

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.05.005

微间距气体放电的实验研究与分析

董克亮, 孙岩洲, 刘绪光

(河南理工大学电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 为了研究微间距气体放电特性机理,在大气压环境下,采用了精密距离控制仪器进行电极间距为1~100 μm 的气体放电实验,得出了电极间距在1~100 μm 范围内的击穿电压,绘制了击穿电压曲线并讨论分析了1~5 μm 间距下击穿电压背离巴申曲线的原因。运用Fowler-Nordheim理论验证了在电极间距小于5 μm 时,气体放电过程由场致电子发射主导,并通过分析1~5 μm 间距内场强,进一步说明场致发射在此起主导作用。电极间距在10~15 μm 范围内时出现火花放电现象,分析认为该间距下的放电为电子崩引发的微间隙火花放电。电极间距在15~100 μm 范围内时击穿电压随着电极间距的增大而逐渐增大,击穿电压曲线与巴申曲线变化趋势相同,可以用汤逊机理解释。

关键词: 微间隙; 气体放电; 击穿电压; Paschen曲线; 场致发射

Experimental Study and Analysis of Gas Discharge with Micro-gap

DONG Keliang, SUN Yanzhou, LIU Xuguang

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Henan Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to study the mechanism of micro-gap gas discharge characteristics, instrument with measuring electrode distance of 1~100 μm is used to gas discharge experiments under atmospheric pressure. The breakdown voltage and breakdown voltage curve at 1~100 μm electrode gaps are obtained. The reason why the breakdown voltage deviates from the Paschen curve at the distance of 1~5 μm is analyzed. Fowler-Nordheim theory is used to verify that the field emission dominates during discharge when the electrode distance is less than 5 μm . The electric field within the 1~5 μm gaps is analyzed to further illustrate that the field emission plays a leading role. Spark discharge occurs when the electrode distance at 10~15 μm , and it is considered that the discharge at this distance is micro-gap spark discharge initiated by electron avalanche. In addition, the breakdown voltage increases with the increase of electrode distance at 15~100 μm , and the breakdown voltage curve has the same trend as the Paschen curve.

Key words: micro-gap; electrical breakdown; breakdown voltage; Paschen curve; field emission

0 引言

微间距气体放电是指放电空间距离在微米量级下的一种放电形式^[1]。微放电在安全防护、材料制备、表面改性、杀菌消毒和生物医学等方面有很高的应用价值^[2-5]。随着集成电路以及电子工艺产品空间距离的要求越来越高,施加电压很小时就会产生很高的场强,很容易对这些器件造成击穿损坏^[6],因此近些年来,微间距气体放电特性的研究受到越

来越多学者的关注,目前在气体放电和低温等离子体领域已经开展大量研究。

关于微间距气体放电的放电机理研究,国内外学者在近些年做了大量的工作。孙志等采用原子力显微镜对微间隙空气放电进行了研究,得出微间隙放电具有极性效应^[6]。成永红等采用MEMS加工工艺,制备并研究了5~40 μm 的金属铝箔膜电极,得出在此间距下符合巴申定律,并认为放电以碰撞电离形成大量电子崩的汤逊放电为主^[7]。Slade等讨

收稿日期:2018-11-11; 修回日期:2019-01-19

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U1204506,11405044)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(U1204506,11405044).

论了在大气压力下空气中紧密间隔接触($0.2\ \mu\text{m}$ 至 $40\ \mu\text{m}$)的电压击穿,指出在很小的电极间距下击穿规律与 Paschen 曲线有很大区别^[8]。Semnani A 等也对在不同频率下的微米尺度电气击穿特性进行了研究,并指出频率非常大时会对击穿电压略有影响^[9]。Radjenovic' M 等研究了在多种气体条件下的 $1\sim 100\ \mu\text{m}$ 直流电压击穿特性,并提出了从阴极电子场发射的角度讨论击穿现象^[10]。许多学者在微间距气体放电的研究结果中都指出电极间距在小于 $5\ \mu\text{m}$ 条件下,气体放电的击穿电压严重偏离巴申曲线^[10-12]。而微机电系统的设计与运行很大程度依靠巴申曲线,一些低温等离子体的产生也需要了解清楚微间距气体放电特性^[13],所以对微间距气体放电击穿特性的研究意义重大。

文中是通过精密距离控制仪器(分辨率 $1\ \mu\text{m}$, 距离范围 $0\sim 1\ 000\ \mu\text{m}$)来控制两电极间距,从而进行微间隙气体放电的实验研究。实验测量了 $1\sim 100\ \mu\text{m}$ 范围内的气体击穿电压,分析了大气压条件下 $100\ \mu\text{m}$ 范围内气体击穿场强大小,并对该范围内的放电特性进行研究。通过对击穿电压数据的分析,与巴申曲线进行了对比,并根据间距内击穿场强的大小以及运用 Fowler-Nordheim 理论解释微间距击穿电压的不同特性,根据实验所得击穿电压电流波形和放电现象判断该放电为微间距火花放电,为以后对微间距气体放电的深入研究提供了参考。

1 实验平台的搭建

在大气压空气环境下进行实验,实验平台结构框图见图 1。文中所搭建的实验平台选用的是 Coronalab CTP-2000K 低温等离子体电源,频率设定为 $8.0\ \text{kHz}$,测量电极间电压选用高压探头 Tektronix P6015A,示波器选用 GDS-2204A,电极间所测得的击穿电压经高压探头后输入示波器 Ch_2 的信号接口,击穿电流通过 Ch_1 信号接口输入示波器,选用阻值大小为 $200\ \Omega$ 的限流电阻,移动电极与固定电极均采用直径为 $6\ \text{mm}$,长度 $10\ \text{mm}$ 的不锈钢材料,电极的边缘是圆形的,以避免边缘场。实验前对不锈钢电极进行机械抛光,化学清洗并在超声波浴中洗涤,以减少电极表面粗糙程度,避免对实验数据产生一定的影响。

该实验的详细流程为:先把可移动端电极缓慢向另一端固定电极移动,在距离较近时在其两端施加 $10\ \text{V}$ 固定电压,然后继续移动电极,当示波器中电流通道显示电流突然增大时,停止电极的移动,判断此时电极间距为零点位置,然后开始测量击穿

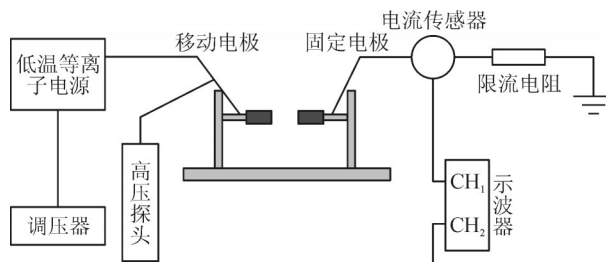


图1 微米间隙实验平台结构框图

Fig. 1 Structure diagram of micro-gap experimental platform

电压,每次移动 $1\ \mu\text{m}$ 的电极距离,分别测量不同间距下的击穿电压。通过控制调压器大约每秒 $5\ \text{V}$ 进行匀速升压,直到示波器中出现电流突增现象,依此判断两电极之间是否发生击穿。

2 实验结果与分析

2.1 实验数据分析

基于精密距离控制实验平台,在大气压条件下测量了电极间距在 $1\sim 100\ \mu\text{m}$ 范围内的击穿电压,实验时,每个点进行了 5 次重复实验,并记录了每次重复实验的原始数据,最终取击穿电压的平均值进行绘图,并作出误差带如图 2 中第 2 条曲线 (Experiment) 所示,第 1 条曲线为 Paschen 曲线。由图 2 第 2 条曲线可知,随着电极间距的增大,击穿电压也随之增大,且在 $5\ \mu\text{m}$ 处测得击穿电压与 Paschen 曲线有明显偏差。当两电极之间的距离为 $5\ \mu\text{m}$ 时,实验击穿电压是 $300\ \text{V}$,与 Lee 在此间距下得出的结论基本相同,而与 Paschen 曲线明显不同^[14]。根据该实验数据,在电极间距为 $1\sim 5\ \mu\text{m}$ 的情况下,击穿电压会随着电极间距的增大而升高。 $5\sim 100\ \mu\text{m}$ 时所测击穿电压比 Paschen 曲线略低,但是变化趋势大致相同。

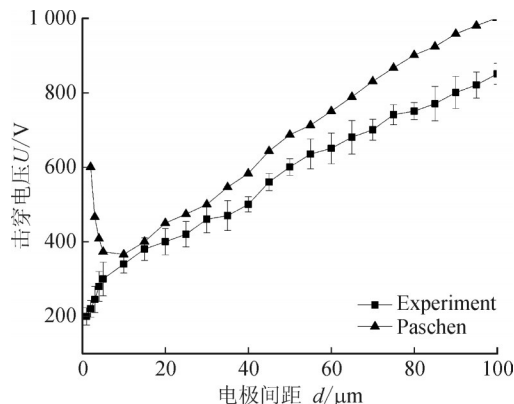


图2 $1\sim 100\ \mu\text{m}$ 大气压条件下气体击穿电压

Fig. 2 Gas breakdown voltage at atmospheric pressure of $1\sim 100\ \mu\text{m}$

金属电极材料在电极间场强达到一定强度时

金属表面会发生电子发射现象,此现象为场致电子发射^[15]。实验所测数据求得的在大气压条件下电极间距为 1~100 μm 时的击穿场强见图 3,由图 3 中数据可知,电极间距在 1~5 μm 时击穿场强在 10^8 V/m 左右,在 5~100 μm 时,击穿场强逐渐降低并趋于 10^7 V/m 左右。有研究表明,普通不锈钢材质电极(粗糙度在 0.6~0.8 时的场致发射阈值在 200~400 kV/cm^[16-17])。因此,在 1~5 μm 的间隙中很容易出现场致电子发射。场致电子发射会导致电极加热升温,并对阴极表面产生溅射沉积物,电极表面将产生凸凹不平的坑洞,影响场致电子发射的阈值。

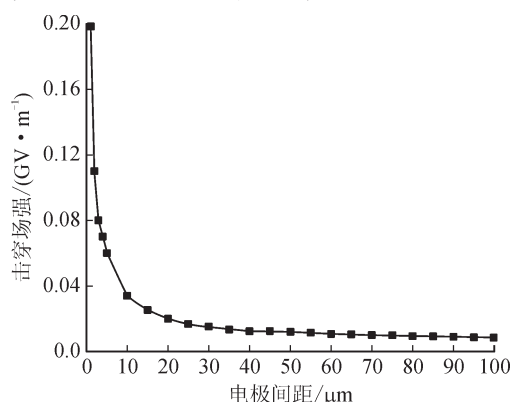


图3 1~100 μm 大气压条件下电极间距内击穿场强

Fig. 3 Breakdown field strength in electrode gap at atmospheric pressure of 1~100 μm

空气中气体放电形式产生机制主要有 3 种:碰撞电离(electron impact ionization),二次电子发射(secondary electron emission)和场致发射(field emission)。气体击穿的形成,一方面间隙中的正离子在不断往阴极运动,会造成阴极附近有大量空间电荷,这些电荷会与外加电源产生的场强发生耦合,起到正反馈作用,从而会增强阴极附近的电场强度,进而增强了场致电子发射的进程^[18-20]。另一方面,电子在间隙中高速运动的过程中会发生电子碰撞电离,以及在阴极发生的二次电子发射,在它们的共同作用下使得气体间隙发生击穿^[10]。该过程中场致电子发射的增强方程为

$$Ce^{-Dd/U}(e^{A\phi d e^{-B\phi d/U}} - 1) = 1 \quad (1)$$

式(1)中: C 、 D 为关于气体和电极材料的常数; A 、 B 为常数参量。

可以通过 Fowler-Nordheim 理论进一步判断场致发射在 1~5 μm 间距下放电时所起的主要作用, Fowler-Nordheim 方程为

$$J = \frac{aE^2}{\phi t^2(\gamma)} \exp[-b\phi^{3/2} E^{-1} \Delta(\gamma)] \quad (2)$$

式(2)中^[21]: J 为场致发射电流密度; ϕ 为金属电极材料电子发射的功函数; a 、 b 为常数参量; E 为电

场强度。由此可知场发射电流可以表示为

$$I = aE^2 \exp(-b\phi^{3/2}/E) \quad (3)$$

由式(3)可推导出: $\ln(I/U^2)$ 和 $(1/U)$ 之间的关系曲线是线性相关的^[22], U 为电极两端所加的电压。即当 F-N 曲线表现负斜率性时,电极间距之间的电子发射为场致电子发射^[23]。随着电极两端所加电压临近击穿电压,间隙中电流也不断增加;取预击穿电压、电流通过计算得出 F-N 曲线见图 4。由图 4 可知,电极间距在 1 μm 和 3 μm 时,曲线表现出负斜率性,与上述结论向一致;5 μm 时曲线并未表现出负斜率性。

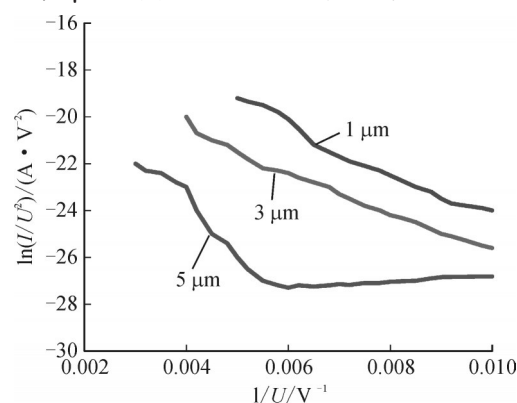


图4 不同电极间距下的 F-N 曲线图

Fig. 4 F-N plots at different electrode gaps

当电极间距在 5~100 μm 时,电极间击穿特性基本符合经典巴申曲线的规律,空气中存在一定的带电粒子,当电压在电极两端逐渐升高时,电极间的自由电子开始在电场作用下向阳极运动,但是由于此时电压还不够高,不能使空气中气体分子电离,而空气中自由电子的自身动能有限,所以一部分自由电子在与气体分子碰撞后又返回或者向其他方向运动,而有一部分则到达了阳极附近。当电压继续升高,电极间距内的场强越来越大,空气中自由电子获得的能量足够与气体分子发生碰撞电离,这个时候就产生了电子雪崩现象^[24],雪崩的持续作用导致电极间距通道内出现的电子密度增大,有明显电流现象产生,而放电过程也由非自持放电形式转向自持放电形式。

2.2 实验波形分析

电极间距在 1~10 μm 时,击穿电压与放电电流波形较为稳定,选取了电极间距为 7 μm 时的实验波形见图 5(a),图 5(a)为在电极发生击穿时,通过示波器得到完整的击穿电压电流波形,击穿电压为 320 V,击穿电流为 0.8 A。电极间距为 10~15 μm 时,在电极发生击穿时的实验波形见图 5(b)-(d)。由图 5(b)可知,在电极间距为 10 μm 时,击穿电压为 340 V,击穿电流为 1.4 A。此外在发生击穿时两电极间会出现连续中断的放电现象,并且会伴随有明亮的火花和

轻微的放电声音,文中把这一放电现象称之为微间隙火花放电。在均匀电场中,当电极间电压逐渐增加到临界击穿电压时,电极间隙内已经有了很高的场强,并且此时间隙内已经发生了电子碰撞电离(由 α 过程决定)从而使得间隙内聚集着带电离子;随着电极间电压的继续增加,间隙中逐渐发展电子雪崩且数量不断增加;当两端电压一旦达到击穿电压,大量的电子雪崩会立即过度到流光,然后电极间的电离强度会突然增加并且进一步发展,进而发生火花击穿,形成微间隙的火花发电。

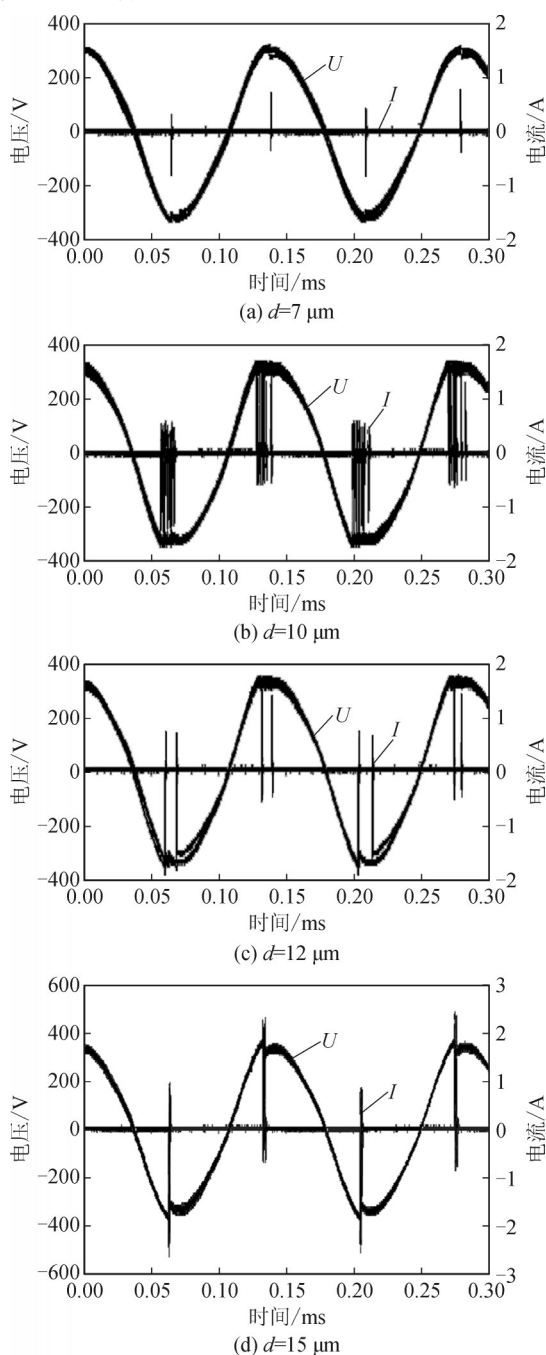
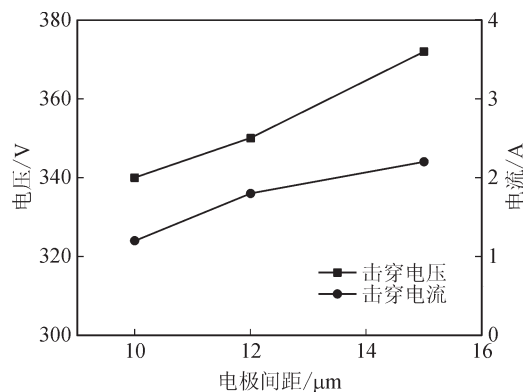


图5 电极击穿时电压电流波形

Fig. 5 Voltage and current waveform during electrode breakdown

在图5(b)中,可以看到,实验波形在发生气体击穿时出现了连续中断的放电现象。当放电间隙击穿后,气体放电通道因被击穿变成良导体,可以看作是由电火花连接而导通,所以此时气体间隙中的电流密度很大,并引起导电气体内部压力和温度急剧增加,它与周围气体所形成的压力梯度将使细小的放电通道迅速扩展,电流急速上升而电压迅速下降,使极间呈现明显的负阻抗特性。而由于该次实验电源功率比较小,在较短时间内有较大的电流脉冲流过火花通道,因此火花放电会遭到中断。此时电极间的电压又会重新恢复到原来的大小,于是重新发生火花击穿和生成新的火花通道,这就是火花放电表现出不连续性的原因。此过程是在非常短的短时间内完成的,所以这也是图5(b)中电压波形出现一段近似平顶波形的原因。

经实验分析发现,火花间隙电压上升到击穿时所需要的时间与电极间电容(即电极间距 d)的大小有关。从图5(b)-(d)组实验数据可知:在电极间距为 $12\ \mu\text{m}$ 时,电压上升到所需要的时间 t 在 $52\ \mu\text{s}$ 处;间距为 $10\ \mu\text{m}$ 时,所需时间小于 t ;间距为 $15\ \mu\text{m}$ 时,所需时间大于 t 。随着电极间距的增大,两电极间的电容增大,大量电荷流过火花通道,会增加电流脉冲的强度和持续时间,从而电压上升到击穿时所需要的时间就会变长。此外,由图5(b)-(d)可以看出,随着电极间距的增加,火花放电现象逐渐减弱,但击穿电压和电流是增加的,图6可以较清晰地体现。当电极间距大于 $15\ \mu\text{m}$ 时,火花放电现象消失,实验电压电流波形趋于稳定,没有中断现象;直至电极间距达到 $100\ \mu\text{m}$,实验结果及现象符合汤森放电理论,由图2可以看出击穿电压基本与巴申曲线一致。

图6 10~15 μm 间距下电极击穿时电压电流值Fig. 6 Voltage and current value during electrode breakdown at spacing of 10 ~ 15 μm

3 结论

文中研究了大气压环境下, 均匀光滑平面电极在间距为 $1 \sim 100 \mu\text{m}$ 范围内的放电特性, 主要得到如下结论:

1) 通过实验测得击穿电压数值, 在 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 时偏离巴申曲线, 且最低击穿电压小于巴申曲线中击穿电压的最小值。

2) 电极间距在 $1 \sim 5 \mu\text{m}$ 时, 电极间距内场强在 10^8 V/m 左右, 根据电极间场强大小以及场发射 F-N 理论可知, 此间距下的气体放电是由场致电子发射主导的。

3) 在研究分析电极间距为 $5 \sim 100 \mu\text{m}$ 范围内的击穿电压时发现, 气隙的击穿场强是逐渐降低的, 且远大于空气中常规间隙均匀电场 30 kV/cm 的击穿阈值, 击穿电压基本符合经典巴申曲线规律。

参考文献:

- [1] 欧阳吉庭, 张宇, 秦宇. 微放电及其应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(3): 673-684.
OUYANG Jiting, ZHANG Yu, QIN Yu. Micro-discharge and its applications[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(3): 673-684.
- [2] 罗朋振, 孙丹凤, 鲁娜, 等. 不同气体介质下极不对称 DBD 放电模式转化研究[J]. 高压电器, 2017, 53(4): 65-71.
LUO Pengzhen, SUN Danfeng, LU Na, et al. Investigation on discharge mode transition of highly asymmetric DBD under different gas dielectrics[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4): 65-71.
- [3] 高军伟, 孙岩洲, 裴植, 等. DBD 中表相放电对电荷及能量传递的影响[J]. 高压电器, 2018, 54(9): 32-37.
GAO Junwei, SUN Yanzhou, PEI Zhi, et al. Surface discharge effect on charge and energy transfer in DBD[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(9): 32-37.
- [4] KOGELSCHAT M. Dielectric-barrier discharge: Their history, discharge physics, and industrial application[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2003, 23(1): 1-46.
- [5] 郝玲艳, 李清泉. 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[J]. 高压电器, 2017, 53(4): 53-59.
HAO Lingyan, LI Qingquan. Simulation calculation of the surface dielectric barrier discharge characteristic parameters under nanosecond[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(4): 53-59.
- [6] 孙志, 付琳清, 高鑫, 等. 基于原子力显微镜的微间隙空气放电研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(23): 5616-5624.
SUN Zhi, FU Linqing, GAO Xin, et al. Research of discharge in micro-gap based on atomic force microscope[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2018, 33(23): 5616-5624.
- [7] 孟国栋, 成永红, 酉小广, 等. 微机电系统微米间隙的预击穿和击穿特性研究[J]. 西安交通大学学报, 2012, 46(8): 106-110.
MENG Guodong, CHENG Yonghong, YOU Xiaoguang, et al. Prebreakdown and breakdown characteristics of micrometer gap in micro-electro-mechanical system device[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2012, 46(8): 106-110.
- [8] SLADE P G, TAYLOR E D. Electrical breakdown in atmospheric air between closely spaced ($0.2 - 40 \mu\text{m}$) electrical contacts[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2002, 25(3): 390-396.
- [9] SEMNANI A, VENKATRAMAN A, ALEXEENKO A A, et al. Frequency response of atmospheric pressure gas breakdown in micro/nanogaps[J]. Applied Physics Letters, 2013, 103(6): 063102.
- [10] RADMILOVIC-RADJENOVIC M, RADJENOVIC B, MATEJCIK S, et al. The breakdown phenomena in micrometer scale direct-current gas discharges[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 2014, 34(1): 55-64.
- [11] 成永红, 孟国栋, 董承业. 微纳尺度电气击穿特性和放电规律研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 13-23.
CHENG Yonghong, MENG Guodong, DONG Chengye. Review on the breakdown characteristics and discharge behaviors at the micro & nano scale[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 13-23.
- [12] ASOKAN T, BALACHANDRA T C. Electrical discharge behavior of micro-gaps[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6): 1864-1868.
- [13] GROOT W D, WEBSTER J R, FELNHOFFER D, et al. Review of device and reliability physics of dielectrics in electrostatically driven MEMS devices[J]. IEEE Transactions on Device & Materials Reliability, 2009, 9(2): 190-202.
- [14] LEE R T, CHUNG H H, CHIOU Y C. Arc erosion behaviour of Silver electric contacts in a single arc discharge across a static gap[J]. IEE Proceedings Science, Measurement and Technology, 2001, 148(1): 8-14.
- [15] 张连俊, 赵立芳, 罗恩泽. 场致电子发射技术分析[J]. 电子器件, 2000(3): 210-212.
ZHANG Lianjun, ZHAO Lifang, LUO Enze. Research of field electron emission technology[J]. Chinese Journal of Electron Devices, 2000(3): 210-212.
- [16] 苏兆锋, 杨海亮, 张鹏飞, 等. 脉冲电场下两种电极材料表面电子发射阈值特性的实验研究[J]. 物理学报, 2014, 63(10): 334-339.
SU Zhaofeng, YANG Hailiang, ZHANG Pengfei, et al. Preliminary experimental research of electron emission

- characteristics on surface area of two kinds of electrodes[J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(10):334-339.
- [17] 伍友成,王 勳,杨 宇,等. 高阈值场发射屏蔽材料电性能实验研究[J]. *高压电器*, 2010, 46(10):23-26.
WU Youcheng, WANG Meng, YANG Yu, et al. Experiment on shielding material with high electron emission threshold [J]. *High Voltage Apparatus*, 2010, 46(10):23-26.
- [18] 张喜波,苏建仓,孙 旭,等. 场致发射电流对高气压间隙击穿场强的影响[J]. *现代应用物理*, 2015, 6(1):42-45.
ZHANG Xibo, SU Jiancang, SUN Xu, et al. Effect of field-emission current on breakdown field strength of high-pressure gas gap[J]. *Modern Applied Physics*, 2015, 6(1):42-45.
- [19] RUMBACH P, GO D B. Fundamental properties of field emission-driven direct current microdischarges[J]. *Journal of Applied Physics*, 2012, 112(10):103302.
- [20] LI Yingjie, TIRUMALA R, RUMBACH P, et al. The coupling of Ion-Enhanced field emission and the discharge during microscale breakdown at moderately high pressures[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(1):24-35.
- [21] 曾葆青,杨中海. 场致发射体的局域功函数研究[J]. *真空科学与技术学报*, 1999(3):201-206.
ZENG Baoqing, YANG Zhonghai. Studies of local work function of a field emitter[J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 1999(3):201-206.
- [22] RADMILOVIĆ-RADJENović M, MATEJČIK Š, KLAS M, et al. The role of the field emission effect in direct-current Argon discharges for the gaps ranging from 1 to 100 μm [J]. *Journal of Physics D - Applied Physics*, 2013, 46(5):15302-15306.
- [23] 张 兰,马会中,姚 宁,等. 碳氮纳米管薄膜及其场致电子发射特性[J]. *光电子与激光*, 2003, 14(8):779-782.
ZHANG Lan, MA Huizhong, YAO Ning, et al. Carbon nitride nanotube thin film and its field emission properties[J]. *Journal of Optoelectronics Laser*, 2003, 14(8):779-782.
- [24] 徐学基,诸定昌. 气体放电物理[M]. 上海:复旦大学出版社,1996:243-268.
XU Xueji, ZHU Dingchang. *Gas discharge physics*[M]. Shanghai: Fudan University Press, 1996, 243-268.
- 董克亮(1993—),男,硕士研究生,主要从事高电压工程及气体放电研究工作。
- 孙岩洲(1972—),男,博士,教授,硕士生导师,主要从事气体放电、高电压工程及供电技术等研究工作。
- 刘绪光(1994—),男,硕士研究生,主要从事高电压工程及气体放电研究工作。

(上接第28页)

- ZHANG Liangxian, SHUAI Yuanming, CHEN Rong, et al. Arrangement optimization of angle rings of UHV transformer winding based on PSO algorithm[J]. *High Voltage Apparatus*, 2018, 54(9):97-102.
- [20] 曹生让,丁晓群,王庆燕,等. 基于反向云自适应粒子群算法的多目标无功优化[J]. *中国电力*, 2018, 51(7):21-27.
CAO Shengrang, DING Xiaoqun, WANG Qingyan, et al. Multi-objective reactive power optimization based on opposition-based learning cloud model adaptive particle swarm optimization[J]. *Electric Power*, 2018, 51(7):21-27.
- 王庆燕(1981—),女,博士,讲师,研究方向为电力设备故障诊断(通讯作者)。
- 杨 忠(1969—),男,教授,博士生导师,研究方向为智能测控与诊断。