

文章编号: 1008-1542(2005)02-0087-06

静电放电电磁脉冲理论建模与作用机理研究进展

刘尚合¹, 周万珍², 孙秋红²

(1. 军械工程学院静电与电磁防护研究所, 河北石家庄 050003; 2. 河北科技大学信息科学与工程学院, 河北石家庄 050054)

摘要: 通过静电放电效应实验和理论分析, 研究了 IEC61000-4-2 标准规定的实验方法与实验平台的局限性, 提出了改进的 ESD 电磁场理论模型, 探讨了静电放电电磁脉冲对微电子器件作用机理, 提出了相应防护对策。

关键词: 静电放电; 理论建模; 作用机理

中图分类号: O441.1; TP274 文献标识码: A

Modeling of electrostatic discharge electromagnetic impulse theory and the development of the study of function mechanism

LIU Shang-he¹, ZHOU Wan-zhen², SUN Qiu-hong²

(1. Electrostatic and Electromagnetic Protection Research Institute, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang Hebei 050003, China; 2. College of Information Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang Hebei 050054, China)

Abstract: Based on the experimental and theoretical analysis of Electrostatic Discharge effect, the paper discusses about limitation of the experiment method and experiment flat which prescribed by IEC61000-4-2. It presents the improved ESD electromagnetic field theory model, and explores the function mechanism of microelectronic device from electrostatic discharge electromagnetic impulse, puts forward the corresponding protection countermeasure.

Key words: electrostatic discharge; theory modeling; function mechanism

在干燥环境中静电放电现象是普遍存在的, 而且静电荷可以聚集成上万伏特的危险静电源。一旦形成放电回路, 有时瞬间会形成几十甚至上百安培的电流脉冲, 这种放电过程往往在 ns 量级完成, 同时伴有强烈的宽带电磁辐射。所以, 静电放电不仅可以通过传导途径对敏感设备释放能量, 而且可以通过空间电磁辐射场把能量传输到附近设备上, 从而对敏感设备造成干扰或损伤。在微电子领域, 全球每年因静电放电造成的损失高达数百亿美元。为此, 工业发达国家都十分重视对静电放电防护的研究。在微电子器件静电危害防护研究方面, 国际上先后提出了各种理论模型, 国际电工委员会还制定了对微电子器件及设备的检测标准和相应的实验平台。但是, 研究发现, 这些理论模型和实验方法存在一定的局限性, 需要进一步研究和改进。笔者在研究静电放电(ESD)电磁脉冲(EMP)场时空分布规律的基础上, 针对当前该研究领域存在的问题和工程建设中电磁脉冲场防护的实际需要, 提出了改进的 ESD 电磁场理论模型^[1,2], 探讨了静电放电电磁脉冲对微电子器件作用机理, 提出了相应防护理论和技术。

1 ESD 模型及 IEC61000-4-2 标准规定的实验方法与实验平台的局限性

收稿日期: 2005-05-31; 责任编辑: 王士忠

作者简介: 刘尚合(1937-), 男, 山西闻喜人, 教授, 中国工程院院士, 主要从事防电磁危害理论与技术方面的研究。

© 1994-2012 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

IEC 标准等规定的 ESD 模拟器的主要电路参数仅有 C, R 两项, 即只规定了模拟器的储能电容和放电回路的电阻。在实际的静电放电过程中, 考虑到分布参数, 电路模型要复杂得多, 见图 1 所示。针对这种情况, IEC 文件对各国生产的 ESD 模拟器模拟人体金属模型时, 规定的标准电流波形见图 2 所示, 其波形参数见表 1。

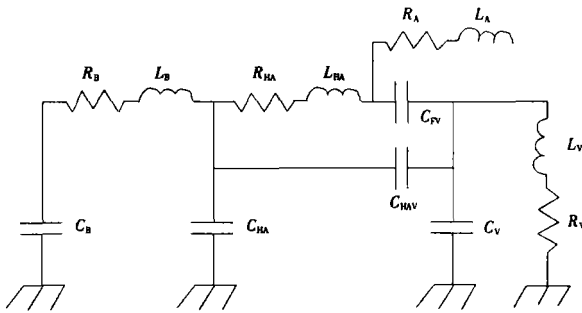


图 1 静电放电(人体金属模型) 等效电路
Fig. 1 Electrostatic discharge equivalent circuit

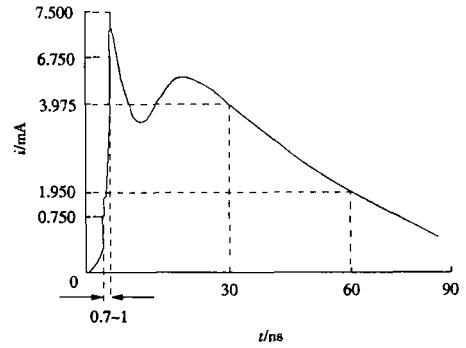


图 2 静电放电(人体金属模型) 标准电流波形
Fig. 2 Electrostatic discharge standard current wave

笔者在进行静电放电电磁脉冲对单片机的效应实验时发现, 用同样满足 IEC61000-4-2 标准的不同厂家的 ESD 模拟器得到的抗扰度测试结果存在着明显的差异, 部分实验结果见表 2。

为了找出产生这种差异的原因, 笔者研究了 2 种模拟器的输出特性。图 3 给出了用静电放电模拟器电流波形校验装置测量的日本 ESS-200AX 型 ESD 模拟器和瑞士 NSG435 模拟器的电流波形。表 3 给出了这 2 种模拟器的波形参数。与表 1 给出的标准规定值比较可知, 2 种模拟器的 ESD 电流基本参数均符合 IEC 标准要求。虽然 2 个模拟器的放电电流的上升时间均在 IEC 标准规定的 0.7~ 1 ns 之间, 但是, 2 种模拟器电流波形的前沿并不重合, 如图 4 所示。上升沿的陡峭程度将影响其辐射场的高频成分, 进而对实验结果会造成一定的影响。另外, 虽然 2 种模拟器的放电电流峰值相近, 但电流的导数波形 (di/dt) 不同。

图 5 是 6 kV 接触放电时 2 种模拟器放电电流的导数波形。由图 5 可知, NSG435 模拟器的电流导数正负峰值大约是 ESS-200AX 模拟器的 1.5 倍,

这对电子设备的辐射干扰显然是不同的。

表 1 静电放电(人体金属模型) 标准波形参数
Tab. 1 Electrostatic discharge standard current wave parameter

放电电压/kV	上升时间/ns	峰值电流/A (±10%)	30 ns 处电流/A (±30%)	60 ns 处电流/A (±30%)
2	0.7~ 1	7.5	4	2
4	0.7~ 1	15	8	4
6	0.7~ 1	22.5	12	6
8	0.7~ 1	30	16	8

表 2 不同 ESD 模拟器辐照效应实验结果
Tab. 2 Different ESD simulator radiate effect experiment result

故障现象	模拟器	阈值电压 /kV
内 RAM 的 $R_0 \sim R_7$ 单元内容出错	ESS-200AX	2.00~ 2.20 - 5.80~ - 6.00
	NSG435	2.50 ~ 2.70 - 4.30~ - 4.50
外 RAM 存储器内容被改写	ESS-200AX	1.10~ 1.20 - 0.20~ - 0.30
	NSG435	3.10~ 3.20 - 0.20 ~ - 0.30

表 3 2 种模拟器的波形参数

Tab. 3 Two simulator wave parameter

放电电压/kV	ESS-200AX				NSG435			
	上升时间/ps	峰值电流/A	30 ns 处电流/A	60 ns 处电流/A	上升时间/ps	峰值电流/A	30 ns 处电流/A	60 ns 处电流/A
2	883	7.05	3.81	2.40	769	6.74	4.08	2.67
4	923	14.35	8.11	4.39	734	13.38	8.03	5.01
6	896	21.66	12.32	6.73	743	20.00	12.42	8.07
8	907	29.33	16.35	9.00	733	26.94	16.66	10.25

笔者认为, 造成上述情况的原因是由于 IEC 标准对电流校验波形的规定不够严格, 这使得不同模拟器

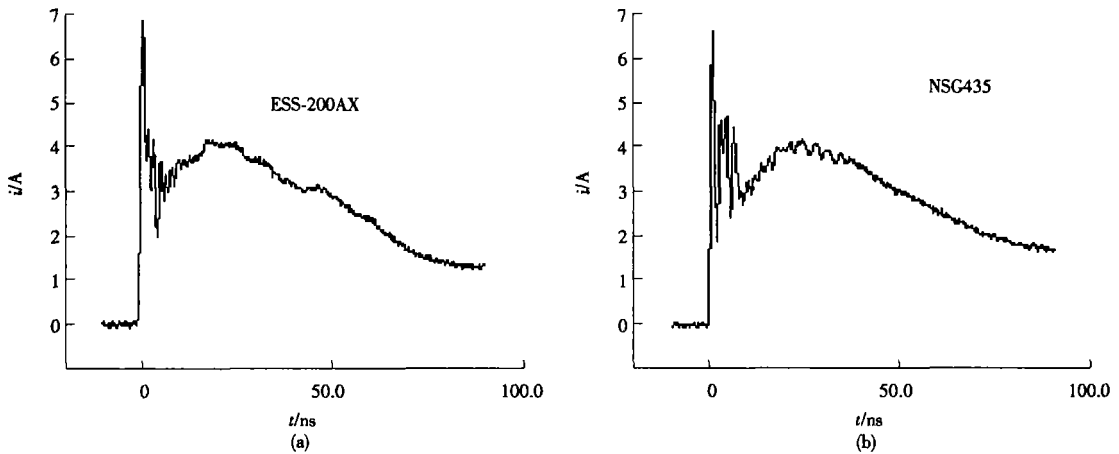


图 3 2 种模拟器的短路电流波形

Fig. 3 Two simulator short circuit current wave

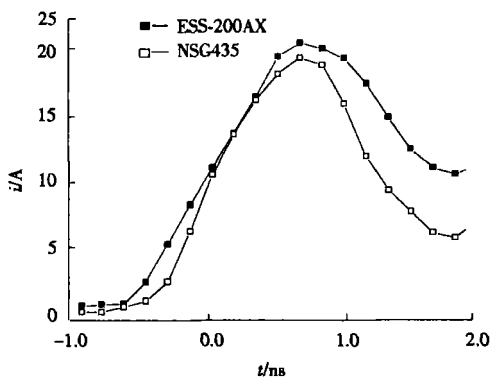


图 4 2 种模拟器电流波形前沿比较

Fig. 4 Comparison of two simulator current wave leading edge

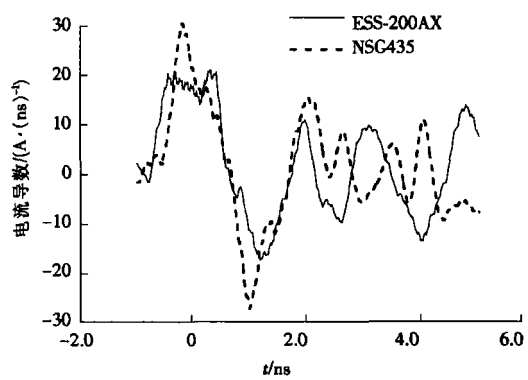


图 5 2 种模拟器静电放电电流的导数波形

Fig. 5 Two simulator electrostatic discharge current derivative wave

得到的静电抗扰度测试结果存在明显的差异。为此,笔者建议要规定电流导数波形参数,限制电流波形的振荡,进一步完善 ESD 模拟器的校验标准,从而减小不同模拟器静电抗扰度测试结果之间的差异。

实际中的静电放电绝大多数是空气放电方式,而且空气放电时电流波形与接近速度、环境条件等有关。IEC 标准虽然规定有空气放电方式,却没有空气放电方式下的电流波形,也没有规定接近速度等条件。因此,笔者进一步研究了空气放电的特点,从改善 ESD 模拟器空气放电重复性的基点出发,设计了基于可编程控制器(PLC)的运动控制台,用以控制模拟器放电电极的运动速度,用严格控制的空气放电方式和相应的实验平台,改进模拟器空气放电的重复性,可以更好地进行电子设备静电放电抗扰度性实验。笔者研制的静电放电模拟实验平台见图 6 所示。利用该模拟实验平台,可以同时测量静电放电过程中的放电电流波形、静电放电辐射场波形和静电放电耦合到传输线上电压波形。在此基础上进行了 ESD 模拟器空气放电电流波形重复性不同条件下的比较实验,得到了较理想的实验结果。



图 6 新型静电放电模拟实验平台

Fig. 6 New electro static discharge simulate experiment flat

2 ESD 辐射场建模研究

IEC 标准规定的 ESD 模型虽然普遍用于电子产品的抗 ESD 实验,但这种 ESD 模型只表征了 ESD 源的

特性,并不能确定ESD过程中其他信息,尤其是静电放电辐射场的信息。随着科学技术发展和微电子技术的广泛应用,人们发现ESD辐射电磁场对微电子电路及设备造成的干扰/损伤导致意外的事故日益严重,为此,人们提出了ESD的辐射场模型,如长导体模型、偶极子模型、双源模型等,其中以WILSON P F提出的偶极子模型最为著名^[1-3]。

Wilson模型虽然可以计算静电放电的远区场,但不能计算近区场,也没有考虑放电前静电荷形成的静态场和电荷转移过程中静电场的贡献。总之,目前的ESD模型(实际上是静电放电过程中静电源的等效电路模型)和各种ESD辐射场模型及有关标准规定的实验方法,都未能全面描述ESD过程中形成的实际场分布,也不能根据ESD参数定量确定受干扰设备实际接受的干扰强度。为此,本项目组在研究分析各种ESD模型的基础上,对Wilson模型进行了修正,提出了一种改进的偶极子模型(简称“新模型”):

$$E(r, z, t) = \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \times \left\{ \frac{rz}{R^2} \left[\frac{3 \int_0^{t-R/c} i(t' - R/c) dt' - 3Q_0}{R^3} + \frac{3i(t - R/c)}{cR^2} + \frac{1}{c^2 R} \frac{\partial i(t - R/c)}{\partial t} \right] \right\} + \frac{l}{2\pi\epsilon_0} \left\{ \left[\frac{3z^2}{R^2} - 1 \right] \left[\frac{\int_0^{t-R/c} i(t' - R/c) dt' - Q_0}{R^3} + \frac{i(t - R/c)}{cR^2} \right] + \left[\frac{z^2}{R^2} - 1 \right] \frac{1}{c^2 R} \frac{\partial i(t - R/c)}{\partial t} \right\}.$$

经计算和实验验证,这种理论模型基本上可以全面描述ESD过程中近区和远区的电磁场分布。新模型既考虑了ESD过程中的辐射场,也考虑了静电场,既能计算远区场分布,也能计算近区场分布。

在上述理论建模的基础上,分析了静电放电电磁场和环境温度湿度、放电电极形状、电极接近速度的关系以及ESD火花长度与放电电压之间的关系,计算了近区与远区的场分布。计算结果表明:在近区的电场主要是电荷激发的静电场为主,在远区主要是电流微分项产生的辐射场。近区场和远区场的电场值都随放电电压的升高而增大。但是随着放电电压的升高,ESD火花长度增大,脉冲电流的前沿将变大,由电流微分项产生的辐射场将减小,也就是说ESD电磁场与放电电压的关系在不同的频段是不同的。这一研究结论和MASUGIM等人用3种天线分频段的测量结果基本一致^[4-6]。本项目的部分实验结果也证明项目组建立的ESD电磁场理论模型和提出的计算方法是正确的,能够全面反映ESD电磁场的实际情况。新建ESD电磁场理论与国际上有代表性的研究成果相比较见表4。

表4 新建ESD电磁场理论模型与国际上已建模型的比较

Tab. 4 Comparison of new ESD electromagnetic theory model and model established international

名称	适用情况	存在问题
长导体模型 ^[7]	适用于ESD过程中长电流通道附近的场计算	不能计算远区电场,也不能计算磁场和ESD快变电流产生的场
双球电极模型 ^[8]	适用于ESD过程中近区的电场计算	忽略了ESD过程中电流作用,不能计算远区场和磁场
偶极子模型 ^[3]	适合于ESD过程中远区辐射场计算,可同时计算电场、磁场分量	没有考虑ESD过程中静电场分量,不适用于ESD近区场计算
本项目建立的新模型 ^[1,2]	考虑了ESD过程中静电场分量,可同时计算近区场、远区场及磁场	

3 ESD特点与作用机理

过去,人们认为静电放电是一种高电位、强电场、小电流的过程,其实这种看法并不完全正确。的确有些静电放电过程产生的放电电流比较小,如电晕放电,但是在大多数情况下静电放电过程往往会产生瞬时脉冲大电流,在ESD过程中会产生上升时间极快、持续时间极短的初始大电流脉冲,并产生强烈的电磁辐射形成静电放电电磁脉冲(ESD EMP)。静电放电过程产生的电磁辐射场覆盖很宽的频谱范围,有的报道达到0~3 GHz。它的电磁能量往往会引起电子系统中敏感部件的损坏、翻转,使某些装置中的电火工品误爆,造成事故。作为近场危害源,许多人已把它与高空核爆炸形成的核电磁脉冲(NEMP)及雷电放电时产生的雷电电磁脉冲相提并论^[9]。

实验研究表明, 静电危害的作用机理可分为力学效应、热效应、电磁辐射效应、强电场效应和磁效应等 5 种。

1) 力学效应 静电场使物质微粒极化, 从而在非均匀静电场中受到力的作用, 使悬浮在空气中的尘埃容易被吸附在物体上造成污染。如果半导体芯片带上静电, 尘埃会吸附在芯片上, 使得集成电路的成品率大大降低。

2) 热效应 静电放电产生的热效应常常是在 ns 或从 μs 量级完成的, 是一种绝热过程, 作为点火源、引爆源, 瞬时可引起易燃易爆气体或电火工品等燃烧爆炸。对微电子器件而言, 其静电放电能量通过器件集中释放, 其平均功率可达几千瓦, 热量很难从功率耗散面向外扩散, 因而在器件内形成大的温度梯度, 造成局部热损伤, 电路性能变坏或失效。静电放电可以使金属布线与扩散区(或多晶)接触孔产生火花, 使金属和硅的欧姆接触被破坏, 可以使局部的硅熔解, 产生再结晶, 造成器件短路, 可以使金属化电极和布线熔解、“球化”, 造成电路开路。大电流流过 PN 结产生焦耳热, 使结温升高, 形成“热斑”或“热奔”, 导致器件损坏。

3) 电磁脉冲效应 静电放电引起的射频干扰, 对信息化设备造成电噪声、电磁干扰, 使其产生误动作或功能失效。强电磁脉冲及其浪涌效应对电子设备可以造成硬损伤或软损伤, 既可以造成器件或电路的性能参数劣化或完全失效, 也可以形成累积效应, 埋下潜在的危害, 使电路或设备的可靠性降低。

4) 强电场效应 静电放电产生的强电场可以导致 MOS 场效应器件的栅氧化层被击穿, 使器件失效, 也可导致微电子电路绝缘介质击穿, 或使器件性能下降, 或使集成电路和精密的电子组件老化, 降低设备寿命。介质击穿对电路造成的危害是由于过电压或强电场造成的, 不单纯决定于静电放电能量。基于这种危害(失效)机理, 常常导致潜在性的危害, 使设备或电路的可靠性降低。这种危害不易被及早发现, 而在生产和储运过程中已形成初始的不良状态使器件寿命降低。潜在性危害是静电危害中最为棘手的问题。当 MOS 器件栅极上外加电场时, 在该电场作用下, 如果栅极没有被击穿, 则也可以使 SiO_2 膜中 Al/ SiO_2 界面处所俘获的 Na^+ 离子漂移而群集在 SiO_2/Si 界面的缺陷中心处, 为器件使用中局部击穿埋下隐患, 造成潜在性危害。

5) 强磁场效应 静电放电引起的强电流可产生强磁场, 干扰电子设备的正常工作。因此其对信息化设备的设计和磁屏蔽材料的选择都提出了苛刻的要求。

4 防护原理与控制对策

研究表明, 确立静电安全防护原则的最基本依据是形成静电危害的 3 个基本条件: 1) 产生并积累起足够的静电, 形成了“危险静电源”, 以致局部电场强度达到或超过周围介质的击穿场强, 发生静电放电; 2) 危险静电源存在的场所有静电敏感器件及电子装置等静电敏感设备; 3) 危险静电源与静电设备之间能够形成能量耦合并且 ESD 能量等于或大于前者静电敏感度。3 个基本条件同时满足时, 才能形成静电危害, 缺其中任一个条件就不会形成静电危害。所以只要控制这 3 个基本条件中的一个, 就能够防止静电危害的发生。

通过对单片机、GPS 系统、无线电引信等抗静电效应实验和防护加固实验研究, 笔者提出静电防护的对策如下。

1) 控制静电起电率防止危险静电源的形成 危险静电源的形成是由于物体的静电起电率(单位时间物体上电荷的增加量)大于物体的电荷消散速率(单位时间物体上泄漏电荷和通过空气中中和的电荷总量), 使物体电荷总量不断积累形成了静电带电体。静电起电率与电荷消散速率相比越大, 带电体上积累的电荷越多, 对地电位越高, 这种静电源就越危险。所以, 有效的控制静电起电率, 是防止静电危害的基本对策之一。

减小静电起电率的主要办法是: 减少物体间摩擦; 控制物体之间的接触、分离速度和次数, 同时使运动物体的速度缓慢变化; 缩小接触分离物体间的接触面积, 减小接触压力; 不急剥离处于紧密接触状态的物质; 物体表面应保持清洁、光滑的状态; 合理搭配使用“摩擦带电序列”中位置靠近的材料。

2) 增大电荷消散速率防止电荷积聚 增大电荷消散速率, 可以减少静电电荷的积聚, 当消散速率大于起电速率时, 就不会形成危险静电源。

增大电荷消散速率的主要办法是: 提高环境的相对湿度, 当相对湿度增加到 50% 时, 一般物体的静电带电量明显减少, 当相对湿度在 65% 以上时, 几乎所有物体的表面电阻率都减小, 提高了物体的电荷泄漏速率; 静电导体或静电亚导体合理地静电接地和搭接, 使物体保持有电荷泄漏的良好通道, 严禁静电危险场所存在绝缘导体; 使用导电材料或防静电材料代替静电非导体, 或使用抗静电剂, 使物体表面电阻率减小。

电荷能够通过接地装置很快泄漏; 使用离子风等静电消除器, 中和带电体上的电荷, 以提高电荷的消散速率, 使危险静电源不能形成。

3) 采用抗静电元器件降低电子设备的静电敏感度 在有些情况下, 防护对策 1)、2) 无法完全实现, 应该考虑使用抗静电元器件, 以降低电子设备的静电敏感度, 防止静电造成危害。

4) 采用抗 ESD 设计和防护加固技术提高电路抗电磁干扰能力 在电路研制中, 采用抗 ESD 设计并综合运用接地、搭接、屏蔽、滤波等静电防护加固技术, 使电路和整机具备抗静电放电的电磁脉冲作用, 消除静电放电对电子设备的危害。

5) 加强静电安全管理 只有加强静电安全管理工作, 才能使各项防护原则和有关规范、标准贯彻实施, 使防护器材和设施得到维护保养, 确保静电危害彻底消除。

参考文献:

- [1] 盛松林, 田明宏, 刘尚合. 改进型偶极子模型的静电放电相关电场计算[J]. 高电压技术, 2002, 28(10): 8-9.
- [2] 盛松林. 静电放电电磁场时空分布理论模型及测试技术研究[D]. 石家庄: 军械工程学院, 2003.
- [3] WILSON P F, MA M T. Fields radiated by electrostatic discharges[J]. IEEE Trans on Electromagnetic Compatibility, 1991, 33(1): 10-18.
- [4] ISHIGAMI S, GOKITA R, NISHIYAMA Y, et al. Measurements of fast transient electric fields in the vicinity of short gap discharges[J]. IEICE Trans Commun, 1995, E78-, B(2): 199-206.
- [5] ISHIGAMI S, IWASAKI T. Two-source model of transient electromagnetic fields generated by electrostatic discharge[M]. Tokyo: International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1999. 130-133.
- [6] MASUGI M, MURAKAWA K, KRABARA N, et al. Measurement and analysis of electromagnetic pulses caused by electrostatic discharge[R]. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Anaheim, CA, USA, 1992.
- [7] POMMERENKE D. ESD: transient fields, arc simulation and rise time limit[J]. Journal of Electrostatic, 1995, 36: 31-54.
- [8] TABATA Y, TOMITA H. Malfunction of high impedance circuits caused by electrostatic discharges[J]. Journal of Electrostatic, 1990, 24: 155-166.
- [9] LAURIN J, ZAKY G, KEITY G B. On the prediction of digital circuit susceptibility to radiated EMI[J]. IEEE Trans On EMC, 1995, 37(4): 528-535.

向本期载文的有关审稿专家致谢

本期《河北科技大学学报》共发表论文 22 篇。这些论文的发表, 是与有关专家的认真审读、细查资料、推敲分析、中肯评价分不开的。他(她)们的评价(有的给予了充分肯定, 有的给出了修改意见, 有的指出了问题的存在, 有的阐述了否定的原因)使作者和编者都受益匪浅。对此, 本部特向这些专家表示敬意, 对他们的辛勤劳动表示感谢。

本期载文的审稿专家名单如下(按姓名的汉语拼音顺序排序):

崔建升 敦惠娟 冯乃谦 郭斌 郭子成 韩璞 郝彦忠
 何汉新 李景印 李修伦 李志全 林成新 凌智勇 卢义和
 毛磊 潘雪增 彭必先 沈雪勤 宋国新 王敏 王士本
 王幸之 武兰河 徐桂芝 薛增涛 杨久义 张锦 赵地顺
 赵海 赵江

本刊编辑部