

GigaDevice Semiconductor Inc.

芯片级 ESD & 系统级 ESD 差异

应用笔记

AN159

目录

目录.....	2
1. 静电放电	5
2. 芯片级 ESD(HBM&CDM)	6
2.1. 人体模型(Human Body Model).....	6
2.2. 充电器件模型(Charge Device Model).....	7
3. 系统级 ESD 测试(IEC61000-4-2)	9
4. 系统级 ESD 与芯片级 ESD 差异	11
5. 版本历史	14

图索引

图 1-1. 芯片级 ESD 与系统级 ESD 范畴	5
图 2-1. HBM 测试仪示意图	6
图 2-2. HBM 测试引脚组合示例	7
图 2-3. HBM 器件静电等级分类	7
图 2-4. CDM 测试方法原理图	8
图 2-5. CDM 静电测试等级分类	8
图 3-1 系统级 ESD 测试仪示意图	9
图 3-2 TVS 防护电路示意图	10
图 4-1. MCU 系统级 ESD 等级参数	11
图 4-2. MCU 芯片级 ESD 等级参数	11
图 4-3. 芯片级 ESD 与系统级 ESD 放电性能差异	12
图 4-4. 芯片级 ESD 与系统级 ESD 测试方法差异	13

表索引

表 3-1 系统级 ESD 测试等级分类	9
表 3-2. IEC62132-1 MCU 的失效模式等级	10
表 3-3 版本历史.....	14

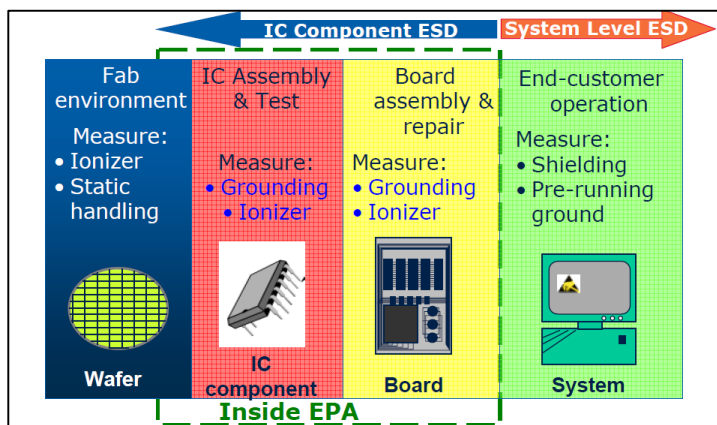
1. 静电放电

现代半导体集成电路的速度越来越快，工作电压越来越低，Die 面积也越来越小因而芯片内部的 ESD 器件的尺寸也相应的被压缩，导致了半导体器件对 ESD 也变得更敏感。ESD 对于电路引起的干扰、对元器件、CMOS 电路及界面电路造成的破坏等问题越来越引起人们的重视。电子设备的 ESD 静电也开始作为电磁兼容性测试的一项重要内容写入国家标准和国际标准中。静电对器件造成的损坏有显性和隐性两种。隐性损坏在当时看不出来，但器件变得更脆弱，在过压、高温等条件下极易损坏。ESD 静电两种主要的破坏机制是：由 ESD 静电电流产生热量导致设备的热失效；由 ESD 静电感应出过高电压导致绝缘击穿。两种破坏可能在一个设备中同时发生，例如，绝缘击穿可能激发大的电流，这又进一步导致热失效。除容易造成电路损害外，静电放电也极易对电子电路造成干扰。静电放电对电子电路的干扰有两种方式。一种是传导干扰，另外一种辐射干扰。

静电是两种介电系数不同的物质摩擦时，正负极性的电荷分别积累在两个物体上而形成。当两个物体接触时，其中一个趋于另一个吸引电子，因而二者会形成不同的充电电位。半导体集成电路从生产制造到电子产品中应用的各个环节中都会存在 ESD 干扰的风险，集成电路在生产制造环节中的抗静电能力等级与良率相关，集成电路芯片应用在电子产品中之后的整体的抗静电能力等级影响到产品的可靠性和用户体验。对于集成电路生命周期中的不同环节都有不同的 ESD 静电抗扰度的测试方法和评判标准，测试标准中提供的 ESD 等级为集成电路在生命周期中的可靠性提供了量化和风险评估的参考标准。

现有的 ESD 测试标准分为芯片级 ESD 和系统级 ESD，两种类型的标准面所面向的集成电路生命周期中的环节有所不同。由于测试方法、芯片的工作状态以及环境的不同，两种测试标准之间的等级之间不具有关联性，不能通过芯片级 ESD 测试标准下的等级高低以类比系统级 ESD 等级高低，反之亦然。如 [图 1-1. 芯片级 ESD 与系统级 ESD 范畴](#) 对比所示，芯片级 ESD 测试目的是为了测试芯片在通过晶圆的切割、封装、出厂前的测试、运输，以及 PCB 组装和贴片等过程中的抗静电性能，芯片级 ESD 均发生在 ESD 保护区域（EPA）内，且操作过程中芯片的不上电操。系统级 ESD 测试则是衡量芯片在实际用中面临的复杂静电环境的抗扰度，而这个过程不是在 ESD 受控区域，且大多是 MCU 上电后系统处于运行状态。

图 1-1. 芯片级 ESD 与系统级 ESD 范畴



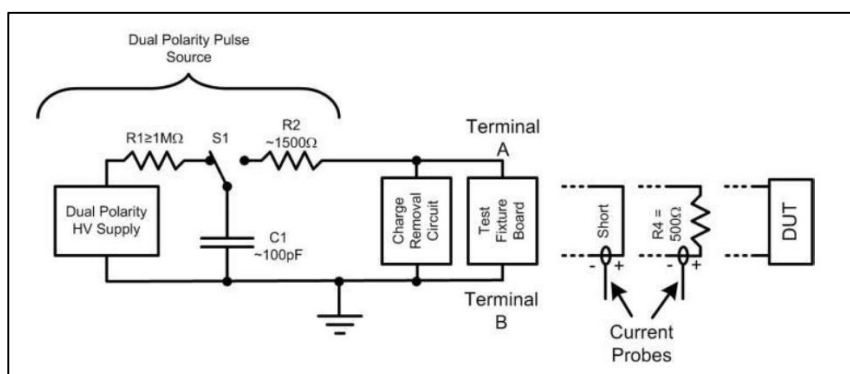
2. 芯片级 ESD(HBM&CDM)

芯片级 ESD 测试的出发点是防止芯片在封装、运输及焊接等过程中由于 ESD 的存在而导致芯片失效。根据静电的产生方式以及对电路的损伤模式不同通常分为四种测试方式：人体放电模式(HBM: Human-Body Model)、充电器件模式(CDM: Charge-Device Model)、机器放电模式(Machine Model)、电场感应模式(FIM: Field-Induced Model)，但是业界通常使用前两种模式来测试(HBM, CDM)。

2.1. 人体模型(Human Body Model)

人体模型 (HBM) 是表征电子设备对静电放电 (ESD) 损坏的敏感性的最常用模型。该模型模拟了人体触摸电子设备时可能发生的放电。HBM 定义最广泛使用是美国军用标准 MIL-STD-883，静电放电灵敏度分类中定义的测试模型。该方法建立了简化的等效电路和模拟 HBM ESD 事件所需的必要测试程序。国际广泛使用的标准是 JEDEC 标准 JS-001。在 JS-001 和 MIL-STD-883 中，带电人体由 100pF 电容器和 1500Ω 放电电阻进行建模，如 [图 2-1. HBM 测试仪示意图](#)。在测试过程中，电容器完全充电至几千伏 (2 KV、4 KV、6 KV 和 8 KV 是典型的标准电平)，然后通过串联到被测器件的电阻放电。

图 2-1. HBM 测试仪示意图



HBM 测试使用引脚组合完成，引脚组合的目的是测试所有主要的 HBM 电流路径。设置引脚组合需要了解被测器件。器件的每个引脚必须分类为无连接引脚、供电引脚或非供电引脚。如图 [图 2-2. HBM 测试引脚组合示例](#) 所示，每次挑选一组引脚，在每一测试模式下，IC 的该测试脚先被施加(Zap)某一 ESD 电压，而且在同一 ESD 电压下，IC 的该测试脚必须要被 Zap 三次，每次 Zap 之间的时间间隔约一秒钟，Zap 三次之后再观看该测试脚是否已被 ESD 所损坏，通常是通过测量被测引脚的 IV curve 并与标准的 IV curve 进行对比已确定该引脚是否正常，若 IC 尚未被损坏则调升 ESD 的电压，再 Zap 三次。测试电压的调整范围如 [图 2-3. HBM 器件静电等级分类](#) 所示。此 ESD 电压由小而逐渐增大，如此重复下去，直到该 IC 引脚已被 ESD 所损坏，此时造成 IC 该测试脚损坏的 ESD 测试电压称为静电放电故障临界电压 (ESD failure threshold)。

图 2-2. HBM 测试引脚组合示例

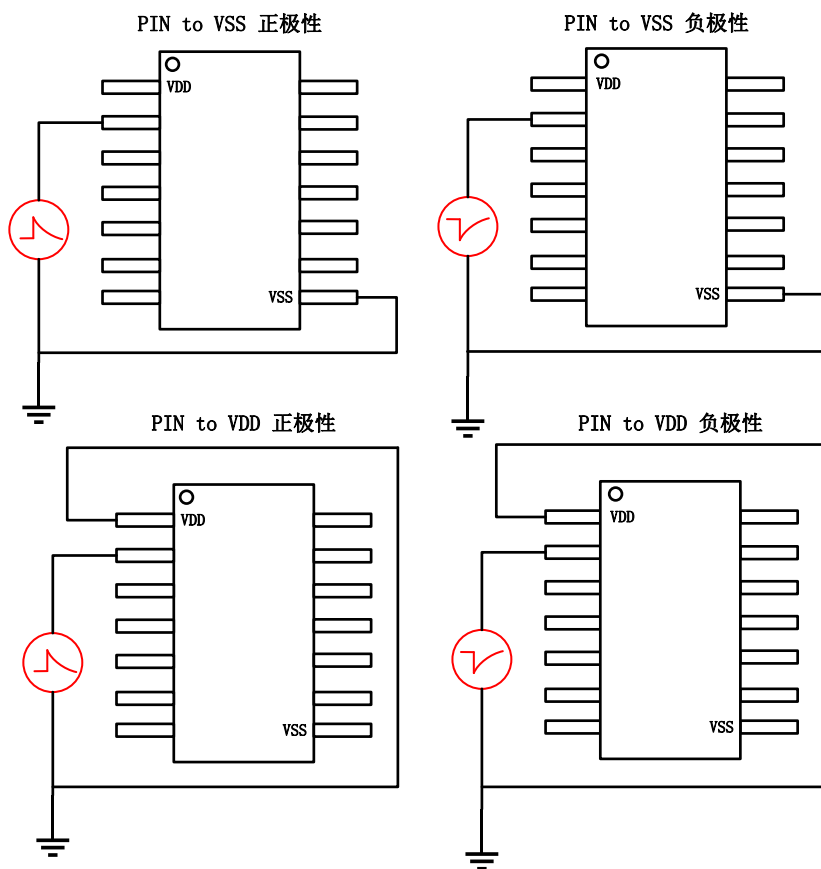


图 2-3. HBM 器件静电等级分类

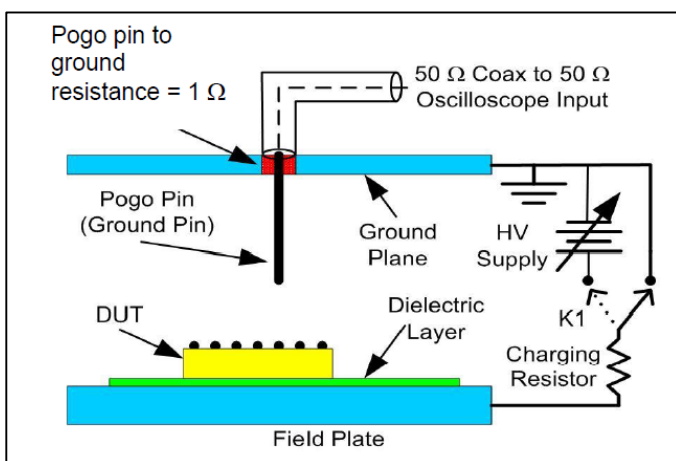
Classification	Voltage Range (V)
0Z	< 50
0A	50 to < 125
0B	125 to < 250
1A	250 to < 500
1B	500 to < 1000
1C	1000 to < 2000
2	2000 to < 4000
3A	4000 to < 8000
3B	≥ 8000

2.2. 充电器件模型(Charge Device Model)

充电器件模型 (Charged-Device Model) 是一种重要的元器件静电放电耐受阈值的测试方法。CDM 模型 HBM 模型完全不同。HBM 是模拟人体(Human Body)带电后对元器件放电，而 CDM 模型则是模拟元器件本身带电后对地放电。随着芯片制造、封测、装联的自动化程度提高，人体接触器件的机会相对减少，带电器件 ESD 放电事件越来越成为半导体器件失效的主要原因之一。半导体器件在装配、试验、测试、运输及存贮过程中由于 IC 管壳（封装）与其它绝缘材料（如包装用的塑料袋、塑料管）相互摩擦，就会使芯片管壳

带电。器件本身作为电容器的一个极板而存贮电荷。当引脚接触到接地的金属设备或被接地的人体用金属镊子触碰引脚的瞬间，形成导电通道，放电电流流经 IC 内部，导致芯片损伤。此种模型的放电时间较 HBM 模型更短，仅约几纳秒 (ns) 之内。CDM 测试设备通常由一个连接到高压电源的充电板 Field Plate 和一个接地的 Pogo pin 组成，Pogo pin 可以在待测 IC (DUT) 的 pin 之间移动。[图 2-4. CDM 测试方法原理图](#)给出了假设使用电阻电流探头进行场感应的 CDM 测试仪的硬件原理图。Pogo pin 引脚应以 $1\ \Omega$ 的电流通路连接到接地面。K1 是对场板充电和对场板接地的开关。

图 2-4. CDM 测试方法原理图



对于每个器件，每个引脚至少施加一次正极和负极放电。在两次放电之间留出足够的时间，以使器件达到完整的试验电压水平。电气应力可按极性划分，每个极性使用至少三个单位的样本量。引脚也可以划分为一组或多组样品，只要器件的每个引脚是至少一组的成员。每组样品至少应有 3 个单元。CDM 测试应从[图 2-5. CDM 静电测试等级分类](#)中最低的级别开始，但也可以从任何级别开始。但是，如果初始电压电平高于图中的最低电平，并且设备在初始电压下失效，则应在下一个较低电平上使用三个新设备重新开始测试。

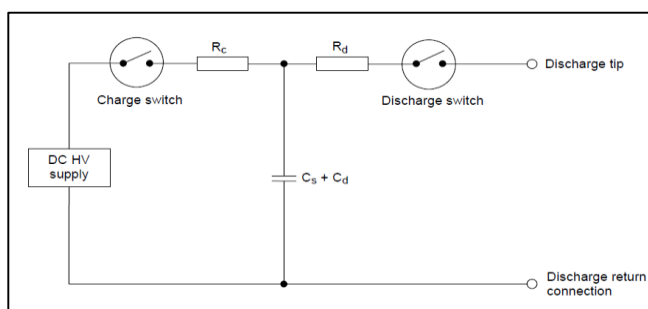
图 2-5. CDM 静电测试等级分类

Classification Level (see Note 1)	Classification Test Condition (in Volts) (See Note 2)
C0a	< 125
C0b	125 to < 250
C1	250 to < 500
C2a	500 to < 750
C2b	750 to < 1000
C3	≥ 1000 (see Note 3)

3. 系统级 ESD 测试(IEC61000-4-2)

系统级 ESD 测试用于模拟现实世界中的终端用户 ESD 事件，国际上对于系统级 ESD 测试仪一般遵循 IEC 61000-4-2 中规定的测试方法进行产品实际应用过程中的 ESD 抗扰度等级。IEC 规定了两种系统级测试，分别是接触放电和空气放电。众多周知，IEC 61000-4-2 也被称之为“Human Body model”，但是 IEC 61000-4-2 是应用于系统级 ESD 抗扰度的等级测试，测试中的 DUT 是已经设计完成的完整产品，产品由嵌入式的 PCB 板和其它的功能结构件等组成，与芯片级 ESD 测试过程中使用的独立芯片不同，系统级 ESD 测试过程中 PCB 板上的芯片之间有 PCB 走线的互联以实现相应的功能。芯片级的 ESD 测试目的是保证 IC 在制造，运输、焊接等过程中不受损坏，IEC 61000-4-2 规定的系统级测试用于模拟现实世界中的终端用户 ESD 事件。如 [图 3-1 系统级 ESD 测试仪示意图](#) 所示，进行系统级 ESD 测试时使用的充放电 RC 与芯片级不同，其中 R_d 的阻值为 330 欧姆， C_d+C_s 的容值为 150pF。

图 3-1 系统级 ESD 测试仪示意图



系统级 ESD 测试标准中规定了接触放电和空气放电两种放电方式，共分为四个测试等级，如 [表 3-1 系统级 ESD 测试等级](#)。按照电子产品的抗静电等级的需求不同可以选择等级进行测试，如有特殊需求的测试等级高于已经提供的四个等级时可以根据客户需求定制测试等级需要在报告中注明。每个测试等级中接触放电和空气放电都需要进行测试，正负极性至少各 10 次进行测试。

表 3-1 系统级 ESD 测试等级分类

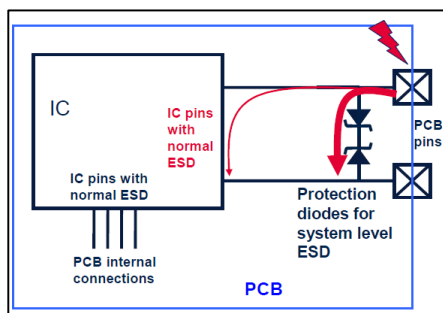
接触放电模式		空气放电模式	
等级	测试电压(kV)	等级	测试电压(kV)
1	2	1	2
2	4	2	4
3	6	3	8
4	8	4	15
Special ⁽¹⁾	客户定制	Special	客户定制

(1). Special是任意等级电压，更高、更低或者介于两者之间。
Special等级根据特殊的待测设备的具体应用环境所需要。

MCU 在进行系统级 ESD 测试试验中选定的测试点会采用一定的器件进行防护，常见的防护器件是 TVS，为芯片的 GPIO 提供静电快速泄放的通道，如 [图 3-2 TVS 防护电路示意](#)

图所示，TVS 起到防护作用时工作在反向击穿状态，该状态下 TVS 的导通电阻比较小可以流过大电流，瞬间的大电流泄放可以拉低 GPIO 口受到的干扰电压的电平，实现了对过电压的箝位作用。TVS 的型号选择很重要，不同型号的 TVS 会对 MCU 系统级 ESD 测试等级产生影响，关于 TVS 的选择可以参考《AN051 ESD 防护器件之 TVS 选型和使用》。

图 3-2 TVS 防护电路示意图



试验结束后需要根据 MCU 的工作条件和功能要求分别加以记录，测试结果依照 IEC62132-1 对于 MCU 的系统级 ESD 可以分为 5 种的失效模式等级进行记录。如下表 3-2. IEC62132-1 MCU 的失效模式等级所示，其中等级 A 是没有问题，BCD 是其中软失效类型，E 硬失效。

表 3-2. IEC62132-1 MCU 的失效模式等级

等级	描述
A	不受影响：在脉冲的注入和注入后，ESD 干扰并未对芯片造成任何影响
B	自动恢复：在脉冲注入过程中，芯片运行变得不正常，但是脉冲注入结束后，芯片有回到原来的正常状态
C	手动恢复：在脉冲注入过程中，芯片运行变得不正常，在脉冲注入结束之后，芯片也无法自动回到原来的正常状态，但是在人工干预后（reset），芯片回到原来的正常状态。
D	重新上电：在脉冲的注入和注入后，芯片都无法正常运行（reset 没有用），只有对芯片进行重新上电后，才能回到正常状态，一般是由于 latch-up 现象的发生。
E	硬失效：ESD 的脉冲注入，已经造成了芯片物理性的损坏。

4. 系统级 ESD 与芯片级 ESD 差异

在 GD MCU 的 datasheet 中，对于 ESD 性能的描述分为两部分，分别是系统级的 ESD 参数和芯片级的 ESD 参数，如 [图 4-1. MCU 系统级 ESD 等级参数](#)和 [图 4-2. MCU 芯片级 ESD 等级参数](#)。对于这两种 ESD 参数，其面对的对象是不同的，对应的测试标准也是不同的。

对于系统级 ESD 测试，MCU 系统上电运行抗扰度测试代码，测试 MCU 在终端客户应用的运行过程中对于静电放电的抗扰度，其测试环境是不在 EPA 静电防护区域，无任何静电手环以及静电服和离子风扇等静电控制措施。

图 4-1. MCU 系统级 ESD 等级参数

Symbol	Parameter	Conditions	Level/Class
V_{ESD}	Voltage applied to all device pins to induce a functional disturbance	$V_{DD} = 3.3\text{ V}$, $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$, LQFP48, $f_{HCLK} = 72\text{ MHz}$ conforms to IEC 61000-4-2	3A
V_{FTB}	Fast transient voltage burst applied to induce a functional disturbance through 100 pF on VDD and VSS pins	$V_{DD} = 3.3\text{ V}$, $T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$, LQFP48, $f_{HCLK} = 72\text{ MHz}$ conforms to IEC 61000-4-4	3A

(1) Based on characterization, not tested in production.

[图 4-1. MCU 系统级 ESD 等级参数](#)中展示了测试使用的芯片封装，主频以及测试环境的参数以及符合的测试标准。

V_{FTB} 是 EFT 测试参数，是 MCU 上电运行中对系统的电源上施加电快速脉冲群干扰，测试 MCU 对 EFT 干扰的抗扰度 level。

芯片级别的 ESD 包括 HBM、CDM 两种，这两种静电模型的测试过程中，MCU 是不上电的，有专门的测试装置进行测试。然后这两种测试的等级也是不一样的。在这里有一个情况提一下，有些情况下会将系统级 ESD 说成 HBM，其实这样认为不太恰当，因为测试中规定的模型，电流峰值以门电路的状态等都不一样。

图 4-2. MCU 芯片级 ESD 等级参数

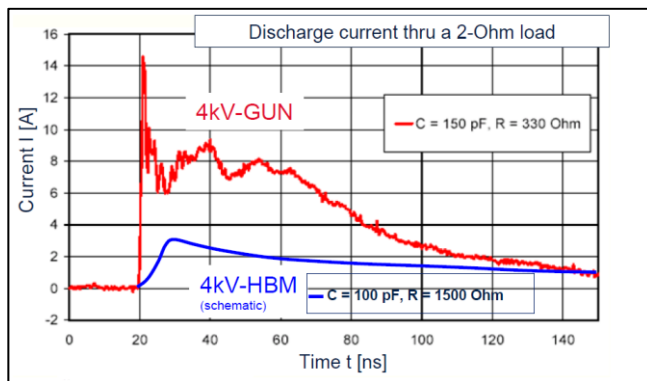
Symbol	Parameter	Conditions	Min	Typ	Max	Unit
$V_{ESD(HBM)}$	Electrostatic discharge voltage (human body model)	$T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$; JS-001-2017	—	—	2000	V
$V_{ESD(CDM)}$	Electrostatic discharge voltage (charge device model)	$T_A = 25\text{ }^\circ\text{C}$; JS-002-2018	—	—	500	V

(1) Based on characterization, not tested in production.

芯片级 ESD 中的 HBM 和系统级 ESD IEC 61000-4-2 两种测试标准之前的测试等效电路结构上存在相似之处，并且 IEC 61000-4-2 的测试也会被称为 HBM 测试。但是两种标准在进行测试过程中的测试环境、电气应力等级以及芯片的工作状态等都不相同。如 [图 4-3. 芯片级 ESD 与系统级 ESD 放电性能差异](#)所示，同一测试等级下，测

试设备施加到 DUT 的电流波形存在很大差别，IEC 61000-4-2 的测试中的电流峰值是芯片级 ESD 的数倍，且上升时间更快。

图 4-3. 芯片级 ESD 与系统级 ESD 放电性能差异



在测试方法上也存在着一定的差异，如[图 4-4. 芯片级 ESD 与系统级 ESD 测试方法差异](#)所示，芯片级 ESD 的测试中是对 MCU 所有的引脚进行组合配对测试，存在多种组合方式，比如将 MCU 的所有引脚对 GND 进行静电放电测试。在这个过程中芯片是处于不上电状态，芯片直接固定在测试夹具上，没有任何的外围电路。系统级 ESD 测试过程中，芯片焊接在 PCB 板上，MCU 在进行测试过程中会设计专门的测试板，测试板能够实现 MCU 的最新系统和一些基本外设，测试过程中 MCU 上电工作，运行相应的功能。MCU 在不上电时，GPIO 会处于高阻抗状态，没有状态变化。MCU 上电工作时，由于运行一定的功能，GPIO 会有状态的切换，MCU 内部也存在逻辑门电路状态翻转。MCU 在这两种状态下，在 ESD 静电干扰的过程中，MCU 内部为 ESD 提供的泄放路径不同，在测试结果上的体现上也会存在差异。其次，MCU 芯片级 ESD 的等级通常是依据于施加 ESD 干扰前后测量 IV curve 是否在容许范围之内进行判定，芯片的物理损伤程度会在 IV curve 上有所体现。MCU 系统级 ESD 的测试过程中芯片通常是上电运行程序，芯片在受到 ESD 干扰过程中出现的复位和死机现象也是系统级 ESD 等级的判定标准。复位的现象往往是电源的波动以及辐射引起的 NRST 引脚的电压波动导致，死机的问题通常是 MCU 的 PC 指针取地址的过程中受到干扰导致地址错误进入 Hardfault 从而出现死机现象，在复位和死机过程中芯片往往不会出现物理性的损伤，与芯片级 ESD 测试有很大区别。目前业界对于两种测试结果的关联性研究结果表明，经过大量的实验数据验证，芯片级 ESD 和系统级 ESD 之间没有直接相关的关系。不能使用芯片级 ESD 测试等级的高低评判系统级 ESD 的等级。MCU 应用在产品中会开启外设功能也会有一定外设电路，这个情况下产品的 ESD 性能与 PCB、器件、防护设计紧密相关。

图 4-4. 芯片级 ESD 与系统级 ESD 测试方法差异

Function	Device level ESD test	System level ESD Test (IEC)
Stressed pin group	All pin combinations	Few special pins
Supply	Unpowered	Powered & unpowered
Test methodology	Standardized	Application specific
Test set-up	Commercial tester & sockets	Application specific
Typical qualification goal	1 ...2 kV JEDEC HBM	8 kV Contact (IEC 61000-4-2) 15kV Air (IEC 61000-4-2)
Corresponding peak current	0.65 ... 1.3 A	> 20 A
Failure signature	Destructive	Functional or destructive

5. 版本历史

表 3-3 版本历史

版本号	说明	日期
1.0	首次发布	2023 年 08 月 01 日

Important Notice

This document is the property of GigaDevice Semiconductor Inc. and its subsidiaries (the "Company"). This document, including any product of the Company described in this document (the "Product"), is owned by the Company under the intellectual property laws and treaties of the People's Republic of China and other jurisdictions worldwide. The Company reserves all rights under such laws and treaties and does not grant any license under its patents, copyrights, trademarks, or other intellectual property rights. The names and brands of third party referred thereto (if any) are the property of their respective owner and referred to for identification purposes only.

The Company makes no warranty of any kind, express or implied, with regard to this document or any Product, including, but not limited to, the implied warranties of merchantability and fitness for a particular purpose. The Company does not assume any liability arising out of the application or use of any Product described in this document. Any information provided in this document is provided only for reference purposes. It is the responsibility of the user of this document to properly design, program, and test the functionality and safety of any application made of this information and any resulting product. Except for customized products which has been expressly identified in the applicable agreement, the Products are designed, developed, and/or manufactured for ordinary business, industrial, personal, and/or household applications only. The Products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems designed or intended for the operation of weapons, weapons systems, nuclear installations, atomic energy control instruments, combustion control instruments, airplane or spaceship instruments, transportation instruments, traffic signal instruments, life-support devices or systems, other medical devices or systems (including resuscitation equipment and surgical implants), pollution control or hazardous substances management, or other uses where the failure of the device or Product could cause personal injury, death, property or environmental damage ("Unintended Uses"). Customers shall take any and all actions to ensure using and selling the Products in accordance with the applicable laws and regulations. The Company is not liable, in whole or in part, and customers shall and hereby do release the Company as well as its suppliers and/or distributors from any claim, damage, or other liability arising from or related to all Unintended Uses of the Products. Customers shall indemnify and hold the Company as well as its suppliers and/or distributors harmless from and against all claims, costs, damages, and other liabilities, including claims for personal injury or death, arising from or related to any Unintended Uses of the Products.

Information in this document is provided solely in connection with the Products. The Company reserves the right to make changes, corrections, modifications or improvements to this document and Products and services described herein at any time, without notice.