

# 电子元器件失效分析技术

信息产业部电子五所

可靠性分析中心

费庆宇

大比特电子元器件论坛  
http://www.dabite.com

# 基本概念和失效分析技术

## 第一部分

大比特电子工程师论坛  
<http://www.big-bit.com>

# 失效的概念

- 失效定义

- 1 特性剧烈或缓慢变化

- 2 不能正常工作

- 3 不能自愈

- 失效种类

- 1 致命性失效：如过电应力损伤

- 2 缓慢退化：如MESFET的 $I_{DSS}$ 下降

- 3 间歇失效：如塑封器件随温度变化间歇失效

# 失效物理模型

- 应力—强度模型

失效原因： 应力 $>$ 强度

强度随时间缓慢减小

如:过电应力（EOS）、静电放电（ESD）、闩锁（latch up）

- 应力—时间模型（反应论模型）

失效原因：应力的时间累积效应，特性变化超差。如金属电迁移、腐蚀、热疲劳

# 温度应力—时间模型

$$\frac{dM}{dt} = Ae^{-\frac{E}{kT}}$$

M温度敏感参数, E激活能, k 玻耳兹曼常量,  
T绝对温度, t时间, A常数

T大, 反应速率dM/dt 大, 寿命短

E大, 反应速率dM/dt 小, 寿命长

# 温度应力的时间累积效应

$$M_t - M_0 = Ae^{-\frac{E}{kT}} (t - t_0)$$

失效原因：温度应力的时间累积效应，特性变化超差

## 与力学公式类比

$$\frac{dM}{dt} = Ae^{-\frac{E}{kT}}$$

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F}{m}$$

$$M_t - M_0 = Ae^{-\frac{E}{kT}}(t - t_0)$$

$$mv_t - mv_0 = F(t - t_0)$$

# 失效物理模型小结

- 应力-强度模型：不考虑激活能和时间效应，适用于偶然失效，失效过程短，特性变化快，属剧烈变化，失效现象明显。
- 应力-时间模型（反应论模型）：需考虑激活能和时间效应，适用于缓慢退化，失效现象不明显。



# 明显失效现象可用应力-强度模型来解释

如：与电源相连的金属互连线烧毁是由浪涌电压超过器件的额定电压引起。

# 可靠性评价的主要内容

- 产品抗各种应力的能力
- 产品的平均寿命

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 预计平均寿命的方法

- 1 求激活能 E

$$L = A \exp\left(\frac{E}{kT}\right)$$
$$\ln L = B + \frac{E}{kT}$$
$$\ln L_1 = B + \frac{E}{kT_1}$$
$$\ln L_2 = B + \frac{E}{kT_2}$$

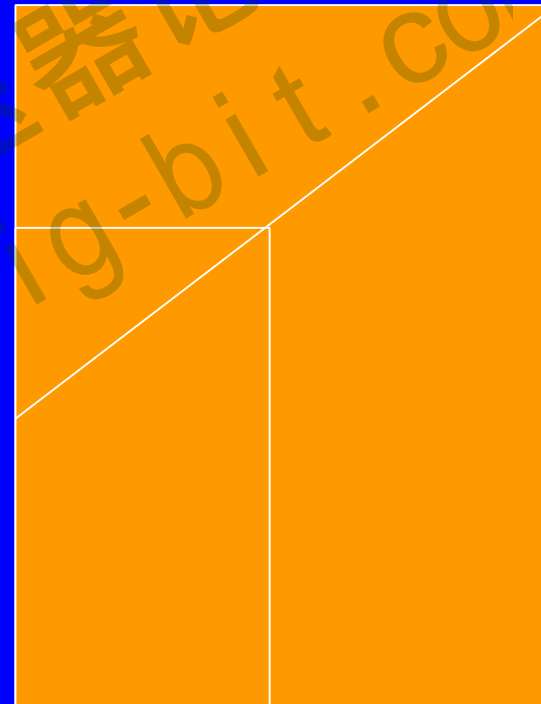
Ln L2

Ln L1

B

1/T1

1/T2



# 预计平均寿命的方法

- 2 求加速系数F

$$L_2 = A \exp\left(\frac{E}{kT_2}\right)$$
$$L_1 = A \exp\left(\frac{E}{kT_1}\right)$$
$$F = \frac{L_2}{L_1} = \exp\left(\frac{E}{k}\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)\right)$$

试验获得高温T1的寿命为L1,低温T2寿命为L2,可求出F

# 预计平均寿命的方法

- 由高温寿命L1推算常温寿命L2
- $F=L2/L1$
- 对指数分布
- $L1=MTTF=1/\lambda$
- $\lambda$ 失效率

$$\text{失效率} = \frac{\text{试验时间内失效的元件数}}{\text{初始时间未失效元件数} \times \text{试验时间}}$$

# 失效分析的概念

失效分析的定义

失效分析的目的

- 确定失效模式
- 确定失效机理
- 提出纠正措施，防止失效重复出现

# 失效模式的概念和种类

- 失效的表现形式叫失效模式
- 按电测结果分类：开路、短路或漏电、参数漂移、功能失效

大比特电子论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 失效机理的概念

- 失效的物理化学根源叫失效机理。例如
- 开路的可能失效机理：过电烧毁、静电损伤、金属电迁移、金属的电化学腐蚀、压焊点脱落、CMOS电路的闩锁效应
- 漏电和短路的可能失效机理：颗粒引发短路、介质击穿、pn微等离子击穿、Si-Al互熔



## 失效机理的概念（续）

- 参数漂移的可能失效机理：封装内水汽凝结、介质的离子沾污、欧姆接触退化、金属电迁移、辐射损伤

大比特电子技术论坛  
<http://bbs.big-bit.com/>

# 引起失效的因素

- 材料、设计、工艺
- 环境应力

环境应力包括：过电、温度、湿度、机械应力、静电、重复应力

- 时间

# 失效分析的作用

- 确定引起失效的责任方（用应力—强度模型说明）
- 确定失效原因
- 为实施整改措施提供确凿的证据

## 举例说明：失效分析的概念和作用

- 某EPROM 使用后无读写功能
- 失效模式：电源对地的待机电流下降
- 失效部位：部分电源内引线熔断
- 失效机理：闩锁效应
- 确定失效责任方：模拟试验
- 改进措施建议：改善供电电网，加保护电路

# 某EPROM的失效分析结果

由于有CMOS结构，部分电源线断，是闩锁效应。

大比特电子工程论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 模拟试验确定失效责任方

触发电流：350mA

维持电压：2.30V

（技术指标：电源电压：5V

触发电流：200mA

维持电压：8.76V

触发电流 >200mA)

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 失效分析的受益者

- 元器件厂：获得改进产品设计和工艺的依据
- 整机厂：获得索赔、改变元器件供货商、改进电路设计、改进电路板制造工艺、提高测试技术、设计保护电路的依据
- 整机用户：获得改进操作环境和操作规程的依据
- 提高产品成品率和可靠性，树立企业形象，提高产品竞争力

# 失效分析技术的延伸

- 进货分析的作用：选择优质的供货渠道，防止假冒伪劣元器件进入整机生产线
- 良品分析的作用：学习先进技术的捷径

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.digit-01.com/>



# 失效分析的一般程序

- 收集失效现场数据
- 电测并确定失效模式
- 非破坏检查
- 打开封装
- 镜检
- 通电并进行失效定位
- 对失效部位进行物理化学分析，确定失效机理
- 综合分析，确定失效原因，提出纠正措施

# 收集失效现场数据

- 作用：根据失效现场数据估计失效原因和失效责任方

根据失效环境：潮湿、辐射

根据失效应力：过电、静电、高温、低温、高低温

根据失效发生期：早期、随机、磨损

- 失效现场数据的内容

# 水汽对电子元器件的影响

- 电参数漂移
- 外引线腐蚀
- 金属化腐蚀
- 金属半导体接触退化

大比特电子变压器论坛  
<http://www.big-bit.com>

# 辐射对电子元器件的影响

- 参数漂移、软失效
- 例：n沟道MOS器件阈值电压减小

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 失效应力与失效模式的相关性

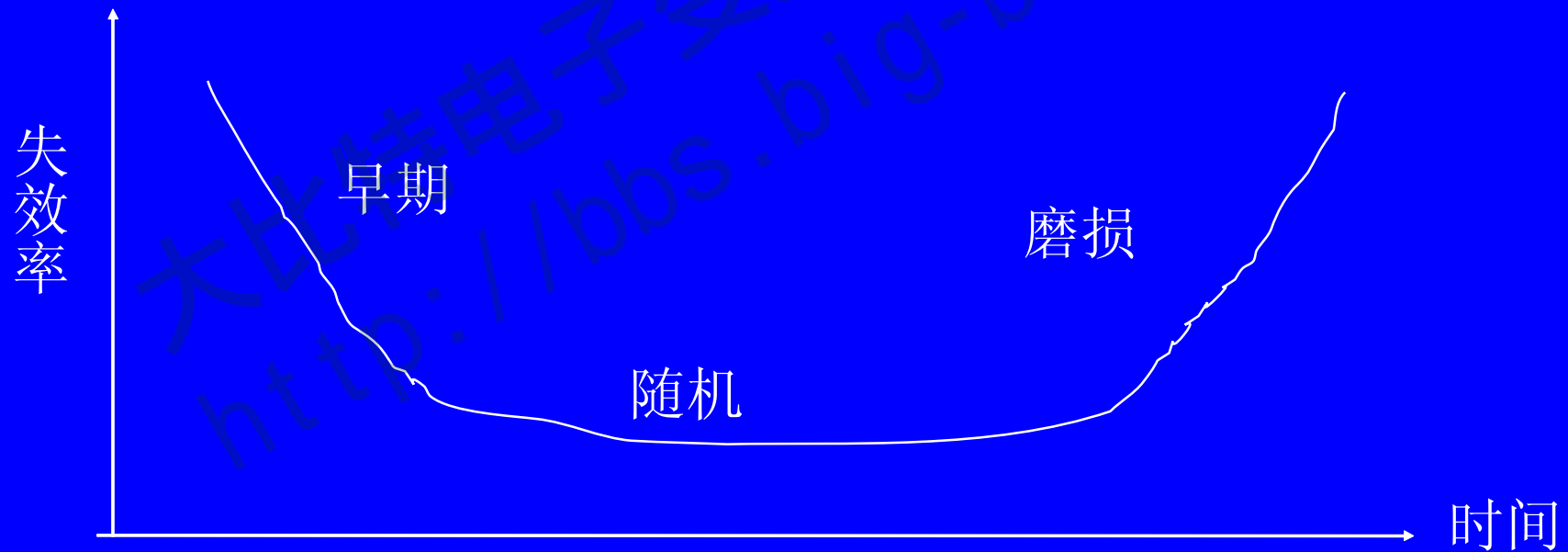
- 过电：pn结烧毁、电源内引线烧毁、电源金属化烧毁
- 静电：MOS器件氧化层击穿、输入保护电路潜在损伤或烧毁
- 热：键合失效、Al-Si互溶、pn结漏电
- 热电：金属电迁移、欧姆接触退化
- 高低温：芯片断裂、芯片粘接失效
- 低温：芯片断裂

# 失效发生期与失效机理的关系

- 早期失效：设计失误、工艺缺陷、材料缺陷、筛选不充分
- 随机失效：静电损伤、过电损伤
- 磨损失效：元器件老化
- 随机失效有突发性和明显性
- 早期失效、磨损失效有时间性和隐蔽性

# 失效发生期与失效率

$$\text{失效率} = \frac{\text{试验时间内失效的元件数}}{\text{试验初始的元件数} \times \text{试验时间}}$$



# 以失效分析为目的的电测技术

- 电测在失效分析中的作用  
重现失效现象，确定失效模式，缩小故障隔离区，确定失效定位的激励条件，为进行信号寻迹法失效定位创造条件
- 电测的种类和相关性  
连接性失效、电参数失效和功能失效



# 电子元器件失效分析的简单实用测试技术（一）

- 连接性测试：万用表测量各管脚对地端/电源端/另一管脚的电阻，可发现开路、短路和特性退化的管脚。电阻显著增大或减小说明有金属化开路或漏电部位。
- 待机(stand by)电流测试:所有输入端接地（或电源），所有输出端开路，测电源端对地端的电流。待机(stand by)电流显著增大说明有漏电失效部位。待机(stand by)电流显著减小说明有开路失效部位。

# 电子元器件失效分析的简单实用测试技术（二）

- 各端口对地端/电源端的漏电流测试（或I—V测试），可确定失效管脚。
- 特性异常与否用好坏特性比较法确定。

大比特电子网  
<http://bbs.bigbit.net/>

# 待机(stand by)电流显著减小的 案例

由于闩锁效应某EPROM  
的两条电源内引线之一烧断。

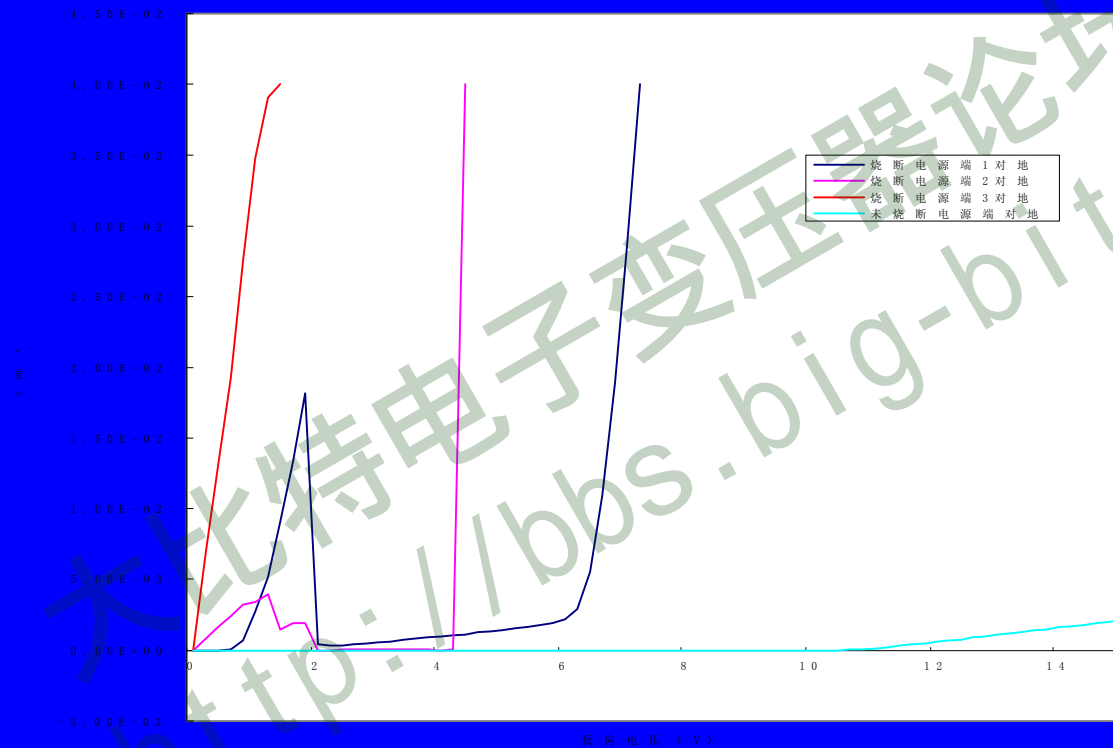
大比特电子论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 待机(stand by)电流偏大的案例 TDA7340S 音响放大器电路

用光发射显微镜观察到漏  
电部位

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 由反向I—V特性确定失效机理



# 由反向I—V特性确定失效机理

- 直线为电阻特性，pn结穿钉，属严重EOS损伤。
- 反向漏电流随电压缓慢增大，pn结受EOS损伤或ESD损伤。
- 反向击穿电压下降，pn结受EOS损伤或ESD损伤。

# 由反向I—V特性确定失效机理

- 反向击穿电压不稳定：芯片断裂、芯片受潮
- 烘烤变化与否可区分离子沾污和静电过电失效

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.bigbit.com>

# 烘焙技术

- 1应用范围：漏电流大或不稳定、阻值低或不稳定、器件增益低、继电器接触电阻大
- 2用途：确定表面或界面受潮和沾污
- 3方法：高温储存、高温反偏



# 清洗技术

- 应用范围：离子沾污引起的表面漏电
- 用途：定性证明元器件受到表面离子沾污
- 方法：无水乙醇清洗  
去离子水冲洗（可免去）  
烘干

# 烘焙和清洗技术的应用举例

彩电图像模糊的失效分析

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 烘焙和清洗技术的应用举例

- 双极型器件的反向靠背椅特性是钝化层可动离子沾污的结果，可用高温反偏和高温储存来证实。

大比特电子论坛  
<http://bbs.big-bit.com/>

# 失效分析的发展方向

- 失效定位成为关键技术
- 非破坏
- 非接触
- 高空间分辨率
- 高灵敏度

电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 无损失效分析技术

- 无损分析的重要性 (从质检和失效分析两方面考虑)
- 检漏技术
- X射线透视技术  
用途：观察芯片和内引线的完整性
- 反射式扫描声学显微技术  
用途：观察芯片粘接的完整性，微裂纹，界面断层

# 检漏技术

- 粗检：负压法、氟碳加压法
- 细检：氦质谱检漏法

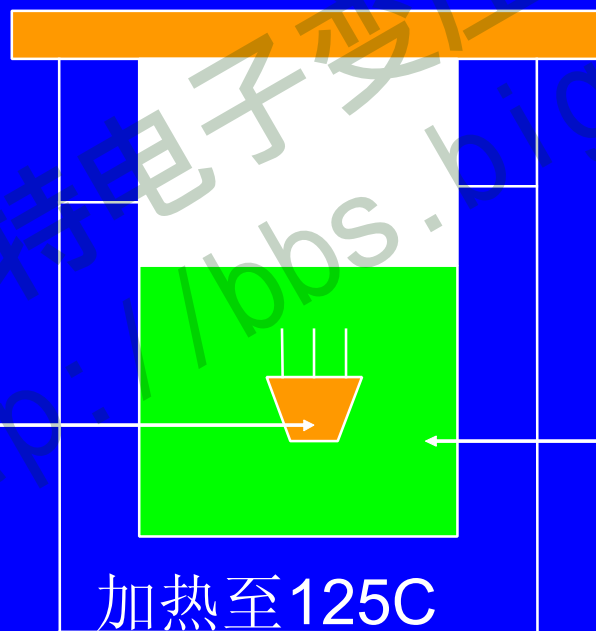
大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 负压法检漏



# 氟碳加压法

F113沸点  
47.6C



FC43 沸  
点180C



# X射线透视与反射式声扫描比较

种类	应用优势	基本原理
<b>X</b> 射线透视象	观察材料高密度区的完整性，如器件内引线断裂	透过材料高密度区 <b>X</b> 射线强度衰减
<b>C-SAM</b> 象	观察材料内部空隙，如芯片粘接不良，器件封装不良	超声波传播遇空气隙受阻反射

# X射线透视举例

- FPGA电源内引线烧断

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# C—SAM像举例

- 功率器件芯片粘接失效
- 塑封IC的管脚与塑料分层

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 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

# 打开塑料封装的技术

浓硫酸和发烟硝酸腐蚀法

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 去钝化层的技术

- 湿法：如用HF: H<sub>2</sub>O=1: 1溶液去SiO<sub>2</sub>  
85% HPO<sub>3</sub>溶液，温度160C去 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>
- 干法：CF<sub>4</sub>和O<sub>2</sub>气体作等离子腐蚀去SiN<sub>x</sub>  
和聚酰亚胺
- 干湿法对比

# 去钝化层的监控

观察压焊点

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 去层间介质

- 作用：多层结构芯片失效分析
- 方法：反应离子腐蚀
- 特点：材料选择性和方向性
- 结果

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.bit.com.cn>



# 腐蚀的方向性

无方向性：金属互连失去依托

有方向性：金属互连有介质层  
作依托

# 去金属化Al层技术

- 作用
- 配方：30% HCl 或 30% H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>  
KOH、NaOH溶液
- 应用实例：pn结穿钉

# 抛切面技术

环氧固化、剖切、研磨

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 形貌象技术

- 光学显微术：分辨率 $3600\text{\AA}$ ，倍数 $1200\times$   
景深小，构造简单  
对多层结构有透明性，可不制样
- 扫描电子显微镜：分辨率 $50\text{\AA}$ ，倍数10万  
景深大，构造复杂  
对多层结构无透明性，需制样

# 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象
- 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

# SEM电压衬度象原理

金属化层负电位为亮区，零  
或正电位为暗区

大比特电子工程论坛  
<http://bbs.big-bit.com/>

# 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）高空间分辨率，非接触，无电容负载，容易对准被测点

# 机械探针与电子探针比较

- 直流电压、交流电压、脉冲电压
- 电压精度高，用于模拟电路、数字电路
- 信号注入、信号寻迹
- 接触性探针，需去钝化层
- 有负载，波形易变形
- 空间分辨率差
- 交流电压、脉冲电压
- 电压精度低，用于数字电路
- 信号寻迹
- 非接触性探针，不需去钝化层
- 无负载，波形不变形
- 空间分辨率高



# 由设计版图确定电子束探测点 用波形比较法进行设计验证



芯片实时象

CAD设计  
版图

# 用EBT进行失效分析实例

- 80脚进口HD63B03微处理器单元
- 手工焊正常
- 载流焊，90%发生多脚开路
- 失效原因
- 改进建议



# 80脚进口HD63B03微处理器单元失效分析

引线框架密封不良的IC  
的反射声学显微图象

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 以测量电流效应为基础的失效定位技术

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

# 改进前后的混合电路热分布图

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# FPGA

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# EMM确定CMOS电路闩锁效应易发区

闩锁效应的外因和

内因

闩锁效应的危害

闩锁效应的预防

增强薄弱环节

EMM的作用

失效定位

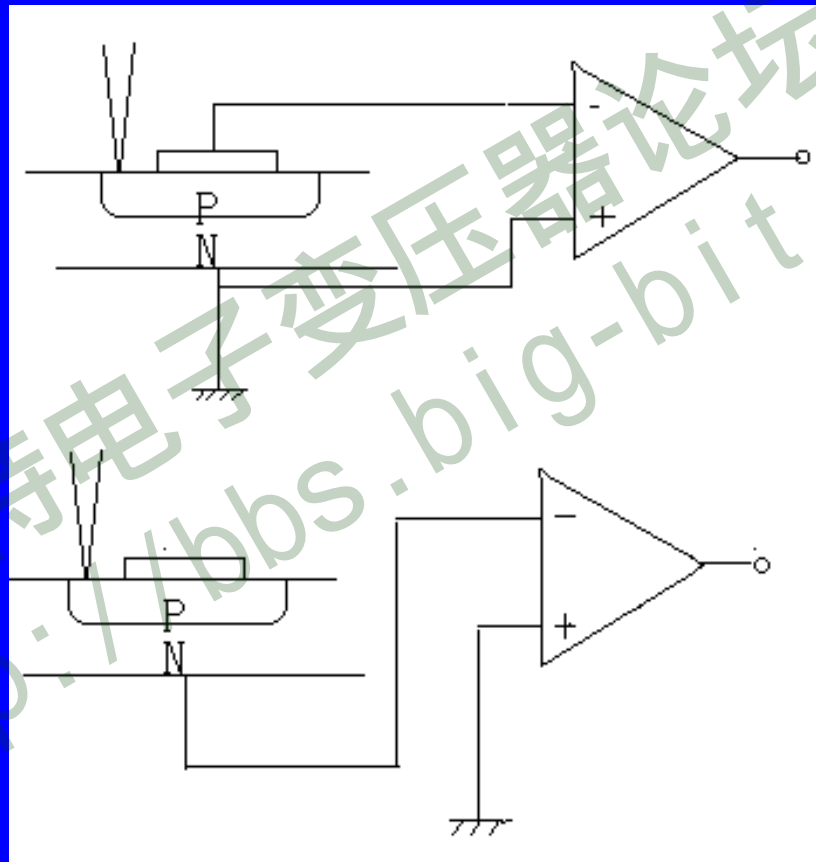
大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# 单端输出束感生电流象 (EBIC)

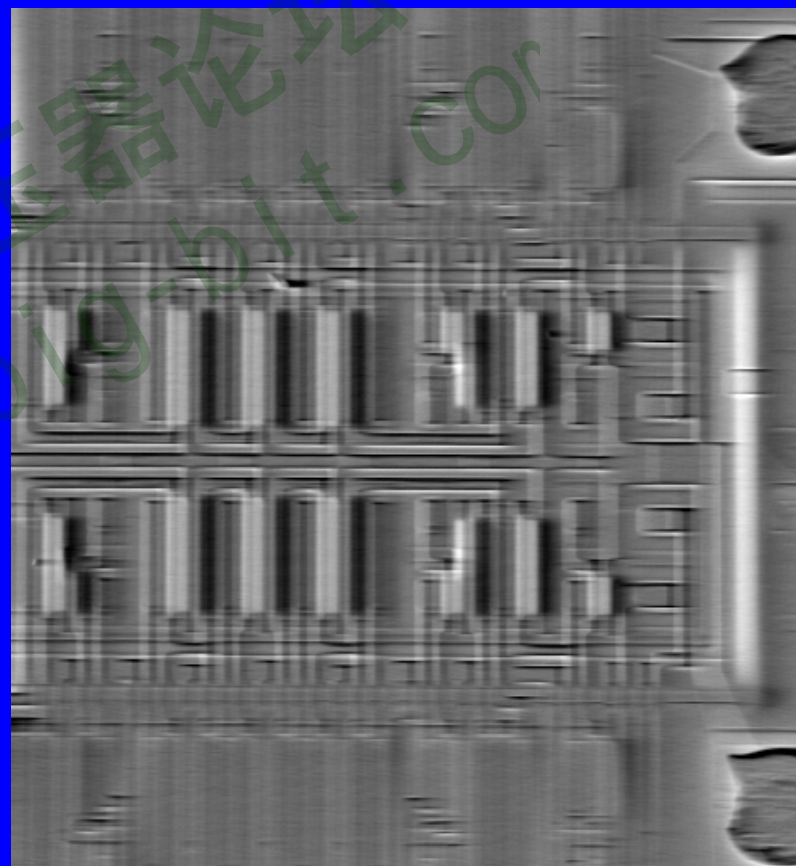
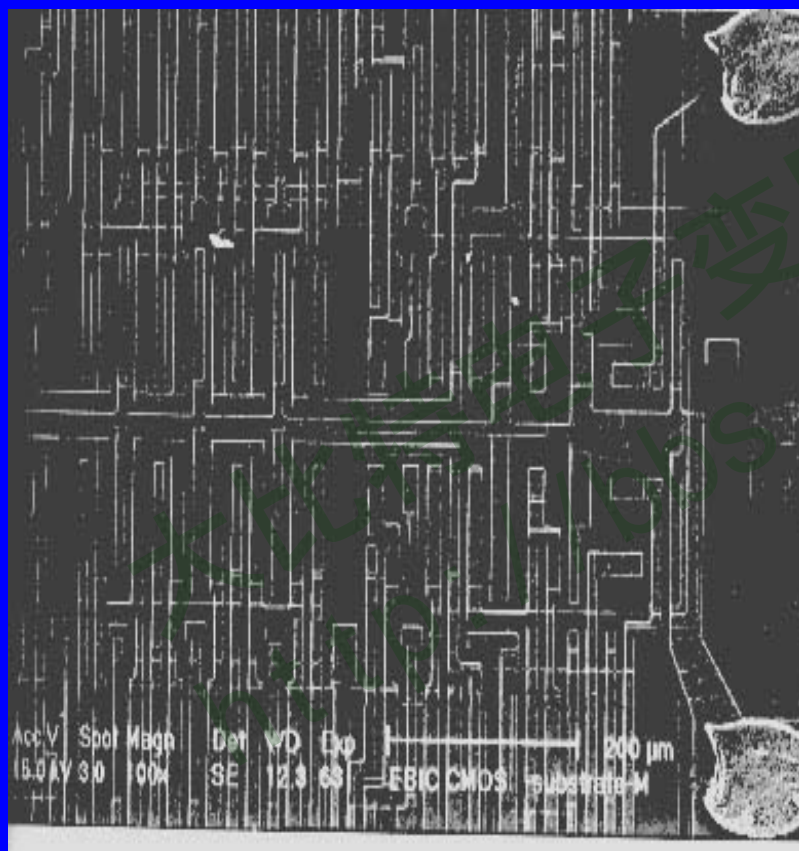
- EBIC的用途：用SEM观察pn结缺陷
- 传统EBIC用双端输出，每次只能观察一个结
- 单端输出EBIC可同时观察芯片所有pn结的缺陷，适用于VLSI失效分析
- 例某CMOS电路的EBIC



# 原理



# CMOS电路的束感生电流象



# 封装内部气体成份分析

封装内部水汽和腐蚀性气体的危害：

- 引起芯片表面漏电，器件电特性不稳定
- 腐蚀金属化层直至开路

检测法

- 内置传感器
- 露点检测
- 质谱分析

# 露点检测

1 应用范围: 气密性封装内部水汽浓度

2 原理: 露点与水汽浓度相关

3 方法: 通过降温确定器件的水汽敏感电特性的突变温度(露点)

# 质谱分析结果

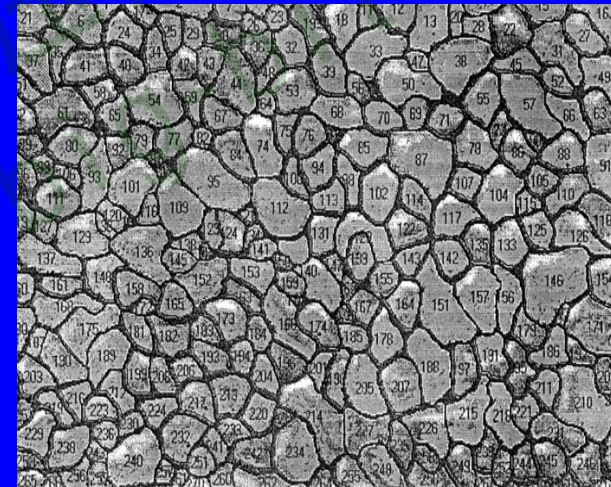
样品		<b>JK256</b>	<b>792</b>	<b>3DG13014</b>	<b>3DG13062</b>
氮气	%	<b>99.9</b>	<b>52.2</b>	<b>99.0</b>	<b>96.1</b>
水汽	%	<b>0.02</b>	<b>38.2</b>	<b>0.21</b>	<b>0.56</b>

其它结果为：气体总压强，氧，氩，氢，CO<sub>2</sub>，酒精，甲醇，碳氢化合物

仪器灵敏度：水汽 100ppm， 其它气体 10ppm

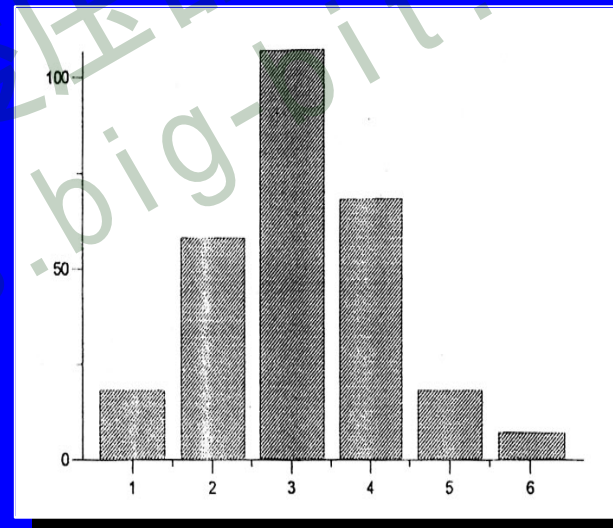
# 用SEM进行VLSI金属化层晶粒结构的定量分析

- 1.定量分析的重要性
- 适当增大晶粒尺寸可增加铝金属层抗电迁移能力
- 定量测定VLSI铝金属化层晶粒尺寸，有助于控制工艺条件，制备高可靠的铝金属化层



# 用SEM进行VLSI金属化层晶粒结构的定量分析

- 2.定量分析方法
- SEM图象数字分析软件，可统计出金属化层任意区域不同晶粒尺寸范围的晶粒数目，用于VLSI金属化工艺的统计工艺控制，是观念上的创新。



# 固态器件微区化学成份分析

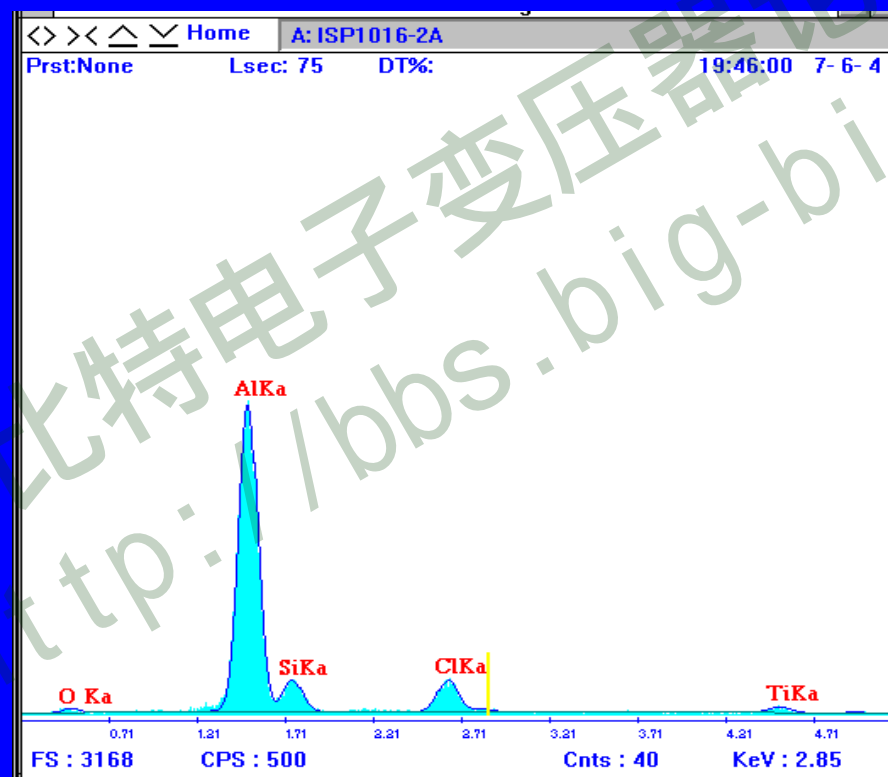
技术指标	EDAX	AES	SIMS
原子序数检测范围	<b>N&gt;5</b>	<b>N&gt;2</b>	全部
灵敏度 (%)	<b>1</b>	<b>0.1</b>	<b>10<sup>-4</sup></b>
深度分辨率 (nm)	<b>1000</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
横向分辨率 (nm)	<b>1000</b>	<b>300</b>	<b>1000</b>



# ISP在过电应力作用下金属化层的热电迁移照片和连接物的能谱分析结果

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>

# X射线能谱分析确定铝金属桥接

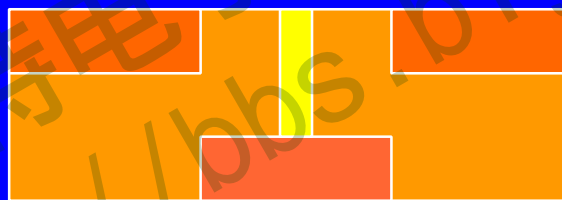


# 聚焦离子束技术

用途:

- 1 制备探测通孔，实现多层布线VLSI的下层金属节点的电压和波形测试
- 2 为对准下层金属制备通孔，可同时显示CAD设计版图和芯片实时图象，可根据版图确定钻孔部位。
- 3 在VLSI芯片上进行线路修改，省去重新制板和流片的手续，加快产品研制

# 用FIB制备探测通孔



# 聚焦离子束技术

- 4 为观察内部缺陷，对样品进行局部剖切面
- 5 扫描离子显微镜可用于形貌观察

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.bigbit.com>

# 聚焦离子束技术应用实例

电路修改

大比特电子变压器论坛  
<http://bbs.big-bit.com>