

显示屏表面空气式静电放电实验特性^{*}

徐晓英¹, 舒晓榕¹, 刘鹏宇¹, 甘瑛洁², 张成铭¹

(1. 武汉理工大学 物理系, 武汉 430070; 2. ESDEMC 科技有限公司, 罗拉 65401)

摘 要: 显示屏是人机交互的重要部件,当人体静电放电发生在显示屏表面时,有可能导致软硬故障。为了研究显示屏空气式静电放电实验特性,通过一个自制的装置对显示屏空气式静电放电电流和通过显示屏的位移电流进行了实验测量。研究发现:放电电流峰值随接近速度的增加而增加,上升时间随接近速度的增加而减小。在 $\pm 10 \sim \pm 12$ kV 电压范围,受电弧长度的影响,上升时间增大,电流峰值变小。随着测量点与放电点之间距离的增大,位移电流波形峰值减小、上升时间增大,正极性放电峰值更大且扩散范围更广,而负极性放电上升时间增大更加明显。由位移电流波形及其分布可以计算出电荷密度。电荷密度随距离放电位置距离的增大而减小。与正极性相比,尽管负极性放电电流峰值较低,但电荷密度较高,说明负极性放电具有造成更高等级损伤风险的危害。

关键词: 静电放电; 空气放电; 电流峰值; 上升时间; 位移电流; 电荷密度

中图分类号: O441.1

文献标志码: A

doi:10.11884/HPLPB201931.190035

Experimental characteristics of surface discharging for air electrostatic discharge on display

Xu Xiaoying¹, Shu Xiaorong¹, Liu Pengyu¹, Gan Yingjie², Zhang Chengming¹

(1. Department of Physics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. ESDEMC Technology Limited Liability Company, Rolla 65401, USA)

Abstract: The display is an important part of human-computer interaction. When the human body electrostatic discharge occurs on the surface of the display, it may lead to hardware and software faults. In order to study the experimental characteristics of air electrostatic discharge on display, the air electrostatic discharge current and the displacement current through the display screen were measured by a self-made device. It is found that the peak value of discharge current increases with the increase of approaching velocity, and the rising time decreases with the increase of approaching velocity. In the voltage range of $\pm 10 \sim \pm 12$ kV, the rise time increases and the peak current decreases under the influence of arc length. With the increase of the distance between the measurement point and the discharge point, the peak value of the displacement current waveform decreases and the rising time increases. The peak value of the positive polarity discharge is larger and the diffusion range is wider, while the rising time of the negative polarity discharge is more obvious. The charge density can be calculated from the displacement current waveform and its distribution. The charge density decreases with the distance of discharge position increasing. Although the peak value of negative polarity discharge current is lower than that of positive polarity, the charge density is higher. This indicates that the negative polarity discharge has a higher damage risk.

Key words: electrostatic discharge; air discharge; peak current; rise time; displacement current; charge density

PACS: 52.80.-s; 41.20.Cv; 52.70.Ds; 52.80.Wq

显示屏是现代电子设备的重要组成部分,是实现人机交互的重要平台,随着新技术的发展,显示屏的应用和使用越来越广泛,其需求不断增长^[1]。触摸屏是通过手指触摸的方式进行操作,很容易遇到人体静电放电(ESD)问题。静电放电可以导致显示屏和触摸屏软硬故障,目前针对显示屏静电放电的研究有:使用 F65 电流

* 收稿日期:2019-02-15; 修订日期:2019-04-11

基金项目:国家自然科学基金项目(11775164); 刘尚合院士专家工作站静电研究基金项目(BOIMTLSHJD20161005)

作者简介:徐晓英(1957—),女,博士,主要从事静电放电、电磁兼容和数值计算方面的工作; xu_xiao_ying@126.com。

钳测量不同类型显示屏瞬态放电电流及其比较^[2];利用铜片对显示屏各个位置的静电放电电流的测量^[3];显示屏静电放电电流全波模型的建立^[4];移动显示驱动芯片的系统级 ESD 软硬故障研究^[5];液晶显示器(LCD)面板驱动芯片的失效研究^[6];移动设备液晶显示器的静电放电扰乱模型的建立^[7];静电放电软故障诊断方法研究^[8];使用 2.5D EM 工具对 ESD 软故障进行调试和近场仿真^[9]。

静电放电火花不能穿透玻璃,然而,静电放电和显示屏及其驱动电路之间存在着各种各样的通道和耦合路径^[3]。如果显示屏没有良好的隔热结构,放电火花就可能会到达连接显示屏和主板的柔性电缆。如果表面玻璃与显示层之间边缘封装结构受到电击穿,火花就可以进入显示屏。放电火花还可以到达其他金属结构,如系统框架^[4]。特别是当火花到达柔性电缆或玻璃层之间的封装电路中时,会损坏或扰乱显示屏。然而,许多显示屏设计都由绝缘结构包围显示屏,这样静电放电就不能直接放电到接地结构。对于设计完好的显示屏,ESD 测试人员如果在空气放电模式下使用 ESD 发生器进行放电,将不会观察到任何火花。未观察到火花往往会误以为没有电流。ESD 发生器放电尖端靠近显示屏表面时将引起表面充电,在 $<1\text{ ns}$ 上升时间内达到 10 A 电流^[2]。显示屏上的非火花放电电流会在显示屏表面玻璃上向各个方向扩散,并以位移电流的形式通过玻璃层,进入显示屏内部。放电火花还可以在显示屏边缘的表面传播,到达柔性电缆或穿透用来连接显示屏不同结构单元的胶水,到达显示器的内部结构,并破坏这些结构。在设计完好的系统中,绝缘屏障良好,火花不能在显示器的边缘传播。因此,最可能扰乱或损坏显示屏的路径是通过玻璃的位移电流。

无火花放电在显示屏表面玻璃产生的电荷可以用 Lichtenberg 粉尘图法可视化。正极性电压放电的粉尘图为分支扩展结构;负极性电压放电的粉尘图为密度更大的圆形结构,而不是分支结构^[10]。虽然粉尘图能够在放电后使电荷分布可视化,但却不能分析电极周围的瞬态位移电流。为了测量电荷密度随时间的变化与分布,Mueller 设计了一种利用分段地平面来测量局部电流的装置^[11]。基于相同的概念,同时为了使测量速度更快,本文工作中使用了类似的分段地平面来捕捉位移电流和电荷分布。

本文主要对显示屏进行空气式静电放电实验,通过一个自制装置捕获通过显示屏表面玻璃的位移电流,研究了放电电流、位移电流和电荷密度及其分布的主要特性,同时研究了不同放电电压、不同放电极性以及不同 ESD 发生器接近速度对放电电流和位移电流的影响。

1 实验装置与测试方案设计

实验分为两部分,显示屏空气式静电放电电流与表面玻璃位移电流的测量,测量系统如图 1 所示。测量系统主要包括:ESD 模拟器、ESD 空气式静电放电速度控制器、采样率 5 GS/s 和带宽 2 GHz 示波器、 20 dB 衰减器、法拉第笼。空气式静电放电速度控制器由空气放电控制监测仪和导轨组成。ESD 模拟器由特制的夹具固定于导轨上,由空气放电控制监测仪控制上下移动,速度 $0.05\sim 0.5\text{ m/s}$ 可调。F-65 电流钳置于 ESD 模拟器夹具之中,位于 ESD 模拟器放电尖端处。测量系统整体放置在标准静电放电抗扰度测试平台上。法拉第笼、示波器接地。图 1(a)为放电电流测量系统,放电电流使用 F-65 电流钳测量,显示屏放置于铝板上。图 1(b)为位移电流测量系统,为了测量通过表面玻璃的位移电流,设计了一块 PCB 板。

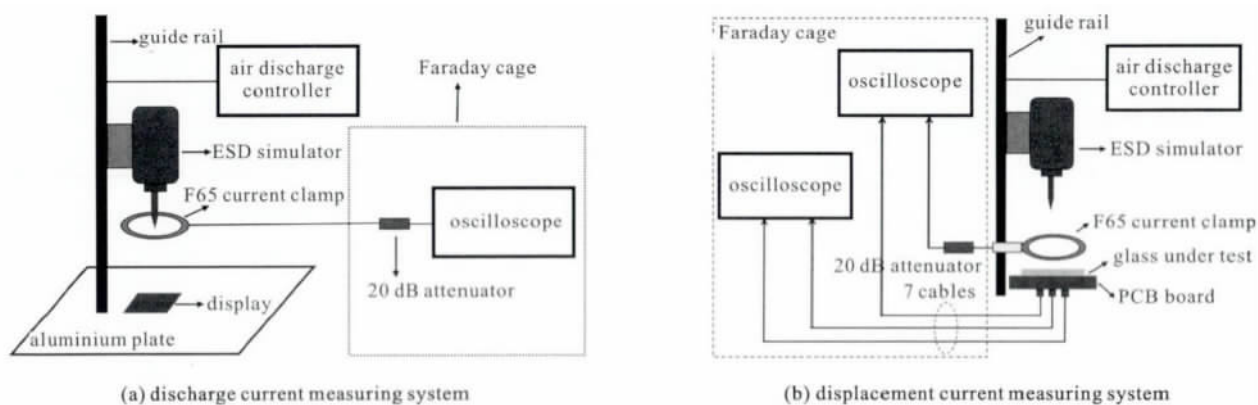


Fig.1 Schematic diagram of measuring system

图 1 测量系统示意图

在玻璃表面上扩散的放电电流会导致玻璃表面电位的快速变化。这种快速的电位变化将使位移电流通过

电容扩散到显示器的内部结构,例如触摸层或显示层。无火花的电流路径如图2所示。此外,火花还可能发生在ESD发生器的放电尖端与显示器的内部结构之间,例如柔性电缆。在设计完好的系统中,显示屏边缘的绝缘屏障可以防止出现这种类型的火花。

ESD模拟器对显示屏放电后,显示屏表面的静电放电电流从放电点沿着显示屏表面玻璃向四周扩散,形成位移电流通过玻璃到达下一层。为了测量通过

表面玻璃的位移电流,设计了一块PCB板,如图3所示。PCB板的正面有8个排成一排的贴片天线,尺寸为 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 。贴片天线的周围为参考地平面。每个贴片天线通过中间位置一个尺寸很小的过孔与PCB板背面的微带线相连。测量位移电流时,将显示屏表面玻璃层紧紧按压在PCB板的正面,使玻璃与PCB板之间的缝隙尽量小。ESD模拟器对表面玻璃放电后,放电电流在玻璃表面向四周扩散,形成位移电流通过玻璃,PCB板上的贴片天线感应到位移电流。然后经过导线、衰减器连接到示波器通道,实现位移电流的采集。

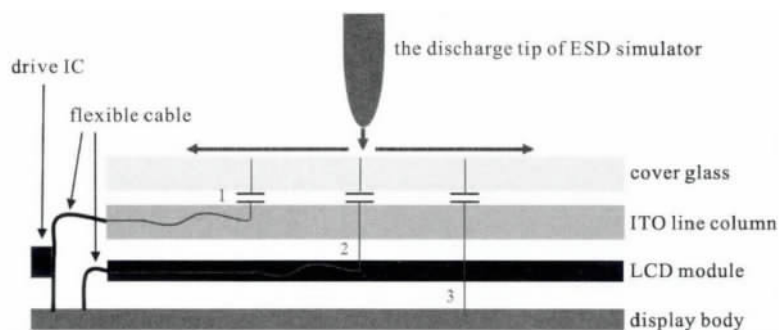


Fig.2 Sparkless surface corona current and displacement current paths into the display

图2 无火花表面电晕电流和通过显示器的位移电流

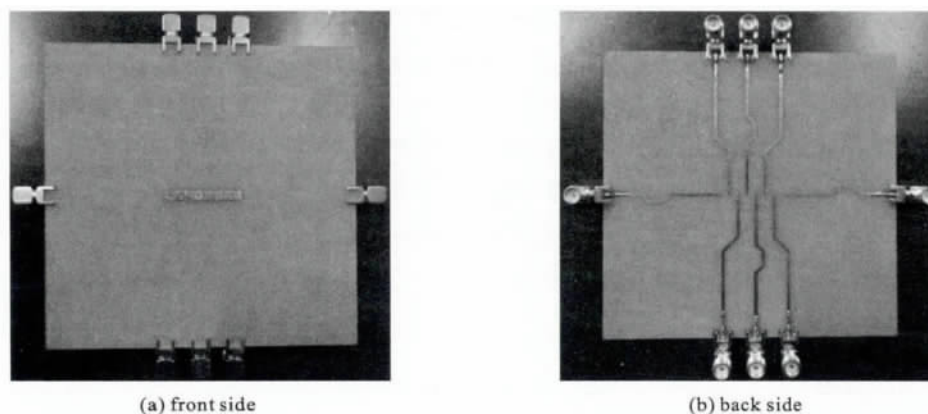


Fig.3 Displacement current measuring PCB structure

图3 测量位移电流的PCB板结构

实验之前先校准ESD模拟器、电流钳和衰减器,实验时湿度为40%,温度为 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。ESD模拟器选择人体金属模型和空气式放电模式,在不同放电电压水平、极性($\pm 4\text{ kV}$, $\pm 6\text{ kV}$, $\pm 8\text{ kV}$, $\pm 10\text{ kV}$ 和 $\pm 12\text{ kV}$)以及不同放电电极接近速度(慢速: 0.1 m/s ,中速: 0.3 m/s ,快速: 0.5 m/s)条件下分别进行放电实验,记录放电电流波形和位移电流的特征值并通过示波器保存波形数据。

2 实验结果与讨论

2.1 放电电流

有大量学者研究了空气式静电放电特性,实验中通常是采用ESD模拟器对电流靶进行放电,其实验结果表明,不同放电电压、不同极性、不同接近速度条件下,放电电流峰值和上升时间差距较大^[12-13]。本文中,研究了ESD模拟器对显示屏放电时,不同放电电压、不同放电极性以及不同ESD模拟器接近速度对放电结果的影响。

图4给出的是ESD模拟器对显示屏表面的放电电流,ESD模拟器接近速度为 0.3 m/s 。在放电电压为 $\pm 2\text{ kV}$ 时,电流钳没有捕捉到电流波形,所以图中放电电压从 $\pm 4\text{ kV}$ 开始。显然,放电电流峰值并不总是随放电电压的增大而增大,上升时间也不总是在小范围内波动。为了研究不同放电电压、不同放电极性和不同接近速度对放电电流波形的影响,在不同条件下进行放电实验。图5、图6分别为不同放电电压、不同放电极性和不同接近速度的放电电流波形的电流峰值与上升时间。放电电流峰值随接近速度的增加而增加,上升时间随接近速度的增加而减小。在 $\pm 4\sim\pm 8\text{ kV}$,电流峰值随放电电压的增加而增加,而在 $\pm 10\sim\pm 12\text{ kV}$,电流峰值随

放电电压的增加而减小;上升时间随放电电压的增加而增大。

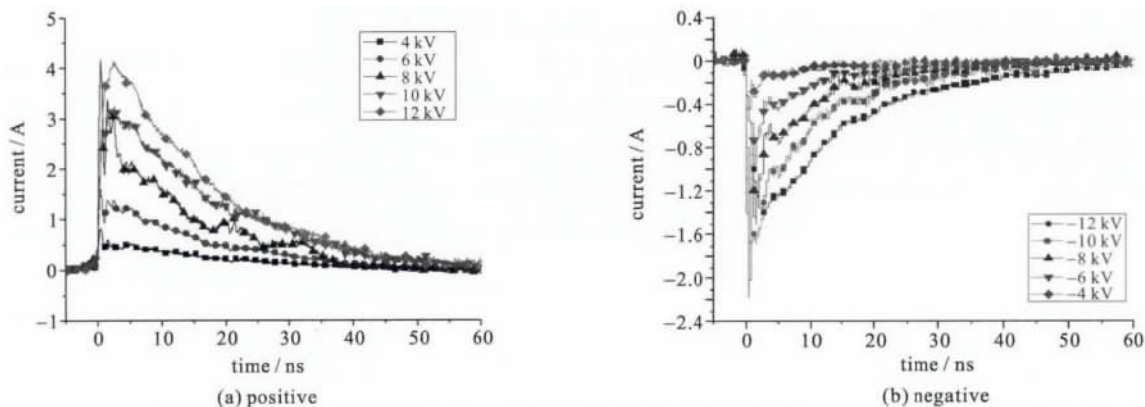


Fig.4 Discharge current waveform

图 4 放电电流波形

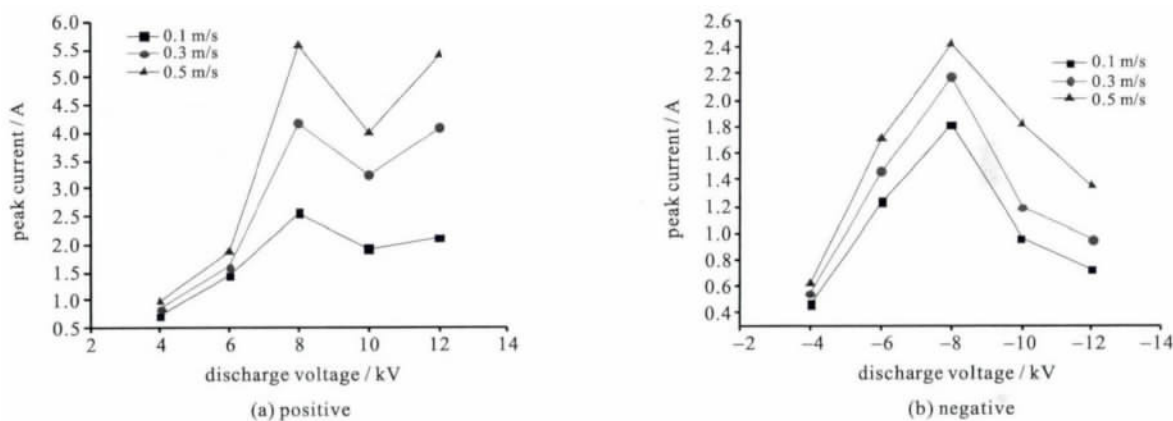


Fig.5 Peak current at different speeds

图 5 不同接近速度的放电电流峰值

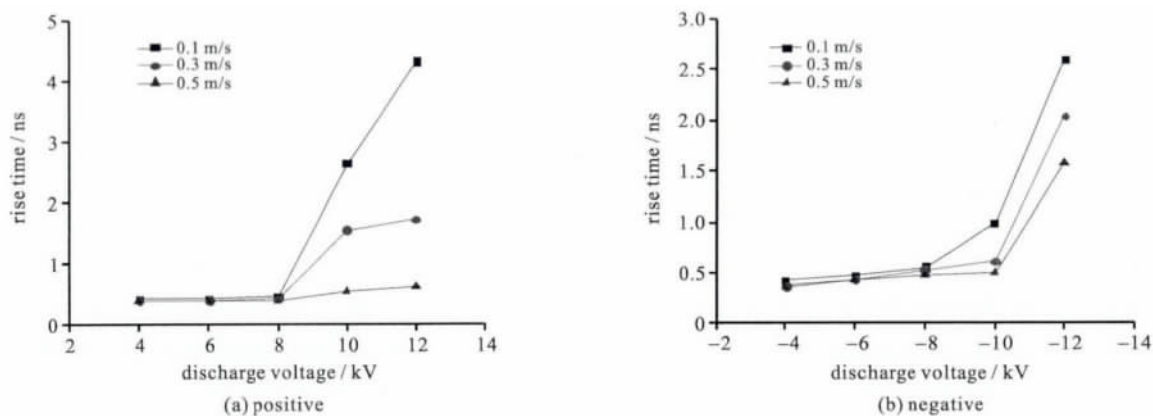


Fig.6 Rise time at different speeds

图 6 不同接近速度的上升时间

上述现象出现原因是电弧长度的影响。放电电压较低时,电弧长度很短,而在放电电压较高时电弧长度较长^[12]。放电电压相同时,放电能量相同,当电弧长度较长时,上升时间增加,能量在更长时间释放,则电流峰值减小;同时电晕也会造成部分能量的损耗,导致放电电流波形总能量减少,电流峰值随之减小。接近速度会影响统计时间延迟,进而会影响到电弧长度^[13],放电电压一定时,接近速度越快,在相同时间延迟内电极移动距离越长,电弧长度越短,放电能量释放越集中,则放电电流峰值越大,上升时间越小。

2.2 位移电流

在设计完好的显示系统中,绝缘屏障良好,火花不能在显示器的边缘传播。因此,最可能扰乱或损坏显示

屏的路径是通过玻璃的位移电流。为了捕捉电流分布,设计了一个 PCB 板,其中包含 8 个 $3\text{ mm} \times 3\text{ mm}$ 的贴片天线,贴片天线的周围为参考地平面,如图 3 所示。PCB 板安装在玻璃背面。

将一块显示屏表层玻璃紧紧贴在位移电流测量 PCB 板上,调整 ESD 模拟器放电尖端位置,使放电尖端与 PCB 板上的贴片天线 #1 的中心位置重合。静电放电发生器的电压设置为 $\pm 8\text{ kV}$,该值是 ESD 测试典型的电压等级。相对湿度控制在 40% 左右,位于 ESD 测试要求的范围(30%~60%)内。为获得位移电流风险评估的上限,ESD 模拟器的接近速度设为快速 0.5 m/s ,如图 7 所示。由 2.1 小节可知,在 $\pm 10\text{--}\pm 12\text{ kV}$ 放电电压,电流峰值随放电电压的增大而减小,于是列出了放电电压 $\pm 12\text{ kV}$ 、接近速度 0.5 m/s 的位移电流,如图 8。

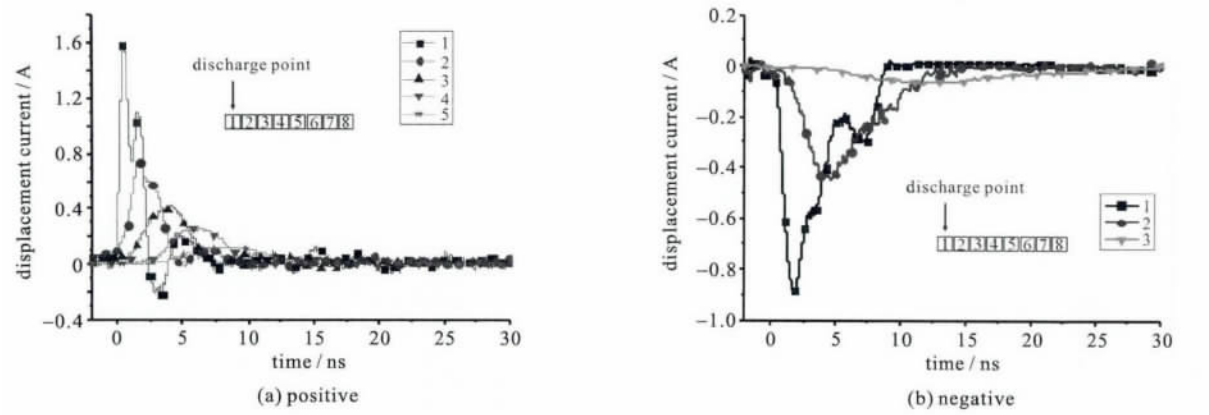


Fig.7 Displacement current at discharge voltage $\pm 8\text{ kV}$

图 7 放电电压 $\pm 8\text{ kV}$ 的位移电流

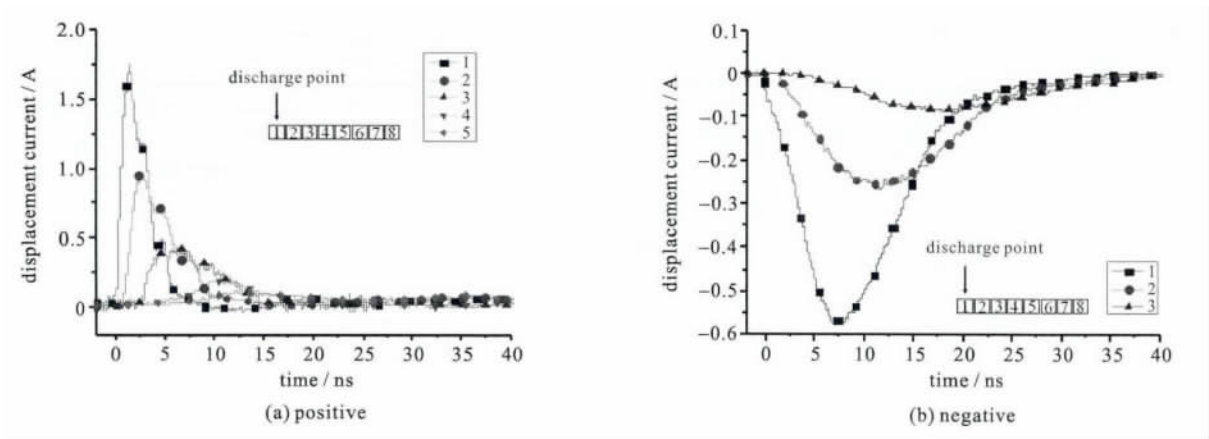


Fig.8 Displacement current at discharge voltage $\pm 12\text{ kV}$

图 8 放电电压 $\pm 12\text{ kV}$ 的位移电流

为了更直观的了解位移电流,从各贴片捕获的位移电流波形中提取出电流峰值与上升时间,如表 1、表 2 所示。由表 1 可知,位移电流波形的峰值随测量点与放电点之间距离的增大而减小,相对于负极性放电,正极性位移电流峰值更大且扩散范围更广。由表 2 可知,位移电流上升时间随测量点与放电点之间距离的增大而增大,负极性位移电流上升时间增大更加明显。由于玻璃是绝缘体,ESD 模拟器对显示屏表面玻璃放电后,电荷在玻璃表面向四周扩散,并残留在玻璃表面,同时随着扩散距离的增加,扩散面积增大,电荷分散,因此位移电流峰值随距离的增加而减小。

表 1 位移电流波形电流峰值

Table 1 Peak of displacement current waveform

discharge voltage/kV	total peak current/A	peak current/A				
		patch 1 (discharge center)	patch 2	patch 3	patch 4	patch 5
8	5.57	1.59	0.74	0.43	0.26	0.12
-8	-2.43	-0.89	-0.46	-0.07	—	—
12	5.40	1.75	0.96	0.43	0.19	0.11
-12	-1.35	-0.57	-0.21	-0.07	—	—

表 2 位移电流波形上升时间

Table 2 Rise time of displacement current waveform

discharge voltage/kV	rise time of total current/ns	rise time/ns				
		patch1 (discharge center)	patch2	patch3	patch 4	patch5
8	0.41	0.46	1.67	3.78	4.05	4.27
-8	0.34	0.69	2.08	9.24	—	—
12	0.62	0.95	1.27	1.67	4.40	6.57
-12	1.57	4.08	4.58	7.39	—	—

2.3 电荷密度

2.2 小节中的结果显示,相同放电电压的正、负极性放电电流峰值差异较大,负极性放电时电流峰值和放电能量虽然较小,但其影响的范围也更小。因此,仅考虑放电电流是不妥当的。通过 2.2 小节中测量的位移电流,对静电放电的电荷密度进行分析计算。电荷密度与位移电流有关,是一种测量局部干扰触点或显示层风险的方法,比放电电流更能说明静电放电对显示屏局部区域的损伤风险。由文献[10]可知,粉尘图的形状以放电点为中心呈对称形状,因此根据粉尘图的对称特性,可以认为与放电点距离相等的圆环上,放电电荷密度近似相等。因此可以通过贴片上测量的位移电流和贴片相关的环面区域来计算电荷密度,测量图形如图 9 所示。放电点位于贴片天线 #1 中心的正上方,对应图 9 中编号为 1 的方格。以贴片天线的边长为环径,将放电区域划分为 1,2,3,4,5 五个区域,1 区域为贴片天线 #1 所处的圆,圆半径为 1.5 mm。2~5 区域为环径为 3 mm(大小为贴片天线尺寸)的同心圆环,环心为放电点。

各区域电荷密度计算公式为

$$\sigma = \frac{\int I dt}{\pi r^2 - \pi(r-3)^2} \quad (1)$$

式中: I 为各区域对应的贴片天线所测位移电流; r 为圆环外半径。例如,对于区域 2, $r = 4.5$ mm。由式(1)结合图 7、图 8 所示的位移电流测量波形,分别计算放电电压为 ± 8 kV, ± 12 kV 时显示屏各区域的放电电荷密度,结果见表 3。

表 3 不同的贴片和极性的表面电荷密度(单位:nC/cm²)Table 3 Surface charge densities for different patches and polarities(units:nC/cm²)

discharge voltage/kV	center circle (discharge center)	annulus 2	annulus 3	annulus 4	annulus 5
8	47.06	6.05	2.46	1.2	0.67
-8	59.78	5.06	0.71	—	—
12	75.73	8.60	2.93	1.06	0.45
-12	94.77	7.00	1.42	—	—

电荷密度的这种计算方法是基于位移电流的测量结果而得,比放电电流更能说明静电放电对显示屏局部区域的损伤风险。从表 3 的结果中可以看出,静电放电的电荷密度随着距放电点位置的增大而减小。在相同放电条件下,虽然正极性的放电电流峰值比负极性大($+8$ kV, $+12$ kV 时分别为 5.57 A, 5.40 A, -8 kV, -12 kV 时分别为 -2.43 A, -1.35 A),但是负极性放电在放电点处的电荷密度比正极性的结果高。从结果中还可以看出,负极性放电的电荷密度消减速度比正极性要快得多。这说明负极性放电具有造成更高等级损伤风险的危害。虽然 ± 12 kV 时放电电流峰值小于 ± 8 kV,但是电流密度更大,因此危害更大。

3 结 论

本文通过自主设计的装置测量了对显示屏表面玻璃空气式静电放电的放电电流和通过显示屏的位移电流,研究了不同放电电压、不同放电极性和不同 ESD 模拟器接近速度对放电结果的影响;基于位移电流的测量

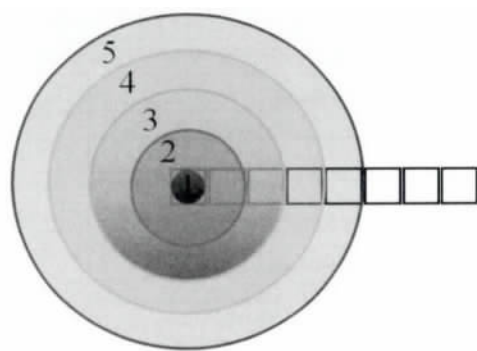


Fig.9 Geometry used to calculate the surface charge density

图 9 用来计算表面电荷密度的几何形状

结果,计算出显示屏上非火花放电的电荷密度。

放电电流峰值随接近速度的增加而增加,上升时间随接近速度的增加而减小。在 $\pm 10 \sim \pm 12$ kV 放电电压,电流峰值随放电电压的增加而减小;上升时间随放电电压的增加而增大。其原因是电弧长度的影响。放电电压较低时,电弧长度很短,而在放电电压较高时,电弧长度较长。接近速度会影响电弧长度,接近速度越快,电弧长度越短。当电弧长度较长时,上升时间增加,电流峰值减小。

位移电流与放电电流有关,位移电流波形的峰值随测量点与放电点之间距离的增大而减小;位移电流波形的上升时间随测量点与放电点之间距离的增大而增大。正极性位移电流峰值更大且扩散范围更广,而负极性位移电流上升沿时间增大更加明显。

电荷密度比放电电流更能说明静电放电对显示屏局部区域的损伤风险。电荷密度随着距放电点位置的增大而减小。与正极性放电相比,尽管负极性放电电流峰值较低,但电荷密度较高,说明负极性放电具有造成更高等级损伤风险的危害。同样的,虽然 ± 12 kV 时放电电流峰值小于 ± 8 kV,但是电流密度更大,因此危害更大。

参考文献:

- [1] Tsai J M, Chuang Y J, Liao S S, et al. Improve ESD protection on mobile phone with capacitive touch screen[C]//Cross Strait Quad-regional Radio Science & Wireless Technology Conference. 2011:295-298.
- [2] Talebzadeh A, Gan Y, Kim K H, et al. Sparkless electrostatic discharge (ESD) on display screens[C]//2015 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2015:1284-1289.
- [3] Shinde S, Zhou J, Marathe S, et al. ESD to the display inducing currents measured using a substitution PC board[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2016:707-712.
- [4] Zhou J, Shinde S, Guo Y, et al. IEC 61000-4-2 ESD test in display down configuration for cell phones[C]//IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2016:713-718.
- [5] Ko J, Kim K, Kim H. System-level ESD immunity of mobile display driver IC to hard and soft failure[J]. Electrical & Electronic Engineering, 2012, 13(1):329-335.
- [6] Hsu C T, Tseng J C, Chen Y L, et al. Board-level ESD of driver ICs on LCD panels[C]//IEEE International Reliability Physics Symposium. 2009, 9(1):59-64.
- [7] Jiang Xiao, Pommerenke, D, Fan Zhou, et al. Model for ESD LCD upset of a portable product[C]//2010 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility. 2010:354-358.
- [8] Kim K Y, Kim Y. Systematic analysis methodology for mobile phone's electrostatic discharge soft failures[J]. IEEE Trans Electromagnetic Compatibility, 2011, 53(3):611-618.
- [9] Lingayat T D. Prediction of electrostatic discharge soft failure issue in case of a six layer PCB of a tablet using SIwave tool[C]//IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics. 2017:1361-1366.
- [10] Murooka Y, Takada T, Hiddaka K. Nanosecond surface discharge and charge density evaluation Part I: review and experiments[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2001, 17(2):6-16.
- [11] Mueller L, Feser K, Pfendtner R, et al. Experimental investigation of discharges for charged plastic or plastic-coated materials[C]//Conference on Electrical Insulation & Dielectric Phenomena. 2001:110-113.
- [12] 贺其元,刘尚合,陈京平,等.对空气式静电放电的研究[J].高电压技术, 2006, 32(7):72-75.(He Qiyuan, Liu Shanghe, Chen Jingping, et al. Research on air electrostatic discharge. High Voltage Engineering, 2006, 32(7):72-75)
- [13] 原青云,张希军,刘尚合,等.影响空气式静电放电特性的相关因素分析[J].高电压技术, 2010, 36(10):2500-2506.(Yuan Qingyun, Zhang Xijun, Liu Shanghe, et al. Analysis of relevant factors influencing the characteristics of air electrostatic discharge. High Voltage Engineering, 2010, 36(10):2500-2506)
- [14] Murooka Y, Koyama S. Nanosecond surface discharge study by using Dust figure techniques[J]. Journal of Applied Physics, 1973, 44(4):1576-1580.
- [15] Pedersen P O. Die Ausbreitungs Geschwindigkeit der Lichtenbergschen Figuren und ihre Verwendung zur Messung sehr kurzer Zeiten[J]. Annalen der Physik, 2006, 374(19):205-230.
- [16] 贺其元,刘尚合,徐晓英,等.接近速度对空气静电放电特性的影响[J].强激光与粒子束, 2007, 19(3):524-528.(He Qiyuan, Liu Shanghe, Xu Xiaoying, et al. Effects of approach velocity on air electrostatic discharge characteristics. High Power Laser and Particle Beams, 2007, 19(3):524-528)