

微秒级大气压等离子体发生装置设计及其性能研究

刘 阳¹, 李泰煜², 葛国伟², 程 旭¹

(1. 中国电建集团河南省电力勘测设计院有限公司, 河南 郑州 450007; 2. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要: Tesla变压器具有电压比高、体积小、重量轻、能量传输效率高和结构紧凑等优点, 在重复脉冲源领域应用广泛, 但重复频率低是限制其在等离子体应用发展的主要因素。基于一种螺旋线型Tesla变压器, 设计了可重复微秒级脉冲发生器, 研究了电容等参数对脉冲源输出特性的影响, 提出了晶闸管的导通时序对重频脉冲源的控制要求。搭建了大气压等离子体发生装置, 研究了不同脉冲重复频率、不同电源电压幅值及不同电极间距对介质阻挡放电特性的影响。研究结果表明: 电极距离的缩小和频率与电压的升高都会导致单位放电次数增加, 改善放电的均匀性。

关键词: Tesla变压器; 脉冲发生器; 等离子体; 介质阻挡放电

Research on design and performance of the microsecond atmospheric pressure plasma generator

LIU Yang¹, LI Taiyu², GE Guowei², CHENG Xu¹

(1. Power China Henan Electric Power Survey & Design Institute Corporation Limited, Zhengzhou 450007, China; 2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Tesla transformer has the advantages of high ratio, small size, light weight, high energy transmission efficiency and compact structure. It is widely used in the field of repetitive pulse sources, but its low repetition rate is the main factor limiting its development in plasma applications. In this paper, based on a spiral Tesla transformer, a repetitive microsecond pulse generator is designed. The influence of parameters such as capacitance on the output characteristics of the pulse source is studied. The control requirements of the thyristor conduction timing for the repetitive pulse source are proposed. An atmospheric pressure plasma generating device was built to study the effects of different pulse repetition frequencies, different power supply voltage amplitudes and different electrode spacings on the dielectric barrier discharge characteristics. The results show that the reduction of electrode distance, the increase of frequency and voltage will increase the number of unit discharges and improve the uniformity of discharge.

Key words: Tesla transformer; pulse generator; plasma; dielectric barrier discharge

0 引言

子体技术在多个应用领域受到广泛关注^[1]。高压
随着高电压新技术的兴起, 气体放电等离 脉冲发生器作为产生放电等离子体的一个重要部

国家自然科学基金项目 (51977195; 51777025); 中国博士后科学基金项目 (2017M622370); 河南省高校重点科研项目 (16A470014, 19A470008)

分,近年来多个高校及学术机构都对其进行了深入研究^[2]。

目前,高压重频脉冲源多采用的是脉冲变压器或Marx发生器来实现^[3]。但上述存在结构复杂、成本较高和输出参数不足等问题。空心Tesla变压器相较于传统的脉冲变压器,结构无磁心,不存在铁磁材料饱和与频率限制的问题,具有结构简单、成本较低和高电压比的优点,适用于长寿命、高可靠性的应用场合。文献[14]对Tesla变压器、主控晶闸管和谐振充电装置进行了深入研究;文献[15]基于螺旋线型空心Tesla,采用线电极研究分析大气压弥散放电特性;此类研究为Tesla型脉冲源在气体放电等离子体方向的应用提供参考和建议。介质阻挡放电早期采用交流励磁驱动产生,但近年来,对脉冲高压源下的DBD等离子体放电的研究越来越多,其相较于交流励磁,能够在较大的参数范围内获得稳定的非热平衡等离子体^[16]。目前Tesla型脉冲源在气体放电领域相关方向应用研究较少,所以通过其重频工作下介质阻挡放电特性的研究,对推动其在等离子体领域的发展和工业领域的应用有着重要作用。

本文基于螺旋线型Tesla变压器设计了一种重频高压脉冲源。通过改变外电路参数,得到了变压器峰值电压比、能量效率和失谐系数等重要参数,分析Tesla变压器重频工作原理下的晶闸管工作特性,基于此脉冲源搭建大气压等离子体发生装置,研究了其在介质阻挡放电下的放电特性,研究结果证明了Tesla型脉冲源在大气压放电产生等离子体方向的可行性。

1 Tesla型脉冲源

1.1 脉冲源电路设计

图1为脉冲源电路示意图,交流电源通过调节自耦调压器 T_1 ,经限流电阻及整流二极管输入,对电容 C_0 充电,后经谐振升压电路向Tesla变压器 T_2 初级电容 C_1 充电,当光纤触发信号指令发出后,晶闸管 S_2 受控导通,初级电容 C_1 在变压器 T_2 一次侧放电,在空气导磁的作用下,可以在

变压器高压侧次级电容 C_2 的A点上得到上升沿微秒级的高压脉冲。

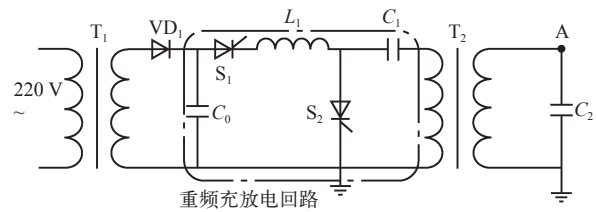


图1 脉冲源电路示意图

Fig. 1 Schematic diagram of high voltage pulse generator circuit

1.2 脉冲源输出特性分析

一、二次回路固有振荡角频率 ω_{01} 、 ω_{02} 表达式为

$$\omega_{01}^2 = \frac{1}{(L_1 + L_{k1})C_1}, \quad \omega_{02}^2 = \frac{1}{(L_2 + L_{k2})C_2} \quad (1)$$

失谐系数被定义为 $\alpha = \omega_{01}^2 / \omega_{02}^2$,它反映了变压器电路的调谐性能。

能量效率 η 是判定变压器输出性能的一个重要参数,通常 η 可以表示为

$$\eta = C_2(u_2)_{\max}^2 / C_1 U_1^2 \quad (2)$$

对不同 C_1 和 C_2 下的失谐系数 α 、峰值电压比 k 和能量效率 η 进行数据计算整理,结果如表1所示。失谐系数 $2.528 < \alpha < 2.942$ 时,输出峰值电压比达到最大,即可达123。失谐系数 $0.979 < \alpha < 1.474$ 时,能量效率较高,可达64%,这一能量效率指数相较于传统空心Tesla变压器型脉冲源是一个较高值。

表1 不同 C_1 和 C_2 下的失谐系数 α 、峰值电压比 k 和能量效率 η

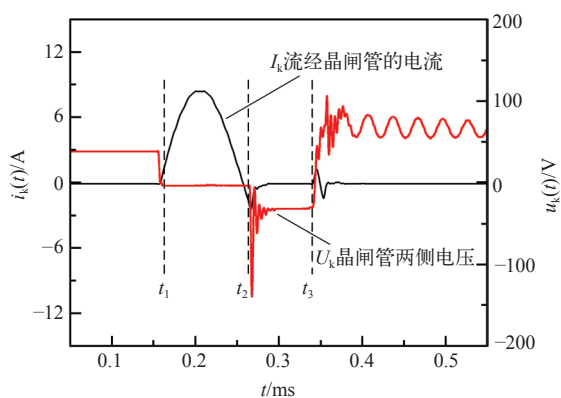
Tab. 1 Detuning coefficient α , peak ratio k and energy η efficiency under different C_1 and C_2

$C_1/\mu\text{F}$	C_2/pF	α	k	$\eta(\%)$
6.04	203	2.528	123	40.5
6.04	348	1.474	108	64.2
6.04	524	0.979	86	61.6
12.05	203	5.044	108	15.7
12.05	348	2.942	121	40.3
12.05	524	1.954	116	56.3
18.14	203	7.593	88	6.9
18.14	348	4.429	115	24.2
18.14	524	2.942	118	39

基于上述脉冲源电路工作原理,可得重频脉冲的形成是通过控制两个晶闸管的时序导通来实现的,而晶闸管是半控型器件,只能控制其

开通,不能控制其关断,试验采用晶闸管型号为 KP 1 500 V/1 000 A,当电流处于100 mA以下时自动关断,所以两个晶闸管控制时序配合,是脉冲源稳定工作的重要保证。

在脉冲源充电回路基础上,对晶闸管 S_0 施加脉宽为30 ms,测得晶闸管两端的电压信号 U_k 和流经晶闸管的电流信号 I_k 。图2中,晶闸管在 t_1 时刻导通, t_2 时刻受到反向电压影响,晶闸管在 t_3 时刻完成自关断,单次放电完成,由试验测试可知,回路中的晶闸管 S_0 关断时间为36 ms。

图2 晶闸管 S_0 关断成功波形图Fig. 2 Thyristor S_0 shutdown success waveform

脉冲源回路控制信号示意图如图3所示。图3中, S_1 与 S_2 为两个晶闸管光纤触发驱动板的独立脉冲信号,两者互不干扰。 S_1 的相位超前于 S_2 ,脉冲宽度均为30 μ s,两个脉冲的间隔为180 μ s,脉冲信号的周期为2 ms,频率为500 Hz。实际输出波形如图4所示。

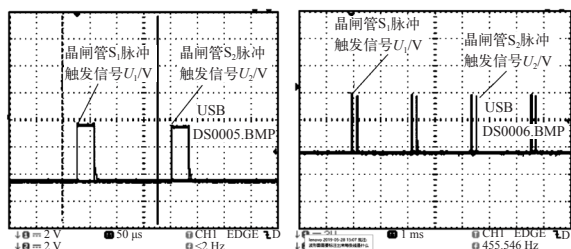


图3 脉冲源回路控制信号示意图

Fig. 3 Schematic diagram of pulse source loop control signal

2 介质阻挡放电实验及分析

2.1 大气压介质阻挡放电装置

大气压介质阻挡放电实验采用在电极之间

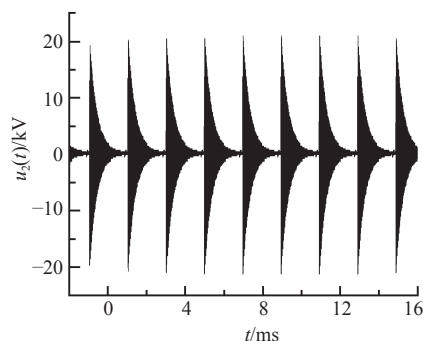
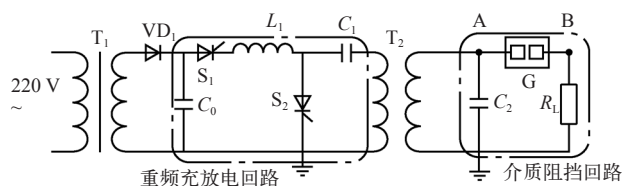


图4 重频微秒脉冲输出波形

Fig. 4 Repetitive microsecond pulse output waveform

放置一定厚度的阻挡介质,以此来抑制电弧的形成。介质阻挡放电实验装置加入实验回路,和采样电阻串联之后并联在次级电容两端。通过改变不同的间隙距离和脉冲频率,观察不同情况下的介质阻挡放电典型波形,拍摄放电图像,并记录次级电容最大电压以及流过介质阻挡放电装置的最大电流。图5为实验电路原理图,图6为实验采用放电电极结构示意图,图7为介质阻挡放电实验装置。该装置由两个不锈钢圆柱电极组成,电极直径均为2.5 mm,放电介质采用石英玻璃,厚度1 mm。放电介质于上电极平行放置,同时要保持与电极紧贴不留缝隙。



T_1 —调压器 VD_1 —二极管 L_1 —电感 S_1 —充电晶闸管

S_2 —放电晶闸管 C_0 —大容量电容 C_1 —初级电容 C_2 —次级电容

T_2 —Tesla变压器 G —介质阻挡放电实验电极 R_L —保护电阻

图5 介质阻挡放电实验装置电路

Fig. 5 Dielectric barrier discharge experimental device circuit

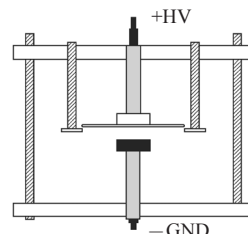


图6 介质阻挡放电电极结构图

Fig. 6 Dielectric barrier discharge electrode structure diagram

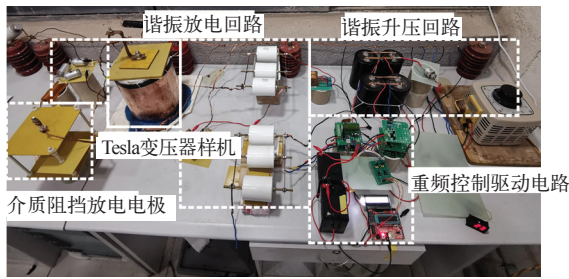


图7 介质阻挡放电装置实物图

Fig. 7 Dielectric barrier discharge electrode picture

2.2 介质阻挡放电的典型放电波形

通过改变不同的间隙宽度，观察各种情况的介质阻挡放电典型波形；在调整完宽度之后，通过调压器进行加压，时刻观察电极间隙内的实时现象。在稳定均匀放电时，记录均匀放电时的电压和电流，并用数码相机拍摄放电照片。同时用双通道示波器记录得到二次电压的波形，以便观察放电特性。在每组实验完成测得相应数据之后，要对介质板用酒精棉球进行擦拭，以防止长时间击穿产生的静电和空气中的灰尘等微粒对实验结果造成的不良干扰作用。

实验条件： $f=500\text{ Hz}$ （放电频率），周期 $30.4\text{ }\mu\text{s}$ 。实验所得典型波形如图8所示，数据如表2所示。其中， S 为放电电极间隙宽度； U_0 为 C_0 外加电压； U_2 为放电电极两端电压； I_2 为流经放电电极的电流。

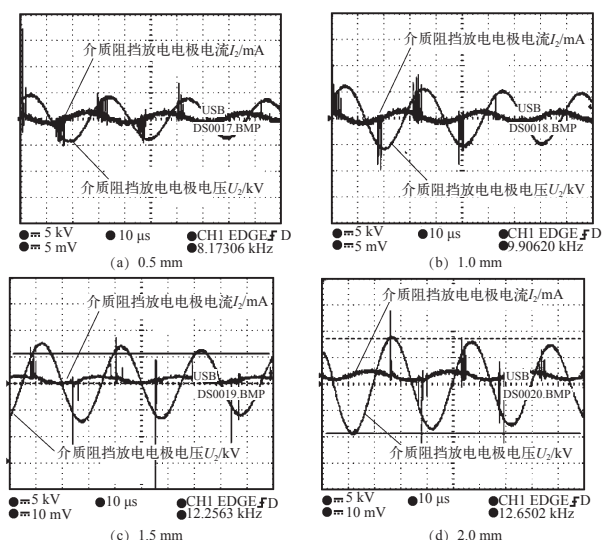


图8 不同间隙距离下的均匀放电时典型放电曲线

Fig. 8 Typical discharge curve for uniform discharge at different gap distances

表2 介质阻挡放电典型放电波形

Tab. 2 Dielectric barrier discharge experimental device circuit

S/mm	U_0/V	U_2/kV	I_2/mA	对应图
0.5	37	4.6	70	a
1.0	48	7.0	90	b
1.5	58	9.0	110	c
2.0	67	9.4	130	d

随着气体间隙宽度的不断增加，放电次数也会随之减少，因此波形图中的放电脉冲数目减少，且更加稀疏，最大电流的幅值也会随之降低。这表示在大气压条件下，随着放电间隙的减小，介质阻挡放电的均匀性会得到相应的改善。

通过对电极施加不同等级的电压，观察三种不同情况下的放电现象：①刚开始放电电压 U_{2a} ；②均匀放电电压 U_{2b} ；③最高放电电压 U_{2c} 。并用数码相机拍摄相关图像，如图9所示。0.5 mm的两种情况分布为均匀放电（见图9a），电压最高（见图9b）；1.0 mm的三种情况分别为刚开始放电（见图9c）、均匀放电（见图9d）和电压最高（见图9e）；1.5 mm的三种情况分别为刚开始放电（见图9f）、均匀放电（见图9g）和电压最高（见图9h）；2.0 mm的三种情况分别为刚开始放电（见图9i）、均匀放电（见图9j）和电压最高（见图9k）。表3为不同电压幅值下的放电特性数据。

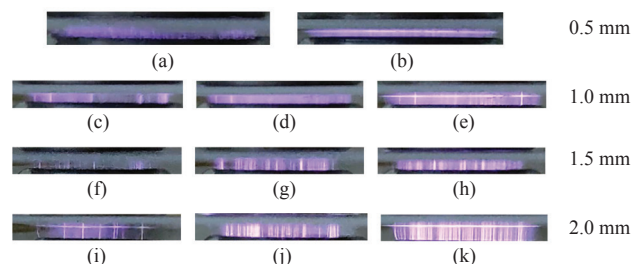


图9 不同电压幅值对放电特性的影响现象图

Fig. 9 Phenomenon of the effect of different voltage amplitudes on discharge characteristics

由实验图像对比可得：在脉冲重复频率和电极间隙宽度一定的前提下，当外加电压的幅值升高时，两个电极之间的间隙电压也会随之升高，当达到气体的击穿电压后会产生放电现象。

表3 不同电压幅值对均匀放电特性的影响

Tab. 3 The effect of different voltage amplitudes on discharge characteristics

S/mm	U_{2a}/V	U_{2b}/kV	U_{2c}/kV	I_2/mA
0.5	/	5	5.4	70
1.0	6.4	7	7.4	90
1.5	7.6	8	9.0	110
2.0	9.2	10	10.6	130

电压较低时, 放电强度较弱, 在放电现象刚出现时, 两个电极之间会有不明显的电弧产生, 通常为几根, 且均匀分布在间隙中。电极之间有不明显的紫色出现; 随着电压的逐渐升高, 放电强度也会逐渐变强, 电极间隙的电弧数量明显增多, 密集且均匀地分布在间隙中。电极间出现比较明显的紫色; 在电压达到最高时, 放电强度达到最强, 电极间隙的电弧密度为最大, 亮度最高, 且紫色进一步加深。

在放电的过程中, 随着外加电压的升高, 间隙中气体的电场强度随之增强, 会导致带电粒子数目增加, 且使其移动速度加快、密度更大。气体间隙的电压由于介质表面电荷作用, 会呈现快速下降, 直至放电现象结束。当放电结束之后, 下一个周期到来, 而间隙电压会随着外加电压的升高而再次升高, 所以会再次放电。因此外加电压越高, 这种周期循环越快, 在一定时间内就会产生更多的放电现象, 从而放电次数增加。

2.3 不同频率对幅值和表面放电现象的影响

通过对控制晶闸管通断的光纤驱动板, 对两个晶闸管进行时序控制, 对Tesla变压器一次的初级电容和二级的次级电容进行交替充放电次序的控制, 控制晶闸管电路导通的不同频率, 最后得到不同重复频率的高压脉冲。

为研究不同频率的重复脉冲对放电现象的影响, 将脉冲重复频率分别设置为150 Hz、300 Hz和500 Hz进行实验。在不同频率下进行上述不同幅值对表面现象的影响实验, 对比放电现象, 放电波形如图10所示。拍摄对应图像如图11所示。

随着频率升高, 对比相同间隙下的波形图和实验现象图可以发现: 当脉冲重复频率比较低

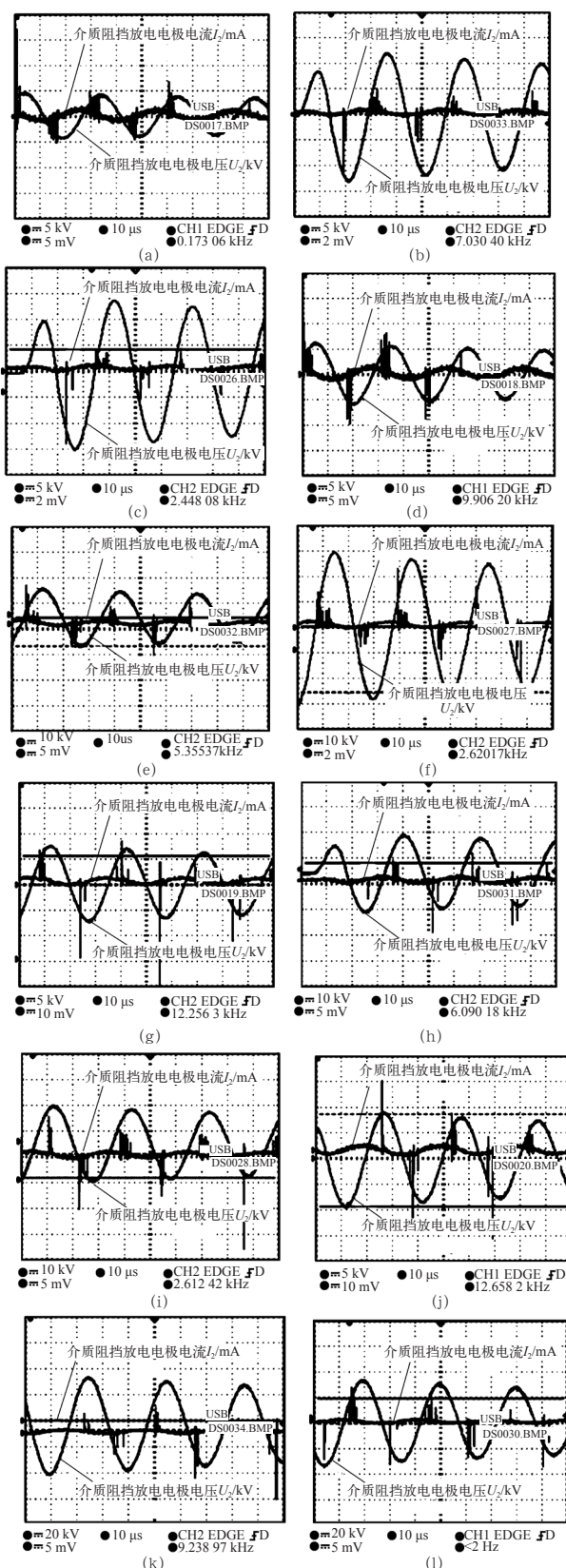


图10 不同频率和间距下的放电特性波形对比图

Fig. 10 Comparison of discharge characteristic waveforms at different frequencies and spacings

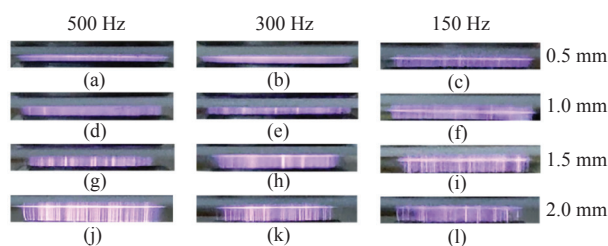


图 11 不同频率和间距下均匀放电现象对比图

Fig. 11 Comparison of uniform discharge phenomena at different frequencies and spacings

时,电极间的整体放电强度较弱,放电区域中电弧数量较少,紫色比较浅,且波形图中脉冲放电次数较少。随着脉冲重复频率的升高,放电强度也随之变强,电极间隙中的电弧数量明显增加,紫色变深。波形图中的脉冲放电次数增多。这表示在大气压条件下,随着脉冲重复频率的升高,介质阻挡放电的均匀性会得到相应的改善。随着外加电压的不断升高,放电次数也会随之增加,因此波形图中的放电脉冲数目增加,且更加密集,最大电流的幅值也会随之升高。因此外加电压的升高,也能在一定程度上改善介质阻挡放电在大气压条件下的均匀性。

综上所述,脉冲源频率和电压的升高以及气体间隙减小,这三种因素都能一定程度上改善大气压条件下的介质阻挡放电的均匀性。

3 结束语

本文基于对Tesla变压器的研究,设计了一种频率500 Hz、电压40 kV的Tesla重频脉冲源来产生微秒级重频脉冲,用于大气压中的介质阻挡放电实验。证明用Tesla变压器设计重频脉冲源来进行等离子体在大气压中持续均匀激发具有可行性。

1) 通过对一次回路中晶闸管工作原理的分析,进行了Tesla型重频脉冲源中脉冲重复频率部分的设计。通过对初级电容和次级电容进行不同组合的方法,测试分析了Tesla型重频脉冲源外电路参数对变压器电压比的影响。通过数据对比得出结论:当失谐系数保持在区间(1.60, 2.28)时,可以达到最高的电压比。

2) 采用设计的Tesla型重频脉冲源进行大气压下介质阻挡放电实验。研究了脉冲重复频率、电源电压幅值和电极间隙距离对放电特性的影响规律。通过数据和图像的对比可以得出,电极间隙距离的缩小、频率与电压的升高,都会导致单位放电次数的增加,使得放电均匀程度得到改善。

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.
- [2] 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.
- [3] 王昌金, 姚陈果, 董守龙, 等. 基于Marx和LTD拓扑的全固态复合模式脉冲源的研制[J]. 电工技术学报, 2018, 33(13): 189-197.
- [4] ZHANG T Y, CHEN D Q, LIU J L, et al. A compact, high-voltage pulsed charging system based on an air-core pulse transformer[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(9): 094706.
- [5] 李黎, 刘云龙, 俞斌, 等. 螺旋线型特斯拉变压器谐振充电特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(33): 145-151.
- [6] 郭亚逢, 王赛, 李超, 等. 调制脉冲等离子体的放电特性及降解异戊烷的实验研究[J]. 高压电器, 2019, 55(5): 17-22.

作者简介



刘 阳

刘阳(1987—), 工程师, 主要研究方向为大气压放电低温等离子特性研究、高电压新技术应用和高电压测量技术。

(收稿日期: 2019-09-12) EA