



电子元器件失效 分析技术 Failure Analysis

编著：张红波

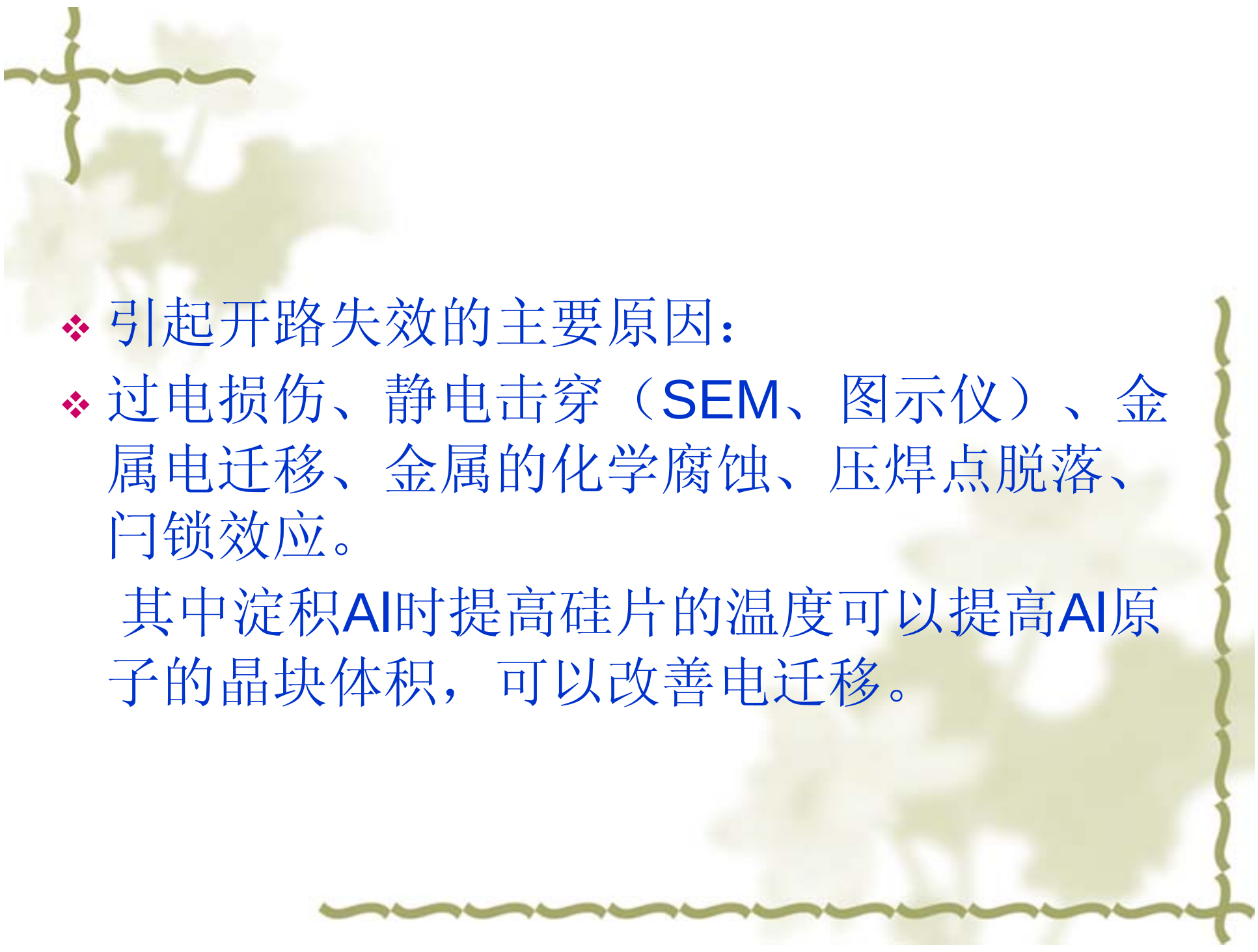


一、电子元器件失效分析技术

- ❖ 1.1、失效分析的基本概念
- ❖ 1.2、失效分析的重要意义
- ❖ 1.3、失效分析的一般程序
- ❖ 1.4、收集失效现场数据
- ❖ 1.5、以失效分析为目的的电测技术
- ❖ 1.6、无损失效分析技术
- ❖ 1.7、样品制备技术
- ❖ 1.8、显微形貌像技术
- ❖ 1.9、以测量电压效应为基础的失效定位技术
- ❖ 1.10、以测量电流效应为基础的失效定位技术
- ❖ 1.11、电子元器件化学成份分析技术

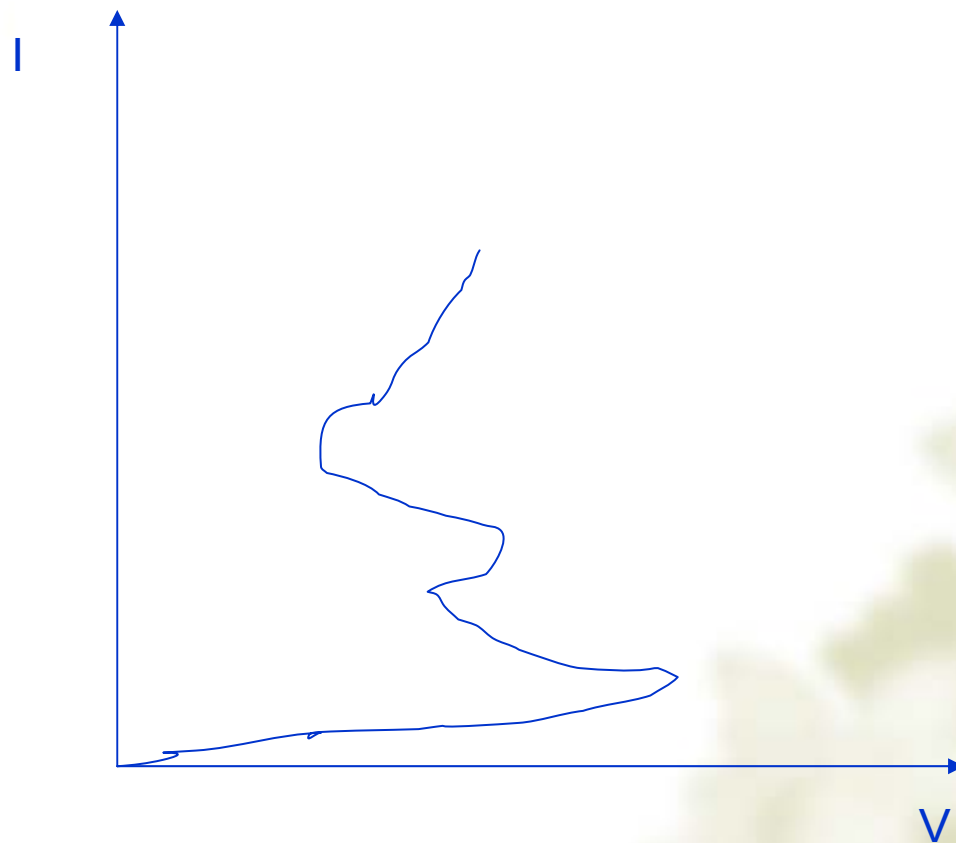
1.1 失效分析的基本概念

- ❖ 目的：确定失效模式和失效机理，提出纠正措施，防止这种失效模式和失效机理重复出现。
- ❖ 失效模式：指观察到的失效现象、失效形式，如开路、短路、参数漂移、功能失效等。
- ❖ 失效机理：指失效的物理化学过程，如疲劳、腐蚀和过应力等。

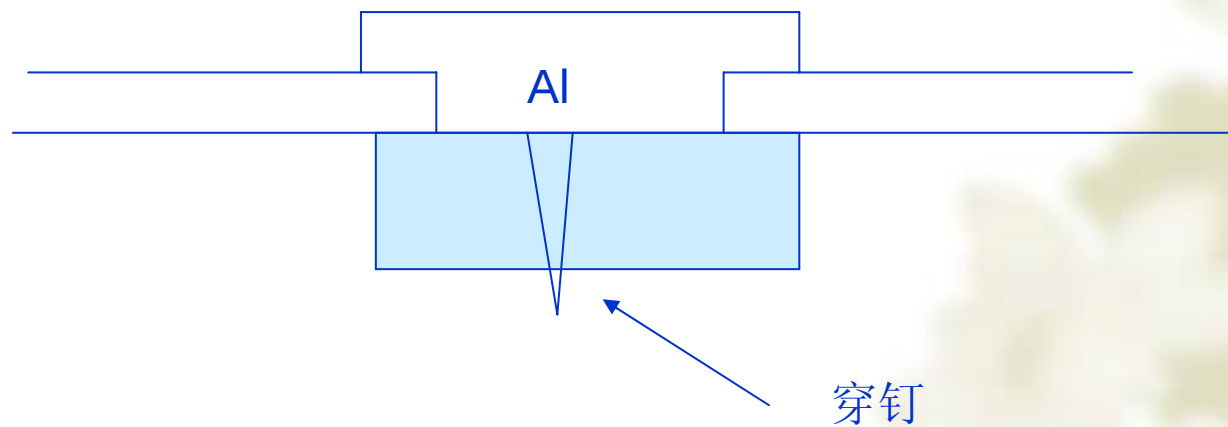
- 
- ❖ 引起开路失效的主要原因：
 - ❖ 过电损伤、静电击穿（**SEM**、图示仪）、金属电迁移、金属的化学腐蚀、压焊点脱落、闩锁效应。

其中淀积**Al**时提高硅片的温度可以提高**Al**原子的晶块体积，可以改善电迁移。

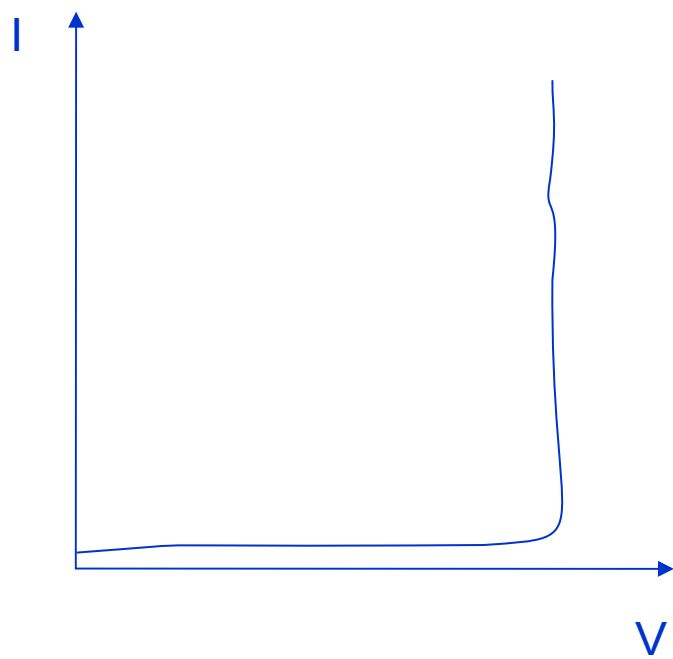
典型的闩锁效应电源对地的I—V曲线



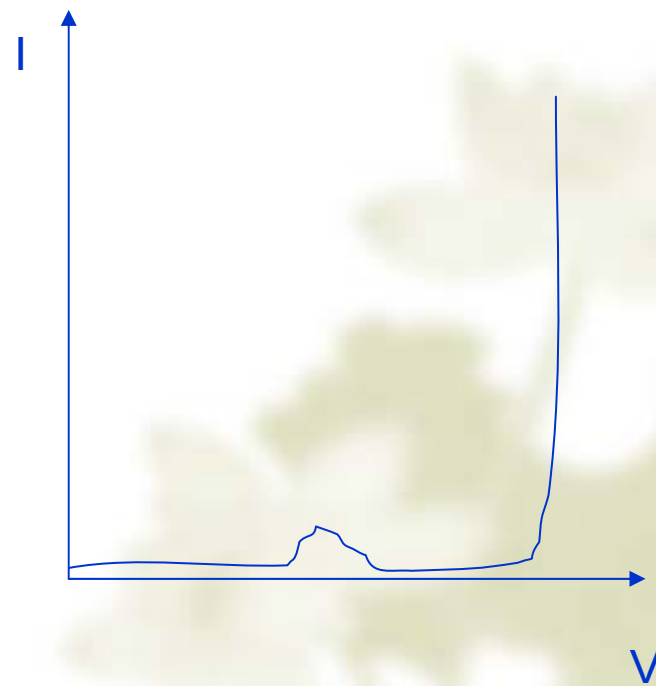
- ❖ 引起漏电和短路失效的主要原因：
- ❖ 颗粒引发短路、介质击穿、PN结微等离子击穿、**Si—Al互溶**

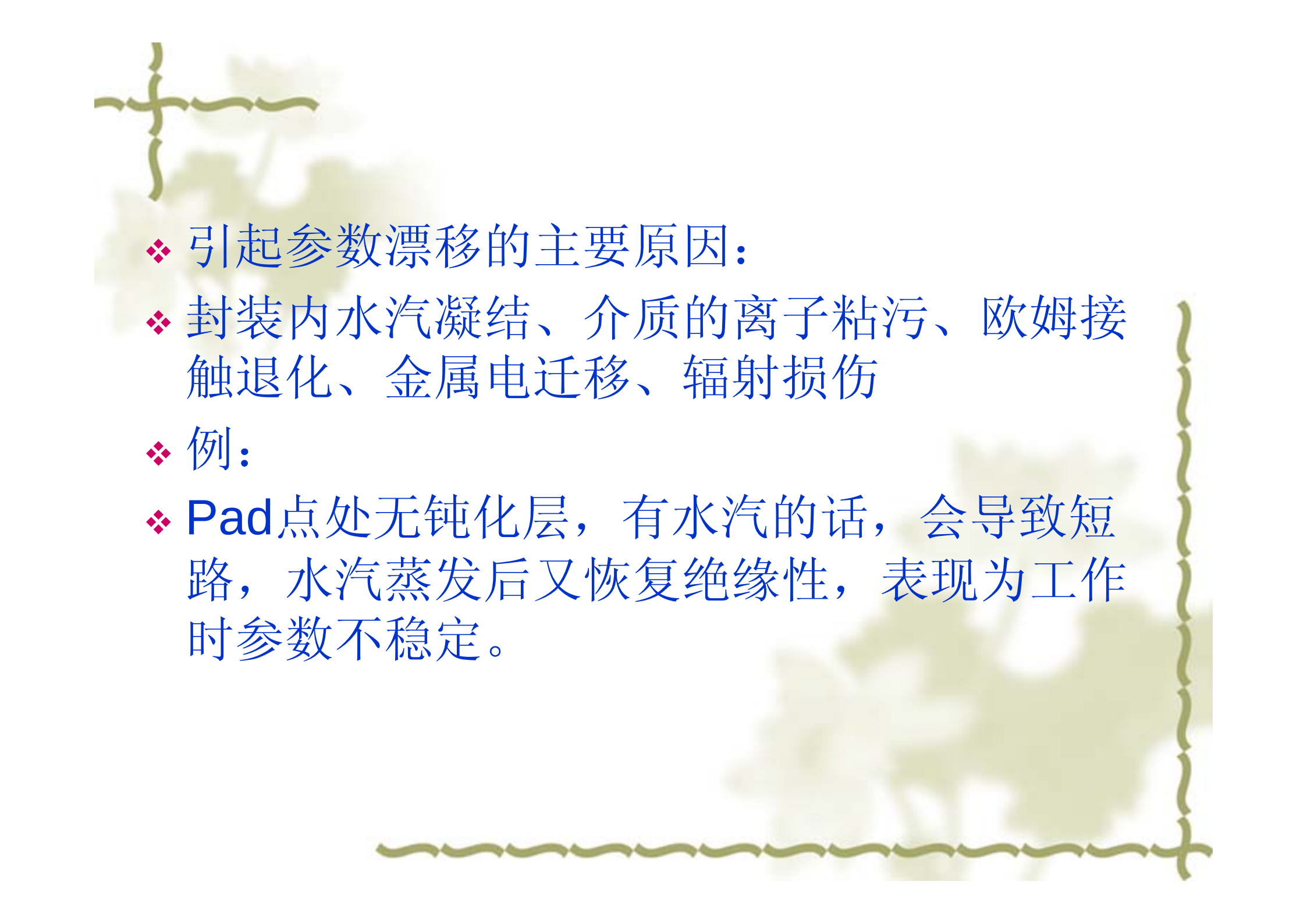


正常PN结反向曲线



微等离子子击穿PN结反向曲线



- 
- ❖ 引起参数漂移的主要原因：
 - ❖ 封装内水汽凝结、介质的离子粘污、欧姆接触退化、金属电迁移、辐射损伤
 - ❖ 例：
 - ❖ **Pad**点处无钝化层，有水汽的话，会导致短路，水汽蒸发后又恢复绝缘性，表现为工作时参数不稳定。

❖ 失效物理模型：

❖ 1、应力—强度模型（适于瞬间失效）

❖ 失效原因：应力>强度

❖ 例如：过电应力（EOS）、静电放电（ESD）、闩锁（Latch up）等。

❖ 2、应力—时间模型（适于缓慢退化）

❖ 失效原因：应力的时间积累效应，特性变化超差。

❖ 例如：金属电迁移、腐蚀、热疲劳等。

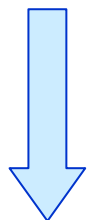
3、温度应力-时间模型

反应速度符合下面的规律

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

(M是温度敏感参数，E是与失效机理有关的激活能)

积分



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

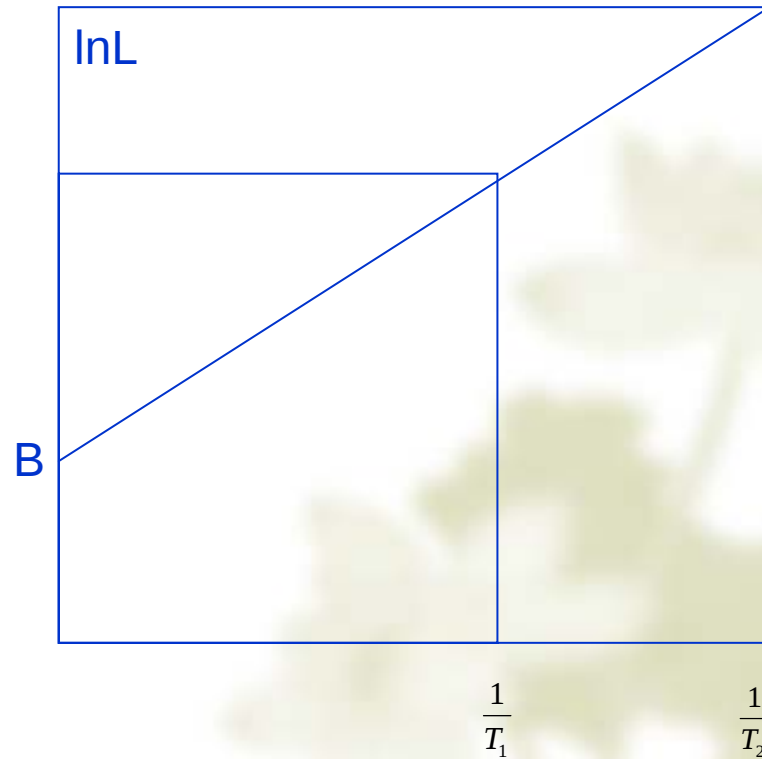
(* 十度法则：从室温开始，每提高10度，寿命减半)

产品平均寿命的估算

$$L \times \frac{dM}{dt} = C$$

$$L = Ae^{\frac{E}{kT}}$$

$$\ln L = B + \frac{E}{kT}$$



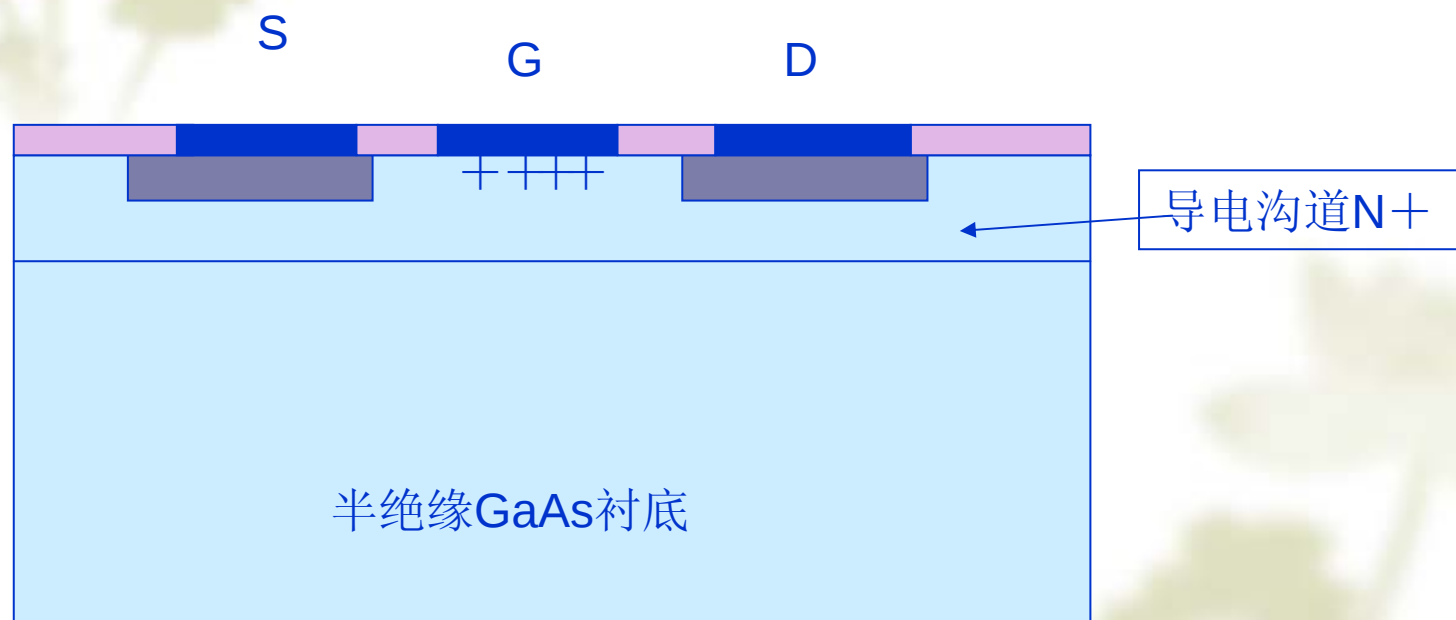
1.2失效分析的重要意义

- ❖ 电子元器件研制阶段
纠正设计和研制中的错误，缩短研制周期
- ❖ 电子元器件生产阶段、测试和使用阶段
查找失效原因，判定失效的责任方
- ❖ 根据分析结果，生产厂可以改进元器件的设计和工艺，用户可以改进电路板的设计、改进器件和整机的测试和使用的环境参数或者改变供货商。

失效分析案例

- ❖ 案例1: GaAs微波器件的失效分析, 表现为 I_{DSS} 缓慢减小, 通过研究金属-半导体接触退化的机理, 确定了金半接触处原子互扩散是根本原因, 提出了增加阻挡层作为改进措施, 通过对比改进前后的可靠性评价, 证明了失效分析的有效性。

MESFET端面图



I_{DSS} 为最大饱和漏电流

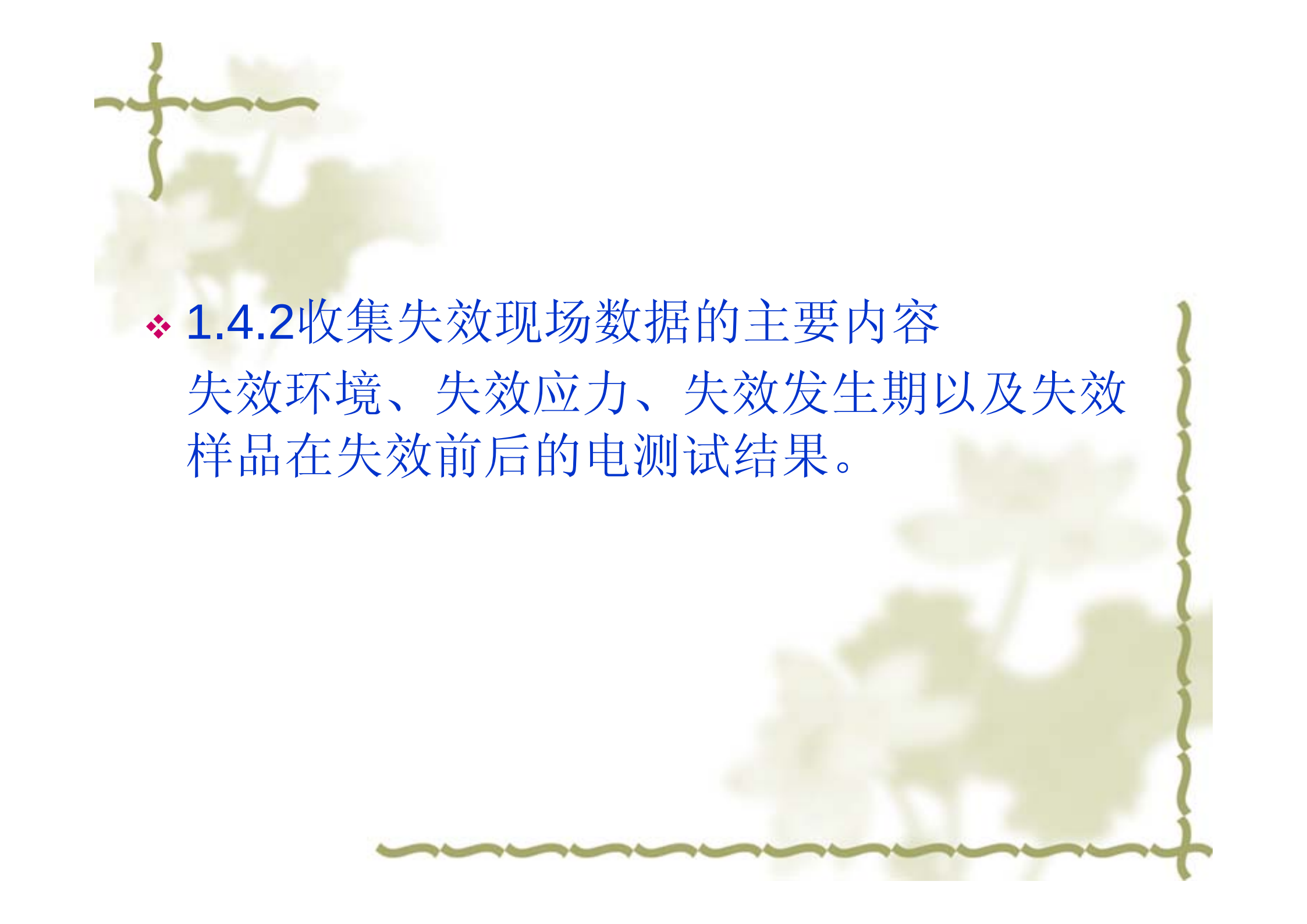
1.3失效分析的一般程序

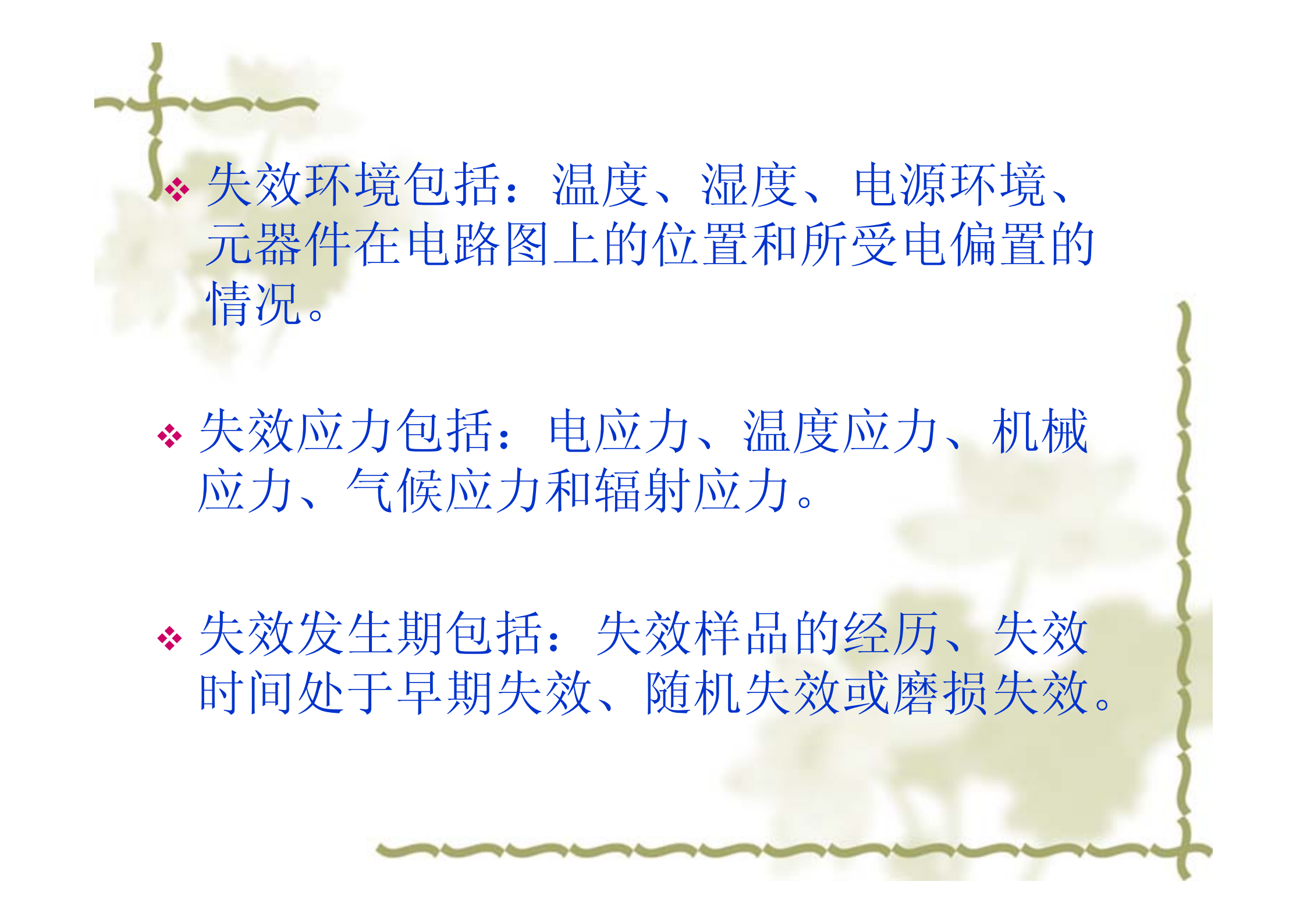
- ❖ 1、收集失效现场数据
- ❖ 2、电测并确定失效模式
- ❖ 3、非破坏性分析
- ❖ 4、打开封装
- ❖ 5、镜检
- ❖ 6、通电激励芯片
- ❖ 7、失效定位
- ❖ 8、对失效部位进行物理、化学分析
- ❖ 9、综合分析，确定失效原因，提出纠正措施

1.4 收集失效现场数据

1.4.1、应力类型与元器件失效模式或机理的关系举例

应力类型	试验方法	可能出现的主要失效模式或机理
电应力	静电、过电、噪声	MOS器件的栅击穿、双极型器件的PN结击穿、功率晶体管的二次击穿
热应力	高温储存	金属—半导体接触的Al-Si互溶，欧姆接触退化，PN结漏电、Au—Al键合失效
低温应力	低温存储	芯片断裂
低温电应力	低温工作	热载流子注入
高低温应力	高低温循环	芯片断裂、芯片粘接失效
热电应力	高温工作	金属电迁移、欧姆接触退化
机械应力	振动、冲击、加速度	芯片断裂、引线断裂
辐射应力	X射线辐射、中子辐射	电参数变化、软错误、CMOS电路的闩锁效应
气候应力	高湿、盐雾	外引线腐蚀、金属化腐蚀、电参数漂移

- 
- ❖ 1.4.2 收集失效现场数据的主要内容
失效环境、失效应力、失效发生期以及失效样品在失效前后的电测试结果。

- 
- ❖ 失效环境包括：温度、湿度、电源环境、元器件在电路图上的位置和所受电偏置的情况。
 - ❖ 失效应力包括：电应力、温度应力、机械应力、气候应力和辐射应力。
 - ❖ 失效发生期包括：失效样品的经历、失效时间处于早期失效、随机失效或磨损失效。

1.5以失效分析为目的的电测技术

❖ 电子元器件的电测失效分类：

连接性失效（开路、短路、电阻变化等）

多数是ESD和EOS引起的，比例大概50%。

电参数失效（值超出范围和参数不稳定）

例如：电流增益、光电流、暗电流等。

功能失效（给定输入信号，输出异常）

多数是集成电路。

电子元器件电测失效之间的相关性

- ❖ 例如数字集成电路，连接性失效可引起电参数失效和功能失效。

输入端漏电—>输入电流 I_{in} 、输入电压 V_{in} 达不到要求—>功能失效、静态电流 I_{DDQ} 失效

输入端开路和输出端开路—>功能失效

电源对地短路—>功能失效、静态电源电流 I_{DDQ} 失效

电测的重要结论:

- ❖ 电测失效模式可能多种模式共存。
- ❖ 一般只有一个主要失效模式，该失效模式可能引发其他失效模式。
- ❖ 连接性失效，电参数失效和功能失效呈递增趋势，功能失效和电参数失效时常可以归结于连接性失效。
- ❖ 在缺少复杂功能测试设备时，有可能用简单的连接性测试和参数测试，结合物理失效分析技术，仍然可以获得令人满意的失效分析结果。

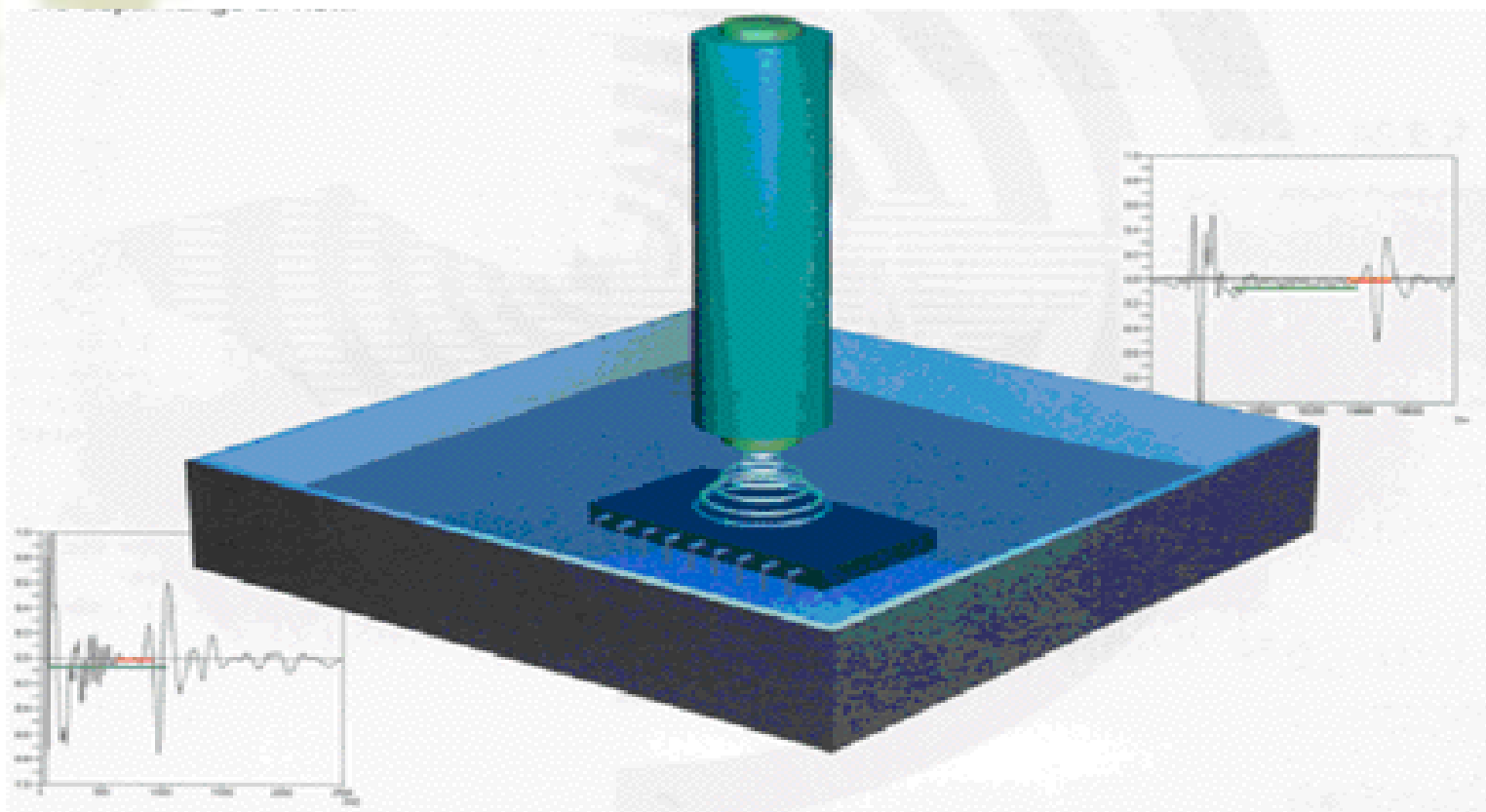
1.6无损失效分析技术

- ❖ 定义：不必打开封装对样品进行失效定位和失效分析的技术。
- ❖ 无损失效分析技术：X射线透视技术和反射式扫描声学显微技术（C—SAM）

表2、X射线透视技术和反射式扫描声学显微术（C—SAM）的比较

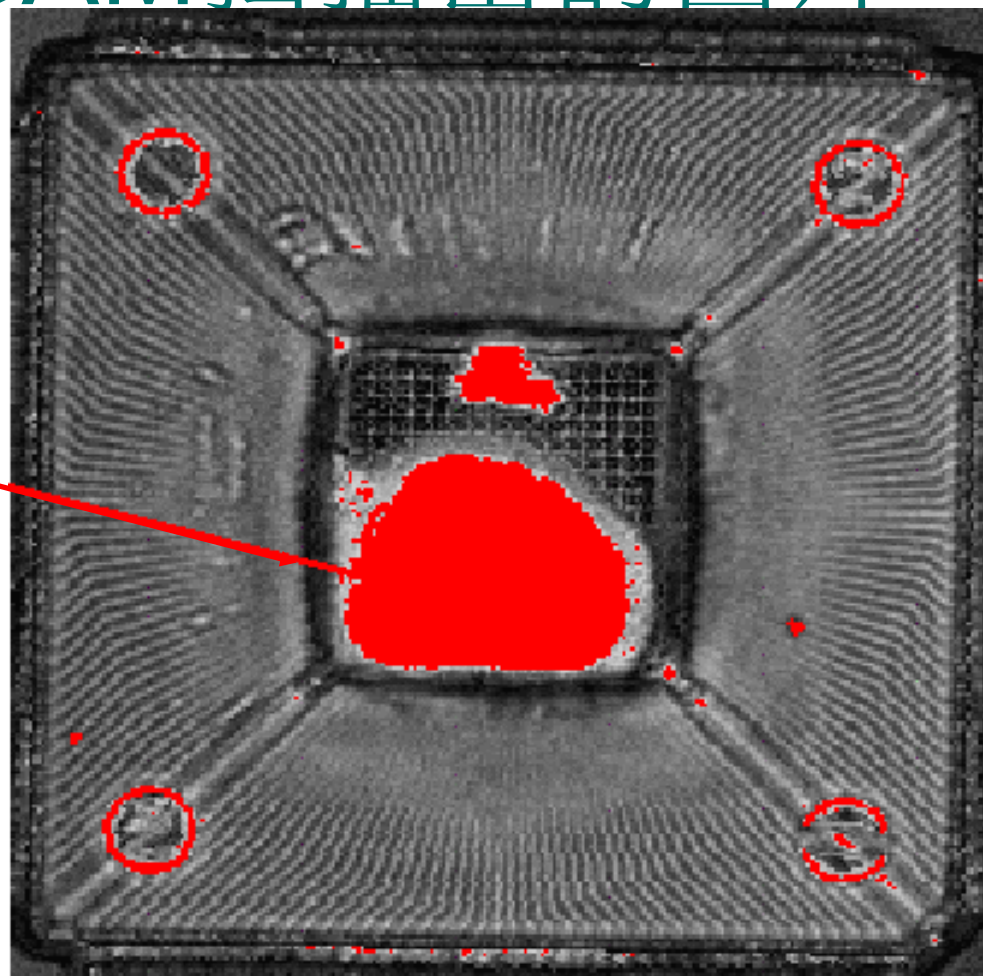
名称	应用优势	主要原理
X射线透视技术(X-Ray)	以低密度区为背景，观察材料的高密度区的密度异常点（主要用来判定引线断裂）	透视X光被样品局部吸收后成像的异常
反射式扫描声学显微术（C—SAM）	以高密度区为背景，观察材料内部空隙或低密度区（主要用来判定封装内的空隙和芯片粘接失效）	超声波（5—100MHz)遇空隙受阻反射

C-SAM的工作原理图



典型的C-SAM扫描出的图片

红色区域为芯片与
L/F之间有空隙



1.7样品制备技术

❖ 主要步骤：

- 1、打开封装
- 2、去钝化层
- 3、去除金属化层
- 4、剖切面
- 5、染色

1.7.1 打开封装

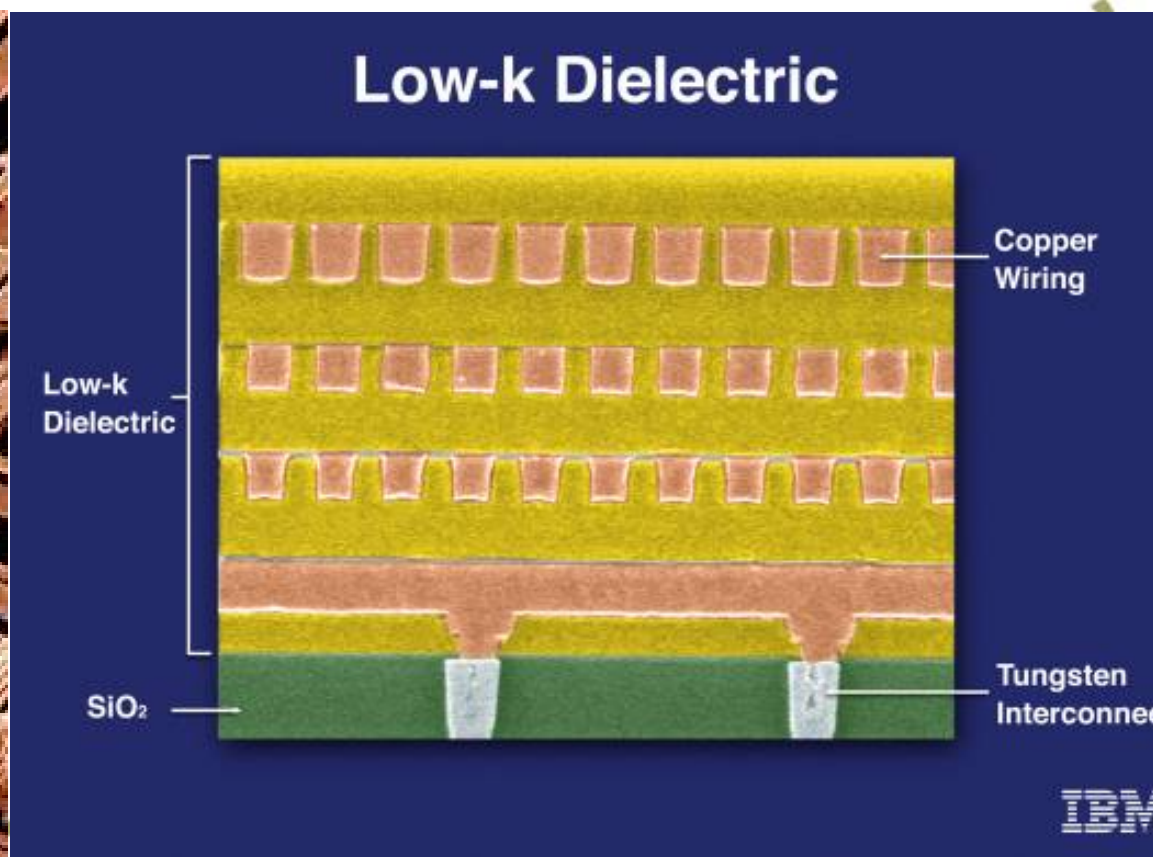
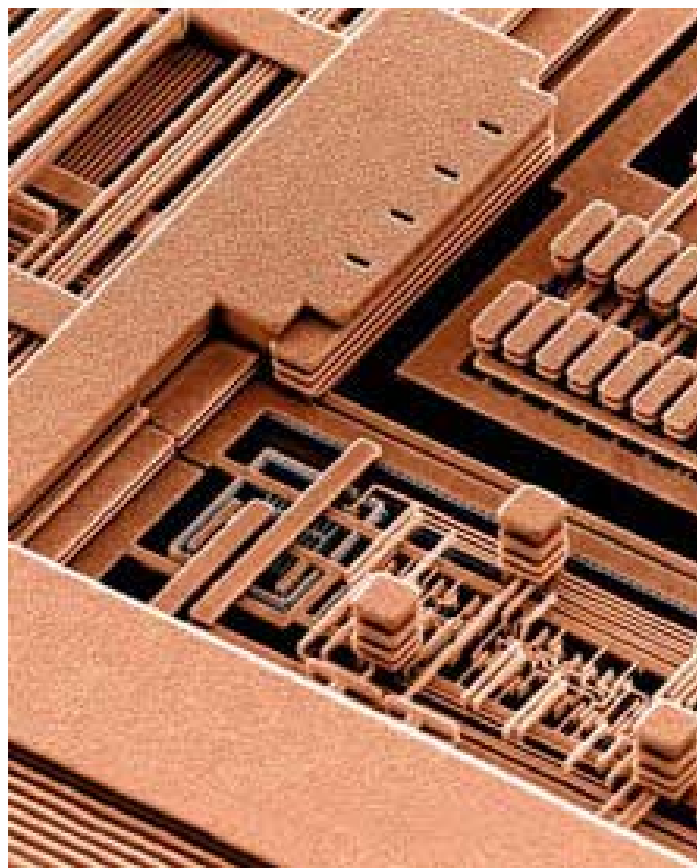
- ❖ 机械开封（磨，撬，加热等方法）
主要针对金属封装的器件。
- ❖ 化学开封（磨，钻，发烟硝酸、发烟硫酸腐蚀法等）
主要针对塑料封装的器件。

去除塑料封装机器(decapsulator)



1.7.2 去钝化层技术

1为什么要去除钝化层？



❖ 2去除钝化层的方法：

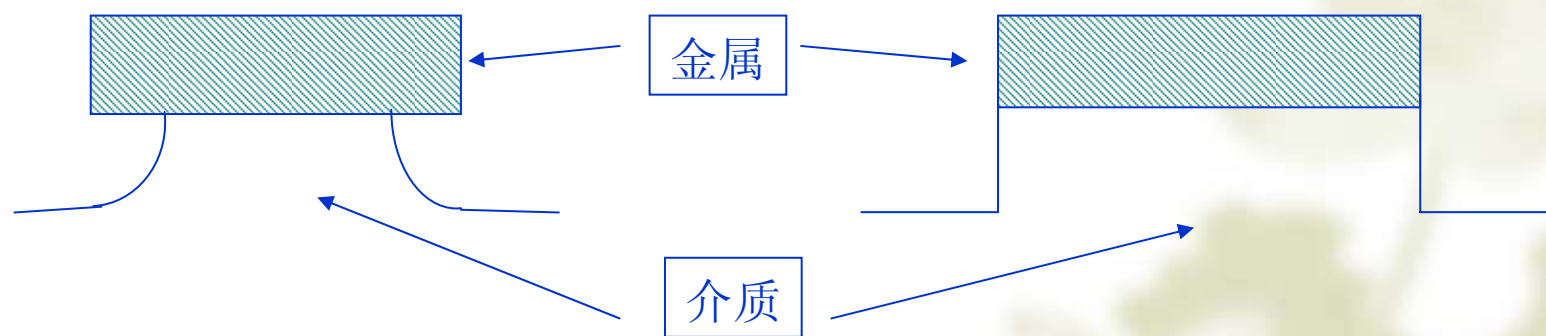
化学腐蚀（各向同性）

等离子腐蚀**PIE**（各向同性）

反应离子刻蚀**RIE**（各向异性）



❖ 各向同性腐蚀和各向异性腐蚀



1.7.3 去除金属化层技术

❖ 用途:

观察CMOS电路的氧化层针孔和Al—Si互溶引起的PN结穿钉现象，以及确定存储器的字线和位线对地短路或开路的失效定位

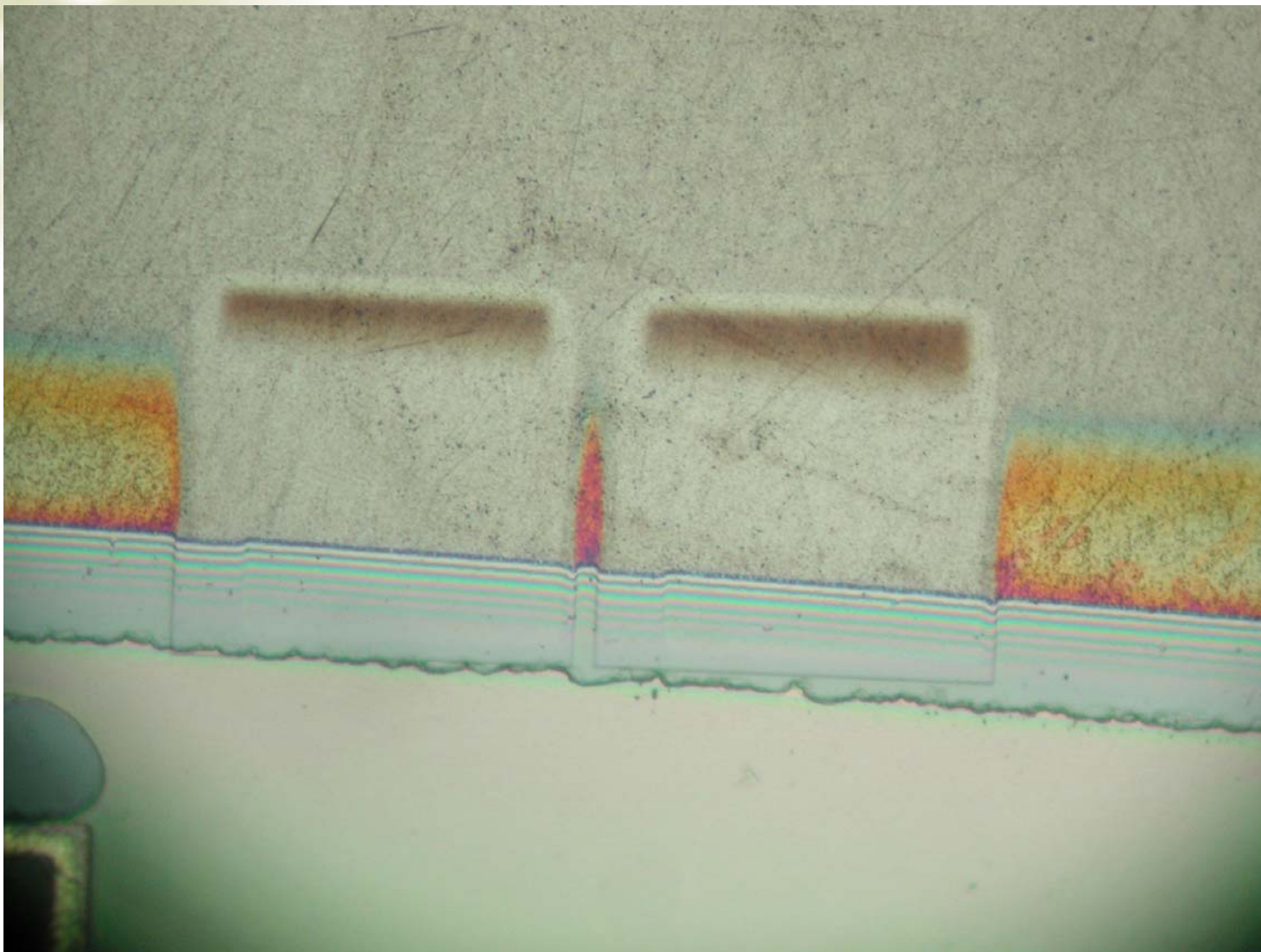
❖ 配方:

30%的硫酸或盐酸溶液，30~50℃，该配方不腐蚀氧化层和硅。

1.7.4机械剖切面技术

- ❖ 一般步骤：
- ❖ 固定器件（石蜡、松香和环氧树脂Epoxy）
- ❖ 研磨（毛玻璃、粗砂纸）
- ❖ 粗抛光（金相砂纸）
- ❖ 细抛光（抛光垫加抛光膏）
- ❖ 染色
- ❖ 金相观察

测量结深的抛光染色图片

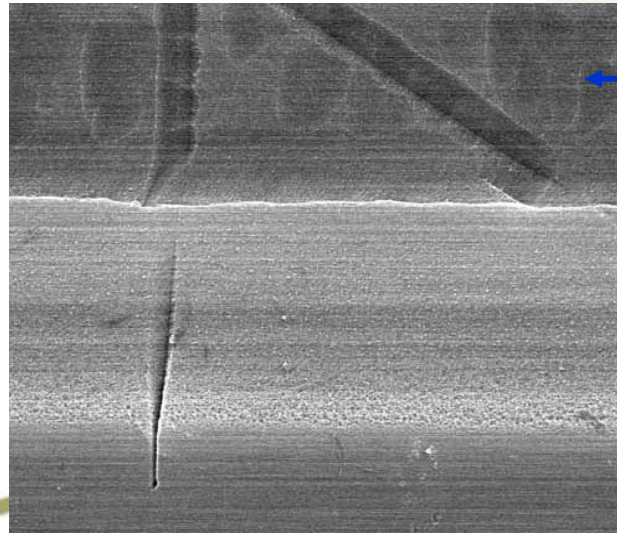
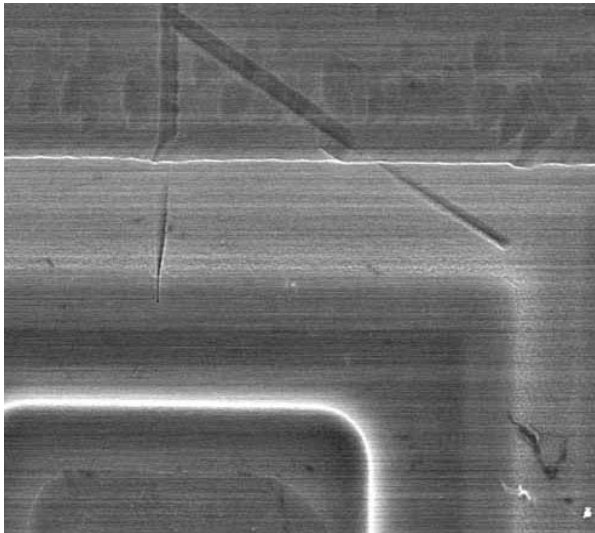
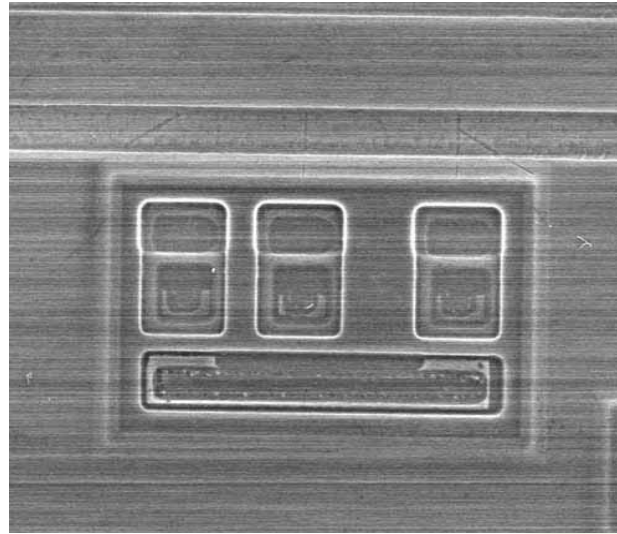
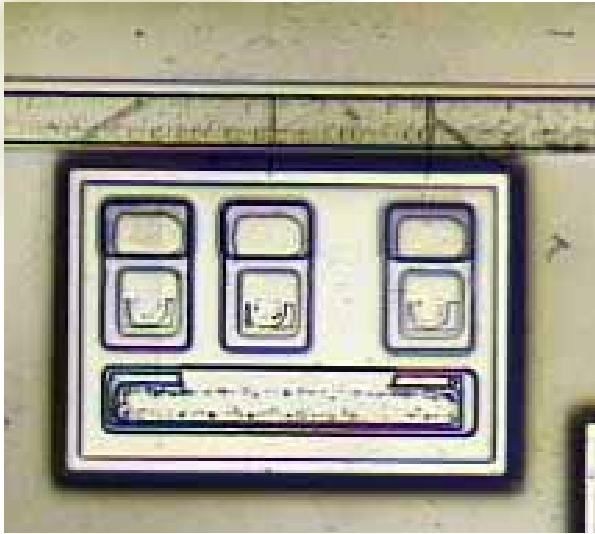


1.8显微形貌像技术

光学显微镜和扫描电子显微镜的比较

仪器名称	真空条件	样品要求	理论空间分辨率	最大放大倍数	景深
光学显微镜	无	开封	360nm	1200	小
扫描电子显微镜	高真空	开封、去钝化层	5nm	50万	大

光学照片与SEM照片对比



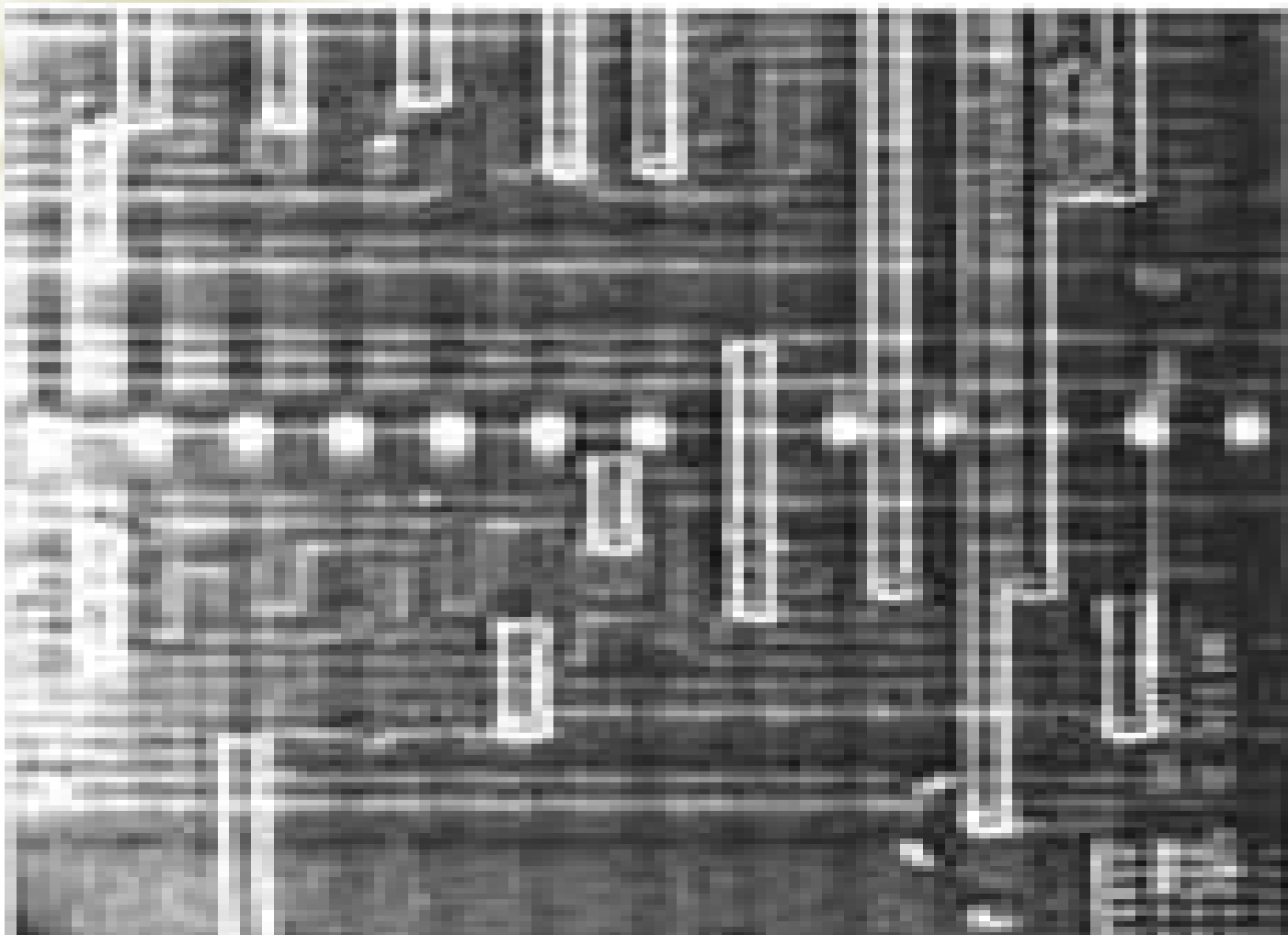
1.9基于测量电压效应的失效定位技术

❖ 1.9.1、扫描电子显微镜的电压衬度像

工作原理：电子束在处于工作状态下的被测芯片表面扫描，仪器的二次电子探头接收到的电子数量与芯片表面的电位分布有关。从而得到包含器件中电极的电势信息的SEM图象（IFA Image-based Failure Analysis）。

判定内容：芯片的金属化层开路或短路失效。

•1、某芯片的电压衬度像



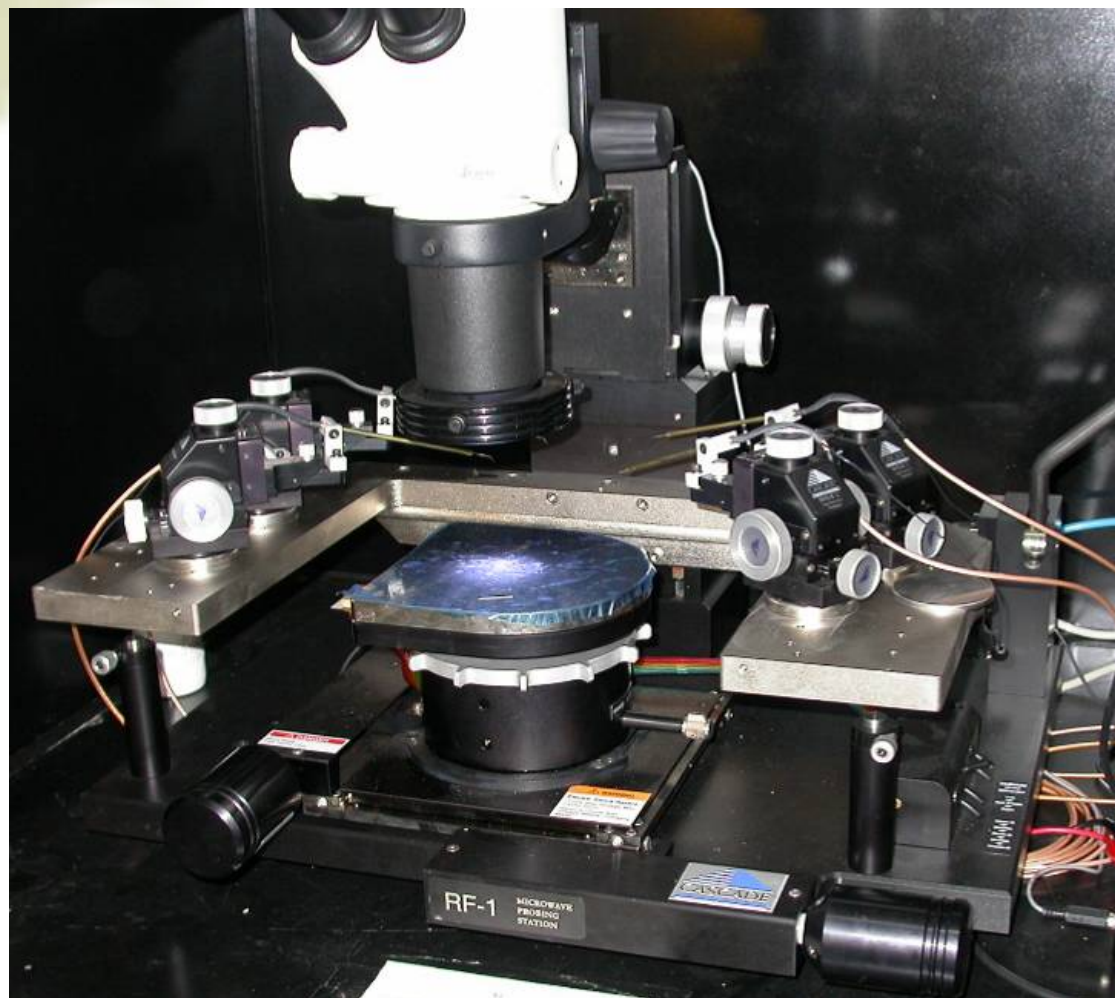
• 2、应用电压衬度像做失效分析实例

- ❖ 现象描述：4096位MOS存储器在电测试时发现，从一条字线可以存取的64个存储单元出现故障，现只能存储“0”信号。
- ❖ 初步推断：译码电路失效，译码器与字线之间开路，0V或12V的电源线短路。
- ❖ 电压衬度像分析：照片中发现一处异常暗线，说明其电压为12V，而有关的译码器没有异常，说明字线与12V电源之间存在短路。由二次电子像证实，在铝条字线与多晶硅电源线之间的绝缘层中有一个小孔。

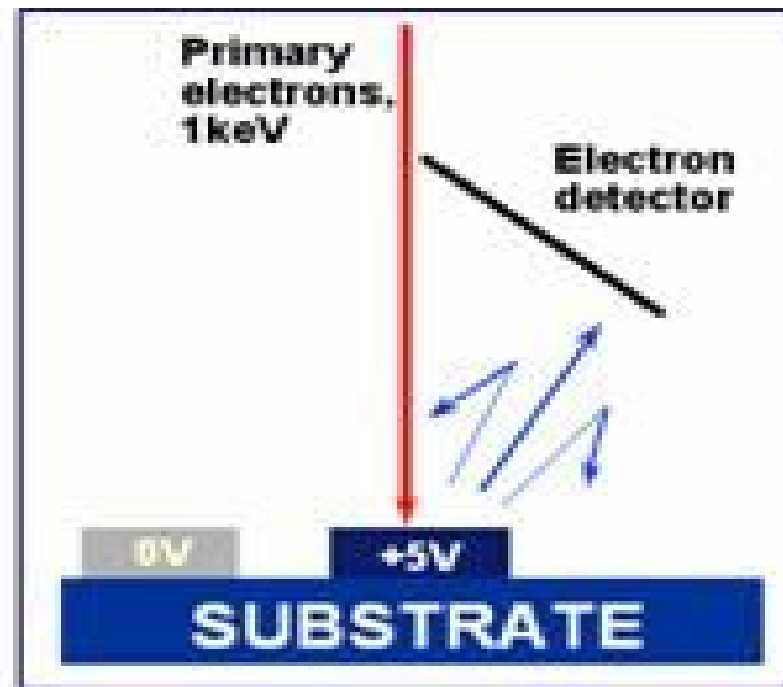
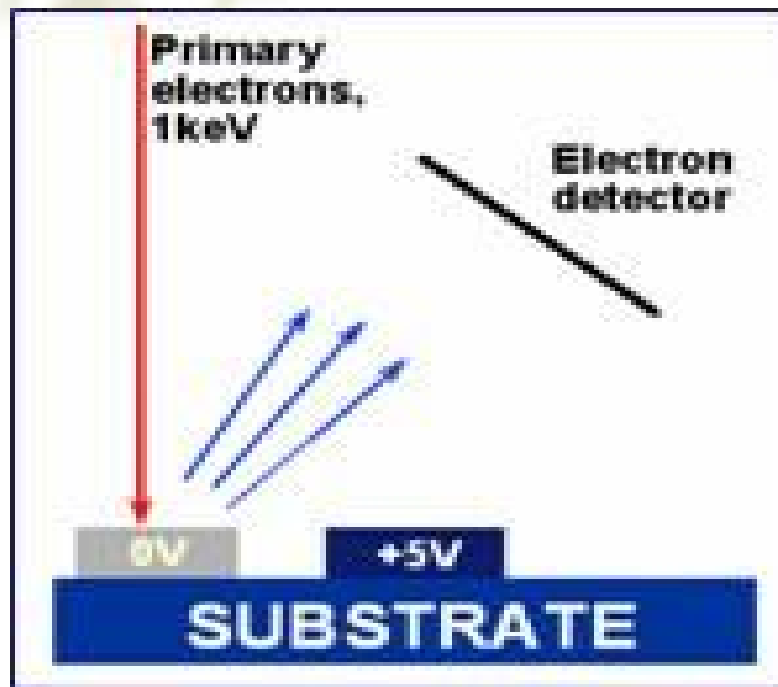
1.9.2 芯片内部节点的波形测量

对比项目	优点	缺点
机械探针	简单方便	空间分辨率低带宽低，有侵扰
电子束探针 (EBT)	空间分辨率高，无侵扰	带宽低（30Mhz） 需高真空
激光探针 (EOS)	简单方便，带宽高 (100GHz)，无侵扰	空间分辨率低 (1um左右)

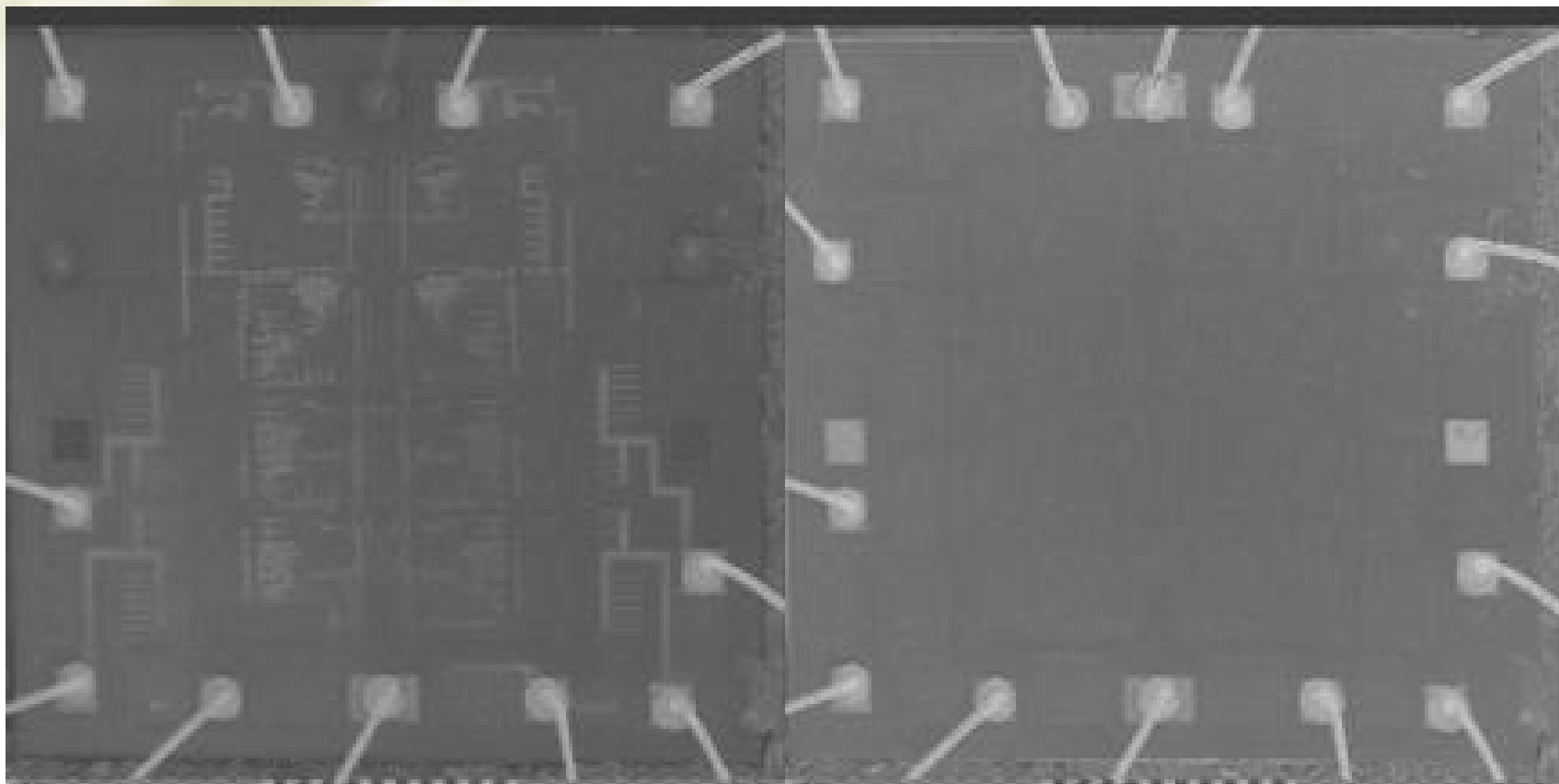
机械探针台



EBT测试原理



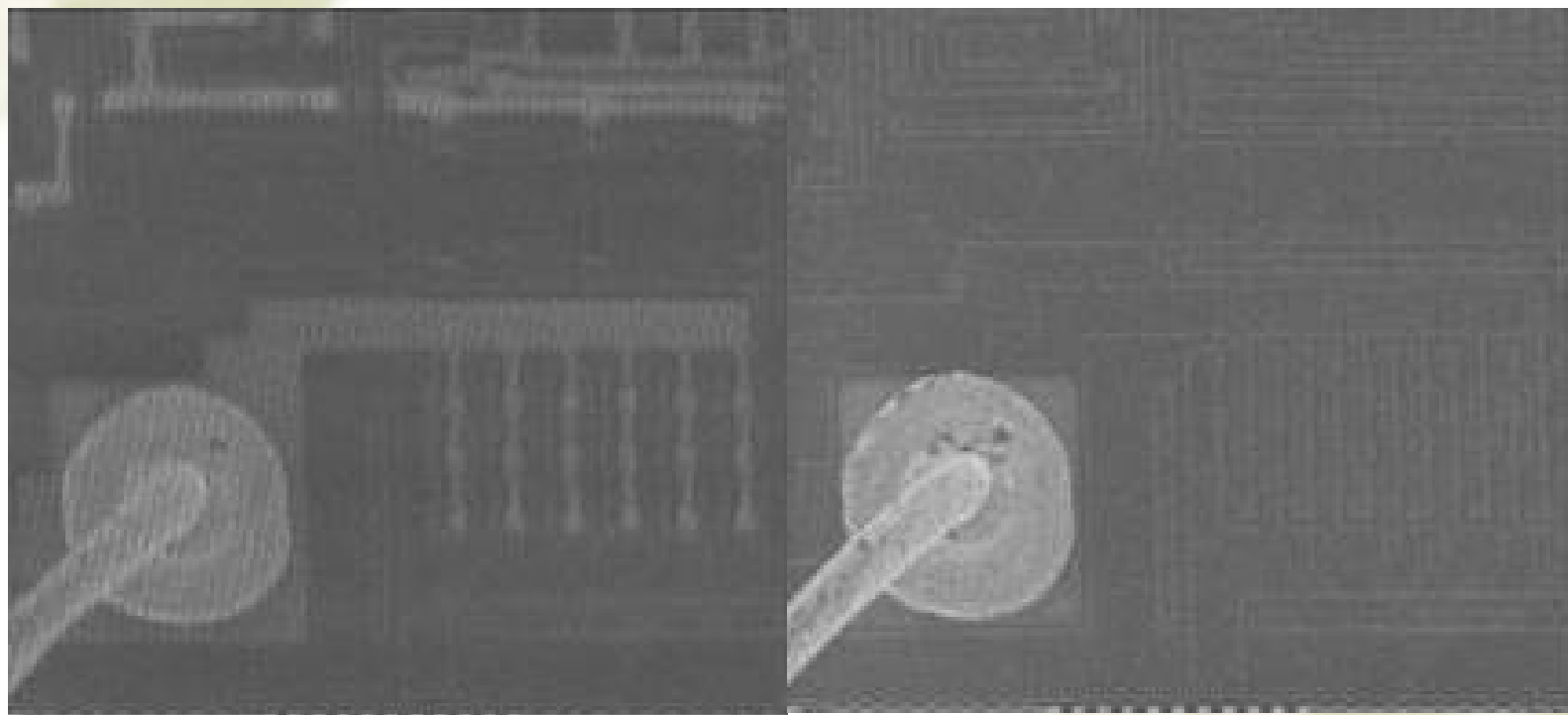
EBT在线检测的芯片照片



有信号时的照片

无信号时的照片

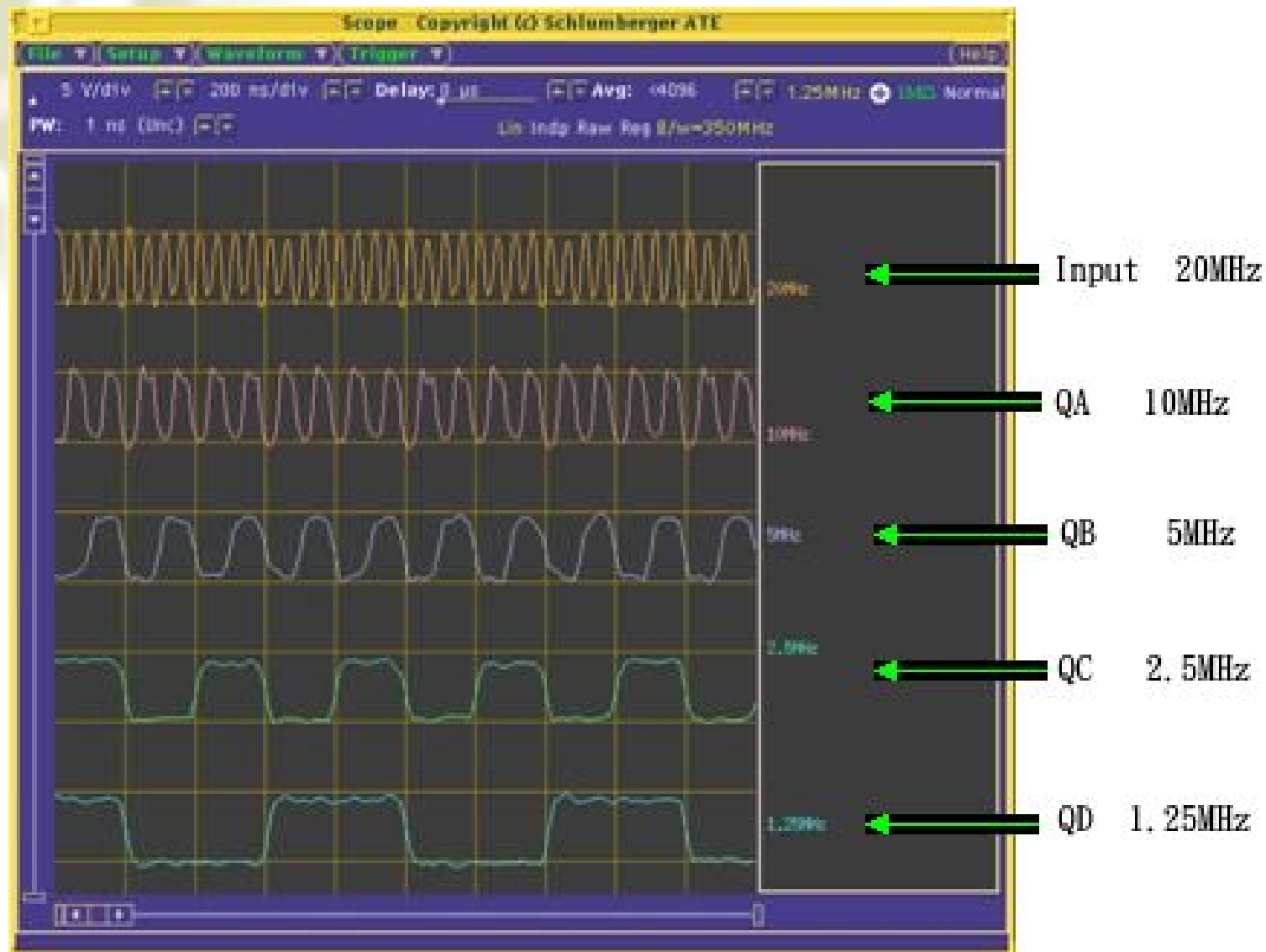
局部放大图片



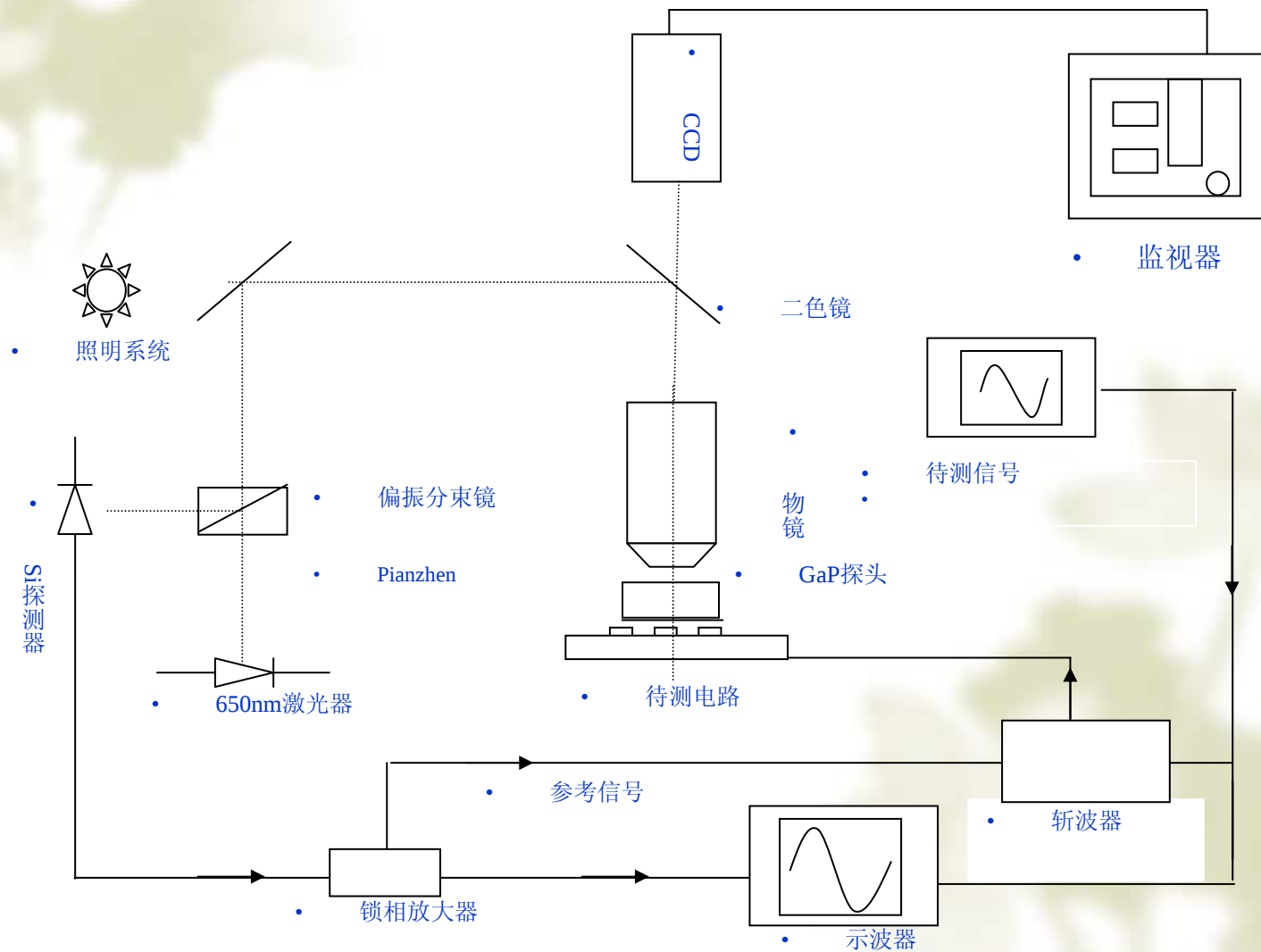
有信号时的图象

无信号时的图象

EBT测试波形



EOS激光测试系统



1.10 基于测量电流效应的失效定位技术

- ❖ 1、显微红外热像分析技术
- ❖ 2、液晶热点检测技术
- ❖ 3、光辐射显微分析技术（PEM）
(Photo Emission Microscope)

液晶热点检测的特点

- 1、速度快，大概**10**分钟就能做一次分析。
- 2、空间分辨率（**1um**）和热分辨率（**3uw**）
- 3、适用不良种类：

确定芯片能耗分布，确定漏电通道，**PN**结内不规则的电流分布，**CMOS**电路闩锁区域等

1.10.1 显微红外热像分析技术

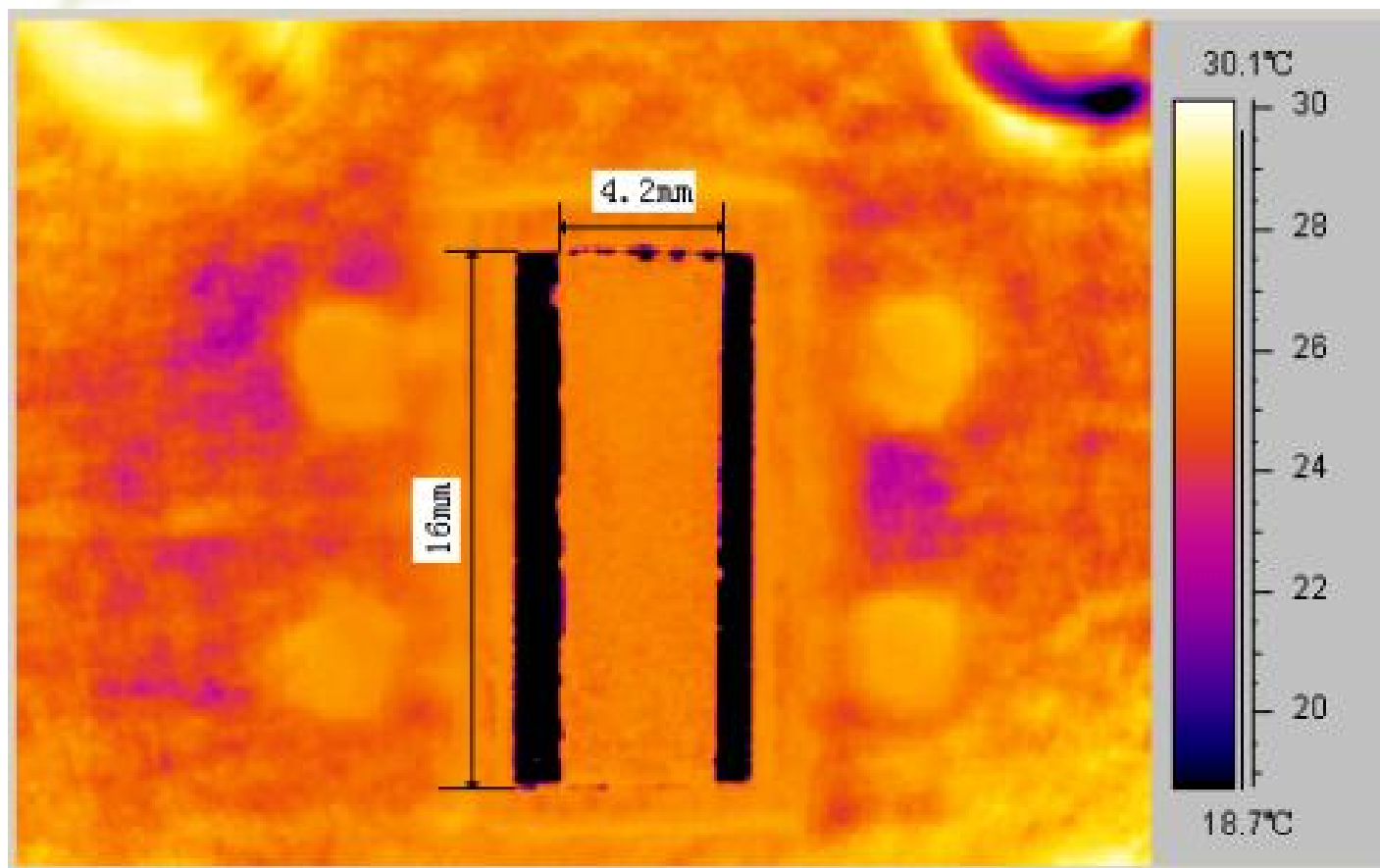
❖ 1、测试原理：

芯片通电过程中会发热，由于芯片各部位电流强度不同，导致芯片表面温度不同，红外热像仪扫描整个芯片，可以获得芯片温度分布图。输出图的颜色对应该点的温度。

❖ 2、仪器性能指标：

热分辨率 0.1°C ，空间分辨率 $5\mu\text{m}$ ，测温范围 $30^{\circ}\text{C} \sim 550^{\circ}\text{C}$ ，最灵敏温度范围 $80^{\circ}\text{C} \sim 180^{\circ}\text{C}$ 。

- ❖ 3、显微红外热像仪的应用
- ❖ 主要是功率器件和混合集成电路



10.2 液晶热点检测技术

1、什么是液晶：

液晶是一种既具有液体的流动性，又具有晶体各向异性的物质。它具有一个独特性质，当温度高于某一临界温度 T_c 时，就会变成各向同性。

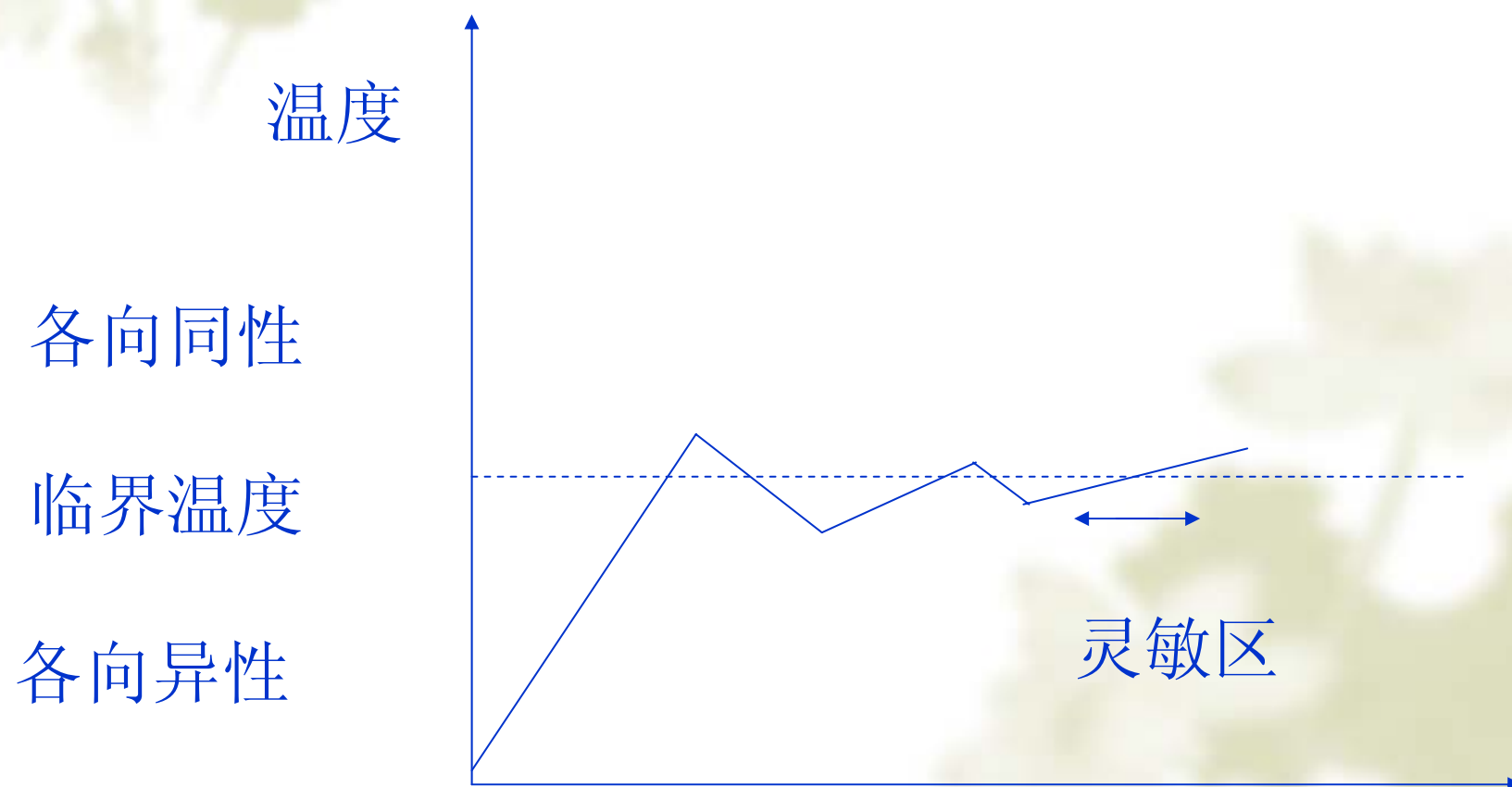
2、液晶热点检测设备要求

- ❖ 偏振显微镜（长工作距离）
- ❖ 温控样品台（温度精度 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ）
- ❖ 样品的电偏置（prober或packaged device）

3、液晶热点检测的关键技术

- ❖ 显微镜在正交偏振光下观察，提高图象对液晶相变的灵敏度
- ❖ 应控制样品温度在临界温度上下反复变化，以便找到合适的工作点
- ❖ 检测时若偏置电压偏高，图象会变模糊，可改用脉冲偏置电压以改善图象质量

• 液晶工作点的选择



10.3 光辐射显微分析（PEM）

1、原理：

- 半导体许多缺陷类型在特定电应力下会产生漏电，并伴随电子跃迁而导致光辐射。

2、操作方法：

- 首先，在外部光源下对制品进行数码照相。
- 然后对此局部加偏压（直流偏压或信号），并在不透光的暗箱中进行微光照相。
- 最后两相片叠加。

3、适用范围：

- ❖ 漏电结、接触尖峰、氧化缺陷、栅针孔、静电放电（ESD）损伤、闩锁效应（Latch up）、热载流子、饱和晶体管及开关管等

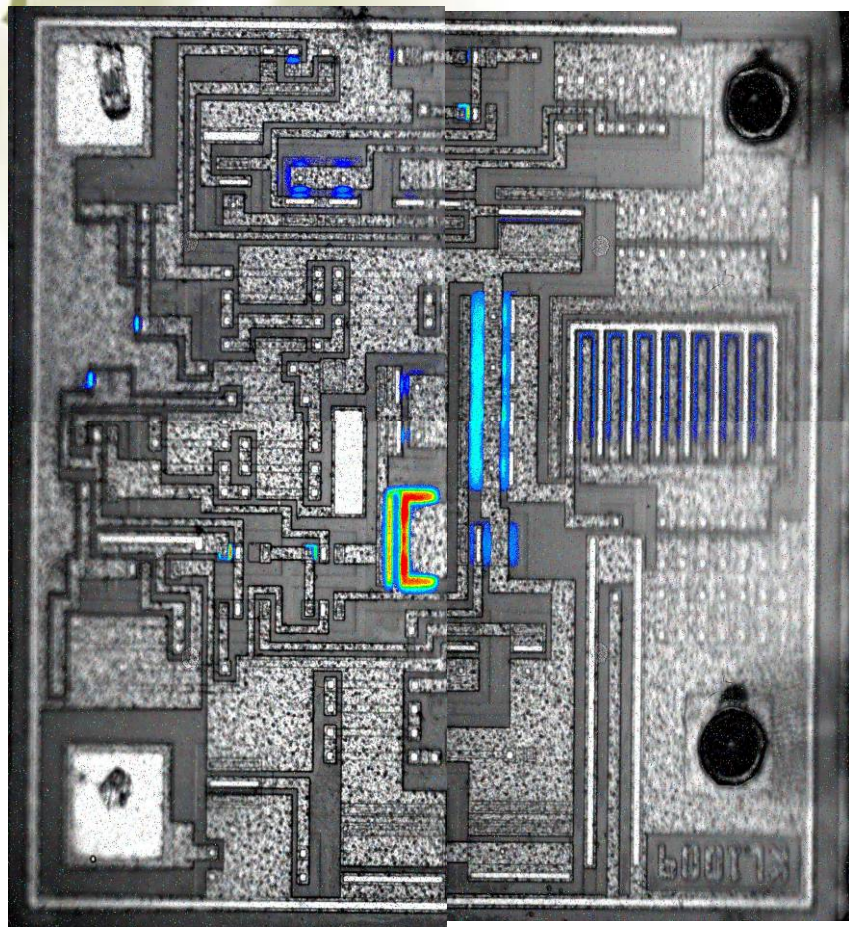
4、缺点：

- ❖ 有些光辐射是正常的器件，如饱和晶体管，正偏二极管等。
- ❖ 有些很明显的失效并不产生光辐射，如欧姆型短路等。
- ❖ 还有些缺陷虽产生辐射，但由于在器件的深层或被上层物质遮挡，无法探测。

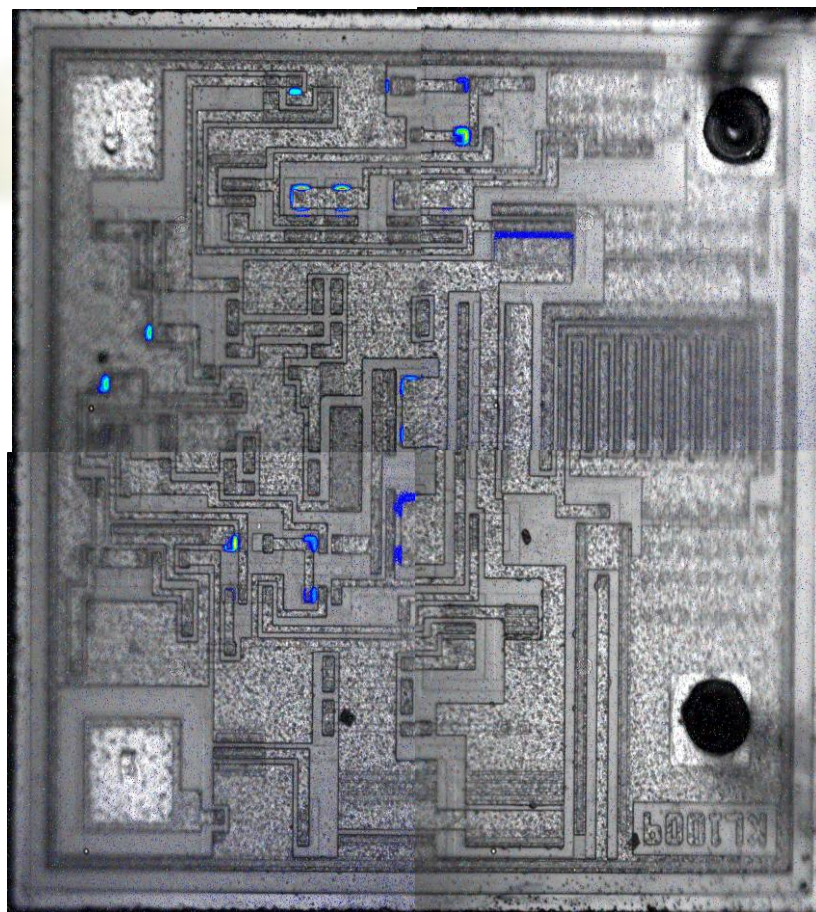
5、优点：

- ❖ 操作简单、方便，可以探测到半导体器件中的多种缺陷和机理引起的退化和失效，尤其在失效定位方面具有准确、直观和重复再现性。
- ❖ 无需制样，非破坏性，不需真空环境，可以方便的施加各种静态和动态的电应力。
- ❖ 精度：几十 $\text{PA}/\mu\text{m}^2$ ，定位精度为1微米。
- ❖ 另外还有光谱分析功能，通过对辐射点的特征光谱分析来确定辐射的性质和类型。

光辐射显微分析技术分析实例



不良品光发射照片



良品光发射照片

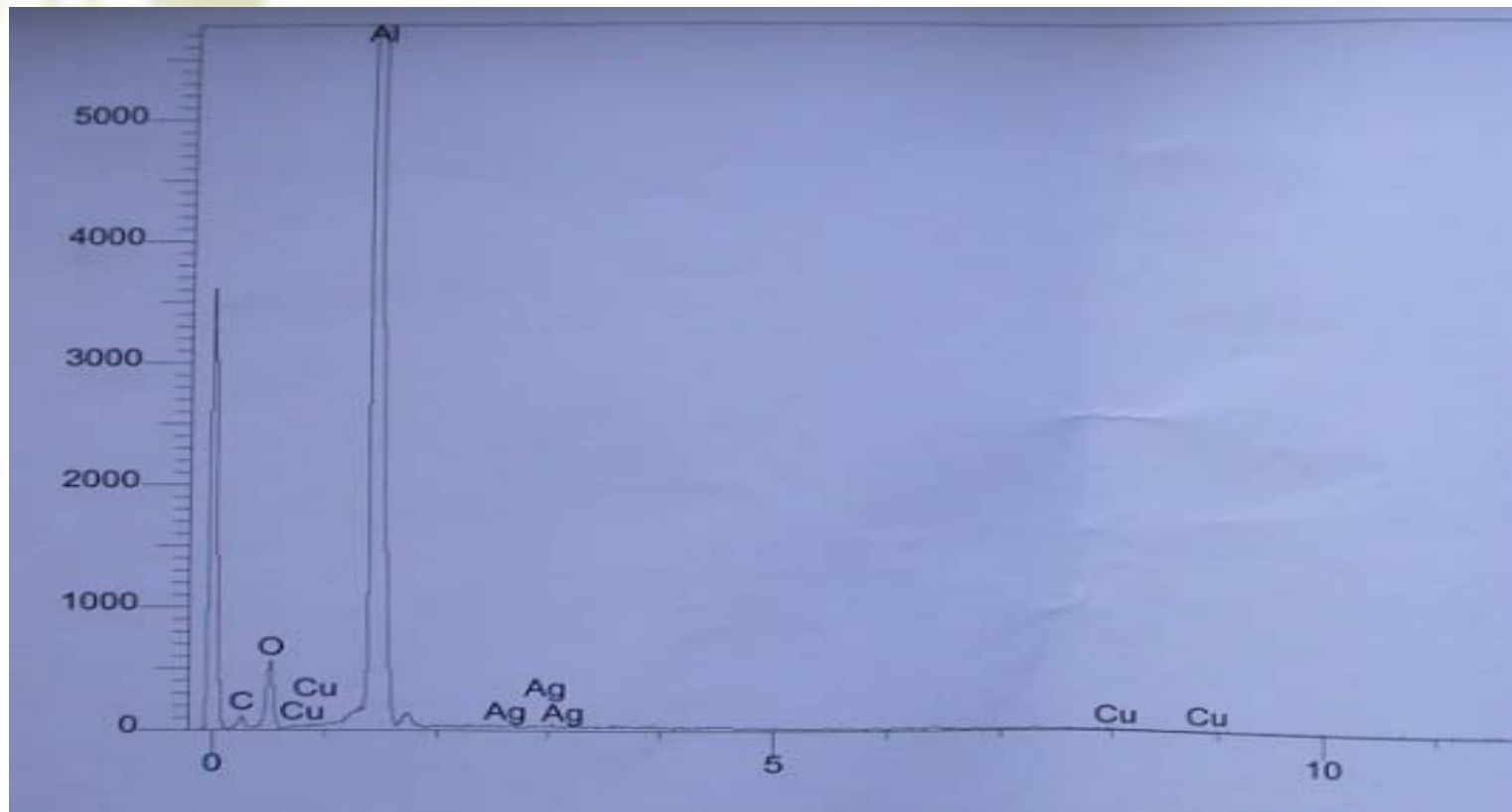
1.11 电子元器件化学成份分析技术

- ❖ 1、重要性：
- ❖ 器件失效主要原因是污染（颗粒污染和表面污染），确认污染源是实施改进措施的先决条件。
- ❖ 另外，界面之间原子互扩散也会引起特性退化和失效，也许要化学分析确认。

2 常用电电子元器件化学成份分析技术

分析项目特性 (Item)	X射线能谱分析 (EDAX)	俄歇电子能谱 (Auger)	二次离子质谱 (SIMS)	傅立叶红外光谱 (FTIR)
分析深度	1~5um	表面2nm	表面	1~10mm
灵敏度	0.10%	0.10%	PPM~PPT	PPM
分析信息	元素	元素	元素/分子	分子
空间分辨率	10nm	15nm	0.3~0.5um	2mm
辐射源	电子束	电子束	离子束	红外光

硅胶内异物 X射线能谱分析（EDAX）结果



20k电子伏特

二、电子元器件主要失效机理与相应的分析技术

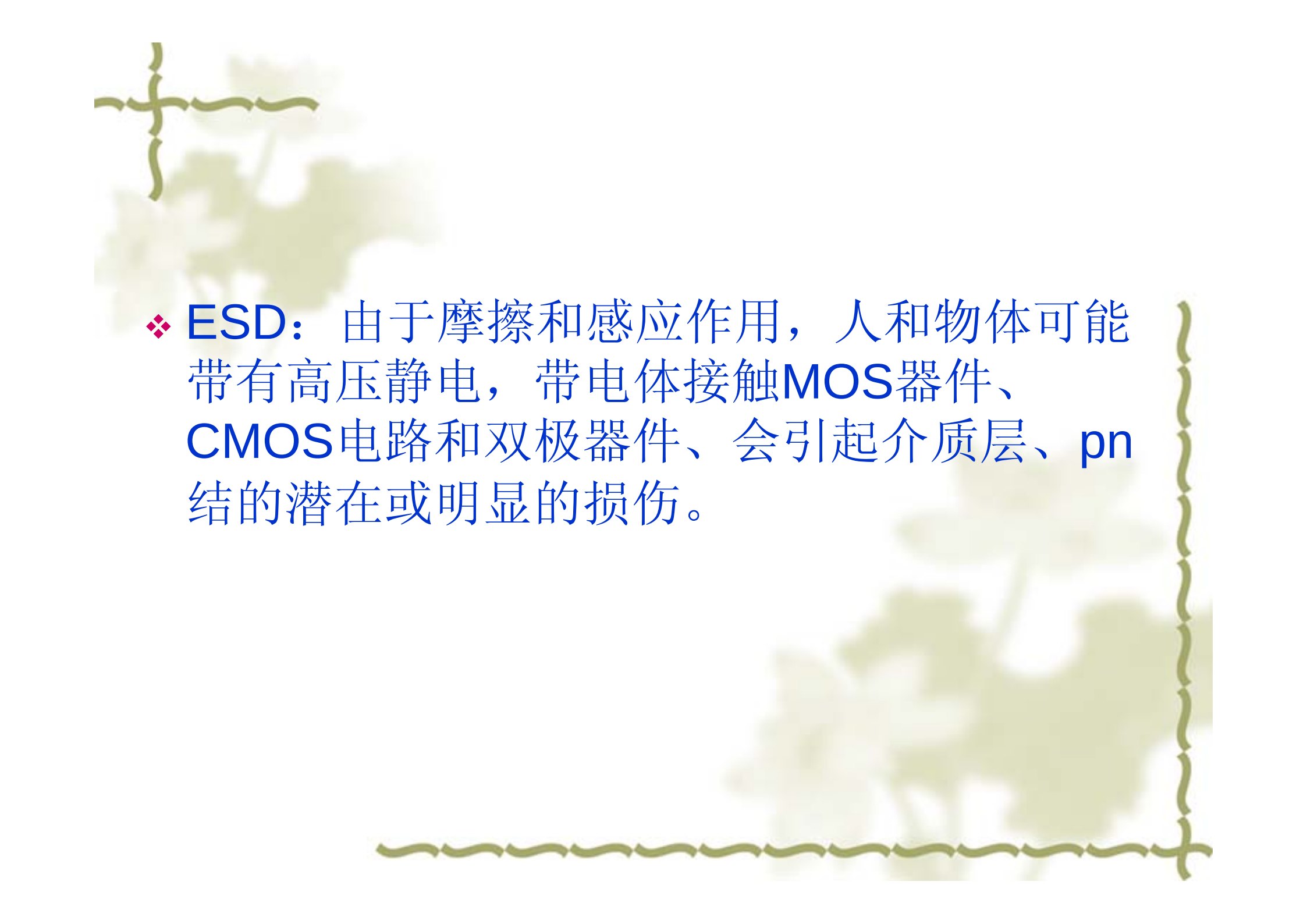
- ❖ 2.1、分立半导体器件和集成电路共有的失效部位、机理和分析技术
- ❖ 2.2、超大规模集成电路（VLSI）的主要失效机理和分析技术

2.1、分立半导体器件和集成电路共有的失效部位、机理和分析技术

- ❖ 失效模式：
- ❖ 开路、短路和点参数漂移
- ❖ 失效部位和机理：
- ❖ 过电应力（**EOS**）损伤、静电放电（**ESD**）损伤、封装失效、引线键合失效、金属—半导体接触退化、钠离子沾污、氧化层针孔和芯片粘接失效等

2.1.1、过电应力（EOS）和静电放电（ESD）损伤的失效分析技术

- ❖ EOS：电源开关瞬间、交流电源的电压波动或接地不良、雷击等情况下，器件受到瞬间高电压或大电流冲击，此时瞬时功率远远超过器件的额定功率，此类损伤属于过电应力损伤。
- ❖ EOS损伤现象：
器件发生误动作、器件pn结或介质层漏电、甚至金属化互连线或内引线发热烧毁和开路等。

- 
- ❖ **ESD:** 由于摩擦和感应作用，人和物体可能带有高压静电，带电体接触**MOS**器件、**CMOS**电路和双极器件、会引起介质层、pn结的潜在或明显的损伤。

EOS和ESD的失效分析方法

- ❖ 比较失效器件和正常器件不同管脚对地端和对电源端的I-V特性
- ❖ 打开封装对芯片进行镜检，寻找内引线、金属化互连线的熔断点、pn结缺陷、金属热电迁移的痕迹。
- ❖ 对正常样品进行过电应力和静电放电损伤的模拟试验，比较实效器件和模拟器件的电测结果和显微图象。

2.1.2、封装失效的分析技术

- ❖ 封装泄漏或封入水汽，都会导致封装器件内部金属化层腐蚀和器件参数漂移或失效。
- ❖ 高温高湿试验（微小泄漏）或负压法测泄漏（大泄漏）。
- ❖ 气密性封装内水汽的质谱法或露点法测量。

2.1.3、引线键合失效的分析技术

- ❖ 主要表现：金线与金属化铝布线的压焊点发生固相反应，形成紫斑（ AuAl_2 ）化合物，造成接触不良，或引线脱落。另外还有ball neck open、wire touch等。



❖ 分析方法:

❖ Wire touch —— X-Ray透视

❖ ball neck open —— X-Ray透视、SEM

❖ 键合引线脱落 —— SEM、X-Ray能谱
(紫斑)

2.1.4、金属—半导体接触退化

- ❖ 原因：
- ❖ 器件工作时发热升温会导致金属—半导体原子相互扩散；
- ❖ 水汽和杂质的侵蚀会导致金属—半导体界面的化学腐蚀作用。

❖ 分析方法:

- ❖ 电测法经过一定的计算步骤可获得接触电阻的数值，再对比失效品与良品的数值即可判断接触退化的程度。
 - ❖ 背面金相观察，寻找金属化层内表面被腐蚀的情况。
 - ❖ 用带有离子溅射枪的俄歇能谱仪或二次离子质谱仪等表面分析仪器，可逐层观察金属—半导体相互扩散以至退化的证据，分辨率和灵敏度较高。
- 

2.1.5、钠离子沾污

- ❖ 现象：
- ❖ 半导体表面反型或形成沟道、使器件表面状态及不稳定，导致电参数（反向漏电流、放大系数、击穿电压、阈值电压、暗电流）退化。
- ❖ 测量难点：
- ❖ 钠离子来源广泛
- ❖ 在二氧化硅中极易迁移
- ❖ 钠离子浓度很小

❖ 判定方法:

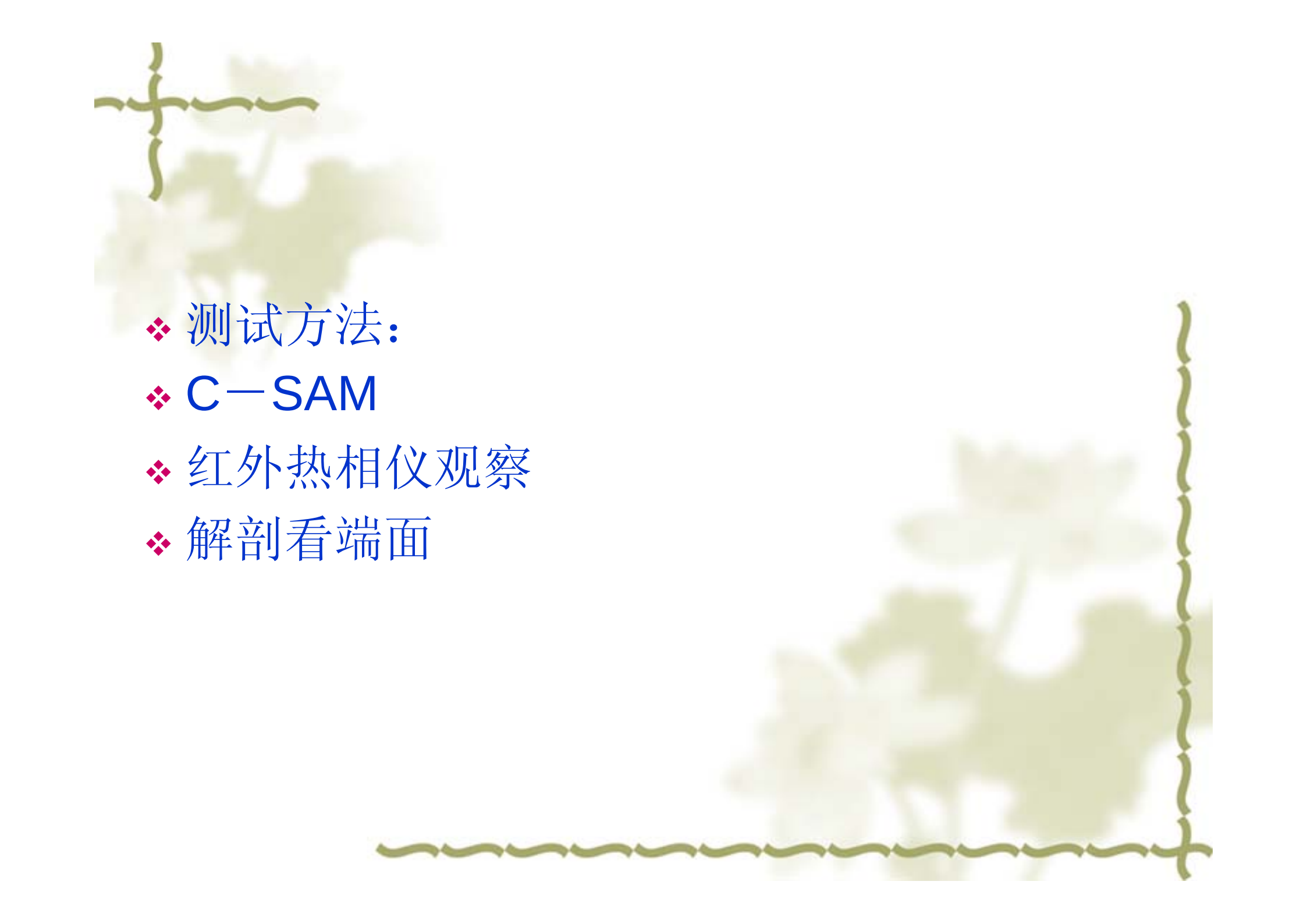
- ❖ 做模拟试验，对器件高无反偏，使二氧化硅中的钠离子在电场作用下原理或靠近介质一半导体界面，改变pn结耗尽层宽度并引起反向漏电流的变化，此时测量电特性；然后重新高温贮存，钠离子会重新返回原处，再测量电特性；对比测试结果，如果特性能回复则可判定为钠离子沾污。

2.1.6、氧化层针孔

- ❖ 失效原理：
- ❖ 氧化层针孔使上面的金属和下面的半导体短路，造成电特性退化或失效。
- ❖ 非破坏性分析方法：
- ❖ 液晶热点分析（分辨率高，灵敏度高）
- ❖ 破坏性分析方法：
- ❖ 腐蚀Al层，观察针孔（简单易行）

2.1.7、芯片粘接失效

- ❖ 芯片粘接的目的：
- ❖ 使芯片和外界在电学上连接，并改善散热条件
- ❖ 芯片粘接不良：
- ❖ 电特性不稳定、芯片局部温度过高
- ❖ 出现原因：
- ❖ 工艺不良
- ❖ 功率器件的开关引起的高低温的变化，导致芯片和外壳的焊料间发生热疲劳现象。

- 
- ❖ 测试方法:
 - ❖ C—SAM
 - ❖ 红外热相仪观察
 - ❖ 解剖看端面

2.2超大规模集成电路（VLSI）的主要失效机理和分析技术

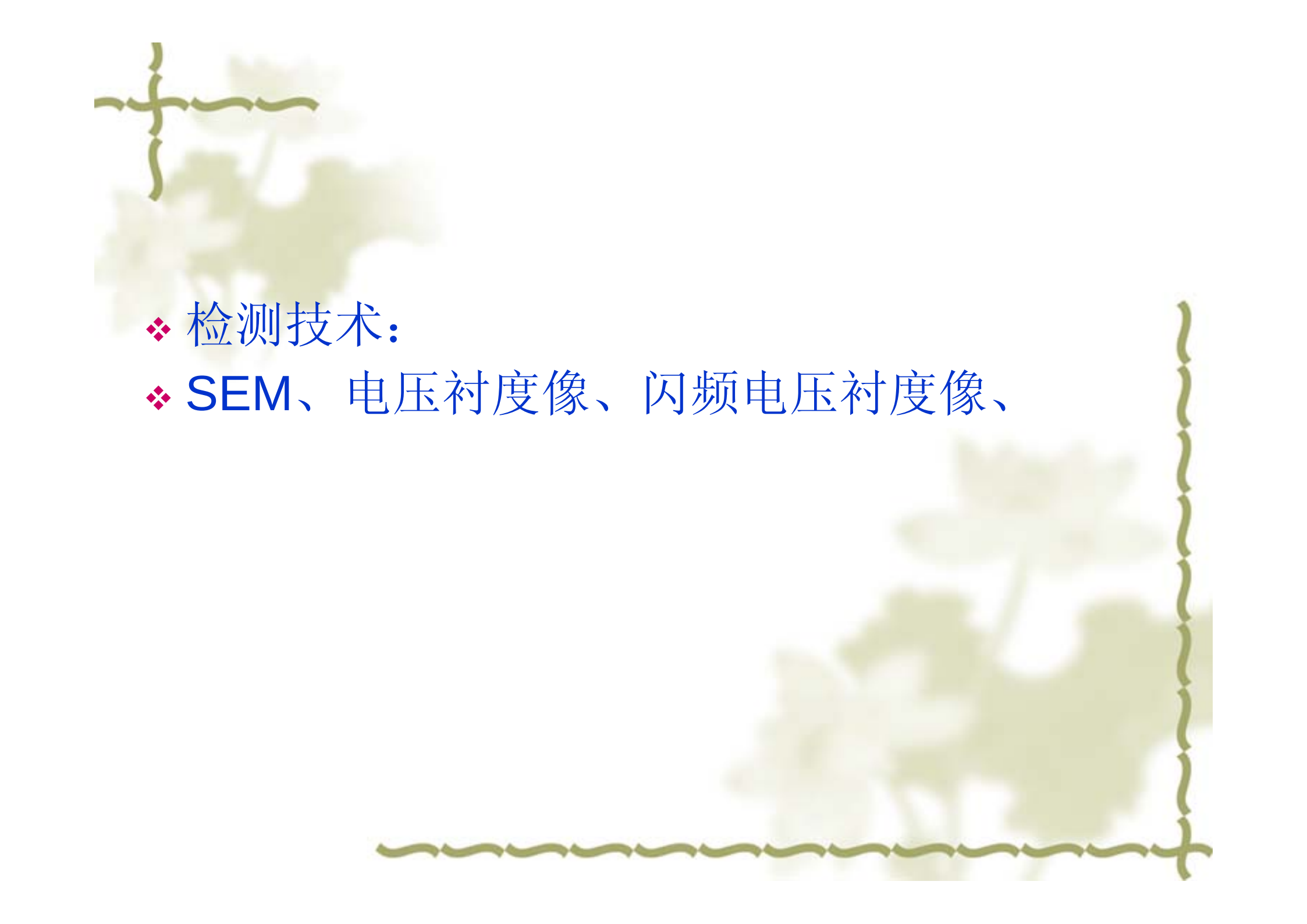
- ❖ VLSI的特点：
- ❖ 每芯片元件数巨大、线宽很窄、介质层厚度和元件尺寸都很小，电源电压不可能再降低，导致VLSI的单位元件内的电场强度、电流密度比分立器件大很多。

2.2.1 VLSI的主要失效机理

失效模式	失效机理	检测方法
开路	EOS、ESD、金属电迁移、应力迁移、金属腐蚀、latch up	电压衬度相、闪频电压衬度相 SEM
漏电或短路	ESD、EOS、PN结缺陷、正常电压下的介质击穿	液晶热点检测、光发射显微镜
电参数漂移	钠离子沾污、封装内水汽凝结、热载流子效应	光发射显微镜
高集成度引起的特殊失效	Latch up、金属电迁移、介质击穿、热载流子效应	光发射显微镜 SEM

2.2.2 金属化互连线开路的失效机理和失效定位技术

- ❖ 发生原因：
 - ❖ 1、Latch up（EOS的一种），表现为电源对地的电流剧增，在电源接通时，即使去掉出发信号，大电流并不消失，闩锁的持续会导致电源和地间的金属互连线的烧毁。
 - ❖ 2、金属电迁移，主要是随着超大规模集成电路的密度增加，金属互连线变得更窄，电子动量的冲击使金属产生疲劳。
 - ❖ 3、金属的应力迁移，热循环中的金属受到应力作用，产生疲劳现象。
 - ❖ 4、金属的化学腐蚀。

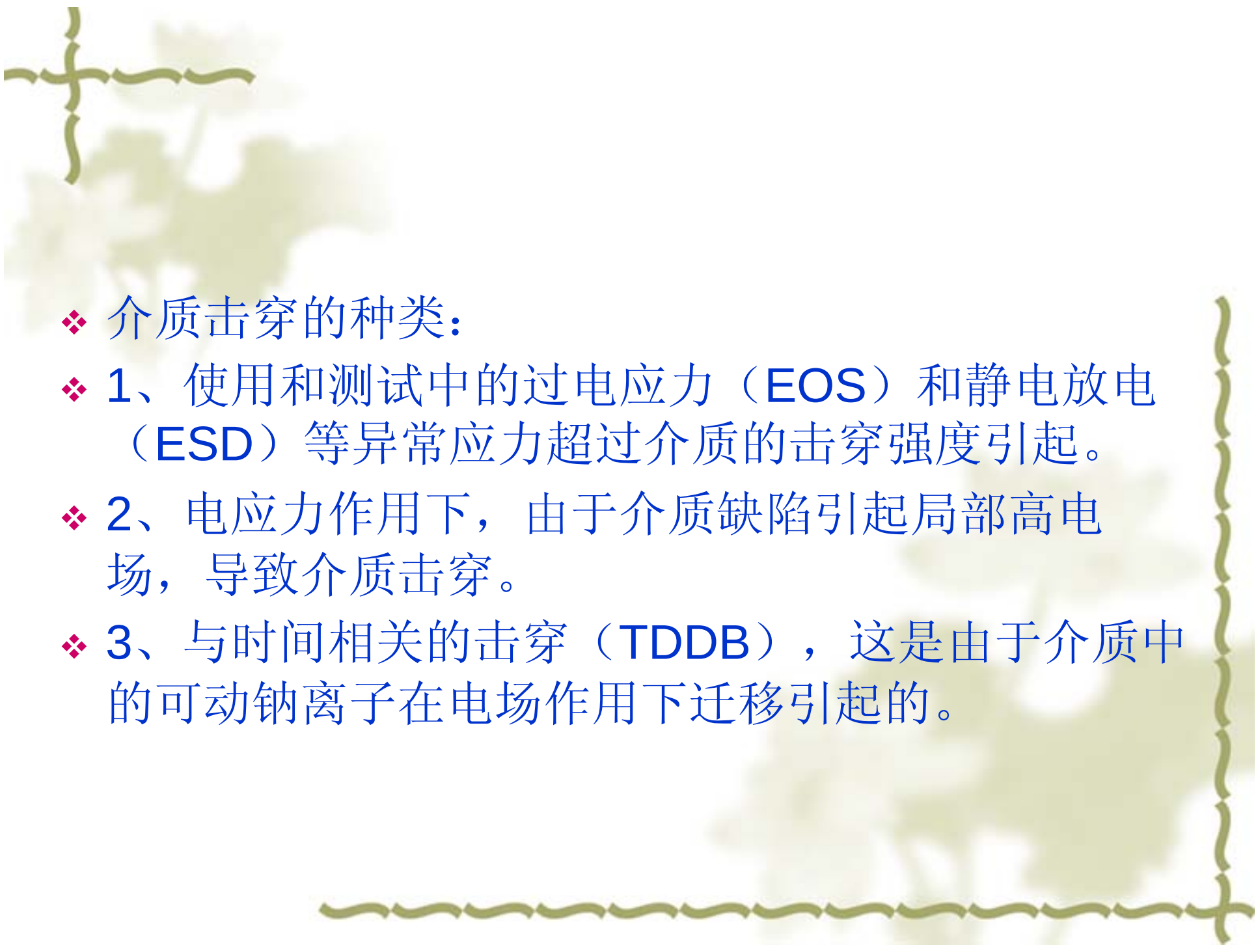


❖ 检测技术:

❖ SEM、电压衬度像、闪频电压衬度像、

2.2.3、VLSI漏电和短路的主要失效机理和失效定位技术

- ❖ 失效机理：
- ❖ 静电放电、过电损伤和正常电压下的介质击穿
- ❖ 原因：
- ❖ VLSI CMOS的氧化层厚度小于30nm，但栅电压没有相应的降低，导致高场强使介质击穿成为主要失效机理。

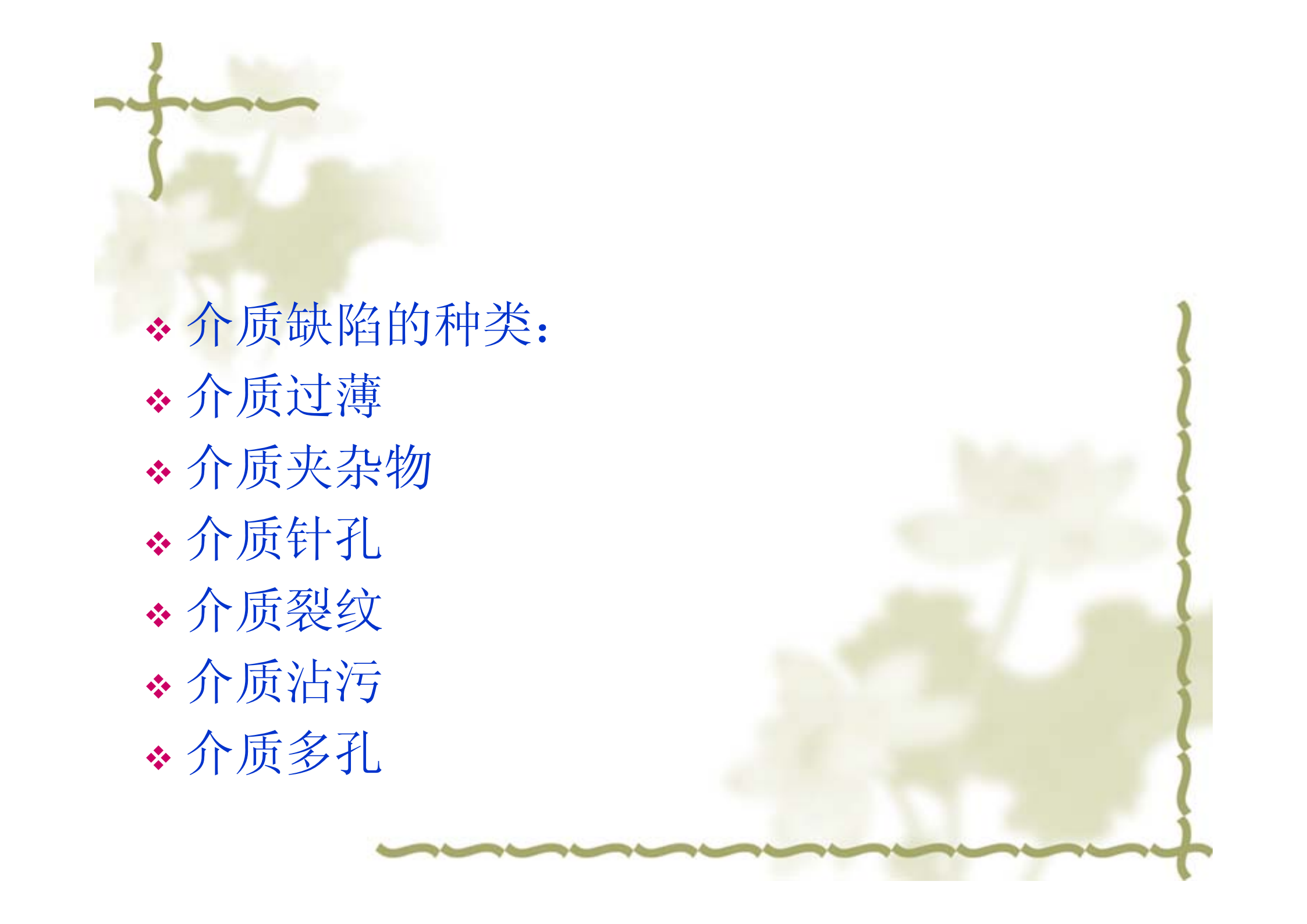


❖ 介质击穿的种类：

❖ 1、使用和测试中的过电应力（**EOS**）和静电放电（**ESD**）等异常应力超过介质的击穿强度引起。

❖ 2、电应力作用下，由于介质缺陷引起局部高电场，导致介质击穿。

❖ 3、与时间相关的击穿（**TDDDB**），这是由于介质中的可动钠离子在电场作用下迁移引起的。

- 
- ❖ 介质缺陷的种类:
 - ❖ 介质过薄
 - ❖ 介质夹杂物
 - ❖ 介质针孔
 - ❖ 介质裂纹
 - ❖ 介质沾污
 - ❖ 介质多孔

- 
- ❖ **VLSI漏电和短路的主要失效定位技术:**
 - ❖ **液晶热点检测、显微红外热像仪**
适用于发热型漏电失效，一般由欧姆短路引起。
 - ❖ **光发射显微镜（PEM）**
适用于光辐射型漏电失效，波长范围250nm~1050nm，空间分辨率1um，检测灵敏度1uA。

2.2.4、热载流子注入的失效机理与失效定位技术

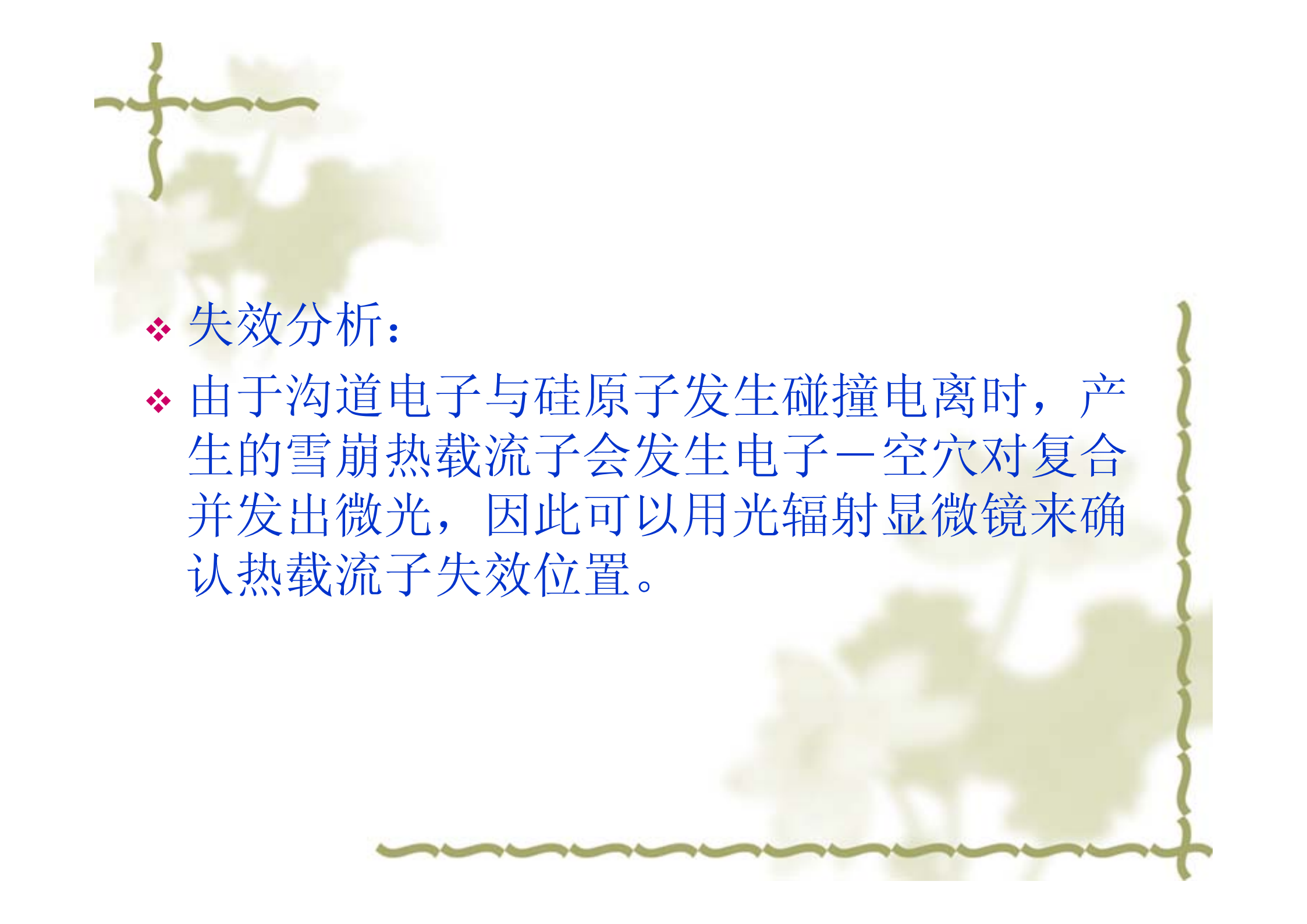
- ❖ 热载流子效应：
- ❖ MOS器件在减小器件沟道和栅极尺寸而电压却没有相应按比例缩小，结果使沟道电场增加，当载流子在大于 10000V/cm 的高电场下运动时，它从电场获得的能量大于散射过程中与原子碰撞损失的能量，因而载流子的温度将超过晶格温度，因此称为热载流子。

热载流子的种类

- ❖ 沟道热载流子
- ❖ 载流子在漏极电压形成的高电场下，从源极向漏极加速运动，在达到漏极边缘之前，部分载流子获得足以克服Si—SiO₂界面势垒的能量，热电子会注入到栅极下面的SiO₂层中。

❖ 雪崩热载流子

- ❖ 某些热载流子与硅原子碰撞电离，产生电子一空穴对，进而产生雪崩热载流子，使沟道电流倍增。这些载流子的大部分受到加速后能通过栅氧化层，形成可测量的栅极电流；其中一小部分载流子将被氧化层中的陷阱俘获，由于陷阱电子产生的电荷积累而引起电参数不稳定，表现为阈值电压漂移或跨导值降低。



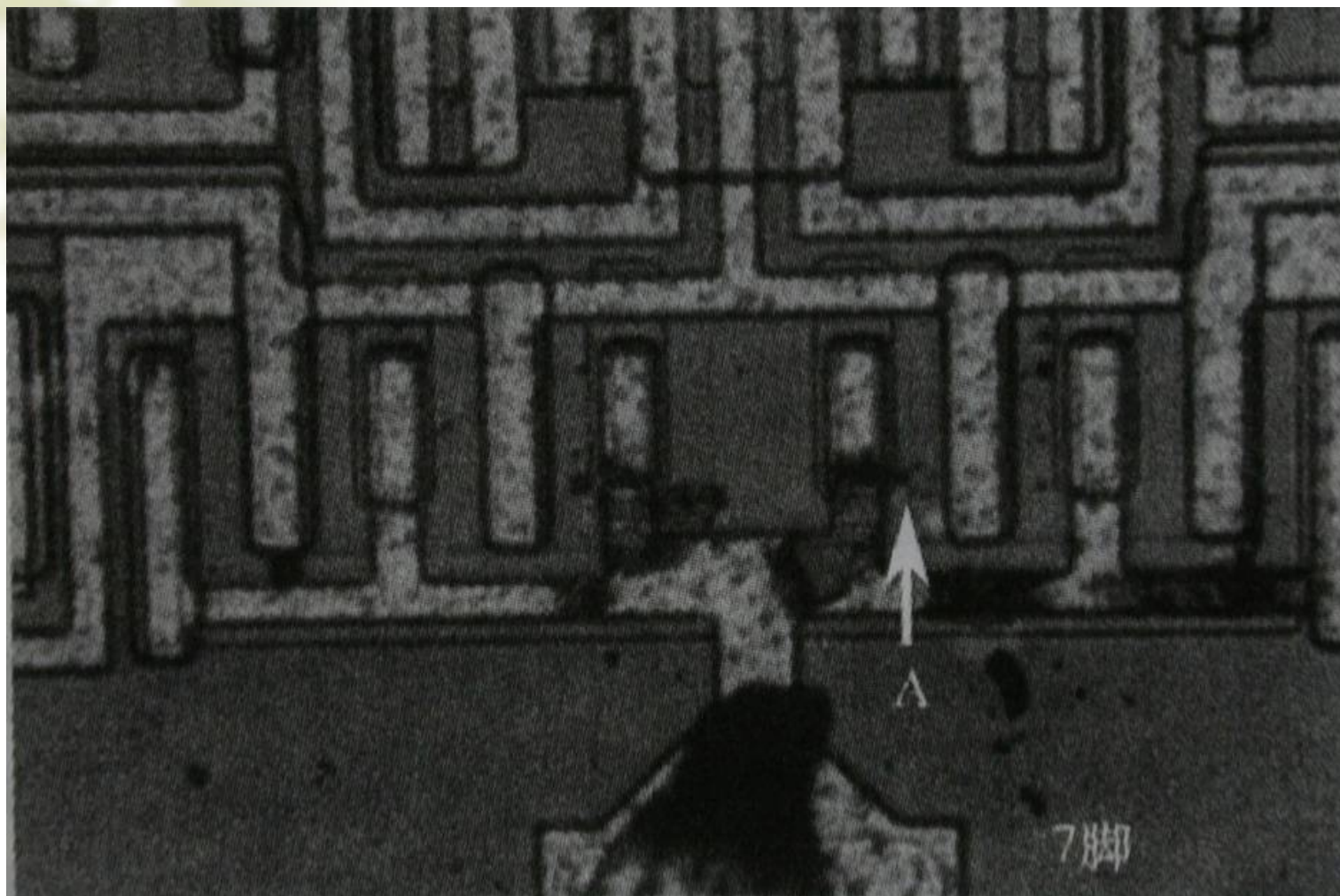
❖ 失效分析：

❖ 由于沟道电子与硅原子发生碰撞电离时，产生的雪崩热载流子会发生电子一空穴对复合并发出微光，因此可以用光辐射显微镜来确认热载流子失效位置。

2.2.5 VLSI失效分析技术的发展趋势

失效定位后的分析技术：

- ❖ 带有激光切割的机械探针台，对可疑器件隔离探测。
- ❖ EBT——高分辨率的取样示波器
- ❖ FIB——高分辨率的快速剖切面技术
- ❖ 微区成份分析仪器，俄歇电子谱仪，二次离子质谱仪等
- ❖ EBIC——电子束感应电流像，PN结成像

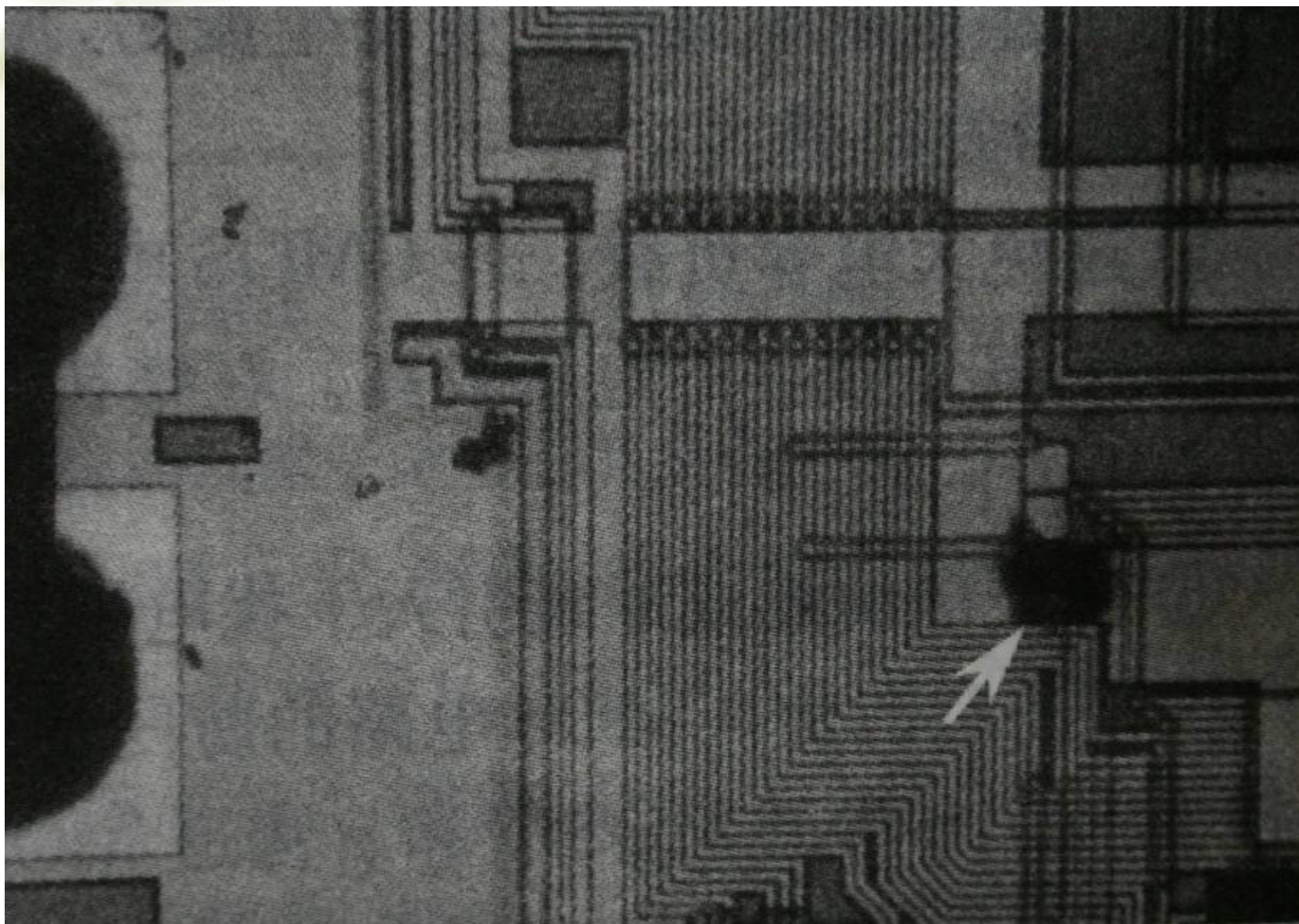


❖ 案例3:

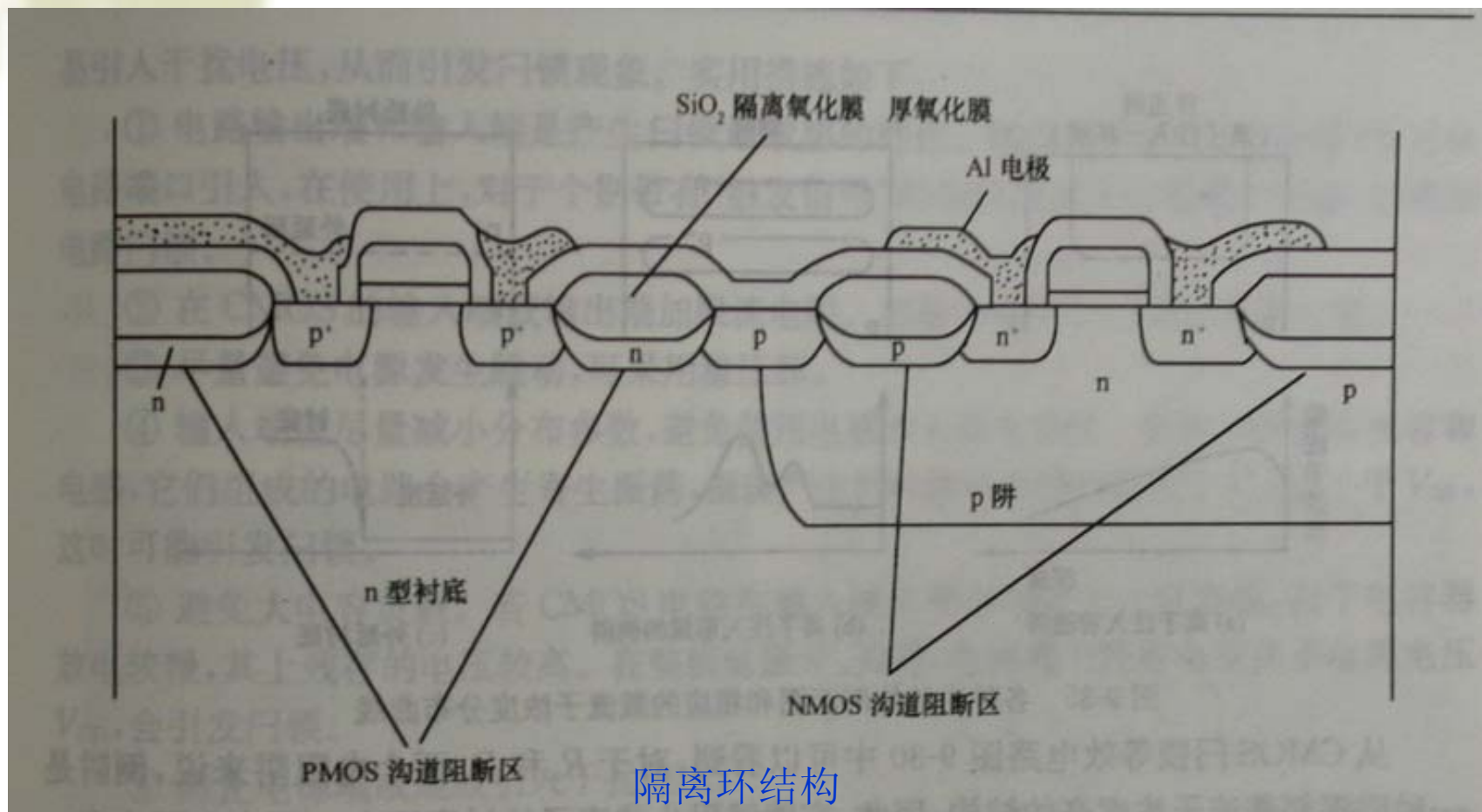
一块CPU电路在整机可靠性鉴定试验中功能失常，各端口对地特性正常，开封分析可见电源正端的金属化互连线在一支路的窄小处烧断（箭头处），表面电源端对地曾经发生过大电流。

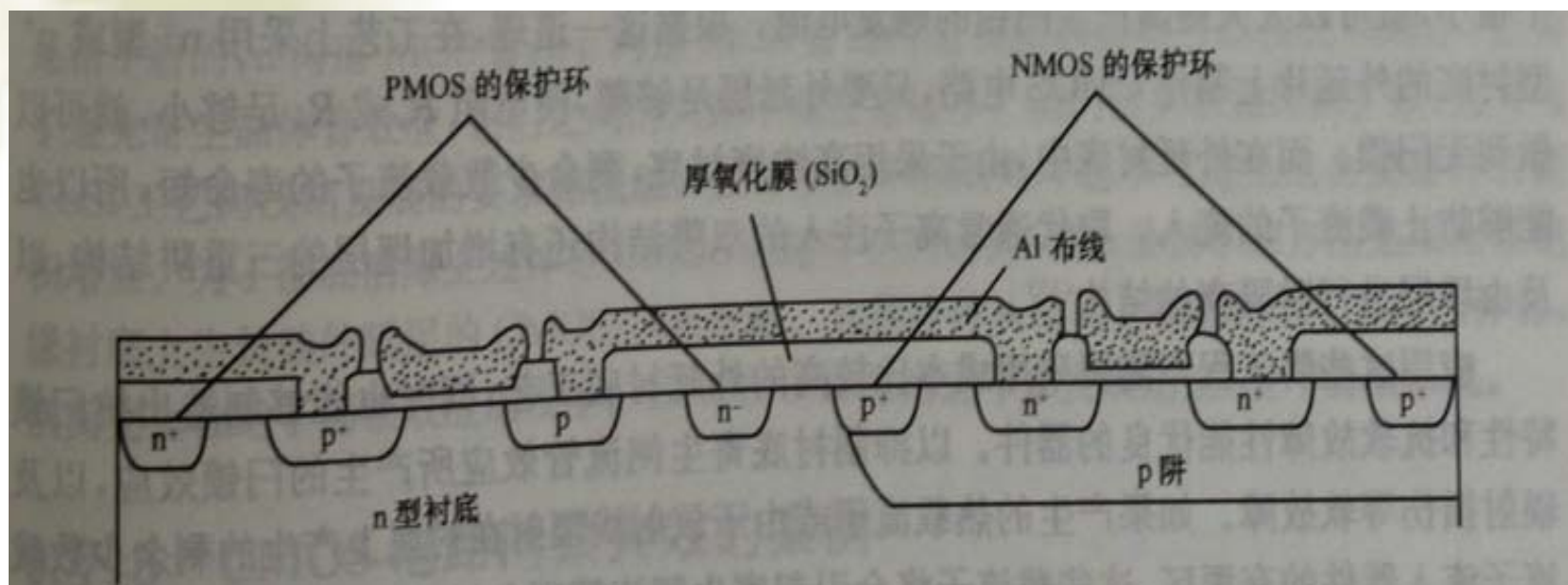
现场调查：在试验中对整机加电操作时，曾发现供电电源发生输出电压过冲，瞬间电压变高的现象，之后整机工作电流出现异常，换电路后整机正常。

说明过冲峰值电压串入CPU电路电源，造成电源端对地击穿，导致器件发生局部闩锁效应。闩锁效应产生的大电流导致金属化互连线烧毁。



CMOS电路的防闩锁设计





保护环结构