



北京航空航天大学
BEIHANG UNIVERSITY



可靠性与系统工程学院

元器件质量与可靠性保证

主讲教师：万 博

Email: wanbo@buaa.edu.cn

2023年04月



元器件质量保证中心

C 本节内容 CONTENTS

第九讲：静电放电损伤及防护

一、静电的产生

二、静电源

三、静电放电模型

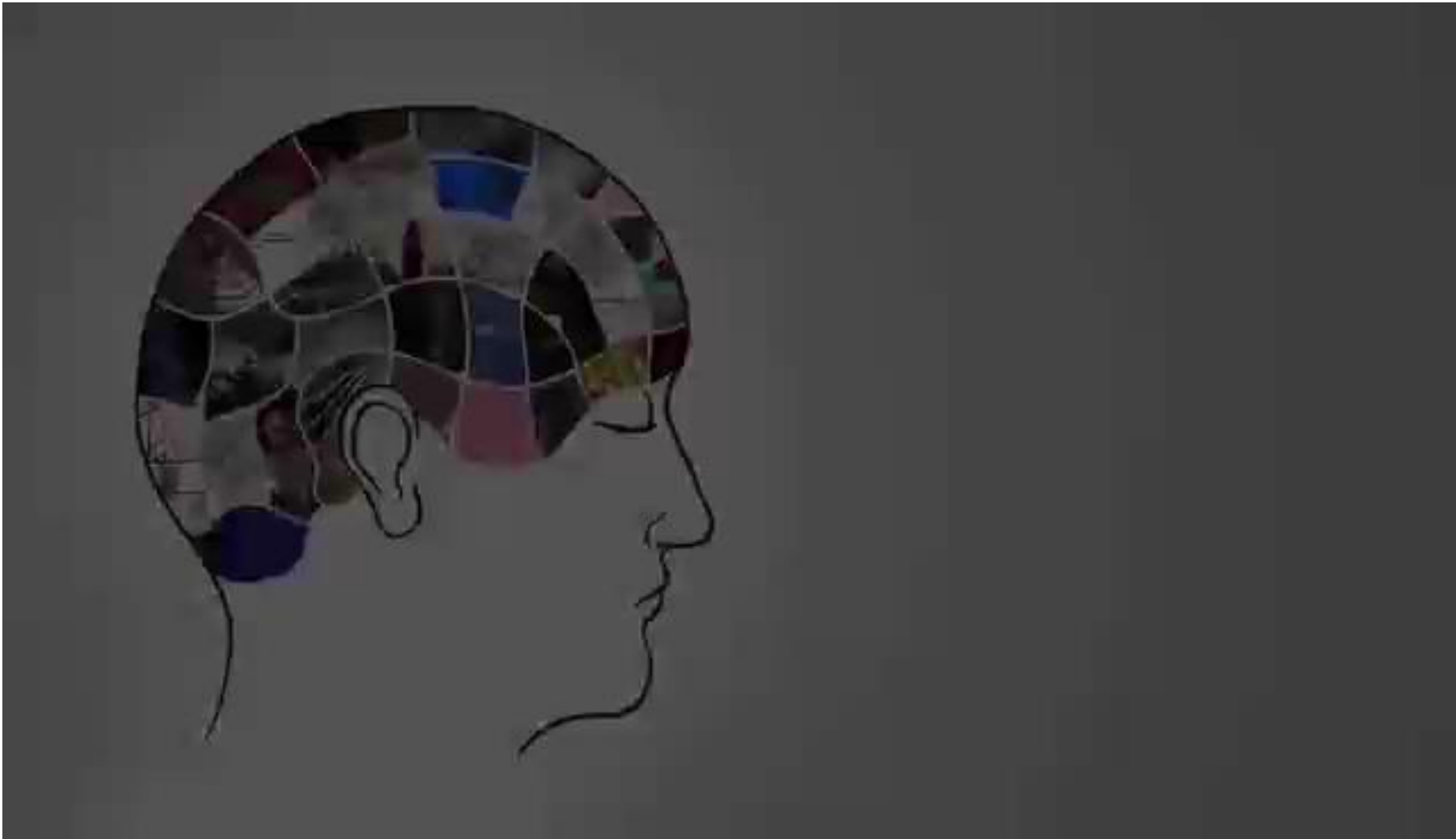
四、半导体器件对静电放电的敏感度

五、静电放电损伤的特点、失效模式和失效机理

六、静电防护

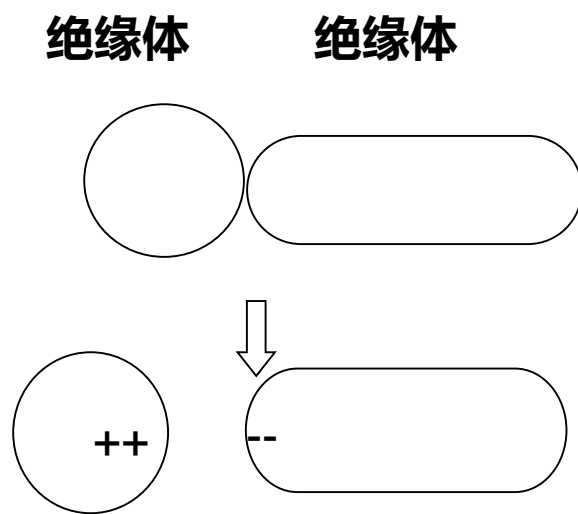


一、静电的产生

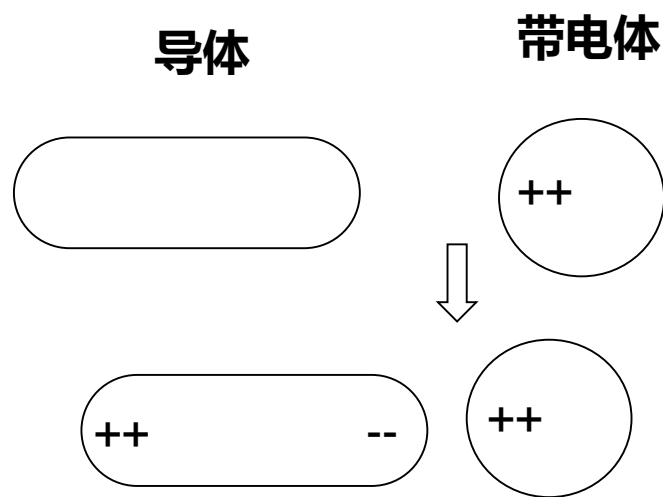


一、静电的产生

- ❑ **静电**是指物体所带电荷处于**静止**或**缓慢变化**的**相对稳定**状态。
- ❑ 特点是**高电位****小电量**。
- ❑ 物体摩擦带电——绝缘体之间
- ❑ 固体感应带电——导体之间



摩擦生电



感应生电

一、静电的产生

□ 摩擦生电

当两种具有不同的电子化学势或费米能级的材料相互接触时，电子将从化学势**高**的材料向化学势**低**的材料转移。当接触后又快速分离时，总有一部分转移出来的电子**来不及返回**它们原来所在的材料，从而使化学势低的材料因电子过剩而带**负电**，化学势高的材料因电子不足而带**正电**。

产生静电的大小除与摩擦物体本身的材料性质有关，还要受到许多因素的影响，如摩擦的**面积**、**速度**、**接触压力**、**表面洁净度**和**环境条件**等，分离**速度越快**，接触**面积越大**，摩擦产生的**静电荷越多**。



一、静电的产生

常见材料摩擦生电顺序

序号	材料	序号	材料	序号	材料	序号	材料
	正 (+)						
1	人的手	9	毛皮	17	琥珀	25	明胶奥纶聚酯
2	石棉	10	铅	18	封蜡	26	聚安脂
3	兔毛	11	丝织品	19	硬橡皮	27	聚乙烯
4	玻璃	12	铝	20	镍、铜	28	聚丙烯
5	云母	13	纸	21	黄铜、银	29	聚氯乙烯
6	人的头发	14	棉花	22	金、铂	30	聚三氟绿化乙烯聚合物
7	尼龙	15	钢	23	硫磺	31	聚四氟乙烯
8	羊毛	16	木材	24	醋酸人造纤维		负 (-)

一、静电的产生

□ 感应生电

当一个导体靠近带电体时，会受到该带电体形成的静电场的作用，在靠近带电体的导体表面感应出异种电荷，远离带电体的表面出现同种电荷。尽管这时导体所带净电荷量仍为零，但出现了局部带电区域。

非导体不能通过感应产生静电。



一、静电的产生

□ 湿度对静电的影响

静电的产生及其大小与**环境湿度**和空气中的**离子浓度**也有密切的关系。在高湿度环境中，由于物体表面吸附带有一定数量杂质离子的水分子，形成弱导电的**湿气薄层**，提高了绝缘体的**表面电导率**，可将静电荷散逸到整个材料的表面，从而使**静电势降低**。

例如，北方地区或干燥的冬季，静电现象严重，通过加湿予以改善。

□ 材料和杂质对静电的影响

材料的**电阻率**，包括固体材料的**表面电阻率**对于**静电泄漏**有很大影响。只有**容易得失电子**，且**电阻率很高**的材料才易产生和积累静电。生产中常见的乙烯、丙烷、丁烷、**原油、汽油**、和塑料等都比较**容易**产生和积累静电。

杂质对静电的影响很大程度上取决于所含杂质的**成分**。一般状况下，杂质有**增加静电的趋势**；但如杂质能**降低**原有材料的**电阻率**，则加入杂质**有利于静电的泄漏**。

C 本节内容 CONTENTS

第九讲：静电放电损伤及防护

一、静电的产生

二、**静电源**

三、静电放电模型

四、半导体器件对静电放电的敏感度

五、静电放电损伤的特点、失效模式和失效机理

六、静电防护



二、静电源

对电子元器件产生影响的静电源——**人体静电**、**尘埃静电**

□ 人体静电

人在活动过程中，衣服、鞋以及所携带的用具与其它**材料摩擦**或**接触**、**分离**时，即可产生静电。

人体活动范围大，很容易与带有静电荷的物体接触或摩擦而带电，同时也有许多机会将人体自身所带的电荷转移到器件上或者**通过器件放电**。而人体静电又容易被人们忽视，所以人体静电放电往往是引起**半导体器件的静电损伤**的主要原因之一，它对半导体器件的**危害最大**。



二、静电源

□ 人体静电

人体的电阻较低，如手到脚之间的电阻只有几百欧姆，人体处于静电场中也容易感应起电，而且人体某一部分带电即可造成全身带电。

人体静电电压与人体电容成反比，电容越小，电压越高。人体对地电容的60%是脚底对地电容，典型值为150pF，少量的人体静电荷即可导致很高的静电势。

人员操作速度越快，人体静电电压越高；空气湿度越低，人体静电电压越高。



二、静电源

□ 人体静电

人体活动	静电电压(V)	
	相对湿度10~20%	相对湿度65~90%
在合成纤维地毯上走动	35,000	1,500
在聚乙烯地板上走动	12,000	250
在工作台上操作	6,000	100
翻动说明书的乙烯树脂封面	7,000	600
从工作台拾起普通聚乙烯袋	20,000	1,200
坐在垫有聚氨酯泡沫材料的工作椅上	18,000	1,500
在塑料工作台上滑动塑料盒	18,000	1,500
从印制电路板上拉下胶带	12,000	1,500
用氟里昂喷洒清洗电路或电路板	15,000	5,000

二、静电源

□ 尘埃静电

尘埃在空气中无处不在，空气中的大多数尘埃被静电充电。当尘埃最初脱离它所依附的材料时，这时静电荷可能产生，或者当它被吹过一个表面时，它可能获取电荷。所以，尘埃是悬浮在空气中的、**并且是移动的多电荷粒子**，对任何静电场都会起反应。

在芯片的制造工序中，因尘埃静电受到影响的工序主要集中在：**光刻（刻蚀）、外延和氧化**工序等几个工序中。



半导体无尘净化车间

C 本节内容 CONTENTS

第九讲：静电放电损伤及防护

一、静电的产生

二、静电源

三、静电放电模型

四、半导体器件对静电放电的敏感度

五、静电放电损伤的特点、失效模式和失效机理

六、静电防护



三、静电放电模型

□ 静电放电

两个具有不同静电电位的物体，由于**直接接触或静电场感应**而引起的两物体间静电电荷的**转移**，这称之为**静电放电**。如果带电体是通过**半导体器件来放电**，就可能会给器件带来损伤，甚至**导致器件失效**。对于微电子器件而言，通常有**三种放电形式**，三种基本模型：

人体模型 充电器件模型 机器模型

□ 1. 人体静电放电模型 (Human Body Model)

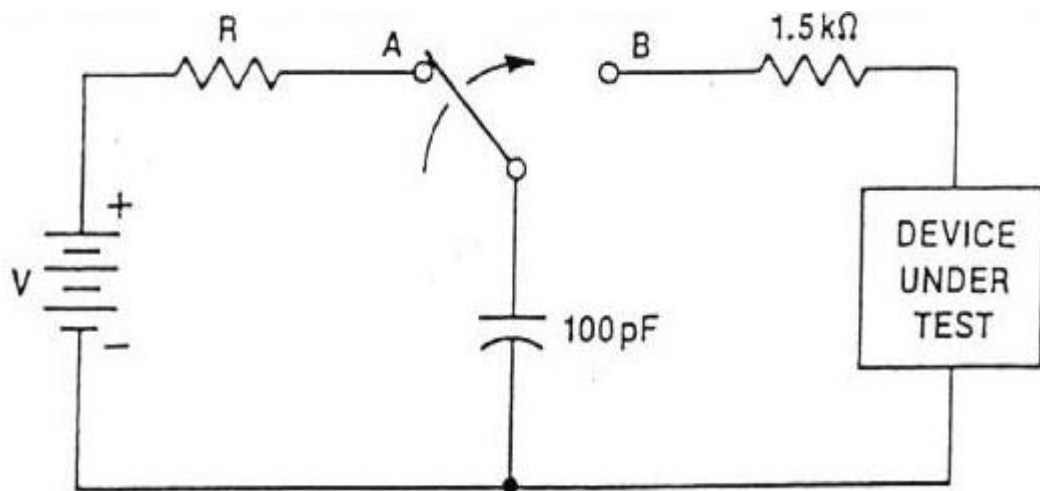
因人体在地上走动磨擦或其它因素在人体上已累积了静电，当此人去碰触到器件时，静电便会经由器件的**引脚**而进入**芯片或组件**内，再经由**芯片或组件**放电到地（GND）**引脚**去。

此放电的过程会在短到**几百纳秒(ns)**的时间内产生**数安培**的瞬间放电电流，此电流会**芯片或组件**给击穿或烧毁。

对一般微半导体器件的**2000V ESD** 放电电压，其瞬间放电电流的**尖峰值大约是1.33 安培**。

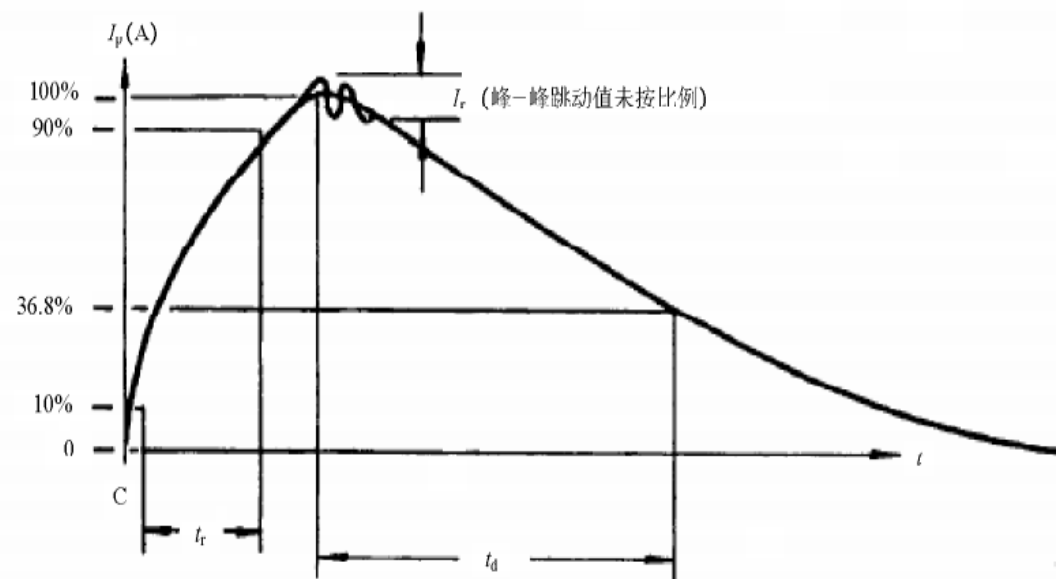
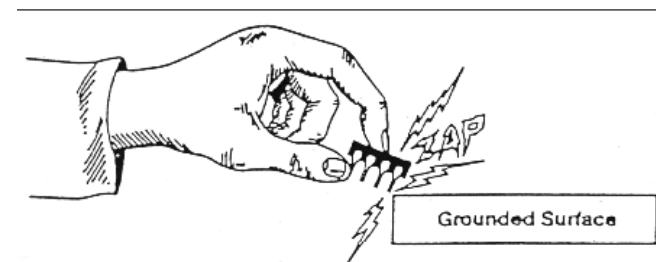
三、静电放电模型

1. 人体静电放电模型 (HBM)



HBM模型等效电路图

- 开关接至左侧，充电即人体带电
- 开关接至右侧，人体向器件放电



此模型普遍采用，并作为评估半导体器件ESD敏感度的标准。

三、静电放电模型

□ 1. 人体静电放电模型 (HBM)

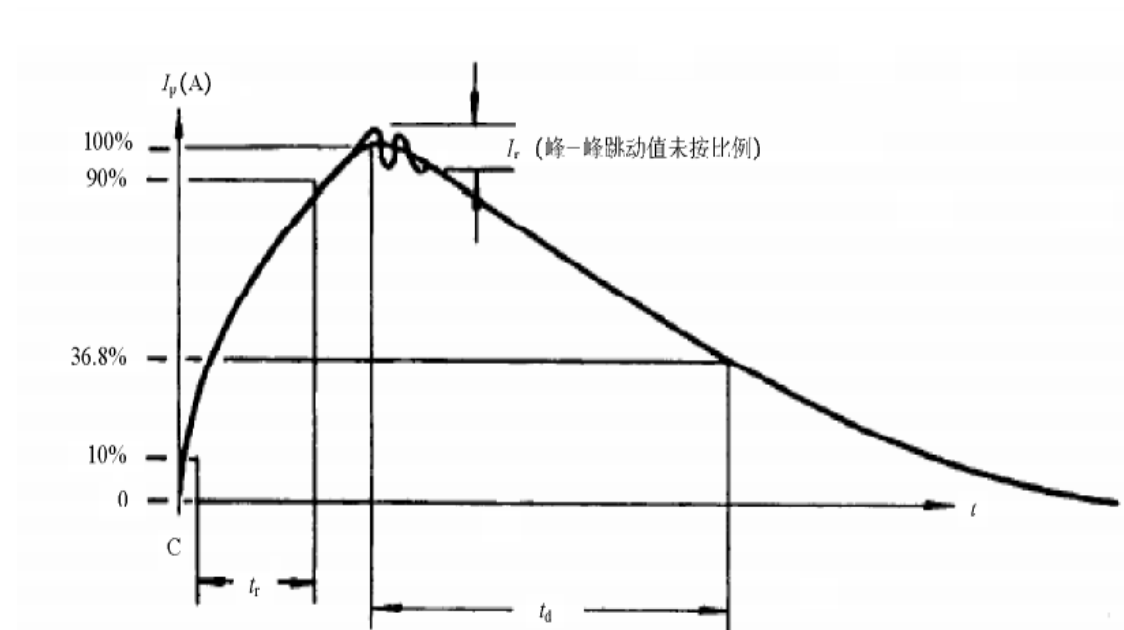
人体模型是较早提出使用广泛的ESD试验模型

放电电流上升时间 t_r 约为2ns~10ns

延迟时间 t_d 在150ns±20ns

脉冲宽度在130ns~170ns之间

峰值电流一般小于5A

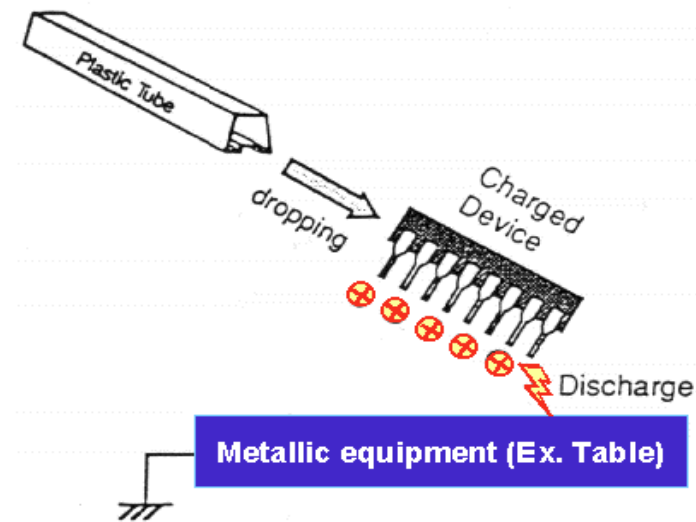


三、静电放电模型

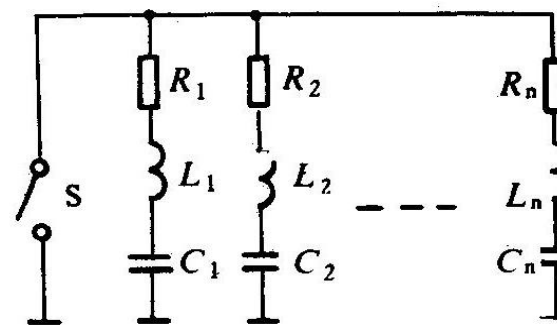
❑ 2. 充电器件放电模型 (Charge Device Model, CDM)

充电器件模型是当**静电荷在未通电**的集成电路器件**上积聚**，当带有**静电的器件的管脚与地接触时**，将通过**管脚对地放电引起器件失效**，这种形式的放电为**带电器件模型CDM模型**。

当带电器件有几个管脚同时与地接触时，就有几个放电通路，分别用 R_i - L_i - C_i 表示。若在放电过程中，各个通路的放电特性不同，就会引起相互之间的电势差，**这电势差也会造成器件的损坏**，如**栅介质击穿**等。



带电器件放电



MOS器件CDM模型的等效电路

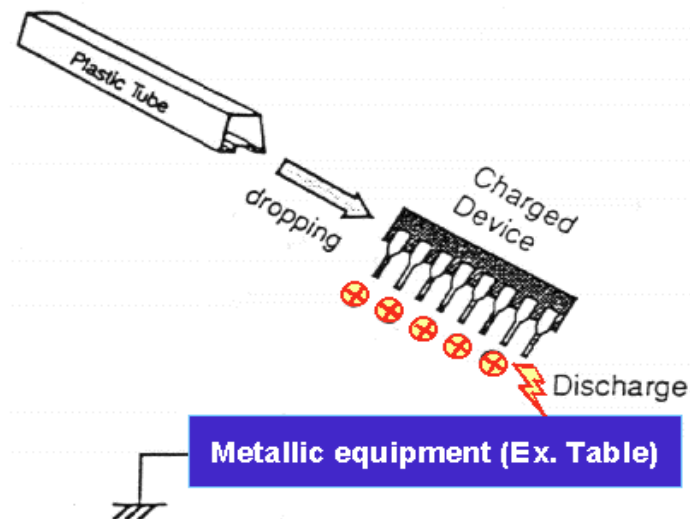
三、静电放电模型

❑ 2. 充电器件放电模型 (Charge Device Model, CDM)

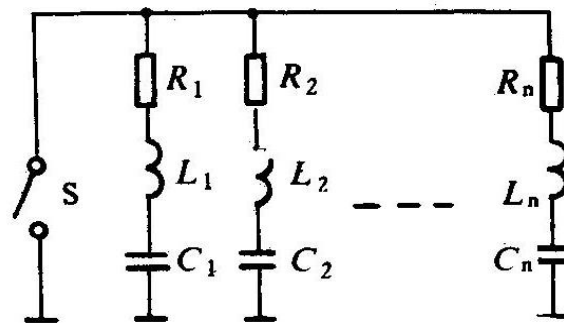
在现代集成电路制造、封测、运输、组装时（人因外）易发生CDM静电放电场景，主要分为摩擦充电放电与电场充电放电两类。

摩擦带电：在输送管内滑动的器件；从磁带或托盘中拾取；剥离胶带和卷轴；从显示设备或电荷耦合器件等电子设备的表面上取下保护膜。

电场充电：激光打标设备中的橡胶辊产生高电场；在自动化PCB组装操作期间，盖带会迅速从卷带式器件上移除。



带电器件放电



MOS器件CDM模型的等效电路

三、静电放电模型

❑ 2. 充电器件放电模型 (Charge Device Model, CDM)

集成电路静电放电主流的人体模型与充电器件模型有着**显著的差别**

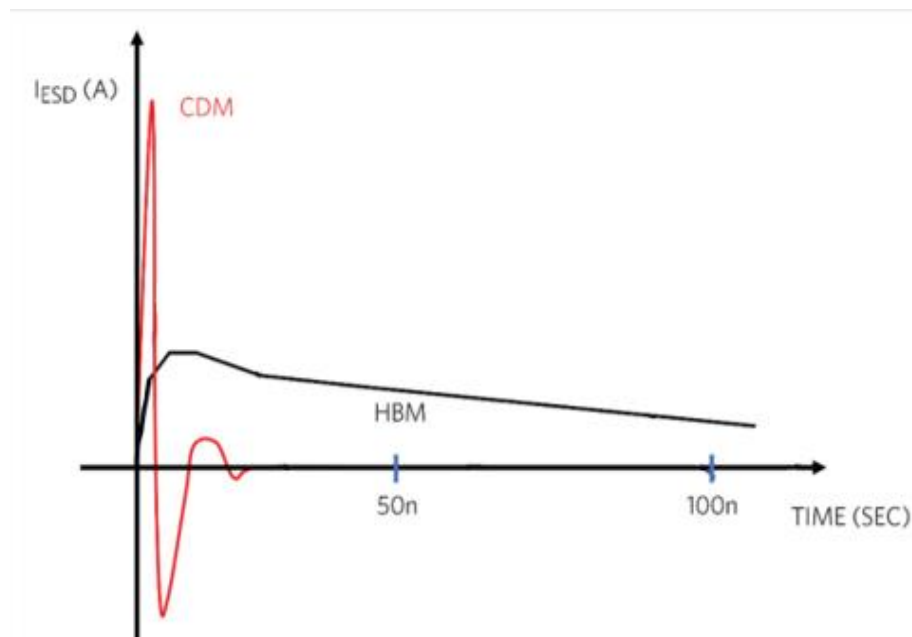
CDM波形是**振荡衰减**的，而HBM事件主要是阻尼双指数衰减。

上升时间一般小于**450ps**

脉冲宽度在**250ps~1000ps**之间

峰值电流范围为**10A左右**

250VCDM峰值电流超过**1000V**HBM事件的峰值电流约**9倍**

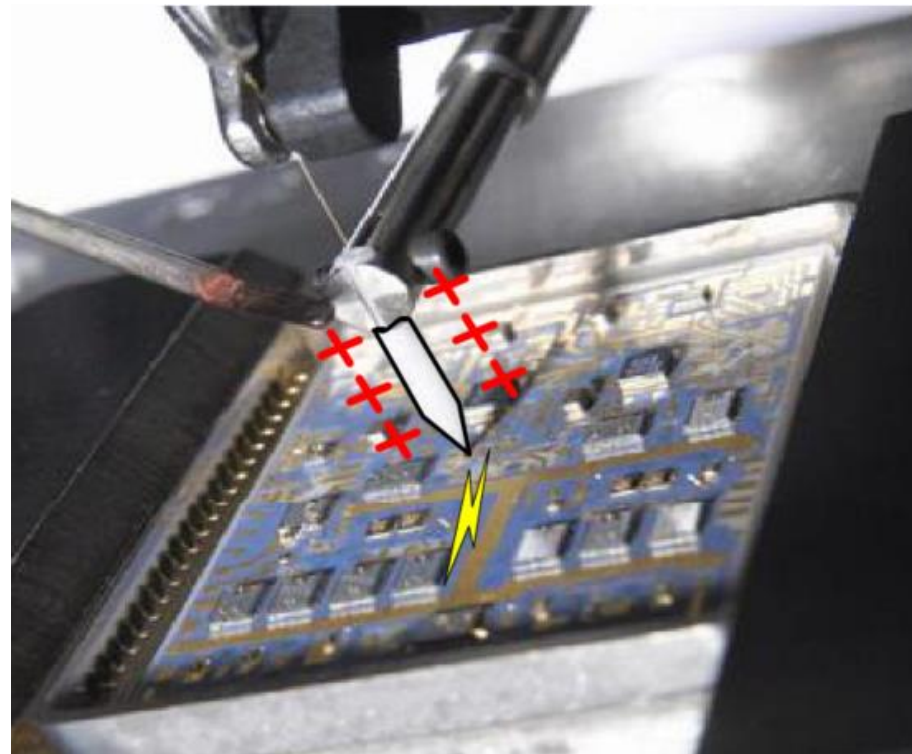


三、静电放电模型

❑ 3. 机器模型（Machine Model, MM）

机器模型是指当**带电的导体源**（如金属工具或机器）接触电子元件时产生的静电放电。机器模型MM模型广泛应用于汽车电子制造领域。

在芯片的**制造、封装**等过程，若参与的机器本身带有一定量的静电荷，机器的机械臂接触到芯片的管脚时，就会形成“**机器-芯片-地**”的放电通路，电荷就会沿着这样的放电通路进行转移，这种形式的放电为**机器模型MM模型**。



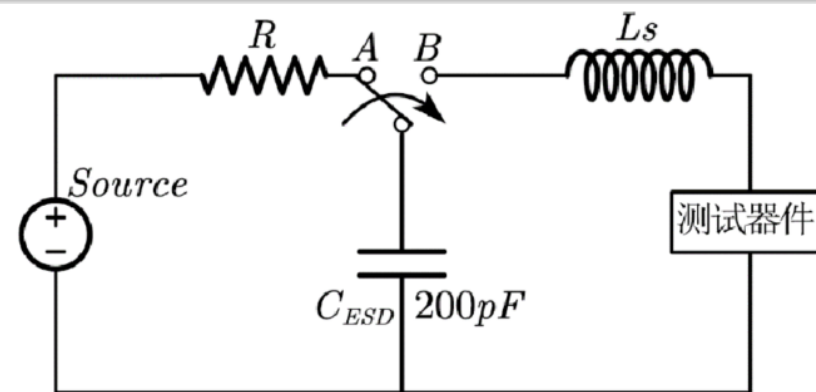
带电机机器向芯片放电

三、静电放电模型

❑ 3. 机器模型 (Machine Model, MM)

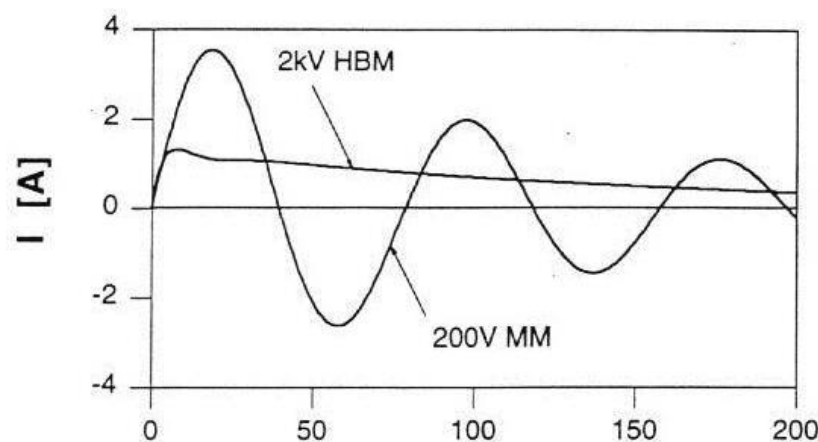
机器模型的等效电路模型与HBM人体模型相似，但其等效电容为200pF，等效电阻为0Ω。由于大多数机器是由金属制成，放电时为机器金属部件与芯片金属引脚的接触，因此接触电阻很小；且一般机器的电容远大于人体电容。

因此会在等效电容上储存更多的静电荷，不但放电速度更快，相比HBM放电电流也大数倍，在几纳秒和几十纳秒之内会有数安培的瞬间放电电流产生。同时考虑寄生电感的影响，放电电流会呈现出指数衰减振荡。



MM模型等效电路图

- 开关接至左侧，充电即人体带电
- 开关接至右侧，人体向器件放电



MM和HBM放电电流对比

三、静电放电模型

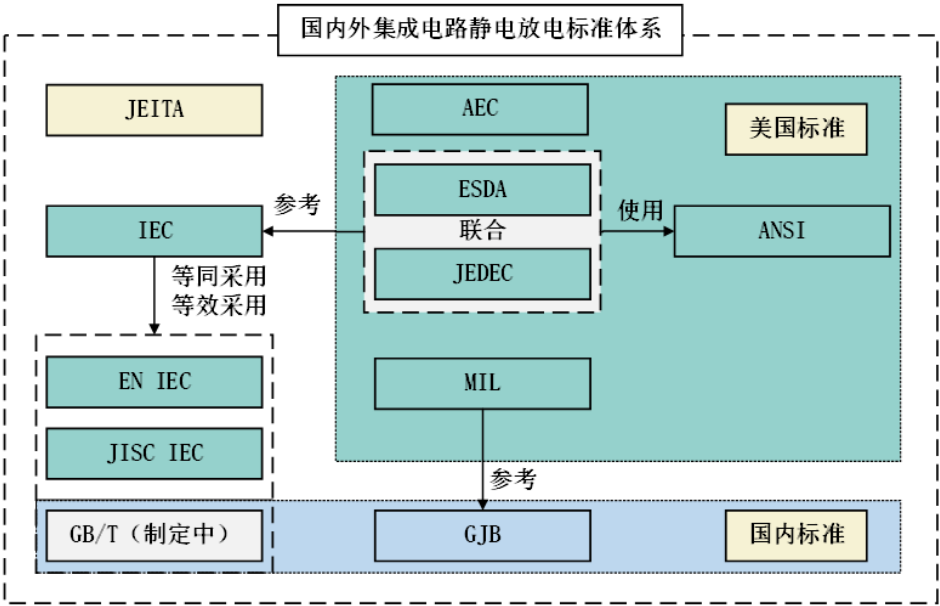
❑ 元器件静电放电模型（试验方法）对应的试验标准

国家/行业组织	标准号	相关模型	最新版发布日期
IEC	IEC 60749	HBM、MM、CDM	2018、2012、 2021
欧洲	EN 61340 EN 60749	HBM、MM、CDM	2007、2007 2018、2012、2017
美国	ANSI/ESDA/JEDEC JS	HBM、CDM	2017、2018
日本	JIS C61340	HBM、MM	2010、2011
中国	GB/T 37977	HBM、MM	审查、2019
GJB	548B/548C	HBM	2021
MIL	883L	HBM	2019
ESDA/JEDEC	ANSI/ESDA/JEDEC JS	HBM、CDM	2017、2018
AEC	Q100	HBM、CDM	2013、2019
JEITA	ED-4701/302A	HBM、CDM	2020
中国航天工业	QJ 1875A	HBM	1998

三、静电放电模型

❑ 静电放电试验方法的标准现状

- 静电放电试验标准由美国主导制定
- 国内静电放电试验方法标准存在不足
- 静电放电试验方法标准不断更新发展



标准\模型	HBM	MM	CDM
GJB 548方法3015	引脚优化分组方法简略 指导性不强	空缺	空缺
以美国为主导的 国外其他标准	发展多年，涵盖全面， 技术先进	发展多年，逐渐取消	关注度高，仍在发展
国内外学术前沿	大规模集成电路管脚 组合优化技术	研究较少	基于CC-TLP的 CDM试验技术

C 本节内容 CONTENTS

第九讲：静电放电损伤及防护

一、静电的产生

二、静电源

三、静电放电模型

四、半导体器件对静电放电的敏感度

五、静电放电损伤的特点、失效模式和失效机理

六、静电防护



四、半导体器件对静电放电的敏感度

❑ 静电放电的敏感度

静电敏感度实质上是器件**抗静电应力**的度量，其用于定量描述不同元器件对静电的**敏感程度**。按器件抗静电能力的大小可分为**静电放电敏感性器件**和**非敏感器件**。

❑ 失效阈值

器件所能抗受的**最大静电电压**。它是由器件的结构、输入端静电保护电路的形式、版图设计、制造工艺等所决定的。

❑ 测定静电失效阈值的方法

在**MIL-STD-883**的方法3015和**GJB548**方法3015中规定了对微电路的静电敏感度(ESDS)进行测试的方法与分类的程序。

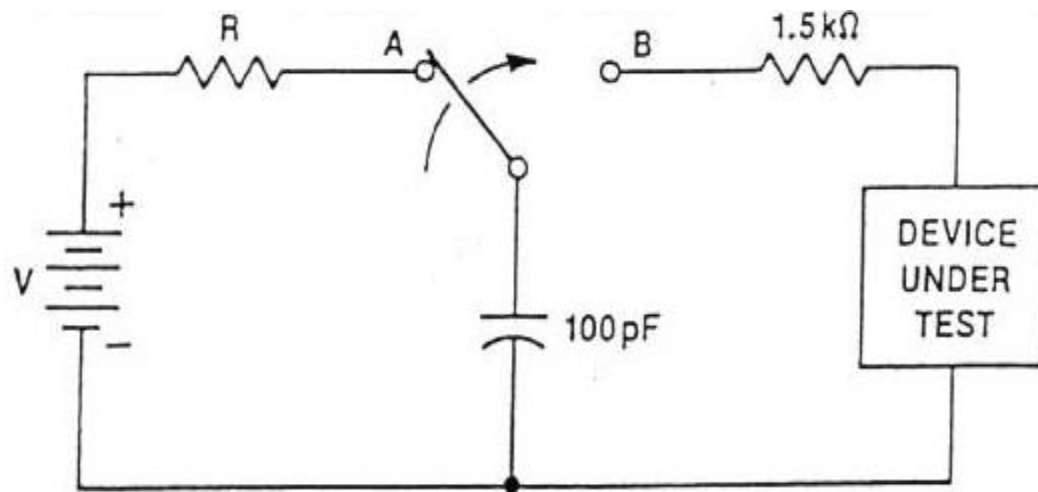
四、半导体器件对静电放电的敏感度

□ 测定静电失效阈值的方法

采用人体静电放电模型，如右图。

测定失效阈值基本方法如下：

- 调节电源电压从低到高，重复进行下面操作：
- 开关S接到A，通过电源对电容充电；
- 将开关S接到B，向器件放电；
- 对器件进行测试，检查器件经ESD后是否失效；
- 所能**通过的最高档电压**就为器件的ESD失效阈值。



四、半导体器件对静电放电的敏感度

□ 测定静电失效阈值的方法

静电敏感度测试仪

- 512 通道
- 能够根据GJB548方法3015、GJB128方法1020、JS-001、JEDEC、JEITA、EIA/JESD 78等标准
- 人体模式（HBM）和机器模式（MM）
- HBM：0-8KV；MM模式：0-4KV
- 闩锁测试电流能力： $\geq 1\text{A}$ ；闩锁测试钳位电压范围：1-100V



四、半导体器件对静电放电的敏感度

元器件的ESD失效阈值分类级别
(GJB548B-2005)

级 别	静电敏感电压范围
0级	<250V
1A级	250V ~ 499V
1B级	500V ~ 999V
1C级	1000V ~ 1999V
2级	2000V ~ 3999V
3A级	4000V ~ 7999V
3B级	≥8000V

四、半导体器件对静电放电的敏感度

❑ 静电敏感度标志

静电敏感的元器件采用一定的符号作为标志。标志应尽可能打印在器件的外壳上，打在外壳上的标志通常是“ Δ ”，1级用1个 Δ 标志；2级用2个 Δ ($\Delta\Delta$)标志；3级无标志。对于外壳太小的器件，也可标志在包装盒或包装箱上。在仓库中储存静电敏感元器件的箱柜上也可打上静电敏感元器件的标志。



静电敏感标志

四、半导体器件对静电放电的敏感度

❑ 静电敏感度标志



一级静电敏感器件

C 本节内容 CONTENTS

第九讲：静电放电损伤及防护

一、静电的产生

二、静电源

三、静电放电模型

四、半导体器件对静电放电的敏感度

五、静电放电损伤的特点、失效模式和失效机理

六、静电防护



五、静电放电对电子元器件的损伤特点

静电损伤是一种**偶然事件**，一般讲是与时间无关的，所以不能通过老炼等筛选方法加以**剔除**，相反，在老炼过程中，由于器件接地不良、不适当地传递或与老炼设备不适当地连接等反而会提高ESD失效的百分比。

- ❑ 损伤的隐蔽性
- ❑ 失效的复杂性
- ❑ 损伤的潜在性
- ❑ 损伤的随机性

五、静电放电对电子元器件的损伤特点

❑ 损伤的隐蔽性

在静电放电造成电子产品的损伤当中，**活动的人体带电是一个重要原因**。一般情况下，人体所带静电电位都在1~2kV范围，而在此电压水平静电放电人体一般并无直观觉察，而电子元器件却在人们不知不觉中受到损伤。**ESD损伤不易发现**，很容易被人们忽视。

❑ 失效(分析)的复杂性

静电放电损伤的失效分析工作较为困难，一些**静电放电损伤现象难以与其他原因造成的损伤相区分**，使人误把静电损伤失效当作其他失效。因此在对静电放电损害未充分认识之前，常常归因于**早期失效或情况不明的失效**，从而不自觉地**掩盖了失效的真正原因**。

五、静电放电对电子元器件的损伤特点

❑ 损伤的潜在性

有些电子元器件受静电放电损伤后，当尚未达到完全失效的程度，则仅表现出产品某些性能参数的下降，如不进行全面地检测往往无法发现。例如数字电路在静电放电损伤后输入电流的增加，在电路功能测试时一般不会出现；或者静电放电使产品出现可自愈的击穿或其他非致命的损害，但这种效应可以积累，从而形成潜在隐患。在继续使用的情况下损伤器件可发生致命失效，既难以预料又不可能事先筛选。

❑ 损伤的随机性

只要电子元器件接触和靠近超过其静电放电敏感电压阈值的情况存在，就有可能发生静电放电损伤，而由于静电可以在任何两种(包括人体)接触分离的条件下产生，故电子元器件的静电放电损伤有可能在产品从加工到使用维护的任一环节、任一步骤、与任何有关带电人体(或物体)接触时发生，具有很大的随机性。

五、静电放电对电子元器件的损伤特点

- 器件在200V的低电压下也能受到损坏
 - 我们能感觉到的ESD电压 $>3000\text{V}$,
 - 我们能听到的ESD电压 $>6000\text{V}$,
 - 我们能看到的ESD电压 $>8000\text{V}$.
-虽然我们不能觉察,但是器件能已经受损

五、静电放电对元器件损伤的失效模式和失效机理

□ 静电放电失效

静电放电的失效机理可分为过电压场致失效和过电流热致失效，可简称为电压型、电流型（功率型）两种。电压型主要会造成：介质击穿、气体的电弧放电、表面击穿等。电流型会造成热二次击穿、金属化层的融化、体击穿等。

电子元器件ESD失效模式基本上可分为两类：

硬失效——击穿、破坏失效，突发性完全失效

软失效——潜在性缓慢失效

五、静电放电对元器件损伤的失效模式和失效机理

❑ 突发性完全失效

发性完全失效是器件的一个或多个参数突然劣化，完全失去规定功能的一种失效，通常表现为开路、短路以及电参数严重漂移。一种是与电压相关的失效，如介质击穿，PN结反向漏电增大、铝条损伤等。另一种是与功率有关的失效，如铝条熔断、多晶电阻熔断、硅片局部区域熔化。

❑ 潜在性缓慢失效

潜在性缓慢失效是指器件经受ESD应力后，功能正常、常规参数也未严重超差，而实际器件已受到潜在性损伤，并且在器件随后的使用过程中会随时转化为完全失效。潜在性失效降低了器件抗静电的能力，降低了器件的使用可靠性。主要表现为：栅氧化层损伤、栅氧化物愈合或短路、保护电路受损、电荷陷阱、PN结衰减等。

五、静电放电对元器件损伤的失效模式和失效机理

元器件类型	被损伤的结构	失效机理	失效模式
MOS场效应晶体管 数字集成电路(双极型和MOS) 线性集成电路(双极型和MOS) 混合电路 MOS电容器	MOS结构	由于过电压和随之而来的大电流造成的介质击穿	短路 (漏电流增大)
二极管(PN、PIN、肖特基) 结型场效应晶体管 MOS场效应晶体管 闸流晶体管 双极型集成电路(数字和线性) MOS集成电路的输入保护电路	半导体结	由于能量过大或过热引起微等离子区二次击穿造成的微扩散； 硅和铝扩散(电迁移)使电流增大	参数漂移或失去二极管或晶体管的功能
混合电路中的厚、薄膜电阻器 单片集成电路中的薄膜电阻器	薄膜电阻器	介质击穿、随电压增加产生新的电流通路；与焦尔热能有关的破坏性的微小电流通路	电阻漂移
混合电路 单片集成电路	金属化条	与焦尔热能有关的金属化条烧毁	开路
用非石英或陶瓷外壳封装的大规模集成电路和存储器尤其是对紫外线敏感的EPROM	场效应结构和非导电外壳	由于ESD在表面上积存的离子引起表面转化或栅极阈值电压漂移	工作性能降低
晶体振荡器 声表面波器件	压电晶体	当静电电压过大时由于机械力使晶体碎裂	工作性能降低
声表面波器件 非金属外壳、芯片表面未钝化的半导体器件	间距很近的电极	电弧放电软化和熔化电极金属	工作性能降低

五、静电放电对元器件损伤的失效模式和失效机理

❑ 静电放电失效的检测分析方法

➤ 电气测试方法：

参数分析仪测试（电源电流、传播延迟、上升时间、下降时间）

I-V特性曲线测试

传输线脉冲TLP测试

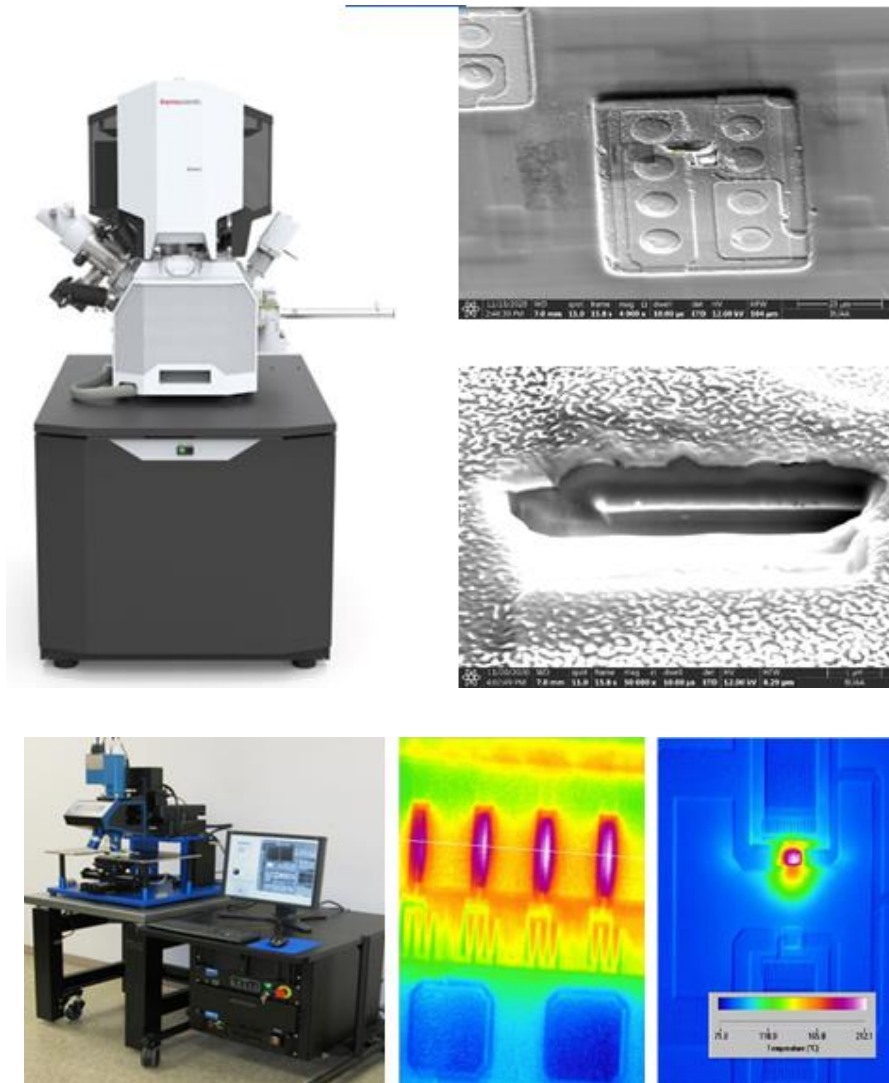
阻抗特性测试

➤ 非电气测试方法：

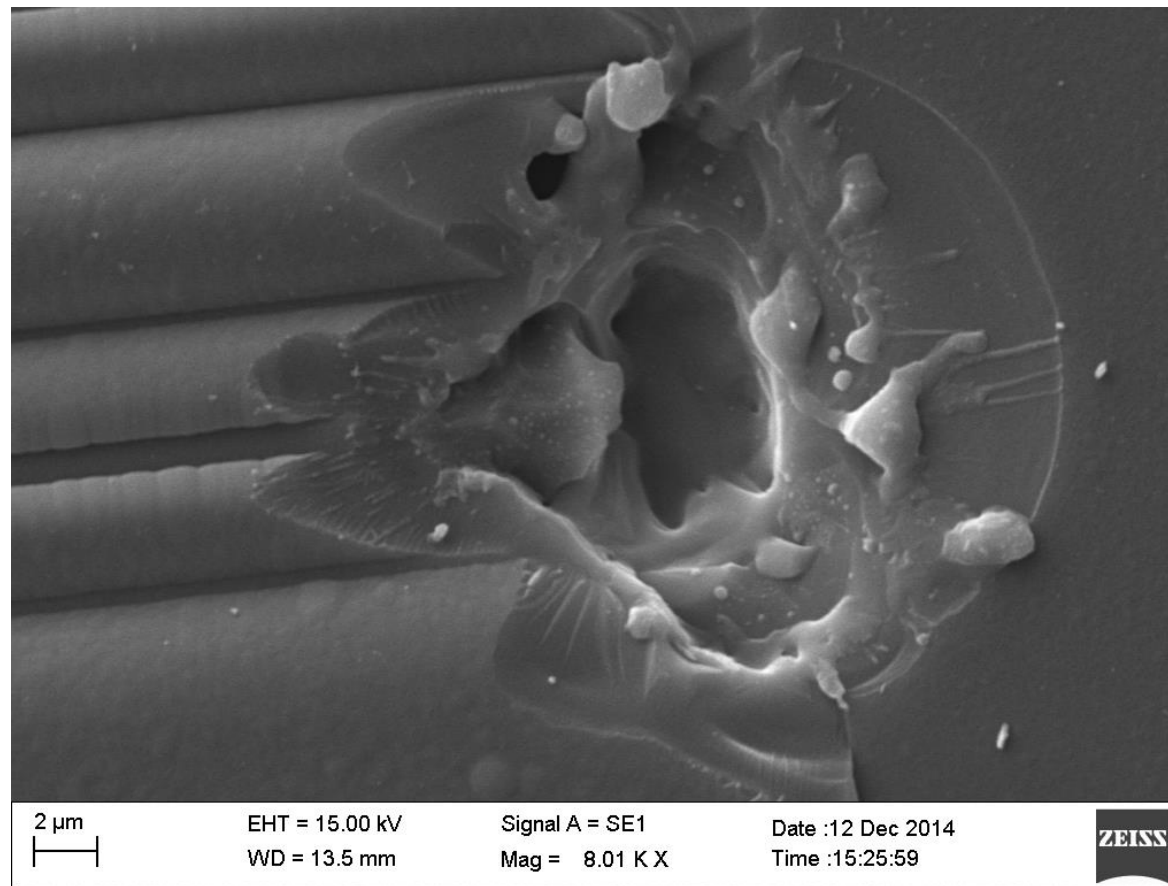
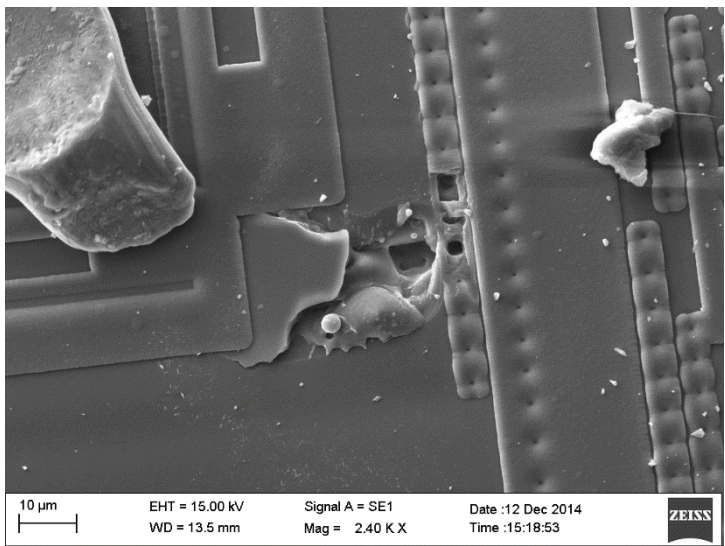
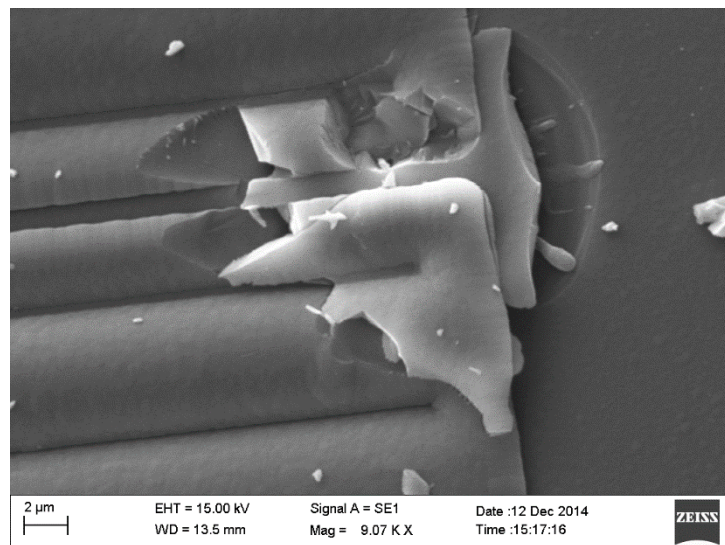
光学显微镜

扫描电子显微镜（SEM）

微光发射显微镜（EMMI）

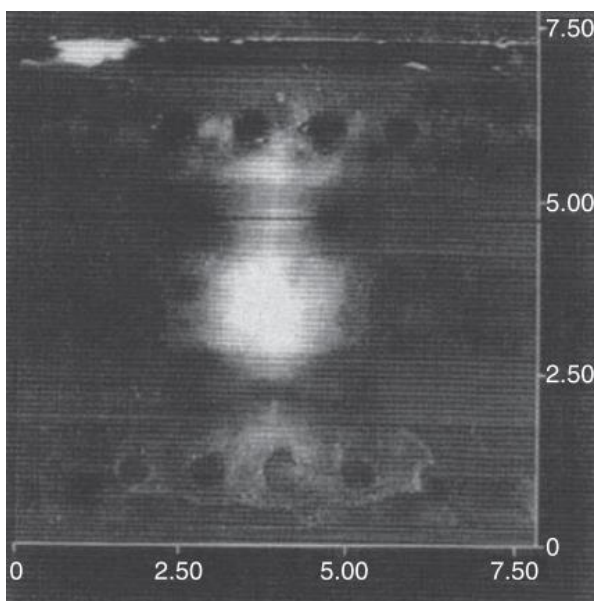
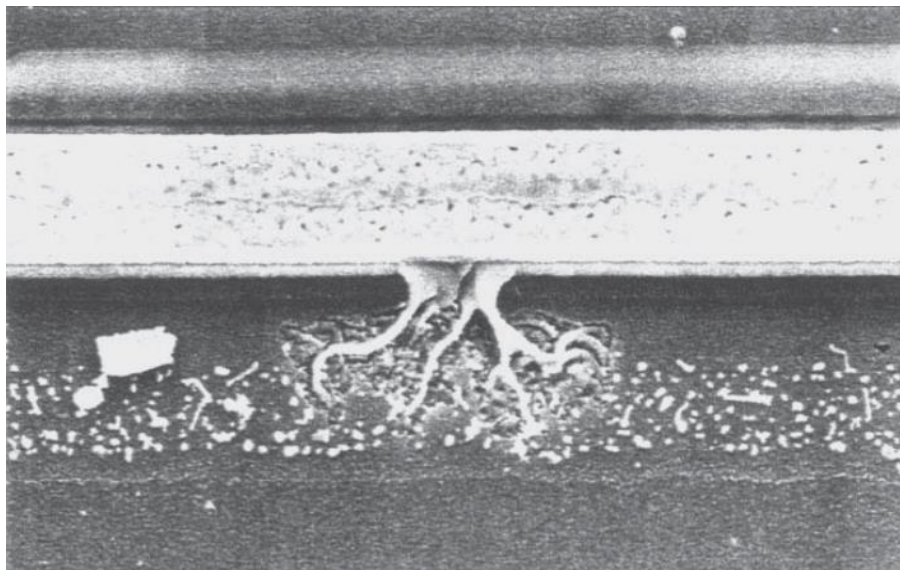


五、静电放电对元器件损伤的失效模式和失效机理

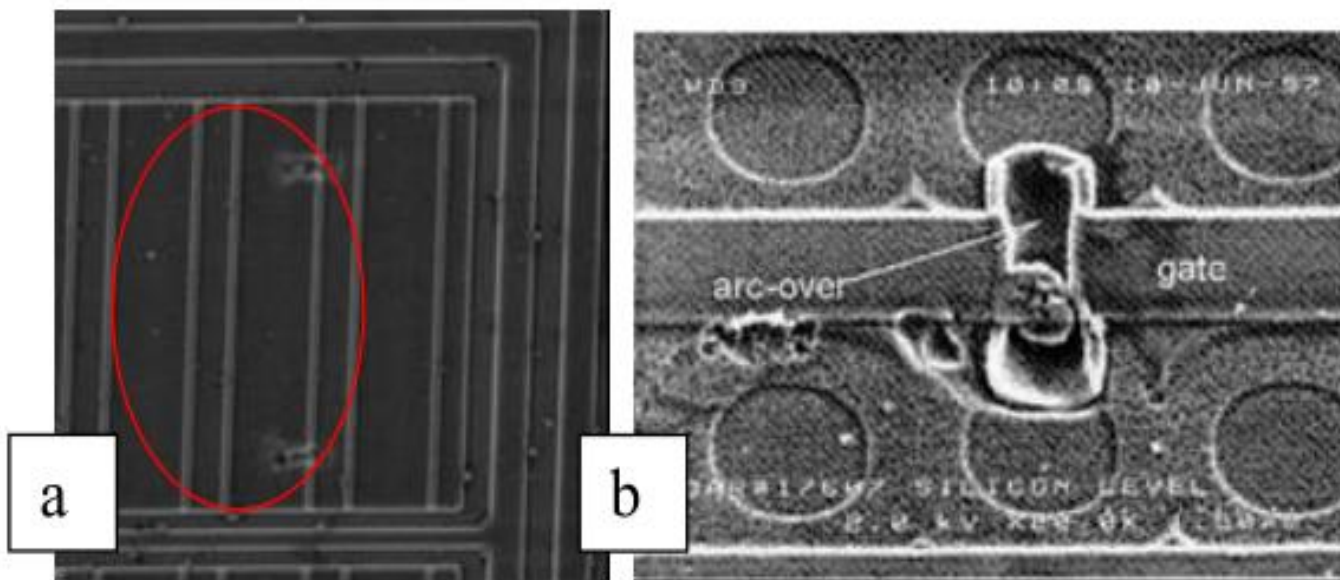


数字IC静电击穿照片
(SEM)

五、静电放电对元器件损伤的失效模式和失效机理

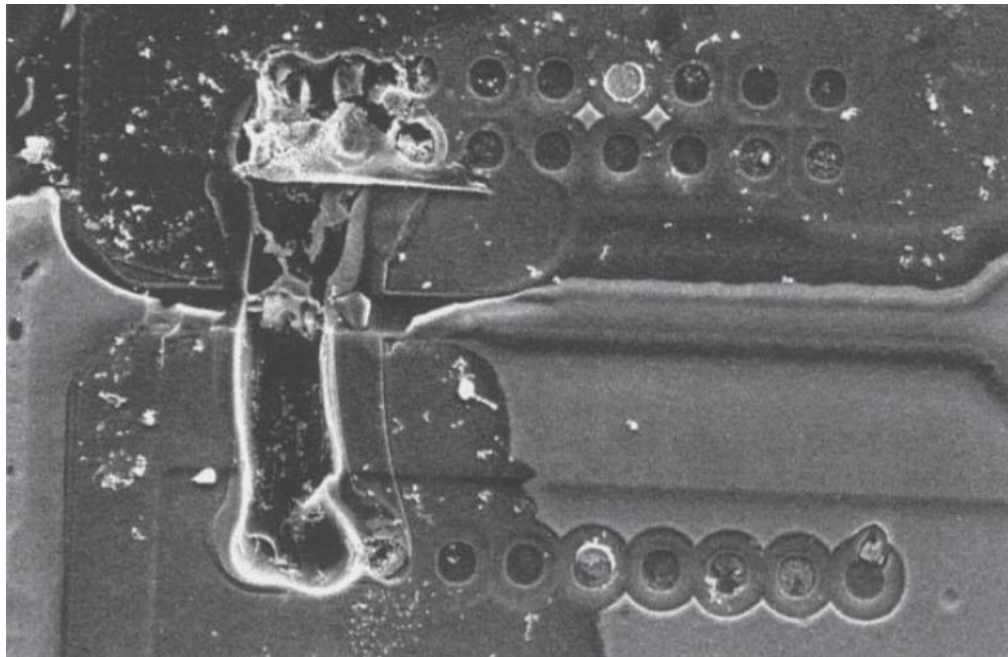


HBM模型ESD失效
MOSFET
源极到漏极失效

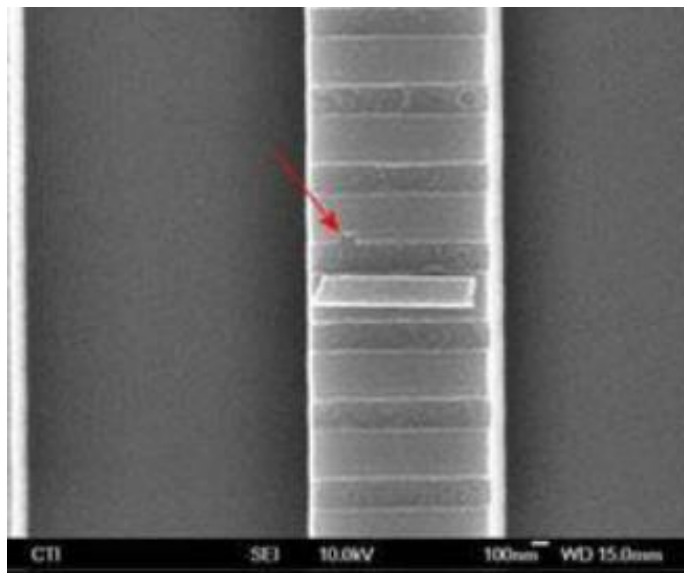
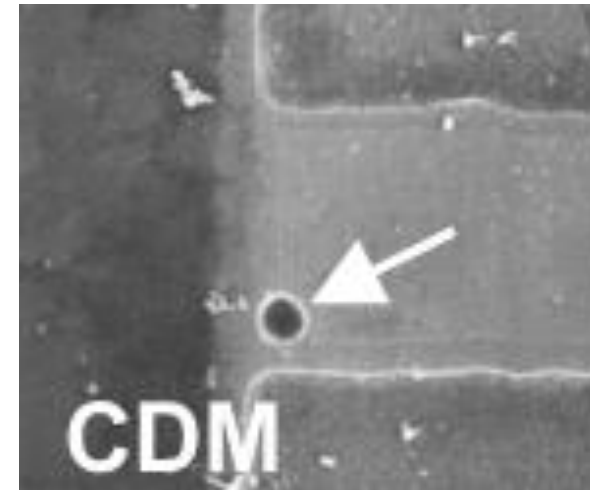
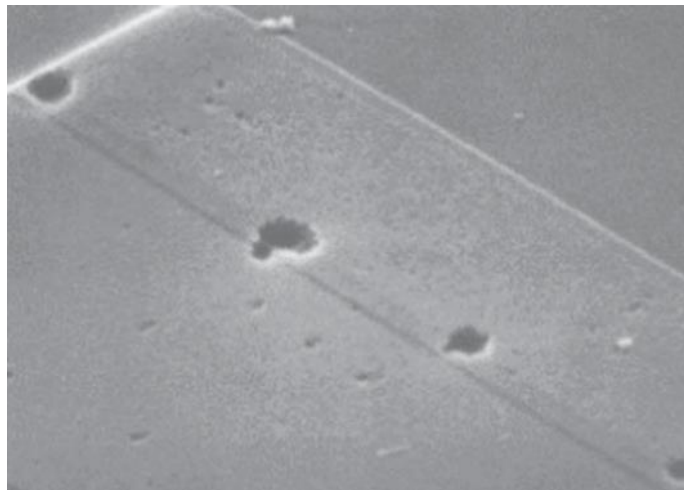


HBM模型ESD失效
2 kV引起的触点尖峰/硅损坏

五、静电放电对元器件损伤的失效模式和失效机理

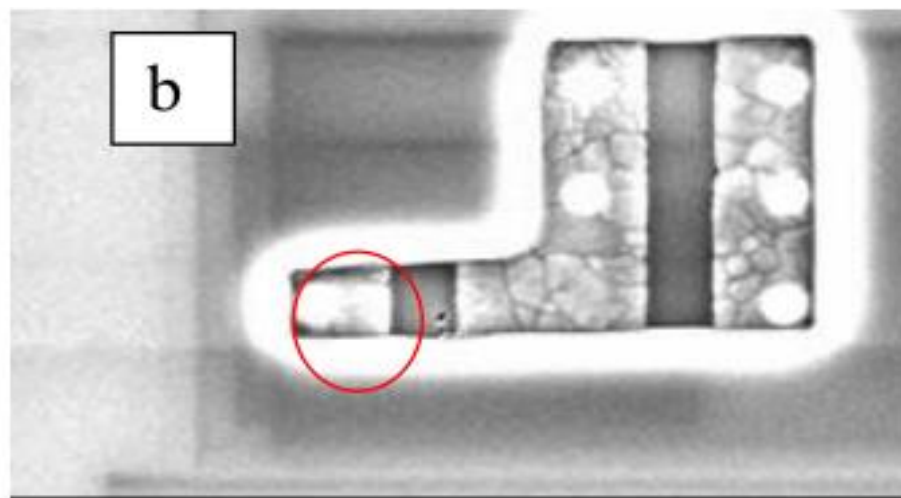
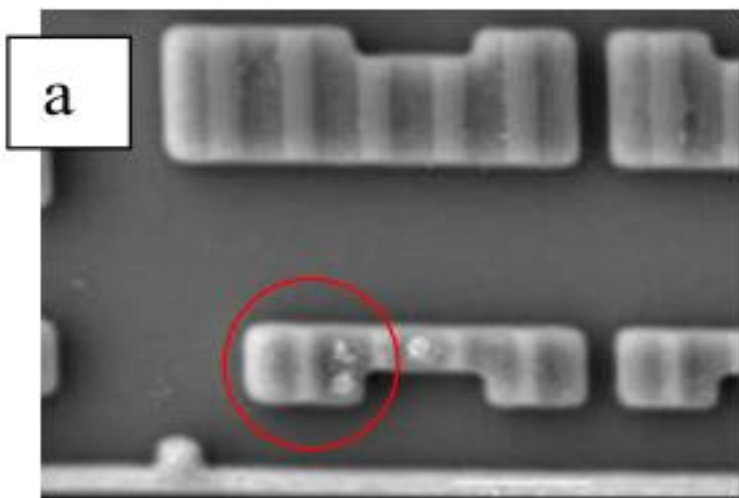
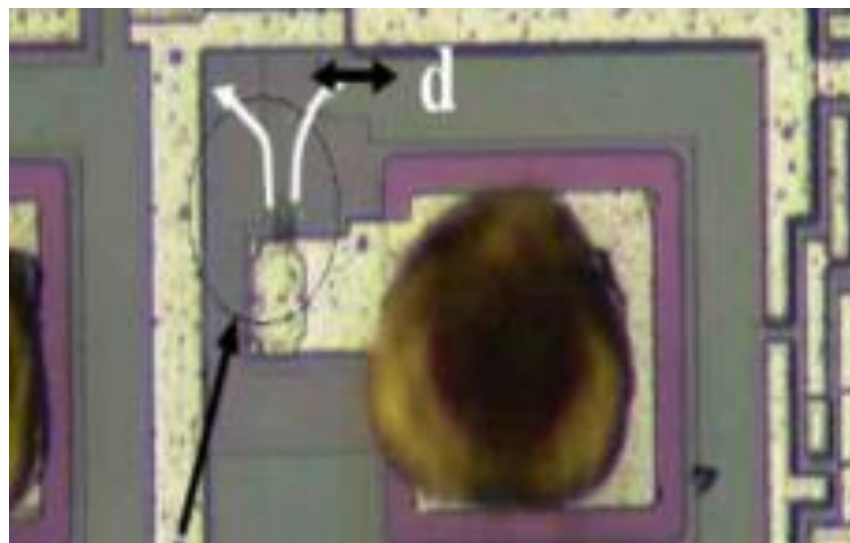
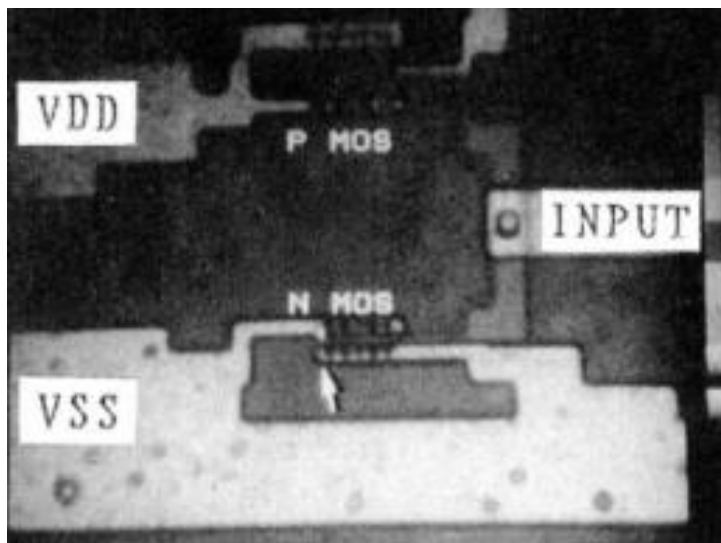


机器模型ESD失效



CDM模型ESD 失效
栅极氧化物中的针孔

五、静电放电对元器件损伤的失效模式和失效机理



由跨域逻辑（a）和输入晶体管（b）驱动的两个NMOS晶体管栅极的**CDM失效**

C 本节内容 CONTENTS

第九讲：静电放电损伤及防护

一、静电的产生

二、静电源

三、静电放电模型

四、半导体器件对静电放电的敏感度

五、静电放电损伤的特点、失效模式和失效机理

六、静电防护



六、静电防护

静电防护应贯彻于电子产品的全过程，即在设计、生产、使用的各环境都要采取相应措施。这可以从两个方面着手：

设计和制造阶段——通过在芯片上设计制作各种静电保护电路或保护结构，来提高器件的抗静电能力；器件应用上增加放电保护回路的设计，瞬态抑制二极管、压敏电阻等。

装机使用阶段——制订并执行各种防静电的措施，以避免或减少器件可能受到的静电的影响。

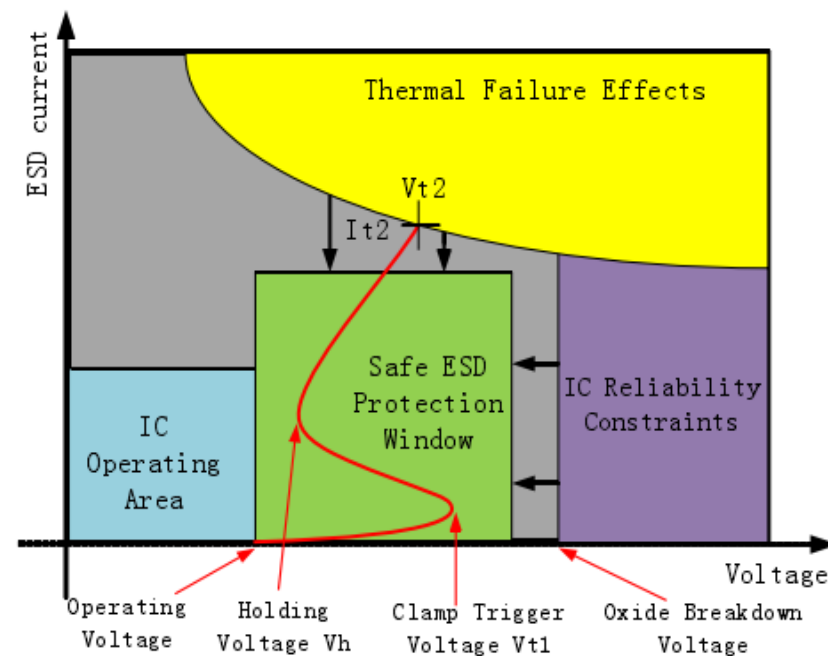
因此必须在器件设计、制造、测试、试验、传递、包装、运输和使用等各个环节中都采取措施，其中任何一个环节的疏忽，都可能造成静电对器件的损伤。

六、静电防护

❑ 器件生产设计中的防静电措施

生产方采取的ESD防护措施，是在器件的**版图设计**中，在适当部位(如电路的输入端、输出端、MOSFET的栅—源间)加**保护网络或保护器件**。当有ESD脉冲出现时，栅极电压便被保护网络箝位在预置的低于栅氧击穿的电平下，静电存储的能量则通过保护网络泄放掉。

生产方除了在器件版图设计时，采取ESD防护措施外，必须重视对ESD元器件的**包装**，应采用**防静电的包装容器**。



ESD设计窗口

六、静电防护

❑ 器件生产设计中的防静电措施——芯片无尘生产线



六、静电防护

❑ 器件使用中的防静电措施

GJB1649-93 《电子产品防静电放电控制大纲》中要求电子产品（设备）承制方应按该标准的要求制订、执行和提供ESD控制大纲，并指明适用的控制大纲功能和要素也应用在转承制方和其他有关机构，以便为静电敏感的元器件、组件和设备提供完整的保护。下表为该标准ESD控制大纲要求要素：

要求	ESD 控制大纲计划	分级	设计保护(不包括零件设计)	保护区	操作程序	保护罩	培训	硬件标记	文件	包装	失效分析
设计	√	√	√	√	√	—	√	√	√	√	√
生产	√	—	—	√	√	√	√	√	√	√	√
检查和试验	√	—	—	√	√	√	√	√	√	√	√
存储和运输	√	—	—	√	√	√	√	√	√	√	—
安装	√	—	—	√	√	√	√	√	√	√	—
维护和修理	√	—	—	√	√	√	√	√	√	√	—

“√”表示考虑；“—”表示不考虑。

六、静电防护

□ 器件使用中的防静电措施

GB/T32304对EPA(Electrostatic discharge Protected Area)，即防静电保护区相关技术作了规定。



六、静电防护

❑ 器件使用中的防静电措施

承制单位要在电子产品的设计、生产、检查和试验、储存和运输、安装以及维护和修理的不同阶段都要采取适当的ESD控制。



防静电腕带/脚腕带

六、静电防护



防静电工作台



防静电服

六、静电防护

❑ 器件使用中的防静电措施

GB/T32304-2015《航天电子产品静电防护要求》，对电子产品静电防护提出了“技术+管理”体系化要求，规定了航天电子产品静电防护的一般要求以及策划、培训、防静电工作区、包装、标识、采购和外包、监视和测量、审核、管理评审和改进等详细技术和管理要求。

此外，防静电认证标准中的IEC 61340-5-1标准则较之前的标准新增了增静电防护产品认证要求，进一步优化了静电放电控制方案的管理要求，更好地发挥防静电作用。

名称	产品认证要求	监视和测量要求（符合性验证）
地面(地板、地垫)	点对点电阻 $1\times10^4\Omega\sim1\times10^9\Omega$	点对点电阻 $1\times10^4\Omega\sim1\times10^9\Omega$
	点对接地点电阻 $1\times10^4\Omega\sim1\times10^9\Omega$	点对地电阻 $1\times10^4\Omega\sim1\times10^9\Omega$
	人体走动电压小于100V	—

六、静电防护

□ 静电防护

名称	产品认证要求	监视和测量要求（符合性验证）
工作台(台面、台垫)	点对点电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$	点对点电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$
	点对接地点电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$	点对地电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$
	充电孤立导体接触分离后残余电压小于200V	—
储存架/柜(储存未经防护的ESDS产品)	点对点电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$	点对点电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$
	点对接地点电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$	点对地电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$
椅/凳	点对接地点电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$	点对地电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$
防静电移动设备(如小车、梯子等)	点对点电阻小于 $1\times10^9\Omega$	表面对地电阻小于 $1\times10^9\Omega$
	点对接地点电阻小于 $1\times10^9\Omega$	

六、静电防护

❑ 器件使用中的防静电措施

名称	产品认证要求	监视和测量要求（符合性验证）
防静电服、帽	点对点电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^{10}\Omega$	点对点电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^{10}\Omega$
可接地防静电服	点对接地点电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$	点对地电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$
可接地防静电服系统	$1\times10^6\Omega\sim3.5\times10^7\Omega$	$1\times10^6\Omega\sim3.5\times10^7\Omega$
防静电鞋	鞋底电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^8\Omega$	鞋底电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^8\Omega$
防静电鞋套、脚跟带	鞋底导电带电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^8\Omega$	鞋底导电带电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^8\Omega$
防静电手套、指套	内、外表面点对点电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$	内、外表面点对点电阻 $1\times10^5\Omega\sim1\times10^9\Omega$
防静电腕带	腕带线缆端对端电阻 $(0.8\sim1.2)\times10^6\Omega$	腕带线缆端对端电阻 $(0.8\sim1.2)\times10^6\Omega$
	腕带套内表面对电缆扣电阻小于 $1\times10^5\Omega$	腕带套内表面对电缆扣电阻小于 $1\times10^5\Omega$
	腕带套外表面对地电阻大于 $1\times10^7\Omega$	腕带套外表面对地电阻大于 $1\times10^7\Omega$
腕带插孔	腕带插孔对接地点电阻小于 2Ω	腕带插孔对地电阻小于 2Ω
	腕带插头与插孔的拔出力大于 1.5N	腕带插头与插孔的拔出力大于 1.5N

六、静电防护

❑ 器件使用中的防静电措施

名称	产品认证要求	监视和测量要求（符合性验证）
电烙铁、吸锡器、热剥器、拆焊等手持电装工具	与ESDS电子产品的接触面对地电阻小于 2Ω	与ESDS电子产品的接触面对地电阻小于 10Ω
	与ESDS电子产品的接触面电压小于 20mV	
	与ESDS电子产品的接触面泄漏电流小于 10mA	
镊子、毛刷、钳子、夹具等手持工具	与ESDS电子产品的接触面对可接地部位电阻小于 $1\times 10^9\Omega$	与ESDS电子产品的接触面对地电阻小于 $1\times 10^9\Omega$
自动取放、自动电装、环境试验等设备	—	与ESDS电子产品的接触面对地电阻小于 $1\times 10^9\Omega$
离子风机	静电衰变时间不大于 20s (从 $\pm 1000\text{V}$ 衰变到 $\pm 100\text{V}$)	静电衰变时间不大于 20s (从 $\pm 1000\text{V}$ 衰变到 $\pm 100\text{V}$)
	残余电压不大于 35V	残余电压不大于 35V
静电连续监测仪	由用户或产品规范规定	由用户或产品规范规定

六、静电防护

□ 静电防护具体措施

- 避免使用产生静电的材料，各种容器、包装材料、工作台垫、设备垫和地板，表面电阻在 $10^5 \sim 10^9 \Omega$ ，这样使静电泄放慢，放电电流小，可防止电子元器件的损伤；
- 静电放电敏感器件必须采用防静电材料包装；
- 操作者应穿防静电工作服和鞋子，不能穿化纤(尼龙、涤纶等)工作服和绝缘的鞋子，避免摩擦起电；
- 静电防护区内的相对湿度应控制在50%以上，增加环境的湿度，使缘绝体表面电阻大大降低，从而加速了静电的泄漏；
- 对各种可能产生静电的物体和人提供放电通路，车间的各种仪器、设备和电烙铁头要接地良好，操作者人体使用接地的肘带、踝带、腕带；

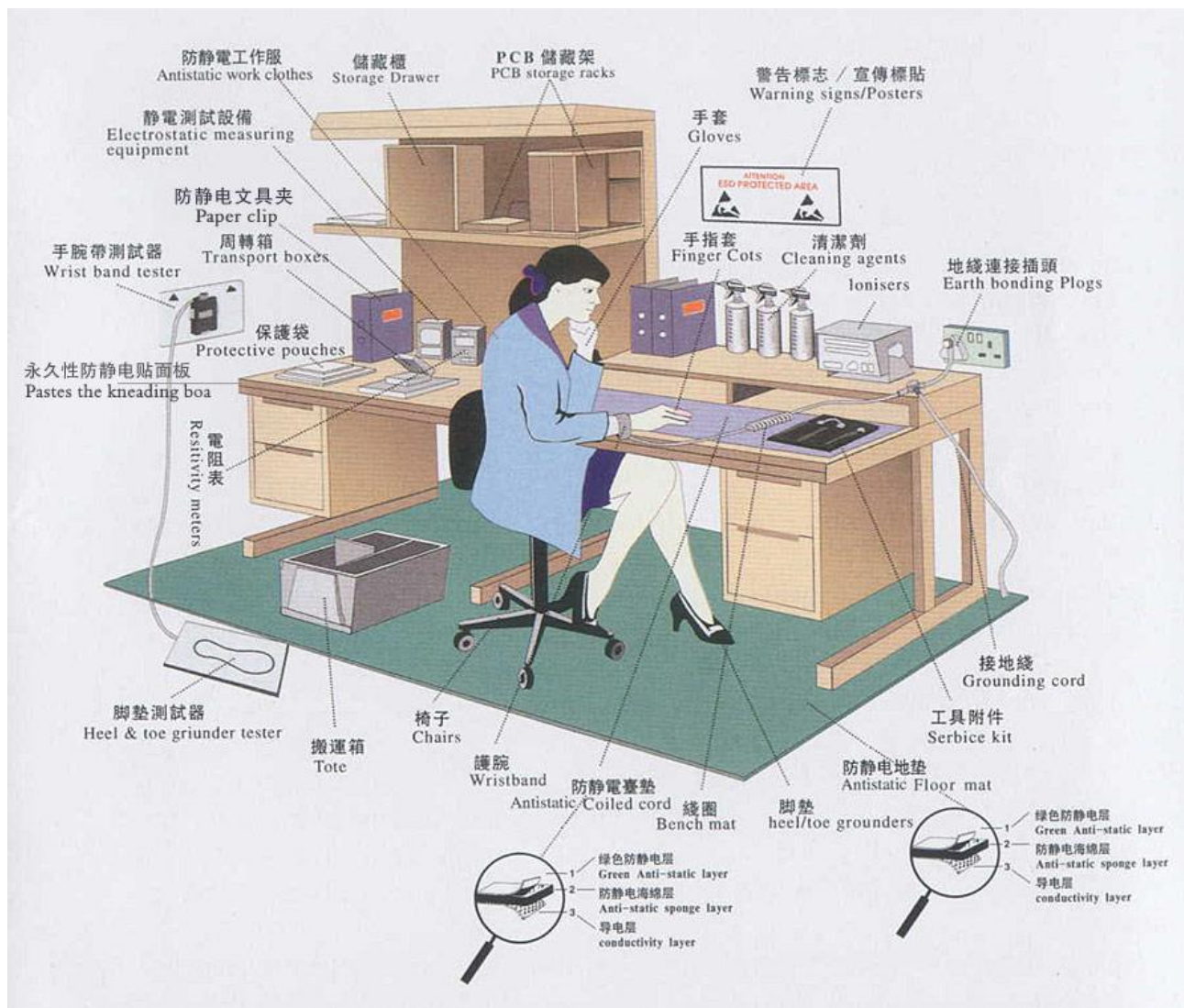
六、静电防护

□ 静电防护具体措施

- 在不能用接地技术泄放静电荷时，安置**空气电离器**，用来中和物体上的静电荷。在工作台面，传送带或仪表面板上可涂抹专用**抗静电剂**，以便防止静电荷的产生和积累；
- 尽量选择静电**损伤阈值高**的器件，在电路设计中增加保护电路；
- 对操作静电敏感器件的人员，应进行静电放电防护知识和技术的**培训及考核**，未经培训或没有通过考核者不允许上岗操作；
- 设置防静电工作区，并张贴防静电**警示牌**，对静电敏感的半导体器件，应在防静电工作区内安装。

六、静电防护

□ 静电防护具体措施



作业

- 1 简述静电损伤的特点。
- 2 请为电子产品的装配车间设计出适当的防静电措施。
- 3 常见的静电放电模型主要有哪几种？
- 4 检索一下各种防静电器材。



The End

万博

可靠性与系统工程学院

wanbo@buaa.edu.cn