

## 电子组件组装互连可靠性设计与评价

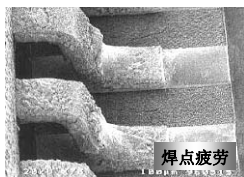
主讲：何小琦  
020-87237897, 13380099881  
hxq-cn@163.com

## 为什么要可靠性设计



性能、功能合格！  
可靠吗？

## 如何设计、评价



有哪些失效，  
标准要求？

## 课程内容

- 一、可靠性设计与评价的概念
- 二、电子组装互连结构与失效特点
- 三、产品可靠性要求及相关标准
- 四、组装可靠性设计的基本程序
- 五、可靠性设计指标
- 六、组装互连可靠性设计方法
- 七、电子组装件可靠性设评估方法

## 培训达到的目的

- 了解可靠性设计的概念和标准要求
- 掌握组装失效模式和可靠性设计方法
- 掌握开展可靠性设计的工作程序

## 一、可靠性设计与评价基本概念

- 1.1 可靠性设计的定义
- 1.2 质量与可靠性的区别
- 1.3 可靠性设计与浴盆曲线的关系
- 1.4 可靠性设计与质量保证体系的关系
- 1.5 可靠性设计的目标

## 1.1 可靠性设计的定义

- SJ/T10388-98 电子工业专用设备可靠性术语

可靠性设计 reliability design ——

为满足设备可靠性要求而进行的设计。

- 电子组件、元器件而言

为满足产品质量与可靠性要求而进行的设计。包括：结构设计、材料选用、工艺适应性设计、热设计、元器件选用，等。

## 质量、可靠性的定义

- 质量——产品的性能的技术指标、安全性、环境适应性，表征交货时产品性能、工艺质量与规范要求的符合程度。产品在出厂前的工艺检验、鉴定试验、筛选、成品率，这些结果表示产品的质量情况。
- 可靠性——产品在规定条件和规定时间内使用，仍能保证性能、功能稳定的能力。产品交货使用后的失效率数据、寿命数据，这些结果表示产品的可靠性情况。

## 表征质量的参量

- 性能——参数
- Cpk——工艺能力指数
- SPC过程控制参数
- 筛选PDA——合格率
- 鉴定——环境适应性等
- QCI——质量一致性检
- QML——工艺、材料检验

描述交货产品的质量状况，表征产品与设计要求的符合程度。

## 表征可靠性的参量

- 可靠度 $R(t)$ ——在规定条件和时间 $t$ 内完成规定功能概率，“三个规定”下的概率。

$$R(t) = \frac{N(t)}{N}$$

- 失效概率 $F(t)$ ——在规定条件和时间 $t$ 内失效的概率。累计失效概率。

$$F(t) = \frac{n(t)}{N}$$

- 失效概率密度 $f(t)$ ——单位时间内发生失效的概率，产品失效数随时间 $t$ 的变化（产品总数）。

$$f(t) = \frac{\Delta n(t)/\Delta t}{N}$$

- 失效率 $\lambda(t)$ ——单位时间内发生失效的概率，产品随时间 $t$ 的变化（剩余好品）。

$$\lambda(t) = \frac{\Delta n(t)/\Delta t}{N(t)}$$

- 平均寿命MTBF/MTTF——批产品寿命平均值。

$$t_{MTTF} = \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{N}$$

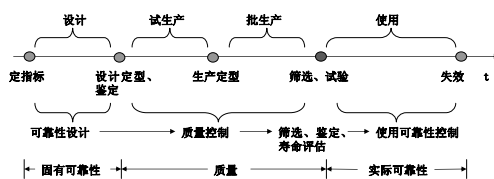
- 寿命方差 $\sigma^2$ ——批产品寿命值的分散性。

$$\sigma^2 = \int_0^\infty (t - \mu)^2 f(t) dt$$

## 1.2 质量可靠性的区别

- 以时间为坐标，鉴定交货为时间节点

交货前生产过程的合格/不合格为质量数据，交货使用后的退化失效为可靠性数据。



## 分清区别的目的

- 质量问题，通过工艺控制解决

如：焊接空洞。通过改善焊接工艺、改进焊接稳定性控制。

- 可靠性问题，通过可靠性设计解决

如：参数退化、疲劳失效、热失效。通过改进设计结构、工艺技术、焊接材料、等。

- 产品的故障时间点

在鉴定未通过，则是设计问题；在鉴定通过批产检验未通过，则是工艺控制问题；在使用过程失效，则需要分析判断。

## 质量问题、可靠性问题

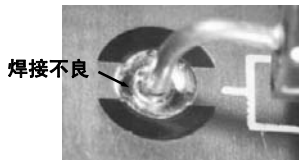
### ■ 焊点接触不良

#### 1) 使用初期

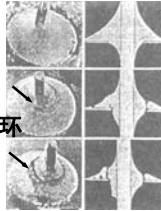
虚焊等焊接不良，质量缺陷问题。

#### 2) 几年后

出现疲劳环，属于可靠性问题。



疲劳环



## 可靠性设计涵盖的内容

### ■ 开展可靠性工作

一切围绕着如何控制失效，开展的一切设计工作。

### ■ 可靠性设计涵盖

针对固有可靠性：结构设计、材料设计、工艺设计等；

针对质量稳定性：Cpk、SPC控制设计；

针对质量检验的：可靠性试验方法设计等。

### ■ 可靠性设计不包括

性能设计、功能设计。

## 1.3 可靠性设计与浴盆曲线的关系

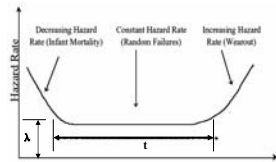
### ■ 失效分布三个阶段：早期失效、随机失效、耗损老化

#### ■ 影响因素：

早期失效——工艺、材料缺陷是主要原因，通过提高工艺水平、稳定工艺解决，温度/机械等裕度设计解决。

随机失效——使用不当、外界环境突变、潜在缺陷等，通过规范操作、生产稳定性控制（Cpk/SPC）、降额使用解决。

耗损失效——结构磨损、材料老化是主要因素，通过固有寿命设计解决。



## 可靠性设计的目的

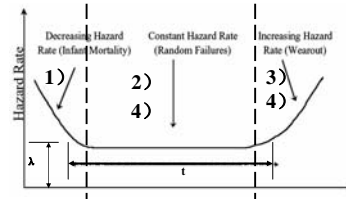
### ■ 可靠性设计解决不同阶段的问题

1) 筛选控制：降低早期失效率。

2) Cpk、SPC控制：降低失效率 $\lambda$ ，不能提高固有（耗损）寿命。

3) 固有寿命设计：提高耗损寿命 $t$ 。

4) 环境适应性设计（温度/机械裕度等）：降低 $\lambda$ 、提高 $t$ 。



## 1.5 可靠性设计的目标

### ■ 对设计出来的产品：

实现固有可靠性，满足可靠性指标要求。

### ■ 对生产出来的产品：

实现产品可靠性，尽可能接近可靠性设计指标。

## 要点回顾：可靠性设计概念

■ 质量、可靠性的区别：鉴定验收，质量与可靠性时间性区别节点。节点前质量问题，采用工艺控制解决；节点后可靠性问题，采用可靠性设计解决。

■ 可靠性设计的作用：赋予产品固有可靠性：可靠寿命、环境应力裕度。可涵盖：结构设计、工艺设计、材料设计、试验设计、质量控制设计。但不包含功能、性能设计。

■ 质量控制的作用：工艺过程控制是为了缩小产品实际可靠性与固有可靠性的差别。通过控制可提高质量水平，但不可能超越固有可靠性。



### 三、可靠性要求及标准

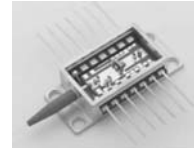
#### 3.1 可靠性基本要求

#### 3.2 GB/GJB/SJ/MIL/IPC/IEEE标准要求

#### 3.3 使用方对元器件的可靠性要求

#### 3.1 可靠性基本要求

- **整机要求**——满足环境应力下的适应性和使用寿命要求。
- **产品规范**——满足产品规范的环境试验和实验室寿命。（模块1000hr稳态寿命）



#### 3.2 GB/GJB/SJ/MIL/IPC/IEEE标准要求

##### (1) 工艺质量要求

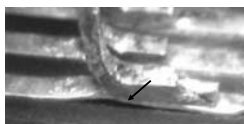
- SJ/T 10670-1995 表面工艺通用技术要求
- GB/T 19247.1-2003印制板组装 第1部分：通用规范
- GB/T 19247.2-2003印制板组装 第2部分：表面安装焊接组装的要求
- GJB 3835-1999 表面安装印制板组件装通用要求
- SJ/T 10666-1995 表面组装组件的焊点质量评定
- IPC/EIA J-STD-001C 电气与电子组装件锡焊要求
- IPC-A-610D 印制板组装件验收条件
- .....

##### SJ/T 10670-1995表面工艺通用技术要求      IPC-A-610D 印制板组装件验收条件

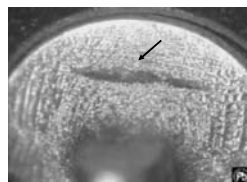
- |   |  |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"><li>▪ 元器件</li><li>▪ 基板</li><li>▪ 工艺材料</li><li>▪ 焊膏印刷</li><li>▪ 贴装</li><li>▪ 固化</li><li>▪ 焊接</li></ul> | <ul style="list-style-type: none"><li>▪ 焊接的可接受和异常</li><li>▪ 通孔工艺</li><li>▪ SMT焊点的高度、宽度等。</li><li>▪ .....</li></ul> |
|---|--|

#### IPC-A-610D

##### ▪ 焊接质量缺陷



焊缝起翘、损坏焊盘连接



焊点上形成缩孔或热裂纹

##### (2) SMC/SMD的质量要求

- SJ/T 10669-1995表面组装元器件可焊性试验
- SJ/T 10630-1995 电子元器件制造防静电技术要求
- IPC/JEDEC J-STD-020 塑料集成电路(IC) SMD的潮湿/回流敏感性分类
- IPC/JEDEC J-STD-033A 潮湿/回流敏感性SMD的处理、包装、装运和使用标准
- IPC-9503 非IC元件的潮湿敏感性分类
- .....

### (3) 工艺材料要求

- GB/T 3131-2001 铅锡焊料
- GB/T 2424.17-1995 电工电子产品环境试验 焊锡试验导则
- SJ/T T11186-1998 锡铅膏状焊料通用规范
- SJ 20511-1995 混合微电路用胶粘剂规范
- MIL-R-14256 液体焊剂的技术要求
- MIL-F-14256 印制电路板技术要求
- IPC-WP-006 Round Robin Testing & Analysis: Lead-Free Alloys-Tin, Silver, & Copper
- IPC-9261 In-Process DPMO AND estimated Yield for PWAs.
- JEP142-02 Obtaining and Accepting Material for Use in Hybrid/MCM Products
- .....

### (4) 耐环境适应性要求

- GB/T 15279-94 微电路模块机械和气候试验方法
- GB 2423 电工电子产品环境试验
- SJ 20137-92 印制板组件抗振动冲击技术要求和测试方法
- MIL-STD-220 电子元件及器件的测试方法
- MIL-STD-883 微电子器件的试验方法和程序
- IPC-TR-462 Solderability Evaluation of Printed Boards with Protective Coatings Over Long-term Storage
- .....

### (5) 混合电路/组件/模块要求

- GB/T 15431-1995 微电路模块总规范
- GB/T 16465-1996 膜集成电路和混合膜集成电路分规范
- GB/T 18910.2-1998 液晶和状态显示器 第2部分: 液晶显示模块分规范
- GB/T 19247.1-2003 印制板组装 第1部分: 通用规范
- GB/T 19247.1-2003 印制板组装 第2部分: 分规范 表贴
- GB/T 19247.1-2003 印制板组装 第2部分: 分规范 通孔
- GB/T 19247.1-2003 印制板组装 第2部分: 分规范 引出端
- SJ 20137-92 印制板组件抗振动冲击技术要求
- SJ 20532-95 印制板组件通用规范
- SJ 20632-97 印制板组件总规范
- SJ 20642-97 半导体光电模块总规范
- GJB 2438A-2002 混合集成电路通用规范
- .....

### (6) 可靠性设计和评估

- GB/T 2689.1-1981 恒定应力寿命试验和加速寿命试验方法总则
- GJB 899-90 可靠性鉴定和验收试验
- GJB/Z299B-98 电子设备可靠性预计手册
- GJB/Z 27-92 电子设备可靠性热设计手册
- SJ 20077-92 微电路应用热设计指南
- SJ 20710-1998 军用表面组装电路设计指南
- GB 7828-1987 可靠性设计评审
- MIL-STD-275 印制电路板的制造及元器件和组件安装的设计原则
- JEP149 使用热降额方法
- IEEE Std 1413-1998 IEEE Standard Methodology for Reliability Prediction and Assessment for Electronic Systems and Equipment
- IPC-SM-785(1992) Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachment
- JEP148(2004) Reliability Qualification of Semiconductor Devices Based on Physics of Failure Risk and Opportunity Assessment
- .....

## GJB2438 混合集成电路通用规范

- 制定设计指南: 说明应用环境对工艺、材料的影响
- 在温度、电性能极限最坏情况下的设计方法
- 制定可靠性设计检查: 电迁移/电流密度、IR压降、闩锁、单粒子翻转(SBU)、热电子、ESD、烧毁/背栅等失效控制的设计。
- 热设计及验证程序: 在最高亮温下工作时, 所用的功能元件也在它们各自允许的设计额定温度范围内工作
- 可靠性设计验证程序: 最坏情况下电路设计, 温度、机械、EMC等期限环境应力下的产品性能验证
- 组装设计性能验证程序: 针对封装失效模式控制的设计验证, 可以是单一封装失效机理的工艺样品试验定量验证、成品试验性能验证、以往的同类产品经验或数据库验证、资料信息定性验证

## SJ20710 军用表面组装电路设计指南

- 热设计: 热分析软件包对表面组装电路进行设计分析, 热分布。
- 可靠性预计: 依据元器件结温和外壳温度, 以及元器件和基板的失效率, 计算出表面组装电路的MTBF预计值。



### 3.3 使用方对元器件可靠性的要求

- XXX公司（通讯）  
2003年XXXX公司对组件供应商认证的可靠性要求。
  - 1) 可靠性设计：针对组件至少5种潜在失效机理进行可靠性设计，验证控制效果。
  - 2) 寿命评估：提供损耗寿命的数据，提供激活能参数。
  - 3) 裕度评估：最供结度、热阻、功耗、固有频率、振幅。
- 国外生产公司：  
建立了全寿命周期的产品可靠性保证技术体系，编写《技术手册》。如SNOY、TOSHIBA、MITSUBISHI、NEC、SEMATECH等。

### TS/ISO16949-2002 国际汽车品质管理体系

- 要求供应商在通过TS16949体系认证
- 其中，7)产品实现要求: 7.3设计和开发
  - 1) 产品设计输出: D-FMEA的开发和评审，可靠性结果。
  - 2) 制造设计输出: P-FMEA的开发和评审，可靠性结果。

### 南京FIAT汽车对供应商的要求



- 供应商必须评估与产品设计或工艺过程有关的潜在故障起因和后果。使用故障模式和后果分析（FMEA）技术，通过对潜在故障模式的系统性分析，防止缺陷的发生
- 供应商编制D-FMEA、P-FMEA。



### 整机可靠性设计的需求

- 可靠性建模:  
GJB813 可靠性建模和预计。
- 系统预计:  
GJB299B 电子装备可靠性预计手册。  
IEEE1413 POF方法可靠性设计评估
- 可靠性分配
- 建立FMEA信息库  
...

都需要元器件  
生产方提供

### 可靠性设计基础

- FMEA:  
故障模式影响及危害性分析, Failure Mode Effect and Criticality Analysis.
- 相关标准:  
IEC 60812 Analysis techniques for system reliability—procedure for failure mode and effects analysis (FMEA) 系统可靠性分析技术—FMEA程序。
- FMEA内容:  
D-FMEA, P-FMEA, 已表格形式给出: 故障模式、部件、原因、影响、设计改进方法。

### 要点回顾：可靠性要求及标准

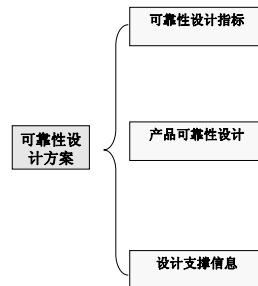
- 混合微电路（HIC）的主要标准:  
GJB2438 混合集成电路通用规范  
GB/T15431 微电路模块总规范
- 板级组件（PCBA）的主要标准:  
SJ 20710 军用表面组装电路设计指南  
SJ 20632-97 印制板组装件总规范  
SJ 20137 印制板组装件抗振动冲击技术要求  
IPC-SM-785 Guidelines for Accelerated Reliability Testing of Surface Mount Solder Attachment  
.....

## 四、可靠性设计的基本程序

- 4.1 元器件生产流程
- 4.2 可靠性设计程序
- 4.3 可靠性设计方案的制定

www.ceprei.com 信息产业部电子第五研究所

## 4.3 可靠性设计方案要求



www.ceprei.com 信息产业部电子第五研究所

## 4.3 例：HIC可靠性设计方案

- 可靠性设计指标
- 基本可靠性设计原则
- 使用可靠性量化设计
- 可靠性设计支撑信息  
(具体见附录)

## 要点回顾：可靠性设计程序

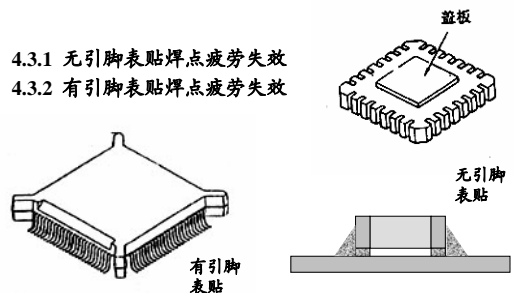
- 可靠性设计方案要求：
  - 1) 可靠性设计指标
  - 2) 产品可靠性设计内容
  - 3) 可靠性设计支撑信息

## 四、电子封装典型失效与可靠性设计

- 4.1 可靠性设计方法
- 4.2 一级封装可靠性设计
- 4.3 二级封装可靠性设计
- 4.4 板级组件振动可靠性设计

## 4.3 二级封装典型失效与可靠性设计（表贴）

- 4.3.1 无引脚表贴焊点疲劳失效
- 4.3.2 有引脚表贴焊点疲劳失效

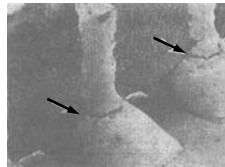




### 4.3.1 无引脚表贴焊点疲劳失效

#### ■ 失效模式：

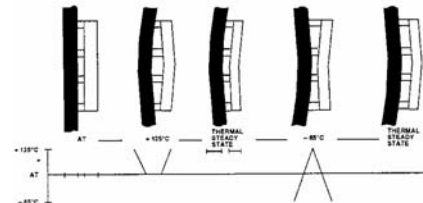
高密度组装形成的组装结构，在温循应力反复作用下，焊点因热疲劳而开裂失效，尤其边缘焊点，初始表现电连接的断断续续。



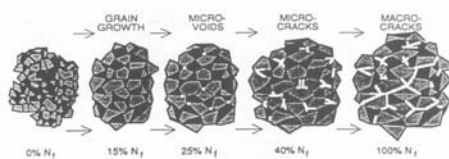
### 无引脚表贴疲劳

#### ■ 失效原因：

元件与基板之间CTE失配，焊料在反复的热胀冷缩中承受剪切形变，疲劳开裂。



#### ■ 疲劳开裂的过程：



#### ■ 外观表现：

大约消耗25%的疲劳寿命后，在晶粒边界交会处可以看见微孔；大约消耗40%的疲劳寿命后，微孔变成微裂纹；微裂纹逐步生长合并成宏观裂纹，导致总体损坏。

#### ■ 焊点疲劳寿命预估：

焊点疲劳遵循C-M模型

$$N_f = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta \epsilon_p}{2 \epsilon_f} \right]^{\frac{1}{c}}$$

疲劳寿命

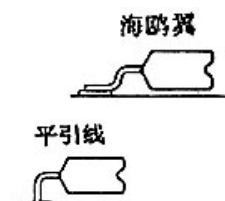
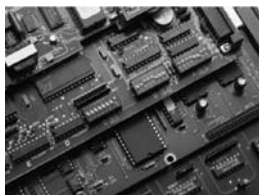
$$\Delta D(\text{leadless}) \propto \left[ \frac{L_d (\alpha \Delta T)}{h} \right]^c$$

模型预测焊点疲劳寿命，确定材料参数c、ε，CTE的Δα、元件大小Ld、焊料高度h的优选值。

### 4.3.2 有引脚表贴焊点疲劳失效

#### ■ 失效模式：

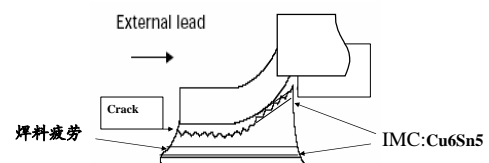
J型、翼型引脚等，温循应力反复作用下，焊点因热疲劳而开裂失效，尤其边缘焊点，电连接断续表现。



### 有引脚表贴疲劳

#### ■ 失效机理

元件基板间CTE失配，焊料反复剪切形变，疲劳开裂。热疲劳典型表现，焊点表面粗糙，焊点裂纹萌生于引脚的跟部、扩展。



## 焊点疲劳寿命预估:

$$N_f = \frac{1}{2} \left[ \frac{\Delta \epsilon_p}{2 \epsilon_f} \right]^{\frac{1}{c}}$$

$$\Delta D(\text{leaded}) \propto \frac{K [L_d \Delta(\alpha \Delta T)]^2}{A h}$$

模型预估焊点疲劳寿命, 优选材料参数 $c$ 、 $\epsilon$ , CTE的 $\Delta \alpha$ 、元件大小 $L_d$ 、焊料高度 $h$ 、焊点面积 $A$ 。

## 控制有引脚焊点疲劳失效的方法

### • 生产方:

疲劳失效控制:  $N_f > N$ , 评估 $\Delta \alpha$ 、元件尺寸 $L_d$ 、焊料高度 $h$ , 根据寿命要求、工艺条件, 优化组合设计参数。

IMC脆性控制: 焊料厚度 $h$ 较薄时, 要考虑IMC的脆性失效控制。

### • 使用方:

有引线焊点疲劳可作为主要潜在机理之一, 可靠性设计评审内容。

## SM电子产品使用环境分类

USE CATEGORY	WORST-CASE USE ENVIRONMENT						ACCELERATED TESTING					
	Tmin °C	Tmax °C	ΔT(1) °C	t <sub>h</sub> hrs	Cycles/year	Typical Years of Service	Tmin °C	Tmax °C	ΔT(2) °C	t <sub>h</sub> min		
1) CONSUMER	0	+60	35	12	365	1-3	+25	+100	75	15		
2) COMPUTERS	+15	+60	20	2	1460	5	+25	+100	75	15		
3) TELECOM	-40	+85	35	12	365	7-20	0	+100	100	15		
4) COMMERCIAL AIRCRAFT	-55	+95	20	12	365	20	0	+100	100	15		
5) INDUSTRIAL & AUTOMOTIVE PASSENGER COMPARTMENT	-55	+95	20 40 80 850	12 12 12 12	185 100 99 20	10	0	+100	100	15		
6) MILITARY GROUND & SHIP	-55	+95	40 850	12 12	100 265	10	0	+100	100	15		
7) SPACE	leo geo	-55 +95	3 to 100	1 12	8760 365	5-30	0	+100	100	15		
8) MILITARY AVIONICS	a b c	-55 +95	40 60 80 820	2 2 2 1	365 365 365 365	10	0	+100	100	15		
9) AUTOMOTIVE UNDER HOOD	-55	+125	60 100 140	1 1 2	1000 300 40	5	0	+100	100	15		

## SMT焊点可靠性设计 关键参数

- 元件尺寸: 元件尺寸越大, 组件焊点疲劳寿命越短。
- 焊点类型: 无引脚焊点受力大, 屈服形变, 寿命短;  
有引脚焊点受力小, 无屈服形变, 寿命长。
- 焊点高度: 焊点高度越高, 内应力越小, 可靠性高。
- 焊点面积: 焊点面积越大, 越能减少焊点应力提高寿命。
- 引线刚度: 引线刚度越低, 焊点疲劳寿命越高。
- CTE失配: CTE-裁剪, 以降低总体热失配。

## 四、电子封装典型失效与可靠性设计

### 4.1 可靠性设计方法

### 4.2 一级封装可靠性设计

### 4.3 二级封装可靠性设计

### 4.4 板级组件振动可靠性设计

## 4.1 可靠性设计基本方法

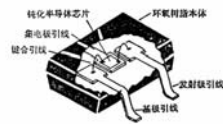
- 定性设计: 凭经验, 采用工艺验证、试验验证。  
优点: 效果明确。缺点: 成本高、周期长。
- 定量设计: 采用可靠性模型预估和量化设计, 针对固有失效控制设计。优点: 固有可靠性明确, 成本低周期短。条件: 必须建立FMEA信息库。

## 4.2 一级封装典型失效与可靠性设计

### 4.2.1 内引线键合失效与可靠性设计

### 4.2.2 功率芯片焊接失效与可靠性设计

BGA: Ball Grid Array



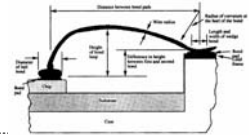
## 4.2.1 内引线键合失效

### 4种主要失效模式

- Au-Al键合退化失效:
- 引线热疲劳损伤
- 内引线共振疲劳
- 引线键合腐蚀

外键合点

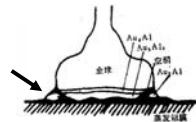
内键合点



## 1) Au-Al键合退化失效与控制

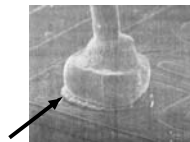
### 失效模式

Au-Al键合点长期工作后, 键合强度降低、变脆、电阻增大、或时好时坏的现象, 最后导致键合点开路或性能退化。



### 失效机理

温度作用下, 生成5种脆性金属间化合物,  $Au_4Al$ ,  $Au_5Al_3$ ,  $Au_3Al$ ,  $Au_2Al$ ,  $AuAl$ , CTE差异、电导率低。



## Au-Al键合退化原因

- IMC温度范围: 50~200℃, 5个不同温度点。
- 评估模型: .

$$h = t^{1/2} D_0 e^{-\frac{E_a}{K_B T}}$$

$h$ 为IMC层厚度,  $t$ 是时间,  $D_0$ 是常数,  $E_a$ 是激活能,  $T$ 温度。

- 失效判据: 键合焊盘金属元素不断扩散生成IMC, 以键合盘金属完全生成IMC作为键合退化失效的判据, 失效时间 $t_f$ , IMC临界厚度 $h_f$ 。

$$t_f = \frac{h_f^2}{D^2}$$

## 常用键合材料的扩散速率参数D和激活能 $E_a$

键合材料	$E_a$ (cal mol <sup>-1</sup> )	IMC临界层厚度 ( $h_c$ )	与扩散相关系数 (D) (cm <sup>2</sup> /sec) $R=1.98719 \text{ cal mol}^{-1}K^{-1}$
Au-Al	15,900	Au键合焊盘: $t_{Au} + 2/5 t_{Al}$ Al键合焊盘: $t_{Al} + 2.5 t_{Au}$	$D = 5.2 \times 10^{-4} e^{-\frac{E_a}{K_B T}}$

$t_{Au}$ : Au盘厚度

$t_{Al}$ : Al盘厚度

## 各种键合材料界面金属间化合物及相对可靠性等级

金属合金系统	相对可靠性比较 A>B>C>D>E>F>G>H>I
Au-Au	A
Al-Al	B
Au-Ag	C
Al-Ni	D
Au-Al	E
Au-Cu	F
Ag-Cu	G
Al-Cu	H
Al-Ag	I

## 控制Au-Al失效的设计方法

### 生产方:

固有失效控制: 为控制IMC生长, 评估键合盘厚度 $t_f$ 的临界值并优选材料, 在厚膜Au浆增加Pd, 降低Au-Al扩散速率; 键合点温度 $T$ 控制。

消除失效设计: 避免Au-Al界面, 过渡片技术, 禁止点胶加固; 外壳键Au改镀Ni, 形成更可靠的Al-Ni键合。

## 工艺控制设计

- 降低Au-Al的速率, 控制电镀添加剂的残留物: 卤族元素(氟、氯、溴、碘、砒)和铈、铅、砷, 会加快键合界面Kirkendall空洞的形成。

键合系统各种杂质及来源

杂质	来源
卤素 (F, Cl, Br, S, At)	等离子刻蚀、环氧除气、硅氧烷腐蚀、光致抗蚀剂剥离、四氯乙烯、聚四乙稀类
Tl, Pb, As, Ni, Fe, Cu, H	电镀
S	封装容器、环境空气、纸板和纸、橡胶带
Na, P, C, Cu, Bi, Cd, Sn, 玻璃	多种来源, 包括: 环境空气

## 控制Au-Al失效的设计方法

### 使用方:

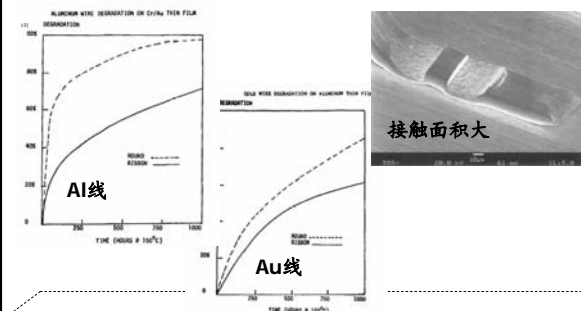
小功率器件: 可采用Au-Al键合。

大功率器件: 避免Au-Al键合。

作为考核产品可靠性设计的主要潜在失效机理之一, 进行设计评审。

## 带、丝Au-Al键合可靠性比较

- Au带、Al带的Au-Al键合更可靠

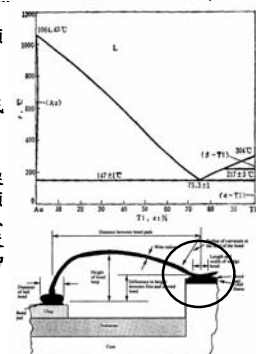


## 2) 内引线热疲劳损伤与控制

- 失效模式: 在温度循环应力作用下, 键合引线容易在引线颈部(与键合点结合部位)出现疲劳损伤或断裂。
- 失效原因: 温循应力使引线反复弯曲和伸展, 导致最薄弱的引线根部疲劳失效, 这种反复的弯曲和伸展是引线封装结构之间CTE的差异造成。引线根部成为疲劳薄弱环节的损伤机理有4个方面:

## 引线颈部疲劳损伤机理

- 引线键合结构设计不合理, 造成引线颈部受力过大;
- 引线颈部键合时受损, 形成颈缩;
- 球焊键合高温使引线发生再结晶, 形成内键合点疲劳薄弱结构;
- 金引线中铈(Tl)元素污染, 引线框架残留镀液沾污, 铈向金引线扩散, 在颈部形成低熔点Au-Tl共晶合金, 熔点147°C, 工作温度接近此温度, 易发生疲劳断裂。Au-Tl共晶合金一般发生在引线键合点处。



### 控制内引线热疲劳的设计方法

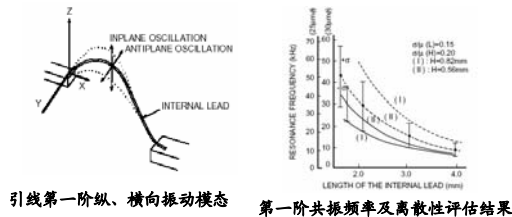
- 生产方：
  - 引线整型高度应该至少是键合点跨度的25%，以减小引线的疲劳损伤；（空封）
  - 选择再结晶温度高的Au引线，键合温度应低于再结晶温度。25  $\mu\text{m}$  的Al-1%Mg引线比Al-1%Si引线疲劳寿命更长。
  - 引线框架镀液Tl元素，等沾污元素的检查。
- 使用方：热疲劳可作为5种典型潜在机理之一，作为可靠性设计评审内容。

### 3) 内引线共振疲劳

- 失效模式：一般的振动应都不足以造成内部键合引线的损伤，但是当产品在超声清洗过程中，当激发的超声频率与内部键合引线的频率相等时，会造成内引线的损伤。
- 失效原因：共振失效的原因是键合内引线的固有频率落在了外部激励频率范围，导致引线发生共振造成机械损伤。

### 原因分析

- 失效机理：Au键合引线在5~20kHz可能共振，Al引线大于10kHz以上可能共振，都已超出了振动考核频率范围（10~2000Hz），但在组件焊剂的超声清洗、维修清洗（15~30kHz），有可能导致内引线共振失效。
- 引线共振频率的检测：模态试验，有限元分析。

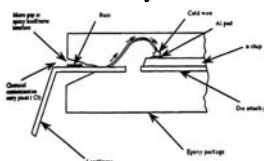


### 避免引线共振的考虑

- 生产方：手工引线键合的高度、跨度要符合规范。键合结构中的角度 $\theta$ 、跨度L、高度H的均值变化都会使固有频率的离散性增大，引发外部激励导致的共振损伤。超声清洗频率控制。建议超声清洗频率控制在20~100kHz。
- 使用方：PCBA维修超声清洗频率控制（对空封器件而言）。

### 4) 引线键合腐蚀

- 失效模式：铝铝键合、金铝键合，一旦潮气渗入至引线键合部位，都会导致键合腐蚀甚至失效。
- 失效原因：潮气溶解了工艺过程沾污物，则形成电解液，卤化物离子、氯和溴化物离子是最常见的沾污物。在潮气中，沾污物将与封装内部的各种金属发生反应，导致腐蚀。（ $\text{AlCl}_3$ ）密封胶材料中Br元素在高温条件下会加速铝的腐蚀，形成溴化铝（ $\text{AlBr}_3$ ）



### 内引线键合腐蚀控制

- 生产方：腐蚀只与湿度RH%和温度T有关，是一种材料腐蚀机理，高可靠产品必须采用气密性封装设计；塑封器件要严格控制塑料界面分层，控制水汽渗入，减少塑料中的Br，降低Al腐蚀速度（ $\text{AlBr}_3$ ）。
- 使用方：采购塑封器件时，批抽样进行声扫检测，GJB1580，塑料/引线框架、塑料/芯片的界面分层检测。

## 要点回顾：内引线键合失效与控制

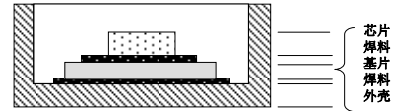
4种主要失效模式

- Au-Al键合退化失效：界面IMC/空洞
- 引线热疲劳损伤：颈部疲劳断裂
- 内引线共振：疲劳损伤
- 引线键合腐蚀：Al丝、Al金属化腐蚀

## 4.2.2 功率芯片焊接失效与可靠性设计

4种主要失效模式

- 缺陷失效：芯片焊接空洞
- 界面金属化合物失效（IMC）：脆性开裂
- 疲劳失效：芯片焊接层疲劳
- 过热失效：结温过高



### 1) 芯片焊接空洞

#### ▪ 影响因素

- 1) 焊接/粘接工艺、焊料选择不当
- 2) 芯片背面金属化处理不当
- 3) 工艺参数控制不良

#### ▪ 4种主要粘接工艺

- 1) 共晶焊接（Au-Si）
- 2) 钎焊（PbSn）
- 3) 有机粘接键合
- 4) 玻璃粘接键合

### 4种粘接工艺的特点

粘接/焊材料	工艺条件	必须达到的效果	工艺设计要求	空洞机理/失效影响	检测方法/判据
共晶焊（AuSi） 98Au2Si (AuSi) 芯片尺寸受限 高稠度使用	370 ~ 400℃	促成硅芯片与焊料产生扩散键合，形成金属键合层	芯片背面镀Au，100~150nm，或带阻焊层的复合键层 Cr-Ni-Au，175℃氮气气氛，防止氮气溶解冻结。	Si通过Au层扩散在表面氧化，导致金属扩散受阻形成空洞。焊接温度高易氧化/硬焊料，导致芯片破裂。	X光透视 声扫 红外热像 /边缘空洞 /热阻计算
钎焊（PbSn） 95Pb5Sn (PbIn) 65Sn/25Ag/10Sb 大尺寸芯片、 大功率芯片用	~200℃	芯片背面镀层与焊料融合	芯片背面复合键 Ti-Ni-Ag，厚层，焊膏。	温度低，不是氧化，空洞少，但可靠性差可引起孔洞。/软焊料，吸收失效应力，但易疲劳。	同上
有机粘接 聚酰亚胺 环氧有机粘接	~150℃	界面粘接	芯片背面镀Au，只能用于非气密性封装。厚度较薄在15~25μm，排气，真空烘烤150℃/16~96hr。	大量的溶剂和粘剂在排气不良形成孔洞。/排气污染。/Ag迁移	同上
玻璃粘接	400℃	界面粘接 温度超过玻璃的熔点	良好散热性无空洞，但需要工艺温度高，粘胶层厚度0.05mm	粘胶硬，芯片易开裂	同上

### 空洞导致的失效模式

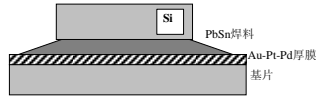
粘接/焊料	软硬类型	导致的失效
共晶焊	硬	结温上升、芯片破裂
钎焊	软	结温上升、焊料疲劳
有机粘接	软	排气腐蚀芯片、Ag迁移短路、
玻璃粘接	硬	导致芯片破裂、排气腐蚀芯片

### 空洞检测方法和标准判据

- 判据：高可靠要求，空洞面积>10%为缺陷 GJB548
- 方法：非破坏性，X光透射（金属粘接）、声学扫描（金属/非金属粘接）、红外热像（功率芯片）。  
破坏性，开封截面观察  
电测法，瞬态热阻、稳态热阻（二极管正向压降、三极管饱和压降）
- 其它标准：MIL1580 塑封器件内部分层检测。  
GJB4027 DPA检验，良品批次性检验。
- 检测的作用：生产方，生产批质量控制；  
使用方，采购批质量控制。

## 2) 芯片焊接界面IMC脆性失效

- 焊接结构：芯片 + PbSn + IMC + 厚膜。
- 失效模式：长期工作后，界面脆性IMC不断生长，电阻增加、强度下降，疲劳寿命缩短，导致焊接层脆性开裂。



## 原因分析

- 机理模型：IMC生长的厚度遵循Arrhenius模型。

$$h = At^n e^{\frac{\Delta H}{RT}}$$

当焊料63Sn-37Pb、厚膜金属76Au-21Pt-3Pd时，t时间指数n = 0.78，激活能 $\Delta H = 106 \text{ kJ/mol}$ ，金属间化合物为：AuSn<sub>4</sub>、PtSn<sub>4</sub>、PdSn<sub>4</sub>，寿命失效通过可靠性设计改进。

## IMC失效控制

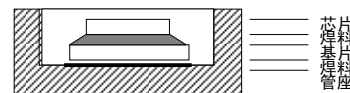
- 机理模型：IMC生长的厚度遵循Arrhenius模型。

生产方：在厚膜导体上焊接芯片，厚膜导体与焊料之间的焊接，应尽量避免Au-PbSn、Ag-PbSn直接焊接，采用多元金属厚膜作为焊盘，如：Au-Pd、Ag-Pd、Au-Pt-Pd，或者在焊盘局部采用多元金属厚膜，通过加速寿命试验，选用失效激活能 $\Delta H$ 更低的厚膜材料。

使用方：采用生产方提供的机理模型参数，评估规定使用温度T条件下的IMC失效寿命t，通过控制使用温度T，实现服役寿命t要求。

## 3) 芯片焊接层疲劳失效

- 焊接结构：芯片 + 焊料 + 基片 + 热沉
- 失效模式：长时间温度/功率循环后，焊料层热疲劳，表现为热阻增加、二次击穿、PN结破裂、SOA减小、粘接强度下降、焊接层剥离或开裂。
- 失效机理：由于芯片与基片或底座间热膨胀系数CTB不同，使焊料产生剪切形变，导致疲劳。



## 芯片焊料失效模式和原因

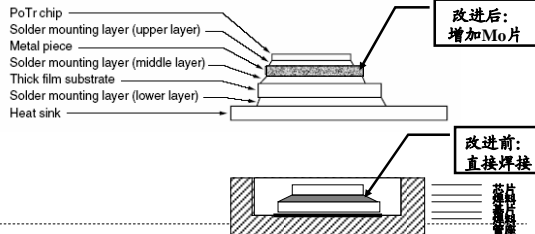
失效模式	对特性的影响	失效机理
焊接层剥离 焊接层开裂	增加热阻 二次击穿 PN结破裂 SOA (安全工作区) 减小 收集极引线损伤	功率晶体管热单元反复开/关工作 ↓ 形成热循环 ↓ 芯片材料和金属层材料反复热胀冷缩 ↓ 焊料层反复形变 ↓ 焊料层剥离

## 疲劳失效的控制方法

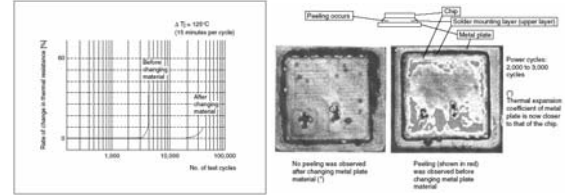
- 生产方：根据Nf模型，在3个方面考虑可靠性设计：减小芯片与基片之间CTB的差异 ( $\alpha_{\text{sub}} - \alpha_{\text{die}}$ )，减小芯片尺寸 ( $L_{\text{die}}$ )，增加焊料高度 $x_{\text{da}}$ 。可选择在Cu底座上加Mo片或在芯片背面采用多层金属化，降低芯片与底座之间的CTB差异。
- 使用方：采用生产方提供的Nf模型参数，验证疲劳失效时间是否大于服役寿命要求，以满足整机要求。

## 某国外公司改进案例

- **减小CTE方法：**在功率芯片与基片之间增加Mo片，有效降低了因热疲劳带来的热阻退化问题。



- **改进效果：**采用声扫检测4000次循环后的改进前后样品，增加Mo片前，样品焊接层由于热疲劳已出现剥离，增加Mo片后，未观察到剥离现象。



功率循环中的热阻变化率

功率芯片焊料层的剥离改进前后对比

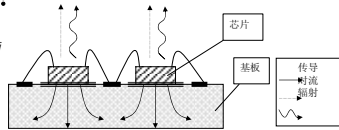
## 芯片结温评估方法

- **散热方式：**传导+对流+辐射，以热传导为主。
- **金属空封热阻模型：**

$$T_{junc} = T_{amb,max} + P_d \sum_{i=1}^3 R_{th,i}$$

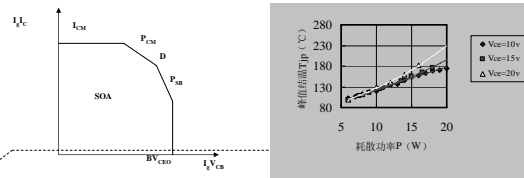
$$R_{th,i} = \frac{1}{2K_i(l_i - w_i)} \left[ \ln \frac{l_i(w_i + 2t_i)}{w_i(l_i + 2t_i)} \right]$$

各种电子材料性能  
参数见附表



## 结温控制方法

- **生产方：**温度裕度设计，控制Tmax，优选热流路径材料；组件选用器件时，关注安全工作区（ICM-PCM-PSB-BVCEO），特别是减功率电压点D。元器件降额法（GJB, 1~3级）。
- **使用方：**采用热阻模型、热检测进行验证，提取结温Tj参数，建立整机系统热阻网络，预计整机系统可靠性。GJB299, GJB/Z27。



## 热设计改进案例1

### 1) 某微波大功率组件

- **改进前：**因将原有的有机复合基板用于大功率组件，导致焊接工艺不良，芯片工作结温剧增，大量失效。
- **改进后：**采用BeO陶瓷基板，改进芯片焊接工艺后，芯片结温正常。

HXQ

## 热设计改进案例2

### 2) 某微波大功率组件

- **某电源厚膜电路，**为满足高频、大容量输入端电容，高温（125℃）高频（100kHz）使用要求，选用片钽电容器、独石电容器，进行组装后热设计优选。
- **改进前：**采用片钽电容器，容量大但高频损耗大，过温。
- **改进后：**采用独石电热器，容量小但高频损耗小，并联解决容量。温度明显改善。

HXQ



## 要点回顾：芯片焊接失效控制

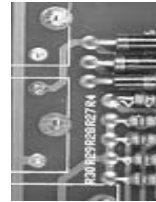
缺陷失效：1种，寿命失效：3种

- 缺陷失效：芯片焊接空洞
- 界面金属化合物失效（IMC）：脆性开裂
- 疲劳失效：芯片焊接层疲劳
- 过热失效：结温过高

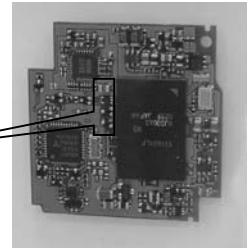
## 4.4 板级组件谐振失效与可靠性设计

### 4.4.1 板级组件共振失效与控制

### 4.4.2 元器件共振失效与控制



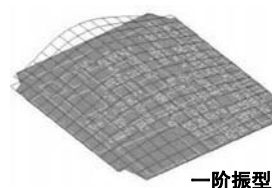
HXQ



## 4.4.1 板级组件谐振失效与控制

### ▪ 失效模式

外界激励频率接近PCB板的固有频率，板组件会发生共振，造成组件中元器件焊点和元器件损伤。



一阶振型

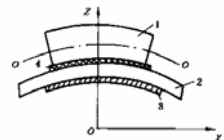
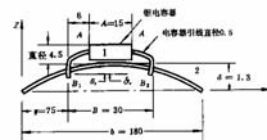
HXQ

### ▪ 失效机理

任何材料结构的固有频率：

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

PCB板是一种具有一定韧性的基片材料，因而，其固有频率相对较低，引起板上元器件的焊点承受共振带来的额外应力。



## 四、电子封装典型失效与可靠性设计

### 4.1 可靠性设计方法

### 4.2 一级封装可靠性设计

### 4.3 二级封装可靠性设计

### 4.4 板级组件振动可靠性设计

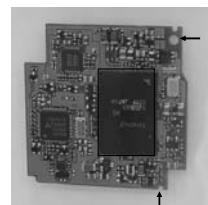
### 4.5 FMEA技术的应用

### ▪ 影响因素

板级组件的固有频率与板本身的安装边界条件有极大的关系，以及元器件的大小密切相关，也就是说，电路板的边界约束条件和组件的结构设计参数的变化，会完全改变组件的固有频率和振动模式。

实质上，边界安装条件改变刚性 $k$ ，元器件大小及密度改变质量 $m$ ，使固有频率 $f$ 变化。

$$f_n \propto \sqrt{\frac{k}{m}}$$



## PCB板组件共振评价

### • 标准

SJ20137-92《印制板组件抗振动冲击技术要求和测试方法》给出的估算方法，近似求解电路板的基频。基频模型如下：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\alpha^2}{a^2} \sqrt{\frac{D}{\rho h}} \quad D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

## 边界条件约束条件

### • 标准

在电子整机中，电路板与机架支撑结构的连接方式主要有：螺栓连接（固定支撑）；插座、带有波状弹簧板边导轨、槽型导轨连接（简单支撑）；某一边（或两边）无支撑（自由）。

如SCFS表示：下方边长a为简支、上方边长a为自由、右侧边长b为固支、左侧边长b为简支；

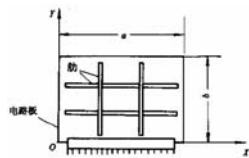
## 避免共振的设计方法

### ▪ 提高刚性：

减小基板的几何尺寸（a×b）；当基板尺寸较大时，可以用加强筋。

增加基板的厚度h，提高刚度因子D。

电路板与板边导轨之间，尽量采用螺钉连接（固支）。

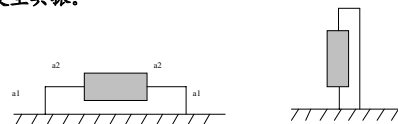


## 4.4.2 双端元器件

### ■ 失效模式

双端元器件共振疲劳失效，出现在定频振动疲劳试验中，失效表现在外部、内部。（50~2000Hz）

关键在于双引线长度的控制和安装的约束条件，若恰好使元器件的固有频率落在激励信号频率范围，则发生共振。



## 双端元器件固有频率评估

### ▪ 固有频率（基频）：

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{192EJg}{mL^3}} (Hz)$$

式中：E为弹性模量（dyn/cm<sup>2</sup>或kg/cm<sup>2</sup>，可查机械手册）；L为元器件的引线长度（cm）；J为弯曲惯性矩（对于圆为 $D\pi^4/64$ ，D为引线直径mm）；m为元器件的质量（g）；g为重力加速度（g=980cm/s<sup>2</sup>）。

## 共振控制方法

### ▪ 避开激励频率选择元器件。

### ▪ 安装方式：

