

## 计算机操作中人体静电放电辐射瞬态电场与磁场的研究\*

黄久生

(北京特种机电技术研究所 北京 100012)

**摘要** 分析了静电放电(ESD)辐射场的偶极子模型.用高采样速率数字示波器和定做的宽带电磁与磁场探头测量了计算机操作中人体静电放电产生的瞬态电场与磁场.用FFT分析了静电放电辐射场的频谱.研究了静电放电辐射场对某电路高频信号的影响.研究结果表明,即使是很低电压(2kV)的静电放电,其辐射近场的电场达几百V/m,磁场可达几十A/m.静电放电辐射场的频谱极宽,从数兆赫到数千兆赫.静电放电对高频电路的试验结果表明,若不采取有效的防护措施,人体静电放电辐射电磁场会对电路造成一定的影响,如对集成电路与元器件造成“潜在效应”的损害,对电路造成电磁干扰,甚至损坏电子器件.

**关键词** 计算机,静电放电,电场,磁场

POSSIBLE EFFECTS OF ELECTROMAGNETIC FIELDS GENERATED BY  
ELECTROSTATIC DISCHARGE FROM THE CHARGED HUMAN  
BODY ON COMPUTER OPERATION

HUANG Jiu Sheng

(Beijing Institute of Special Electromechanical Technologies, Beijing 100012)

**Abstract** The electromagnetic fields radiated by electrostatic discharge is analyzed using the bipolar model. The transient electric and magnetic fields generated by electrostatic discharge from the charged human body during the operation of computers are measured by a very high sampling rate oscilloscope and custom-made wide band electric field and magnetic field antennas. The spectrum of the fields is analyzed by FFT. The influence of the fields on high frequency signals is studied. The results show that the electric fields can be several hundred V/m and the magnetic fields can be several A/m even if the discharge voltage is very low(2kV). The spectrum of the fields is very wide ranging from several MHz to several GHz. The effects of the fields on high frequency circuits show that some influences such as “latent effects” on integrated circuits or devices, electromagnetic interference and even damage to the circuits can be caused by the electromagnetic fields generated by electrostatic discharge from the charged human body.

**Key words** computer, electrostatic discharge, electric fields, magnetic fields

## 1 引言

在19世纪前,静电似乎不存在什么问题,仅仅是一种简单而有趣的现象<sup>[1]</sup>.在20世纪中期,随着工业生产的高速发展以及高分子材料的迅速推广应用,静电问题越来越严重.静电放电(electrostatic discharge,ESD)能够对电子元器件等造成危害已是众所周知.在过去的几十年中,人们研究的静电的危害主要是静电放电电流产生的焦耳热效应和场击穿

效应,因而在静电产生机理,不同类型的静电放电(如火花放电、刷形放电和电晕放电)的引燃界限<sup>[2,3]</sup>,最小引燃能量<sup>[4]</sup>,静电放电模型(如人体模型、人体金属模型、机器模型等<sup>[5]</sup>),静电测量技术,减少与防止静电的产生方法,改进静电防护材料的性能<sup>[6]</sup>等方面进行了大量的研究.对静电放电辐射的电磁场虽然有所认识,但定量的研究却很少.静电

\* 国防科技重点实验室基金资助项目

2000-02-24收到初稿,2000-04-10修回

放电辐射场是一个频谱极宽、幅度很大的近场电磁脉冲(EMP)。随着电子产品电磁兼容性(EMC)要求越来越严,静电放电辐射场的研究已成为目前国内外重要课题之一。

在电子技术迅速发展和广泛应用的信息化的今天,计算机已在各个行业和领域都得到了广泛应用,在航空、航天、石油化工、电力等大型系统以及家庭中越来越普及,计算机的集成电路密度越来越大,而与计算机接触最多的是人体,人体是一个最常见的静电危害源。因此研究人体静电放电辐射电磁场对计算机造成的影响是很有意义的。本文主要测量计算机操作中人体静电放电辐射的电场和磁场,并研究其对电子电路的效应。

## 2 静电放电辐射瞬态场的模型

静电放电辐射场的作用主要是在近场。在近场,电磁辐射的时间延迟可以忽略,近场的电场与磁场关系极为复杂,没有简单的关系式。1990年,Tabata和Tomita<sup>[7]</sup>提出了两个球形电极的ESD辐射电场模型,Wilson<sup>[8]</sup>等人提出了与实际吻合较好的偶极子ESD辐射模型。通过简化模型和条件对标势 $\phi(r,t)$ 和矢势 $A(r,t)$ 进行求解,可得到如下的电场和磁场表达式:

$$E(r,t) \approx a_{\rho} dl \frac{\eta}{2\pi R^2} \left| \frac{3i(u)}{R^2} + \frac{1}{cR} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right| + a_z dl \frac{\eta}{2\pi} \left| \frac{3z^2}{R^2} - 1 \right| \left| \frac{i(u)}{R^2} + \frac{z^2}{R^2} - 1 \right| \left| \frac{1}{cR} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right|,$$

$$H(r,t) \approx a_{\phi} dl \frac{1}{2\pi R} \left| \frac{i(u)}{R^2} + \frac{1}{cR} \frac{\partial i(u)}{\partial u} \right|,$$

其中 $R$ 是从源点到观察点 $(\rho, \phi, z)$ 的距离, $\eta$ 是自由空间波阻抗, $c$ 是传播速度。从以上表达式可见,ESD产生的近场正比于电流 $i(t)$ ,放电电流越大,距离越近,场强越强,远场正比于电流的变化率 $\frac{\partial i(u)}{\partial u}$ 。

## 3 静电放电辐射场的实验研究

静电放电辐射场是上升时间小于1 ns、持续时间仅几十至几百 ns的瞬态电磁脉冲,所以静电放电辐射场有很宽的频谱。国外在90年代初以前要对静电放电辐射场进行准确的测量是一项困难的工作<sup>[9]</sup>,主要原因是由于探头和数字示波器的带宽不

够而引起较大的误差。因此,要进行定量测量时,探头与数字存储示波器的带宽必须在1 GHz以上。近年推出的带宽在1 GHz以上的数字示波器为这一课题研究提供了条件。

### 3.1 静电放电辐射瞬态电场研究

#### 3.1.1 实验装置

实验装置主要是泰克公司近年推出的采样速率为5 GS/s、带宽为1 GHz的双通道数字存储示波器(TDS680B)和定做的宽带单极子电场天线<sup>[10]</sup>,天线的长度为10 mm,经校验其带宽达12 GHz(3 dB)。天线有效长度 $L$ 和电场 $E(t)$ 及电压 $V(t)$ 之间的关系为 $L = \frac{V(t)}{E(t)}$ ,用示波器测出天线的电压 $V(t)$ ,通过计算机软件数值处理可得到电场 $E(t)$ 。实验时被试验者通过一个100 M的电阻与稳定直流高压电源相连,以保持人体静电电压稳定。放电试验为人直接对金属地,模拟计算机操作时人对桌面边缘的金属体放电。人体带电电压为2 kV。

#### 3.1.2 实验结果

图1为人体持金属笔、笔尖对地放电时在10 cm处测得的电场信号波形,其 $E_{pp} = 410$  V/m。由图1可见,其波形是持续时间为几十个纳秒的振荡波形。用快速傅里叶(FFT)分析波形的频谱,其信号频谱极宽,可达3 GHz。

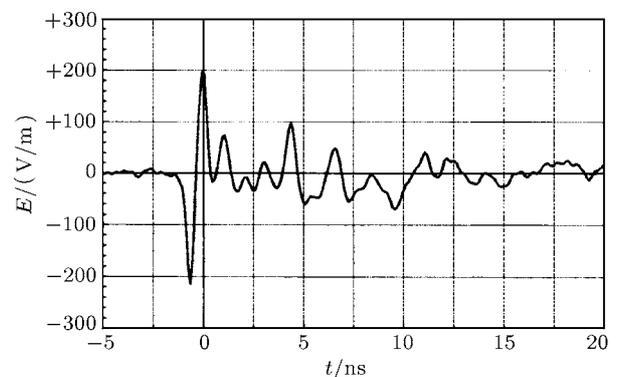


图1 人体静电放电辐射电场波形(2 kV,10 cm)

### 3.2 静电放电辐射瞬态磁场的研究

#### 3.2.1 实验装置

本实验装置为惠普公司1999年推出的采样速率为8 GS/s、带宽为1.5 GHz四通道数字存储示波器(HP infinity 54845 A)和定做的宽带磁场天线。磁场天线为圆环形且有电场屏蔽保护,直径为10 mm,带宽为5 GHz(3 dB)。根据法拉第原理,其感应电压与磁感应强度的关系为 $V(t) = S \frac{dB(t)}{dt}$ , $S$ 为圆环天线的有效面积,用示波器测出 $V(t)$ ,通过

计算机软件数值处理就可得到磁感应强度的变化率  $\frac{dB(t)}{dt} = \frac{V(t)}{S}$ . 实验时, 被试验者通过一个 100 M 的电阻与稳定直流高压电源相连, 以保持人体静电电压稳定. 放电试验为人直接对计算机桌面边缘的金属体放电. 人体带电电压为 2kV.

### 3.2.2 实验结果

图 2 是人体带电电压为 2kV, 对地放电时在 3cm 处测得的磁感应强度对时间导数的波形, 其  $\frac{dB(t)}{dt}$  峰峰值 =  $5.4 \times 10^4$  T/s, 波形为上升时间 493.4ps ( $1\text{ps} = 10^{-12}\text{s}$ ), 持续时间为几十个纳秒. 通过对数值积分可得磁感应强度  $B(t)$ , 再由公式  $H(t) = B(t)/\mu_0$  可得到磁场强度的峰峰值为 28 A/m.

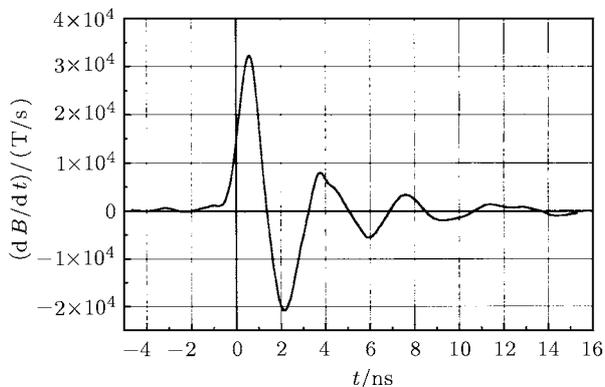


图 2 人体静电放电辐射磁感应强度变化率波形

## 4 静电放电产生电磁场的效应

近年来人们对静电放电的进一步研究表明, 静电放电辐射场对电子产品会产生一种所谓的“潜在效应”, 即电子产品短时间不表现出任何损坏迹象, 但随着时间增长其性能要下降或出现故障. 在大规模集成电路广泛应用的数字化时代, 这种“潜在效应”的危害不可忽视, 如卫星发射后要连续工作多年, 在运行过程中其检测维修费用很高. 如考虑到这些高技术产品如火箭和航天飞机的可靠性问题, 这种潜在危害也很严重甚至是非常可怕的. 静电放电辐射场的另一个效应是对通信设备和电子产品造成的电磁干扰 (EMI). 随电子产品电磁兼容要求越来越严格, 各国制定的电子产品电磁兼容标准中都规定电子产品必须经过不同等级的静电放电检验. 目前很多电子产品在遭受静电放电的打击时就会造成损坏. 如 1997 年某实验室四台计算机正在工作, 附近一个实验室在做静电放电实验, 在听到放电声响的同时, 四台计算机突然同时死机, 且发出蜂鸣声,

所有程序中断. 复位后有三台计算机能工作, 一台内存为 16 M 的 586 机器开机自检时显示内存仅几 k, 完全不能工作, 换内存后也不能工作, 调换机器主板后才工作, 后来上网时发现与该机相连的一个调制解调器也已损坏<sup>[11]</sup>.

作者用静电放电模拟器以空气放电和接触放电产生的电磁场对某电子电路的高频信号的试验表明, 静电放电产生的电磁场使正常工作的高频信号产生了一个幅度很大的脉冲. 这个脉冲的宽度比静电放电持续的时间长几个数量级<sup>[11]</sup>, 这么强的电磁脉冲能对电路造成很大的影响, 如对元器件造成“潜在效应”损害, 干扰电路的正常工作, 甚至损坏电路.

## 5 结论

静电放电辐射的瞬态电场与磁场关系极为复杂, 辐射近场极强且有很宽的频谱. 用高速采样数字示波器和宽带电磁探头及磁场探头测量了静电放电辐射的电场和磁场并分析了其频谱. 结果表明, 即使是很低电压 (2kV) 的静电放电, 在放电时人体没有电击感, 但其辐射的近场 (几 cm 处) 电场强度达几百 V/m, 其频谱从数兆赫到数千兆赫, 辐射的磁场约为几十 A/m. 静电放电对某高频电路的试验结果表明, 静电放电辐射的电磁场对电路的高频信号能造成很大的影响. 若不采取有效的防护措施, 这种静电放电电磁脉冲能对电路造成一定的影响, 如对集成电路与元器件造成“潜在效应”的损害和对电路造成电磁干扰, 甚至损坏器件.

### 参 考 文 献

- [ 1 ] 黄久生, 刘尚合. 物理, 1997, 26: 55 [ HUANG Jiu-Sheng, LIU Shang-He. Wuli (Physics), 1997, 26: 55 (in Chinese) ]
- [ 2 ] Huang J S, Zhao L Z. The safety electrostatic potential of non-incendiary discharges from charged insulator. In: Proceedings of the International Conference on Modern Electrostatics. Beijing, China: International Academic Publishers, 1987. 472
- [ 3 ] 黄久生, 刘尚合. 静电, 1995, 3: 20 [ HUANG Jiu-Sheng, LIU Shang-He. Electrostatics, 1995, 3: 20 (in Chinese) ]
- [ 4 ] 唐安镇, 周锡忠. 物理, 1981, 10: 543 [ TANG An-Zhen, ZHOU Xi-Zhong. Wuli (Physics), 1981, 10: 543 (in Chinese) ]
- [ 5 ] 黄久生, 刘尚合. 静电放电 (ESD) 模型的分析与研究. 见: 吴彦主编. 静电基础与应用. 大连: 大连理工大学出版社, 1996. 168 [ HUANG Jiu-Sheng, LIU Shang-He. The Analysis of Electrostatic Discharge (ESD) Model. In: WU Yan ed. Foundation and Application of Electrostatics. Dalian: Dalian Institute of Technology Press, 1996. 168 (in Chinese) ]

(下转第 614 页)