

DOI: 10.7652/xjtuxb201901022

利用探针法研究二次电子发射过程中 介质材料的表面电位

殷明, 翁明, 刘婉, 王芳, 曹猛

(西安交通大学电子物理与器件教育部重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 为研究介质材料二次电子发射过程中表面电位的测量手段及相关规律,以拒斥场会影响二次电子出射为基础,提出了能够原位测量介质材料表面电位的探针法。首先,利用专业电磁仿真软件对探针法原理进行了研究,计算了探针附近电位分布和探针偏压对二次电子发射系数的影响曲线,此曲线拐点处对应的探针偏压即为样品的表面电位;其次,用铜样品进行了实验研究,验证了探针法测量样品表面电位的可行性;最后,将探针法应用于介质材料聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA),对其表面电位进行了实验测量和研究。结果表明:栅网偏压和入射电子能量对PMMA表面电位有直接的影响,PMMA表面电位总是高于栅网偏压,两者呈线性关系;随着入射电子能量的增加,PMMA表面电位呈现先升高后下降的趋势。实验结果与理论分析相一致,验证了探针法测量介质材料表面电位的可行性。该方法操作简便、成本低廉,而且实现了原位在线测量,减小了实验中的不稳定性,对介质材料二次电子发射机理的研究有一定的参考价值。

关键词: 二次电子发射;表面电位测量;介质材料;仿真

中图分类号: O462; TN16 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)01-0163-06

Surface Potential Measurement of Dielectric Materials Using Metal Probe in Secondary Electron Emission Process

YIN Ming, WENG Ming, LIU Wan, WANG Fang, CAO Meng

(Key Laboratory of Physical Electronics and Devices of Education Ministry, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To study measurement methods and relevant rules of the surface potential in the process of secondary electron emission of dielectric materials, this paper proposes a new in situ online method for the measurement of the surface potential of insulating samples based on the fact that electric field will affect the secondary electron emission, and we call it probe method. Firstly, the principle of the probe method is studied by using a professional electromagnetic simulation software. The potential distribution near the probe and the influence of probe bias on the secondary electron emission coefficient are calculated. Then the probe bias at the knee of the curve is considered as the surface potential of the dielectric sample. Secondly, experiments are carried out with copper samples, and the feasibility of the probe method for measuring the surface potential of the samples is verified. Finally, the probe method is applied to the dielectric material polymethyl methacrylate (PMMA) to measure its surface potential. The results show that the grid bias voltage and the incident electron energy have direct influences on the surface potential of

收稿日期: 2018-04-08。 作者简介: 殷明(1996—),男,硕士生;翁明(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(U1537210,11375139)。

网络出版时间: 2018-11-15

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181115.0915.002.html>

PMMA. The surface potential of PMMA is higher than the grid bias and they are in a linear relationship. With the increase of the incident electron energy, the surface potential of PMMA increases first and then decreases. This is consistent with the theoretical analysis, which further validates the feasibility of the probe method in measuring the surface potential of dielectric materials. This method is easy to operate and low in cost, and can realize in situ online measurement to reduce the instability in the experiment, therefore it is applicable to the study of the secondary electron emission of dielectric materials.

Keywords: secondary electron emission; surface potential measurement; dielectric material; simulation

自从 1899 年 Campbell 发现了二次电子发射现象^[1]之后,人们一直在对二次电子的发射特性和机理进行研究^[2-4],并将其应用到各个领域。一方面,在电子倍增管、扫描电子显微镜等器件中均需要利用二次电子发射^[5-6];另一方面,在微波器件、粒子加速器等领域中则需要避免二次电子发射,以防止微放电效应的发生^[7-9]。

目前,虽然对于金属材料二次电子发射的研究已经有了长足的进步^[10-11],但是对介质材料二次电子发射过程的研究尚不完善。因此,为了实现对介质材料二次电子发射特性的研究,首先需要了解介质材料带电后的表面电位变化情况。开尔文探头(Kelvin probe)作为一种非接触无损振荡电容装置,是目前测量导体材料的功函数或半导体、绝缘体表面电位最为常用的方法,并且已经在研究介质材料二次电子发射方面得到了一定程度的应用^[12-14]。但是,在测量介质材料的二次电子发射特性及其表面电位时,由于 Kelvin 探头的尺寸较大,会阻挡电子束照射样品。若电子束先照射样品,然后再将 Kelvin 探头从照射区外移动至照射区,这不仅无法实现原位和在线测量,而且增加了真空设备的复杂性,使研究成本上升。

本文基于课题组的实验平台^[15-17],将二次电子发射系数(SEY)的测量与介质表面电位的测量联系在一起,提出了一种简便的能实现原位和在线测量介质表面电位的探针法,并对其原理和合理性进行了仿真与实验验证。最后,基于探针法对 PMMA 材料的表面电位及其影响因素进行了研究。

1 探针法原理的仿真与验证

Computer Simulation Technology 公司的 CST 软件是面向 3D 电磁、电路、温度和结构应力设计工程师的一款全面、精确、集成度极高的专业仿真软件包,其中的粒子工作室含有固定能量、空间电荷限制

流、温度限制流、场致发射、二次电子发射和爆炸发射等多种粒子发射模型,主要应用于电真空器件、高功率微波管、粒子加速器、聚焦线圈、磁束缚、等离子体等自由带电粒子与电磁场自洽相互作用下相对论及非相对论运动的仿真分析^[18-19]。本文利用 CST 软件,对探针法的原理和正确性进行了仿真。

1.1 实验装置与软件建模

实验装置是在课题组原有的介质材料二次电子发射特性测试平台^[15]的基础上加以改进得到的,如图 1 所示。真空室内的真空度为 7×10^{-4} Pa,真空室内置有电子枪、金属桶形收集极、平板金属样品托、样品以及金属探针。利用电池供电的 LM317 集成电路模块作为可调电压源,可为收集筒、探针和样品托分别加上不同的偏压 V_c 、 V_p 、 V_s ,并由万用表 Fluke 117C 测得。电子枪自上而下发射束流大小为 I_{PE} 的电子束,穿过探针并轰击到样品,由样品出射的二次电子被收集筒收集。在此期间,流过收集筒、探针和样品的电流 I_c 、 I_p 、 I_s 经过 $50 \text{ k}\Omega$ 的取样电阻后,由示波器 Hantek DSO3104 相应的通道 CH_c 、 CH_p 和 CH_s 检测出,用于计算 SEY。

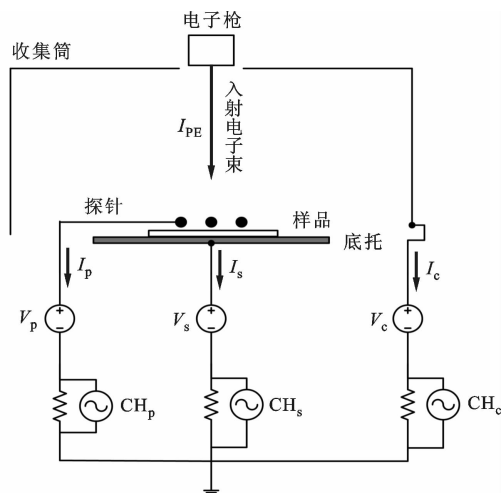


图 1 实验装置图

根据实验装置,利用 CST 软件中的几何模型以及各种布尔操作进行了建模。在实际仿真中发现,单根探针对二次电子出射的影响较小,实验结果不够明显,因此在电子束斑直径为 14 mm 时,选用直径为 1 mm、轴线在样品上方 0.9 mm 处、相互间距为 5.9 mm 的 3 根圆柱体为 3 根探针,以取得较好的效果。在材质方面,仿照实验装置中将收集筒、探针、样品托的材质均设置成铜,并且忽略它们的二次电子发射。而为了给样品设置想要的表面电位 U_s ,将其定义为导体材料,在这种情况下设定的样品托的偏压 V_s 即为样品的表面电位 U_s ,设置二次电子发射特性为 Vaughan 模式,设置电子枪的发射模式为直流,电子束流大小 I_{PE} 设置为 10^{-6} A。

当改变探针上所加的偏压 V_p ,可以研究 V_p 对探针附近电场的影响,并跟踪二次电子的运动情况,最终研究 SEY 与 V_p 的关系。

1.2 探针附近的电位分布

当 U_s 为 0 V, V_p 分别为 -10、0、10 V 时,CST 仿真得到的探针附近电位分布情况如图 2 所示。由图 2 可知:当 V_p 为 -10 V 时,探针附近的电位低于 U_s ,该处出射的部分二次电子会被压回样品表面,最终造成 SEY 减小;当 V_p 为 0、10 V 时,探针附近

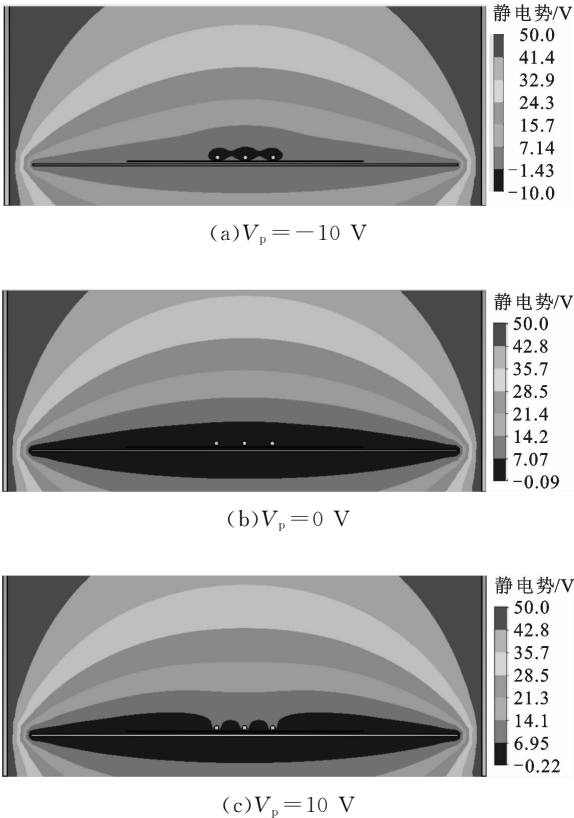


图 2 探针附近的电位分布图

的电位分布有利于该处二次电子的出射,由样品出射的全部二次电子均可被收集筒收集到。因此,当 V_p 等于或高于 U_s 时,对于 SEY 没有显著影响,而当 V_p 低于 U_s 时,会抑制二次电子的出射,使得 SEY 降低。

1.3 样品表面电位测量的仿真

在进行了探针附近电位分布对二次电子出射影响的定性分析后,进一步利用 CST 软件的功能,定量仿真电子束入射、电子束轰击样品、由样品表面出射二次电子、二次电子受探针附近电场的影响以及二次电子最终被收集桶收集这一系列过程。

首先,在 CST 粒子工作室中设定好样品表面的二次电子发射特性,当电子轰击到样品表面时,CST 软件会根据内置的理论模型发射出对应的二次电子,而这些出射的二次电子又会根据空间电位分布有着不同的运动方式,最终一部分被收集筒收集到。通过监测最终收集筒上接收到的所有碰撞电流 I_c ,即可计算出仿真实验中的二次电子发射系数

$$\delta_1 = \frac{I_c}{I_{PE}} \tag{1}$$

由于探针的遮挡效应,所以本文中研究的 SEY 均为样品与探针混合的二次电子发射系数。在设定 U_s 为 -5、0、5 V 时,通过改变 V_p 来观察 δ_1 的变化,结果如图 3 所示。由图 3 可知, δ_1 随 V_p 变化的曲线与前面定性分析的相同,当 V_p 小于 U_s 时, δ_1 明显降低,而当 V_p 大于等于样品表面电位时, δ_1 基本保持不变,所以选取 V_p 相比 U_s 较高时的 δ_1 ,求均值后得到恒定值(称为拐点)。图 3 中 δ_1 与 V_p 关系中的拐点位置由垂直虚线标出,它们基本上与样品预先设定的 U_s 相同,这说明 δ_1 与 V_p 关系中的拐点对应的 V_p 实际上就是待测的样品表面电位。

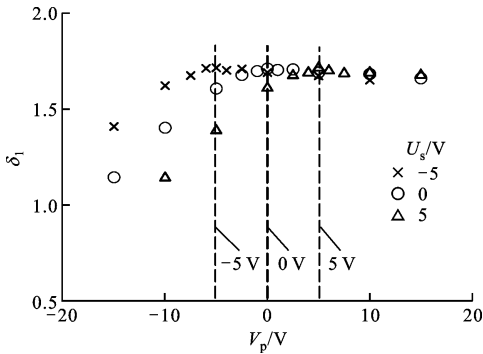


图 3 仿真中不同 U_s 下 δ_1 与 V_p 的关系

1.4 探针法的实验验证

本文用图 1 所示实验装置,对探针比较法测量样品表面电位的原理进行了验证。在实验中,将探

针与样品分开约 0.4 mm 的距离,并设定入射电子能量为 300 eV,收集桶电压为 40 V,铜样品的表面电位 U_s 由样品托的偏压 V_s 决定,分别为 -5、0、5 V。流过收集桶、探针以及样品的电流 I_c 、 I_p 和 I_s 分别由示波器测出,验证实验中的二次电子发射系数为

$$\delta_2 = \frac{I_c}{I_c + I_p + I_s} \quad (2)$$

测量结果如图 4 所示,可知 δ_2 与 V_p 关系中的拐点均在对应的 U_s 附近。仿真与实验所测得的 U_s 均与实际给定的表面电位相同,这说明利用探针法测量表面电位是合理可行的。

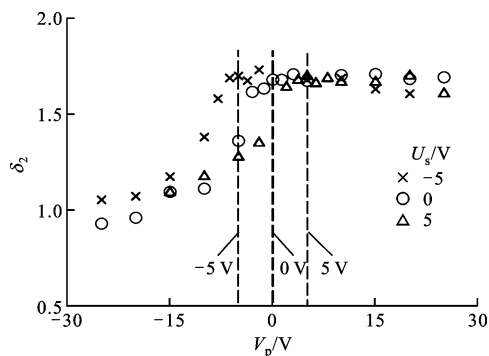


图 4 铜样品在不同 U_s 下 δ_2 与 V_p 的关系

2 PMMA 样品表面电位及影响因素

本文将探针法应用于介质材料表面电位的测量,被测样品为厚度 1 mm 的 PMMA 材料,保持样品托的偏压 V_s 为 0。在图 1 所示装置中,若样品为介质材料,那么电子束照射样品后,其表面将积累电荷。当入射电子能量位于样品 SEY 与一次电子能量关系曲线中第 1、2 交叉点之间时,样品 SEY 大于 1,意味着样品表面将建立起正的表面电位,这一电位将会抑制样品表面出射的二次电子,使 SEY 值下降,直至 SEY 值等于 1,并最终使样品的表面电位 U_s 恒定,这说明样品的 U_s 与入射电子能量 E_{PE} 、样品本身的二次电子发射特性等因素有关。

2.1 PMMA 表面电位的测量

用探针法测量样品 U_s 的基础是对 SEY 的测量,而对于介质材料 SEY 的测量,采用了课题组以往的测量思路^[15-17],SEY 的测量分 2 步完成。第 1 步,对样品进行中和,中和的目的是让样品带电,并达到稳定状态,使其具有相应的 U_s ,而且保证每次测量后,样品的 U_s 能够保持固定,不受测量过程的影响,为了让样品带电均匀,本文在探针上方 5 mm 处放置了一个由金属网构造的平面栅网,尽可能保

证栅网和样品之间有一个均匀电场,以使得最终样品表面的电位分布均匀;中和时保持收集桶偏压不变,为 40 V,并给定一个栅网偏压 V_g ,让电子枪输出连续脉冲照射样品,同时探针处于悬浮状态。第 2 步,当中和完成之后,保持收集桶与栅网相连并设偏压为 40 V,然后设定一个 V_p ,让电子枪输出一个单脉冲,照射样品,同时用示波器记录下相应 I_c 、 I_p 、 I_s 的电流波形,并按照式(3)计算测量实验中的二次电子发射系数 δ_3 。这两步交叉进行,直至获得完整的 δ_3 和 V_p 关系曲线。由于平面栅网的引入,式(2)将变化为式(3),其中 t 是由栅网的几何结构决定的电子透过率,在本文实验中 t 约为 0.9。同时,为了降低在测量过程中样品的带电造成 δ_3 下降而带来的测量误差,采用脉冲电流的峰值 I_{cmax} 、 I_{pmax} 、 I_{smax} 计算 δ_3 ,即

$$\delta_3 = \frac{I_{cmax}}{t(I_{cmax} + I_{pmax} + I_{smax})} \quad (3)$$

2.2 PMMA 样品表面电位的确定

入射电子能量为 300 eV, V_g 分别为 -10、-5、0、5、10 V 时测量得到的 δ_3 随 V_p 的变化曲线,如图 5 所示。由图 5 可知,曲线的变化规律与图 3、图 4 中仿真与验证实验的趋势相同。因此,按照前述方法找到拐点,确定出不同情况下的表面电位并在图 5 中用虚线标出。

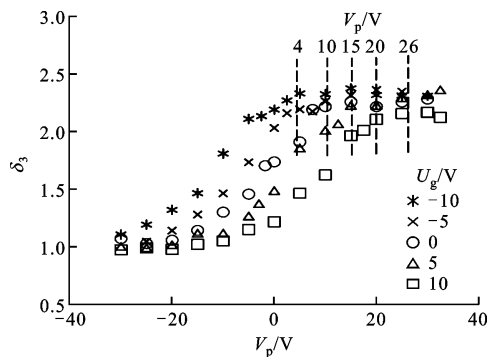


图 5 PMMA 样品在不同 V_g 下 δ_3 与 V_p 的关系

探针的存在使得电场分布有一定的不均匀性,介质材料的表面电位会有一些的差别,所以严格地说,本文研究的表面电位是电子束轰击区域内样品表面电位的平均值。

2.3 栅网偏压对表面电位的影响

按照 2.2 节的方法测量入射电子能量 E_{PE} 分别为 100、200、300、500、700 eV 时, U_s 与 V_g 的关系如图 6 所示。由图 6 可知, U_s 与 V_g 均可近似为线性关系。将数据点进行线性拟合后得到各直线的解析式,其斜率都在 1 附近。

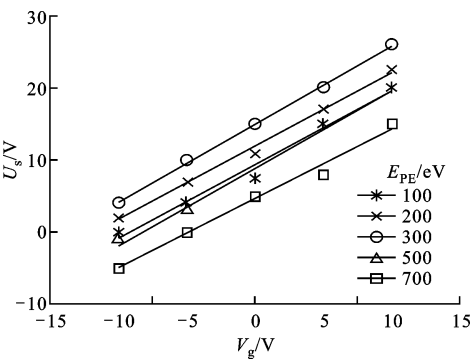


图 6 不同 E_{PE} 下 U_s 与 V_g 的关系

在给定的 V_g 下对样品进行中和后,样品的表面电位达到稳定,此时二次电子发射系数为

$$\delta = \delta_0 \frac{\int_{U_s-V_g}^{\infty} N(E)dE}{\int_0^{\infty} N(E)dE} = 1 \tag{4}$$

式中: δ_0 为对应入射电子能量下,样品表面无拒斥场时(即 $V_g-U_s \geq 0$)的二次电子发射系数; $N(E)$ 为样品的二次电子能谱分布函数; E 为二次电子的能量。由式(4)可知,当样品表面积累了一定的表面电荷后,在能谱曲线中只有能量高于 U_s-V_g 的二次电子才可以被收集筒和栅网接收。测量 SEY 时,收集桶与栅网相连并且偏压较高为 40 V(高于本文测量相应的样品表面电位 U_s),在入射电子能量固定的情况下, δ_0 不变,且与 U_s-V_g 无关,说明能量高于 U_s-V_g 的二次电子所占的比例固定。在入射电子能量固定的情况下,因为能谱分布 $N(E)$ 本身与 U_s-V_g 并不相关,所以只有当 U_s-V_g 为一固定值时,才能保证式(4)成立,样品的 U_s 与 V_g 成线性关系,且斜率为 1,即

$$U_s = V_g + a \tag{5}$$

这与测量结果相符,说明将探针法应用于介质材料表面电位的测量是可行的。

2.4 入射电子能量对表面电位的影响

不同 V_g 下 U_s 与 E_{PE} 的关系如图 7 所示。由图 7 可知,即使 V_g 不同,但是 U_s 随入射电子能量的变化趋势是大致相同的,随着入射电子能量从 100 eV 增高到 700 eV, U_s 都呈现出先升高后下降的关系,并用式(4)进行分析,随着入射电子能量的增加,二次电子发射系数 δ_0 呈现先增大后减小的趋势,能量高于 U_s-V_g 的二次电子所占的比例应先减小后增大。若能谱分布 $N(E)$ 与入射电子能量无关,则当 V_g 确定时, U_s 变化趋势为先增大后减小,这与图 7 的实验结果相同,进一步证明了将探针法应用于介

质材料表面电位的测量之中是可行的。

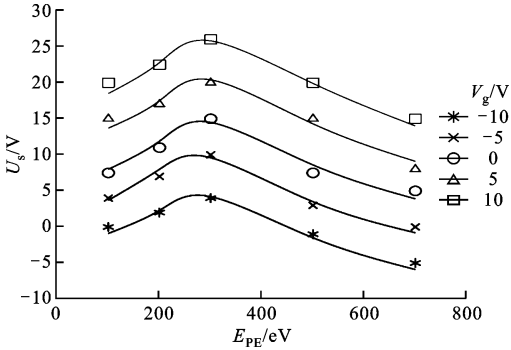


图 7 不同 V_g 下 U_s 与 E_{PE} 的关系

3 误差的讨论

探针法测量样品表面电位时引起的误差来自于 SEY 的测量,而 SEY 的测量误差主要来自两个方面。

(1)由于介质材料 SEY 的测量必须建立在电子束以单脉冲照射的工作情况下,所以整个测量系统的脉冲响应是造成 SEY 测量误差的主要原因。在当前的实验环境下,除了尽可能提高系统响应速度之外,在读取示波器记录的脉冲电流时,可以读取脉冲电流的峰值,以尽量降低在测量过程中由于样品带电造成 SEY 下降而带来的测量误差。

(2)电子束照射样品时必然照射到探针,所以真正测量到的 SEY 并不是样品的 SEY,而是样品与探针混合的 SEY。此外,随着探针偏压的变化,电子束照射到探针那部分的比例也会相应的发生变化,这些因素都会引起 SEY 测量误差。一般而言,探针遮挡样品的几何面积越小,由探针带来的 SEY 的误差会减小,但是探针偏压对出射二次电子的影响也会随之减小,导致 δ_s 与 V_p 关系中拐点越不明显。因此,在测量表面电位时,探针遮挡样品的几何面积与出现明显拐点之间需要进行优化选择。

4 结 论

基于介质材料 SEY 的测量,本文提出了一种简单易行的原位在线测量样品表面电位的新方法,即探针法。CST 软件仿真和对金属样品的实验测量表明,这种方法的原理合理可行。在此基础上,本文将探针法应用于介质材料 PMMA 表面电位的测量之中,结果表明,在稳定状态下入射电子能量和栅网偏压对 PMMA 表面电位有直接的影响。随着入射电子能量的增加,PMMA 表面电位呈现先升高后下降的趋势,PMMA 表面电位高于栅网偏压时两者呈线性关系。研究分析表明,PMMA 的带电程度与

SEY、能谱分布密切相关。

参考文献:

- [1] SHIH A J, YATER J, HOR C, et al. Secondary electron emission [J]. *Applied Surface Science*, 1997, 111 (2): 251-258.
- [2] LIN Y, JOY D C. A new examination of secondary electron yield data [J]. *Surface & Interface Analysis*, 2010, 37(11): 895-900.
- [3] LI Y D, YANG W J, ZHANG N, et al. A combined phenomenological model for secondary electron emission [J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(7): 255-313.
- [4] 虞阳烨, 曹猛, 张海波. 金属二次电子发射能谱的表面吸附势垒模型 [J]. *西安交通大学学报*, 2015, 49 (10): 97-102.
YU Yangye, CAO Meng, ZHANG Haibo. A model of surface adsorption barrier on secondary electron spectrum of metal [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2015, 49(10): 97-102.
- [5] WAGNER H M, FERRIS W R. The orbital-beam secondary-electron multiplier for ultra-high-frequency amplification [J]. *Proceedings of the IRE*, 2006, 29 (11): 598-602.
- [6] 郝杰, 李维勤, 钱钧. 具有埋层结构电介质样品扫描电镜二次电子特性 [J]. *电子学报*, 2015, 43(5): 1028-1034.
HAO Jie, LI Weiqin, QIAN Jun. Second electron characteristics of dielectrics with buried structures in SEM [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2015, 43(5): 1028-1034.
- [7] YU M. Power-handling capability for RF filters [J]. *IEEE Microwave Magazine*, 2007, 8(5): 88-97.
- [8] 翁明, 王瑞, 崔万照. 采用等效特征扩散长度计算微波击穿电场 [J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(4): 1-5.
WENG Ming, WANG Rui, CUI Wanzhao. Calculation of microwave breakdown electric field using the equivalent characteristic diffusion length [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(4): 1-5.
- [9] 宋庆庆, 王新波, 崔万照, 等. 多载波微放电中二次电子横向扩散的概率分析 [J]. *物理学报*, 2014, 63 (22): 31-37.
SONG Qingqing, WANG Xinbo, CUI Wanzhao, et al. Probability analysis of secondary electron transverse diffusion in multicarrier microdischarge [J]. *Acta Physica Sinica*, 2014, 63(22): 31-37.
- [10] LI Y, CUI W Z, WANG H G. Simulation investigation of multipactor in metal components for space application with an improved secondary emission model [J]. *Physics of Plasmas*, 2015, 22 (5): 10.1063/1.4919858.
- [11] FURMAN M A, PIVI M T F. Probabilistic model for the simulation of secondary electron emission [J]. *Physical Review Special Topics: Accelerators and Beams*, 2002, 16(6): 124404.
- [12] BELHAJ M, TONDU T, INGUIMBERT V, et al. A Kelvin probe based method for measuring the electron emission yield of insulators and insulated conductors subjected to electron irradiation [J]. *Journal of Physics: D Applied Physics*, 2009, 42(10): 105309.
- [13] BELHAJ M, TONDU T, INGUIMBERT V. Effect of the incident electron fluence on the electron emission yield of polycrystalline Al_2O_3 [J]. *Applied Surface Science*, 2011, 257(10): 4593-4596.
- [14] BELHAJ M, TONDU T, INGUIMBERT V, et al. Electron emission yield and charging process of alkali-silicate glass submitted to an electron beam under the varying temperature condition [J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*, 2012, 270 (1): 120-127.
- [15] WENG M, CAO M, ZHAO H J, et al. Note: a simple charge neutralization method for measuring the secondary electron yield of insulators [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(3): 036108.
- [16] CAO M, HU T C, WENG M, et al. Analytical model of dynamic secondary electron emission of insulators under electron irradiation [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2015, 54(9): 095701.
- [17] WENG M, HU T C, ZHANG N, et al. Dynamic secondary electron emission characteristics of polymers in negative charging process [J]. *Modern Physics Letters: B*, 2016, 30(11): 1650168.
- [18] SPACHMANN H, BECKER U. Electron gun simulation with CST PARTICLE STUDIO [J]. *Nuclear Inst & Methods in Physics Research: A*, 2006, 558(1): 50-53.
- [19] 杨景刚, 黎大健, 李军浩, 等. 气体绝缘开关直线和T型结构中电磁波传播特性的仿真 [J]. *西安交通大学学报*, 2008, 42(12): 1526-1530.
YANG Jinggang, LI Dajian, LI Junhao, et al. Simulation for electromagnetic wave transmission characteristics in straight and T-shaped tanks of gas insulation switchgear structures [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2008, 42(12): 1526-1530.

(编辑 赵炜)