

ESD 防护器件 HMM 和 TLP 测试方法及性能评价

徐晓英¹, 甘瑛洁¹, 浦 实¹, 徐 朕¹, 冯婉琳¹, 黄 为²

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

摘 要: 人体-金属模型波形 (HMM) 和传输线脉冲 (TLP) 波形是静电放电防护器件测试时常用的注入波形。针对静电放电 (ESD) 防护器件, 介绍了这 2 种波形的测试方法。通过对同一型号瞬态电压抑制器进行测量, 获取器件的瞬态波形、钳位电压、损伤阈值、瞬态阻抗等特性参数, 并对结果进行分析比较。测试结果表明, 基于 IEC 标准的 HMM 测试所能得到的有效信息最少; 基于 TLP 的 HMM 测试可直观得到被测器件的静电放电瞬态响应; TLP 矩形波测试结果的稳定性好, 测量参数的可重复性高。

关键词: ESD 防护器件; 瞬态电压抑制器; 人体金属模型; 传输线脉冲测试; IEC61000-4-2

ESD Protection Device HMM and TLP Test Methods and Performance Evaluation

XU Xiaoying¹, GAN Yingjie¹, PU Shi¹, XU Zhen¹, FENG Wanlin¹, HUANG Wei²

(1. School of Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

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

Abstract: Human-metal model (HMM) and transmission line pulse (TLP) current waveforms are widely used for electrostatic discharge (ESD) protection devices testing. This paper introduced the ESD protection diodes test methods based on these two kinds of waveforms. In the paper, a type of transient voltage suppressor was tested. Transient waveforms, clamping voltage, threshold and transient resistance were obtained. According to the results, IEC 61000-4-2 based HMM test obtains the minimum effective information; TLP-based HMM test can intuitively provide the DUT transient response during ESD; While TLP test result is more repeatable with good repeatability of measured parameters.

Key words: ESD protection device; transient voltage suppressor; human-metal model; transmission line pulse; IEC61000-4-2

0 引言

随着电子产品大规模和超大规模集成电路的发展, 以及产品体积空间的缩小, 电子设备的静电防护技术面临着越来越大的挑战。在电子线路防静电设计时选择合适的静电放电防护器件, 可以有效提高电子系统和产品的静电放电 (ESD) 抗扰度^[1-5]。对 ESD 防护器件性能进行检测和评价是选择器件的重要方法。

目前, 对 ESD 防护器件性能的测试方法中, 应用较多的有人体金属模型 (HMM) 测试、传输线脉冲 (TLP) 测试、人体模型 (HBM) 测试、直流 (DC) 测试等。上述测试方法中, 直流测试的结果反映了器件的直流特性, 而实际的静电放电是高电压、大电流的瞬态脉冲, 直流测试难以反映 ESD 防

护器件的 ESD 防护特性。ANSI-STM5.1^[6]等标准规定了 HBM 波形的元件级 ESD 敏感度测试方法, 但由于规定中 HBM 测试波形的上升沿时间在 2~10 ns 之间, 以 HBM 波形测试器件的 ESD 性能, 并不能很好地表征快上升沿 (<1 ns) ESD 事件中器件的抗扰度。此外, 不同的测试仪所产生的 HBM 波形相差较大, HBM 测试方法存在较多问题^[7]。

IEC61000-4-2 标准^[8]所规定的 HMM 波形是静电放电测试的一种标准波形, 通常用于检测电子设备的系统级静电放电抗扰度。由于测试标准提出较早, HMM 波形的接受度高, 目前许多器件生产商进行元件级静电放电抗扰度测试时, 会采用 HMM 波形作为测试源波形。传输线脉冲测试是元件级静电放电抗扰度研究中使用较多的测试方法^[9-13]。自 1985 年英特尔的工程师首次利用传输线测试技术来测量器件的静电放电特性后, 越来越多的工程师和学者开始使用 TLP 技术来测量 ESD 保护器件和

三极管等半导体器件的 ESD 特性^[14-17]。

对同一器件, 不同测试方法得到的结论可能不同。在静电放电保护器件的测试中, 如何根据实际情况和测试需求恰当地选择测试方法, 如何有效评价保护器件的性能, 如何根据测试结果选择合适的 ESD 保护器件, 依旧是研究人员需要探讨的问题。

本文对 2 种常用的测试波形: HMM 波形和 TLP 波形所对应的 ESD 防护器件的检测方法进行了说明。通过对同一型号瞬态电压抑制器进行测试, 对比 2 种检测波形的测试结果, 分析了不同方法在评估 ESD 防护器件性能方面各自的优缺点。

1 测试方法及设置

HMM 波形的测试方法有 2 种: 基于 IEC61000-4-2 的 HMM 测试和基于 50 Ω 的 HMM 测试^[12]。这 2 种测试所采用的波形模块电路结构不同, 相同点在于当被测器件 (DUT) 为 2 Ω 电阻时, 电流探头所测的 DUT 端的电流波形都符合 IEC61000-4-2 标准中规定的 HMM 波形参数。

基于 50 Ω 的 HMM 测试和 TLP 测试的测试方法相同, 而波形发生模块不同。基于 50 Ω 的 HMM 波形发生模块为电容和电阻等元件组成的电路模块, TLP 的波形发生模块的基本单元为传输线。

1.1 基于 IEC61000-4-2 的 HMM 测试方法

IEC61000-4-2 标准中规定了静电放电模拟器在接触式放电时的 HMM 电流波形参数。在基于 IEC61000-4-2 的 HMM 测试中, 测试人员首先设定静电发生器的放电电压, 然后采用手持发生器放电的方式, 使放电尖端接触被测器件管脚, 在同一电压下对被测器件连续注入多次放电脉冲 (例如, 100 次)。放电过程结束后, 通过检测器件的电特性来确定器件是否在放电过程中受到损伤^[17]。

1.2 基于 50 Ω 的 HMM 和 TLP 测试方法

本文进行基于 50 Ω 的 HMM 测试和 TLP 测试时, 脉冲波形发生器使用 ESD EMC 公司生产的 ES620-50 脉冲发生器, 发生器载有 HMM 波形模块和 TLP 波形模块。

使用这 2 种测试方法对元件级的 ESD 测试结构如图 1 所示。通过控制波形发生模块的充放电过程, 脉冲发生器产生并向 DUT 注入脉冲波形, 测试系统中所有连接电缆的特性阻抗均为 50 Ω 。DUT 端口电压和流经 DUT 的电流通过电压和电流探头连接示波器进行测量。

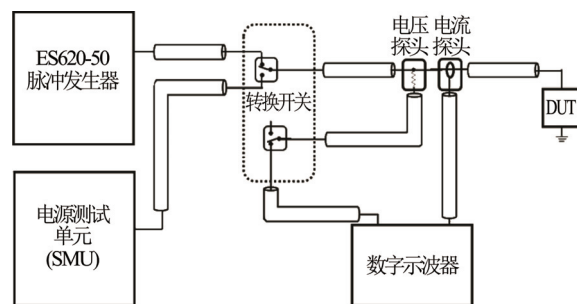


图 1 基于 50 Ω 的 HMM 测试、TLP 测试装置图

Fig.1 50 Ω -based HMM and TLP test set-up

每一个脉冲注入后, 通过转换开关的控制, 使 DUT 连接到电源测量单元 (SMU)。SMU 向 DUT 加载直流偏置电压, 检测 DUT 上的直流漏电流, 通过漏电流的变化来判断脉冲注入是否引起了 DUT 的损伤或损坏。

1.3 基于 50 Ω 的 HMM 和 TLP 测试设置

基于 50 Ω 的 HMM 测试中, 逐步增大 HMM 波形发生模块的充电电压。模块的充电电压范围为 50~1 225 V, 电压测量步长为 25 V。每次 HMM 波形注入后, SMU 对器件加载 ± 1 V 的直流偏置电压, 测量对应的直流漏电流。

TLP 测试中, TLP 波形发生模块的充电电压范围为 1~1 000 V。1~50 V 范围内电压测量步长为 1 V, 通过较密集的测试点得到准确的器件开启电压。50~1 000 V 范围内电压测量步长为 20 V, 适当增大步长可高效地测量被测器件。每次 TLP 波形注入后, SMU 对器件加载 ± 1 V 的直流偏置电压, 测量对应的直流漏电流。使用的 TLP 脉冲的上升沿时间约为 1 ns。选用脉冲宽度为 50、100、200 ns 的 TLP 脉冲波形对被测器件进行测试, 以得到方波脉冲宽度对测量结果的影响。

测试所用的示波器带宽为 1 GHz, 最大采样频率为 10 GHz。电压探头测量带宽为 1 GHz, 电流探头为 CT2 型号电流探头, 有效测量带宽为 200 MHz。本文测试的 DUT 为某型号 TVS。

2 测试结果

根据上述的测试方法, 对同一型号的 TVS 器件进行了测试, 获取不同测试方法下器件的瞬态响应、伏安特性曲线和损伤阈值。

2.1 基于 IEC61000-4-2 的 HMM 测试结果

根据 HMM 测试后器件的电特性检测结果, 当静电放电模拟器的充电电压设置为 10 kV 时, 测试

后的器件阻抗由 10^{10} 级降低至 10^6 级。因此, 器件在基于 IEC61000-4-2 的 HMM 测量中的损伤阈值电压等级为 10 kV。

该测试方法没有测量器件的瞬态响应波形。

2.2 基于 50 Ω 的 HMM 测试结果

图 2 为 3 个不同等级的充电电压 (500 V, 1 000 V, 1 500 V) 下, TVS 瞬态电流和电压波形。

从图 2 中可以看出, TVS 的瞬态电流波形形状与 IEC61000-4-2 标准所规定的 HMM 电流波形形状类似, 第 2 个峰值后, 电流随脉冲时间的增加而逐步降低, 200 ns 后基本为 0。瞬态电压波形呈现出明显的钳位现象。从电压波形图中可看出, 器件的开启电压为 10 V。当器件两端电压降至 10 V 以下, 器件不再导通, 电压波形在 10 V 处出现明显的下降拐点。

2.3 TLP 测试结果

测试中, TLP 脉冲宽度分别设置为 50、100、200 ns, 其中 100 ns 为工业界常用的 TLP 测试脉冲宽度。图 3 为 100 ns TLP 测试中, TLP 源电压为 500 V 时的 TVS 瞬态波形图。

由于过冲的峰值相对于稳态电压的值很大, 为准确获取伏安曲线, 测量时将脉冲峰值进行了消减处理。电压波形的过冲可能来自于测试系统中电压采样的感抗影响, 也可能来自 TVS 在未触发时自身的高阻过电压。

100 ns 的脉冲后, 电压波形出现振荡, 这是因为脉冲发生系统的阻抗为 50 Ω , 而被测器件导通后阻抗较小, 约为 2 Ω 甚至更低, 导致整个测试系统的阻抗不匹配引起的反射。50 ns 和 200 ns 的瞬态波形与图 3 所示类似。

按照 TLP 测试的常用方法, 取脉冲宽度 70%~90% 时间段内的瞬态波形数据做平均, 每施加一个脉冲, 获得一个坐标点, 绘制伏安曲线, 不同脉冲宽度对应的正极性漏电流为图中的虚线, 结果如图 4 所示。

图 4 中, 3 种脉冲宽度下, 漏电流曲线都发生了偏折, 偏折拐点的位置出现明显差异, 脉冲宽度越长, 拐点对应的电流值越小。这说明被测器件的损伤与所注入的脉冲能量有关, 注入能量越大, 器件出现失效的等级越低。

由伏安曲线可知, 该 TVS 的开启电压为 10 V。对比 3 种脉宽的测试结果可知, 虽然伏安曲线所选择的时间窗口都为脉冲时间的 70%~90%, 但所得的

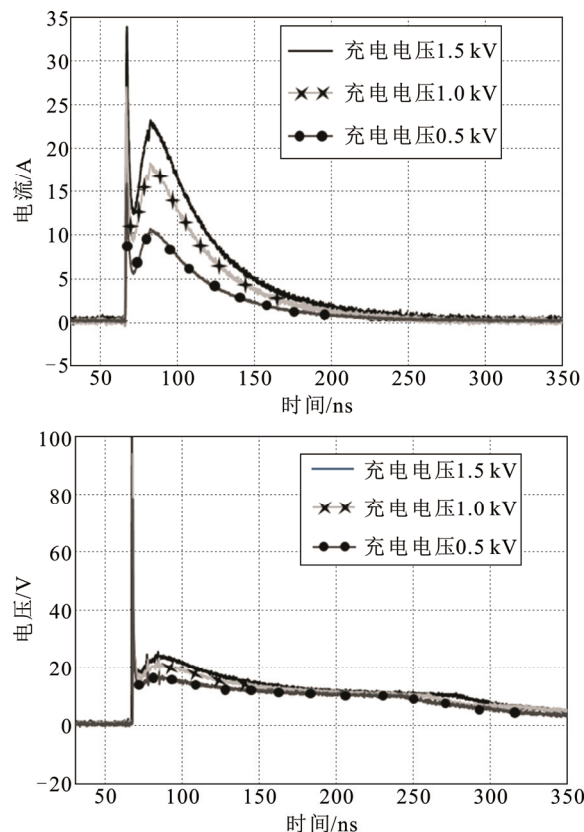


图 2 基于 50 Ω 的 HMM 测试瞬态电流、电压波形

Fig.2 50 Ω -based HMM test current and voltage waveforms

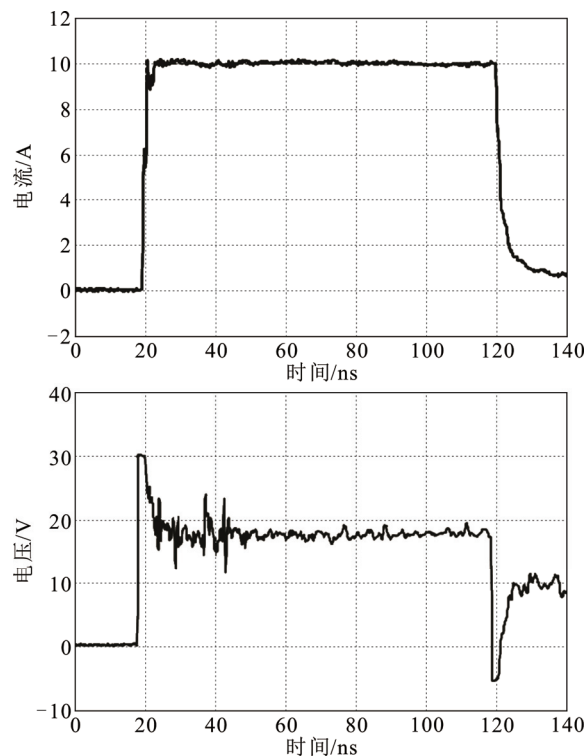


图 3 100 ns TLP 测试瞬态电流、电压波形

Fig.3 100 ns TLP test current and voltage waveforms

伏安曲线出现了差异, 这种差异性随着电压的增大越来越明显。

根据 TLP 的测试结果,还可绘制脉冲电压(U),脉冲时间(T)与受试器件瞬态阻抗(R)间的 VTR 3D 关系图,如图 5 所示。由于其类似瀑布的形状,所以也称之为瀑布图。从图 5 中可清晰的看出器件阻抗随时间和脉冲电压的变化情况。

3 测试比较与讨论

下文从测试方法和测试结果 2 个方面对 3 种测量进行比较。比较的测试结果包括:损伤阈值、瞬态波形、伏安曲线、瞬态阻抗等。

3.1 测试方法

基于 IEC61000-4-2 标准的 HMM 测试方法由于采用手持静电枪的方式对器件注入放电波形,因此测试结果受到静电枪接地电缆的摆放位置、人手持姿势、静电枪与被测器件之间角度位置等测试环境的影响。这些环境因素可能造成测试结果的差异性。IEC61000-4-2 标准对放电电流波形的规定允许存在 30% 的误差,细则并不完善^[18-20],不同放电枪的放电波形存在差异,这是导致测试结果存在差异性的主要原因。由于认为静电放电发生器能够较好地还原真实的静电放电事件,因此,这种测试方法能够获得被测器件在真实静电放电中的损伤电压阈值。

基于 $50\ \Omega$ 的 HMM 测试和 TLP 测试使用的测试系统与测试方法相同,激励源波形不同。相比基于 IEC61000-4-2 标准的 HMM 测试方法而言,该测试系统的测试可重复性高,受测试环境的影响小,可以提供可靠稳定的测试结果。当 DUT 不为 $2\ \Omega$ 电阻时,基于 $50\ \Omega$ 的 HMM 电流波形与基于 IEC 的 HMM 电流波形可能存在较大差异,测试结果也可能不同。文献^[21]对 HMM 波形的 2 种测试方法进行了深入的分析与比较。

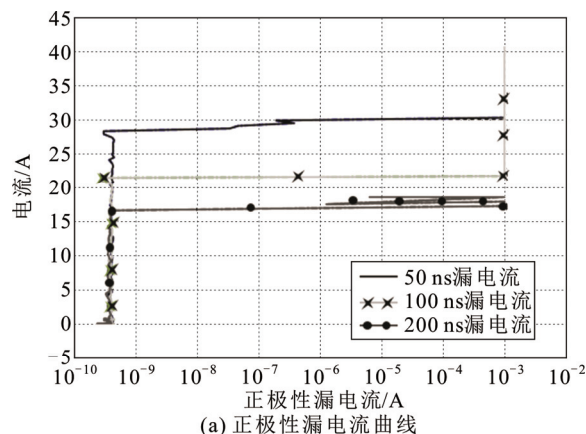
3.2 测试结果

3.2.1 损伤阈值

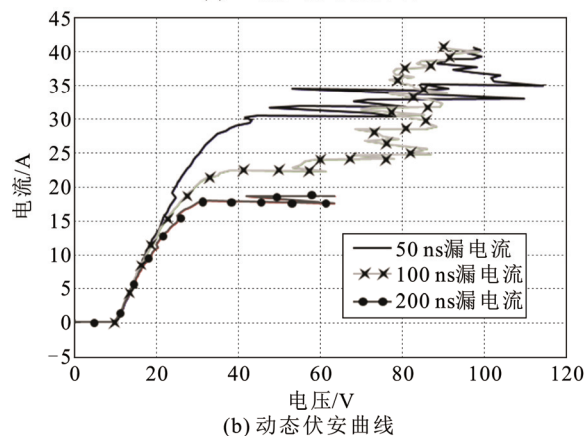
表 1 统计了 3 种测试方法测试同一型号 TVS 器件得到的电压和电流阈值。从表 1 中可以看出,基于 IEC 的 HMM 测试得到的为放电枪的充电电压与器件损伤的关系,而基于 TLP 的 HMM 和 TLP 测试能够得到器件损伤时的端口电压和通过器件的电流,因此后 2 种测试方法能更直接地表征器件本身的 ESD 敏感度特性。

3.2.2 瞬态电流和电压波形

基于 IEC61000-4-2 标准的 HMM 测试没有测量波形。对比图 2 和图 3 可以看出,基于 $50\ \Omega$ 的 HMM



(a) 正极性漏电流曲线



(b) 动态伏安曲线

图 4 3 种脉宽所测得的正极性漏电流曲线和动态伏安曲线

Fig.4 Positive leakage currents and dynamic voltage-current curves under three different pulse widths

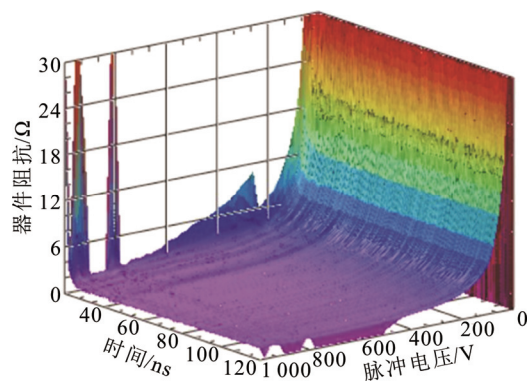


图 5 VTR 3D 瀑布图

Fig.5 VTR 3D waterfall plot

测试和 TLP 测试的瞬态波形有很大的差别。

由于 TLP 测试中的脉冲是理想方波波形,所以瞬态波形的任何变化都来自于被测器件。

从基于 $50\ \Omega$ 的 HMM 测试获得的瞬态电压波形中,可直接读出器件的钳位电压值,还可以得到器件在类似实际 ESD 事件中的瞬态响应波形。比较不同源电压等级下的瞬态电压波形还可以判断器件

的钳位电压与测试源电压的关系。然而,由于 HMM 波形是随时间不断变化的,所以不能判断瞬态波形的变化是源波形的变化,还是由被测器件引起的。

3.2.3 伏安曲线和瞬态阻抗

比较后 2 种测试方法所得的伏安曲线(图 6)可以看出,2 种方法测量的 TVS 开启电压都为 10 V,且当器件的端电压<20 V 时,各测试波形的伏安曲线基本重合。不同之处主要在于高电压段的伏安曲线,这是由于不同的源波形在同样电压时对器件注入的能量是不同的,说明本文所选择测量的 TVS 器件瞬态阻抗与注入功率(能量)有关。

由瞬态电压、电流波形计算被测器件瞬态阻抗-时间的波形图,得到器件的瞬态阻抗特性,可以帮助工程师在设计 ESD 防护电路时选择合适的防护器件。当发生静电放电时,ESD 防护器件为静电电流的主要泄放通路,因此防护器件阻抗需要在短时间内降低到一定值。从图 6 中 2 种脉宽的 TLP 所得的瞬态阻抗波形中可以看出,器件阻抗在 1 ns 内迅速减小至 2 Ω。100 ns TLP 和 200 ns TLP 的波形重合,说明瞬态阻抗不受 TLP 脉冲宽度的影响。基于 50 Ω 的 HMM 测试所得的瞬态阻抗随时间在不断变化,并不稳定,这是由于 HMM 的电压和电流值随时间不断变化造成的。100 ns 之后的阻抗振荡很大,是因为放电电流减小到示波器的噪声等级,测量结果不再准确。

4 结论

1) 基于 IEC 标准 HMM 测试方法为系统级静电放电测试的标准方法,适用于系统级的静电放电检测,可用作体积规格较大的器件检测,不可测试晶圆级或小体积/小管脚的器件检测,测试可重复性较差,测试结果可为器件在系统中使用时的损伤阈值提供参考,只能说明器件本身的 ESD 敏感度,不能评估 ESD 防护器件的防护性能。

2) 基于 50 Ω 的 HMM 测试结果可直接表征器件的瞬态响应,搭载不同测试夹具可测试不同体积的器件和晶圆硅片等。但由于系统阻抗不同,该方法只是 IEC 标准中 HMM 波形的一种近似。

3) TLP 测试方法是目前较先进的器件和晶圆级静电放电测试方法。TLP 测试的结果通过分析可以得到许多器件的有用参量,是测量和表征半导体器件静电放电防护性能的首选方法。

4)ESD 保护器件对 ESD 的防护性能可以通过:

表 1 3 种测试方法所得的器件损伤阈值

Table 1 Device threshold values under three test methods		
测试方法	电压阈值/V	电流阈值/A
HMM (基于 IEC 标准)	10 000	
HMM (基于 50 Ω)	25	19
TLP	50 ns 脉宽	28
	100 ns 脉宽	21
	200 ns 脉宽	16

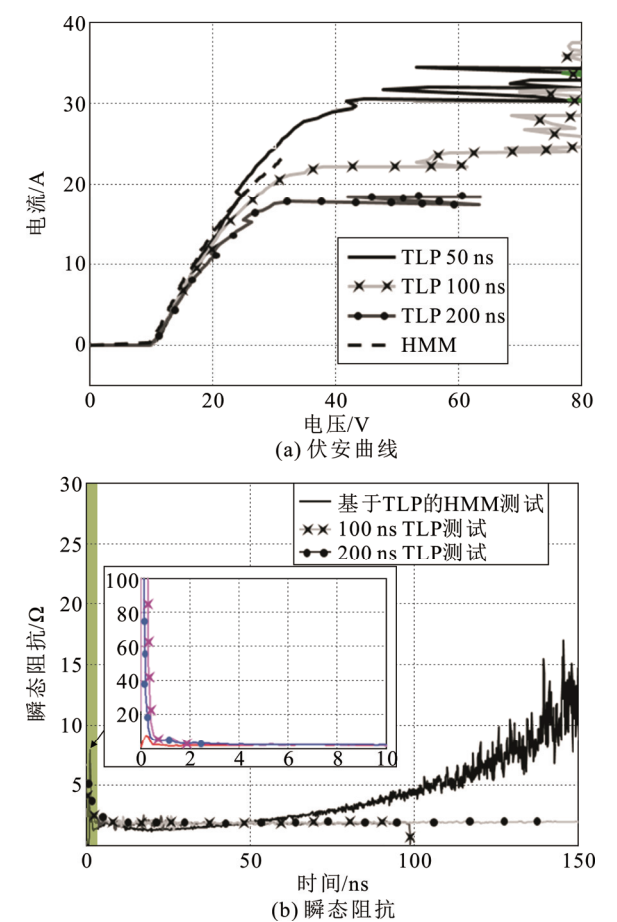


图 6 基于 50 Ω 的 HMM 测试方法与 TLP 测试的伏安曲线和瞬态阻抗的比较

Fig.6 Voltage-current curve and dynamic resistance comparison for 50 Ω-based HMM and TLP test methods

开启电压、钳位电压、损伤电流和电压阈值、瞬态阻抗等方面来进行评价。3 种测试方法所获取的损伤阈值和伏安曲线存在差异性,这是因为本文所测的 TVS 器件的损伤是热击穿引起的,不同测试条件下对器件所注入的总能量不同。

参考文献 References

[1] 刘尚合, 武占成, 朱长青, 等. 静电放电及危害防护[M]. 北京:

- 北京邮电大学出版社, 2004.
- LIU Shanghe, WU Zhancheng, ZHU Changqing, et al. ESP and hazard protection[M]. Beijing, China: Beijing University of Posts and Telecommunication Press, 2004.
- [2] 刘尚合, 刘卫东. 电磁兼容与电磁防护相关研究进展[J]. 高电压技术, 2014, 40(6): 1605-1613.
- LIU Shanghe, LIU Weidong. Process of relevant research on electromagnetic compatibility and electromagnetic protection[J]. High Voltage, 2014, 40(6): 1605-1613.
- [3] 郭瑶, 徐晓英, 叶字辉, 等. TVS 二极管标称参数与静电放电防护能力研究[J]. 固体电子学研究与进展, 2015, 35(4): 382-387.
- GUO Yao, XU Xiaoying, YE Yuhui, et al. Study on the relation between TVS nominal parameters and its protection ability[J]. Research & Progress of SSE, 2015, 35(4): 382-387.
- [4] YANG J, ZHANG X J, DONG K N. Influence of package form on electromagnetic pulse protective characteristics of transient voltage suppressor transistor[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(6): 1683-1687.
- [5] 张希军, 董康宁, 杨洁. 不同特征频率高频硅双极晶体管静电放电电机模型敏感特性[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1631-1636.
- ZHANG Xijun, DONG Kangning, YANG Jie. Machine model ESD sensitivity of different characteristic frequency high-frequency silicon bipolar transistors[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1631-1636.
- [6] ESD association standard test method for electrostatic discharge sensitivity testing human body model (HBM) component level: ANSI/ESD STM5[S], 2007.
- [7] 韩雁, 霍明旭, 宋波. 静电放电人体模型测试标准 EIA/JEDEC 中的问题研究[J]. 中国集成电路, 2009, 18(6): 56-61.
- HAN Yan, HUO Mingxu, SONG Bo. A case study of problems in EIA/JEDEC HBM ESD test standard[J]. China Integrated Circuit, 2009, 18(6): 56-61.
- [8] International Electro Technical Commission. Testing and measurement technique—electrostatic discharge immunity test: IEC61000-4-2[S], 2001.
- [9] ESD association standard test method for electrostatic discharge (ESD) sensitivity testing—transmission line pulse(TLP)—component level: ANSI/ESD STM 5.5.1[S], 2014.
- [10] 梁振光, 杨明远. 传输线脉冲发生器研制及其对电路板抗静电放电干扰的测试[J]. 高电压技术, 2015, 41(5): 1610-1617.
- LIANG Zhengguang, YANG Mingyuan. Development of transmission line pulser and its immunity test for electrostatic discharge on printed circuit board[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(5): 1610-1617.
- [11] 鄢永明, 曾云, 夏宇, 等. 维持电压和失效电流线性可调节的高压 ESD 器件[J]. 电子科技大学学报, 2015, 44(5): 700-704.
- YAN Yongming, ZENG Yun, XIA Yu, et al. Investigation of high voltage electrostatic discharge devices with adjustable holding voltages and failure currents[J]. Journal of University of Electronic Science and Technology of China, 2015, 44(5): 700-704.
- [12] 黄龙, 梁海莲, 顾晓峰, 等. 多晶硅栅对 LDMOS-SCR 器件 ESD 防护性能的影响[J]. 浙江大学学报(工学版), 2015, 49(2): 366-370.
- HUANG Long, LIANG Hailian, GU Xiaofeng, et al. Effect of poly-silicon gate on ESD protection performance of LDMOS-SCR devices[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2015, 49(2): 366-370.
- [13] 罗广孝, 崔翔, 张卫东, 等. TVS 静电抑制器等效电路参数估算及应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 204-211.
- LUO Guangxiao, CUI Xiang, ZHANG Weidong, et al. Equivalent circuit parameter estimation and application of TVS electrostatic discharge suppressor[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 204-211.
- [14] 王源, 张立忠, 曹健, 等. 隧道场效应晶体管静电放电冲击特性研究[J]. 物理学报, 2014, 63(17): 178501.
- WANG Yuan, ZHANG Lizhong, CAO Jian, et al. Research on electrostatic discharge characteristics of tunnel field effect transistors[J]. Acta Physica Sinica, 2014, 63(17): 178501.
- [15] 吴晓鹏, 杨银堂, 刘海霞, 等. 沟道尺寸对深亚微米 GGNMOS 保护器件特性的影响[J]. 西安电子科技大学学报(自然科学版), 2015, 42(6): 113-117.
- WU Xiaopeng, YANG Yintang, LIU Haixia, et al. Research on the influence of the channel dimension on the characteristics of the gate grounded NMOS protection device[J]. Journal of Xidian University, 2015, 42(6): 113-117.
- [16] BEGES R, CAIGNET F, BESSE P, et al. TLP-based human metal model stress generator and analysis method of ESD generators[C]// Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium. Reno, USA: IEEE, 2015: 1-10.
- [17] 马立云, 谭志良, 宋培姣, 等. 3DG81B 在静电放电作用下损伤效应与机理分析[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4191-4197.
- MA Liyun, TAN Zhiliang, SONG Peijiao, et al. The damage effect and mechanism of 3DG81B induced by ESD[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 4191-4197.
- [18] 徐晓英, 刘尚合, 武占成, 等. IEC61000-4-2 规定的实验平台与方法的局限性[J]. 高电压技术, 2005, 31(6): 32-35.
- XU Xiaoying, LIU Shanghe, WU Zhancheng, et al. Limit in test platform and in experiment method defined by IEC 61000-4-2[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(6): 32-35.
- [19] 张燕奇, 赵春燕, 高攸纲. PED 测试中静电枪表现的性能的研究[J]. 环境技术, 2014, 4(增刊): 191-194.
- ZHANG Yanqi, ZHAO Chunyan, GAO Yougang. Study on the performance of ESD gun in testing[J]. Environmental Technology, 2014, 4(Supplement): 191-194.
- [20] 刘尚合, 徐晓英. IEC 标准与 ESD 抗扰度实验方法研究[J]. 军械工程学院学报, 2005, 17(1): 1-6.
- LIU Shanghe, XU Xiaoying. Study on IEC standard and ESD immunity testing method[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2005, 17(1): 1-6.
- [21] SCHOLZ M, CHEN S H, JOHNSON D, et al. Misrelation between IEC61000-4-2 type of HMM tester and 50 Ω HMM tester[C]// Electrical Overstress/Electrostatic Discharge Symposium. Tucson, USA: IEEE, 2012: 1-9.



XU Xiaoying
Ph.D., Professor
Corresponding author



GAN Yingjie
Ph.D. candidate



PU Shi
Ph.D.
Associate professor

徐晓英(通信作者)

1957—, 女, 博士, 教授, 博导

主要从事静电放电、电磁兼容和数值计算方面的工作。主持完成了交通部重点项目和国家自然科学基金项目。现为中国物理学会静电专业委员会委员

E-mail: xu_xiao_ying@126.com

甘瑛洁

1989—, 女, 博士生

主要研究方向为静电放电机理与测试

E-mail: ganyj1989@sina.com

浦实

1983—, 男, 博士, 副教授

主要研究铁路环境电磁兼容特性、铁路无线通信射频链路特性、面向下一代移动通信的微波毫米波太赫兹波天线及器件研发、无线电力/能量传输线圈及系统设计等

E-mail: sidpu@whut.edu.cn