



中国赛宝实验室可靠性研究分析中心

CEPREI

讲师简介

李少平
1984年毕业于电子科技大学，学士学位
1994年加入现单位从事可靠性技术科研与应用推广
中国赛宝实验室可靠性研究分析中心高级工程师

2/77

说明

本讲义仅为本中心内部材料，供本课程学员学习参考，不得在传媒上登载、不得转给他人。

3/77

中国赛宝实验室可靠性研究中心



主编

张晓明 李少平



X135-06, 顺德碧桂园大合影, 200603

编制人员

郑廷圭 罗道军 来萍 李萍
蔡伟 邝贤军 解江 费庆宇
罗宏伟 徐爱斌 贺光辉

4/77



除非特别指出，本讲义图片来自于：

**中国赛宝实验室
可靠性研究分析中心**



5/77

中国赛宝实验室可靠性研究分析中心



您所知道的可靠性？

理论

失效

故障

MTBF

返修

寿命

更大的麻烦。。。

6/77

一次惨痛的经历！

- 1986年1月28日
- 73秒
- 7名人员
- 12亿美元

7/77

中国赛宝实验室可靠性研究中心

• 网络新闻图片

一次惨痛的经历！



挑战者号1986年1月28日执行第十次任务时，于升空过程中突然爆炸

8/77

一次惨痛的经历！

◆ 博伊斯乔利说

- “这些钢圈看上去很结实，很牢固，但点火后，每个部分受到巨大压力，都会像气球一样被‘吹’起来。这样，就需要在各部分的接合处采用松紧带来防止热气跑出火箭。”
- 这份工作由两条名为“○圈”的橡胶带完成，它们可以随着钢圈一起扩张，并能弥合缝隙。
- 这两条橡胶带与钢圈脱离哪怕**0.2秒**，助推器的燃料就会发生泄露，固态火箭助推器就会**爆炸**。

9/77

中国赛宝实验室可靠性研究中心

一次惨痛的经历！

- ◆ “挑战者”发射那天，天气非常寒冷。气温降低后，这些“○圈”就变得非常坚硬，伸缩就更加困难。坚硬的“○圈”伸缩的速度变慢，密封的效果就大打折扣。虽然那可能只是零点几秒的时间，但足以把一次本应成功的发射变成一场灾难。

10/77

一次惨痛的经历！

- ◆ “挑战者”的悲剧在于，博伊斯乔利在发射前6个月就对“○圈”提出质疑，因为一年前他曾亲自跑到佛罗里达，对上一次发射时使用的火箭进行了检查，让他吃惊的是，**第一层“○圈”失灵，热气跑了出来，幸运的是，第二层“○圈”拦住了热气。**
- ◆ 博伊斯乔利仍保存着当时拍摄的“○圈”照片，**本应是蜜色的润滑油被熏成了黑色。第一层“○圈”的很多部分不见了，很显然，它们被烤焦了。**他说：“我看到这一切时，心口像堵上了一团棉花。那次发射，航天飞机竟然没有爆炸，简直是奇迹！”

事故并非偶然

11/77

中国赛宝实验室可靠性研究分析中心

可靠性工程新观念

- 1980年代可靠性观念发生变化，也随之提出了**可靠性强化试验**（**RET**, Reliability Enhancement Testing, 或称为步进应力试验、高加速寿命试验HALT、高加速应力筛选HASS等）等**面向失效的可靠性新技术**。
- RET技术的理论依据是**失效物理学** (Pof, Physics of Failure), 把失效当作研究的主体，通过激发、研究和根治失效达到提高可靠性的目的。

12/77

可靠性观念变化比较

传统观念	现时观念
可靠性是一种成本	可靠性是一种资产
遵照规范做	为用户提供价值
可靠性靠公式和手册保证	可靠性靠良好的设计和生产
与设计和生产脱离	与设计和生产融为一体
只用 MTBF 作为可靠性统计参数	同时用故障率和有效寿命作为可靠性的统计参数
检测故障，协调解决	分析故障，清除故障
重复运作	改进运作

13/77

中国赛宝实验室可靠性研究中心

失效物理方法

M. G. Pecht和L. W. Condra提出了失效物理方法的8个步骤:

1. 确定真正的系统要求;
2. 确定使用环境;
3. 验明潜在的失效部位和失效机理;
4. 采用可靠的原材料和元器件;
5. 设计可靠的产品;
6. 鉴定加工和装配方法;
7. 控制加工和装配过程;
8. 对产品的寿命期成本和可靠性进行管理。

14/77

可靠性工程新发展

- 2003年美国Lucent（朗讯）公司因通讯设备的高可靠要求，颁布了X21368企标：“光电子元器件、组件与子系统可靠性评价”，要求供应商：
- “应给出产品及其**内部主要元器件、材料各自的5种主要失效机理**，要求在产品的设计初期（设计评审）就开展此项工作。评估每一种失效机理的风险、失效模式和采取的纠正措施。”
- 这是失效物理方法进入企业标准的典型标志。

15/77

中国赛宝实验室可靠性研究中心

有的人这样理解失效分析

- 医药学的历史与人类的病痛一样长。大量医药科学的进步都是建立在外科医生进行的**尸体解剖**上。（仁慈的东方人除外）
- 在我们的专业领域，这一做法通常称为“**失效分析**”。
- 每个失效部件都应被视为进行**可靠性改进的机会**。失效部件有时甚至是“**珍贵的**”。

16/77

本课程的目的

- 失效分析技术的用途与价值
- 了解技术发展状况
- 学习基础知识和技能，了解相关标准
- 希望更多人关心、支持和参与可靠性工程

17/77

中国赛宝实验室可靠性研究分析中心

本课程的对象

- 失效分析技术人员
- 生产和质量管理人员
- 设计师、工艺师、质量师和可靠性师
- 试验技术人员
- 技术服务人员
- 其他好学人士



18/77

总目录

第一讲 失效分析概论

第二讲 分析技术及设备

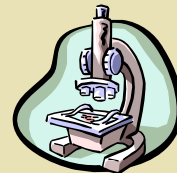
第三讲 失效分析典型案例

19/77

中国赛宝实验室可靠性研究分析中心

第一讲 失效分析概论

- 基本概念
- 失效分析的定义和作用
- 失效模式
- 失效机理
- 相关标准对失效分析的要求
- 标准和资料



20/77

1. 基本概念

- **失效**——丧失功能或降低到不能满足规定的要求。
- **失效模式**——失效现象的表现形式，与产生原因无关。如开路、短路、参数漂移、不稳定等。
- **失效机理**——导致失效的物理化学变化过程，和对这一过程的解释。如电迁移开路、银电化学迁移短路。工程上，也会把失效原因说成是失效机理。
- **应力**——驱动产品完成功能所需的动力和产品经历的环境条件。是产品退化的诱因。
- **缺陷**

21/77

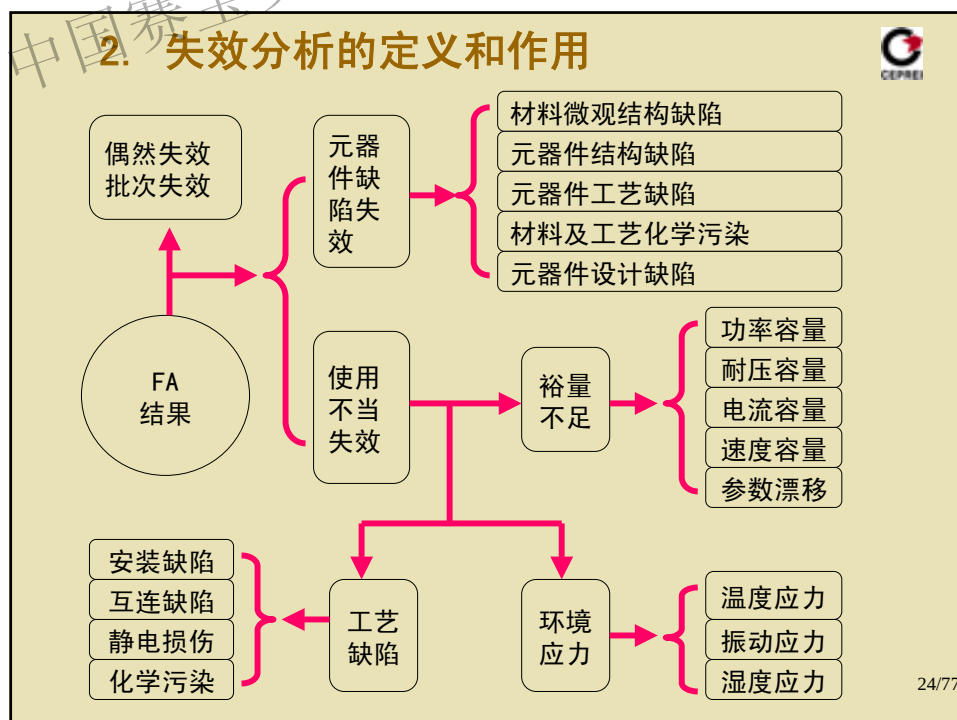
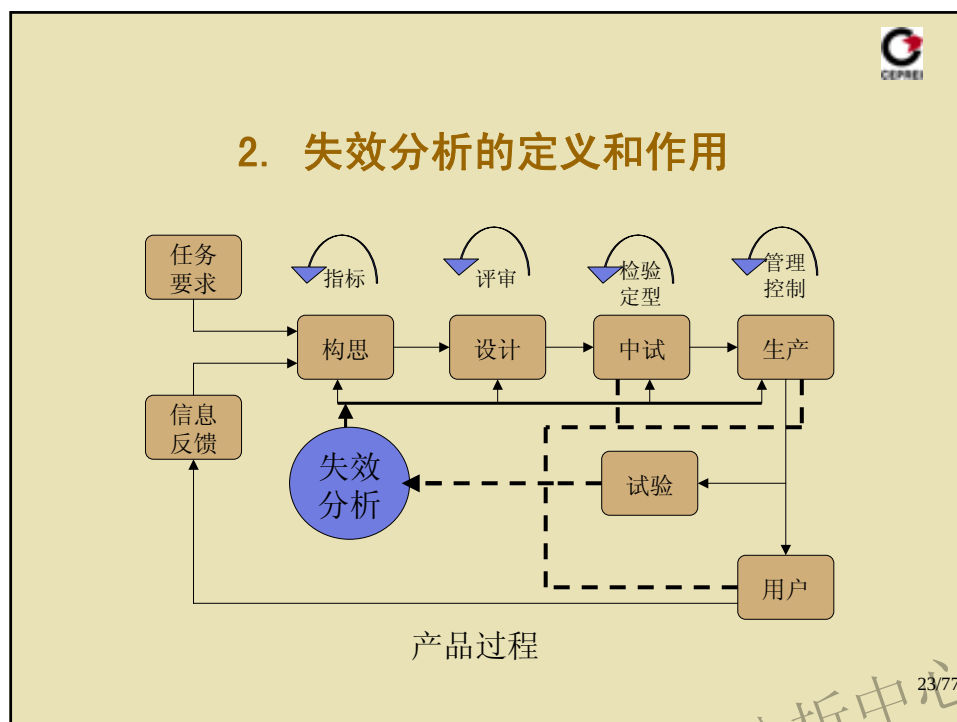
中国赛宝实验室可靠性研究分析中心

2. 失效分析的定义和作用

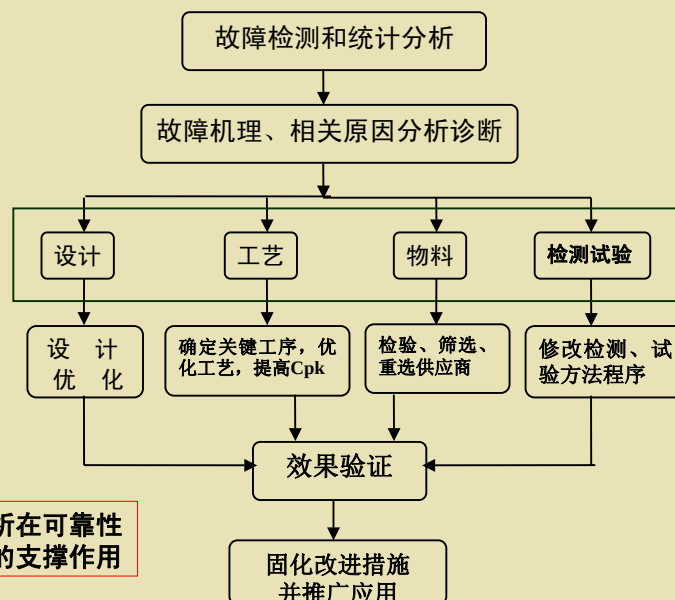
- 失效分析是对已失效器件进行的一种**事后检查**。使用电测试以及先进的物理、金相和化学的分析技术，**验证**所报告的失效，**确定**其失效模式，**找出**失效机理。
- 失效分析程序应足以得出相应结论，确定失效的原因或相应关系，或者在生产工艺、器件设计、试验或应用方面采取纠正措施，以消除失效模式或机理产生的原因，或防止其重新出现。

——GJB548A-96微电子器件试验方法和程序，“方法5003 微电路的失效分析程序”

22/77



2. 失效分析的定义和作用



25/77

2. 失效分析的定义和作用



- 失效分析技术有广泛的应用对象，包括**实物对象**和**过程对象**。
- 实物对象包括已发生失效或发生重要变化的测试结构、半成品、试制品、试验品、整机应用以及外场应用失效品。
- 过程对象包括元器件的研发过程与应用过程。
 - 研发过程可细分为设计优化、制造工艺优化（如成品率优化）、测试筛选与评价试验优化等过程。
 - 在应用过程中，元器件选型、二次筛选条件优化、设备研制生产中的故障控制对策、可靠性增长、全寿命期维护等。

26/77

2. 失效分析的定义和作用

- 换句话说，这些技术过程需要失效分析工作才能得以完成或完善。
- 最简单不过的道理，就是因为可靠性是**不断地与失效作斗争**才能得以维持或提高。

27/77

中国赛宝实验室可靠性研究分析中心

3. 失效模式

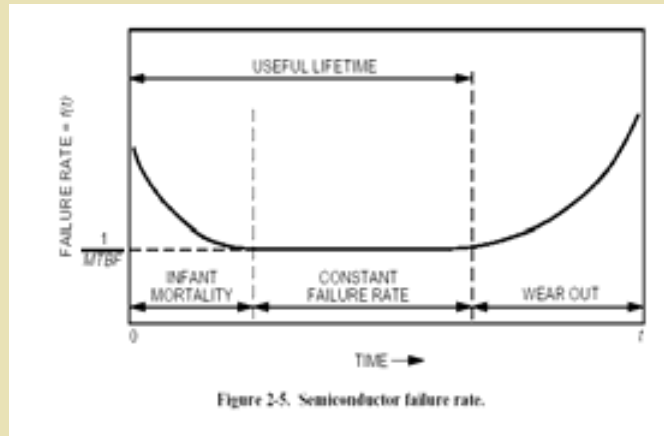
失效模式的概念和种类

- 失效模式就是失效的外在表现形式，不需要深入说明其物理原因，易于记录和报告。
 - 按失效的持续性分类：致命性失效、间歇失效、缓慢退化
 - 按失效时间分类：早期失效、随机失效、磨损失效
 - 按电测结果分类：开路、短路或漏电、参数漂移、功能失效
 - 按失效原因分类

28/77

3. 失效模式

失效模式的概念和种类



JPL Publication 96-25, (GaAs MMIC Reliability Assurance Guideline for Space Applications)

29/77

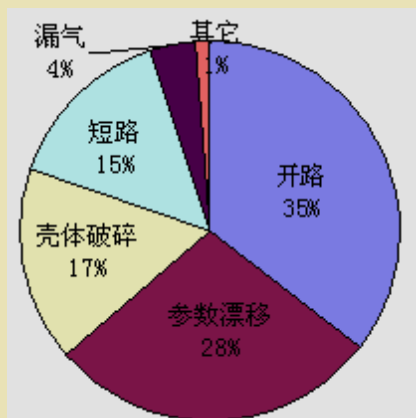
3. 失效模式

失效模式的例子

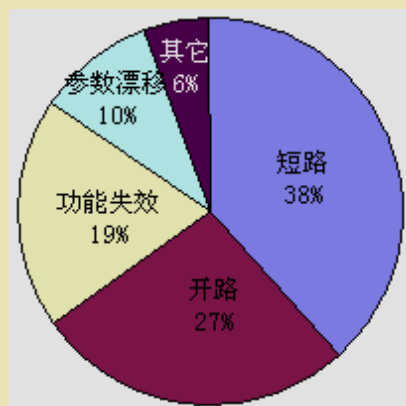
- 在这里给出部分电子元器件现场使用失效主要失效模式及其分布的数据统计结果。
- （资料来源：电子工业部可靠性管理办公室“八五”成果汇编）

30/77

3. 失效模式



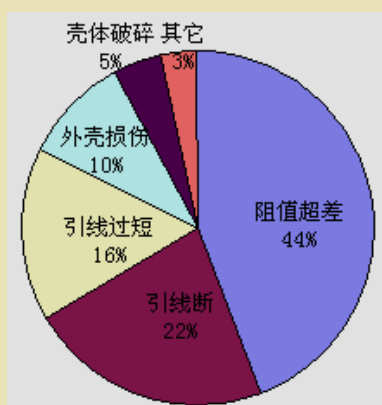
分立器件使用中的失效模式及分布



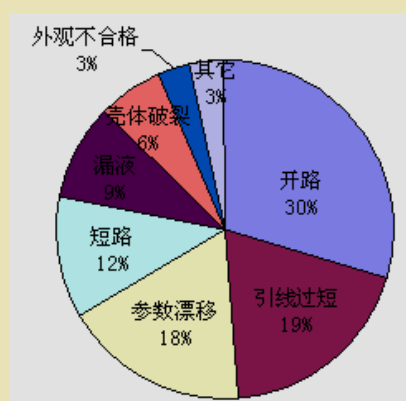
集成电路使用中的失效模式及分布

31/77

3. 失效模式



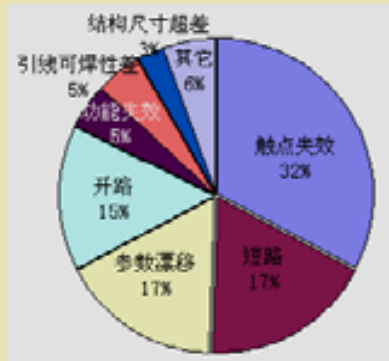
电阻器使用中的失效模式及其分布



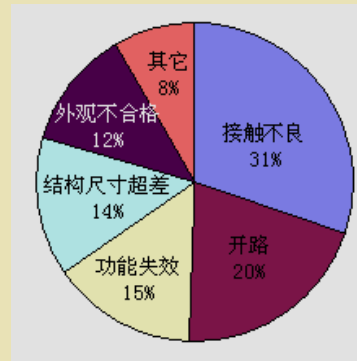
电容器使用中的失效模式及其分布

32/77

3. 失效模式



继电器使用中的失效模式及其分布



接插元件使用中的失效模式及其分布

33/77

3. 失效模式



有时也会按失效原因对失效模式分布进行分类。

目前最重要的两大失效模式：

- **电过应力和静电放电**导致的失效

EOS/ESD: Electrical over Stress/Electrostatic Discharge

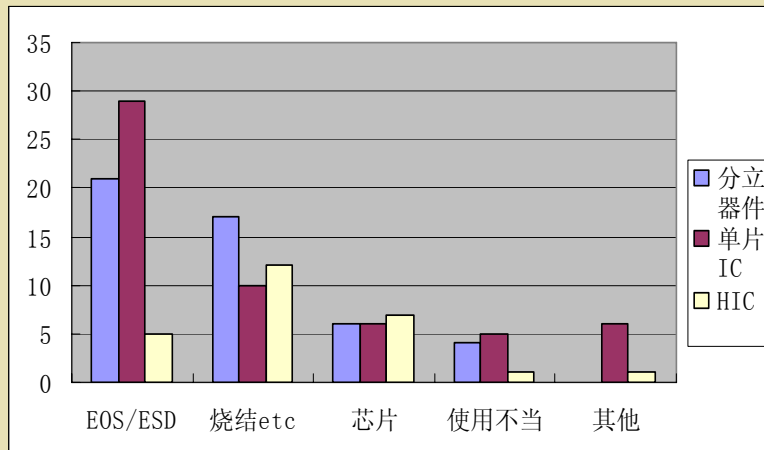
- **制造工艺不良**导致的失效

3. 失效模式

按失效原因统计失效模式分布



半导体器件、IC和HIC失效模式分布



张晓明, “对微电子器件失效分析的回顾”, 电子元器件, 2000, 5期

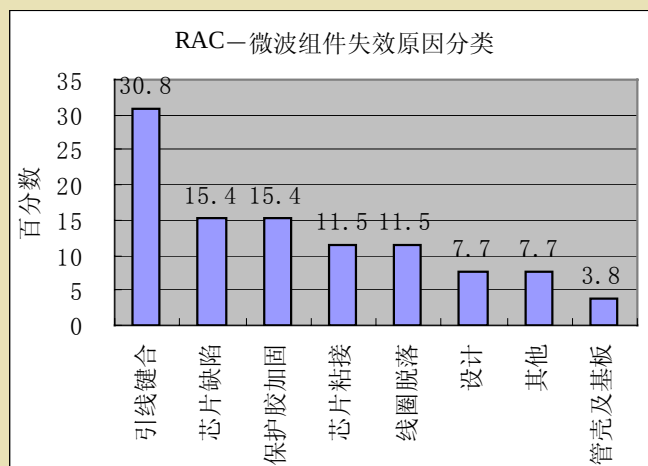
35/77

3. 失效模式

按失效原因统计失效模式分布



制造工艺不良的模式分布



来萍, “50例微波器件失效分析结果汇总与分析”, 固体电子学研究进展, 2005, 4期

36/77

4. 失效机理

- 导致失效的物理化学变化过程，和对这一过程的解释。如电迁移开路、电化学迁移短路。
- 工程上，有时会把失效原因说成是失效机理。

37/77

中国赛宝实验室可靠性研究分析中心

4. 失效机理

过应力

- 电应力--电源输出输入电压超过规定的最大额定值,输出的电流超过规定的最大额定值。
 - 热应力--环境温度、壳温、**结温**超过规定的最大额定值
 - 机械应力--振动、冲击、离心力或其他力学量超过规定的最大额定值
- 超过额定值未必一定损坏。

38/77

4. 失效机理



电过应力失效

- 施加在产品上的电应力--电源浪涌、负载效应、过激励、电磁感应等--超过规定的最大额定值，导致产品发生不可逆变化。
- 电应力失效占半导体器件现场失效50%。
- 电压或电流过载大于1us: EOS, 小于1us: ESD
- ESD损伤通常要用SEM观察，EOS损伤用光学显微镜即可观察到。

• 超过额定值未必一定损坏。

39/77

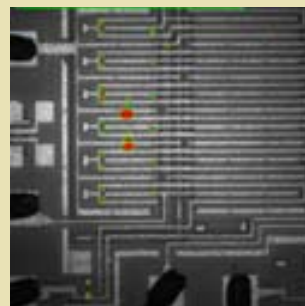
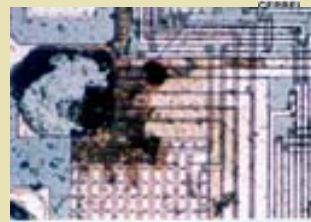
4. 失效机理(按应力类别划分)



CMOS电路闩锁失效(1)

- 闩锁(latch-up)是指CMOS电路中固有的寄生可控硅结构被触发导通，在电源和地之间形成低阻大电流通路的现象。
- MOS集成电路使用的主要失效机理
- 测试标准

EIA/JESD78 IC Latch-Up Test



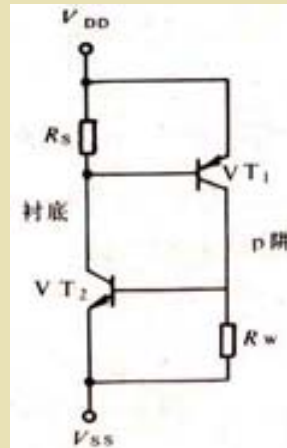
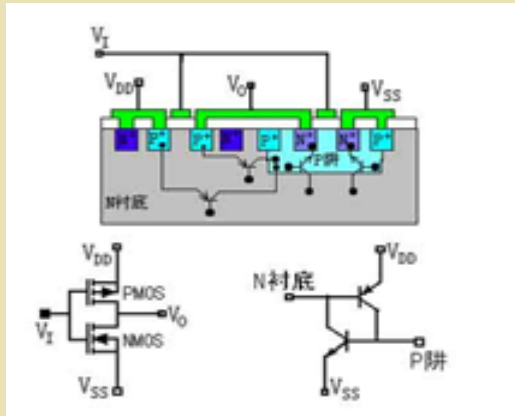
40/77

4. 失效机理



寄生晶闸管原理图

CMOS电路门锁失效（2）



Latch-up原理

41/77

4. 失效机理



CMOS电路门锁失效（3）

- 条件--在使用上 $(V_I; V_O) > V_{DD}$ 或 $(V_I; V_O) < V_{SS}$ ；或电源端到地发生二次击穿。
- 危害--一旦导通电源端产生很大电流，破坏性和非破坏性
- 失效特点--电现象 内部失效判别

42/77

4. 失效机理



ESD 失效机理—解释

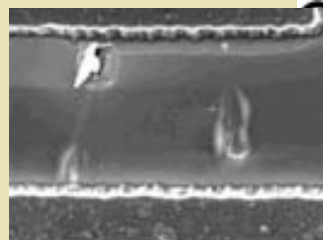
- 处于不同静电电位的两个物体间发生的静电电荷转移就形成了静电放电，这种静电放电将给电子元器件带来损伤，引起产品失效。
- 电子元器件由静电放电引发的失效可分为**突发性失效**和**潜在性失效**两种模式。



43/77

4. 失效机理

ESD 失效机理—解释



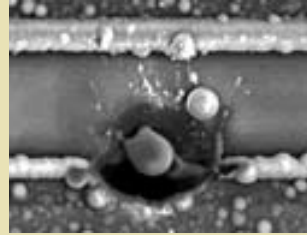
突发性失效是指元器件受到静电放电损伤后，突然完全丧失其规定的功能，主要表现为开路、短路或参数严重漂移。

潜在性失效是指静电放电能量较低，仅在元器件内部造成轻微损伤，放电后器件电参数仍然合格或略有变化。但器件的抗过电应力能力已经明显削弱，再受到工作应力后将进一步退化，使用寿命将明显缩短。

44/77

4. 失效机理

ESD 失效机理—解释



■ 过电压场致失效

发生于MOS器件，包括含有MOS电容或钽电容的双极型电路和混合电路；

■ 过电流热致失效

多发生于双极器件，包括输入用pn结二极管保护的MOS电路、肖特基二极管以及含有双极器件的混合电路。

45/77

4. 失效机理



ESD 失效机理—解释

实际发生哪种失效，取决于静电放电回路的绝缘程度。

- 如果放电回路阻抗较低，绝缘性差，元器件往往会因放电期间产生强电流脉冲导致高温损伤，这属于过电流损伤。
- 如果放电回路阻抗较高，绝缘性好，则元器件会因接受了高电荷而产生高电压，导致强电场损伤，这属于过电压损伤

46/77

4. 失效机理



机械过应力失效

- 施加在产品上的机械应力--振动、冲击、离心力、安装应力或其他力学量--超过规定的最大额定值导致产品结构发生不可逆变化。

•超过额定值未必一定损坏。

47/77

4. 失效机理



机械过应力失效

因安装扭矩过大，穿心电容陶瓷介质破裂



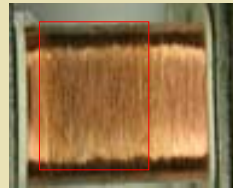
48/77

4. 失效机理



过热失效

- 由于外部温度或内部发热导致产品的材料发生相变、融化、玻化、过度形变等。



- 超过额定值未必一定损坏。

49/77

4. 失效机理



金属的腐蚀—解释

- 金属在干燥气体或无导电性的非水溶液中，单纯由化学作用而引起的腐蚀就叫做**化学腐蚀**，温度对化学腐蚀的影响很大。
- 当金属与**电解质溶液**接触时，由电化学作用而引起的腐蚀叫做**电化学腐蚀**。其本质是腐蚀电池放电的过程，金属作为阳极被氧化而腐蚀，形成金属氧化物，而阴极反应则根据腐蚀类型而异，可发生氢离子或氧气的还原，析出氢气或吸附氧气。
- 金属在大气中的腐蚀，在土壤及海水中的腐蚀以及在电解液中的腐蚀都是电化学腐蚀。

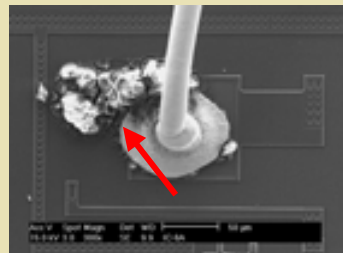
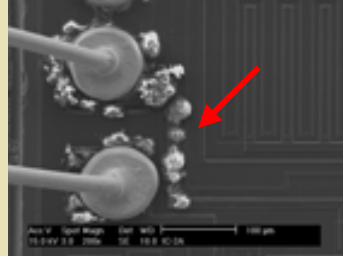
50/77

4. 失效机理



金属的腐蚀—解释

- 当金属与周围介质接触时，由于发生**化学反应**或**电化学作用**而引起金属的破坏叫做金属的腐蚀。
- 金属的腐蚀现象十分普遍，在电子元器件中，外引线及封装壳内的金属因化学反应或电化学作用引起电性能恶化直至失效。



51/77

4. 失效机理



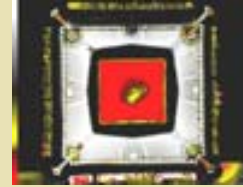
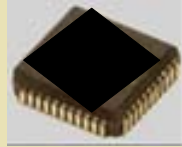
银离子迁移

银的迁移是一种电化学现象，在具备水份和电场的条件时发生。



52/77

4. 失效机理（缺陷）



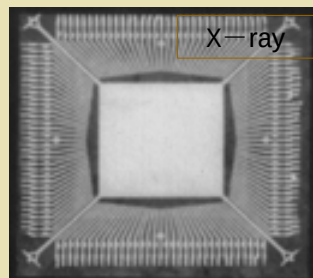
塑封器件“爆米花效应”（分层效应）

“爆米花效应”是指塑封器件塑封材料内的水份在高温下受热发生膨胀，使塑封料与金属框架和芯片间发生**分层**，拉断键合丝，发生开路失效或间歇失效。

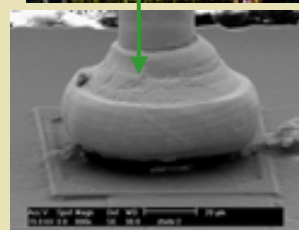
53/77

4. 失效机理

“爆米花效应”
（分层效应）



潮湿敏感损伤



54/77

4. 失效机理

“爆米花效应”
(分层效应)

IPC/JEDEC J-STD-035 Acoustic
Microscopy for Nonhermetic
Encapsulated Electronic Component



Effects of Elevated Reflow Temperature
on Plastic Packages (J-STD-020C
Moisture/reflow sensitive)

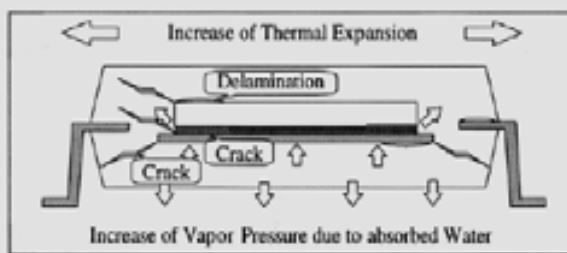
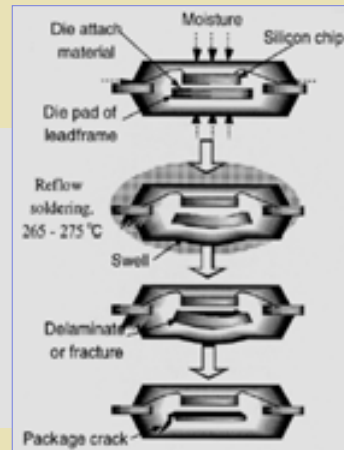


FIGURE 6.1 Influence of elevated reflow temperature and failure modes.



• (文献)

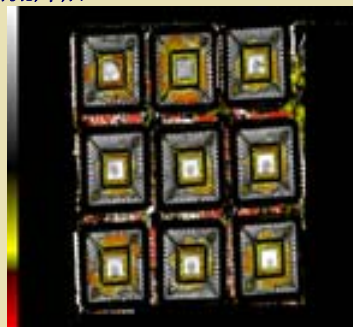
55/77

4. 失效机理

“爆米花效应” (分层效应)



回流焊后



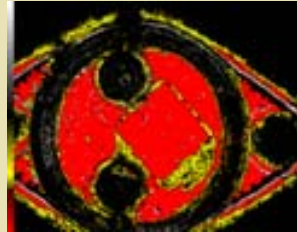
捷伟测试技术有限公司提供

56/77

4. 失效机理



芯片焊接缺陷



导致热烧毁的主要原因

- ◆ 界面空洞
- ◆ 热疲劳



57/77

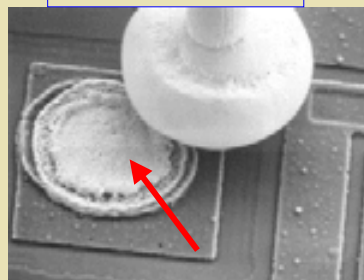
4. 失效机理

键合失效机理



金铝化合物失效

ISTFA
美国实验室报告



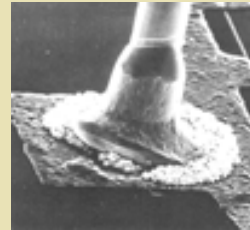
58/77

4. 失效机理

键合失效机理

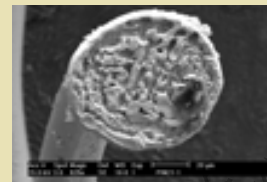
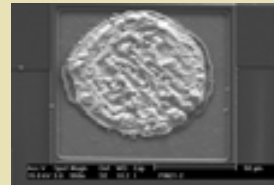
柯肯德尔效应 (Kirkendall)

ISTFA



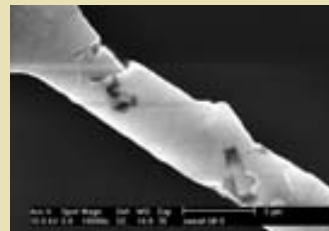
■在AuAL键合系统中，若采用Au丝热压焊工艺，由于高温（300℃以上），金向铝中迅速扩散，金的扩散速度大于铝扩散速度，结果出现了在金层一侧留下部分原子空隙，这些原子空隙自发聚积，在金属间化合物与金属交界面上形成了空洞，这称为柯肯德尔效应。

■当柯氏效应—空洞增大到一定程度后，将使键合界面强度急剧下降，接触电阻增大，最终导致开路。



4. 失效机理

金属化电迁移—解释



在外电场作用下，金属离子受到两种力的作用：

- 一种是电场力，使金属离子由正极向负极移动；
- 另一种是导电电子和金属离子间相互碰撞发生动量交换而使金属离子受到与电子流方向一致的作用力，金属离子由负极向正极移动，这种作用力俗称“电子风”。
- 对铝、金等金属膜，电场力很小，金属离子主要受电子风的影响，结果使金属离子与电子流一样朝正极移动，在正极端形成金属离子的堆积，形成小丘，而在负极端产生空洞，使金属条断开。

60/77

4. 失效机理



金属—半导体接触失效—解释

- 欧姆接触，肖特基接触
- 铝—硅接触尖峰或溶坑
 - 在高温加电时扩散和迁移同时存在
 - 铝在硅中扩散，形成尖峰，发射极PN结短路
 - 硅在铝中扩散，接触面空洞—开路
- GaAs器件的主要失效原因
 - 措施：难熔多层金属化如PtSi—Ti/W—Al

61/77

4. 失效机理



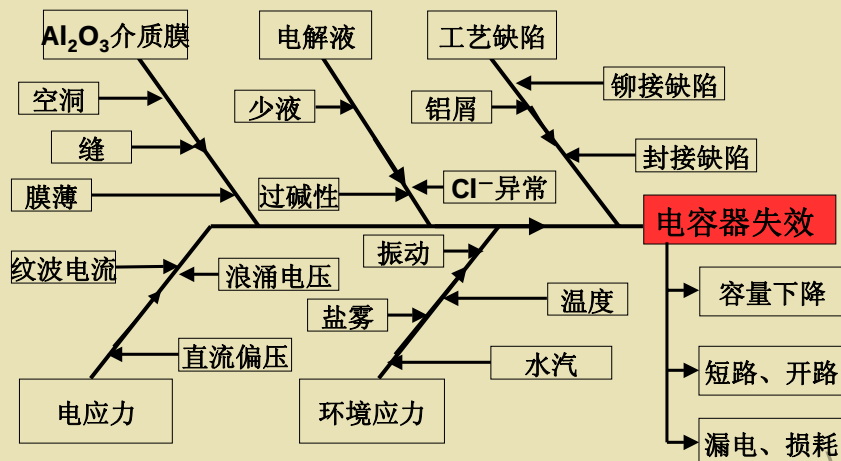
电阻器的失效机理—术语与解释

1. 导电材料结构的变化。淀积导电薄膜无定形体结晶化趋势（致密化 电阻下降）
2. 淀积导电薄膜晶粒间气体的吸附和去气（变化1—2%）
3. 导电材料的氧化、粘污（阻值增大，与温度、湿度有关）
4. 电负荷老化（温度、与潮气和电场有关的电解、氧化）
5. 有机材料合成电阻器粘合剂的非可逆变化
6. 有机材料保护层的影响（挥发物扩散到导电材料内部）
7. 导体与引出线接触电阻变化（接触部粘合剂的改变）

62/77

4. 失效机理

失效模式与失效机理的关系：铝电解电容器的失效因素



63/77

5. 一些标准对失效分析的要求

GJB548A-96 微电子器件试验方法和程序，“方法5003微电路的失效分析程序”，要求收到器件的同时还应收到：

- **试验条件：**应包括使器件失效的试验或应用类型，使用时间、温度及其他应力条件；
- **系统条件：**应包括在设备中失效的确切位置、日期、首次记录到缺陷的试验和（或）检验、取出失效器件时所注意到的任何异常环境条件及有关系统的全部情况。还应记录设备的征兆；
- **器件的一般资料：**应包括器件型号和序列号、日期代码和其他识别信息，以及生产批和检验批的大小。

64/77



5. 一些标准对失效分析的要求

QJ3065. 5-98 元器件失效分析管理要求
(航天标准) 规定了一般要求和详细要求。

一般要求:

- 失效分析人员
- 分析仪器设备
- 失效分析管理程序
- 故障现场的保护及数据记录
- 失效分析进度要求
- 失效分析报告
- 失效分析信息反馈、归档
- 失效分析的仲裁

65/77



5. 一些标准对失效分析的要求

QJ3065. 5-98 元器件失效分析管理要求
(航天标准) 规定了一般要求和详细要求。

详细要求:

- 失效分析管理机构及其职能
- 失效分析委托
- 失效分析的实施
- 失效分析报告
- 失效分析报告结论反馈
- 失效分析结论处理程序
- 失效分析数据库建立

66/77



5. 一些标准对失效分析的要求

GJB546A-96 电子元器件质量保证大纲

5.1.3 失效分析报告

承制方应随同鉴定保持报告一起向鉴定机构提交失效分析报告的摘要，此摘要应包括 5.2.4b 条规定的失效分析但不包括使用方通报的失效分析。

对于使用方通报的失效和现场失效，承制方应在收到失效的元器件及有关的支撑资料后的 **30天**内提交分析报告。当鉴定机构需要了解某些具体失效时，承制方应提交详细的失效分析报告。

67/77



5. 一些标准对失效分析的要求

GJB546A-96 电子元器件质量保证大纲

5.2.4 失效和缺陷分析程序

a. 关键加工过程超出规定的界限时，应对加工过程中的材料和元器件进行缺陷分析；

b. 鉴定试验和质量一致性检验期间的失效数超过规范所允许的数量时，或现场使用发生失效时，对元器件进行失效分析。

68/77



5. 一些标准对失效分析的要求

GJB546A-96 电子元器件质量保证大纲

5.2.4 失效和缺陷分析程序

5.2.4.3 失效和缺陷分析能力

- 承制方应具有适合其产品失效和缺陷分析所需的能力和設備（可以是有資格的簽約單位的設備）。設備配置指南如下。

69/77



5. 一些标准对失效分析的要求

GJB546A-96 电子元器件质量保证大纲

5.2.4.3 失效和缺陷分析能力

- 具有足够放大倍数的X射线设备；
- 解剖元器件而不损伤或污染内部零件的设备；
- 微量化学分析设备
- 显微检测技术设备；
- 粗细检漏仪；
- 电参数分析设备；
- 抛光、研磨等金相分析设备。
-

70/77

5. 一些标准对失效分析的要求

【相关知识】

■ 质量问题技术归零的5条要求

为彻底解决由于技术原因造成的产品质量问题，避免重复发生，要按“**定位准确、机理清楚、问题复现、措施有效、举一反三**”五项内容逐项落实，实现对质量问题的有效纠正，并形成文件。

■ 质量问题的管理归零

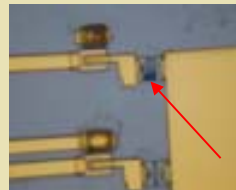
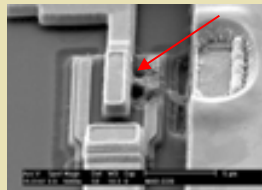
过程清楚、责任明确、措施落实、严肃处理、完善规章

失效分析与根本原因分析

71/77

5. 一些标准对失效分析的要求

■ 其实最重要的要求是“证据”！



本讲结束

72/77

6. 标准和资料

- GJB450A 装备可靠性工作通用要求
- GJB841 故障报告、分析和纠正系统
- GJB546A-96 电子元器件质量保证大纲
- QJ3065.5-98 元器件失效分析管理要求（航天标准）
- GJB548A-96 微电子器件试验方法和程序
- GJB3157-98 半导体分立器件失效分析方法和程序
- 混合微电路技术手册，朱瑞廉译，电子工业出版社，2004
- 工程材料的失效分析，谢斐娟等译，机械工业出版社，2003
- EIA/JESD78 IC Latch-Up Test

73/77

中国赛宝实验室可靠性研究分析中心



74/77