

静电放电概论

第一部分—静电放电 (ESD) 简介

© 2013, 静电放电协会, 纽约州罗马市

历史背景沿革

对许多人来说, 静电放电 (ESD) 只是一种行经毛料地毯、滑过汽车座椅, 或是触摸金属门把时, 所感受到的电击现象。然而几世纪以来, 静电和 ESD 一直都是严重的工业问题。早在 15 世纪时, 欧洲和加勒比海地区的军事要塞就已使用一些静电控制措施和器材, 来防止火药库因静电火花点燃而发生意。1860 年代, 美国造纸厂采用基本的接地装置、火焰离子化技术, 及汽鼓等, 以消除纸幅经过干燥程序后所带的静电。任何你可想象得到的商业和工业生产过程, 多少都会遇上带电与放电等相关课题。静电控制在很多工业领域中都有着举足轻重的地位, 如军火炸药, 石油化工, 医药, 农业, 印刷和平面设计, 纺织, 喷涂, 甚至塑料制品等。进入电子时代, 静电及静电放电带来了新的相关问题。况且, 随着电子器件速度的增快, 集成电路也越来越小, 它们对 ESD 普遍变得更敏感。这种趋势可能会加速发生。美国静电放电防护协会 (ESDA) 于 2010 年 4 月发布修订的「**静电放电技术准则**」 (*Electrostatic Discharge (ESD) Technology Roadmap*) 中提及: 「电子器件从 2010 到 2015 年间及以后, 敏感度将会越来越高, 各公司应立即监测各种操作处理程序的防静电能力。」今天, 在全球电子化环境中, 实际上无论从何种面向来看, ESD 都冲击着生产力和产品可靠度。

尽管经过三十年来的大量努力, ESD 仍然影响产品良率、制造成本、产品质量, 产品可靠度和获利率。光器件本身的损害, 成本可从几美分的简单二极管到数千美元复杂的集成电路等。如再考虑维修和重工、运输、劳力和相关开销等成本, 很明显地, 这个问题有着极大的改善空间。今天几乎所有电子制造企业, 约数千家, 均开始关注于业界所能接受的基本静电控制因素。ESDA 已设定各种静电防护标准, 来引导厂商建立基础静电消解和控制技术 (见第六部分 - ESD 标准)。任何忽略静电控制的企业, 将不可能有机会成功制造和运送完全无损的电子零件产品。

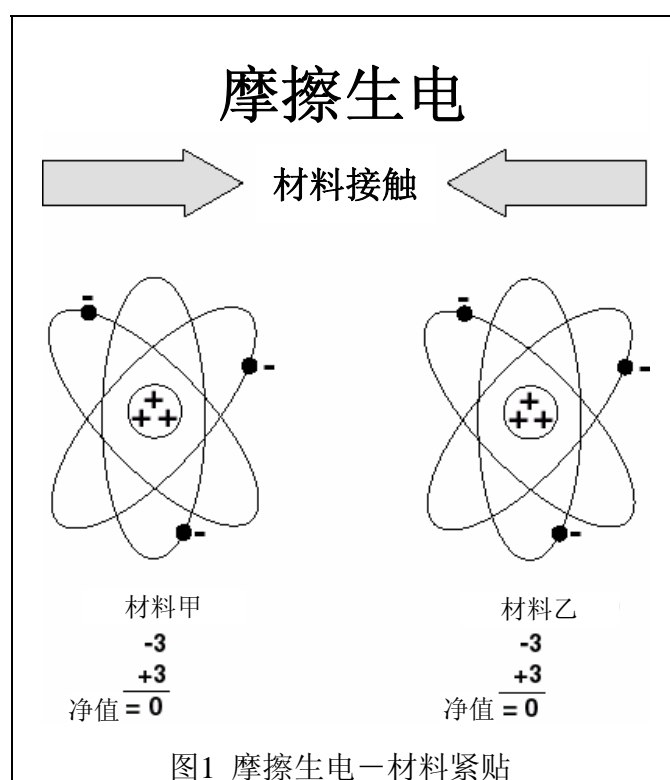
静电: 创造电荷

静电放电 (ESD) 相关名词定义可参考 *ESD ADV 1.0 Glossary* (**静电放电协会专有名词表**), 亦可自 www.ESDA.org 网站免费下载。**静电荷**之定义为「处于静止状态的电荷」。静电是材料内部或表面的一种电荷不平衡状态。这种电子不平衡状态会形成电场, 这种电场可被测出, 同时它也会影响其它物体。静电放电定义为「高静电场引起静电荷快速、自发地转移。注意: 一般情况下, 不同电位之两个物体彼此接近时, 电荷即由两者间的火花通过。」

静电放电可以改变半导体设备的电气特性, 减损或破坏它的效能。静电放电也可能会影响电子系统的正常运转, 造成设备故障或失灵。带电物体的表面会吸附并留置污染物,

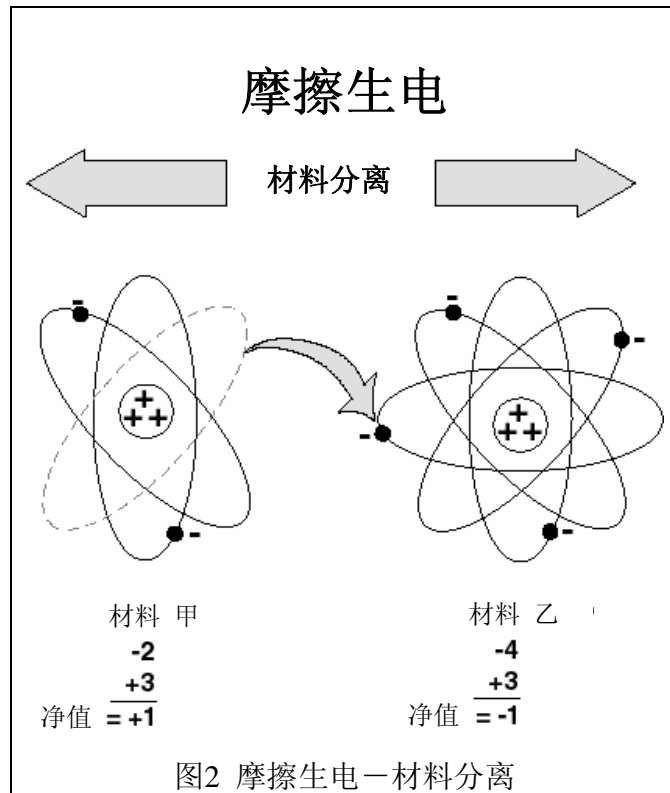
使清除微粒子的工作变得困难。空气中的微粒一旦被吸附至硅芯片或器件的集成电路表面，将引起程度不一的芯片受损情形，进而导致产品良率降低。

为能够控制静电放电，应先了解静电荷一开始是如何产生的。最常见的情况是，两种材料接触后再分离，即产生静电。这两种材料可以是完全相同或不尽相同的，而不同材料通常会释放更高层次的静电。例如，走路时，鞋底与地板的接触与分离便会产生静电。将电子器件放入或抽出自提袋、卡匣或管子等，都会产生静电，因其外壳和金属引线与容器表面已有多次接触和分离。这些例子中，尽管静电荷量大小不一，静电确已形成。



以材料间的接触与分离来创造静电荷，称为“摩擦生电”。英文「Triboelectric」源自希腊文的单字，「tribo」意为「摩擦」，「elektros」意为「琥珀」（史前树脂之化石）。摩擦生电涉及材料间的电子传输。不带电的材料，其原子核中的质子（正电）与环绕在原子核外围的电子（负电）数量相同。在图 1 中，材料「甲」所包含的原子具有数量相等的质子和电子。材料「乙」所包含的原子亦具有数量相等（也有可能相异）的与质子和电子。两种材料皆呈电中性。

当两种材料接触然后分离，带负电荷的电子便从其中一种的表面移转至另一种的表面。何种失去电子、何种获得，取决于其自然特性。失去电子的材料变成带正电，得到电子的则带负电。请参考图 2 说明。



静电的测量单位为「库仑」（coulombs）。一件物体的电荷量「q」是由该物体的电容量「C」和电压（V）所决定：

$$q = CV$$

虽然如此，通常我们还是会以「电压」来表示一个物体的静电位。

两种材料接触、电子传递和分离的这个过程，实际上比这里所描述的还要复杂许多。摩擦所产生的电荷量，受材料间接触面积、分离速度、相对湿度，和化学性质、表面功能性以及其它因素所影响。材料一旦产生电荷，就是「带静电」（若电荷仍留在该材料上）。此电荷可从该材料移转出去，发生静电放电情形，称 ESD 事件。其它因素包括实际放电电路的电阻，以及两个物体间接口上所产生的接触电阻，都会影响实际释放的电荷量。表 1 显示主要几种静电产生场景及其电压水平，从表中可看出湿度会减少电荷量的累积。尽管如此，高相对湿度亦会产生静电荷。

静电发生情境	典型电压水平	
	相对湿度10-25%	相对湿度65-90%
行走在地毯上	35,000V	1,500V
行走在塑料地板	12,000V	250V
在工作台边工作	6,000V	100V
从工作台拿起塑料袋	20,000V	1,200V
发泡胶椅	18,000V	1,500V

材料上的静电荷也可经由其它方式创造，例如感应、离子轰击，或与另一带电物体接触，但摩擦生电仍是最常见的方式。

材料特性如何影响静电荷

摩擦生电系列

当两种材料接触后分离，电荷的极性和大小视该材料在摩擦生电序列中所排的顺序位置而定。摩擦生电序列显示电荷如何在各种材料上产生。材料接触分离时，序列中较上位者带正电，较下位者则带负电。一般而言，表中所列材料，互相分得越开者所产生的电荷，会较越靠近者来得高。但这些表仅可作为一般指南，因为这里面仍涉及许多未经良好控制以确保重复性的变量。典型摩擦电系列如表 2 所示。

典型摩擦生电序列表	
+	兔毛
	玻璃
	云母
	人发
	尼龙
	羊毛
	毛皮
	铅
	丝绸
	铝
	纸
	棉花
	钢铁
	木

负电 -	琥珀 封蜡 镍，铜 黄铜，银 黄金，铂金 硫 醋酸人造丝 聚酯纤维 赛璐珞 硅 铁氟龙
---------	---

实际上几乎所有材料，包括水和空气中的微尘颗粒，都可摩擦生电。电荷产生量、电荷如何流动，以及流动速度等，都是该种材料在物理、化学和电气上的功能特性。

绝缘材料

可防止或限制电子流经表面或通过体积之材料，称为绝缘体。绝缘体都有极高的电阻，故绝缘材料的定义是「具有表面电阻或体积电阻等于或大于 1×10^{11} 欧姆之材料」。绝缘体表面可产生大量电荷。因绝缘材料不允电子流动，正电荷和负电荷可以同时停留在绝缘体表面，但不一定在同样位置上。呈负电性的位置因电子过剩，或可满足电子缺乏的另一端（呈正电性）。然因电子无法于绝缘材料之表面随意流通，故两种电荷可于位置上停留很长的时间。

导电材料

导电材料因电阻低，故可使电子轻易流经表面或通过体积。依据 **ESD ADV 1.0 Glossary (静电放电协会专有名词表)**，导电材料的低电阻为小于 1×10^4 欧姆（表面电阻）和 1×10^4 欧姆（体积电阻）。当导电材料充电时，电荷（电子缺乏或过剩）将均匀分布在材料表面。若带电的导电材料与另一导电材料接触，电子无疑可为两者共享。若后者连接至交流电设备接地或其它任何接地点，电子多半会流向地面，导体上的过剩电荷即可中和。

与绝缘体一样，导体的摩擦生电可创造静电荷。只要导体与其它导体或地面隔离，静电荷将持续留在导体上。若导体接地，则电荷将很容易流向地面。或是，带电导体与另一导体接触，则电荷将于两导体间流动。

静电消散材料

具静电消散性的材料（或称消电性材料）具有介于绝缘和导电材料间的电阻（ $1 \times 10^4 < 1 \times 10^{11}$ 欧姆，表面或体积电阻）。电子可流经或通过消散材料，但仍由材料的表面电阻或体积电阻所控制。

相较于另两类材料，静电消散材料亦可藉摩擦生电的方式产生电荷。然而，就像导电材料，静电消散材料允许电荷移转至地面或其它导电物体。一般而言，在相等大小下，静

电消散材料的电荷移转，比导电材料需要更长的时间。静电消散材料的电荷移转也明显比绝缘材料快速，但比导电材料慢。

静电场

带电材料亦有静电场及其所属力线。进入此电场附近的导电物体会被极化，称为「感应现象」（如图 1）。处于该电场中的导电物体，其表面电子将受负电场所排斥。正电场会把电子吸至其表面，使其它区域呈现正电性。在极化过程中，导电物体的实际电荷并无改变。然而，若该物体为导电性或消散性，并在极化过程中接地，因电荷呈现不平衡状态，电荷将自地面流入或流出至地面。若静电场被移除，且不接地，电荷将留在该物体上。若不导电物体进入电场，电偶极子将会与电场排列，形成相对表面电荷。非导体（绝缘材料）无法藉由感应现象来达到充电目的。

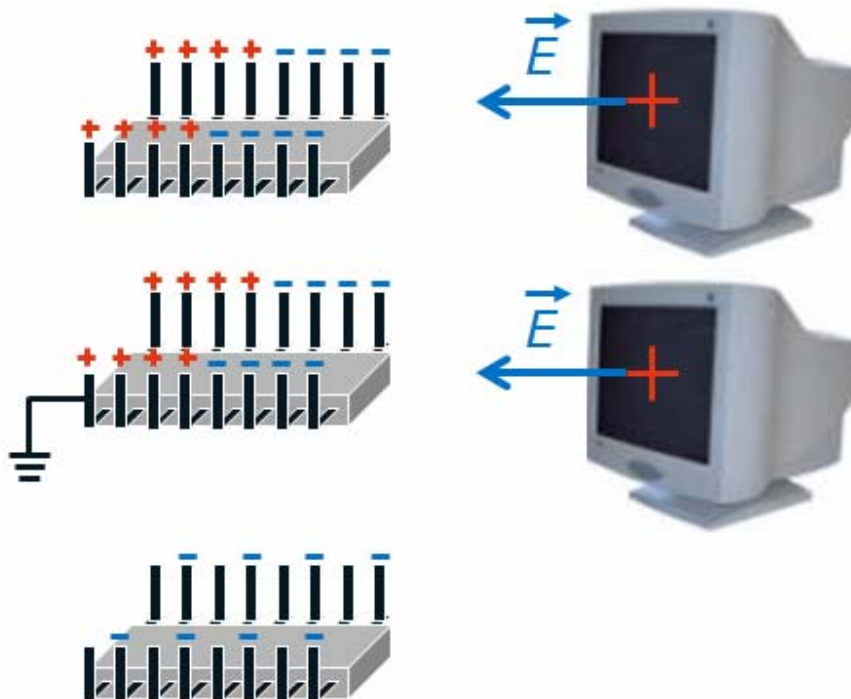


图1：感应现象

ESD 损害—器件如何发生故障

静电损害的定义是：「某物体因静电放电导致不能满足一个或多个特定参数而产生的变化。」这种状况从生产制造到现场服务的任一节点都可能发生。损害发生通常是因为在未进行防护控制的环境中操作某种敏感器件，或采用了较低阶的 ESD 损害防治规范。损害一般可分为「破坏性故障」或「潜伏性缺失」两种。

破坏性故障

当电子器件遭逢 ESD 事件，它可能会永久失效，起因是金属熔化、接头断裂，或氧化故障等。该器件因电路遭永久性破坏，导致完全无法作用，或仅能部分作用。通常这种型态的故障在该器件出货前的测试中可检出。若测试后发生破坏性等级的 ESD 事件，零件或可继续投入生产，而损害则须俟该器件最后检验不合格时才能被检出。

潜伏性缺失

依据 *ESD ADV 1.0 Glossary (静电放电协会专有名词表)*，「潜伏性缺失」的定义是：「经过一段正常运转期后发生的故障。此种故障可归因于早期的静电放电事件。潜伏性缺失的概念备受争议，并不完全被所有的科技产业接受。」潜伏性缺失是难以辨识出来的。发生 ESD 事件的器件可先局部排除后再继续执行其设定的功能。然而，该器件的使用寿命可能会变短。一项产品或系统的构成器件若具潜伏性缺失，经使用者开封使用后可能出现过早故障的情形。这种故障通常需花昂贵的修理费用，在某些情况下还可能对使用者造成伤害。

适当的仪器能有助确认一项器件是否曾有灾难性故障情形。基本的性能表现测试可具体证明器件曾受损。然以现有科技，潜在性缺失极难证明或检出，尤其是当该器件已组装成为最终产品后。

基本 ESD 事件——电子器件故障成因为何？

ESD 损害通常由以下三种发生情形之一所引起：直接对器件发生静电放电、器件本身发生静电放电，或是电场感应放电。ESD 损害是否会发生在静电放电敏感物体 (ESDS) 上，取决于其放电能量消散力，或其耐受电压水平。器件受损程度决定于其 ESD 敏感度。

放电至器件

当带电导体（包括人体）放电至另一物体，便发生 ESD 事件。静电损害的最主要原因是人体或带电材料将静电荷直接移转至静电放电敏感物体 (ESDS) 上。在地板上行走时，身体便开始累积静电荷。手指轻触（或靠近）ESDS 或组件的引线时（通常为不同电位），身体便会放电，极可能造成静电放电损害。此种损害模式称为「人体模型」(HBM)。放电也可发生在带电的导电物体上，例如金属工具或配件。此种事件就其放电性质，称为「机器模型」(MM)。

从器件放电

电荷从 ESDS 移转至导体也是一种 ESD 事件。处理封装材料、工作表面，或机器表面时，或与其接触后分离，静电荷即可累积在 ESDS 本身。这情形经常发生于器件在某个平面上移动或在包装内振动时。电荷从 ESDS 上移转称为「带电器件模型」(CDM)。其所牵涉的电容、能量和电流波形，完全不同于放电至 ESD 敏感物体之情形，当然也就产生不同的故障模型。

自动化组装趋势似可解决 HBM ESD 事件所造成的问题。事实上，由自动化设备来进行组装，部分零组件可能对损害更为敏感。举例来说，某件器件从馈线滑下时可能已带电，若它接着与工作头或任何其它导电表面接触，便会立即放电到该金属物上。

电场感应放电

另一种直接或间接破坏器件的静电带电过程称为「电场感应」。如前所述，任何物体经静电带电后，电荷便建立了静电场。若将 ESDS 放置于静电场，电荷便感应至该物体上。若该物体接着在静电场范围内接地，电荷便被移出，发生「CDM 事件」。若该物体离开静电场范围并重新接地，就会发生第二次的 CDM 事件，因为此时的电荷（与第一次的极性相反）亦被移出。

ESD 的防护规模为何？

ESDS 因 ESD 事件引致的受损程度，取决于其放电能量消散能力或耐受电压水平，如前所述，这些因素进而决定零件的 ESD 敏感度。依各 ESD 事件模型进行测试有助于了解零组件的 ESD 敏感度。尽管测试过程中的放电与真实世界的 ESD 事件，两者间并没有直接关连性，惟确认了电子组件的 ESD 敏感度后，就可对 ESD 的防护规模提供适当指引。有关这些测试流程，本系列第五部分有更详细的说明。

ESD 耐受电压之定义：「不会引起器件故障的最高电压水平；器件可通过所有低电压测试」。在相对较低的电压水平下，许多电子组件都对 ESD 损害敏感或易感，不少是在低于 100 伏特时便敏感，一些磁盘驱动器零组件的耐受电压更低于 10 伏特。目前的产品开发设计，趋向将更多的集成电路植入微型器件，进一步提高其 ESD 敏感度，使潜在问题变得更为严重。表 3 为各类组件的 ESD 敏感度。

表3 代表性电子器件的ESD敏感度 器件或零件对人体模型（HBM）与带电器件模型（CDM*）的敏感度	
器件或零件类型	
微波设备（肖特基势垒二极管，点接触二极管，以及其它>1千兆赫的检波二极管）	
分离式金属氧化物半导体场效应晶体管设备	
表面声波（SAW）设备	
结面场效应晶体管（JFETs）	
电荷耦合设备（CCDs）	
精密稳压二极管（负载电压调节线，<0.5%）	
运算放大器（OP AMPs）	
薄膜电阻	
集体电路	
巨磁阻效应（GMR）和新科技的磁盘驱动器读取头	
雷射二极管	
混合动力车	
特高速集体电路（VHSIC）	
硅控整流器（SCRs），输出电流<0.175安培，环境温度10°C	
*特定敏感度可查阅供货商数据表	

总结

在「**静电放电 (ESD) 简介**」部分，我们讨论了静电带电和放电、创造电荷的机制、各种材料、ESD 损害类型、各种 ESD 事件，以及 ESD 敏感度等。以下为本部分结论：

1. 几乎所有材料，包括各种导体，均可摩擦生电。
2. 电荷量受材料类型、接触和分离的速度、湿度，以及其它因素所影响。
3. 带电物体具有静电场。
4. 静电放电会造成器件损害，并使参数立即失效；ESD 损害亦可能只造成不利于检测时发现的潜伏性缺失，也可能导致器件过早发生故障。
5. 静电放电可能会发生在整个制造、测试、运送、装卸、及操作等过程中，甚或是发生于投入现场服务的作业期间。
6. ESD 损害也可能是对器件放电、从器件放电，抑或是静电场电荷移转等情形所造成的结果。各种器件的 ESD 敏感度均不同。

为保护产品不受 ESD 损害，应先了解静电带电和放电的基本概念。有效的 ESD 控制方案端赖有效的培训方案，所有参与人员均需具备关键性的基础观念。有关 ESD 控制的基本概念见第二部分。

参考书目

- **ESD-ADV 1.0, Glossary (静电放电协会专有名词表)**, ESD Association, Rome NY.
- **ESD TR20.20, Handbook (静电放电手册)**, ESD Association, Rome, NY.
- **ESD ADV 11.2, Triboelectric Charge Accumulation Testing (摩擦生电累积测试)**, ESD Association, Rome, NY.
- **ANSI/ESD S20.20—Standard for the Development of Electrostatic Discharge Control Program (静电放电控制方案建立标准)**, ESD Association, Rome, NY.