^2$ 上,分布概率为 93.26%。正电荷斑密度总体上高于负电荷密度的绝对值,且正电荷密度分布的区间更宽,即负电荷密度分布相比于正电荷而言更为集中。



(a) 正电荷斑密度分布



(b) 负电荷斑密度分布

图 6 电压为 470 V 时表面电荷概率密度分布

Fig. 6 Probability distribution of surface charge under voltage of 475 V

在一个放电周期内,正放电前介质表面负残余电荷的存在会使得气隙电场得以增强,负放电亦然。更高的正电斑密度使得负放电前气隙电场会有更大程度的增强,在更低的外加电压下气隙电场就可达到击穿电场,因此图 5(a)中的负放电时刻相比于正放电时刻更接近过零点。由于图 5(a)的外施电压较低,因此气隙电场受表面电荷的影响更大。由于上一次放电后有表面电荷残留,同一位置在下次放电前其电场又会被增强,因此放电总会在同一位置发生,进而表现出显著的表面电荷记忆效应^[24]。显著的表面电荷记忆效应是放电丝电流波形幅值和相位在多个电压周期中稳定的重要保证。

对图 5 中的正电荷斑密度分布进行统计分析如图 7 所示。当放电形式为丝状放电时,4 个电压幅值下的表面电荷密度在 20 nC/cm^2 以内的分布概率均低于 60%。

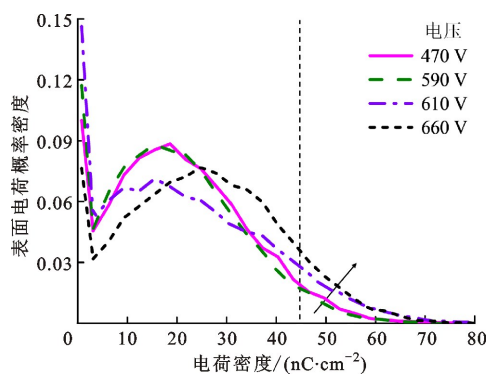


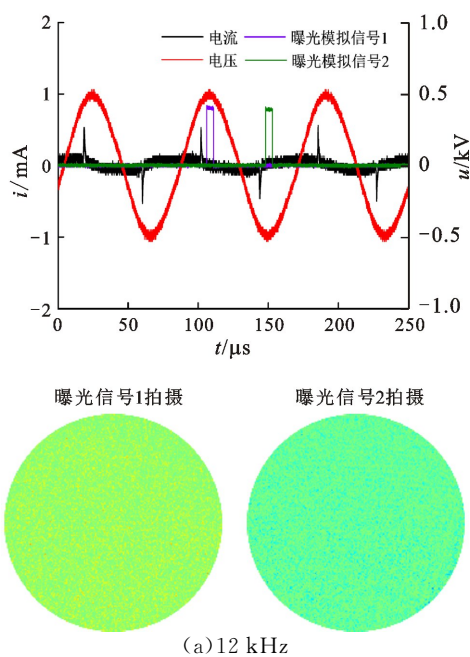
图7 频率为40 kHz时正表面电荷概率密度分布

Fig.7 Probability distribution of positive surface charge under voltage frequency of 40 kHz

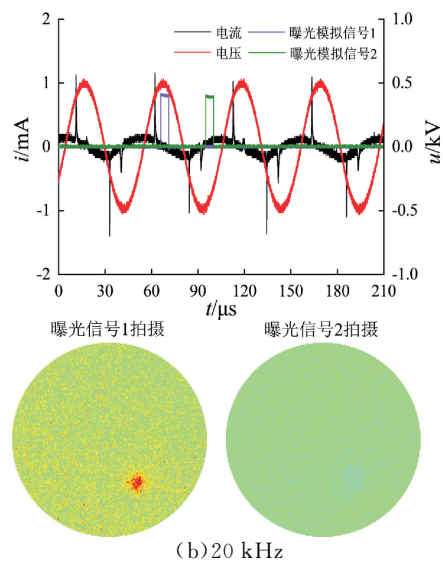
相比于图4中均匀放电的电荷密度分布,丝状放电的表面电荷分布在更高的电荷密度区间上,随着电压幅值的升高,表面电荷概率密度分布曲线总体上呈现上移的趋势。在电压幅值的上升过程中,表面电荷密度在 $[45, 90]$ nC/cm²上的分布概率由13.85%升高到25.56%,即在大于45 nC/cm²的区间上表面电荷密度分布总体上向更高的密度区间移动。

2.3 不同电压频率下的表面电荷分布

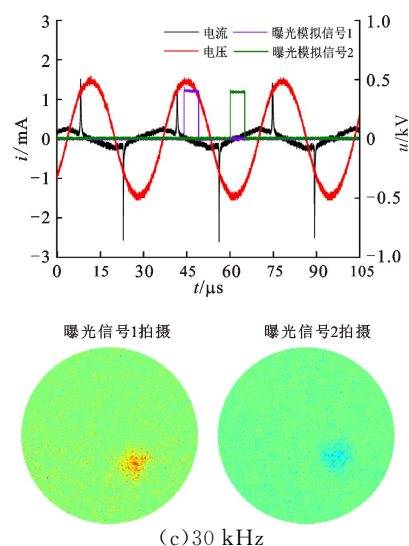
为了探究电压频率对表面电荷分布特性的影响,固定电压幅值为475 V,选取12、20、30、46 kHz电压频率下的表面电荷密度分布测量结果进行对比实验结果如图8所示。



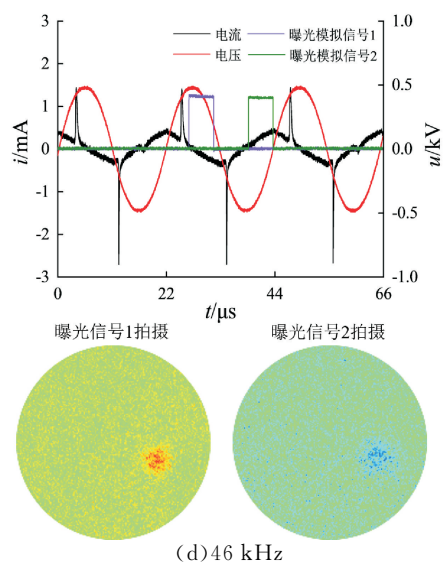
(a)12 kHz



(b)20 kHz



(c)30 kHz



(d)46 kHz

图8 电压为475 V时4种频率下表面电荷分布和放电波形
Fig.8 The surface charge distribution and discharge waveform under the voltage is 475 V with four frequencies

在电压频率增大的过程中,电流波形始终保持稳定。12、30、46 kHz 电压频率下是典型的单脉冲放电。20 kHz 电压频率下,正放电电流波形为单脉冲,而负放电呈现双脉冲。表 3、表 4 分别为不同频率下电流脉冲、正负电荷斑的对比。

表 3 4 种频率下的电流脉冲参数

Table 3 Current pulse parameters with four frequencies

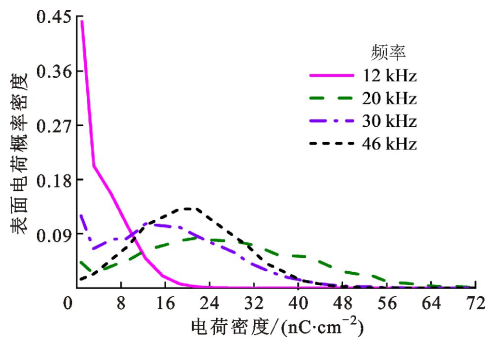
参数	数值			
	12 kHz	20 kHz	30 kHz	46 kHz
脉宽/ μs	2.2	2.0	1.7	1.0
正电流脉冲幅值/ mA	0.50	1.12	1.48	1.41
负电流脉冲幅值/ mA	0.46	1.33	2.57	2.71

表 4 3 种频率下的表面电荷斑对比

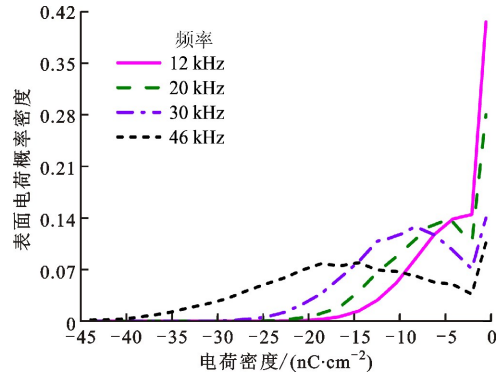
Table 4 Comparison of surface charge spots with three frequencies

极性	参数	数值		
		20 kHz	30 kHz	46 kHz
正电荷斑	电荷斑直径/ mm	0.80	0.93	1.00
	表面电荷斑占有率/%	1.09	1.95	2.02
	表面电荷总量/ nC	0.28	0.33	0.41
负电荷斑	电荷斑直径/ mm	0.89	1.07	1.20
	表面电荷斑占有率/%	1.51	3.05	3.13
	表面电荷总量/ nC	-0.23	-0.30	-0.49

可以看到,随着频率的增大,在均匀放电向丝状放电转化的过程中,电流幅值逐渐增大,脉宽逐渐减小,正负电流幅值的差值增大,不对称性变得显著。丝状放电的电流脉宽在微量量级,均匀放电的电流幅值小于丝状放电,脉宽大于丝状放电。随着频率的升高,表面电荷总量逐渐增大,且始终处于 0.5 nC 以内;表面电荷斑的直径和占有率呈增大趋势,且负电荷斑直径比正电荷斑直径大,即随着频率的升高,主要的放电区域经历了先收缩后增大的过程。不同频率下的表面正、负电荷密度分布如图 9 所示。



(a) 正电荷密度分布



(b) 负电荷密度分布

图 9 4 种频率下的表面电荷概率密度分布

Fig. 9 Probability distribution of surface charge density with four frequencies

当电压频率为 12 kHz 时,放电形态为均匀放电,正电荷密度分布在 $10 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 以内区间的概率达到 90.49%。当电压频率升高到 20 kHz 时,放电形态转变为丝状放电,正电荷密度分布在 $10 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 以内区间的概率大幅下降,仅为 14.87%,而在大于 $20 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 区间上的分布概率可达 64%,远大于均匀放电时的情况。电压频率为 30 kHz 时,在大于 $25 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 的密度区间上,电荷分布概率相比于 20 kHz 均出现了不同程度的下降。当频率继续升高时,在大于 $23.28 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 的高密度区间上的分布概率由 55.69% 降低为 25.74%,而电荷密度在小于 $23.28 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 的低密度区间上的分布概率升高。

由图 9(b) 可知,在负电荷绝对值大于 $15.52 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 的任何电荷密度区间上,均存在表面电荷密度分布概率随电压频率升高而升高的规律。当电压频率从 13 kHz 提高到 46 kHz 时,在负电荷密度绝对值大于 $15.52 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 的区间上,电荷密度分布概率由 0.98% 增加到 47.42%。在 12 kHz 均匀放电形态下,负电荷密度分布在 $-10 \text{ nC}/\text{cm}^2$ 以内区间的概率达到 89.55%。与正电荷不同的是,负电荷概率密度分布在不同的丝状放电形式下,随着频率升高,仍然会存在总体电荷密度分布增大的规律。

3 分析与讨论

结合不同实验条件下的表面电荷观测与放电特性等信息的测试与分析可知,当外加激励电压幅值升高时,放电间隙中的电场强度也随之增强,从而使得间隙中气体的电离程度增加,以产生更多的带电粒子^[25],介质表面也将阻挡、吸附、积聚更多的电荷。

当外加电压工作频率提高时,粒子间的碰撞运

动加剧,气体更易被电离,空间中产生更多的带电粒子。此外频率的增加使得每个周期内正负放电的时间间隔缩短,减少了空间中带电粒子的中和与消散,使得上一次放电后在间隙中残留的带电粒子密度增大,而下次放电发生前,随着碰撞电离的发展,这些高能带电粒子将产生大量的二次电子,促进放电通道的发展并提高放电的强度,使得放电电流幅值的增加,同时阻挡介质更容易捕获放电空间中的带电粒子,使得每次放电后介质表面积聚的电荷增多。在图 8(b)、(c)、(d)中,高频时介质表面积聚电荷量高于低频率下,因为两次放电间隔的时间更长,虽然在这种时间尺度下表面电荷不会出现明显的衰减与消散^[14],但空间中的带电粒子在运动过程中将相互中和^[26],使得空间中的带电粒子减少,降低了间隙中气体的电离程度与间隙中残余的带电粒子总量,下次放电的强度也随之降低,在介质表面上积聚的电荷量也随之减少。

从图 3、图 8(a)可以看到,在电压幅值或频率较低时,每次放电后在介质表面并不会出现明显的电荷斑,因此在下次放电发生前,沿介质表面没有出现明显的场强畸变区域,放电丝将较为均匀地分布在整个放电空间,此时放电电流的相位、幅值与脉冲数量均能保持一定的稳定性。而在图 5(b)、图 8(c)、(d)的实验条件下,放电后的介质表面出现了明显的电荷斑,此时的放电电流参数也能保持一定稳定性,其主要原因是团聚在介质表面的电荷与在间隙的放电通道残存的带电粒子的共同作用,产生的反向内建电场有利于下次放电更容易出现在该位置。实验结果说明在这个过程中表面电荷的记忆效应对放电的稳定起到了关键性的作用。

作为惰性气体,氦气的亚稳态粒子具有较高的能量(19.8 eV),远高于空气、氮气等^[27],因此氦气比较容易通过彭宁电离效应为放电提供大量的种子电子,从而降低起始放电电压,更容易实现较为均匀的放电,通过表面电荷观测实验也发现,如图 3(a)、图 8(a)所示,在外加电压、频率较低时,整个介质表面电荷分布均匀,放电脉冲为典型的单脉冲放电,是较为典型的均匀放电。

4 结 论

通过建立高时间分辨率介质表面电荷光学测量系统,在常压氦气环境中探究了 DBD 在不同实验条件下放电形态转变中的表面电荷分布特性,并分析了表面电荷对放电形态演变的影响,得到以下结论。

(1)在电压频率为 15 kHz 时,随着电压幅值的提高,电流脉冲数和幅值增加,表面电荷始终均匀分布,电荷密度主要分布在 10 nC/cm^2 以内的密度区间上,且概率密度分布向更高的电荷密度区间上移动。电压幅值增大到 560 V 时,均匀放电演变为丝状微放电,表面电荷分布图中分散的高电荷密度点增多。

(2)在电压频率为 40 kHz 时,随着电压幅值的提高,放电形式均为丝状放电,表面电荷分布在更高的密度区间上。表面电荷分布从单个向多个电荷斑转变,位置从电极边缘向中部靠近,电流的稳定性降低,表面电荷记忆效应对丝状放电的稳定性具有重要影响,电荷密度在 45 nC/cm^2 以上高密度区间的分布概率增大。

(3)随着电压频率的增大,表面电荷分布由均匀分布转变为电荷斑分布,产生的电荷斑直径随频率的增大而增大,表面电荷斑电荷总量在 0.5 nC 以内。在放电形式发生变化时,电荷密度分布在 10 nC/cm^2 以内区间的概率大幅下降,在大于 15 nC/cm^2 的区间上的分布概率增大,即丝状放电的表面电荷斑密度高于均匀放电的电荷密度。

参考文献:

- [1] 黄寅,孟永鹏,梅磊,等. 气流速度对大气压氦气介质阻挡放电特性的影响 [J]. 高电压技术, 2022, 48(7): 2737-2746.
HUANG Yin, MENG Yongpeng, MEI Lei, et al. The influence of gas flow on the characteristics of dielectric barrier discharge in helium at atmospheric pressure [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(7): 2737-2746.
- [2] DENG Xu, ZHANG Dianya, LU Siheng, et al. Green synthesis of $\text{Ag/g-C}_3\text{N}_4$ composite materials as a catalyst for DBD plasma in degradation of ethyl acetate [J]. Materials Science and Engineering: B, 2021, 272: 115321.
- [3] 黄悦峰,张子寒,何坤,等. 介质阻挡放电涡发生器等离子体激励条件下壁面气膜冷却性能研究 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(3): 37-45.
HUANG Yuefeng, ZHANG Zihan, HE Kun, et al. Investigations of the film cooling characteristics on the wall surface with dielectric barrier discharge-vortex generators plasma actuation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(3): 37-45.
- [4] ZHAO Shen, HAO Chunjing, XU Di, et al. Effect of electrical parameters on energy yield of organic pollutant degradation in a dielectric barrier discharge reactor [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(6):

- 1043-1050.
- [5] 黄寅, 孟永鹏, 黄彦钦, 等. 一种双回路驱动的纳秒快前沿高重复频率脉冲源 [J]. 西安交通大学学报, 2021, 55(10): 114-122.
- HUANG Yin, MENG Yongpeng, HUANG Yanqin, et al. A pulse source with dual-loop driven nanosecond fast risetime and high repetition frequency [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2021, 55(10): 114-122.
- [6] ZHANG Xuming, LEE B J, IM H G, et al. Ozone production with dielectric barrier discharge: effects of power source and humidity [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2016, 44(10): 2288-2296.
- [7] 张龙龙, 崔行磊, 刘峰, 等. 不同类型电源激励下 HMDSO 添加比例对 Ar 介质阻挡放电特性的影响 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(15): 3135-3146.
- ZHANG Longlong, CUI Xinglei, LIU Feng, et al. Effect of HMDSO addition ratio on Ar DBD characteristics excited by different types of power sources [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(15): 3135-3146.
- [8] GUTIÉRREZ-LEÓN D G, RODRÍGUEZ-MÉNDEZ B G, LÓPEZ-CALLEJAS 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.
- [9] 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.
- [10] 李雪辰, 张琦, 楚婧娣, 等. 大气压针-板介质阻挡放电丝的时空演化 [J]. 高电压技术, 2017, 43(6): 1880-1886.
- LI Xuechen, ZHANG Qi, CHU Jingdi, et al. Spatial-temporal evolution of dielectric barrier discharge filament in pin-to-plate geometry at atmospheric pressure [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(6): 1880-1886.
- [11] 史曜炜, 周若瑜, 崔行磊, 等. 不同电源激励下共面介质阻挡放电特性实验 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(22): 5371-5380.
- SHI Yaowei, ZHOU Ruoyu, CUI Xinglei, et al. Experimental investigation on characteristics of coplanar dielectric barrier discharge driven by different power supplies [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(22): 5371-5380.
- [12] 鲁杨飞, 李庆民, 刘涛, 等. 高频电压下表面电荷分布对沿面放电发展过程的影响 [J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 3059-3070.
- LU Yangfei, LI Qingmin, LIU Tao, et al. Effect of surface charge on the surface discharge evolution for polyimide under high frequency voltage [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(13): 3059-3070.
- [13] 崔彦捷, 彭平, 曹沛, 等. 针板电极下局部放电对油浸绝缘纸板表面的影响 [J]. 西安交通大学学报, 2017, 51(4): 37-44.
- CUI Yanjie, PENG Ping, CAO Pei, et al. Influence of partial discharge on oil-impregnated insulation press-board surface [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2017, 51(4): 37-44.
- [14] TSCHIERSCHE R, NEMSCHOKMICHAL S, BOGACZYK M, et al. Surface charge measurements on different dielectrics in diffuse and filamentary barrier discharges [J]. Journal of Physics: Applied Physics, 2017, 50(10): 105207.
- [15] BOGACZYK M, TSCHIERSCHE R, NEMSCHOKMICHAL S, et al. Spatio-temporal characterization of the multiple current pulse regime of diffuse barrier discharges in helium with nitrogen admixtures [J]. Journal of Physics: Applied Physics, 2017, 50(41): 415202.
- [16] MU Haibao, ZHANG Guanjun, KOMIYAMA Y, et al. Investigation of surface discharges on different polymeric materials under HVAC in atmospheric air [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(2): 485-494.
- [17] WILD R, BENDUHN J, STOLLENWERK L. Surface charge transport and decay in dielectric barrier discharges [J]. Journal of Physics: Applied Physics, 2014, 47(43): 435204.
- [18] DU Yan, MENG Yongpeng, WU Kai, 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.
- [19] 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): 163-172.
- WAN Hairong, HAO Yanpeng, FANG Qiang, et al. Evolutionary dynamics of single-multiple columns in atmospheric helium dielectric barrier discharge [J]. Acta Physica Sinica, 2020, 69(14): 163-172.
- [20] LI Xiaotong, TAN Zhenyu, WANG Xiaolong, et al. Mechanism governing the dependence of temporal non-linear behavior on the gap width in atmospheric-pres-

- sure helium dielectric barrier discharge: role of residual charged particles [J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2021, 49(4): 1278-1292.
- [21] 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.
- [22] SAM Y L. Surface charge measurement by the Pockels effect [D]. Southampton: University of Southampton, 2001.
- [23] 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: 西安交通大学, 2018.
- [24] WU Kai, PAN Cheng, MENG Yongpeng, 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.
- [25] 魏德宸, 郝伟, 陈永彬, 等. 高频激励 AC-DBD 气体电离区域及电极的温升特性 [J]. 高电压技术, 2021, 47(4): 1470-1477.
- WEI Dechen, HAO Wei, CHEN Yongbin, et al. Temperature rise characteristics of ionized gas and electrode for AC-DBD under high frequency [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(4): 1470-1477.
- [26] 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 and Technology, 2011, 20(2): 024005.
- [27] 王新新. 介质阻挡放电及其应用 [J]. 高电压技术, 2009, 35(1): 1-11.
- WANG Xinxin. Dielectric barrier discharge and its applications [J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(1): 1-11.

(编辑 赵炜 刘杨)