

小间隙静电放电中的电极移动速度效应研究

Investigation of Small-gap Electrostatic Discharge Electrode Moving Speed Effect

¹ 贵州师范大学大数据与计算机科学学院 ² 北京东方计量测试研究所 ³ 中国科学院力学研究所
阮方鸣¹ 季启政² 孟洋³ 尹兰¹ 陈延利¹ 高志良² 程桂仙¹

摘要：分析已发表的静电放电研究文献，设计了电极移动速度效应测试仪。该新型测试系统通过独特的机电一体化设计，为带电电极既要高速向靶运动放电以研究快速移动速度对放电结果的影响，又要避免二者可能产生强烈碰撞损坏仪器，就静电放电领域长期困扰研究者的难题提供了解决方案。对电极移动速度效应模型方法和流体动力学理论进行了分析推导，将 Townsend 放电理论结合小间隙放电模型给出气体压强影响放电电流结果的算法。基于电极移动速度效应测试仪的功能和数据，对所提出的理论分析结果和算法进行了初步验证和讨论。

关键词：静电放电；移动速度；放电参数；电流峰值；效应

引用格式：阮方鸣, 季启政, 孟洋, 等. 小间隙静电放电中的电极移动速度效应研究 [J]. 安全与电磁兼容, 2022(2):29-34.
Ruan Fangming, Ji Qizheng, Meng Yang, et al. Investigation of Small-gap Electrostatic Discharge Electrode Moving Speed Effect[J]. SAFETY & EMC, 2022(2): 29-34. (in Chinese)

Abstract : Measurement instrument of electrode moving speed effect has been invented by my team through pondering think and large number of experiments after analyzing problems in references. The new measurement instrument resolved the difficult problem puzzled researchers in electrostatic discharge expertise for long time that electrode need to move fast to the target so as to research speed effect on result of small-gap electrostatic discharge, but strong collision must be avoided to protect the experiment device from damage. The theoretical model derivation and algorithm analysis have been briefly verified with the newly invented measurement instrument of electrode moving speed effect on discharge parameters. Influence on discharge results by electrode moving speed and gas pressure were also discussed based on test function and data with measurement instrument of electrode moving speed effect on discharge parameters.

Keywords : electrostatic discharge; moving speed; discharge parameter; current peak; effect

引言

现行国际电工委员会 (IEC) 制定的静电放电抗扰度测试国际标准 IEC 61000-4-2^[1]，在实际应用过程中，存在着测试结果的离散性 (可重复性不高) 问题。现实世界真实发生的静电放电过程，影响放电结果变化的不同环境因素，包括带电体与受电体之间的接近速度、气体压强、温度和湿度等。在 IEC 61000-4-2 中，给出了带电体与受电体接触条件下的测试规定，但尚未充分考虑非接触静电放电情况下不同因素对放电结果的影响。

对静电放电性质的相关研究，国内外研究者做过许多工作。美国密苏里科技大学电磁兼容实验室 David Pommerenke^[2-5] 就静电放电中微观过程原理对放电结果的影响进行了深入分析，并涉及对气体压强、温度、湿度在静电放电过程中的影响分析。日本八户工业大学的 Ken Kawamata 和名古屋工业大学的 Osamu Fujiwara 等^[6-7]

讨论了小间隙静电放电产生辐射中放电电极大小和粗糙程度对放电结果的影响。Jian-Hsing Lee^[8] 提出了一种新型静电放电电荷带模型 (CTM)，讨论导致集成电路 (IC) 失效的机理。T. Sugimoto 等^[9] 观察接地球形电极与带电多电极之间的电晕和火花放电，认为放电波形和电荷转移取决于带电阵列的极化和球形电极的尺寸。加拿大的 W. D. Greason^[10] 用两个金属球相向运动的实验，分析讨论两球体以一定相向速度运动放电移动时造成周围电场、磁场变化的影响。德国柏林科技大学 S. Frei 等^[11] 探讨静电放电过程中电极移动速度和空气湿度对放电结果的影响。S. Bonish 等^[12] 分析了小间隙静电放电过程，提出了用表面过程和气体电子雪崩两种次级过程描述小间隙放电的模型。

刘尚合院士团队^[13-16] 在静电放电与电磁防护研究领域进行了长期研究，取得丰富成果。近年来，他们在

基金项目：国家自然科学基金 (No.60971078); 贵州省静电与电磁防护科技创新人才团队项目 (No. 黔科合平台人才 [2017]5653)

航天领域空间飞行器静电放电效应与防护方面的研究上取得突出进展。清华大学何金良团队^[17-19]在静电放电波形数学建模、静电放电产生的近场分析、环氧树脂-铝复合材料表面电荷消散等方面进行了研究。浙江大学董树荣团队^[20-21]在集成电路设计的静电防护方面获得很多有意义和实用价值的结果。北京理工大学欧阳吉庭等^[22-23]从等离子体理论的角度,对微放电和电晕放电进行了研究。南京信息工程大学万发雨等^[24-25]通过建模仿真和实验方法,对静电放电辐射场及干扰进行了预测分析,并研究了固定间隙放电湿度的影响。陆军工程大学石立华团队^[26-28]在雷电与高功率脉冲特性研究方面也取得系列成果。

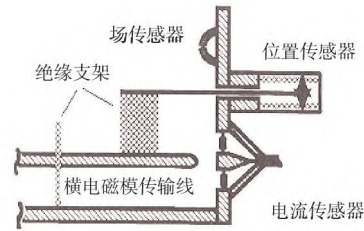
带电体向受电体运动时,速度会对放电结果参数产生影响,这是上世纪80年代瑞士的B. Daout等^[29]学者提出的问题。美国密苏里科技大学David Pommerenke等^[30]设计了一种带电体向受电体直线运动可与之碰触的速度测试和放电电流测量装置。国内电磁环境效应国家重点实验室的研究人员^[31]设计了一种带电体向受电体作等效直线运动的实验装置。它将带电体放在旋转臂上,旋转臂从水平位置释放,由于重力作用作弧线运动至臂的垂直位置时,旋转臂顶端的带电体向受电体放电。在2021年IEEE EMC+SIPI学术会议上,日本的Takeshi Ishida等^[32]学者报告了基于其设计的带电体可向靶移动的实验装置,以及对温度湿度影响放电弧长从而影响带电体向受电体的移动速度效应的研究。前述这几种测试装置,存在着一些问题:密苏里科技大学David Pommerenke的直线运动装置和日本Takeshi Ishida团队的实验装置,带电体向靶的移动速度不能高,否则会撞坏放电靶和放电头;电磁环境效应国家重点实验室的装置,用旋转臂顶端带电体的旋转运动等效直线运动,这与通常真实带电体与受电体相向直线运动存在一定差异。

基于对已发表相关文献研究工作存在问题的分析,我们团队经过近三年的深入探讨和反复实验,设计发明了电极移动速度效应测试仪,解决了长期困扰静电放电研究者的一个难题,即带电电极既要高速向靶运动放电以讨论快速移动速度对放电结果的影响,又要避免二者可能产生强烈碰撞损坏仪器。

1 新型静电放电测试仪结构组成

1.1 已有电极移动速度测试系统的分析

美国密苏里科技大学David Pommerenke博士设计的实验装置如图1所示,可以检测静电放电过程中电极向靶的移动速度、电场磁场强度。装置不仅存在强烈碰撞导致系统受损的风险,而且由于实验在开放环境中进



测量弧长、接近速度和放电电流的实验装置

图1 密苏里科技大学的实验装置

行,气体压强、温度、湿度等环境因素也难以控制。

电磁环境效应国家重点实验室团队设计了一套可以间接测量带电体向放电靶移动速度的实验装置,如图2所示。该实验测试系统中带电体与受电体之间的运动非直接相向运动,且实验过程中的环境因素,如温度、湿度、气体压强,在开放情况下不易定量准确地加以控制。

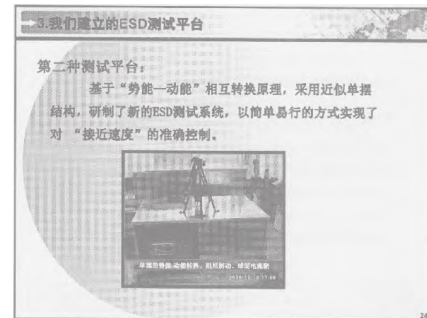


图2 电磁环境效应国家实验室的测试装置

1.2 新型静电放电测试仪的特点

在分析已有电极移动速度测试装置问题基础上,设计研发了电极移动速度效应测试仪^[33],其结构如图3所示。该测试系统主要包括:可调节箱、内气体压强的密闭箱体、密闭箱内设置的导轨支架、曲轴连杆和其驱动的静电放电模拟器、放电靶等。

根据电极移动速度效应测试仪结构图,制作了实验样机,如图4所示。

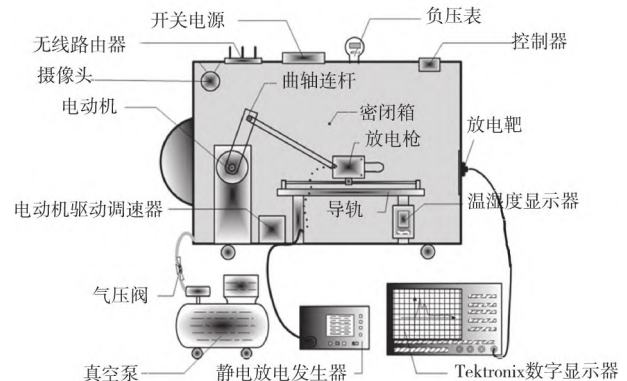


图3 电极移动速度效应测试仪结构图



图4 电极移动速度效应测试仪样机实物

新型电极移动速度效应测试仪，其组成包括可调节箱内气体压强的密闭箱，在密闭箱内壁上安装有曲轴连动杆、放电靶（即受电体，又叫检流器）、导轨、静电放电发生器（即带电体，通常称为放电枪）、电动机、摄像头、温度湿度显示器、负压力表等。在密闭箱底部设置有可滑动的滚轮。

密闭箱体内部气体压强可调节控制，通过真空泵将密闭箱体内部气体抽走，提高真空度，使气体压强在1~0.05 atm 范围内可以调节。

该系统采用将圆周运动转变成直线运动的曲轴连动杆机构的精巧设计，通过电机转矩和速度调节器，控制直线运动行程和运动速度，运动速度在0~1.0 m/s 之间可调。既保证了带电体（放电枪）高速向靶运动，又能在放电枪的放电头在高速接触放电靶瞬间即折返，避免了放电头与放电靶出现相互强烈撞击造成仪器损坏的情况。同时，初步实现了多个影响因素可以控制调节，从而为深入研究这些参数对放电结果性质影响奠定了基础，为小间隙静电放电研究提供了一种新途径。

2 电极移动速度效应研究

基于新型静电放电测试仪，以下将从理论分析、数值仿真、实验测试检验几个方面，开展对电极移动速度效应的理论分析和实验检测。

2.1 理论模型

小间隙静电放电通过带电体与放电靶之间的介质（气体）状态变化实现放电。气体作为一种流体需服从流体力学的基本规律，即流量守恒定律和 Bernoulli（伯努利）定理。

假设有一截流管气体通过 A、B 两个点，如图 5 所示。A 点流管横截面积为 S_A ，流速为 v_A ，压强为 p_A ，高度 h_A ，穿过横截面 S_A 的流量为 Q_A ；而在 B 点处流管横截面积为 S_B ，流速为 v_B ，压强为 p_B ，高度 h_B ，穿过横截面 S_B 的流量为 Q_B 。根据流量守恒定律：

$$Q = Q_A = Q_B \quad (1)$$

而

$$Q_A = S_A v_A, \quad Q_B = S_B v_B \quad (2)$$

则

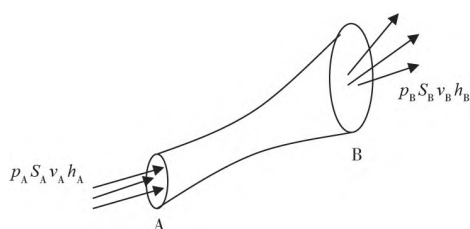


图5 流管的形成与相关物理量

$$S_A v_A = S_B v_B \quad (3)$$

根据 Bernoulli 定理，有

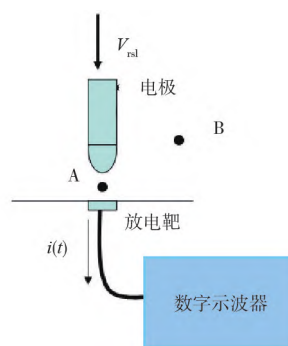
$$p_B - p_A = \frac{1}{2} \rho (v_A^2 - v_B^2) + \rho g (h_A - h_B) \quad (4)$$

$$p_B + \rho g h_B + \frac{1}{2} \rho v_B^2 = p_A + \rho g h_A + \frac{1}{2} \rho v_A^2 \quad (5)$$

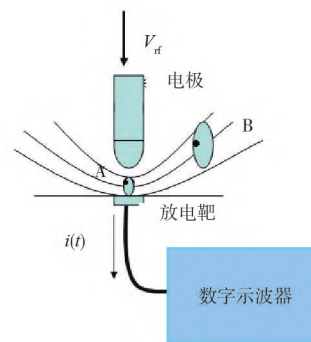
其中 ρ 为流体密度， g 为重力加速度。

2.2 电极移动速度影响气体压强分析

在小间隙静电放电过程中，放电间隙中的气体同样遵守流体力学基本规律。当带电体（电极）向受电体（靶）移动时，将引起放电间隙内的气体流动发生变化，如图 6 所示。当带电电极静止和低速移动时，放电间隙内部和外部没有形成气体流动的流管，放电间隙内部 A 点的气体压强与放电间隙外 B 点的压强相同，如图 6（a）所示。当带电电极向放电靶快速移动时，放



(a) 电极静止和低速移动时



(b) 电极快速移动时

图6 电极移动速度导致流管形成示意图

电间隙内外形成流管，A点、B点处的气体流速和横截面积不同，根据流体力学中流量守恒定律和 Bernoulli 定理，可推测 A 点处气体压强低于 B 处的气体压强，如图 6 (b) 所示。

基于以上分析，可以推出：

$$p_A = p_B - \frac{1}{2} \rho \left[\left(\frac{S_B}{S_A} \right)^2 - 1 \right] v_B^2 \quad (6)$$

$$\left[\left(\frac{S_B}{S_A} \right)^2 - 1 \right] > 0 \quad (7)$$

$$p_A < p_B \quad (8)$$

同时，根据气体放电的 Townsend 理论^[34]，放电电流与气体压强之间有如下关系：

$$i = i_0 e^{\alpha d} \quad (9)$$

$$\frac{\alpha}{p} = A \exp\left(\frac{-B}{E/p}\right) \quad (10)$$

式(9)、式(10)中， i 为放电电流， α 为第一电离系数， p 为气体压强， E 为电场强度， A 和 B 为与气体种类有关的两个常数。

综上所述，初步认为电极向靶移动的速度能引起放电间隙气体压强变化，气体压强的改变导致电离系数的变化，从而使得放电电流发生变化，形成电极移动速度影响放电结果效应。

3 基于新测试系统数据的数值分析

S.Bonish^[35]等提出的小间隙放电模型，将放电过程分为表面电子发射和气体电离雪崩两个次级过程，其放电电流公式表示为：

$$i_s(t) = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m_e}} \cdot \frac{S_n(t) \cdot V(t)^{\frac{3}{2}}}{(d - v_e(t) \cdot t)^2} K[\alpha(t)] \quad (11)$$

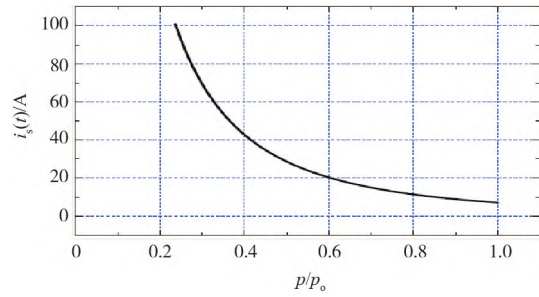
$$i_{av}(t) = C \frac{dv}{dt} + eN_0 \frac{V_e}{d} \exp\left(\int_0^t \alpha(\zeta) v_e(\zeta) d\zeta\right) \quad (12)$$

式(11)、式(12)中， α 为第一电离系数， v_e 为电子漂移速度。与电场强度和气体压强有如下关系：

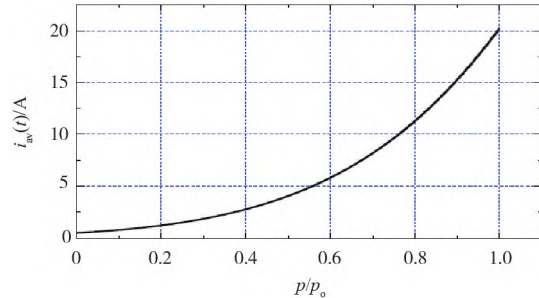
$$v_e(t) = C \cdot \left(\frac{E}{p}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (13)$$

$$C = 3.3 \times 10^6 \frac{cm^{3/2} torr^{1/2}}{s V^{1/2}} \quad (14)$$

根据上面各式和已知相关参数，可以初步估算在气体压强变化影响下放电电流的变化情况，如图 7 所示。其中， $i_s(t)$ 是表面电子发射过程电流的变化趋势， $i_{av}(t)$ 是气体电离雪崩过程中电流的变化趋势， p_0 为气体压强初始值， p 为实际气体压强。由图 7 (a) 可见，气体压强 p 增加，表面过程的放电电流 $i_s(t)$ 迅速减小；由图 7 (b) 可见，气体压强 p 增加，气体电离雪崩过程中放电电流 $i_{av}(t)$ 迅速增大。



(a) 表面过程的放电电流变化



(b) 气体电离雪崩过程的放电电流变化

图 7 气体压强变化引起的放电电流变化图

4 电极移动速度效应初步检测结果

4.1 电极移动速度对放电电流影响

电极移动速度效应测试仪在给定带电体电压情况下，电极以三种不同速度向靶移动，其放电电流有明显变化，如图 8 所示。其中，曲线 1 是电极以 5.8 cm/s 的速度向靶移动时的放电电流，曲线 2 是电极以 24 cm/s 的速度向靶移动时的放电电流，曲线 3 是电极以 15 cm/s 的速度向靶移动时的放电电流。

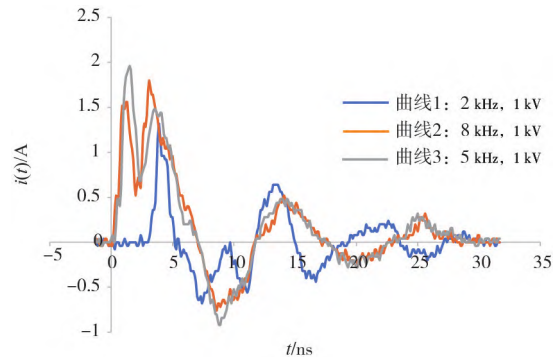


图 8 电极移动速度对放电电流的影响

图 8 可知，放电枪的带电电极快速向靶移动时的放电电流峰值明显大于电极以较慢速度向靶移动时的放电电流峰值。而且，电极快速向靶移动时的放电电流波形里，有两个较大的正向电流波峰；而电极慢速向靶移动时的放电电流波形，电流上升沿比快速移动情况下有较大延迟，且只出现了一个较大的正向电流波峰。

4.2 气体压强对放电电流的影响

在带电电压为 1 kV 和电极移动速度一定（步进电

机转速控制频率为 3 kHz) 情况下, 通过调节真空泵, 改变实验系统箱体内部压强, 并测量电极向靶移动的放电电流, 结果见图 9。

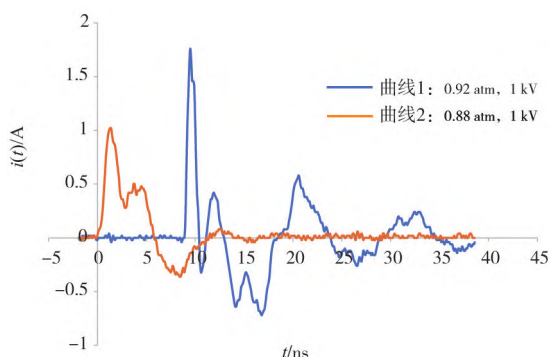


图 9 气体压强改变导致放电电流变化

由图 9 可知, 放电电流峰值在低气压 (0.88 atm) 时明显较小。若考虑小间隙放电模型中两个次级过程在时间上的延续性, 该实验放电过程中起主导作用的是气体电离雪崩过程, 表面发射过程起作用的时区已过。

5 结语

电极移动速度效应测试系统为研究小间隙静电放电参数 (如电极移动速度、气体压强、温度等) 提供了一种新的途径和基础平台。根据流体力学的两条基本原理, 分析了电极移动速度导致的放电间隙内外不同点气体压强变化对放电电流的影响。将新型电极移动速度效应测试仪用于对理论分析进行了初步检验。进一步升级和开发该静电放电电极移动速度测试系统的功能模块, 对深入研究非接触静电放电的性质和机理, 并进而提出非接触静电放电测试标准将产生重要作用和影响。

参考文献

- [1] IEC 61000-4-2: Electromagnetic compatibility (EMC) -Part 4-2: Testing and measurement techniques-Electrostatic discharge immunity test[S]. 2008.
- [2] D.Pommerenke. On Influence of Speed of Approach, Humidity and Arc Length on ESD Breakdown[C]//The 3rd ESD Forum. Grainau, Germany: 1993: 103-111.
- [3] S. Bonish, D. Pommerenke, W. Kalkner. Broadband Measurement of ESD Risetimes to Distinguish between Different Discharge Mechanisms[J]. Electrostatics, 2002(3): 363-383.
- [4] N. Becanovic, S. M. Mousavi, D. Pommerenke, et al. A Portable Test Platform for Capturing ESD Induced Fields[C]// Proceedings of 2021 Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity, and EMC Europe. Glasgow, UK: IEEE EMC,2021: 1144-1148.
- [5] A. Patnaik, W. Zhang, R. Hua, et al. Root Cause Analysis Methodology of ESD Soft-Failure Applied to a Robot[C]// Proceedings of 2018 IEEE International Conference on Computational Electromagnetics (ICCEM). Chengdu,China: IEEE, 2018: 1-3.
- [6] K. Kawamata, S. Minegishi, O. Fujiwara. Influence of electrode size for electromagnetic radiation due to micro gap discharge in spherical electrode[C]//Proceedings of 2012 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility. Shanghai, China: APEMC Committee, 2012: 57-60.
- [7] K. Abe, Ken Kawamata, Shigeki Minegishi, et al. Influence of electrode surface roughness in electromagnetic radiation due to micro gap ESD[C]// Proceedings of 2016 International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE. Wroclaw, Poland: EMC EUROPE organization Committee, 2016: 786-789.
- [8] J-H Lee, J. R. Shih, Yu-Hui Huang, et al. A new ESD model induced yield loss during chip-on-film package process and it's failure mechanism[C]//Proceedings of 2011 International Reliability Physics Symposium. Monterey, US: IEEE IRPS organization committee, 2011: CP.2.1 - CP.2.6.
- [9] T. Sugimoto, K. Chiba, Y. Higashiyama. Corona and spark discharges occurring between a grounded sphere and an array of charged multiple electrodes[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006(3): 881-886.
- [10] W. D. Greason. Methodology to Simulate Speed of Approach in Electrostatic Discharge(ESD)[C]// Proceedings of EOS/ESD Symposium. Santa Clara, US: EOS/ESD Association,1997.
- [11] S. Frei, M. Senghaas, R.Jobava. The Influence of Speed of Approach and Humidity on the Intensity of ESD[C]// Proceedings of Int. Zurich Symp. on EMC. Zurich: IEEE EMC Committee, 1999: 105-110.
- [12] S. Bonish,W. Kalkner, D. Pommerenke. Modeling of Short-Gap ESD under Consideration of Different Discharge Mechanisms[J]. IEEE Trans. on Plasma Science, 2003, 31(4): 736-744.
- [13] 刘尚合, 胡小锋, 原青云, 等. 航天器充放电效应与防护研究进展 [J]. 高电压技术, 2019(7): 99-109.
- [14] 胡小锋, 张建平, 许滨. 航天器空间静电效应研究进展 [J]. 强激光与粒子束, 2019(10): 10-18.
- [15] 原青云, 孙永卫, 张希军. 基于电荷守恒定律的航天器内带电三维仿真简化模型 [J]. 物理学报, 2019(19): 151-160.
- [16] 刘尚合, 谢喜宁, 胡小锋. 飞行器静电起电放电的研究进展 [J]. 安全与电磁兼容, 2021(5): 12-22.



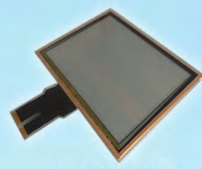
安盾电子

ANDUN ELECTRONICS

屏蔽系列



屏蔽玻璃



屏蔽触摸屏

加热系列

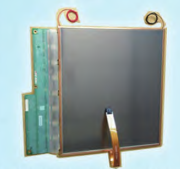


FPC加热玻璃



双拼加热玻璃

邦定系列

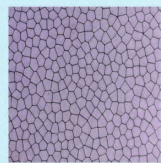


液晶基板邦定加热屏蔽触摸屏

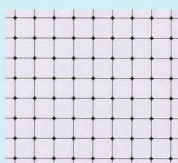


液晶屏邦定屏蔽玻璃

薄膜系列

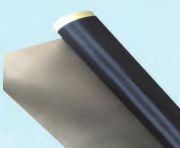


无规则型

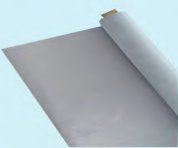


规则型

丝网系列

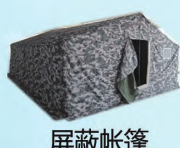


黑网



原网

屏蔽布产品系列



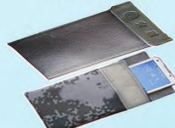
屏蔽帐篷



屏蔽窗帘



屏蔽服



屏蔽袋

安盾电子有限公司

电话: 0534-2188619

传真: 0534-2188615

网址: www.emc-andun.com

邮箱: sdandun@163.com

广告编号: 2021-03-11

- [17] Z. Yuan, T. Li, J. He, et al. New mathematical descriptions of ESD current waveform based on the polynomial of pulse function[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2006(3): 589-591.
- [18] Z. Yuan, J. He, R. Zeng, et al. Transient near-field effect of electrostatic discharge[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2006(4): 795-798.
- [19] C. Li, J. He, J. Hu, et al. Dynamic observation of dc surface charge dissipation for epoxy-resin/alumina composite[C]//Properties & Applications of Dielectric Materials. Sydney, NSW, Australia: IEEE, 2015.
- [20] 徐泽坤, 沈宏宇, 胡涛, 等. 新型 VBO 接口芯片静电放电防护器件 [J]. 浙江大学学报, 2019(4): 794-800.
- [21] Zhang Shuai, Dong Shurong, Wu Xiaojing, et al. An improved GGNMOS triggered SCR for high holding voltage ESD protection applications[J]. Chinese Physics B, 2015(10): 591-593.
- [22] 欧阳吉庭, 张宇, 秦宇. 微放电及其应用 [J]. 高电压技术, 2016(3): 673-684.
- [23] 欧阳吉庭, 张子亮, 彭祖林, 等. 空气针尖负电晕放电的特征辐射谱[J]. 高电压技术, 2012(9): 98-102.
- [24] 汪项伟, 万发雨, 冯超超, 等. 静电放电辐射场模拟及干扰预测 [J]. 高电压技术, 2017(10): 263-269.
- [25] 万发雨, David Pommerenke. 湿度对固定间隙放电的影响研究 [C]// 中国物理学会第十九届全国静电学术会议论文集. 太原: 中国物理学会静电专业委员会, 2014: 46-50.
- [26] T. Wang, L-H Shi, S. Qiu, et al. Multiple-Antennae Observation and EMTR. Processing of Lightning VHF Radiations[J]. IEEE Access, 2018(6): 26558-26566.
- [27] T. Wang, S. Qiu, L-H Shi, et al. Broadband VHF Localization of Lightning Radiation Sources by EMTR[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2017(6): 1-9.
- [28] 周颖慧, 杜鸣心, 石立华. EtherCAT 设备端口电磁脉冲损伤阈值及防护措施 [J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 320-327.
- [29] B. Daout, H. Ryser. The Correlation of Rising Slope and Speed of Approach in ESD Tests[C]//Proceedings of the 12th Int. Zurich Symp. on EMC. Zurich: IEEE EMC Committee, 1987: 467-474.
- [30] D. Pommerenke. On Influence of Speed of Approach, Humidity and Arc Length on ESD Breakdown[C]//The 3rd ESD Forum. Grainau, Germany: Technical University of Berlin, 1993: 103-111.
- [31] 刘尚合. 静电相关标准探讨 [C]// 2012 静电防护与标准化学术交流会. 北京: 2012 静电防护与标准化学术会议组委会, 2012: 39-41.
- [32] T. Ishida, Y. Tozawa, O. Fujiwara. Effect of Approach Speed on Spark Length determining Air Discharge Current from ESD Generator in Environment with Different Temperature and Humidity[C]//Proceedings of 2021 Joint IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity, and EMC Europe. Glasgow, UK: IEEE EMC, 2021: 1153-1158.
- [33] 阮方鸣, 杨向东, 李章伦, 等. 电极移动速度效应检测仪及其制作方法: ZL201310017269.6[P]. 2014-12-03.
- [34] 徐学基, 诸定昌. 气体放电物理 [M]. 上海: 复旦大学出版社, 1996: 92-18.
- [35] S. Bonish, D. Pommerenke, W. Kalkner. Broadband Measurement of ESD Risetimes to Distinguish between Different Discharge Mechanisms[J]. Journal of Electrostatics, 2002(3): 363-383.

编辑: 田宁 E-mail: tianning@cesi.cn

