

# ESD 辐射场测试研究

朱长青, 刘尚合, 魏 明

(军械工程学院静电与电磁防护研究所, 河北石家庄 050003)

**摘 要:** 测试一直是静电与电磁防护研究的瓶颈. 针对 ESD 辐射场测试问题, 提出了能量有效带宽和动态范围有效带宽的概念, 并根据 IEC61000-4-2 标准规定的 ESD 电流波形, 采用数值方法估算了 ESD 辐射场的带宽以及上升时间对带宽的影响. 在此基础上成功研制了带宽为 3.5Hz~1GHz ( $\pm 1.5$ dB), 动态范围 60dB, 测试灵敏度可调的 ESD 辐射场测试系统, 并实际测试了 IEC61000-4-2 标准规定的水平和垂直耦合电场.

**关键词:** ESD; 辐射场; 测试

**中图分类号:** O441; TM930 **文献标识码:** A **文章编号:** 0372-2112 (2005) 09-1702-04

## A Study on Test & Measurement of the Radiated Field by ESD

ZHU Chang-qing, LIU Shang-he, WEI Ming

(Institute of Electrostatic & Electromagnetic Protection, Ordnance Engineering College, Shijiazhuang, Hebei 050003, China)

**Abstract:** Test and measurement has been a bottleneck in researching electrostatic and electromagnetic protection. Aiming at test and measurement of the radiated field by ESD, it is proposed to express the bandwidth of ESD radiated field by effective bandwidths according to energy and dynamic range, and the effective bandwidths of the radiated field by ESD and the effect on bandwidths from rising time have been estimated numerically according to the ESD current waveform stipulated in the IEC61000-4-2. In terms of these analyses, a test & measurement system of the radiated field by ESD has been developed successfully. Its measurement bandwidth is 3.5Hz~1GHz (within  $\pm 1.5$ db), the measurable dynamic range is more than 60dB, and the sensitivity is adjustable. And more, the horizontal and vertical coupling E field stipulated in the IEC61000-4-2 were measured by the test & measurement system.

**Key words:** ESD; Radiated Field; test & measurement

### 1 引言

IEC61000-4-2 标准关于电子设备静电放电 (ESD) 抗扰度测试方法中, 规定了水平板和垂直板的场耦合方式, 却没有给出场参数, 对 ESD 模拟器也仅规定了放电电流的典型波形和 4 个关键点参数. 实验发现, ESD 抗扰度测试结果重复性很差. 原因是上述不确定因素易造成 ESD 辐射场的变化. 因此, 解决这一问题的关键是实现 ESD 辐射场的准确测量. 人们虽对此做过大量工作, 但目前已有的测试设备, 尤其是测量带宽, 还不能满足 ESD 辐射场的测试要求. 基于测试工作的实际需要, 我们研制了带宽为 3.5Hz~1GHz, 动态范围 60dB, 测试灵敏度可调的 ESD 辐射场测试系统, 基本满足了 ESD 辐射场的测试要求, 并按 IEC61000-4-2 标准规定的 ESD 抗扰度检测方法, 对 ESD 辐射场进行了实际测试.

### 2 研究现状及存在的问题

许多文献<sup>[1,2]</sup>对 ESD 辐射场进行过理论分析与计算, 表明 ESD 辐射场时域上表现为一具有极快上升沿、幅度变化剧烈的脉冲, 频域上则有很宽的频谱. 因此, 测试技术的关键主要是解决测试系统的带宽和动态范围问题. 目前应用于脉冲电场测试的方法主要有 3 种.

(1) 天线直接感应法, 它采用宽带天线, 直接获取脉冲电场信号, 通过高频电缆将天线接收信号送入示波器进行显示. 文献 [3] 比较全面地介绍了该方法所用测试天线的性能, 其中电小极

子天线高阻输出时具有平坦的宽带电场测量特性, 比较适合脉冲电场测试使用. 存在的主要问题是高频电缆用于信号的传输, 会干扰被测电场的分布, 传输距离和传输带宽十分有限.

(2) 有源电光调制法<sup>[4,5]</sup>, 它首先将天线接收信号对激光进行调制, 形成调制激光波, 经光纤传输后, 解调光信号而实现电场信号的测试. 该方法用光纤连接器代替电缆, 解决了信号长距传输问题, 但新增加的电光调制器是有源部件, 宽带设计有一定困难. 另外, 天线要求与高输入阻抗电路配合, 但高输入阻抗在宽带应用时会带来大的热噪声, 限制了测试系统的动态范围. 现有类似测试设备的带宽一般在 10kHz~100MHz 量级, 不能满足 ESD 辐射场的测试要求.

(3) 无源电光调制器法<sup>[6-9]</sup>, 它利用晶体的电光效应实现无源电光调制, 因此电光调制探头不会干扰被测电场. 从实用的角度看, 由于已知晶体的电光系数都不大, 进行有效电光调制需要的电场强度非常高, 为此, 虽利用集成光波导、加装偶极子天线等技术来提高调制深度, 但效果并不理想. 关键是激光在晶体中的渡越时间、加装天线的长度限制了测试系统的带宽, 而晶体的线性调制范围小、电光系数不够大等又制约了测试灵敏度的提高.

### 3 ESD 辐射场带宽估计

要研制 ESD 辐射场测试系统首先需要估计被测信号的带宽. 文献 [10] 提到 ESD 电流脉冲的上升时间可小至 100ps,

并以其倒数判定 ESD 辐射场具有 10GHz 的带宽. 文献 [11] 提到用单极子天线在 5GHz, 甚至在 30GHz 仍能测到 ESD 辐射场信号. 事实上这种带宽概念不足以作为研制测试系统的依据.

### 3.1 能量有效带宽与动态范围有效带宽

ESD 危害往往具有能量特性, 而传统的 3dB 带宽、用上升时间或脉冲宽度的倒数作为 ESD 辐射场的带宽都不能确切表述其能量特性. 以人体模型 ESD 电压脉冲  $u(t) = Ue^{-\alpha t}$  为例, 其 3dB 带宽范围内, 信号所具有的能量只占放电总能量的 50%. 脉宽倒数对应带宽范围内信号的能量也仅占总能量的 93%. 另外, 由于该脉冲的上升时间为零, 以其倒数定义信号的带宽不切实际.

另外, 任何测试系统都有一定的测量范围, 输入信号的动态范围是受限的. 因此, 考虑到能量与带宽的关系及测量的有效性, 定义信号的能量有效带宽为: 在该带宽范围内, 集中信号能量的绝大部分, 可视情设定为 99% 或其他值; 定义信号的动态范围有效带宽为: 信号的频谱幅值变化不超过确定的可测范围, 如 60dB, 以保证测量的有效性.

### 3.2 ESD 辐射场的带宽

ESD 属近场危害源, IEC61000-4-2 标准确定的测试区域更是如此. 根据多种文献<sup>[1, 2, 11, 12]</sup>对 ESD 辐射场的分析, ESD 近区辐射场主要与 ESD 电流及其积分有关, 而 ESD 电流积分项反映的是静电场. 因此, ESD 辐射近区场的信号带宽与 ESD 放电电流的带宽基本一致. 下面依据 IEC61000-4-2 标准规定的 ESD 电流波形对 ESD 辐射场的带宽进行理论估计.

IEC61000-4-2 标准规定的 ESD 电流波形, 只给出了上升时间、最大值及 30ns 和 60ns 时的幅度, 没有相应的解析表达式. 有许多文献<sup>[1, 13]</sup>试图给出它的解析

表达式, 但与实际情况均有不同程度的差异. 考虑到 ESD 模拟器的实际结构, 我们采用图 1 所示的等效电路来数值拟合标准规定的 ESD 电流, 收到理想效果. 当取  $C_1 = 140\text{pF}$ ,  $R_1 = 171\Omega$ ,  $L_1 = 1.8\mu\text{H}$ ,  $C_2 = 10\text{pF}$ , 将  $R_2$  和  $r$  一起考虑取  $R = 170\Omega$ ,  $L_2 = 0.154\mu\text{H}$ ,  $U_0 = 4\text{kV}$  时, 经数值计算, 得到图 2(a) 中实线所示静电放电电流波形, 它的上升时间是 0.830ns, 最大电流值 14.987A, 30ns 和 60ns 对应的电流值分别为 8.004A 和 3.994A, 最大误差小于 IEC61000-4-2 标准规定参数的 1.5%.

通过 FFT 计算, 得到图 2(b) 实线所示用动态范围表示的幅频特性, 对放电电流的平方进行积分得到图 2(c) 实线所示的能量分布图.

为确定上升时间对带宽的影响程度, 拟合了具有更快上升沿的 ESD 电流波形 (其他波形参数不变), 如图 2(a) 中虚线所示, 对应的频谱和能量分布分别如图 2(b) 和图 2(c) 中的虚

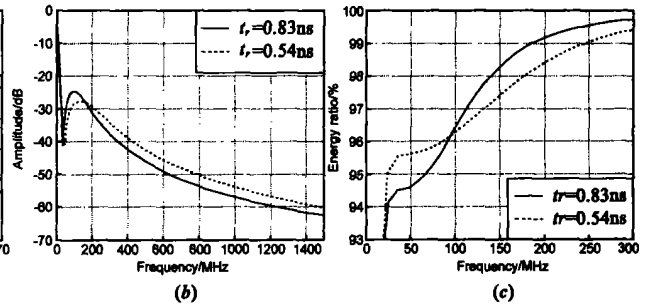
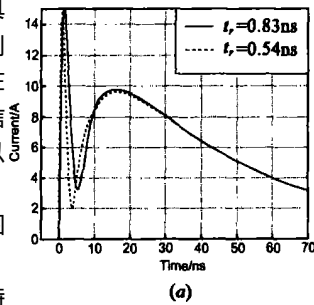


图 2 IEC61000-4-2 标准静电放电电流的波形、频谱、能量分布及其上升时间的影响

线所示. 从图 2 可知, 上升时间由 0.83ns 变为 0.54ns 时, 信号的 99.5% 能量有效带宽仍不超过 300MHz, 60dB 动态范围有效带宽由 1250MHz 扩展为 1460MHz, 可以看出, 上升时间的明显变化 (35%), 对信号带宽的影响并不同样明显 (17%).

用有限带宽的测量系统测试脉冲信号时, 造成的误差主要是使脉冲的上升时间展宽, 引入附加的上升时间, 经验公式是  $t_a = 0.35/BW$ , 它导致测量所得脉冲的上升时间变为  $t_m = \sqrt{t_a^2 + t_r^2}$  ( $t_r$  是脉冲真实上升时间). 根据前面的讨论, 由于上升时间对带宽的影响并不明显, 尤其当测量上升时间不超过脉冲真实上升时间的 10% 时, 可以认为, 测量系统是无失真传输的, 据此推导出测量系统的带宽:

$$BW_m = \frac{0.35}{t_r \times \sqrt{0.21}} \approx \frac{0.76}{t_r} \quad (1)$$

考虑到 IEC 标准中规定 ESD 上升时间的中心值为 0.83ns, 由式 (1) 知, 所需测量带宽为 916MHz, 相应的动态范围是 55dB, 在此带宽范围内, 几乎包含了全部信号能量. 据此, 估计测试 ESD 辐射场所需带宽为 1GHz, 动态范围要大于 55dB.

## 4 测试系统

测试系统在基本层面上采用了有源电光调制法, 根据所提出的天线高阻耦合、直接电光调制和天线电容分压原理, 并采用电路极小化设计技术等多项手段, 着重解决了天线接收信号的宽带电光调制、降低噪声及宽带传输等问题. 系统主要由测试天线、电光调制探头、光电接收机和示波器 4 部分构成, 图 3 是其实物照片.

### 4.1 电光调制

对天线接收信号的电光调制由特选场效应管完成, 借助场效应管的高输入电阻和大电流驱动能力, 实现了天线高阻耦合和激光信号的直接电光调制. 整个电光调制器置于 2.5mm 厚的镀铜薄圆柱形钢壳内, 一方面达到了电磁屏蔽效果, 另一方面壳体的圆形平面也作为单极子测试天线的反射面, 使其等效为电偶极子, 同时省略了天线与电光调制器的连接线, 避免了耦合或反射干扰. 整个探头的外壳是可接地屏蔽体, 体积为  $\Phi 65 \times 20\text{mm}^3$ .

根据分析<sup>[3]</sup>, 偶极子天线满足  $\beta l \ll 1$  时, (这里,  $\beta = 2\pi/\lambda$ )

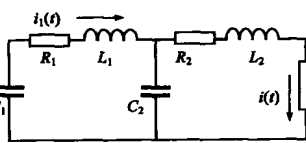


图 1 ESD 模拟器等效电路



图 3 宽带 ESD 辐射场测试系统

$\lambda$  称为波数,  $\lambda$  是接收信号的波长,  $h$  是天线的长度) 可等效为一个与频率无关的电容  $C_a$ . 这样, 图 4 可作为测试系统的等效输入电路. 图中,  $U_a$  是天线感应的电压,  $R_i$  和  $C_i$  分别是测试系统的输入电阻和输入电容,

由图 4 可知, 测试系统输入级的下限频率  $f_L = 1/2\pi R_i(C_a + C_i)$ , 由于场效应管的输入电阻大于  $10^9\Omega$ ,  $C_a + C_i$  取 150pF 时, 下限频率  $f_L = 1.06\text{MHz}$ , 而上限频率由  $\beta h \ll 1$  限定.

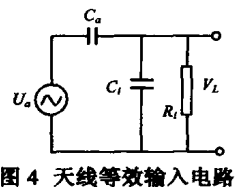


图 4 天线等效输入电路

由于天线等效电容和输入电容构成电容分压电路, 通过改变输入电容的大小, 即可改变测试系统的灵敏度, 并且电容值越大, 系统的低频特性越好. 天线-电容分压原理不仅解决了强信号测试时的宽带衰减问题, 同时, 极大地降低了热噪声的带宽(测试系统的下限频率变为热噪声的上限频率), 提高了测试系统的动态范围.

4.2 光电接收

光电接收机实质上是一个带有放大功能的光电转换探头, 目前世界上主要示波器生产厂商虽提供与之示波器配套的光电转换探头, 但在输入光功率匹配、灵敏度或带宽方面并不适合 ESD 辐射场测试的要求. 为此设计了由高线性度 InGaAs 平面结构 PIN 探测器、高增益宽带放大电路和光功率检测等组成的光电接收机.

为提高宽带放大器的增益, 光电接收机采用了  $300\Omega$  的输出电阻, 为了保证测试系统 1GHz 的带宽, 要求配套示波器具有大于 1.5GHz 的模拟带宽, 并且最好具有  $1M\Omega$  的输入阻抗, 采用  $50\Omega$  输入时, 受光电接收机输出耦合电容的影响, 测试系统的下限频率会有所提高.

4.3 基本性能测试

由于目前国内尚没有合适场强的计量设备, 我们减小了宽带 ESD 辐射场测试系统的输入分压电容(测试下限频率会提高)以配合计量设备. 经国防计量站点频计量测试表明: 测试系统在 150Hz~1GHz 的频率范围内具有平坦的频率特性 ( $\pm 1.5\text{dB}$ ). 为了检测点频测试是否漏掉了关键频点, 采用 AV3618 网络分析仪(50MHz~2GHz)和 BT3 频率特性测试仪(0~450MHz)对除天线外的整个系统进行了 0~2GHz 的扫频测试, 结果是带内平坦度小于  $\pm 1.5\text{dB}$ . 图 5 是 AV3618 网络分析仪的扫频结果. 考虑到 BT3 低端的不确定性, 经点频测试, 测试系统的下限频率可低至 3.5Hz.

示波器显示测试系统的最大不失真输出峰-峰值为 2.62V (从天线注入三角波测试), 基底噪声小于 2.5mV. 由此可计算出测试系统的动态范围大于 60dB. 图 6 是测试系统对方波源在 GTEM 室内形成的方波电场进行

测试得到的测试图. 上图显示测试系统的基底噪声远小于 1mV, 下图是脉冲上升沿的展开图, 表明脉冲的上升时间为 1.35ns(厂家给出源脉冲的上升沿是 1.3ns), 可见, 测试系统具有良好的测试带宽和足够的动态范围.

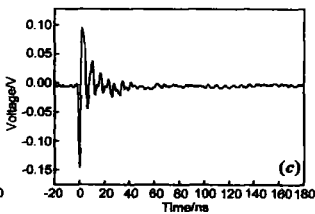
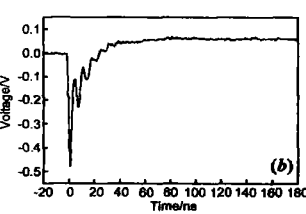
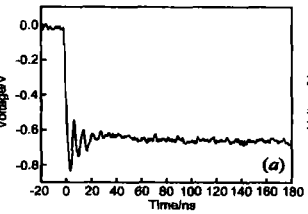


图 7 位于垂直耦合板正前方 20cm, 50cm, 1m 处的电场波形

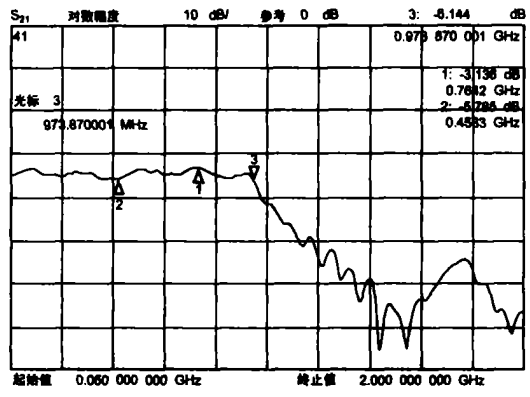


图 5 除天线外测试系统的频率特性

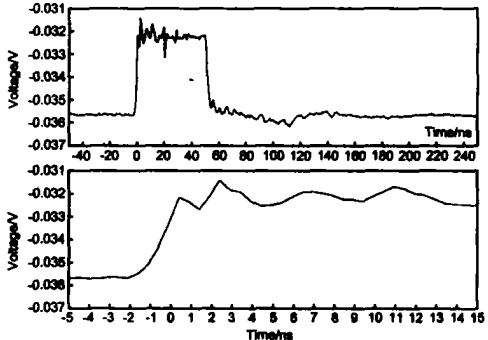


图 6 GTEM 室内测得的方波电场波形

5 ESD 辐射场测试

使用所研制的 ESD 辐射场测试系统, 在不同放电状态下, 对 IEC61000 4 2 标准规定的水平和垂直耦合板附近的电场进行了实际测试. 实验用的 ESD 模拟器是日本 Noiseken 公司的 ESS-200AX. 在 2kV 接触放电状态下, 距垂直耦合板前方 20cm, 50cm, 1m 处测得其电场波形分别如图 7(a)、图 7(b) 和图 7(c) 所示. 在距水平耦合板上方 20cm, 50cm, 1m 处测得其电场波形如图 8(a)~(c) 所示.

图 7、图 8 表明距耦合板较近时, 静电电场分量十分明显, 随着距离的增加, 静电场迅速衰减. 高频分量逐渐显现出来. 对于面积只有  $50 \times 50\text{cm}^2$  的垂直耦合板, 距其 1m 处几乎已测不出静电场分量, 而对面积有  $80 \times 160\text{cm}^2$  的水平耦合板来讲, 距其 1m 处仍有较强的静电场分量. 可以推定, 在耦合板附近, ESD 主要通过电容耦合方式作用于被测电子设备. 在远区, ESD 主要通过高频辐射干扰被测电子设备. 上述结果与理论研究相一致. 另外, 从图 7、图 8 显示的丰富频率分量可以看出测试系统具有良好的宽带性能.

## 6 结论

从能量分布和测试有效性出发,提出了能量有效带宽和动态范围有效带宽的概念。按 IEC61000 4 2 标准估算的 ESD 辐射场在 55dB 动态范围内的信号带宽约为 1GHz。据此研制了 ESD 辐射场测试系统,计量测试表明其测量带宽为 3.5Hz~1GHz( $\pm 1.5$ dB),动态范围 60dB,测试灵敏度可调。应用该系统实际测试了 IEC61000 4 2 标准规定的水平和垂直耦合板附近的电场,收到良好效果。

### 参考文献:

- [1] K Wang, D Pommerenke, R Chundree, et al. Numerical modeling of electrostatic discharge generators [J]. IEEE Trans, On EMC, 2003, (5): 258- 271.
- [2] P F Wilson, M T Ma. Field radiated by electrostatic discharges [J]. IEEE Trans On EMC, 1991, (2): 10- 18.
- [3] M Kanda. Standard probes for electromagnetic field measurements [J]. IEEE Trans On AP, 1993, (10): 1349- 1364.
- [4] S Frei, D Pommerenke. Fields on the horizontal coupling plane excited by direct ESD and discharges to the vertical coupling plane [J]. Journal of Electrostatics, 1998, (44): 177- 190.
- [5] 谢彦召, 焦杰, 郑振兴, 等. 宽频带电光式脉冲电场测量系统的研制及应用 [J]. 核电子学与探测技术, 2000, 20(1): 43- 46. Xie Y Z, Jiao J, Zheng Z X, et al. Development and application of wide band electro optic measurement system for pulsed E field [J]. Nuclear Electronics & Detection Technology, 2000, 20(1): 43- 46.
- [6] 谢彦召, 焦杰, 郑振兴. 瞬态电磁场测试的无源电光式传感器 [J]. 强激光与粒子束, 1999, 11(3): 363- 366. Xie Y Z, Jiao X, Zheng Z X. The passive electro optical sensor of testing transient electromagnetic field. High Power Laser and Particle Beams, 1999, 11(3): 363- 366.
- [7] Masamitsu N. Kuwabara. Recent progress in fiber optic antennas for EMC measurement [J]. IEICE Trans, 1992, (3): 107- 113.
- [8] N Kuwabara, K Jajima, R Kobayashi, et al. Development and analysis of electric field sensor using LiNbO3 optical modulator [J]. IEEE Trans On EMC, 1992, (4): 391- 396.
- [9] K Tajima, N Kuwabara, F Amemiya. Highly sensitive electric field sensor using LiNbO3 optical modulator [J]. IEICE Trans, 1991, (7): 1941- 1943.
- [10] Shinobu I, Ryoichi G, Yoshifumi N, et al. Measurements of fast transient fields in the vicinity of short gap discharges [J]. IEICE Trans, 1995, (2): 199- 205.
- [11] D Pommerenke. ESD: transient fields, are simulation and rise time limit [J]. Journal of Electrostatics, 1998, 44: 191- 203.
- [12] Y Tabata, H Tomita. Malfunctions of high impedance circuits caused by electrostatic discharges [J]. Journal of Electrostatic. 1990, 24: 155- 156.
- [13] 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.

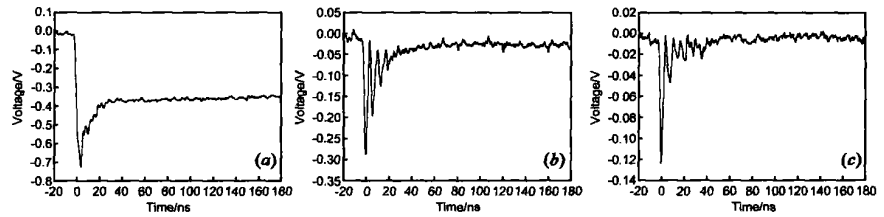


图 8 位于水平耦合板侧上方 20cm, 50cm, 1m 处的电场波形

Sheng S L. A research on time space distributed theoretical model of electromagnetic field by ESD and test technology [D]. Shijiazhuang: Ordnance Engineering College, 2003.

- [14] Zhu Changqing, Liu Shanghe. A study on the radiated field by ESD [A]. Proceedings of A sia Pacific Conference on Environmental Electromagnetics [C]. Hangzhou, China, 2003. 209- 212.
- [15] F Kmg, P Russer. The time domain electromagnetic interference measurement system [J]. IEEE Trans On EMC, 2003, (3): 330- 338.
- [16] IEC61000 4 2, Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4: Testing and Measurement Techniques Section 2: Electrostatic Discharge Immunity Test [S]. 2001.

### 作者简介:



朱长青 男, 1963 年生于山东广饶, 军械工程学院, 博士, 教授, 研究方向为计量测试、静电与电磁防护理论与技术, 1983 年获空军工程大学工学学士学位, 1987 年获中北大学工学硕士学位, 2005 年 3 月获军械工程学院博士学位, 科研成果主要有叠层钢板计数装置、电子评审系统等, 学术兴趣是电路设计和电子测试仪器的研发。在国内外学术期刊和学术会议上发表学术论文 60 余篇。

E mail: zhuneil@163.com.



刘尚合 男, 1937 年生于山西闻喜, 军械工程学院静电与电磁防护研究所, 教授, 博导, 中国工程院院士。研究方向是兵器防电磁危害理论与技术, 1964 年毕业于北京师范大学物理系, 是国家重点学科“武器系统与运用工程”的学术带头人, 在国内率先开展了静电安全工程理论与技术研究, 主持完成国家自然科学基金重点项目和部队重点科研项目多项, 国家自然科学基金委员会信息科学部专家评审组组长, 先后获国家科技进步一等奖、全国科学大会奖和省部级科技进步一、二等奖 7 项, 军队教学成果一等奖 2 项, 国家发明专利 4 项。在国内外学术期刊和学术会议上发表学术论文 150 余篇。



魏明 男, 1968 年生于河北石家庄市, 博士, 军械工程学院静电与电磁防护研究所, 副教授, 主要研究方向为电磁兼容、雷电电磁脉冲理论、静电防护技术等, 1990 年毕业于第四军医大学生物医学工程系, 1997 年获硕士学位, 2000 年获工学博士学位。