



电工技术学报  
*Transactions of China Electrotechnical Society*  
ISSN 1000-6753, CN 11-2188/TM

## 《电工技术学报》网络首发论文

题目：表面微放电等离子体特性参数计算及介质片性质的影响  
作者：陈星宇，陆晨，熊紫兰  
DOI：10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231567  
网络首发日期：2024-02-19  
引用格式：陈星宇，陆晨，熊紫兰. 表面微放电等离子体特性参数计算及介质片性质的影响[J/OL]. 电工技术学报.  
<https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231567>



**网络首发：**在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

**出版确认：**纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.231567

# 表面微放电等离子体特性参数计算及 介质片性质的影响

陈星宇, 陆晨, 熊紫兰

(华中科技大学强电磁技术全国重点实验室 武汉 430074)

**摘要：**表面微放电 (Surface micro-discharge, SMD) 在不同的领域有着越来越广泛的应用。为了深入理解其放电特性及介质片性质的影响, 基于放电物理过程及 SMD 特有的放电结构, 建立了等效电路模型, 并联立 Boltzmann 方程求解器求解电子连续性方程, 得到气隙电压、等离子体电阻及电子密度等特性参数。结果表明: 对于同一种类不同厚度的介质片, 功率相同时的放电面积及各特性参数一致。对于不同种类的介质片, 介电常数较大的介质片下 SMD 的放电功率、气隙电压、等离子体电阻及电子密度随外加电压的变化率较大。在电压相似的情况下, 相同厚度下介电常数较大的介质片放电功率及气隙电压更大, 等离子体电阻更小。最后, 通过比较计算功率和测量功率, 验证了模型及仿真计算的正确性。

**关键词：**表面微放电; 介质片; 气隙电压; 等离子体电阻; 放电功率

**中图分类号：**O461

## 0 引言

常压非平衡等离子体在许多领域发挥着重要作用, 是放电等离子体领域的研究热点<sup>[1-4]</sup>。介质阻挡放电 (Dielectric barrier discharge, DBD) 具有等离子体密度高、高能电子数量多、气体温度低、应用范围广等特点, 因而受到了人们广泛的研究和关注<sup>[5-7]</sup>。表面微放电 (Surface micro discharge, SMD) 是一种非均匀间隙的介质阻挡放电结构<sup>[8-9]</sup>, 与其它大气压低温等离子体源相比, 其不需要特殊的稀有气体就可直接在空气中产生大面积均匀的等离子体<sup>[7-8]</sup>。因为表面微放电具有放电结构简单, 处理温度低, 化学反应丰富, 产物多样等优点, 被广泛应用到诸多领域, 例如医疗杀菌、材料改性、污染治理、农业以及食品工业等<sup>[12-15]</sup>。

SMD 的特性研究是其应用研究的基础, 介质片、工作气体和环境温度等参数都会影响表面微放电的放电特性<sup>[16-18]</sup>。其中, 人们对于介质片对其它种类 DBD 的特性的影响有了大量的研究。Primas Emeraldi 等人讨论了  $Al_2O_3$  和  $SiO_2$  介质片对脉冲微间隙 DBD 装置  $CO_2$  转化效率的影响, 发现  $Al_2O_3$  介质片的放电更剧烈, 微放电更多,  $CO_2$  转化效率

超过  $SiO_2$  介质片 2 倍<sup>[19]</sup>。Yang Guoqing 等人通过  $SnO_2$  物理溅射制备了几块不同表面电导率的石英玻璃用作介质片, 在氩气和氮气的大气混合气体中产生 DBD 放电。在实验中, 观察并讨论了放电功率、电流和脉冲数等放电参数的差异。发现介电表面电导率发生变化时, 放电特性会发生明显变化<sup>[20]</sup>。Dong L F 等人研究了介电材料对大气压下氩气/空气中介质阻挡放电模式的分岔和时空动力学的影响。研究发现, 不同介电材料的斑图分叉序列不同。介质阻挡放电中六边形斑图的时空动力学取决于介电材料<sup>[21]</sup>。现有的研究主要集中于均匀间隙 DBD 下介质片性能对放电强度及均匀性的影响研究, 而介电参数对非均匀间隙的 SMD 放电特性影响研究较少。

相比较于多物理场仿真, 等离子体的电路模型的建模相对简单, 能够快速得到仿真结果, 有利于研究等离子体的放电特性<sup>[22-24]</sup>。Zhou Simin 等采用受控电流源模型对双螺旋结构的沿面 DBD 进行了等效电路分析<sup>[25]</sup>。Jérôme Pons 等分别考虑了高压电极和地电极建立了集总参数等效电路, 采用非对称电流源对放电的不对称性进行了研究<sup>[26]</sup>。Henrike Jakob 等对放电和未放电区域面积进行了

切割,进一步建立了时空集总参数等效电路<sup>[27]</sup>。郝玲艳等人联立 Boltzmann 方程求解器和 Matlab/Simulink 模块,探讨了沿面 DBD 各个参量随时间和电流的变化关系<sup>[28]</sup>。方志等人考虑了溢流效应,将环状射流近似为 DBD 结构,计算了气隙电压、放电功率等电路参数<sup>[29]</sup>。国内外学者对等离子体的电路模型做了大量的研究,取得了许多成果,但鲜有对 SMD 装置的电路模型建立和特性参数的仿真计算。

本文从理论上推导了 SMD 的等效电学模型,并结合 Boltzmann 方程求解器对 2 种介质下等离子体特性参数——气隙电压、等离子体电阻及电子密度等进行了计算。在不同的放电功率下,分析与讨论了介质片种类和厚度对表面微放电特性参数的影响。最后,根据得到气隙电压和电阻等参数计算得到放电功率,与实验 Lissajous 法测得的功率进行比较,验证了模型的正确性。

### 1 实验装置

本文所使用的表面微放电装置和相关实验设备如图 1 所示。采用直径为 20 mm、高度为 14 mm 的铜电极作为高压电极,且其周围使用聚四氟乙烯进行绝缘包裹。采用直径为 50 mm、网孔密度为 5×5 目/cm<sup>2</sup>的不锈钢网作为接地电极。介质片放置在铁丝网表面,位于高压电极和接地电极之间,形成一种三明治结构,等离子体的生成区主要在铁丝网下表面区域。

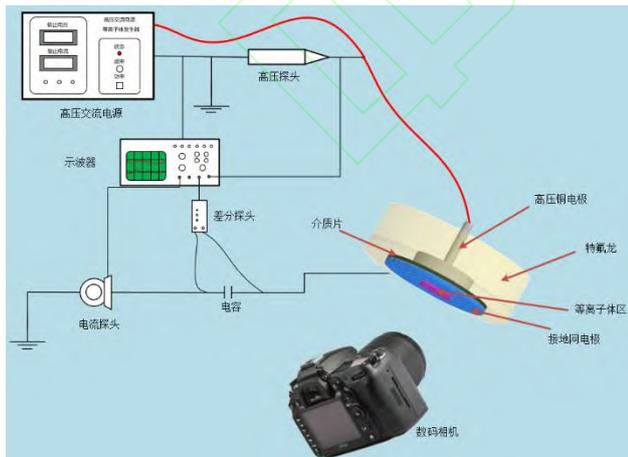


图 1 表面微放电装置和所采用的实验设备

Fig.1 SMD devices and experimental equipment employed

本文使用高压高频交流电源 (CTP-2000K, Corona Lab) 作为外部激励源,电源输入电压通过高压探头(Tektronix: P6015A)测量,放电电流通过电流探头(Pearson 6585)测量,并用示波器(Tektronix,

MDO3034)记录电压电流波形。电路中串联有一个 10nF 的采样电容器,在采样电容器的两端放置差分探头(Tektronix, P5220A)来测量采样电容器两端的电压,采用 Lissajous 法测量计算放电功率<sup>[30]</sup>。为了研究介质片参数对放电性能及特性参数的影响,本文使用了厚度为分别为 0.5mm 和 1mm 的 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 介质片进行实验。在所有实验中,通过调整输入电压幅值和介电参数来改变 SMD 的放电状态,输入电压频率固定在 8kHz。表面微放电装置在不同参数下的放电图像由数码相机 (NIKON D750) 在黑暗背景下拍摄,并根据参考标尺测算出不同条件下的放电面积大小。数码相机的主要参数设置如下:光圈的大小设置为 5.6,曝光时间设置为 1s,ISO 的大小设置为 2000,其余参数设置为默认值。

### 2 SMD 的等效电路模型

#### 2.1 SMD 的电路模型建立

SMD 气隙内的放电由许多在时间上和空间上随机分布的微放电构成,因此对 SMD 的仿真通常是建立在对其微放电过程的模拟和等效的基础上。微放电发生前后等效电路不同,其简化电路结构及等效电路模型如图 2 所示。

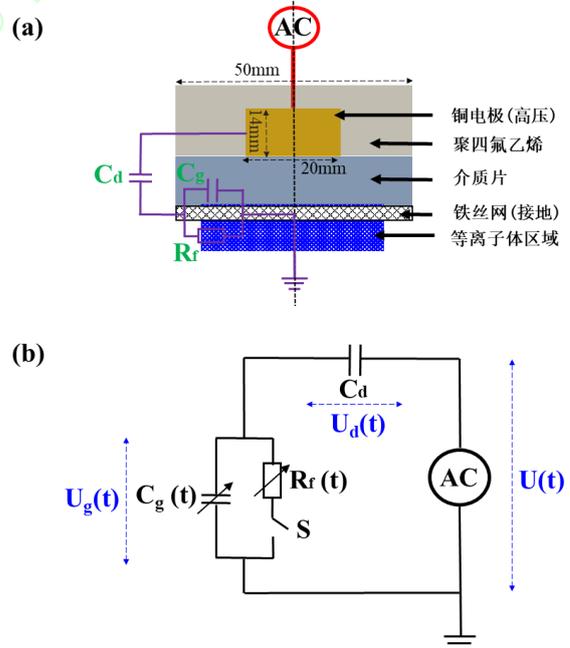


图 2 SMD 简化电路结构和等效电路模型 (a) 装置的电路结构示意图 (b) 简化电路模型示意图

Fig. 2 Model of SMD equivalent circuit (a) Circuit schematic of the device (b) Simplified circuit schematic

首先对 SMD 装置各个部分进行电路等效,如图 2(a)所示。表面微放电的放电结构主要由高压电

极、介质片和接地网电极构成，且三者紧密的贴合在一起。表面微放电正常工作时，等离子体主要产生于铁丝网附近处。在放电过程中，介质片上下表面会不断的积累和释放电荷。本文引入虚拟电极的概念<sup>[31-32]</sup>，将介质片上下表面积累和释放电荷的区域等效为虚拟电极，介质片下表面的虚拟电极与铁丝网形成等离子体放电通道。 $C_d$ 为介质片的等效电容， $C_g$ 为铁丝网与介质层下表面虚拟电极之间等离子体通道的气隙电容。 $R_f$ 为铁丝网与介质层下表面虚拟电极之间的等离子体通道电阻，其表征放电过程中的有功消耗。其中， $C_g$ 、 $R_f$ 以及虚拟电极的大小（实际放电面积）均会随着放电的强弱而变化。

根据上述电路解析，SMD的等效电路可简化为如图2(b)所示，其中 $U(t)$ 为电源电压， $U_d(t)$ 为介质片电压， $U_g(t)$ 为气隙电压。气隙击穿前，放电未发生，开关断开，SMD的等效电路由介质等效电容 $C_d$ 和气隙等效电容 $C_g$ 串联构成；气隙击穿后，放电发生，开关闭合，气隙内电离水平不同，导致气隙电容 $R_f$ 非线性变化，气隙区等效电路由可变电容 $C_g(t)$ 、放电通道电阻 $R_f(t)$ 并联构成。

## 2.2 电路参数计算

在图2所示的表面微放电等效电路中， $C_d$ 和 $C_g$ 的计算方法如式(1)和式(2)所示<sup>[33]</sup>：

$$C_d = \frac{K_d \epsilon_0 A_1}{d_1} \quad (1)$$

$$C_g = \frac{K_g \epsilon_0 A_2}{d_2} \quad (2)$$

其中， $K_d$ 表示介质片的相对介电常数， $Al_2O_3$ 介质的 $K_d$ 取值为9.34， $SiO_2$ 的 $K_d$ 取值为3.7。 $K_g$ 表示铁丝网与介质层下表面虚拟电极之间气体的相对介电常数，取值为1。 $\epsilon_0$ 表示真空的绝对介电常数，取值为 $8.854 \times 10^{-12} F/m$ 。 $A_1$ 表示介质片上表面虚拟电极的面积， $A_2$ 表示介质片下表面虚拟电极的面积。放电面积（虚拟面积大小）通过拍照确定，介质片上下表面虚拟电极的面积相等，即 $A_1=A_2$ 。 $d_1$ 表示介质片的厚度； $d_2$ 表示铁丝网与介质层下表面虚拟电极之间的气隙距离，在此SMD结构中固定为0.5mm。

等离子体通道电阻 $R_f$ 可由电阻计算公式所得，如式(3)。 $\sigma$ 表示电导率，其计算方法如式(4)所示<sup>[34]</sup>：

$$R_f = \frac{d_2}{\sigma A_2} \quad (3)$$

$$\sigma = e(n_e \mu_e + n_i \mu_i) \quad (4)$$

其中， $e$ 表示电子电荷，取值为 $1.6 \times 10^{-19} C$ 。 $n_e$ 表示电子数密度。 $n_i$ 为离子数密度， $\mu_e$ 表示电子迁移率

（在空气中近似为常数），在空气中的取值为 $0.1131 m^2/(V \cdot s)$ <sup>[35]</sup>， $\mu_i$ 表示离子迁移率。由于等离子体可以视为准中性物质，所以在式(4)中电子数密度与离子数密度相同，即 $n_e=n_i$ 。与此同时，由于电子的迁移率 $\mu_e$ 远远大于离子的迁移率 $\mu_i$ ，因此，表面微放电空气等离子体的电导率主要由电子决定。

表面微放电空气等离子体的电子数密度 $n_e$ 可通过求解电子连续性方程获得，如式(5)-式(7)所示<sup>[34]</sup>：

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \cdot \Gamma_e = R_e \quad (5)$$

$$\Gamma_e = -(\mu_e E_g) n_e - D_e \cdot \nabla n_e \quad (6)$$

$$R_e = AP \mu_e e^{\frac{-BP}{|E_g|}} E_g n_e - \beta n_e n_i \quad (7)$$

其中， $\Gamma_e$ 为电子通量， $E_g$ 为铁丝网与介质层下表面虚拟电极之间气隙的电场强度， $D_e$ 为电子扩散系数， $R_e$ 为源项， $A$ 和 $B$ 为常数，这里的取值分别为 $11/(m \cdot Pa)$ 和 $273.8 V/(m \cdot Pa)$ <sup>[35]</sup>， $P$ 为气体压强， $\beta$ 为复合系数。

为了简化计算，假设等离子体在空间中均匀分布，且不考虑电子的扩散。气隙电场强度 $E_g(t)$ 可由式(8)计算得到。

$$E_g(t) = \frac{U_g(t)}{d_2} \quad (8)$$

$U_g(t)$ 为图2(b)所示电路中的气隙电压，开关 $S$ 闭合时，其值为气隙等效电容 $C_g(t)$ 和通道电阻 $R_f(t)$ 的分压，计算公式基于基尔霍夫定律，如式(9)-式(10)所示：

$$U(t) = U_g(t) + U_d(t) \quad (9)$$

$$C_d(t) \frac{d(U_d(t))}{dt} = \frac{U_g(t)}{R_f(t)} + C_g(t) \frac{d(U_g(t))}{dt} \quad (10)$$

$U(t)$ 为图2(b)所示电路中的电源电压， $U_d(t)$ 为介质片电容 $C_d$ 的分压。

由于所使用的表面微放电的工作气体为空气，为简化计算，假定空气中只存在氮气和氧气，二者占比分别为80%和20%。式(7)中的复合系数 $\beta$ 可用氮气和氧气的复合系数 $\beta_N$ 和 $\beta_O$ 的表达式求解，如式(11)-式(13)所示<sup>[34]</sup>：

$$\beta = 0.8 \beta_N + 0.2 \beta_O \quad (11)$$

$$\beta_N = \frac{5.4 \times 10^{-5}}{\tau_e} \quad (12)$$

$$\beta_O = \frac{6 \times 10^{-5}}{\tau_e} \quad (13)$$

在Bolsig+软件中，将气体温度设置为300K，空气中的电离度设置为 $1 \times 10^{-4}$ ，等离子体密度的初始值设定为 $1 \times 10^{13}/m^3$ ，可获得在大气压空气放电条件下电子

温度  $T_e$  随约化场强的变化规律, 如图 3 所示。

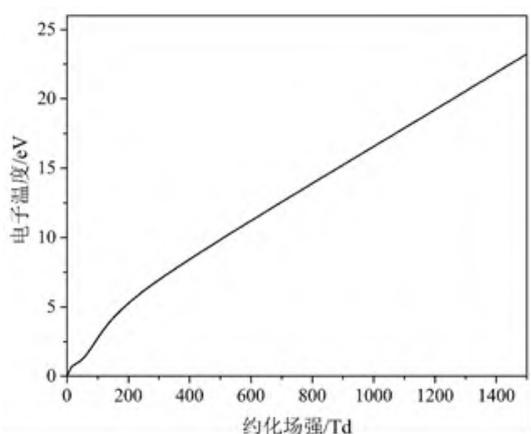


图 3 大气压空气放电中电子温度与约化场强的变化规律  
Fig. 3 Changing law of electron temperature and approximate field strength in atmospheric pressure air discharge

联立式(5)-式(8)以及式(11)-式(13)可得到电子数密度的简化计算公式, 如式(14)所示:

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} = \frac{AP\mu_e n_e U_g(t)}{d_2} e^{\frac{-BPd_2}{|U_g(t)|}} - 5.52 \times 10^{-5} \frac{n_e^2}{T_e} \quad (14)$$

式(14)避免了多物理场中对不同粒子间的碰撞、电离以及各个粒子反应的求解, 仅需求解关于电子数密度的常微分方程, 电子数密度的初始值为  $10^{13}/\text{m}^3$ , 代入式(3)和(4)即可求得等离子通道电阻随时间的变化。

### 2.3 计算参数的选取

表 1 计算参数选择表

Tab.1 Calculation parameter selection

介质片	介电常数	厚度/mm	电压 kV	功率/W
SiO <sub>2</sub>	3.7	0.5	6.0	0.85
			7.5	1.74
			9.0	3.22
		1	9.5	0.82
			10.5	1.75
			12.5	3.12
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	9.34	0.5	4.0	0.14
			5.5	1.14
			6.5	3.78
		1	5.0	0.12
			7.0	1.24
			9.0	3.84

通过对不同介电常数下不同电压等级的放电功率的计算, 选取了 2 种介质片、2 种厚度参数在 3 组不同电压下的电压及功率参数(不同电压等级下, 不同厚度的同种介质片选取的 2 组数据的放电功率保持基本

一致)。介质片参数、选取的电压条件以及实验测得的功率如表 1 所示。

## 3 结果与讨论

### 3.1 放电面积随外加电压和介电性质的变化

由式(1)-(3)可知, 在外加电压固定后电容和通道电阻的求解中仅放电面积  $A_1$  为变量, 通过数码相机拍照记录并测量。以 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 的 1mm 介质片为例, 图 4 给出了其不同电压下的放电图像。发现放电区域近似为圆形。随着外加电压和功率的增大, 其放电区域的面积逐步增大, 亮度也逐渐增加。说明外加电压会同时影响放电面积和放电通道内的特性参数。

图 5 为不同条件下放电面积随外加电压的变化曲线。随着外加电压的增大, 放电面积也随之增大。以 1mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 介质片为例, 在 5.0kV 时其放电面积约为 745mm<sup>2</sup>, 7.0kV 时其放电面积增至 876 mm<sup>2</sup>, 到 9.0kV 时其放电面积增至 1058 mm<sup>2</sup>。0.5mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 介质片对应功率近似相同点的放电面积依次为 731、903 和 1046 mm<sup>2</sup>, 与 1mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 介质片同功率组的放电面积接近。说明对于同种介质片不同厚度同一放电功率, 放电面积基本一致, SiO<sub>2</sub> 不同厚度同功率组也有类似的结果。

放电面积为 SMD 气隙放电特性的一种宏观表征, 不同厚度同种介质片同功率下放电面积相同的原因可能是同功率条件下相关的电路参数相同导致, 具体结果及分析将在下一小节进行详细陈述。

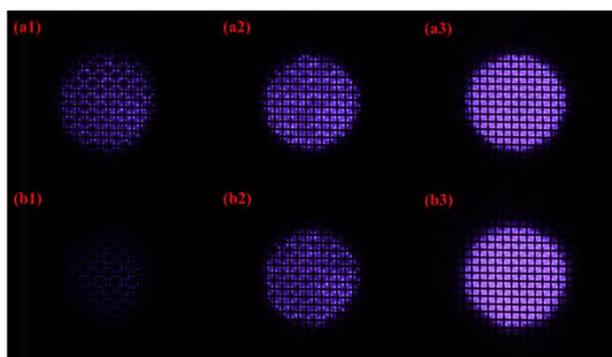


图 4 SMD 的放电照片 (a) 1mm SiO<sub>2</sub>: (a1) 9.5kV (a2) 10.5kV (a3)12.5kV; (b) 1mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b1) 5.0kV (b2) 7.0kV (b3) 9.0kV  
Fig. 4 Discharge images of SMD (a) 1mm SiO<sub>2</sub>: (a1) 9.5kV (a2) 10.5kV (a3)12.5kV; (b) 1mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (b1) 5.0kV (b2) 7.0kV (b3) 9.0kV

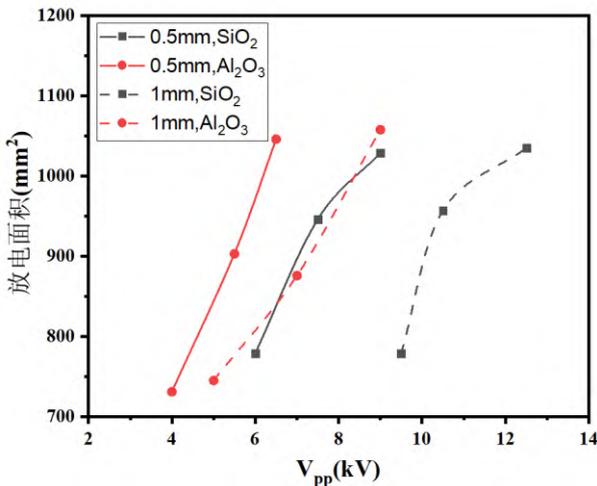


图 5 SMD 的放电面积随外加电压变化曲线

Fig. 5 Discharge area vs. applied voltage for SMD

### 3.2 等离子体参数计算结果与分析

以 1mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 介质片在 9.0kV 的电源电压下为例, 实验测得的电源电压和电流, 以及计算得到的气隙电压、介质片电压、通道电阻、电子密度随时间变化的关系如图 6 所示。气隙电压、介质片电压与电源电压一样也为正弦波形, 气隙电压的相位超前于电源电压, 而介质片电压的相位滞后于电源电压, 电流为典型微放电脉冲簇。其原因如图 2(b) 电路所示, 电源电压为气隙电压与介质片电压之和, 介质片电压为纯电容电压, 电压滞后于电源电压。气隙电压作为二者的电压之差, 其相位超前于电源电压。通道电阻呈现周期性, 其周期为电源周期的一半。结合图 6(a) 与 (b) 可知, 在气隙电压幅值较大时通道电阻较小, 此时电路处于放电状态, 反之则通道电阻较大, 电路处于未放电状态。由式(3)和式(4)可知, 在放电面积固定时, 通道电阻和电子数密度成反比, 即电子数密度同样呈现周期性。电路处于放电状态时电子数密度较高, 最大值约为  $10^{17}/\text{m}^3$ , 接近未放电状态下电子数密度的 10000 倍。为了便于比较, 后面出现的等离子体气隙电压均为峰峰值, 通道电阻和电子密度均为平均值。

图 7-图 9 分别为不同介电性质下气隙电压峰峰值、通道电阻及电子密度平均值随外加电压的变化情况。随着外加电压的增大, 气隙电压增大, 放电更为剧烈, 通道电阻下降, 电子密度增大。以 1mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 介质片为例, 在 5.0kV 时其气隙电压约为 2.06kV, 通道电阻约为 4.18M $\Omega$ , 电子密度仅为  $1.13 \times 10^{13}/\text{m}^3$ 。到 7.0kV 时气隙电压增至 2.94kV, 通道电阻则锐减至 0.84M $\Omega$ , 电子密度增至  $1.99 \times 10^{15}/\text{m}^3$ 。到 9.0kV 时气隙电压增至 3.80kV, 通道电阻则仅为 0.47M $\Omega$ , 电子密度增至  $2.57 \times 10^{16}/\text{m}^3$ 。0.5mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 介质片功率相似点的气隙电

压依次为 2.06、3.05 和 3.79kV, 通道电阻依次为 4.13、0.90 和 0.47M $\Omega$ , 电子密度依次为  $1.18 \times 10^{13}$ 、 $2.14 \times 10^{15}$  和  $2.49 \times 10^{16}/\text{m}^3$ 。与 1mm Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 介质片下相似功率组的气隙电压、通道电阻和电子密度值接近。说明不同厚度同种介质片在同一放电功率下, 气隙电压、通道电阻和电子密度等特性参数基本一致。SiO<sub>2</sub> 不同厚度同功率组也有类似的结果。

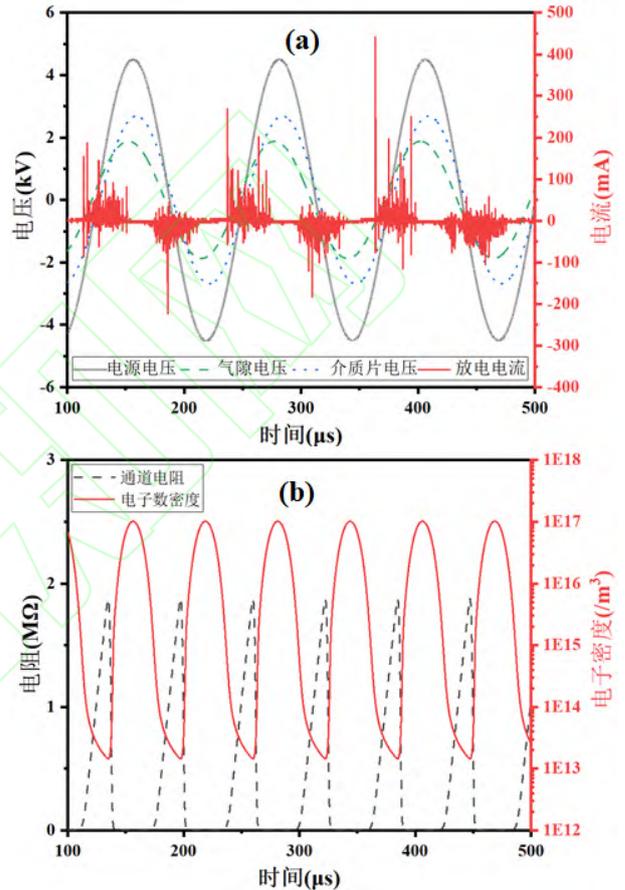


图 6 SMD 的电路参数随时间变化曲线(a) 电压/电流 (b) 电阻/电子密度

Fig. 6 Circuit parameters vs. time for SMD (a) Voltage/Current (b) Resistance/Electron number density

由方程 (1) 和 (2) 可知, 介质片电容和气隙电容的主要影响因素为介质片的介电常数、厚度以及放电区域的面积。当选用相对介电常数为 3.7 的 SiO<sub>2</sub> 作为介质片材料时, 在相同的厚度下, 与选用相对介电常数为 9.34 的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 相比, 当外界的输入电压增加相同的数值时, 随着放电面积的增加, SiO<sub>2</sub> 介质片的  $C_d$  幅值变化较小; 同时由于气隙介电常数及气隙间距不变, 其对应的介质片上的分压变化幅度相应地小于 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 情况下的数值, 从而导致与其相关的气隙电压, 等离子体通道电阻以及电子密度在外界输入电压增加相同的数值情况下, 相较于同厚度的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 介质片, 变化幅度均

较小。此结果同时也说明使用较大介电常数的介质材料,对于放电的电子密度调节有着更高的灵敏度,相较介电常数小的材料,其在较低的外加电压输入下即可得到同样的电子密度。

不同厚度的同种介质片下,功率相同时对应的各电路参数相同是因为在同种介质下,铁丝网与介质层下表面虚拟电极之间的气隙距离  $d_2$  不变,在相同的放电功率下放电强度一致,放电面积和气隙电压值均一致。由式(2)可知此时的气隙电容  $C_g$  也一致,由式(3)、(4)、(14)可知,通道电阻  $R_f$ 、电子密度  $n_e$  和气隙电压  $U_g$  存在函数对应关系,气隙电压和放电面积不变时通道电阻不变,电子密度也不变。此时仅介质片电容存在区别,由式(1)可知,介质片越厚,其电容  $C_d$  越小,其容抗  $1/j\omega C_d$  更大,此时介质片分压占比更大,由于此时气隙分压幅值相同,也就意味着介质较厚时要达到相同的功率需要更大的外加电压,与实际所测相符。

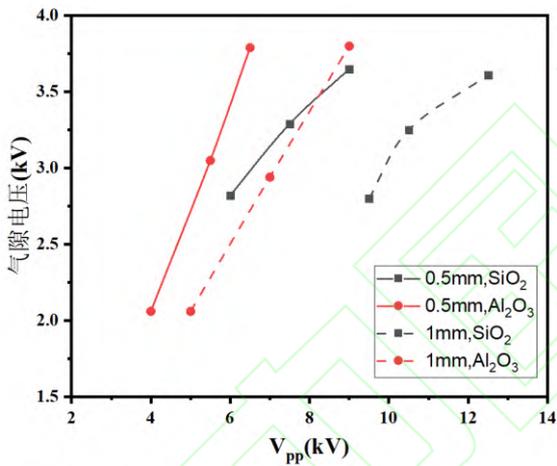


图 7 SMD 的气隙电压随外加电压变化曲线

Fig. 7 Air gap voltage versus voltage curve for SMD

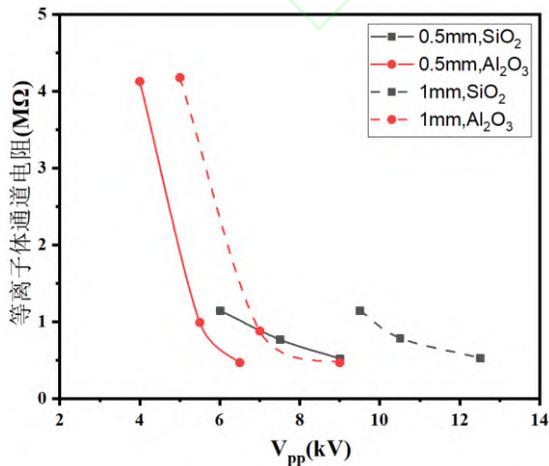


图 8 SMD 的等离子体通道电阻随外加电压变化曲线

Fig. 8 Plasma channel resistance versus voltage curve for SMD

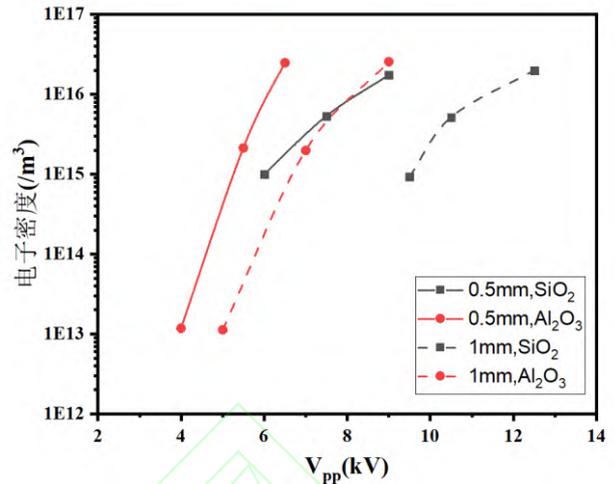


图 9 SMD 的电子密度随外加电压变化曲线

Fig. 9 Electron number density versus voltage curve for SMD

### 3.3 功率验算

在计算得到气隙电压和通道电阻后,可计算电路有功功率  $P_R$ , 其求解公式为:

$$P_R = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{U_g(t)^2}{R_f(t)} dt \quad (15)$$

为验证电路模型的有效性,本文使用式(15)计算了表 1 中各个条件下的放电功率,并与实验测得的功率进行了对比,结果如图 10 所示。

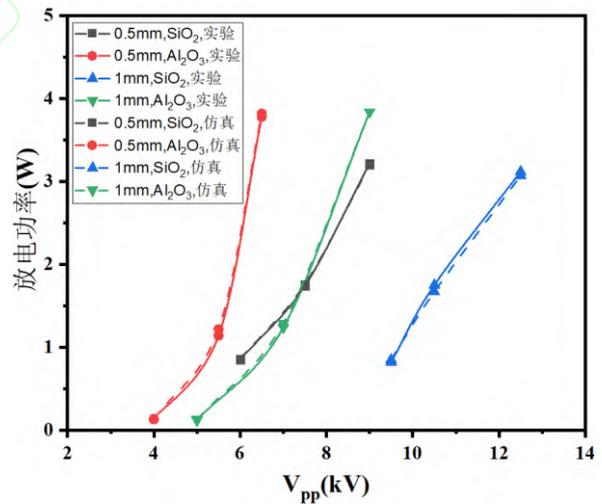


图 10 SMD 的放电功率实验值与计算值的对比

Fig. 10 Comparison of experimental and calculated values of discharge power for SMD

由图 10 可知,对于不同厚度的  $Al_2O_3$  和  $SiO_2$  介质片,放电功率的计算值与测量值高度一致。以厚度为 1mm 的  $Al_2O_3$  介质片为例,在 5.0kV、7.0kV 和 9.0kV 时计算功率分别为 0.13W、1.29W 和 3.84W,其实验测得的功率分别为 0.12W、1.24W 和 3.84W。0.5mm 的  $Al_2O_3$  功率相似点,在 4.0kV、5.5kV 和 6.5kV 时计算

功率分别为 0.13W、1.22W 和 3.82W，其实验测得的功率分别为 0.14W、1.14W 和 3.78W，均与计算结果基本一致。由以上数据对比可知，对于所测试的放电条件，本文所提出的 SMD 的电路模型的放电功率计算值与实验测量功率值之间的误差在  $10^{-2}$ W 量级，最大相对误差不超过 7%，且随着功率的增加相对误差逐渐减小。可能的原因是由于在低功率下放电较弱，对于放电面积的测量相对误差变大，同时在较低功率下，由于实验功率测量造成的相对误差也会增加。模型计算值与实验测量值的对比结果说明了此电路计算模型的有效性。

#### 4 结论

本文针对 SMD 特殊的放电结构构建了电路模型，结合放电的物理过程计算了 SMD 的相关特性参数，探究了介质片的性质对 SMD 特性参数的影响。在选定介质片参数下，随着外加电压增大，放电区域面积增大，气隙电压增大，等离子体电阻减小，放电功率增大。对于同种介质片在不同厚度下，在功率相近时其放电区域面积、气隙电压、等离子体电阻、电子密度等参数基本一致，可认定为 SMD 在同种介质片下只要放电功率相同即可视为完全相同的放电。对于不同种类的介质片在相同的厚度下，介电常数较大的 SMD 其功率、放电区域面积、气隙电压、等离子体电阻及电子密度等参数随外加电压变化的幅度大于介电常数较小时的情况。同时通过模型计算所得的功率与实际测量所得的功率一致，验证了电路计算模型的正确性。

本文为 SMD 在实际应用中的参数选取及结构设计提供了参考。总之，通过控制介电性质和放电功率可保证放电的一致性。为降低外加电压和提高 SMD 的放电效率，选取较薄和相对介电常数较大的介质片是一种简便有效的方法。

#### 5 参考文献

- [1] 戴栋, 宁文军, 邵涛. 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. Research status and development trend of atmospheric pressure low-temperature plasma[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 1-9.
- [2] Cullen P J, Lalor J, Scally L, et al. Translation of plasma technology from the lab to the food industry[J]. Plasma Processes and Polymers, 2018, 15(2): 1700085.
- [3] 宋岩泽, 梁贵书, 冉慧娟,等. 等离子体处理调控表面电导率提高环氧树脂绝缘性能的研究[J]. 电工技术学报,2023, 38(15): 3984-3998.  
Song Yanze, Liang Guishu, Ran Huijuan, et al. Study on the improvement of insulating properties of epoxy resin by modulating surface conductivity with plasma treatment[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023, 38(15): 3984-3998.
- [4] 王瑞雪, 李忠文, 虎攀, 等. 低温等离子体化学毒剂洗消技术研究进展 [J]. 电工技术学报, 2021, 36(13): 2767-2781.  
Wang Ruixue, Li Zhongwen, Hu Pan, et al. Review of research progress of plasma chemical warfare agents degradation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2767-2781.
- [5] Attri P, Ishikawa K, Okumura T, et al. Plasma Agriculture from Laboratory to Farm: A Review[J]. Processes, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, 2020, 8(8): 1002.
- [6] 孙闵杰, 付军辉, 刘泓麟,等.分段电极介质阻挡放电 CO<sub>2</sub>重整 CH<sub>4</sub>过程放电特性与反应性能研究[J]. 电工技术学报,2023, 38(15): 3972-3983.  
Sun Minjie, Fu Junhui, Liu Honglin, et al. Study on the discharge characteristics and reaction performance of CO<sub>2</sub> reforming CH<sub>4</sub> process with segmented electrode dielectric barrier discharge[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2023, 38(15): 3972-3983.
- [7] 姜楠, 李志阳, 彭邦发,等.等离子体羟基化改性纳米 SiO<sub>2</sub> 粒子对绝缘纸绝缘特性的影响[J]. 电工技术学报, 2023, 38(24): 6817-6827  
Jiang Nan, Li Zhiyang, Peng Bangfa,et al. Effects of plasma hydroxylation-modified SiO<sub>2</sub> nanoparticles on the insulating properties of insulating paper[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(24): 6817-6827.
- [8] Luan P, Bastarrachea L J, Gilbert A R, et al. Decontamination of raw produce by surface microdischarge and the evaluation of its damage to cellular components[J]. Plasma Processes and Polymers, 2019, 16(5): 1800193.
- [9] Tschang C-Y T, Thoma M. In vitro comparison of direct plasma treatment and plasma activated water on Escherichia coli using a surface micro-discharge[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, IOP Publishing, 2019, 53(5): 055201.

- [10] Shimizu T, Zimmermann J L, Morfill G E. The bactericidal effect of surface micro-discharge plasma under different ambient conditions[J]. *New Journal of Physics*, 2011, 13(2): 023026.
- [11] Li Dong, Liu Dingxin, He Tongtong, et al. Three distinct modes in a surface micro-discharge in atmospheric pressure He + N<sub>2</sub> mixtures[J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22(12): 123501.
- [12] Knoll A J, Luan P, Pranda A, et al. Polymer etching by atmospheric-pressure plasma jet and surface micro-discharge sources: Activation energy analysis and etching directionality[J]. *Plasma Processes and Polymers*, 2018, 15(5): 1700217.
- [13] Song J-S, Lee M J, Ra J E, et al. Growth and bioactive phytochemicals in barley (*Hordeum vulgare* L.) sprouts affected by atmospheric pressure plasma during seed germination[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, 2020, 53(31): 314002.
- [14] Zhou Renwu, Zhou Rusen, Mai-Prochnow A, et al. Surface plasma discharges for the preservation of fresh-cut apples: microbial inactivation and quality attributes[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, IOP Publishing, 2020, 53(17): 174003.
- [15] 夏文杰, 刘定新. Ar 等离子体射流处理乙醇水溶液的放电特性及灭菌效应[J]. *电工技术学报*, 2021, 36(4): 765-776.  
Xia Wenjie, Liu Dingxin. Discharge characteristics and sterilization effect of ethanol aqueous solution treated by Ar plasma jet[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2021, 36(4): 765-776.
- [16] Hatamoto A, Emori K, Nishida H. Experimental Study on Heat Transfer of Dielectric Barrier Discharge Plasma Actuator Considering Heat Conduction of Dielectric Material[A]. *American Society of Mechanical Engineers Digital Collection*, 2021.
- [17] Xia Yang, Bi Zhenhua, Qi Zhihua, et al. Effect of electrode configuration on the uniformity of atmospheric pressure surface dielectric barrier air micro-discharge[J]. *Journal of Applied Physics*, 2018, 123(8): 083301.
- [18] Pekárek S. Asymmetric properties and ozone production of surface dielectric barrier discharge with different electrode configurations[J]. *The European Physical Journal D*, 2013, 67(5): 94.
- [19] Emeraldi P, Imai T, Hayakawa Y, et al. The influence of dielectric materials on CO<sub>2</sub> conversion performance of pulsed micro-gap cylindrical dielectric barrier discharge reactor[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2023.
- [20] Yang Guoqing, Li Anbang, Fang Jian, et al. Effect of Dielectric Surface Conductivity on Atmospheric Dielectric Barrier Discharge[A]. *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*[C]. 2013: 278-282.
- [21] Dong L F, Fan W L, Wang S, et al. Pattern formation in dielectric barrier discharges with different dielectric materials[J]. *Physics of Plasmas*, 2011, 18(3): 033506.
- [22] Jain V, Srinivasan R, Agarwal V. An accurate electrical model for atmospheric pressure DBD plasma in air with experimental validation[A]. *2016 7th India International Conference on Power Electronics (IICPE)*[C]. 2016: 1-4.
- [23] López-Fernandez J A, Peña-Eguiluz R, López-Callejas R, et al. Electrical model of dielectric barrier discharge homogenous and filamentary modes[J]. *Journal of Physics: Conference Series*, IOP Publishing, 2017, 792(1): 012067.
- [24] Wilde N D, Xu H, Gomez-Vega N, et al. A model of surface dielectric barrier discharge power[J]. *Applied Physics Letters*, 2021, 118(15): 154102.
- [25] Zhou Simin, Huang Xiutao, Liu Minghai. Electrical model and experimental analysis of a double spiral structure surface dielectric barrier discharge[J]. *Plasma Science and Technology*, IOP Publishing, 2019, 21(6): 065401.
- [26] Pons J, Moreau E, Touchard G. Asymmetric surface dielectric barrier discharge in air at atmospheric pressure: electrical properties and induced airflow characteristics[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2005, 38(19): 3635.
- [27] Jakob H, Kim M. Electrical Model for Complex Surface DBD Plasma Sources[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2021, 49(10): 3051-3058.
- [28] 郝玲艳, 李清泉, 毕晓甜. 沿面介质阻挡放电等离子体特性参数的仿真计算[J]. *高电压技术*, 2014, 40(10): 3018-3024.

- Hao Lingyan, Li Qingquan, Bi Xiaotian. Simulation calculation of characteristic parameters of discharge plasma blocked along surface medium[J]. High Voltage Technology, 2014, 40(10): 3018-3024.
- [29] 方志, 钱晨, 姚正秋. 大气压环环电极结构射流放电模型建立及仿真[J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 218-228.
- Fang Zhi, Qian Chen, Yao Zhengqiu. Modeling and simulation of jet discharge in atmospheric pressure ring-ring electrode structure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 218-228.
- [30] 冉冬立, 蔡忆昔, 王军. 基于 Q-V Lissajous 图形的介质阻挡放电试验研究[J]. 绝缘材料, 2009, 42(4): 72-76
- Ran Dongli, Cai Yixi, Wang Jun. Study on dielectric barrier discharge test based on Q-V Lissajous graph method[J]. Insulating Materials, 2009, 42(4): 72-76.
- [31] Enloe C L, McLaughlin T E, VanDyken R D, Kachner K D, Jumper E J and Corke. T C. Mechanisms and Responses of a Single Dielectric Barrier Plasma Actuator: Plasma Morphology[J]. AIAA Journal, 2004, 42(3): 589-594.
- [32] Underwood T, Roy S, Glaz B. Physics based lumped element circuit model for nanosecond pulsed dielectric barrier discharges[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(8): 083301.
- [33] Liu S, Neiger M. Electrical modelling of homogeneous dielectric barrier discharges under an arbitrary excitation voltage[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2003, 36(24): 3144.
- [34] Thomas U, Subrata R, Bryan G. Physics based lumped element circuit model for nanosecond pulsed dielectric barrier discharges[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113 (8): 083301.
- [35] Raizer Y P, Allen J E. Gas discharge physics[M]. Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1991: 70.

作者简介

陈星宇 男, 1994 年生, 博士研究生, 研究方向为介质阻挡放电的放电特性。

E-mail: d201880468@hust.edu.cn

熊紫兰 女, 1986 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为气体放电与绝缘。

E-mail: zilanxiong@hust.edu.cn (通信作者)

## Calculation of the characteristic parameters of surface micro-discharge and the effect of dielectric sheet properties

Xingyu Chen, Chen Lu, Zilan Xiong\*

(State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology, Huazhong University of Science and Technology Wuhan 430074 China)

**Abstract** Dielectric barrier discharge (DBD) has the characteristics of high plasma density, large number of high-energy electrons, low gas temperature and wide application range, so it has been widely studied and attracts huge attention. Surface micro discharge (SMD) is a kind of DBD with non-uniform discharge gap. Compared with other atmospheric pressure low temperature plasma sources, SMD can directly generate a large area of uniform plasma in the air without special rare gases, and is widely used in many fields, for example, medical sterilization, material modification, pollution control, agriculture and food industry. The characteristics of SMD are the basis of its application research. The dielectric sheet properties, working gas and ambient temperature will affect the discharge characteristics of SMD. The existing researches mainly focus on the influence of dielectric properties on the discharge intensity and uniformity under uniform gap, while the influence of dielectric parameters on the discharge characteristics of SMD with non-uniform discharge gap is less studied.

In order to deeply understand the discharge characteristic and the effect of dielectric sheet properties, first of all, we selected  $\text{SiO}_2$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dielectric sheets with dielectric parameters of 3.7 and 9.34, respectively, and chosen two thicknesses of 0.5mm and 1mm; Then, we measured the variation curve of SMD discharge power under different dielectric parameters through experiments, and selected the voltage and power parameters of two dielectric sheets and two thickness parameters under three groups of different voltages. The discharge power of the two groups of data selected from the same dielectric sheet with different thickness kept basically the same.

Next, an equivalent circuit model of SMD was established based on the physical process of discharge and the unique discharge structure of SMD. The electron continuity equation was solved by the Boltzmann equation solver, and the characteristics of gap voltage, plasma resistance and electron density were calculated.

The results show that for the same kind of dielectric sheet with different thicknesses, the discharge area and the characteristic parameters of SMD are consistent when the discharge power is the same. For different kinds of dielectric sheets, the discharge power, air gap voltage, the plasma resistance and the electron density of SMD under dielectric sheets with larger dielectric constant have a larger rate of change with the applied voltage, which indicates that the dielectric materials with larger dielectric constant have higher sensitivity to the adjustment of electron density of discharge. Compared with materials with smaller dielectric constant, the same electron density can be obtained under lower applied voltage input. In the case of similar voltage, the discharge power, the air gap voltage and the electron density are larger and the resistance is smaller under the dielectric sheet with a larger dielectric constant and the same thickness. Finally, the correctness of the model and simulation calculation is verified by comparing the calculated power with the measured power. The error between the calculated discharge power and the measured power of the SMD circuit model proposed in this paper is in the order of  $10^{-2}W$ , the maximum relative error is less than 7%.

This paper provides reference for parameter selection and structure design of SMD in practical application. The consistency of SMD can be ensured by controlling dielectric properties and discharge power. In order to reduce the applied voltage and improve the discharge efficiency of SMD, it is a simple and effective method to select thin dielectric plates with large relative dielectric constant.

**Keywords:** Surface micro discharge, dielectric sheet, gas gap voltage, plasma resistor, discharge power