

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.04.010

纳秒脉冲电源作用下沿面介质阻挡放电等离子体 特性参数的仿真计算

郝玲艳¹, 李清泉²

(1. 齐鲁工业大学电气工程与自动化学院, 济南 250353;

2. 山东大学电气工程学院特高压输变电技术与装备山东省重点实验室, 济南 250061)

摘要: 为了深入探究纳秒脉冲电源作用下沿面介质阻挡放电等离子体特性参数的演化规律,揭示其作用机理,文中搭建了纳秒脉冲电源作用下非对称结构沿面介质阻挡放电等离子体光电特性实验测量平台,并在此基础上建立了放电集总参数等效电路模型,通过对比实验推理和仿真计算分别得到的放电电流以及电子密度参量,证明了模型的有效性。文中通过该模型计算得到了介质表面电压、气隙电压以及电子温度等等离子体特性参数随时间的变化关系,并进一步研究了电源斜率对大气压沿面介质阻挡放电电流的影响。得到的主要结论为:单极性纳秒脉冲电源作用下,在脉冲上升沿存在二次放电,在下降沿存在反向放电过程,电子温度与电子密度高达 8.3 eV 和 $2.7 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$,电源斜率对放电有重要的影响,随着电压上升率增加,第 1 次放电的电流增大。放电时刻提前,但是对应的第 2 次放电电流略有减小,下降率的增加则对应着第 2 次放电电流幅值的增加,第 1 次放电的电流则略有减小,研究结果为深入分析激励器放电特性,提高等离子体发生器效率提供参考。

关键词: 纳秒脉冲电源; 电路仿真; 等离子体; 电源斜率

Simulation Calculation of the Surface Dielectric Barrier Discharge Characteristic Parameters Under Nanosecond

HAO Lingyan¹, LI Qingquan²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Qilu University of Technology, Jinan 250353, China;

2. Shandong Provincial Key laboratory of UHV Transmission Technology and Equipment, School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In order to better understand the discharge mechanism of the surface dielectric barrier discharge and illustrate the regularity evolution of characteristic parameters of the plasma, an equivalent circuit of the asymmetric surface dielectric barrier discharge plasma generator is established based on the experimental results of electrical and optical diagnostics of surface dielectric barrier discharge. The parameters such as the discharge current and electron density acquired by the equivalent circuit model are fitting well with the experimental data, which proves the effectiveness of this model. Firstly, the variation of air gap voltage, voltage drop across the discharge gap, electron density, electron temperature, were calculated. Moreover, the influence of the slope of the power supply on the discharge parameters mentioned above is analyzed. It is shown that under the effect of the nanosecond discharge, there exists the second discharge under the rising edge and the reverse discharge under the falling edge, and the electron density and electron temperature are $2.7 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ and 8.3 eV. The slope of the power supply takes important part in the discharge. As the voltage rate of rise is increased, the discharge occurs earlier and the current in the first discharge increases but the second discharge current decreases slightly. The increase of the voltage rate of decrease is positive correlation with the second discharge, but the first discharge current decreases slightly.

Key words: nanosecond pulsed power; circuit simulation; plasma; power supply slope

收稿日期:2016-11-27; 修回日期:2017-02-06

基金项目:国家自然科学基金(51077089)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51077089).

0 引言

近年来,沿面介质阻挡放电等离子体发生器结构简单、响应快、可控性强、易于产生大面积的等离子体,在空气流动控制领域具有广阔的应用前景^[1-8],此外在放电的过程中,会产生大量的氧原子(O)、羟基(OH)、双氧水(H₂O₂)、臭氧(O₃)等种类繁多的活性粒子,在生物医学、环境保护、纳米技术等应用领域得到了越来越广泛的关注^[9-11]。随着电源技术的不断向脉冲方向发展,使用纳秒脉冲电源作为激励源,可以在瞬间产生高能量密度的等离子体、而且具备平均功耗率低和稳定性好等特点,因此众多的研究者开始研究纳秒脉冲电源作用下放电等离子体的特性^[12-17]。

通过建立合适的等效电路模型来模拟其放电情况,与唯象学仿真、粒子群—蒙特卡罗计算、流体模型^[18]等方法相比,无需过多的考虑放电复杂的物理过程,仿真速度快,是一种较为简捷的方法。可以实现电源参数和放电电流、功率、气隙电压等参数之间关系的研究。文[19]使用电流源代表等离子体,基于实验结果获得了平行板介质表面电压、气隙电压、气隙电流传输电荷等参数变化规律;文[20]采用遵循幂律的受控电流源模型分别对平行板放电和沿面放电进行了等效电路分析;文[21]通过引入虚拟电极代表电荷在介质表面的积累建立了集总参数等效电路;文[22]建立了时空集总参数等效电路,计算了介质表面电压和放电电流等参数。文[23]使用 VCCS 电路等效高低压电极间的放电,引入可变电阻和可变电容等效射流和溢流部分建立了射流放电模型;文[24]使用 Maxwell 软件计算极间电容,通过电路模型得到了更为准确的能量沉积特性曲线;文[25-27]也对等效电路模型的研究做了大量的工作,取得了良好效果。

该课题组在上述等效电路模型的基础上,参考文[28]建立时空集总参数等效电路模型的方法,克服了现有模型局限于放电电压、放电电流、传输电荷以及气隙电压的研究,通过实验估测等离子体几何尺寸,联立基尔霍夫电压方程、欧姆定律和电子连续性方程,建立电子密度与电阻之间的计算关系,进而通过电阻的大小变化模拟放电的通断,借助软件 MATLAB/Simulink 和波尔兹曼方程求解器,对正弦波电源作用下沿面介质阻挡放电等离子体的特性参数进行了仿真计算^[29]。为了进一步揭示纳秒脉冲电源作用下等离子体特性参数变化规律,笔者在前期工作的基础上进一步建立纳秒脉冲电源

激励下放电等效电路模型,研究了介质表面电压、气隙电压、放电电流、电子密度和电子温度等参数的演化规律,并进一步分析了纳秒脉冲电源电压上升率和电压下降率对大气压沿面介质阻挡放电电流的影响。

1 实验设置

非对称大气压沿面型介质阻挡放电的实验平台示意图见图 1^[3],包括高压纳秒脉冲电源、沿面介质阻挡等离子体激励器、发射光谱测量系统、高速相机以及电学特性测量系统。

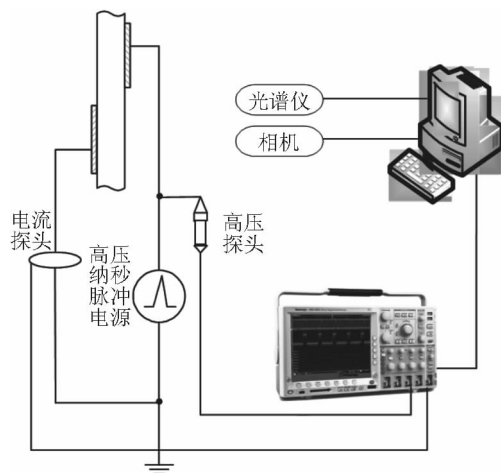


图 1 非对称沿面型介质阻挡放电实验平台示意图

Fig. 1 Experimental arrangement of the asymmetric surface dielectric barrier discharge plasma actuator

实验中采用的电源为基于磁开关重复频率纳秒脉冲源,上升时间约 120 ns,脉宽 200 ns 单极性高压纳秒脉冲电源,波形为类三角形脉冲,幅值为 0~37 kV,脉冲重复频率在 1 Hz~2.5 kHz 之间连续可调。

实验介质板采用 Al₂O₃ 介质板,厚度为 0.5 mm,使用铜箔制作的线性电极交错分布在介质板两侧,电极宽度相同几何尺寸一致,宽度为 1 mm,长度为 75 mm,水平间距为 1 mm。放电电压和电流波形分别通过高压探头 Tek6015A 和电流探头 TCP0030A 获得,并由 Tektronix4014B 数字示波器记录。放电图像通过高速相机 Hispec5 获取。

2 等效电路模型

2.1 模型建立

非对称沿面介质阻挡放电示意图见图 2^[22],放电具有对称性,分别产生在高压电极和地电极两侧,在电场力的作用下,电荷在介质板表面不断积累和释放,因此将上下介质板表面等效为虚拟电

极,分别与高压电极与地电极形成等离子体放电通道,等效电路模型见图3^[29]。

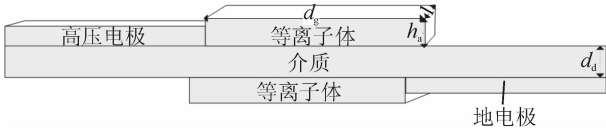


图2 非对称沿面介质阻挡放电示意图

Fig. 2 Sketch of the asymmetric surface dielectric barrier discharge

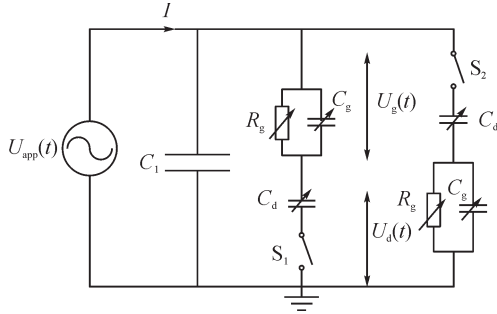


图3 等效电路模型

Fig. 3 Equivalent circuit model

所在支路分别代表了高压电极和地电极两侧的放电等效电路,开关 S_1 、 S_2 的闭合与断开分别代表了两电极附近放电的点燃与熄灭,由等离子体的电阻变化控制; C_1 为高压电极和地电极间的等效电容,由电极自身结构决定; C_g 代表高压电极与虚拟电极之间的等效电容; C_d 为虚拟电极与地电极之间的电容; R_g 为等效电阻; h_a 和 d_g 分别代表等离子体的厚度和横向长度; l 为线状电极的长度; I 为放电总电流; $U_{app}(t)$ 、 $U_d(t)$ 和 $U_g(t)$ 分别代表电源电压、介质表面电压以及气隙电压^[29]。

2.2 模型计算

2.2.1 基尔霍夫电压定律

根据基尔霍夫电压定律可以推导出图3对应的方程(1)。由于放电过程中产生的等离子体在外观上看较为均匀,因此 C_g 、 C_d 、 R_g 的求法简化为平板电容计算方法,见式(2)–(4)。

$$\frac{dU_g(t)}{dt} = \frac{dU_{app}(t)}{dt} \left(\frac{C_d}{C_g + C_d} \right) - \frac{U_g(t)}{R(C_g + C_d)}; \quad (1)$$

$$C_g = \frac{\epsilon_0 \epsilon_a h_a l}{d_g}; \quad (2)$$

$$C_d = \frac{\epsilon_0 \epsilon_d d_g l}{d_d}; \quad (3)$$

$$R_g = \frac{d_g}{\sigma h_a l}. \quad (4)$$

将式(2)–(4)代入式(1),得到

$$\frac{dU_g(t)}{dt} = \frac{d_g}{d} \frac{dU_{app}(t)}{dt} - \frac{\sigma d_d}{\epsilon_0 \epsilon_d} \frac{h_a}{d_g} U_g(t); \quad (5)$$

$$d = d_g + d_d h_a / (d_g \epsilon_r). \quad (6)$$

式(1)–(6)中: d 代表放电系统空间尺度,对于放电具有较大的影响,相对介电常数 ϵ_a 和 ϵ_r 取值分别为1和10;介质板厚度 d_d 的值为0.5 mm; h_a 、 d_g 的值则通过高速相机拍摄的图片估测; C_1 值约为11.6 pF^[30]。

2.2.2 电导率求解

式(4)中电阻不仅与等离子体几何参数有关而且与电导率相关,在放电过程中等离子体的电导率随着放电空间粒子密度的变化而变化,根据欧姆定律^[31]

$$j = \sigma E; \quad (7)$$

$$\sigma = e(n_e \mu_e + n_i \mu_i). \quad (8)$$

式(7)、(8)中, n_e 、 n_i 、 μ_e 、 μ_i 分别代表电子密度($1/m^3$)、离子密度($1/m^3$)和相应的迁移率($m^2/(V \cdot s)$),因为等离子体呈准电中性,所以电子密度与离子密度相等,但离子迁移率和电子迁移率相比差3个数量级,所以可以近似的认为空气放电产生的等离子体电导率由式(8)的第1项决定,空气中的电子迁移率近似为常数,取值为 $0.113 \text{ m}^2/(V \cdot s)$ ^[32],因此电导率的求解可以转化为电子密度的求解,根据电子的连续性方程式(9):

$$\frac{\partial n_e}{\partial t} + \nabla \Gamma_e = R_e; \quad (9)$$

$$\Gamma_e = -\mu_e E n_e - \nabla (D_e n_e); \quad (10)$$

$$R_e = A p \mu_e E n_e e^{\frac{-B p}{|E|}} - \beta n_e n_i. \quad (11)$$

式(9)–(10)中: Γ_e 为电子通量; R_e 为源项, $1/(m^3 \cdot s)$,包括带电粒子的产生项(式(11)第1项)和消失项(式(11)第2项); E 代表电场强度, V/m ; A 是和温度有关的常数、在一定的介质中 B 也是常数,在大气压空气,二者取值通常为 $11.0 \text{ (1/(m} \cdot \text{Pa))}$ 和 $273.8 \text{ (V/(m} \cdot \text{Pa))}$ ^[32]; β 为复合系数(m^3/s); D_e 为电子扩散系数, m^2/s ;下标 e 表示为电子^[29]。

为了简化计算,近似认为等离子体均匀分布,电子密度与离子密度相等,空间净电荷密度为零,电场均匀分布,不考虑电子的扩散,因此电子通量简化为^[28]

$$\Gamma_e \approx n_e \mu_e |E|. \quad (12)$$

模拟中空间电场 E 由式(13)所示方程求解

$$E_g(t) = U_g(t) / d_g. \quad (13)$$

此外,空气中氮气和氧气的比例为4:1,因此式(7)可以转化为式(14)近似求解^[28]

$$\frac{dn_e}{dt} \approx A p |\mu_e E n_e| e^{\frac{-B p}{|E|}} - 0.8 \beta_{N_2} n_e^2 - 0.2 \beta_{O_2} n_e^2. \quad (14)$$

通过MATLAB/Simulink软件联立求解上述方程组,可以求出电流、介质表面电压、气隙电压、等离子体电子密度等参数。

3 结果分析

3.1 模型有效性验证

为了验证模型的有效性,模型所施加电源参数与实验外加电源参数一致,即幅值为 8 kV,半高宽 200 ns,上升沿 120 ns,脉冲重复频率 1 kHz,当放电稳定后,计算得到了一个脉冲周期内,外加电压、介质表面电压、气隙电压以及放电电流变化见图 4。

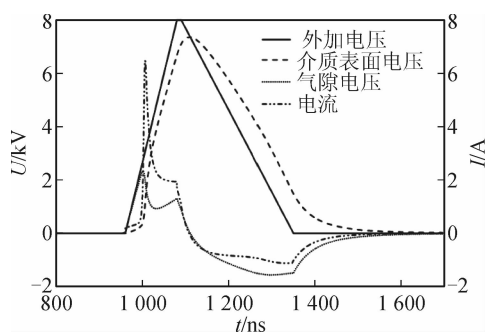


图 4 放电电压电流特性计算图形

Fig. 4 Calculated characteristics of discharge voltage and current

实验测得的结果见图 5^[15],为了保证测量的准确性,实验结果取多次测量的平均值。比较图 4、5 可以发现两者波形基本相同,放电起止时刻略有差异。在纳秒脉冲电压上升沿,随着脉冲电压的增加,仿真与实验均出现了两次放电过程,且第 2 次放电的电流幅值小于第 1 次放电电流幅值,计算模型得到的峰值电流为 6.5 A,实验测得的平均峰值电流为 6 A,此外,二者在脉冲电压的下降沿均存在反向放电,因此可以证明该模型是有效的。

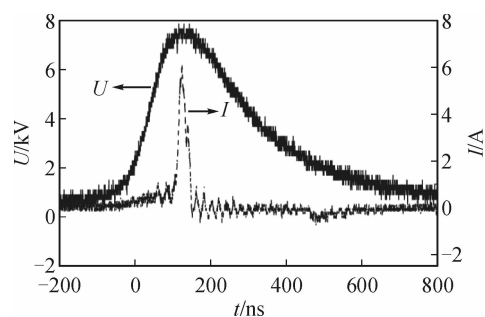


图 5 伏安特性曲线实验图形

Fig. 5 Experimental VA characteristics

3.2 等离子体介质表面电压、气隙电压

等离子体介质表面电压和气隙电压随外加电压的变化规律如图 4 虚线所示。在单极性纳秒脉冲电源的上升沿,气隙电压随着外加电压的增加不断增大,直至击穿产生放电,放电电流迅速增至最大值。同时,电荷在介质板上不断累积,介质板电压持续增加,而气隙电压迅速降低,放电电流迅速减小,

第 1 次放电完成。随着外加电压的继续增大,气隙电压再次增大,随之出现第 2 次放电。在纳秒脉冲电源的下降沿,随着电源电压的减小,介质板电压高于外加电压,使得气隙电压反向增加,出现了反向放电。随着反向放电结束,介质板电压和气隙电压都趋向于零。

3.3 等离子体电子密度

通过模型计算得到的平均电子密度在一个纳秒脉冲作用时间内的变化曲线见图 6,初始电子密度为 $1 \times 10^{13} \text{ m}^{-3}$ ^[33]。当放电稳定后,随着外加电压的持续增加,气隙击穿,电子密度随之增大,峰值可达 $2.65 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$,随着放电电流减小,电子密度减少,并在纳秒脉冲的下降沿,随着反向放电的发生,电子密度又出现第 2 次增加,峰值为 $0.55 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$,之后随着放电的熄灭,电子密度减小。电子密度的变化规律与电流的变化规律一致,电流增大,电子密度增加,反之则减小,说明了等离子体中电流主要是由电子的运动构成,以电子电流为主。

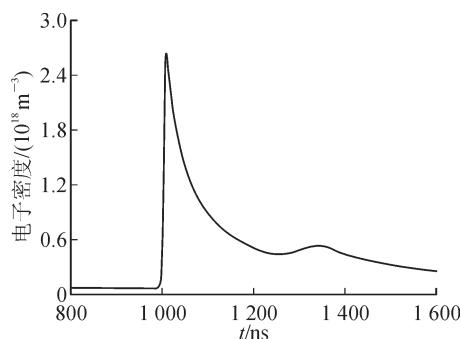


图 6 电子密度随时间的演化

Fig. 6 Evolution of the electron density over time

此外,实验测得了纳秒脉冲电源作用下放电发射光谱,光谱仪光纤探头固定于支架上,对准放电区域,距离高压电极 100 mm 并保持水平,可根据实验要求实现在竖直方向和水平方向上的位置调节。为了保证结果的可靠性,实验对放电电极板多个放电位置进行了光谱采集。光谱主要由氮分子第二正带系 $\text{N}_2 (\text{C}^3\Pi_u \rightarrow \text{B}^3\Pi_g)$ 和氮分子离子的第一负带系 $\text{N}_2^+ (\text{B}^2\Sigma_u^+ \rightarrow \text{X}_2\Sigma_g^+, 0-0, 391.4 \text{ nm})$ 组成,见图 7。

将电子数密度与 371.1、380.5 nm 2 组谱线比的关系拟合成经验式(15)^[4]

$$\frac{I_{\text{peak}}^{371.1}}{I_{\text{peak}}^{380.5}} = C_0 + C_1 \lg n + C_2 (\lg n)^2. \quad (15)$$

式(15)中: n 代表电离率; C_0 、 C_1 、 C_2 为常数,通过实验拟合得到。通过计算得到幅值 8 kV,脉冲重复频率 1 kHz,电子密度为 $4.05 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$,与模型计算得到的电子密度在同一数量级,因此,进一步证明

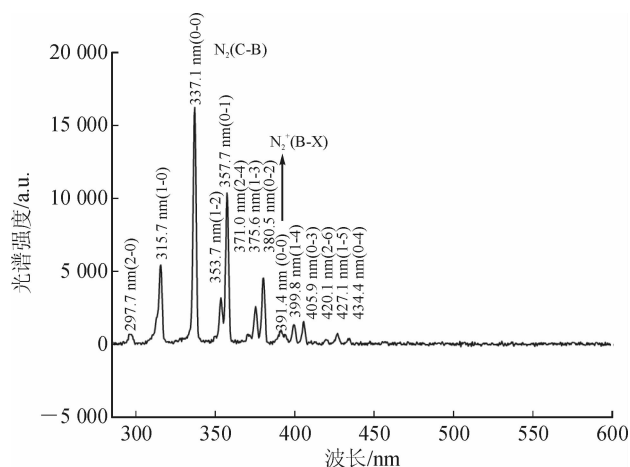


图7 空气沿面介质阻挡放电发射光谱

Fig. 7 Emission spectra emitted by SDBD in air

了模型的有效性。

3.4 等离子体电子温度

通过 BOLSIG+软件计算出大气压空气放电中约化场强与电子温度的对应关系,见图 8^[22],在此基础上,通过编程计算得到在一个纳秒脉冲电源作用周期内电子温度的变化规律见图 9。

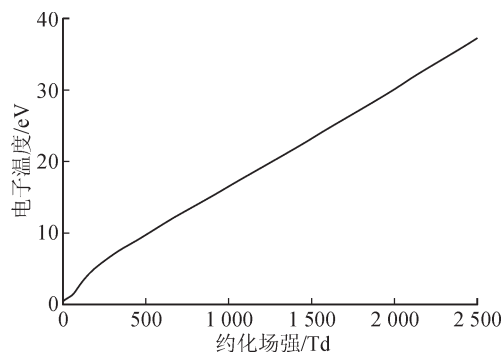


图8 电子温度与约化场强的关系曲线

Fig. 8 Relationship between electron temperature and the reduced electric field strength

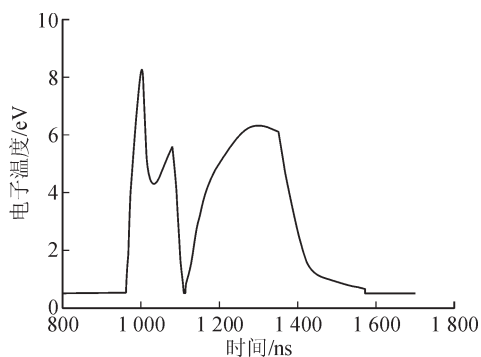


图9 电子温度变化曲线

Fig. 9 Evolution of the electron temperature

根据图 9 可知,纳秒脉冲作用下的电子温度最高可以达到 8.3 eV,高能电子数量增多,随着放电的多次发生,电子温度出现了多次上升下降的过程。

3.5 等离子体参数随电源斜率的变化规律

众多研究者对纳秒脉冲与正弦波电源作用下的等离子体放电规律进行研究指出,纳秒脉冲电压上升及下降的快慢即电源斜率对放电特性有着重要的影响^[34-36]。因此,该节研究纳秒脉冲电源其他参数设置为:幅值为 7 kV,脉冲宽度为 10 ns,纳秒脉冲间隔为 40 ns,通过改变脉冲上升率及下降率,研究放电电流的变化趋势。得到的伏安特性曲线见图 10。图 10(a)对应着上升率变化对比图,上升率分别为 2.5×10^{11} 、 2×10^{11} 、 1.4×10^{11} V/s,图 10(b)示出的是下降率改变的放电电流图,下降率分别为 -2.5×10^{11} 、 -2×10^{11} 、 -1.4×10^{11} V/s。

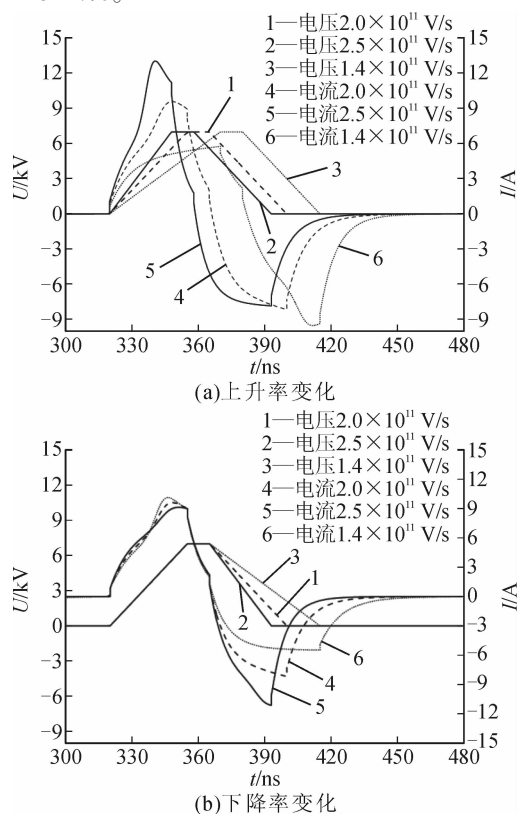


图10 放电电流随纳秒脉冲电压斜率变化伏安特性

Fig. 10 Evolution of the discharge current with the change of the power supply slope

通过图 10(a)明显看出,随着电压上升率增加,第 1 次放电的电流增大,放电时刻随之提前,但是相应的反向放电电流减小。由图 10(b)可知,电源下降率的增加或减少则对应着二次放电的幅值的增加或减少,而第 1 次放电的电流则呈现相反的变化。

由此可见,电源的斜率对放电的影响至关重要,当电压的增长率足够大时,就会导致放电间隙的过电压,高的过电压引起放电间隙高的约化电场,进一步导致相对较高的电子有效温度,电离效率也就越高,这就最终导致高的电子产生效率,使其在电流幅值、瞬时功率、电子密度、电子温度等各

项参数的对比上均存在着绝对的优势,在高速气流控制等需要高能注入的场合,具有广阔的应用前景。而相邻的两次放电出现不同的原因可能与空间剩余电子密度有关,因为当前一次放电电流较高时,会有较多的剩余电子,导致第2次放电时气隙电压快速减小,电流减弱,反之亦然。

4 结论

文中以非对称结构沿面介质阻挡放电等离子体发生器为研究对象,参照实验结果,建立了纳秒脉冲电源作用下等离子体发生器集总参数等效电路模型,主要的结论如下:

1)建立了一种能反映纳秒脉冲沿面介质阻挡放电过程的等效电路模型,并通过放电特性和光谱特性对模型的有效性进行了验证。建立了平均电子密度和电导率之间的关系,实现了电子密度和电子温度的推算。

2)单极性纳秒脉冲电源作用下,在脉冲的上升沿和下降沿均有放电发生,电子温度与电子密度最高值分别为 8.3 eV 和 $2.7 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 。电源斜率对放电有重要的影响,随着电压上升率(下降率)增加或减少,放电幅值以及放电时刻均发生变化。

3)利用此模型可以进一步得到实际实验过程中无法直接测量获得的放电参量,如气隙电压、介质表面电压、电子温度等,从而对沿面介质阻挡放电特性进行更深入的研究,为优化反应器设计、提高放电效率提供参考。

参考文献:

- [1] CORKET C, POST M L, ORLOV D M. Single dielectric barrier discharge plasma enhanced aerodynamics: physics, modeling and applications[J]. Experiments in Fluids, 2009, 46(1): 1-26.
- [2] QI Xiaohua, YANG Liang, YAN Huijie, et al. Experimental study on surface dielectric barrier discharge plasma actuator with different encapsulated electrode widths for airflow control at atmospheric pressure[J]. Plasma Science and Technology, 2016(10): 1005-1011.
- [3] DING Xinliu, JIA Fengli, AI Junyang, et al. Comparison between electropositive and electronegative cold atmospheric-pressure plasmas: A modelling study[J]. High Voltage, 2016, 1(2): 81-85.
- [4] WU Y, ZHU Y, CUI W, et al. Simulation of nanosecond pulsed DBD plasma actuation with different rise times[J]. Plasma Processes and Polymers, 2015, 12(7): 642-654.
- [5] 何堃, 庞磊, 狄东旭, 等. 气流环境中纳秒脉冲沿面介质阻挡放电的特性[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4254-4262.
- HAO Lingyan, PANG Lei, DI Dongxu, et al. Characteristics of nanosecond pulse surface dielectric barrier discharge in air flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4254-4262.
- [6] 郝玲艳, 李清泉, 司雯, 等. 氩气流增强沿面介质阻挡放电等离子体特性的实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(8): 2296-2304.
- HAO Lingyan, LI Qingquan, SI Wen, et al. Experimental study on improvement of plasma characteristics of surface dielectric barrier discharge caused by argon flow[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(8): 2296-2304.
- [7] 吴阳阳, 贾敏, 王蔚龙, 等. 新型介质阻挡放电等离子体激励器的放电与诱导流动特性实验[J]. 电工技术学报, 2016, 31(24): 45-53.
- WU Yangyang, JIA Min, WANG Weilong, et al. Experimental research on the discharge and induced flow characteristics of a new dielectric barrier discharge plasma actuator[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(24): 45-53.
- [8] 沈炎龙, 于力, 栾昆鹏, 等. 表面放电等离子体产生冲击波特性[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(6): 44-48.
- SHEN Yanlong, YU Li, LUAN Kunpeng, et al. Investigation on properties of surface discharge plasma induced shockwave[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(6): 44-48.
- [9] AYAN H, STAACK D, FRIDMAN G, et al. Application of nanosecond-pulsed dielectric barrier discharge for biomedical treatment of topographically non-uniform surfaces[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2009, 42(12): 125202.
- [10] 邵涛, 章程, 王瑞雪, 等. 大气压脉冲气体放电与等离子体应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 685-705.
- SHAO Tao, ZHANG Cheng, WANG Ruixue, et al. Atmospheric-pressure pulsed gas discharge and pulsed plasma application[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 685-705.
- [11] 张鹏, 洪延姬, 沈双晏, 等. 等离子体中活性粒子分析及化学动力学机理[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(3): 271-275.
- ZHANG Peng, HONG Yanji, SHEN Shuangyan, et al. Kinetic effects of plasma-assisted ignition and active particles analysis[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015, 27(3): 271-275.
- [12] QI Haicheng, GAO Wei, FAN Zhihui. Volume diffuse dielectric barrier discharge plasma produced by nanosecond high voltage pulse in airflow[J]. Plasma Science and Technology, 2016(5): 520-524.
- [13] PONS J, RABAT H, LEROY A, et al. Experimental study of a surface DBD actuator supplied by an atypical nanosecond rising high-voltage pulse[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(6): 1661-1668.
- [14] LI Shengtao, YU Shihu, YANG Feng, et al. Progress in and prospects for electrical insulating materials[J]. High Voltage, 2016, 1(3): 122-129.
- [15] 郝玲艳, 李清泉, 秦冰阳, 等. 纳秒脉冲电源作用下沿面介质阻挡放电等离子体激励器的特性[J]. 高电压技术, 2016, 42(9): 2936-2942.
- HAO Lingyan, LI Qingquan, QIN Bingyang, et al. Study on

- the characteristics of the surface dielectric barrier discharge plasma actuator under nanosecond pulse voltage[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(9): 2936-2942.
- [16] 杨国清, 张青, 钟思, 等. 表面粗糙度对表面介质阻挡放电特性的影响研究[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 96-100.
YANG Guoqing, ZHANG Qing, ZHONG Si, et al. Effect of surface roughness on characteristics of surface dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 96-100.
- [17] 王钰恒, 汤红卫, 仲崇山. 空气介质阻挡放电固氮的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 81-85.
WANG Yuheng, TANG Hongwei, ZHONG Chongshan. Study on air dielectric barrier discharge nitrogen fixation[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 81-85.
- [18] 李清泉, 郝玲艳. 沿面介质阻挡放电等离子体及其应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(4): 1079-1090.
LI Qingquan, HAO Lingyan. Surface dielectric barrier discharge plasma and its applications[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(4): 1079-1090.
- [19] LIU S, NEIGER M. Electrical modeling of homogeneous dielectric barrier discharges under an arbitrary Excitation-Voltage[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2003, 36(24): 3144-3150.
- [20] CHEN Zhiyu. Pspice simulation of one atmosphere uniform glow discharge plasma(OAUGDP)reactor systems[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2003, 31(4): 511-520.
- [21] ENLOE C L, MCLAUGHLIN T E, DYKEN R D V, et al. Enloe mechanisms and responses of a single dielectric barrier plasma actuator; Plasma morphology[J]. AIAA Journal, 2004, 42(3): 589-594.
- [22] ORLOV D M. Modelling and simulation of single dielectric barrier discharge plasma actuators[D]. Indiana: University of Notre Dame, 2006.
- [23] 方志, 钱晨, 姚正秋. 大气压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. The model and simulation studies for ring-ring electrode structure jet discharge at atmospheric pressure[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 218-228.
- [24] 庞磊. 气流场中重复频率纳秒脉冲表面放电特性研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2013.
PANG Lei. Investigation on characteristics of surface discharge under repetitive nanosecond pulses in the airflow[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2013.
- [25] 安治永, 李应红, 宋慧敏. 用 MATLAB/Simulink 仿真等离子体激励器电特性[J]. 高电压技术, 2008, 34(1): 91-94.
AN Zhiyong, LI Yinghong, SONG Huimin. Electrical characteristic simulation of plasma reactor system by MATLAB/simulink[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 91-94.
- [26] 宋慧敏, 李应红, 魏泮亭, 等. 等离子体电流体动力激励器的建模与仿真[J]. 高电压技术, 2006, 32(3): 72-74.
SONG Huimin, LI Yinghong, WEI Fengting, et al. Modeling and simulation of plasma electrohydrodynamic actuator[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(3): 72-74.
- [27] 张百灵, 樊昊, 李益文, 等. 基于射频放电一维模型的等离子体诊断[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 3994-3999.
ZHANG Bailing, FAN Hao, LI Yiwen, et al. Diagnostics of plasma based on one-dimensional model of capacitively coupled radio-frequency discharge[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 3994-3999.
- [28] 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): 1-11.
- [29] 郝玲艳, 李清泉, 毕晓甜, 等. 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, et al. Simulation calculation of characteristic parameters of surface dielectric barrier discharge[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3018-3024.
- [30] 李清泉, 房新振, 许光可, 等. 沿面型介质阻挡放电的电气特性[J]. 电工电能新技术, 2012, 31(1): 26-29.
LI Qingquan, FANG Xinzheng, XU Guangke, et al. Electrical characteristics of surface dielectric barrier discharge[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2012, 31(1): 26-29.
- [31] 赵青, 刘述章, 童洪辉, 等. 等离子体技术及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
ZHAO Qing, LIU Shuzhang, TONG Honghui, et al. Technology and application of plasma[M]. Beijing: National Defense University Press, 2009.
- [32] RAIZER Y P, ALLEN J E. Gas discharge physics[M]. Heidelberg: Springer-Verlag, 1991.
- [33] 李应红, 吴云, 梁华, 等. 提高抑制流动分离能力的等离子体冲击流动控制原理[J]. 科学通报, 2010, 55(31): 3060-3068.
LI Yinghong, WU Yun, LIANG Hua, et al. The mechanism of plasma shock flow control for enhancing flow separation control capability[J]. Chinese Science Bulletin, 2010, 55(31): 3060-3068.
- [34] IZA F, WALSH J, KONG M. From sub-microsecond to nanosecond pulsed atmospheric-pressure plasmas[J]. IEEE Transactions Plasma Science, 2009, 37(7): 1289-1296.
- [35] LEIWEKE R, GANGULY B. Effects of pulsed-excitation applied voltage rise time on argon metastable production efficiency in a high pressure dielectric barrier discharge[J]. Applied Physics Letters, 2007(90): 241501.
- [36] CHEN Bo, TAN Zhenyu, SONG Xinxin. Effects of the operating conditions on the electrical characteristics of pulse discharges in atmospheric-pressure pure helium[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2012, 40(4): 1103-1109.
- 郝玲艳(1981—), 女, 博士, 讲师, 主要从事气体放电及低温等离子体应用方面的研究。
- 李清泉(1969—), 男, 博士, 教授, 博导, 主要从事气体放电、电力设备绝缘监测等高电压技术方面的研究(通信作者)。