

## 第二讲 失效分析技术与设备

1. 失效分析程序
2. 非破坏性分析技术的基本路径
3. 半破坏性分析技术的基本路径
4. 破坏性分析技术的基本路径
5. 分析技术与设备清单

获得失效分析证据具体技术方法

3/102

### 1. 失效分析程序

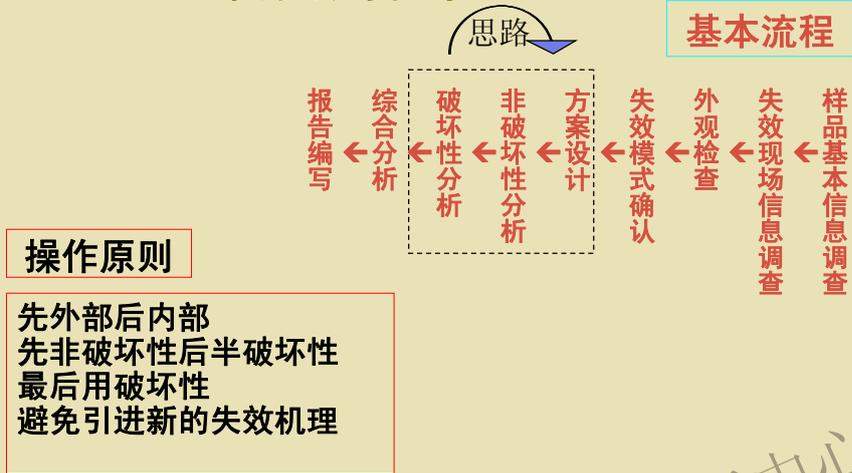
- ✓ 基本方法与程序
- ✓ 失效信息调查与方案设计
- ✓ 非破坏性分析的基本路径
- ✓ 半破坏性分析的基本路径
- ✓ 破坏性分析的基本路径
- ✓ 报告编制

失效分析的逻辑与技术途径

4/102

# 1. 失效分析程序

## 基本方法与程序



5/102

# 1. 失效分析程序

## 失效信息调查与方案设计

### 信息类别

#### ▪ 基本信息

工作原理、结构、材料、工艺、主要失效机理；  
还有，出于管理需要的信息，包括样品来源、型号、  
批次、编号、时间、地点等。

#### ▪ 技术信息：

是判断可能的失效机理和失效分析方案设计的重要  
依据，（具体见下页）。

6/102

## 1. 失效分析程序

### 技术信息

- 特定使用应用信息

整机故障现象、异常环境、在整机中的状态、应用电路、二次筛选应力、失效历史、失效比例、失效率及其随时间的变化等。

- 特定生产工艺

1) 生产工艺条件和方法

2) 特种器件应先用**良品开封**了解和研究其结构特点

- 技术信息的作用：方案设计、分析过程和机理诊断的重要依据

7/102

## 1. 失效分析程序

### 非破坏性分析的基本路径

#### 非破坏性项目(先实施易行的、低成本的)

- 外观检查
- 模式确认(测试和试验, 对比分析)!
- 检漏
- 可动微粒检测(PIND)
- X光照相
- 声学扫描
- 模拟试验

8/102

## 1. 失效分析程序

### 半破坏性分析的基本路径

半破坏性分析（多余物、污染、缺陷、微区电特性和电光热效应）

- 可动微粒收集
- 内部气氛检测（与前项有冲突）
- 开封
- 不加电的内部检查（光学·SEM·微区成分）
- 加电的内部检查（微探针·热像·光发射·电压衬度像·束感生电流像·电子束探针）

9/102

## 1. 失效分析程序

### 破坏性分析的基本路径

破坏性分析（进一步的微区电特性、污染、缺陷）

- 内部检查、加电内部检查（去除钝化层·微探针·聚焦离子束·电子束探针）
- 剖切面分析（聚焦离子束、光学、SEM、TEM）

10/102

## 1. 失效分析程序

### 报告编制

- 失效现场信息 (样品概况)
- 有关的各种检测的记录数据描述和分析
- 综合分析
- 分析结论
- 措施建议

报告案例

11/102

## 1. 失效分析程序

### 如何使用失效分析报告

- 质量师 (可靠性师)
- 设计师
- 工艺师
- 用户



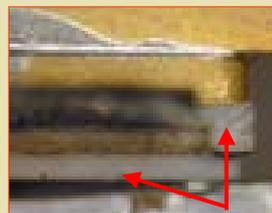
12/102

## 2. 非破坏性分析技术

- 2.1 外观检查
- 2.2 电参数测试分析与模拟应力试验
- 2.3 检漏与PIND
- 2.4 X光与扫描声学分析

13/102

### 2.1 外观检查



标志、变形、破、裂、缺损、  
污染、腐蚀、热斑、封口等

14/102

## 光学显微镜-(1)基本结构

- 主架
- 载物台
- 照明系统
- 目镜系统
- 物镜系统
- 拍照系统



15/102

## 光学显微镜-(2)工作原理

- 显微镜主要是由物镜和目镜组成。
- 物镜的焦距很短，目镜的焦距较长。
- 物镜的作用是得到物体的放大的实像。
- 目镜的作用是将物镜所成的实像进一步放大为虚像。

16/102

## 光学显微镜- (3)指标和参数

- 基本分类：立体和金相  
(倍数、景深、工作距离)
- 照明方式：反射和透射
- 照明辅助装置：  
明场和暗场 (BD)、  
偏光 (P)  
微分干涉 (DIC) 等

17/102

## 光学显微镜- (3)指标和参数

- 放大倍数
  - 观察放大倍数：物镜倍数 × 目镜倍数
  - 照相放大倍数：物镜 × 照相目镜 × 相机
  - 金相 ~ 1000倍
  - 立体 ~ 几十倍

18/102

### 光学显微镜- (3)指标和参数

- 特点：
  - 操作简单、不需真空条件。
  - 图像有彩色，能观察多层金属化的芯片。
  - 景深小，观察微米以下的细微结构有困难。最高分辨率0.2~0.3微米。



19/102

### 光学显微镜- (4)用途

- 表面形状、尺寸、组织、结构、缺陷
- 芯片的各种烧毁与击穿现象
- 引线内外键合情况、芯片裂缝、沾污、划伤、氧化层缺陷及金属层腐蚀等
- 配合液晶相变分析，可对加电状态下的芯片发热点进行观察和定位。



20/102

## 光学显微镜- (4)用途

### ■ 图片



21/102

## 2.2 电参数测试分析

目的：确认失效模式和失效管脚定位，识别部分失效机理

方法：与同批次好品同时进行测试和试验  
功能测试和管脚直流特性（**I-V特性**）  
对照良好样品、产品规范，解释差异

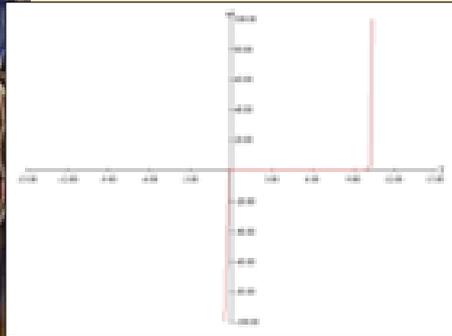
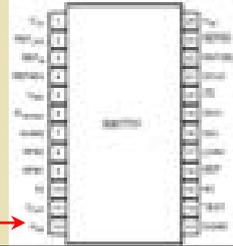
结果：1) \*参数漂移 \*参数不合格 \*开路 \*短路 \*与失效现场不一致

2) 确认异常功能和异常直流特性的引脚

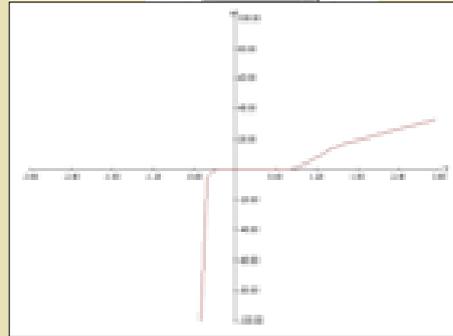
22/102

## 2.2 电参数测试分析

### I-V特性分析



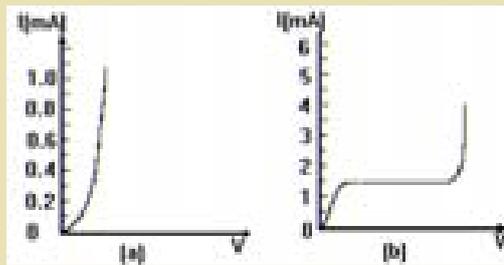
好样品  $V_{DD}$ 端对DGND的I-V特性



失效样品  $V_{DD}$ 端对DGND的I-V特性

102

## 2.2 电参数测试分析



### 注意事项

- 图示仪：局部和全貌
- 测试仪：自动测试仪器与随时间蠕变的特性
- 测试标准和规范：高反压器件和雪崩击穿电压
- 关于万用表

24/102

## 2.2 电参数测试分析

### 电参数测试可识别的失效模式和机理

- |             |                  |
|-------------|------------------|
| A. 与失效现场不一致 | A. 半导体器件离子沾污     |
| B. 参数漂移     | B. 半导体器件结缺陷      |
| C. 参数不合格    | C. 半导体器件内部水汽含量高  |
| D. 开路       | D. 短路铝电解电容器电解液干涸 |
| E. 短路       | E. . . . .       |
| F. 间歇失效     |                  |

25/102

## 2.3 检漏与PIND

### 检漏

- 结果：低漏率、高漏率、冒泡
- 与外观结果的相关性
- X-射线检查结果
  - 玻璃绝缘子和焊缝
  - 有裂缝或气泡
  - 不连通和连通



26/102

## 2.3 检漏与PIND

### 可动微粒探测与分析

- 影响:金属可能引起短路,非金属引起沾污
- 方法:振动微粒噪声,振动与X光照相结合
- 可动微粒取样
- 可动微粒性质分析
- 可动微粒来源
- 继电器和电感线圈



27/102

## 2.4 X光与扫描声学分析(C-SAM)

- X射线透视技术
- 反射式扫描声学显微技术



28/102

## X射线透视系统- (1) 基本结构

- X射线源
- 屏蔽箱
- 样品台
- X射线接收成像系统



资料来源: Feinfocus

29/102

## X射线透视系统- (3) 技术指标

- 空间分辨率: 亚微米量级;
- 图像的放大倍数:  $\sim 10^4$ ;
- 被检测物体的尺寸: 数百毫米;
- 被测物体水平旋转:  $360^\circ$ ,  
Z方向调整:  $\pm 45^\circ$ 的。

30/102

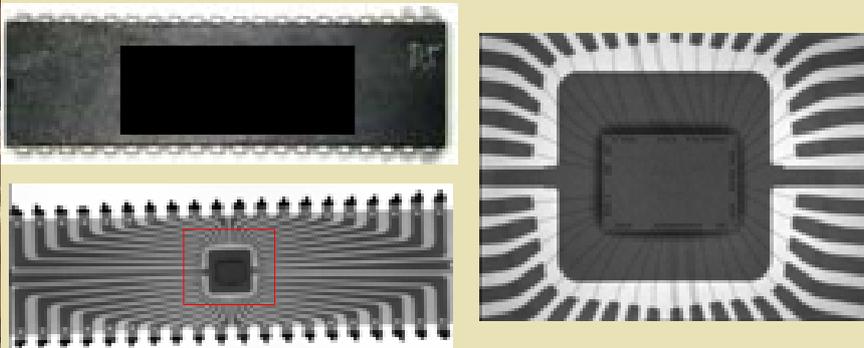
## X射线透视系统- (4)用途

- X射线透视仪一般用于检测电子元器件及多层印刷电路板的内部结构
  - 内引线开路或短路
  - 粘接缺陷
  - 封装裂纹、空洞
  - 桥连、立碑及器件漏装
  - 焊点缺陷 (PCB)
  - .....

31/102

## X射线透视系统- (4)用途

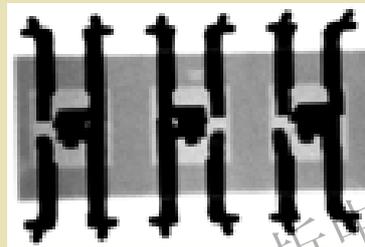
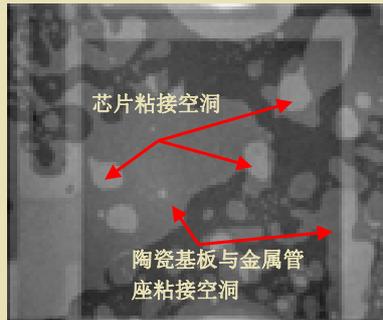
### ◆ 结构



32/102

## X射线透视系统- (4)用途

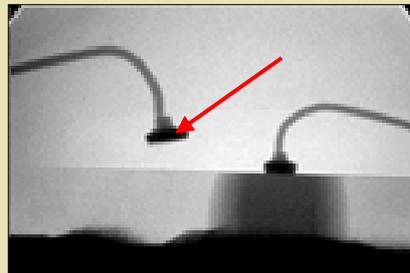
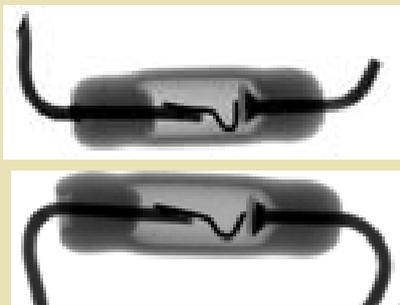
### ■ 缺陷



33/102

## X射线透视系统- (4)用途

### ■ 内部结构



34/102

## X射线透视系统- (5)小结

- 快速、直观、无损
- 观察效果与被观测物对象的密度、厚度有关
- 小缺陷(裂纹、孔洞)比较困难
- 深度分析困难
- 无法观察器件内部界面分层

35/102

## 扫描声学显微系统

### 超声波的用途

1. 超声波无损探伤测试设备(如:扫描声学显微镜S.A.M.)
2. 用声纳找潜水艇和鱼群
3. 身体检查设备
4. 超声波清洗机(15~50KHz)
5. 超声波焊接(15~40KHz)



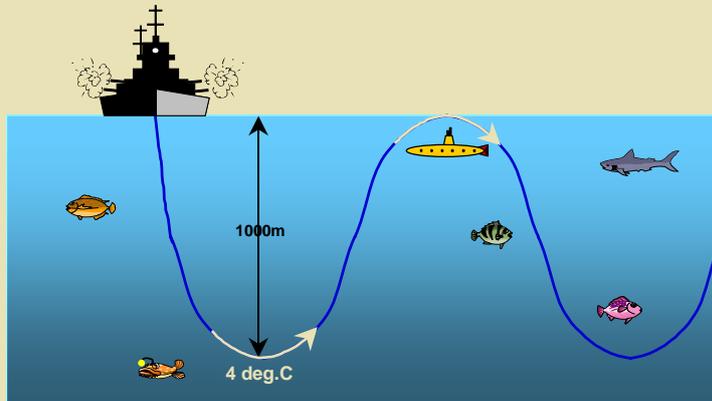
Fetus  
胎儿

(SONIX提供)

36/102

## 扫描声学显微系统

(SONIX提供)



SONAR(Sound Navigation Ranging)声纳探测

37/102

## 扫描声学显微系统- (1) 基本结构



- ◆ 换能器及支架
- ◆ 脉冲收发器
- ◆ 示波器
- ◆ 样品台 (水槽)
- ◆ 计算机及
- ◆ 显示器



38/102

### 扫描声学显微系统- (3) 指标和参数

- 频率范围：（1~500）MHz
- 空间分辨率：0.1  $\mu$  m
- 扫描面积达到：0.25~300mm
- 各种扫描模式：
  - 超声波传输时间测量（A扫描）
  - 纵向截面成像（B扫描）、
  - X/Y二维成像（C、D、G、X扫描）
  - 三维扫描与成像。
  - T-扫描方式：检测透射信号

39/102

### 扫描声学显微系统- (4) 用途

#### 声学扫描显微术的特点与用途

- CSAM是的重要技术手段之一，与X射线分析具有互补性
- 对平直界面不连续性缺陷十分灵敏
- 特别适合塑料封装器件内部分层分析，也适合器件、印制电路板上热沉焊接的分析
- 结合破坏性手段，可以用于焊点的分析。对设备配置和操作员经验有一定要求
- 复杂情况下的超声分析结果需要其它技术手段对比

40/102

## 扫描声学显微系统- (5)小结

### 声学扫描显微术与X射线分析术比较

名称	主要原理	应用优势
X射线透视技术	观察透射X射线的被样品局部吸收后成像的异常	以低密度区为背景,观察材料的高密度区的密度异常点。
反射式扫描声学显微术 (C-SAM)	超声波在界面反射回波,遇到空气时产生全反射	以高密度区为背景,观察材料内部空隙和界面分层。

41/102

## 扫描声学显微系统- (5)小结

### 声学扫描显微术的优点

1. 很高的分辨率:  
能够检测到的最小间隙厚度为0.13微米
2. 很高的灵敏度:  
能够检测出细微缺陷的大小,位置和形状
3. 可以实时检测
4. 安全:  
对人体无害

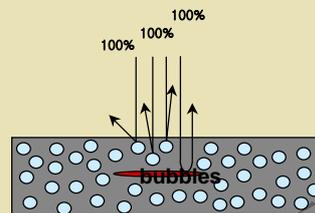
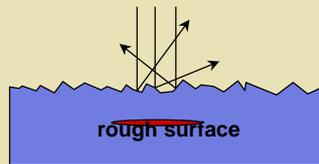
(SONIX提供)

42/102

## 扫描声学显微系统- (5)小结

### 声学扫描显微术的弱点

1. 很难检测出表面很粗糙或者内部有很多气泡的样品
2. 需要液体进行超声波传输，可能给样品带来损害
3. 需要专家分析和判断



(SONIX提供)

43/102

### 3. 半破坏性分析技术

- 3.1 开封技术与可动微粒收集
- 3.2 内部气氛检测（与前项有冲突）
- 3.3 不加电的内部检查（光学· SEM与EDS · 微区成分）
- 3.4 加电的内部检查（微探针·红外热像·EMMI光发射·电压衬度像·束感生电流像·电子束探针）

44/102

### 3.1 开封技术与可动微粒收集



#### 开封

- 首先必须了解样品的内部结构，必要时用同类品试开封
- 空封机械法： 专用工具 研磨
- 塑封化学法： 硫酸 硝酸

45/102

### 3.1 开封技术与可动微粒收集

#### 样品制备技术

- 种类： 打开封装、去钝化层、去层间介质、抛切面技术、去金属化层
- 作用： 增强可视性和可测试性
- 风险及防范： 监控

46/102

### 3.2 内部气氛检测

- 主要有害气氛:水汽、氧、有机气氛
- 水汽的危害:除了直接引起漏电之外,水对很多失效机理都有加速作用
  - \*银迁移(离子迁移)
  - \*金属腐蚀(腐蚀和电化腐蚀)
  - \*金铝化合物
  - \*焊接热疲劳
  - \*水汽中H离子引起的二次慢俘获

47/102

### 3.3 不加电的内部检查

- 金相显微镜
- 扫描电镜 (SEM) 与能谱仪 (EDS)



48/102

### 3.3不加电的内部检查

#### 内部观察

- 内部引线和外引脚的对应关系
- 内部结构状态全貌
- 以上两项必要时必须拍照



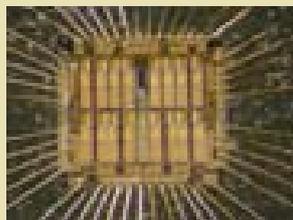
- 观察顺序
  - 1)引线丝及内外键合点
  - 2)芯片
  - 3)金属化
  - 4)钝化层及介质
  - 5)PN结
  - 6)其它结构

- 有怀疑的都必须照相

49/102

### 3.3不加电的内部检查

芯片全貌



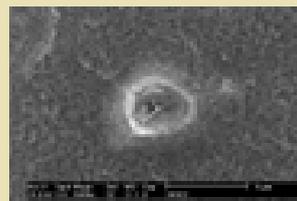
内键合点缺陷



划片区崩损

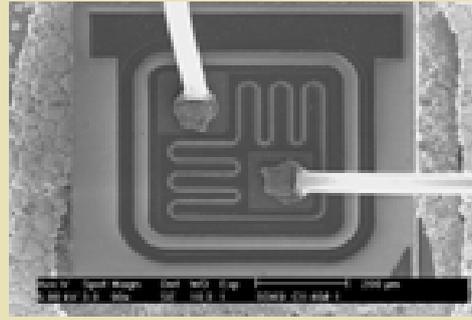


击穿



50/102

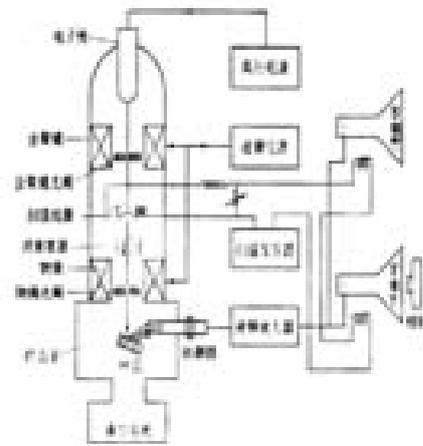
## 光学显微镜与SEM成像比较



51/102

## 扫描电子显微镜SEM-成像原理

- 电子枪发射的电子束，经透镜和物镜的聚焦后，以较小的直径、较高的能量和强度到达试样的表面。
- 在扫描线圈的偏转作用下，电子束以一定时间和空间顺序在试样表面作逐点式扫描运动。
- 入射电子于样品表面互相作用，产生背散射电子和二次发射电子。
- 只要收集样品表面发射的两种电子的一种，即可得到电子扫描的图象。



## EDS分析方法的特点

- ◆ 主要用于元素的定性分析；
- ◆ 能谱仪能够分析原子序数大于5的元素，波谱仪可以分析原子序数从4~92之间的所有元素；
- ◆ EDS的分析方式有点分析、线分析和面分析；
- ◆ EDS做微区分析时所激发的体积为 $10\mu\text{m}^3$ 左右；
- ◆ EDS常常与SEM结合使用，可对目标部位进行点、线、面形貌扫描和成分分析；
- ◆ EDS的定量分析精度较低（检测限一般 $>0.2\text{wt}\%$ ）。

53/102

## 3.4 加电的内部检查

- 微探针
- 红外热像
- EMMI光发射
- SEM电压衬度像
- SEM束感生电流像
- 电子束探针



54/102

### 3.4 加电的内部检查

#### 以测量电压效应为基础的失效定位技术

用途：确定断路失效点位置

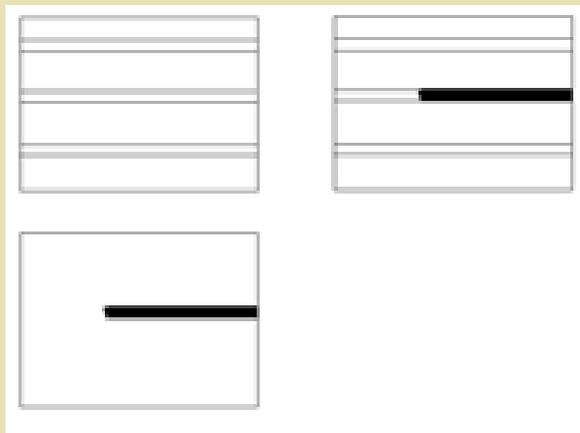
主要失效定位技术：

- ◆ 扫描电镜的电压衬度像
- ◆ 机械探针的电压和波形测试
- ◆ 电子束测试系统的电压和波形测试

55/102

### 3.4 加电的内部检查

#### 电压衬度像和差像示意图



56/102

### 3.4加电的内部检查

#### 电子束测试技术

- ◆ 用途：（与IC测试系统相比较）测定芯片内部节点的电压和波形，进行芯片失效定位（电镜+电子束探头示波器）
- ◆ 特点：（与机械探针相比较）高的空间分辨率，非接触，无电容负载，容易对准被测点

57/102

### 3.4加电的内部检查

#### 机械探针与电子探针比较

- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>◆ 直流电压、交流电压、脉冲电压</li><li>◆ 电压精度高，用于模拟电路、数字电路</li><li>◆ 信号注入、信号寻迹</li><li>◆ 接触性探针，需去钝化层</li><li>◆ 有负载，波形易变形</li><li>◆ 空间分辨率差</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>◆ 交流电压、脉冲电压</li><li>◆ 电压精度低，用于数字电路</li><li>◆ 信号寻迹</li><li>◆ 非接触性探针，不需去钝化层</li><li>◆ 无负载，波形不变形</li><li>◆ 空间分辨率高</li></ul> |
|---|--|

58/102

### 3.4加电的内部检查

#### 以测量电流效应为基础的失效定位技术

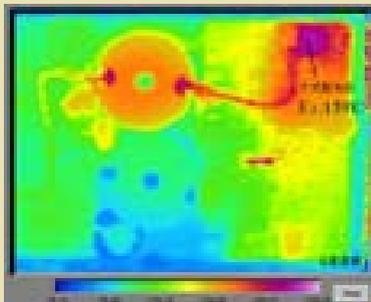
- ◆ 红外热象技术：热分布图，定热点
- ◆ 光发射显微镜：微漏电点失效定位  
栅氧化层缺陷，pn结缺陷，闩锁效应
- ◆ 电子束感生电流像：pn结缺陷定位

59/102

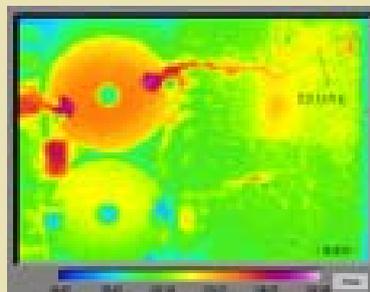
### 3.4加电的内部检查

#### 红外热像技术

改进前的混合电路  
热分布图



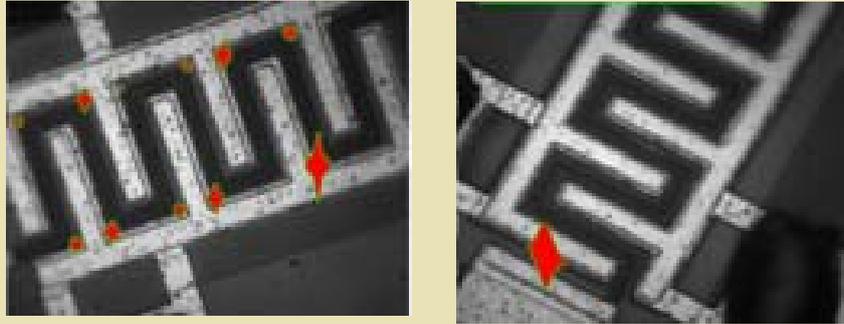
改进后的混合电路  
热分布图



60/102

### 3.4 加电的内部检查

#### 光发射显微镜 (EMMI)



61/102

### 4. 破坏性分析技术

#### 4.1 去除钝化层技术 (湿法、干法)

#### 4.2 剖切面技术及分析 (切片)



62/102

## 4.1 去除钝化层技术

- ◆ 干法：反应离子刻蚀，离子轰击
- ◆ 湿法：酸腐蚀，如氢氟酸、磷酸、混酸等



等离子刻蚀仪



等离子刻蚀前



等离子刻蚀后

63/102

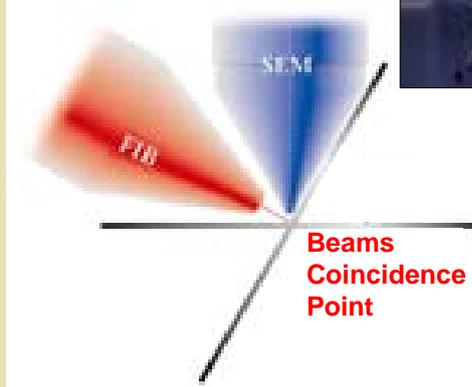
## 4.1 去除钝化层技术

### 去钝化层的监控



64/102

#### 4.1 去除钝化层 切割（剖面）技术

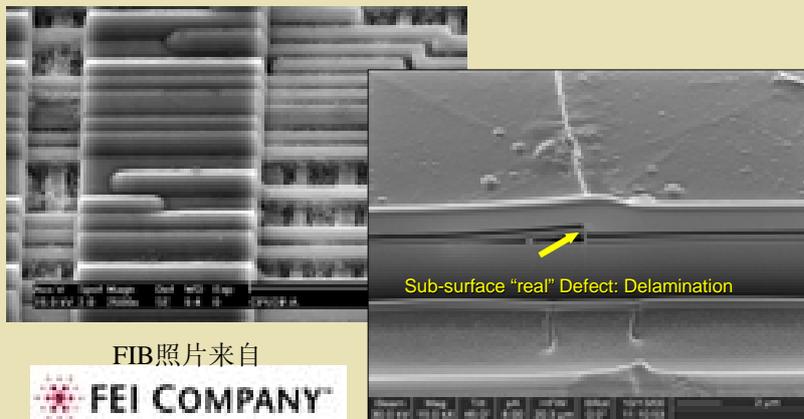


FIB—聚焦离子束

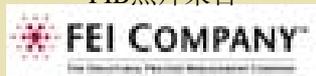
65/102

#### 4.1 去除钝化层技术

离子轰击去除钝化层、切割



FIB照片来自



66/102

## 4.2 剖切面技术及分析（金相切片）

- 厂家：UUEHLER
- Model No:60-1990
- 砂纸换用方便，双盘操作面，转速可调
- 研磨精度及抛光精度可随砂纸提高

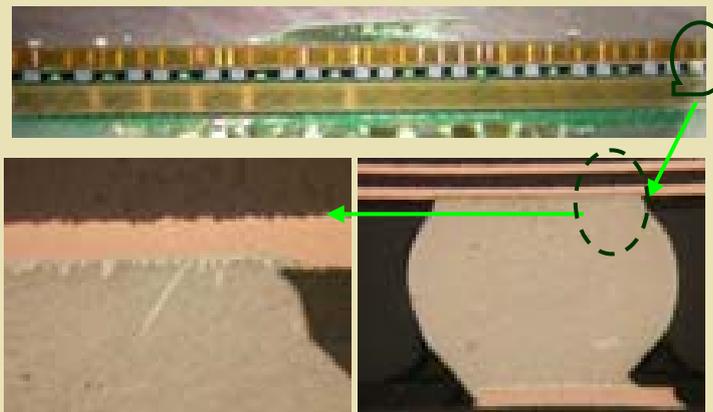


67/102

## 4.2 剖切面技术及分析（金相切片）

### 方法与步骤

- ❖ 取样
- ❖ 镶嵌
- ❖ 切片
- ❖ 抛磨
- ❖ 腐蚀
- ❖ 观察



(IPC-TM-650 2.1.1)

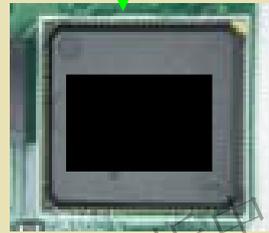
获得焊点界面结构的信息

68/102

## 金相切片制作过程—取样

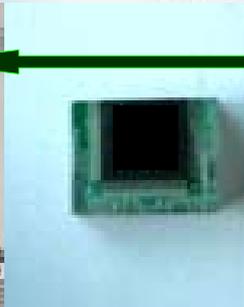
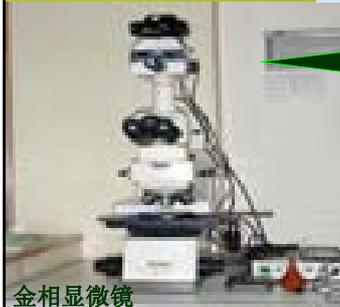
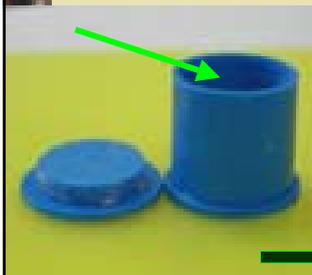


注意：最好使用专用工具(取样机或慢锯)，过程小心！以免制样造成原来失效现场破坏，产生新的失效。



69/102

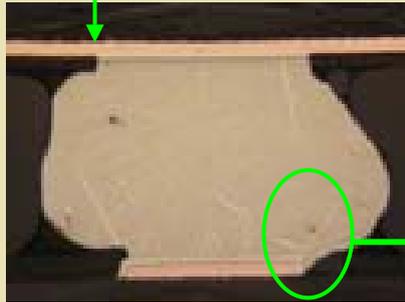
## 金相切片制作过程：镶嵌—切片—磨抛—观测



金相显微镜

抛磨机

### 金相切片分析举例（1）

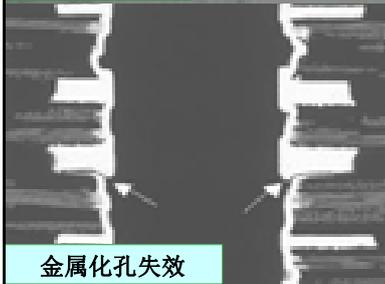


71/102

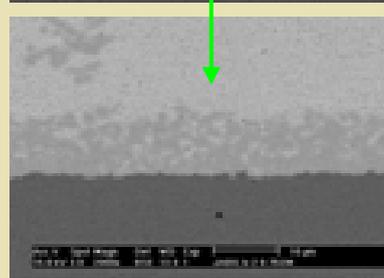
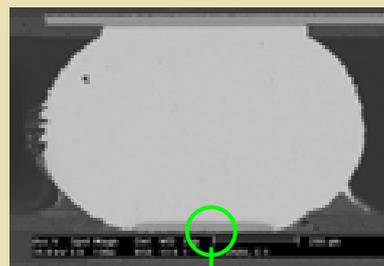
### 金相切片分析举例（2）



BGA焊点失效

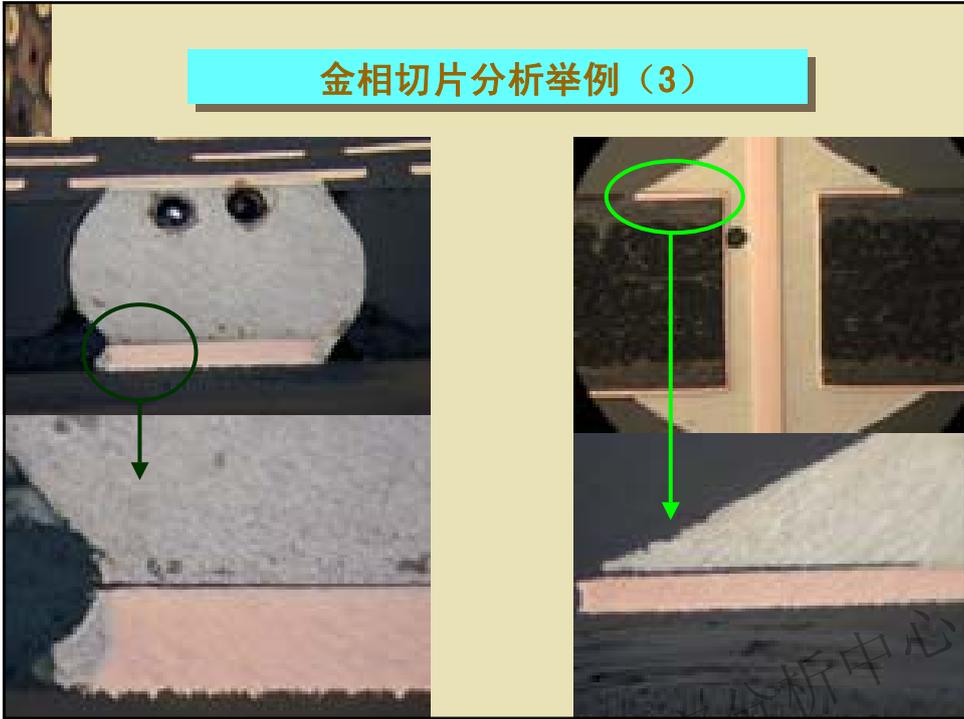


金属化孔失效

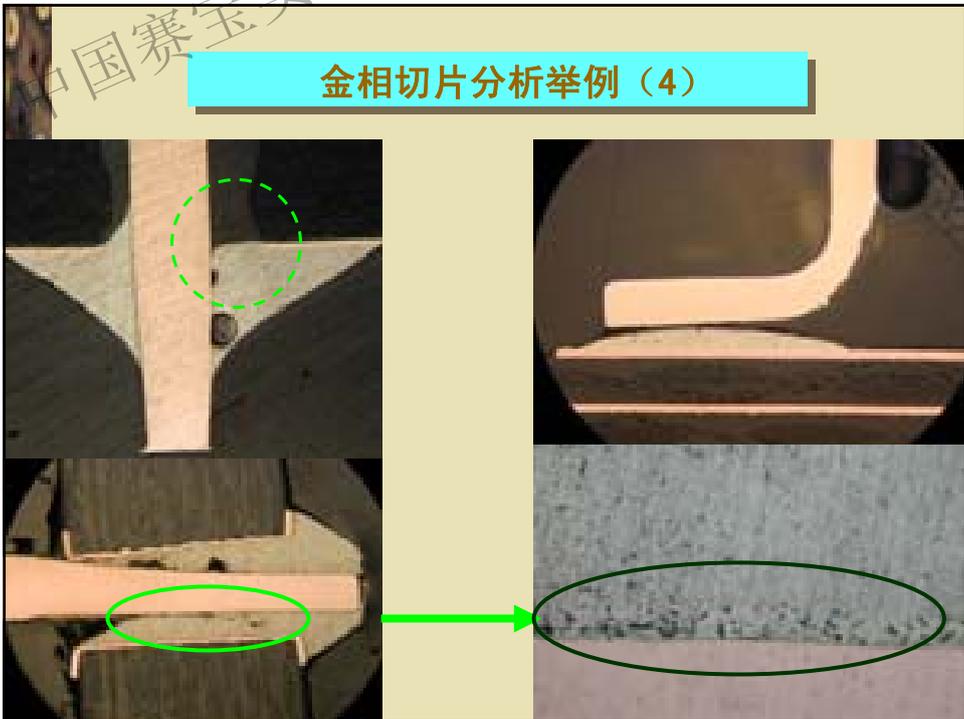


72/102

### 金相切片分析举例（3）



### 金相切片分析举例（4）

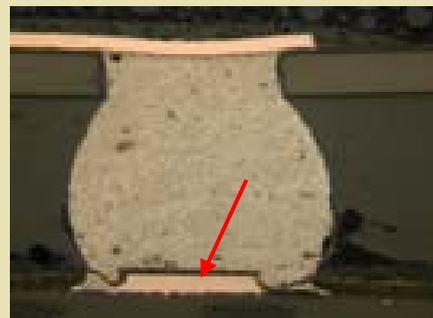
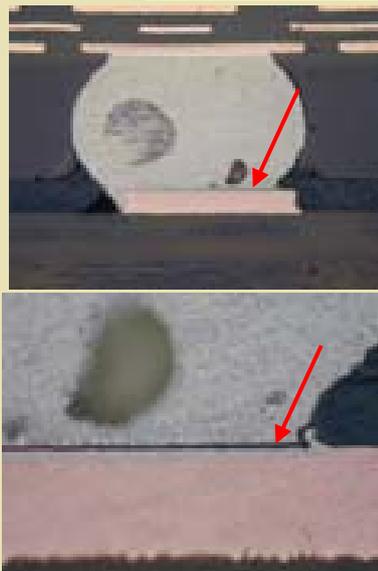


## 金相切片分析方法特点

- ◆ 破坏性方法
- ◆ 试样制备周期长（1d以上，最好3d）
- ◆ 试样制备要求高
- ◆ 可直观地获取材料内部大量信息
- ◆ 对操作和分析人员要求较高

75/102

## BGA焊点失效



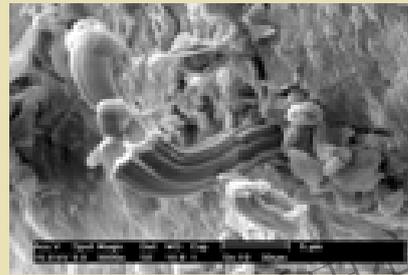
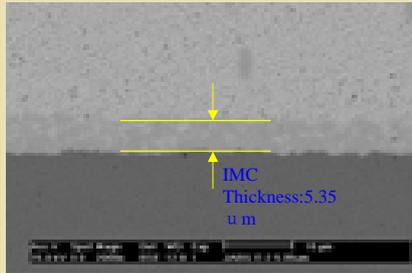
76/102

## SEM分析的例子

• 焊点金相组织观察

• 金属间化物 (IMC) 与锡须分析测量

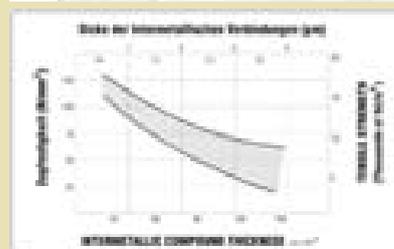
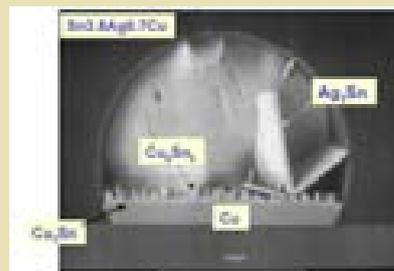
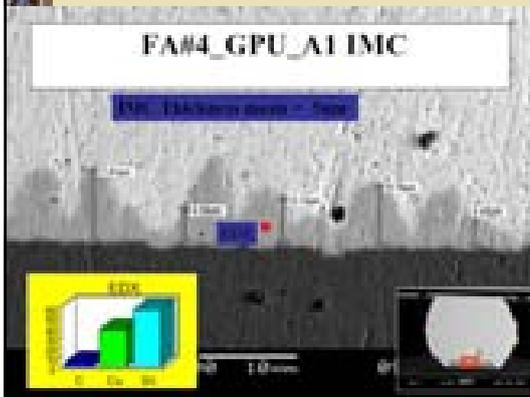
• 可焊性镀层分析



77/102

## SEM的应用举例—01

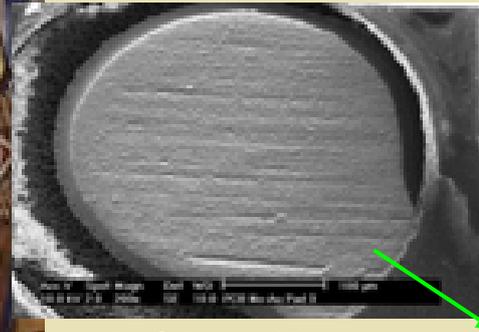
◆ IMC分析



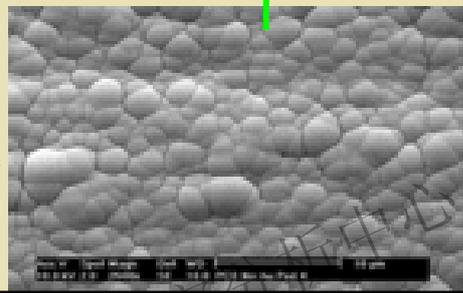
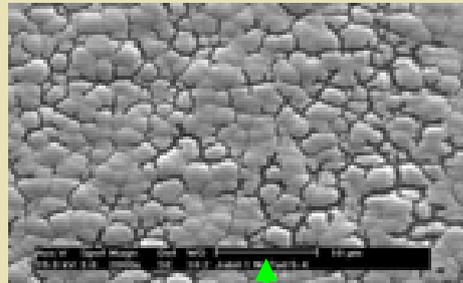
78/102

## SEM的应用举例—02

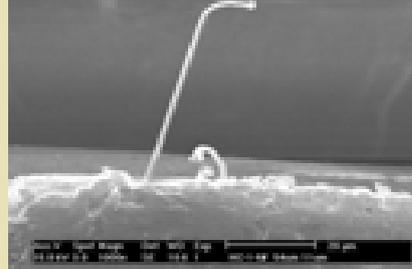
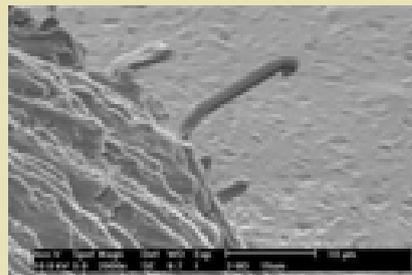
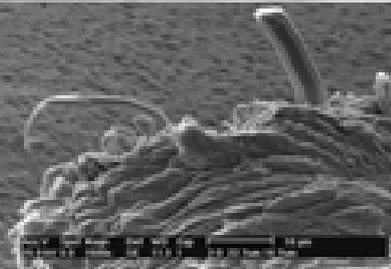
### ■ Pad分析



ENIG Finish of Pad



## SEM的应用举例—03锡须观察



102

## 制 样

- ◆ 锯、锉、钳、镊
- ◆ 自制小工具
- ◆ 研磨、抛光
- ◆ 化学腐蚀
- ◆ 有机溶解
- ◆ 反应离子刻蚀
- ◆ 聚焦离子轰击—FIB



## 形貌观察

- ◆ 目检
- ◆ 光学显微镜（立体显微镜、金相显微镜）
- ◆ 扫描电子显微镜
- ◆ 原子力显微镜（隧道显微镜）
- ◆ X-RAY透视
- ◆ C-SAM



## 成分分析

- ◆ ESD—X射线能量散射谱
- ◆ AES—俄歇谱
- ◆ SIMS—二次离子质谱
- ◆ XPS—电子能谱
- ◆ 离子色谱、质谱
- ◆ FTIR—红外光谱
- ◆ GCMS—色质联用
- ◆ 内腔体气氛检测分析



中国赛宝实验室可靠性研究分析中心

## 内部无损分析

- ◆ X—RAY透视观察
- ◆ C—SAM扫描观察
- ◆ PIND—内部粒子噪声分析
- ◆ 气密性分析



84/102

## 故障定位

- ◆ 电参数检测分析定位  
(常规检测、  
探针检测、非接触探针检测)
- ◆ 形貌观察定位
- ◆ 液晶敏感定位
- ◆ 热成像定位  
(红外热像)
- ◆ 光辐射显微定位



2

## 物理量分析

- ◆ 静电放电检测分析
- ◆ 键合拉力检测分析
- ◆ 芯片剪切力检测分析
- ◆ 温度分布检测分析
- ◆ 差热、热重分析



86/102

## 应力试验分析

- ◆ 环境应力试验分析
- ◆ 电应力试验分析
- ◆ 机械应力试验分析



IC负荷试验箱



温度冲击箱



交变湿热箱

87/102



88/102