

文章编号:1007-2780(2022)08-1022-10

基于场路协同的智能显示终端空气 静电放电仿真

杨兰兰*, 王香霖, 王 倩, 王莉莉, 屠 彦

(东南大学 电子科学与工程学院 信息显示与可视化国际合作联合实验室,
江苏 南京 210096)

摘要:静电放电由于具有高电压、强电场、瞬时大电流和宽频电磁辐射,对电子产品的危害极大,特别是空气静电放电更具普遍性和危害性。本文将描述空气放电的 Rompe-Weizel 非线性电弧 SPICE 模型与静电放电全波模型结合,并结合描述芯片工作的 IBIS 模型,建立空气放电的场路协同仿真模型,研究空气静电放电对智能显示终端放电时放电电流、电磁场分布及信号传输情况的影响。仿真结果表明,放电弧长越长,电流峰值越小,上升时间越长。在空气放电影响下,信号传输线的不同终端处所受干扰不同,影响主要集中在前 2 ns,且并不是辐射电磁场越强处所受干扰也越大。场路协同仿真为复杂电子设备的空气放电研究提供了一种更加符合实际情况的仿真方式,为电子设备设计和制备过程中降低静电干扰提供了理论指导。

关 键 词:静电放电;空气放电;场路协同仿真;三维全波模型

中图分类号: TN972 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2022-0072

Field-circuit co-simulation for air electrostatic discharge in intelligent display terminals

YANG Lan-lan*, WANG Xiang-ji, WANG Qian, WANG Li-li, TU Yan

(Joint International Research Laboratory of Information Display and Visualization, School of Electronic
Science and Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: Electrostatic discharge is harmful to electronic products because of its high voltage, strong electric field, instantaneous large current and broadband electromagnetic radiation, especially air electrostatic discharge is more common and harmful. In this paper, the Rompe-Weizel SPICE model describing nonlinear arc air-discharge, the 3D full-wave model and the IBIS model describing chip operation are combined to establish the field-circuit co-simulation model of the intelligent display terminal under air discharge. The discharge current, electromagnetic field distribution and signal transmission under air electrostatic dis-

收稿日期: 2022-03-04; **修订日期:** 2022-03-26.

基金项目: 江苏省自然科学基金(No. BK20171156); 中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2242021k30002); 国家重点研发计划(No. 2016YFB0401201)

Supported by Natural Science Foundation of Jiangsu Province(No. BK 20171156); Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2242021k30002); National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0401201)

*通信联系人, E-mail: jujube_yang@seu.edu.cn

charge event are monitored through the discharge process. The simulation results show that the longer discharge arc length leads to the smaller current peak and the longer rise time. Under the influence of air discharge, the interference is different at different terminals of the signal transmission line, and the influence is mainly concentrated in the first 2 ns. And it is not that the stronger the electromagnetic field radiation is, the greater the interference is. Field-circuit co-simulation provides a more realistic simulation method for air discharge research in complex electronic products, and provides theoretical guidance for reducing electrostatic interference in the design and manufacture of electronic products.

Key words: electrostatic discharge; air discharge; field-circuit co-simulation; 3D full-wave model

1 引言

信息时代显示终端是人机交互的重要部件。各种智能电子产品,如手机、PAD、笔记本电脑,以及医疗设备、汽车智能显示终端、航空仪器设备等都易受外部电磁环境的干扰。随着集成技术的发展,各种智能电子设备日趋集成化、小型化、轻薄化,且功耗更低、运行速度更快,但电子元器件被封装在小空间内,意味着智能电子设备更容易受到外部电磁环境的干扰。静电放电(Electrostatic discharge, ESD)是这类电子产品发生故障的主要因素。ESD发生时,通常伴随着高电压、强电场、瞬时大电流和宽频的电磁辐射,它将通过直接传递的传导干扰和空间耦合的辐射干扰两种方式影响电子产品的内部电路,使电子产品的功能受到影响。这些影响分为软失效(可恢复)和硬失效(受到不可逆的永久性破坏)两种。

ESD可分为接触放电和空气放电,其中空气放电是实际生产生活中最主要的放电现象,也是对电子设备造成损伤或干扰的主要方式之一^[1]。空气放电易受到放电火花通道、放电电压的大小与极性、气体压强、环境温度湿度、电极接近速度等因素的影响,放电实验的重复性比较低^[2-3]。与依据 IEC 61000-4-2 标准的放电实验相比,电磁仿真可以消除不同放电设备和不同实验环境带来的结果不确定性,具有良好的重复性,使得ESD复杂多变的随机过程相对可控。通过电磁仿真得到的信息更加丰富,可以快速定位易受ESD影响的位置点、在PCB板上的传播路径、信号传输所受干扰情况以及对特定芯片的影响等。

单纯的电路分析方法忽略了ESD电磁场的影响,无法定位放电过程中发生的故障在设备中

所处的位置。单独的电磁场求解器也无法考虑复杂的电路元件,如IC芯片等,因此无法分析信号在传输过程中由于干扰所导致的信号错误^[4-7]。因此需要场路协同仿真方法来研究静电放电对电子设备的影响,将其静电放电发生器和待测电子设备放在一起考虑。待测电子设备中常见的一类是智能显示终端,它通常包含带有显示屏的防护外壳、内部PCB板及板上的IC芯片。场路协同仿真方法将整个系统分为两部分:电磁结构和电路模块。它采用时域有限差分法或有限元法等全波方法精确求解各种复杂的封装和互连结构,采用电路分析法求解电路模块。然后通过接口将这两部分耦合起来,最终实现电磁场与电路的协同仿真。该方法能够准确地描述高速集成电路中的电磁效应,除了获得电路中的电压和电流信息外,还可以获得电磁场信息。因此,该方法可以有效分析高速集成电路中的电磁兼容性、信号完整性、电磁干扰等问题^[8-9]。

CST Studio Suite是一款高性能3D电磁分析软件包,用于设计、分析和优化电磁组件和系统^[10]。CST微波工作室(MWS)和CST设计工作室(DS)提供一个方便的接口,共同模拟电磁场和电路的交互效应。本课题组前期基于场路协同仿真方法对接触放电展开了相关研究,将仿真与理论和实验结果进行了对比分析,对场路协同仿真方法的有效性进行了验证^[11-14]。

本文将基于场路协同仿真研究方法,结合三维全波仿真模型和电路模型,研究空气静电放电对智能显示终端的影响。智能显示终端包含带有显示屏的防护外壳及包含IC芯片的PCB电路板。智能显示终端将与静电放电发生器一起进行联合仿真,研究空气静电放电发生时的PCB板上的信号传输情况及电磁场分布情况,为静电放

电防护提供有益的分析和指导。

2 场路协同仿真方法

2.1 空气静电放电 SPICE 模型

空气静电放电的 SPICE(Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis)模型依据 Rompe-Weizel 公式,如公式(1)所示^[15],将其描述成一个非线性网络的电路结构。火花电阻在放电初期,电阻趋近于无穷大。在空气击穿过程中电阻迅速减小,同时与火花长度成正比,即放电弧长越大,电阻越大。该模型的本质就是描述了空气放电过程中电压电流随弧长和时间的非线性变化关系。

$$R(t)=\frac{s}{\sqrt{2a\int_0^t i^2(\xi)d\xi}}, \quad (1)$$

式(1)中 $R(t)$ 为火花电阻(Ω), s 为火花长度(m), i 为放电电流(A), a 为经验常数 $(0.5\sim1)\times 10^{-4}\text{ m}^2\cdot\text{V}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

2.2 智能显示终端场路协同仿真流程及空气静电放电电路模型

图1为智能显示终端场路协同仿真流程。(a)在 MWS 工作室中建立静电放电发生器的 3D 全波模型,设置激励端口、频率带宽、边界条件、网格大小等;(b)和(c)分别导入 PCB 模型和防护外壳结构;(d)在 DS 工作室中获得与 3D 全波模型相关联的电路模块;(e)给相应的芯片端口添加 IBIS (Input/Output Buffer Information Specification)模型;(f)添加空气放电的 SPICE 模型,并给 IBIS 模型和 SPICE 模型添加相应的外部激励。仿真采用纯瞬态场路协同仿真,这种方法可以实时将当前电路仿真的激励转化为在微波工作室(MWS)中的电场和磁场信息,从而监测整个空气放电过程,实现 3D 全波模型仿真与电路级仿真的互相补充。

图2为包含静电放电发生器及智能显示终端的三维全波仿真模型示意图。智能显示终端保护外壳的长宽高为 $120\text{ mm}\times 82.5\text{ mm}\times 22.5\text{ mm}$,主要拟合手机的尺寸,保护外壳主体的材质为铝金属,正面嵌入了一块 $97.5\text{ mm}\times 75\text{ mm}\times 1.5\text{ mm}$ 的玻璃,模拟智能显示终端的显示屏。智能显示终端横放在静电发生器上,一端有圆形的玻璃触

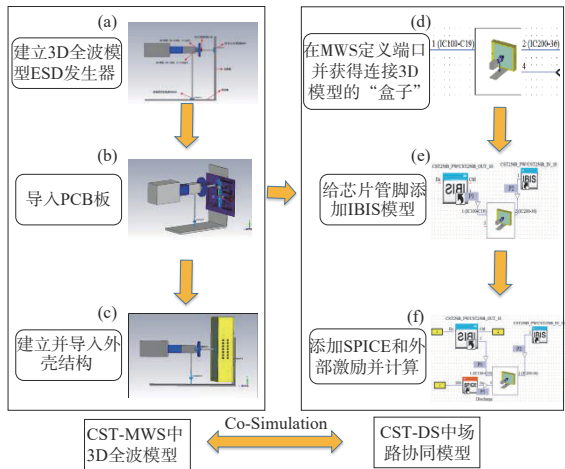


图1 智能显示终端场路协同仿真流程

Fig. 1 Flow diagram of field-circuit co-simulation in intelligent display terminals

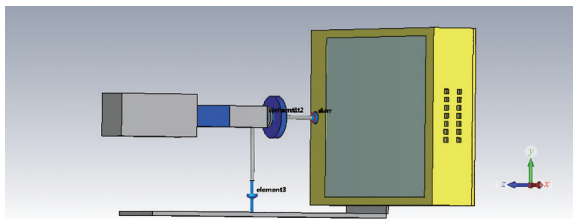


图2 包含静电放电发生器及智能显示终端的三维全波仿真模型示意图

Fig. 2 3D full-wave model including ESD generator and intelligent display terminal

摸按键,放电点在此位置上,相对应的另一端有正方形排孔,模拟智能显示终端上的开孔。此保护外壳与 PCB 的连接方式为与 PCB 的接地层通过 4 个小接地电阻相连,然后将保护外壳与 ESD 发生器的接地板用大电容相连。图3所示为智能显示终端保护外壳内的内部 PCB 板。内部 PCB 板主要用于 CPU(IC100)与 4 块高速缓存(IC200-IC203)交换数据,整块 PCB 板大小为 $80\text{ mm}\times 60\text{ mm}$,厚度为 1.086 mm 。CPU 与 4 块缓存的布线位于顶层与底层,中间层为电源与接地的布线。为了仿真空气放电对电子设备信号线传输过程造成的干扰情况,本文在导入的 PCB 中选取了一根信号线(ADDR5,位于 IC100 与缓存 IC200 之间的一根地址线),在信号传输线的两端设置了两个端口,分别为 Port1 和 Port2,如图3所示。内部 PCB 板处于 xy 平面上。

图4为智能显示终端添加 IBIS 模型和空气

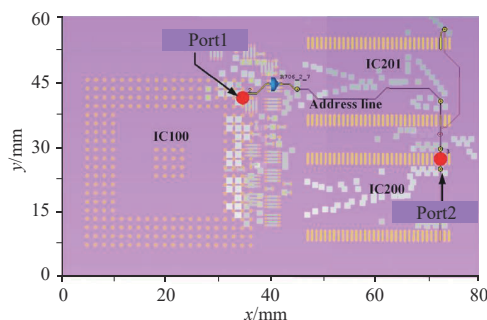


图3 内部PCB板

Fig. 3 Internal PCB board

放电 SPICE 模型后的空气放电场路协同仿真电路图。在 3D 全波仿真模型对应的电路模块的 Port4 上添加空气放电 SPICE 模型,通过激励源 1 施加空气放电的放电电压,同时添加 P3 电流探针来探测放电电流的情况。传输信号由激励源 2 产生,其信号波形是幅值为 1.8 V,频率为 100 MHz 的周期性方波信号。激励源 3 为芯片的使能信号,此处为低电平使能。Port1 与 Port2 为地址信号线两端设置的端口,信号从 IC100-C19 引脚处开始,经过 3D 模型电路模块中的 ADDR5 地址线传输到 IC200-36 端,在两端分别添加 P1 和 P2 探针来探测信号变化情况。P1 和 P2 探针实际上监测的是地址信号线两端 Port1 和 Port2 处的电压信号。

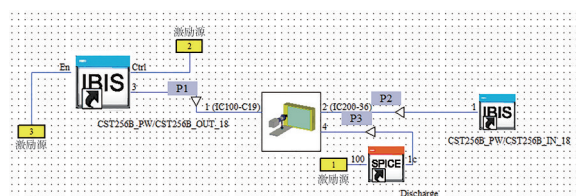


图4 包含芯片 IBIS 模型和空气放电 SPICE 模型的场路协同仿真的电路模型

Fig. 4 Field-circuit co-simulation model including IBIS model and air discharge SPICE model

3 无 ESD 激励时信号传输情况

首先探究无外界激励下的信号传输情况。将激励源 1 的激励电压设置为 0 V,仿真时间设置为 60 ns,此时探讨的是无 ESD 电压激励时,激励源 2 施加频率为 100 MHz,幅值为 1.8 V 的周期性方波信号在电路中的传输情况,方便与后面

施加放电电压激励时进行比较。

图 5 为无 ESD 激励时,信号从源端到 P1 再到 P2 的传输情况。周期为 100 MHz 的传输信号经过 IBIS 模型后发生了一定的畸变,信号上升时间增大,输出信号延迟了约 3 ns,在低电平时出现了较小的抖动。整个信号的周期和幅值并没有发生变化。信号从 V_{P1} 到 V_{P2} 的传输过程中,波形没有发生变化,只是有略微的延迟。由图 5 可以看出,在没有外界 ESD 激励影响的情况下,100 MHz 方波信号在传输时能够保持信号特性,但在传输线 IC100-C19 引脚处对应的 IBIS 模型相对原始输入信号影响较大,这主要是 CPU 芯片的 IBIS 模型影响。

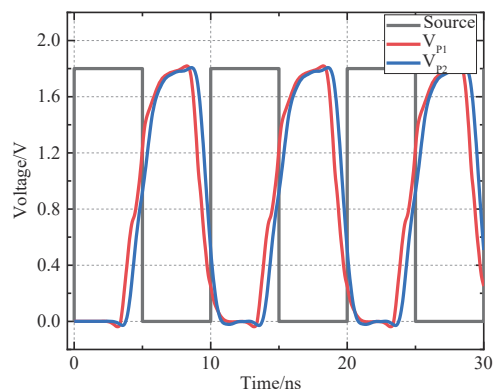


图5 无ESD时传输线信号传输情况

Fig. 5 Signal transmitting under no-ESD event

4 空气放电模拟结果

其他设置不变,放电点放在触摸玻璃按键中心进行场路协同仿真,分别仿真了 0.3, 0.5, 0.7, 1.1, 1.3 mm 5 种弧长下的空气静电放电对于放电电流、传输信号的影响^[16]。小弧长对应空气干燥,实验测试时静电发生器快速接近待测物体的情形;大弧长则对应空气湿度比较大,实验测试时静电发生器接近待测物体的速度比较慢的情形;中等长度的弧长则对应接近速度中等的典型状态。

图 6 给出了不同弧长下对地板和对智能显示终端放电的放电电流。从图 6 可以看出,与直接对地板进行放电得到的电流波形相比,对智能显示终端放电的第一峰值的放电电流幅值较低,放电波形的第二波峰几乎消失不见,大约在

2 ns 就已衰减为 mA 量级。这种差异主要是放电系统负载阻抗完全不同造成的,一个是直接对金属接地板放电,而另一个则是智能显示终端对玻璃介质进行放电。对接地板放电时,接地板与静电放电发生器之间形成了良好的通路且阻抗较小;而对玻璃介质来说,除了系统的负载阻抗变大之外,电荷在玻璃介质上的积累也阻挡了电流的进一步升高。

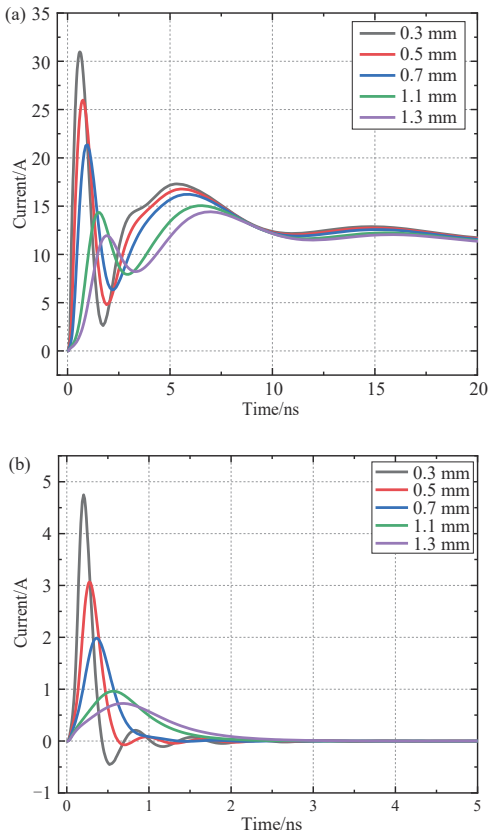


图 6 不同弧长下对待测物体的放电电流。(a)对接地板; (b)对智能显示终端。
Fig. 6 Discharge current to device under test under different arc-length. (a) To ground; (b) To intelligent display terminal.

表 1 为图 6(b)在不同弧长下放电电流的具体参数。可以看出,随着弧长的增加,峰值上升时间是增加的,而电流峰值是减小的,同时波形前沿和后沿都变得平缓起来。在小间隙 0.3 mm 下峰值为 4.75 A,只有对地放电电流的约 1/7,大间隙 1.3 mm 下仅有 0.72 A。放电电流的上升速度是指单位时间内电流上升幅值大小,为进一步

探究电流随弧长的变化情况,对不同弧长下放电电流上升速度情况进行拟合,如图 7 所示。

表 1 对智能显示终端不同弧长放电下峰值时间和电流峰值的变化情况

Tab. 1 Variation of peak-time and peak-current under different arc-length for discharging to intelligent display terminal

弧长/mm	峰值时间/ns	峰值电流/A	上升速度/(A·ns ⁻¹)
0.3	0.20	4.75	23.75
0.5	0.26	3.06	11.77
0.7	0.36	1.98	5.50
1.1	0.55	0.96	1.75
1.3	0.66	0.72	1.09

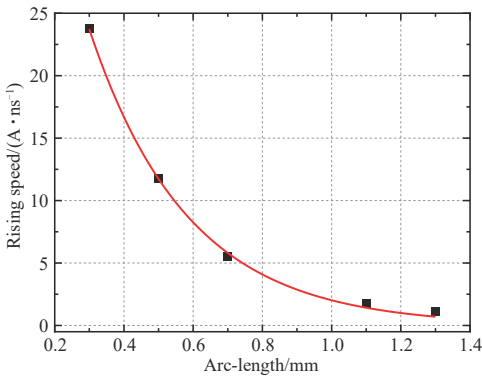


图 7 放电电流上升速度与弧长关系的拟合曲线
Fig. 7 Fitting curve between the rising speed of discharging current and arc-length

从图 7 可知,放电电流的上升速度随着弧长增加呈指数减小,拟合公式如式(2)所示:

$$v(s)=68.14e^{-3.52s}, \tag{2}$$

式中: s 为放电弧长, v 为峰值电流上升速度。

由于空气放电电弧电阻的变化是非线性的,而弧长与电弧电阻是正比关系,因此放电电流与弧长之间的关系也是非线性的。从物理意义来看,随着放电间隙增加,相同的电场作用下电子漂移空间距离增加,到达阳极运动的所需时间也增加,峰值上升时间就增加。单位体积内的二次电子数量减小,碰撞和电离的空间电荷数量减小,电流峰值就减小,这同仿真结果具有一致性。

图 8 给出了 8 kV 放电电压、不同放电弧长下空气放电对传输信号的影响,以监测的地址信号

线两端的电压 V_{P1} 和 V_{P2} 来表征。对 V_{P1} 来说,信号扰动集中在 2 ns 之内,且幅值在 ± 0.2 V 范围之内,这是由于放电电流幅值较小,且在 2 ns 之后电流就降至 mA 量级,说明影响主要集中在放电电流比较强的时间区域内。从信号波形来看,空气放电对 V_{P2} 传输信号的影响明显比对 V_{P1} 的影响要大。在放电的前 2 ns, V_{P2} 电压的扰动约为 ± 0.6 V,是 V_{P1} 扰动的 3 倍左右。 V_{P2} 的抖动一直持续到 10 ns 之后才基本消失,说明即使放电电流降至 mA 量级之后空气放电产生的电磁场对传输过程中的信号仍然存在影响。

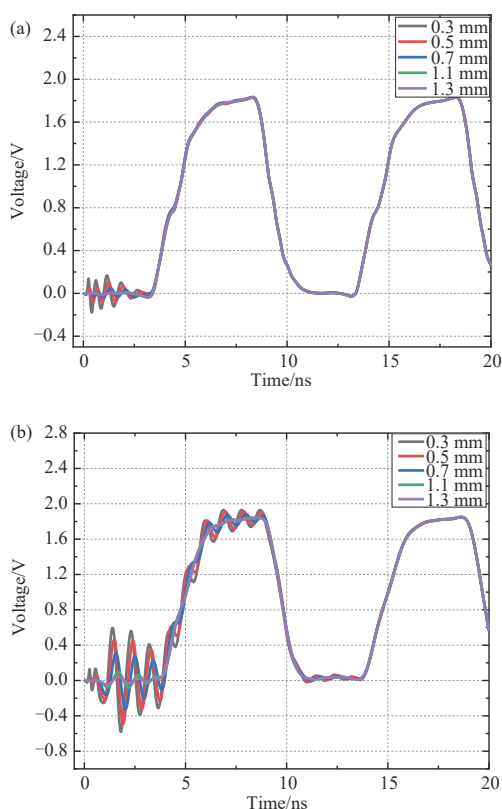


图8 不同弧长下探针 P1 和 P2 电压波形变化。(a) V_{P1} ;
(b) V_{P2} 。

Fig.8 Voltage detected at probes P1 and P2. (a) V_{P1} ;
(b) V_{P2} .

图9给出了 V_{P1} 和 V_{P2} 信号扰动电压峰-峰值变化图,从图9中可以看出,信号抖动峰-峰值是随弧长非线性变化的。0.3 mm 小弧长下, V_{P2} 抖动电压比 V_{P1} 大约 0.8 V,而 1.3 mm 大弧长时只有约 0.08 V 的差距,说明 V_{P2} 抖动峰-峰值的剧烈程度大于 V_{P1} ,且弧长越大,对传输信号的影响越

小。研究结果表明,大弧长下的空气放电对信号干扰的影响相对较小。

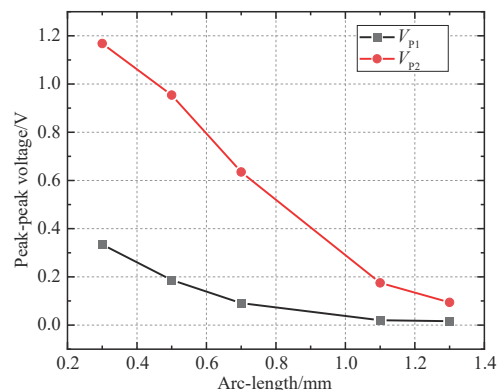


图9 V_{P1} 和 V_{P2} 信号扰动电压峰-峰值变化图

Fig.9 Peak-peak voltage detected at P1 and P2 under different arc-length

为了更好地观察给定点位置的电磁场大小以及整个仿真区域电磁场分布随时间的变化情况,仿真时添加了电磁场探针和电磁场表面监视器。放电点与电磁场探针位置的示意图如图10所示,电磁场探针设置数量为2个,分布位置在 Port1 和 Port2 端口的正上方(z 方向)3 mm 处。由图10所示的透视图可以观察到放电点 A 与电磁场探针在 xy 方向上的相对位置分布。对 Port1 和 Port2 处探测获得的电场和磁场进行坡印廷矢量计算来表征放电过程中这些位置的能量大小,结果如图11所示。

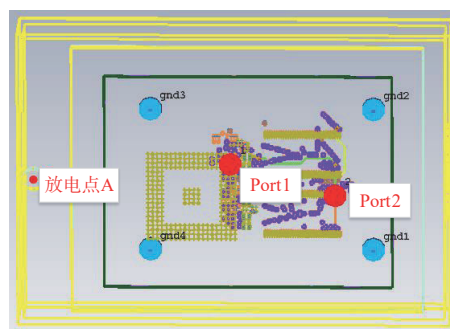


图10 放电点与电磁场探针位置

Fig.10 Discharge point and electromagnetic probe positions

由图11可以看出,随着弧长不断增加,坡印廷矢量大小即能流密度不断减小。图11(a)中 Port1 处的能量主要集中在放电的前 1 ns 内,在 0.3 mm

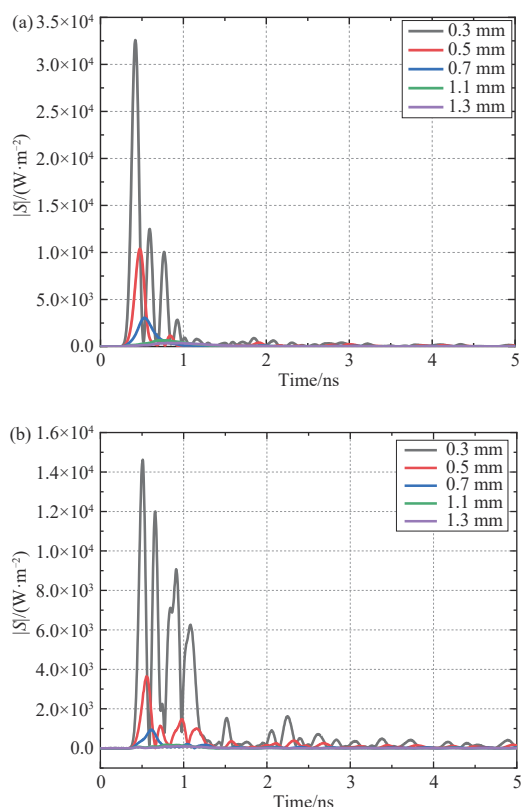


图 11 不同弧长 Port1 和 Port2 处的坡印廷矢量大小。
(a) Port1; (b) Port2.

Fig. 11 Poynting vector magnitude at Port1 and Port2 under different arc-length. (a) Port1; (b) Port2.

放电弧长时,能流密度高达 $3.3 \times 10^4 \text{ W/m}^2$,大弧长时差别极大,差了约两个数量级。能流密度值在 2 ns 之后基本很小,这说明在 2 ns 以内手机内部的电路极易发生损伤。从各个放电弧长来看,Port1 处的能流密度幅值要比 Port2 处大,但从图 8 的信号电压波形来看, V_{P2} 抖动却比 V_{P1} 要大,说明不仅仅是透过玻璃板和孔缝结构的电磁场对信号有干扰,还有着信号在 PCB 传输路径中受到的传导干扰的影响。信号线的不同终端所受的干扰影响不仅与电磁场辐射的强弱相关,也与 PCB 板上的布线路径和传输路径相关,并不是辐射电磁场越强处所受干扰也越大。从图 11 还可以看出,Port2 处坡印廷矢量大小到达峰值的时间相较 Port1 也有零点几纳秒的延迟,这是由于点 Port1 与放电点的距离比点 Port2 近,符合电磁波在空间传播的特性。

上述研究结果表明,放电的前 2 ns 是空气放电可能对智能显示终端产生影响的主要时间

段。智能显示终端内部的 PCB 板是最易受到电磁干扰影响的部分,内部 PCB 板上电磁场随时间的变化情况也是需要重点关注的。在放电电压为 8 kV,放电弧长为 0.3 mm 情况下,选取了 2 ns 内的 4 个时间点的电场分布来探究电场变化情况,结果如图 12 所示。

由图 10 可知,放电点位于 PCB 板左侧。图 12 表明 0.2 ns 时,PCB 板左侧边缘有微弱电场的存在;0.4 ns 时已经逐步向右侧扩散;0.8 ns 时,左侧的 PCB 电场已经小于右侧。由于电场的边缘效应,板上边缘的电场强度要高于内部板上。PCB 板内电场强度最高为 $1.4 \times 10^3 \text{ V/m}$,而边缘则可以高达 $4.5 \times 10^3 \text{ V/m}$,约为板内场强的 3 倍。该结论对于芯片的 ESD 防护具有一定的指导意义,系统重要的芯片(CPU 等)要摆放于 PCB 板中央位置,避免受到 ESD 强电场冲击。

放电电压的大小对于智能显示终端信号传输的影响也需要关注。放电点依旧为玻璃按键的中心,选取了 0.5 mm 放电弧长下不同电压对 V_{P1} 和 V_{P2} 的信号的影响。仿真设置了 5, 8, 10, 12, 15 kV 五种电压等级。

图 13 所示为不同放电电压下空气放电电流的情况。可以看出随着电压增加,上升时间逐渐减小,电流峰值逐渐增加。对放电电流的上升速度与放电电压的关系进行拟合,拟合公式如式(3)所示:

$$v(V_c) = 2.53e^{0.20V_c}, \quad (3)$$

式中: V_c 为放电电压, v 为电流峰值上升速度。

从式(3)可知,放电电流上升速度 v 和放电电压 V_c 之间呈指数增长关系。从物理意义上讲,当固定放电间隙时,整个电流空间体积是不变的,当激励电压不断增大,外加电场强度增加,漂移的空间电子所受外力增加,加速度变大,电子到达阳极时间会减小,同时空间电荷的碰撞和电离会增多,从而二次电子数量增加,电流幅值也会变大。这种指数变化规律也符合电子雪崩增长的规律。

图 14 给出了不同放电电压下探针 P1 和 P2 处的电压变化情况。由图 14 可知,对于 V_{P1} 的影响主要在放电的前 2 ns,在 5~15 kV 的外界激励中,抖动峰值在 $\pm 0.4 \text{ V}$ 范围之内,这是由于 2 ns 内的空间电磁场变化比较剧烈。对于 V_{P2} 信号,

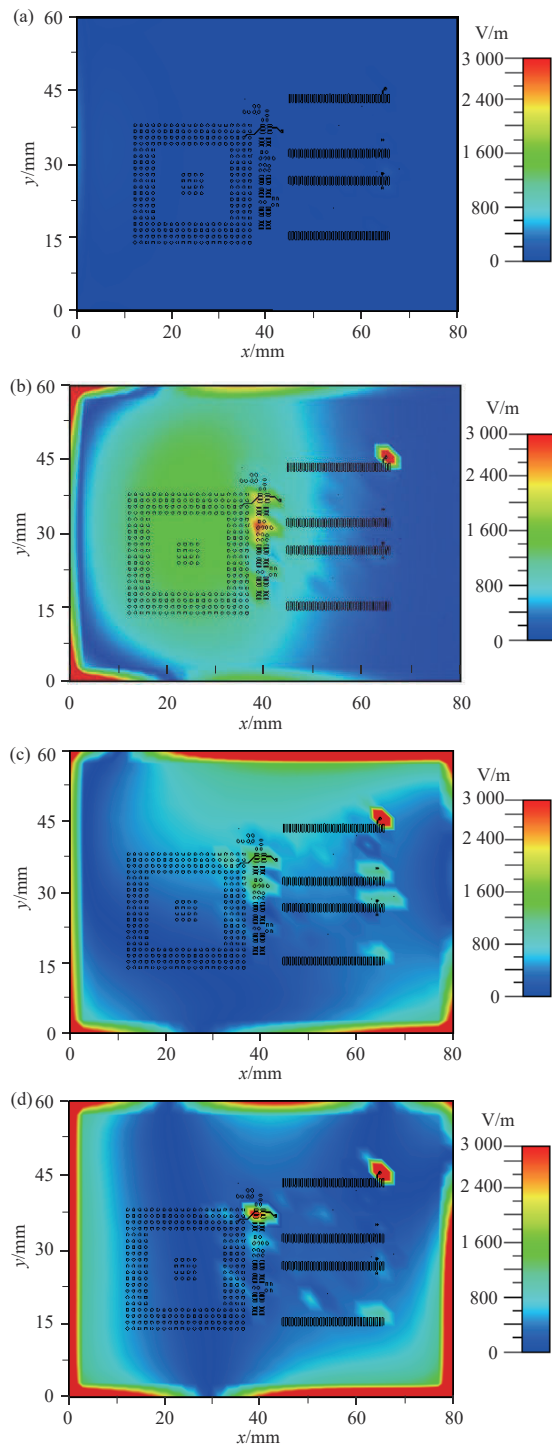


图12 PCB板正面电场分布图。(a) 0.2 ns; (b) 0.4 ns; (c) 0.8 ns; (d) 1.2 ns。

Fig. 12 Electric field norm on the internal PCB board. (a) 0.2 ns; (b) 0.4 ns; (c) 0.8 ns; (d) 1.2 ns.

影响信号的时间一直持续到14 ns,尤其在前5 ns内,扰动幅值约为 V_{P1} 的3倍。在15 kV放电电压下, V_{P2} 的扰动电压甚至接近1.2 V,已比较接近

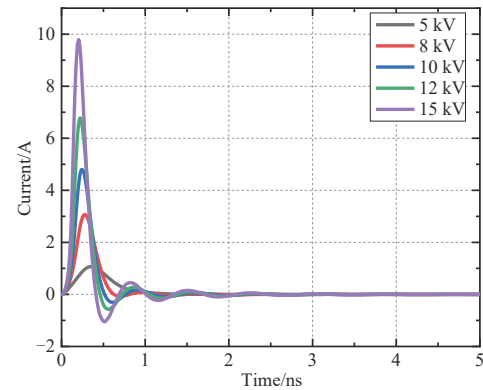


图13 不同放电电压下的放电电流

Fig. 13 Discharge current at different discharge voltage

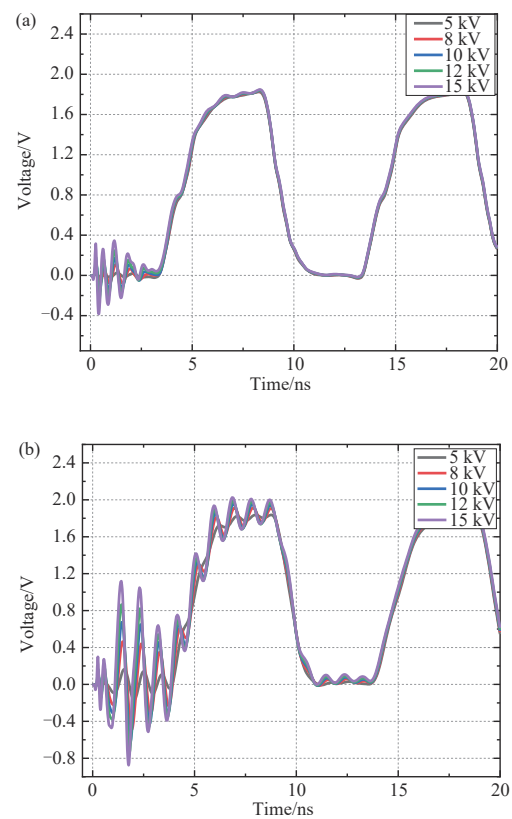


图14 不同放电电压下探针P1和P2处的电压变化。(a) V_{P1} ; (b) V_{P2} 。

Fig. 14 Voltage detected at probes P1 and P2 under different discharge voltage. (a) V_{P1} ; (b) V_{P2} .

1.8 V的信号电平。也就是说,高电压下信号的扰动值已比较接近信号电压的幅值,可能会使得信号传输过程中的高低电平发生错误,比如会出现错误的高电平,造成信号的逻辑错误,也就是电子设备的软失效问题。

5 结 论

本文将复杂 PCB 板、保护外壳、芯片 IBIS 模型、描述空气放电的 Rompe-Weizel 非线性电弧模型及静电发生器模型整合在一起共同构建完整的电子设备场路协同仿真模型,研究空气放电对智能显示终端的影响,包含放电电流、电磁场分布及信号传输情况。仿真结果表明,放电弧长越长,电流峰值越小,上升时间越长。在空气放电影响下,信号传输线的不同对终端处的干扰不同,且影响主要集中在前 2 ns。信号线的不同终端所受的干扰影响不仅与电磁场辐射的强弱相关,也与 PCB 板上的布线路径和传输路径相关,并不是辐射电磁场越强处所受干扰也越大。同

时对空气放电时,智能显示终端内部 PCB 板上的电磁场分布情况亦可以监控,可以发现重要的芯片要摆放于 PCB 板中央位置,避免受到 ESD 边缘强电场的冲击。当空气静电放电电压较高时,信号扰动电压有可能接近信号电平,造成信号的逻辑错误,智能显示终端将出现软失效。本文通过对智能显示终端场路协同仿真的研究,提出了一种实用的静电放电仿真方法。通过场路协同仿真,分析了不同放电因素对电子产品的影响,为在产品的设计过程中降低静电放电的影响提供了理论指导。此外,通过能流密度最大位置点或引脚电流位置可以预测硬失效,而通过信号干扰可以预测软失效。然而,在未来还需要进行详细的实验研究,以便更准确地验证该方法。

参 考 文 献:

- [1] 刘鹏宇. 液晶显示模组表面空气式静电放电及能量特性研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2019.
LIU P Y. Study on air electrostatic discharge and energy characteristics of LCM [D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [2] 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 Q Y, ZHANG X J, LIU S H, *et al.* Analysis on the relative factors affecting the characteristics of air electrostatic discharge [J]. *High Voltage Engineering*, 2010, 36(10): 2500-2506. (in Chinese)
- [3] 赵丹,吴桂林,朱继芳,等. 非接触式静电放电波形分析及试验[J]. 宇航计测技术,2021,41(3):73-78.
ZHAO D, WU G L, ZHU J F, *et al.* Waveform analysis and test of non-contact electrostatic discharge [J]. *Journal of Astronautic Metrology and Measurement*, 2021, 41(3): 73-78. (in Chinese)
- [4] HOSSEINBEIG A, IZADI O H, SOLANKI S, *et al.* Methodology for analyzing ESD-induced soft failure using full-wave simulation and measurement [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2019, 61(1): 11-19.
- [5] PARK J, LEE J, SEOL B, *et al.* Efficient calculation of inductive and capacitive coupling due to electrostatic discharge (ESD) using PEEC method [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2015, 57(4): 743-753.
- [6] ZHOU J C, SHINDE S, GUO Y D, *et al.* IEC 61000-4-2 ESD test in display down configuration for cell phones [C]//*Proceedings of 2016 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Ottawa: IEEE, 2016: 713-718.
- [7] GAN Y J, TALEBZADEH A, XU X Y, *et al.* Experimental characterization and modeling of surface discharging for an electrostatic discharge (ESD) to an LCD display [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2018, 60(1): 96-106.
- [8] LI E P, WEI X H, CANGELLARIS A C, *et al.* Progress review of electromagnetic compatibility analysis technologies for packages, printed circuit boards, and novel interconnects [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2010, 52(2): 248-265.
- [9] BARCANSKI A. Linking circuit simulation with full-wave solver for board-level EMC design [J]. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2015, 4(3): 52-58.
- [10] CST Studio Suite 3D EM simulation and analysis software [EB/OL]. <https://www.3ds.com/products-services/simulia/>

products/cst-studio-suite.

- [11] 王倩,杨兰兰,王香霖,等. 基于场路协同的手机静电放电仿真研究[J]. 电子器件,2021,44(5):1025-1029.
WANG Q, YANG L L, WANG X J, *et al.* Investigation of electrostatic discharge in mobile phones based on field-circuit Co-simulation [J]. *Chinese Journal of Electron Devices*, 2021, 44(5): 1025-1029. (in Chinese)
- [12] 许文婷,杨兰兰,屠彦. PCB板静电放电的仿真分析[J]. 真空科学与技术学报,2018,38(4):272-278.
XU W T, YANG L L, TU Y. Interaction of electrostatic discharge and printed circuit board: a simulation and experimental study [J]. *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology*, 2018, 38(4): 272-278. (in Chinese)
- [13] YANG L L, YANG C, WANG X J, *et al.* System-level co-simulation combined with full-wave 3D model and circuit elements for electrostatic discharge in display devices [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2021, 52 (S1): 129-132.
- [14] 杨昌. 电子设备场路协同仿真静电放电仿真研究[D]. 南京:东南大学,2020.
YANG C. Research on the field-circuit co-simulation of electronic equipment for electrostatic discharge [D]. Nanjing: Southeast University, 2020. (in Chinese)
- [15] TAKA Y, FUJIWARA O. Further validation of spark-resistance formula applied for human ESD [C]//*Proceedings of the 2009 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*. Zurich: IEEE, 2009: 393-396.
- [16] LIU D Z, NANDY A, ZHOU F, *et al.* Full-wave simulation of an electrostatic discharge generator discharging in air-discharge mode into a product [J]. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2011, 53(1): 28-37.

作者简介:



杨兰兰(1978—),女,安徽萧县人,博士,教授,2008年于东南大学获得博士学位,主要从事显示器件的仿真与测试、电子系统的场路协同仿真方面的研究。E-mail: jujube_yang@seu.edu.cn