

第2章 失效分析工作的原则和程序

2.1 电子元器件失效分析的目的及作用

2.2 失效分析工作的流程和通用原则

2.3 失效分析报告

失效的数据收集；失效分析报告内容；

鱼刺图

2.4 电子元器件失效分析的程序

2.5 破坏性物理分析（DPA）

- 美军在60-70年代采用了以失效分析为中心的元器件质量保证计划，在6~7年间使集成电路的失效率从 $7 \times 10^{-5}/h$ 降至 $3 \times 10^{-9}/h$ ，集成电路的失效率降低了4个数量级，实现了“民兵II”、阿波罗飞船登月计划。
- 我国“七专”工作。
- 元器件失效分析：基础性的、最主要的，更多是微观分析。
- 失效分析定义：分析和研究失效的发生和影响，确定失效模式，判定失效机理，研讨提供改进的措施。
- 失效分析：事后检查与分析工作；综合性极强；反馈目的。专业人员的技术素质。
- 得出正确结论的捷径。
- 提高元器件固有可靠性就是提高可靠性水平的主要工作。

2.2 失效分析工作的流程和通用原则

2.1 失效分析工作的流程

失效现象 → 全部疑点 → 逐级定位 → 提出假设
→ 验证假设 → 预防方案 → 实施效果

2.2 失效分析的一些原则

1. 先方案后操作
2. 先光学后电学
3. 先面后点
4. 先静态后动态
5. 先非破坏后破坏
6. 先一般后特殊
7. 先公用后专用
8. 先简单后复杂
9. 先主要后次要

2.3 失效分析报告

2.3.1 失效的数据收集

- 准确的收集判定机理的基础。
- 失效分析（现场失效数据收集）报告。

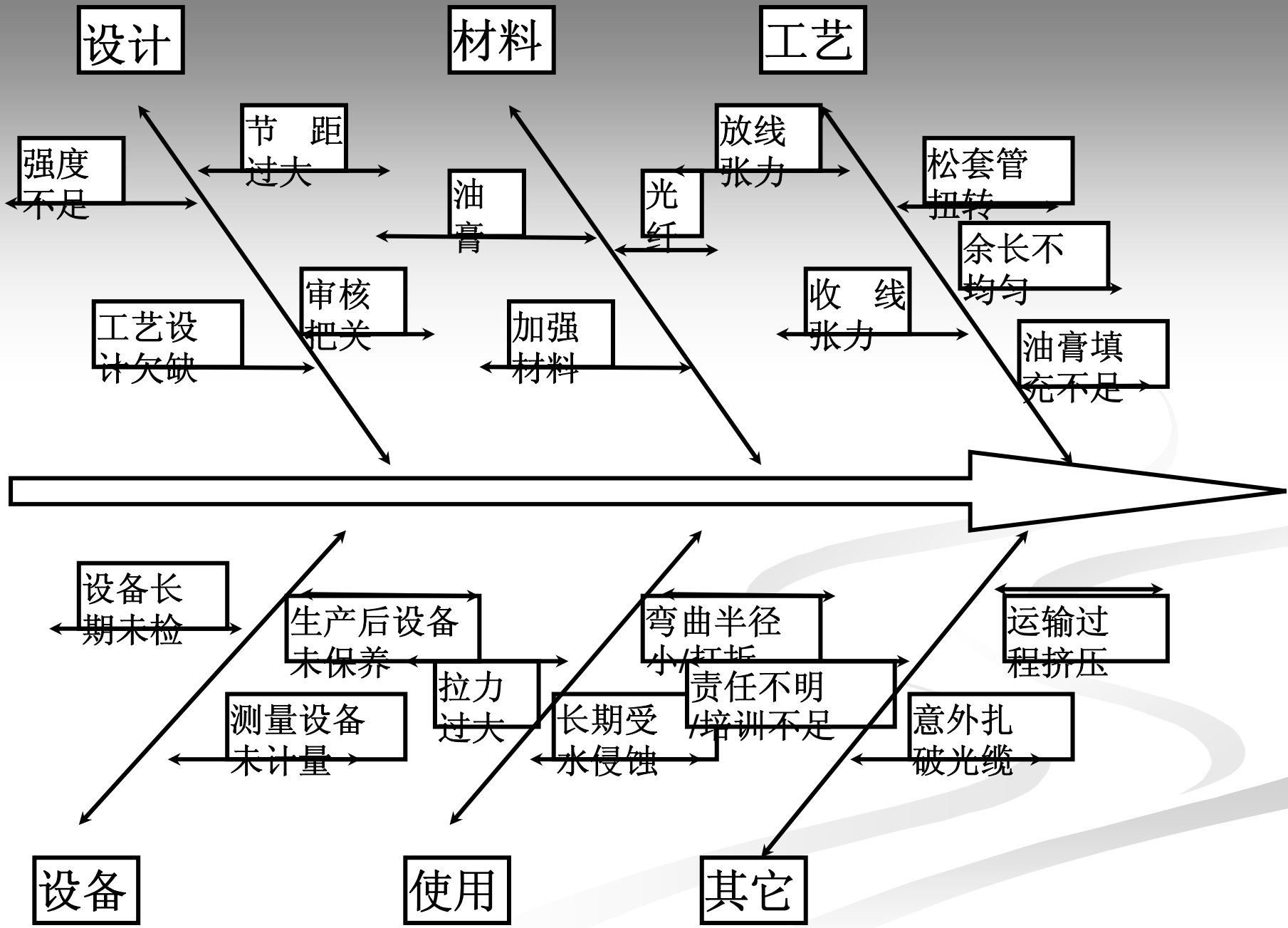
2.3.2 失效分析报告内容

三部分组成：

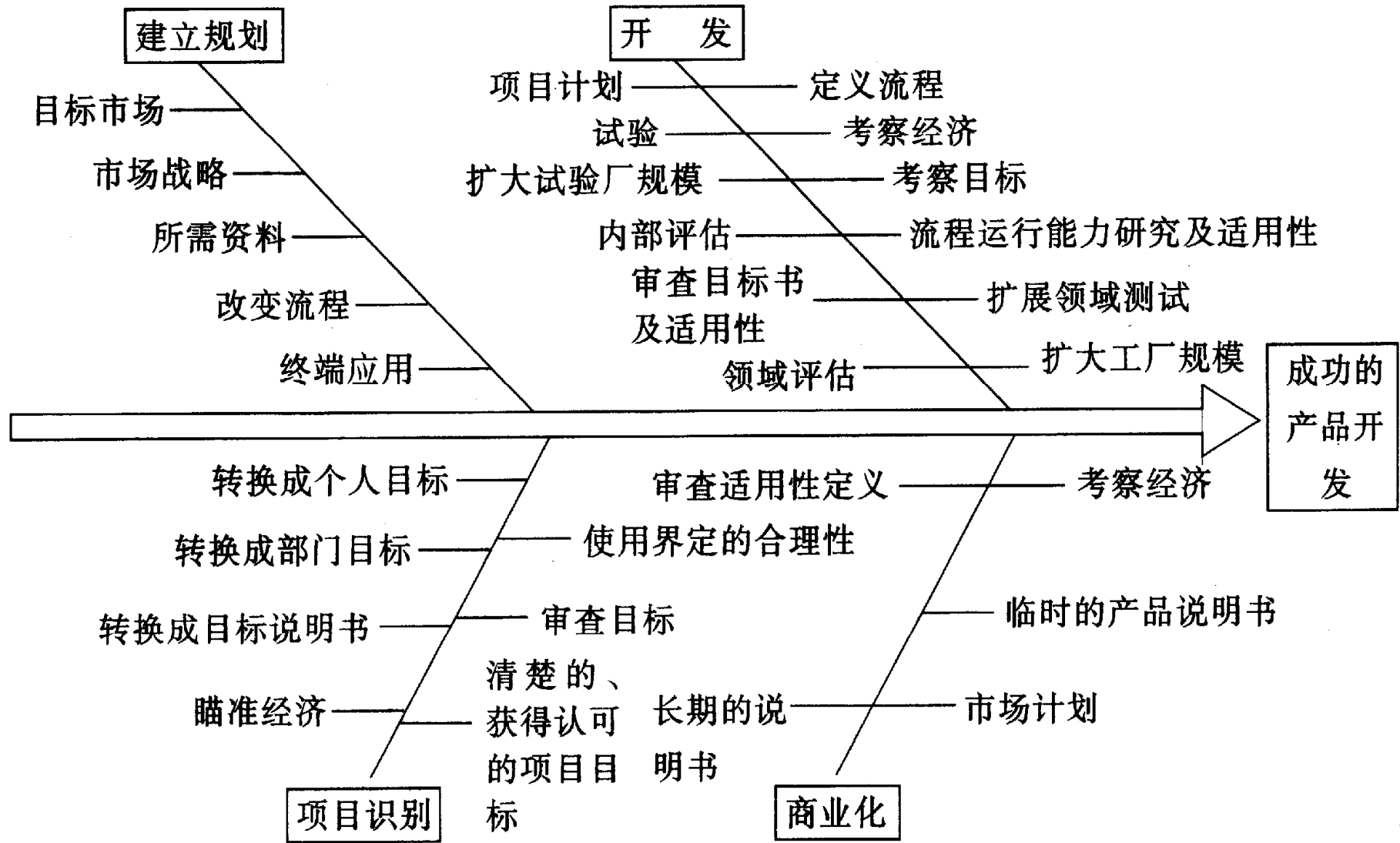
- 1) 元器件失效分析委托单。
 - 2) 元器件失效分析主报告。
 - 3) 元器件失效分析反馈单。
- 多次的快速的失效分析循环，可以带来巨大的经济效益。

鱼刺（骨）图

- 当多层次和多种因素造成一种失效模式时，用鱼骨图将因果关系和主次关系表示出来。因果图（cause and effect diagram）又叫石川图、特性要因图、树枝图、鱼刺图等。
- 脊椎骨的右端表示失效的现象或结果，各种因素按不同层次放在其左边，作为失效的原因。
- 鱼刺图的主要特征：
 - ①所有可能原因反映；
 - ②原因之间的关系；
 - ③假定的、定性的；
 - ④各种要素之间的复杂关系。
- 光缆失效的主要模式之一损耗增加，画出因果分析图。



因果图 —— 成功的产品开发



产品成功开发中的因果图分析

2.4 电子元器件失效分析的程序

- 失效分析要从失效现场直至追溯到制造、设计及使用的各个阶段。

2.4.1 失效分析程序的步骤

步骤1: 数据的收集与分析

步骤2: 失效现象的观察和判定

步骤3: 假定失效机理

步骤4: 失效机理的认定与验证 按照失效分析程序: 从外部到内部分析, 非破坏性到半破坏性直至破坏性检测和分析。

步骤5: 总结

2.4.2 微电路的失效分析程序

(详见GJB 548A方法5003)

A. 非破坏性的分析方法

1. 外部检查:

- 验证失效件与标准、规范的一致性。寻找失效的疑点。
- 显微镜观察、照相技术。固定并且确定失效现场，储存失效分析资料。
- 样品固定在橡皮泥上。为便于调节焦距，起始的放大倍数可从5倍左右开始。

2. 元器件解剖前电性能验证技术

- ◆ 电测失效：连接性失效，功能性失效和电参数失效。
- 附加(补充)电测试：验证环境条件与失效的联系。
- 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。待机电流显著增大说明有漏电失效部位。待机电流显著减小说明有开路失效部位。

3. 间歇动作试验：引发失效的温度、振动和冲击。

4. 内部检查：透明试件。

- ① 结构设计及使用的材料。
- ② 污染引起的腐蚀或粘附物。
- ③ 细裂纹或裂缝。
- ④ 电镀不完全。
- ⑤ 相互接触及接合不良。
- ⑥ 热或电气损伤。
- ⑦ 静电引起的损伤。

5. X-射线照相：封装的试件内部的物理缺陷

6. 细检漏和粗检漏的器件密封试验

7. 清洗外壳：外部清洗在非破坏程序之内，内部洗净包括在半破坏程序之内。

- 化学清洗是按除掉有机物污染、非有机物 / 非水溶性污染物、水溶性污染物的顺序进行的。

8. 微片检测试验

- PIND试验装置，振动试验装置
- 检测的微粒的最小质量为 $0.02 \mu\text{g}$ 左右。

9. 露点试验

- 检测试件封装内部空隙的湿气。
- 露点温度由这样观测到的元器件特性参数与温度关系曲线上，出现明显的、急剧变化的不连续突变点表示。

10. 表面温度分布测定

- 制成试件的温度图

11. 非破坏性分析方法可能鉴别的一部分失效模式和失效机理：

- ①瞬间或不当电源的过应力，导致引线开路或短路。
- ②外引线或/和金属化层焊接区的开路及短路。
- ③引线框架上外引线的剥蚀。
- ④电阻变化。
- ⑤表征 pn 结已退化的过量漏电流。
- ⑥时间响应或与频率相关的器件电学参数的退化。
- ⑦封壳外金属层的缺损，剥落。
- ⑧各种密封性问题。
- ⑨外来物的存在，由X-射线照相得出。
- ⑩由X-射线确定键合位置与引线调整不良；芯片或衬底安装中的空隙、开裂、虚焊、开焊。

B. 半破坏性的分析方法

打开封装；

1) 金属管壳

- 用管壳开启器或用小型车床、铣床开盖、或用小锯条锯开或用砂磨将封帽顶磨去部分。

2) 塑料封装

- 环氧封装喷射腐蚀技术。用高温硫酸溶解。
- 等离子刻蚀法。
- 发烟硝酸
- 用机械法磨去顶盖一部分，或在芯片上方开个圆孔，直到离芯片非常薄为止，用沸腾的发烟硝酸通过小孔喷射到芯片上方的塑料上进行局部腐蚀。

B. 半破坏性的分析方法

打开封装：

3) 陶瓷封装

将封装底座夹住，在引线框架密封线上选择一点，用小锤轻敲锋利刀片即可开启；用金-锡合金封焊的，可稍加热并用真空吸盖办法打开；对于环氧树脂封盖的，可先在醋酸中浸泡5~10分钟，使其发软，然后再轻轻撬开。

钝化层去除技术：

- 化学腐蚀法去除钝化层和金属化层
- 干法刻蚀去除钝化层

B. 半破坏性的分析方法

1. 内部检查

2. 电学检验

3. 真空烘烤 在 10^{-5} mmHg, 150~250℃条件下烘烤两小时, 测量并记录由烘烤所引起漏电流的任何变化。

4. 电学检验 复测。

5. 多头探针探测失效器件的有源区。各点电位, 有关电阻值, 个别管子结构特性, 漏电通道, 键合电路等。划断铝膜, 测单个管子特性。

6. 鉴别出的部分失效模式和失效机理

- ①内部金属层： 钻蚀和电过应力的问题； 化合物； 电迁移现象； 台阶处过薄； 缺损及/或剥皮。
- ②氧化层沾污、 变色； 氧化层缺陷、 裂缝、 针孔。
- ③在金属/半导体接触区上的各种反应。
- ④表征结已退化的漏电流。
- ⑤经过氧化层或介质层的短路。
- ⑥键合位置不良： 由X-射线照片确定。
- ⑦掩模未套准。
- ⑧外来物质的存在再确定。
- ⑨表面参数的稳定性。
- ⑩各个结、 扩散区和元件的质量。

C. 破坏性的分析方法

- 破坏性分析：剖面获取；氧化层缺陷分析；扩散缺陷分析；可选择的各种理化分析。
 1. 表面形状测定
 2. 器件的剖面分析
 3. 氧化层缺陷分析
 4. 机械破坏试验

破坏性分析方法可确定下列失效模式和失效机理：

- ①氧化层或介质层的厚度及不完善性。
- ②扩散层的不完善性。
- ③结的几何形状。
- ④金属间化合物的形成。
- ⑤在键合/金属化层界面处的空隙。
- ⑥接触金属扩散到半导体或衬底内。
- ⑦金属层的电迁移现象。
- ⑧芯片或衬底安装处的空隙。

D. 自选特殊分析项目

- 采用特殊的分析技术，提供失效机理确切的物理、化学或电学等方面的原因和验证失效机理。

①残余气体分析

②表面轮廓曲线测量

③光扫描 光束扫描 pn 结可说明氧化层表面、内部或下面有杂质玷污。

④红外扫描 测过热点及热异常的位置。

⑤电子显微镜

⑥扫描电子显微技术和电子束显微分析

⑦特殊的试验结构研究失效机理。

2.5 破坏性物理分析（DPA）

2.5.1 DPA的目的和试验项目

1. 破坏性物理分析（DPA：destructive physical analysis）方法的定义

- GJB 4027—2000军用电子元器件破坏性物理分析方法的定义“为验证元器件的设计、结构、材料和制造质量是否满足预定用途或有关规范的要求，对元器件样品进行解剖，以及在解剖前后进行一系列检验和分析的全过程”。

- 标准中明确规定了应在生产批中随机抽样。样本大小为生产批总数的2%，但不少于5只也不多于10只；
- 对结构复杂的元器件应为生产批总数的1%，但不少于2只也不多于5只。

2. DPA的目的

- 1) 确定元器件设计中和工艺过程的偏差；
- 2) 提出批处理意见和修改措施；
- 3) 独立地检验、验证供货方的元器件质量。

3. DPA的试验项目

- DPA针对元器件失效的高发部位进行检验。主要是对元器件的电极系统（内、外引线、金属层或金属化层），芯片的粘结或贴装等。

2.5.2 破坏性物理分析的作用和与失效分析的关系

- DPA的作用：合格品采用与失效分析同样的技术方法，调查评估特性良好的元器件的缺陷。
- 由于DPA在元器件可靠性工作中的作用和地位越来越重要，一些部门和从事重要工程研制的公司制定出的标准，要求用于重要场合的元器件进行DPA。
- 例如，美国国家航空航天管理局（NASA）在“空间飞行项目的电气、电子和机电（EEE）元器件的管理与控制要求”的标准中规定，在不做特殊说明时，用于寿命保证和完成任务所必不可少或关键性应用场合的每一批元器件类型，都应做DPA。

- 再如欧洲空间局（ESA）在“ESA空间系统的元器件选择、采购和控制”的标准中规定，承包商（承担ESA项目的公司）应对半导体分立器件、集成电路、滤波器、可变电容器 / 电阻器、陶瓷电容器、钽电容器、继电器、晶体检波器、混合电路、开关、高压元器件、高频元器件和光电元器件按同一日期代号的种类各取3只做DPA。
- 利用失效分析的人员和设备进行DPA工作，可以得到投入小、见效快、效益高的结果。

失效分析与DPA的比较表

分析方法	失效分析	DPA
分析目的	得出失效原因，提出处理意见和改进措施	评价设计和工艺质量，预防与基本设计和工艺相关的批缺陷
应用阶段	出现失效后（事后）	认定或到货验收（事前）
应用部门	元器件生产厂、承担工程项目的公司和独立实验室	承担工程项目的公司和独立实验室为主
分析样品	失效样品（全部）	合格品（抽样）
分析程序	有基本要求	有具体规定
判别标准	失效特征与原因的关系有时很复杂，没有定量的判据	有缺陷的定量判别标准
工作性质	分析研究和经验判断	符合性检验
分析设备	电测试、形貌观察、物理测试、应力试验、成分分析等	形貌观察、物理性质测试为主
周期费用	由复杂程度决定，范围较大	费用固定，变化不大

2.5.3 破坏性物理分析案例

- 我国DPA工作的起步在上世纪七十年代末。
- 在1996年2月长三乙发射外星失败，发射才几秒，平台倒塌，损失严重。原因是平台的稳态回路无输出。经专家组现场检查，确定某所的集成电路有部分批次出现零克点的致命失效。
- 经过近万批的DPA，发现了国内外元器件的许多不合格的批次性问题，认识到DPA 的重要性和迫切性。
- 开展DPA工作后，从1997年至今，航天系统大型发射，全部成功。这和1996年以前的多次失败形成鲜明的对照。其中DPA功不可没。

1. 批次性关键质量问题的发现

- DPA工作发现零克点批次质量问题。
 - “一个零克点相当（销毁）一个导弹、一架飞机”。一个零克点可使一个大型系统销毁。
- 1) 零克点数量之多，缺陷持续时间之长令人深思
- 乙厂向航空甲所供应的CV变换器集成电路，经DPA发现存在严重的零克点缺陷。到DPA发现缺陷为止，4年的供货均存在这类致命缺陷，最严重的一只电路中发现21个零克点（一个器件有102条键合丝）。甚至发现一根键合线两头都是零克点这种极为罕见的现象。

2) 严重漏气引起零克点

- 某厂生产3DD型三极管，漏气十分严重，以致于在粗检漏时，管壳内充满了氟油，将内涂料缓慢“泡发”，从而将键合丝慢慢连根拔起。电参数测试合格的这类器件随时间将会陆续失效。

3) 镀金工艺缺陷产生零克点

- 某型号运算放大器出现零克点，DPA结论：键合工艺没有缺陷，零克点的原因是管壳镀金层缺陷造成。

2. DPA是提高元器件使用可靠性

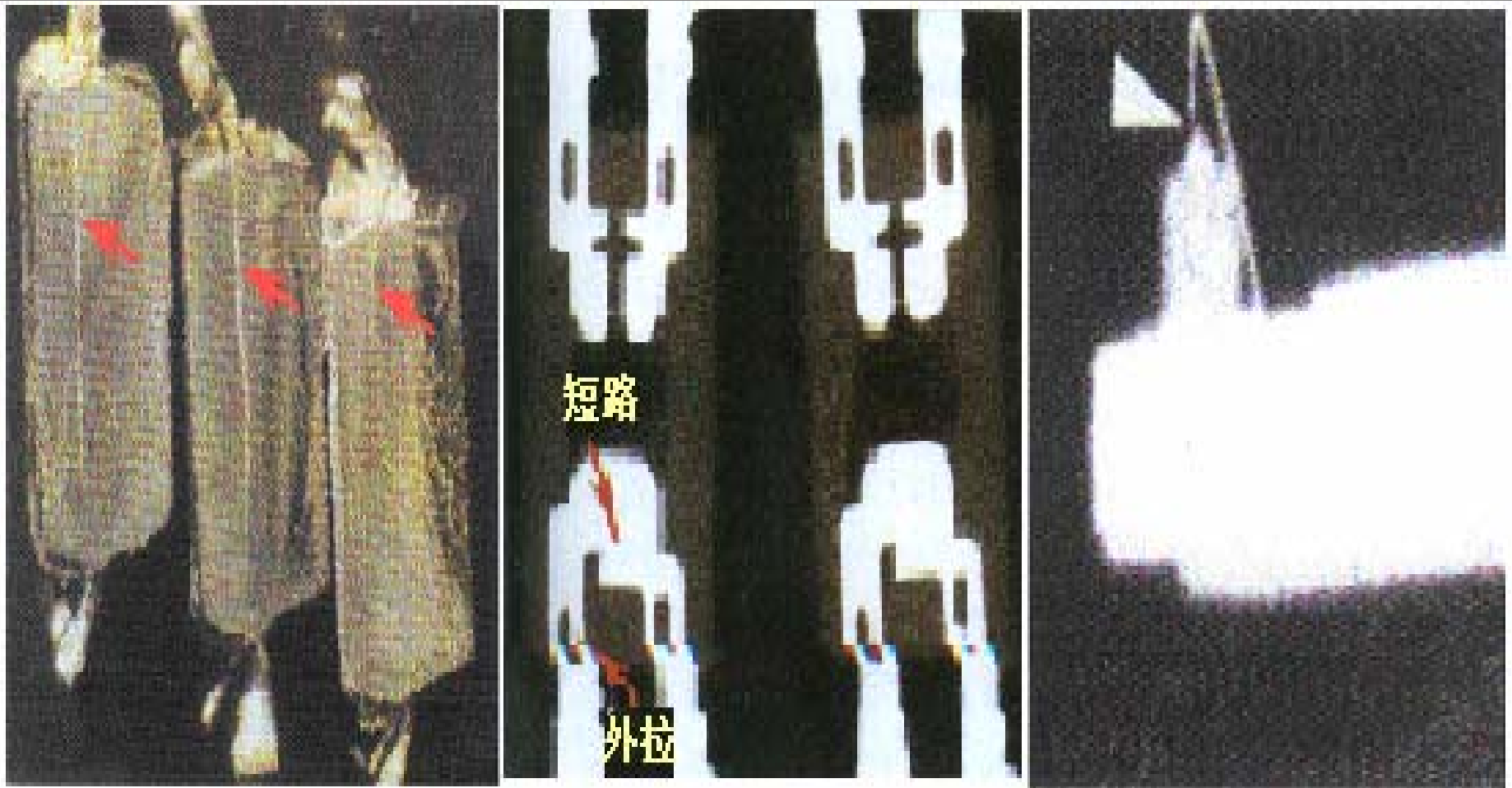
使用方的问题造成DPA不合格案例也不少。

1) 管脚加工成型不当

某单位在电路装配上发现大量光电耦合器短路和开路失效。经查：该双列直插光电耦合器，为了改造成适合表面安装的结构，对管脚进行了加工成型。

失效原因：

- 加工成型中操作或模具不当，；
- 由于管脚被拉动，管脚与塑料之间有间隙，水分进入，高温环境如载流焊时，水分蒸发膨胀造成塑封爆裂。



(a) 塑封爆裂

(b) 管脚短路

(c) 金线开路

图2.1 光电耦合器短路失效

图2.1 (a) 说明包封内部有大的应力，X射线检查发现内部框架引线短路和金丝断线。(b) (c) 大的拉力使管脚外拉位移，金丝引线拉断或管脚短路

2) 安装散热板用力不当

一种三端稳压器在安装散热板时，由于散热板表面不平，在上固定螺钉时用力过大过猛，造成对芯片的损伤破裂。

图2.2 (a) 是两个破裂剥离的芯片照片。

图2.2 (a) 芯片上的裂缝侧面图



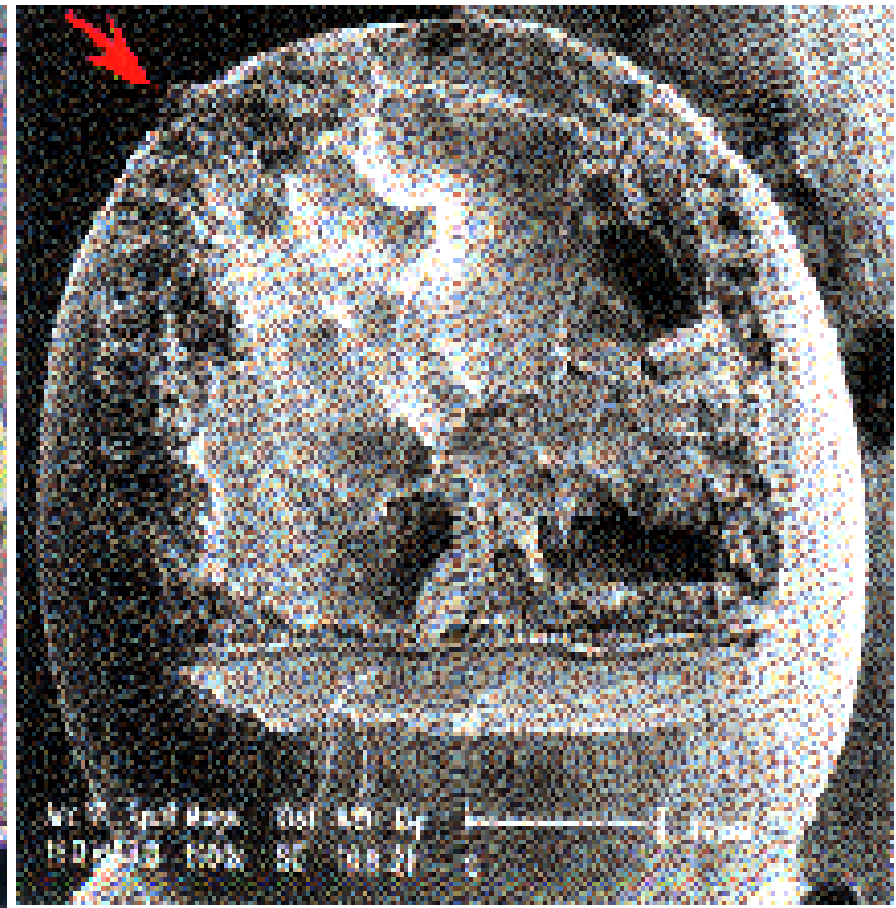
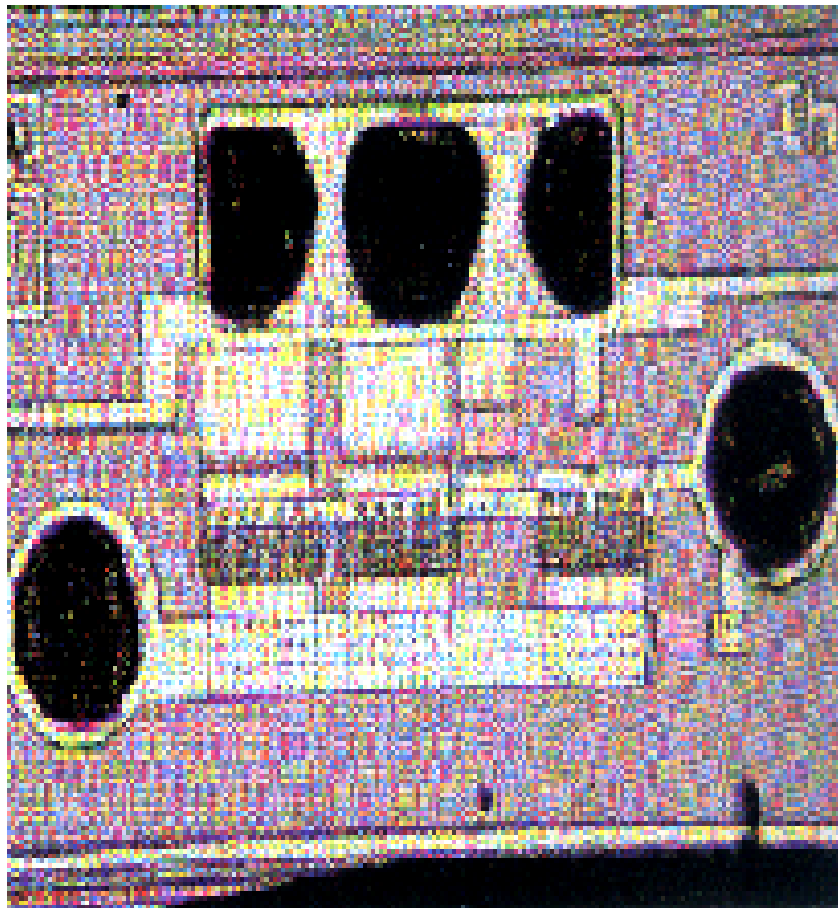
图2.2 (b) 芯片侧面上的裂缝

图2.2
(b) 一种三端稳压器的芯片，从侧面到表面出现破裂剥离照片。



3) 长期功率试验的温度过高

砷化镓微波单片电路样品经历了高温（150℃、168h）、热冲击（-65~150℃、15次）、湿热和125℃及85℃高温直流静态工作各500h等试验。在长期125℃高温直流静态工作中（结温远远超过150℃），在键合界面产生金-铝化合物，使界面接触电阻增大。



- 在大电流通过界面的情况下，键合面电阻上的焦耳热使界面快速温升，加速金-铝化合物的产生。
- 金-铝界面长时间温度超过 150°C 都有可能产生金-铝化合物。化合物的脆性造成键合合易脱落。
- 塑封微波民用器件在 125°C 的长期功率试验中，内部温度可能超过产生金铝化合物的温度。
- 对于塑封金-铝键合的微波器件进行长期试验取 85°C 的环境温度。或使用无金-铝键合的产品。