

## 元器件可靠性与质量保证

### Chapter 1: 电子元件可靠性概述

- 1.1 电子元件可靠性的基本概念
- 1.2 电子元件标准体系和质量等级

### Chapter 2: 电子元件的分类

- 2.1 分类标准
- 2.2 分类方法
- 2.3 各类常用电子器件功能简介
  - 2.3.1 电阻器
  - 2.3.2 电容器
  - 2.3.3 敏感元件和传感器
  - 2.3.4 开关
  - 2.3.5 电连接器
  - 2.3.6 电感器
  - 2.3.7 变压器
  - 2.3.8 继电器
  - 2.3.9 二极管
  - 2.3.10 晶体管
  - 2.3.11 闸流晶体管
  - 2.3.12 微电路
  - 2.3.13 光电子器件

### Chapter 3: 电子元件制造技术

- 3.1 半导体集成电路制造技术
- 3.2 混合集成电路制造技术

### Chapter 4: 微电子器件的封装技术

- 4.1 微电子封装概述
- 4.2 微电子封装工艺
- 4.3 封装的分类及其特点
- 4.4 先进封装技术

### Chapter 5: 电子元件可靠性试验技术

- 5.1 电子元件可靠性试验概述
- 5.2 电子元件可靠性基础试验
- 5.3 电子元件寿命试验
- 5.4 电子元件鉴定试验

### Chapter 6: 电子元件使用可靠性保证

- 6.1 军用电子元件的使用质量管理流程
- 6.2 元件选择控制要求
- 6.3 电子元件应用验证

### Chapter 7: 元件降额设计

- 7.1 概述
- 7.2 降额设计的过程
- 7.3 降额设计的基本原则
- 7.4 元件结温的计算

### Chapter 8: 热设计

- 8.1 热设计的目的与作用
- 8.2 温度对元件可靠性的影响
- 8.3 热设计理论基础
- 8.4 元件热设计的主要方法
- 8.5 热分析

### Chapter 9: 静电放电损伤及防护

- 9.1 静电的产生

9.2 静电源
9.3 静电放电（ESD）模型
9.4 半导体器件对静电放电的敏感度
9.5 静电放电损伤的特点、失效模式和失效机理
9.6 静电防护
Chapter 10: 电子元器件筛选
10.1 筛选的定义与目的
10.2 元器件筛选的特点
10.3 筛选试验分类及介绍
10.4 筛选方案设计
10.5 筛选效果的评价
10.6 特殊使用条件下进行的筛选
Chapter 11: 电子元器件破坏性物理分析
11.1 破坏性物理分析的定义与目的
11.2 破坏性物理分析工作的适用范围和时机
11.3 破坏性物理分析的工作方法和程序
11.4 破坏性物理分析的结论与不合格品的处理
11.5 假冒伪劣元器件的识别
Chapter 12: 电子元器件失效分析技术
12.1 基本概念
12.2 工作内容及流程
12.3 失效模式及失效机理
附录

# 元器件可靠性与质量保证

---

## Chapter 1：电子元器件可靠性概述

---

### 1.1 电子元器件可靠性的基本概念

半导体分立器件：二极管、晶体管、闸流晶体管

元器件可分为电子元器件和机械零部件，前者又分为军用电子元器件和民用电子元器件

【电子元器件】：

- 
- 元器件：电子电路、系统的基础部件，是能够完成预定功能且不能再分割的基本单元
  - 电子元器件：根据GJB 8118-2013 《军用电子元器件分类与代码》，定义为：在电子线路或电子设备中执行电气、电子、电磁、机电和光电功能的基本单元
  - 军用电子元器件：用于武器装备中的电子元器件

【电子元器件分类及代码】

---

XXXX XX XX XX XX

- 一共分为五层
- 第一层为四位数，与GJB 7000-2010中的代码保持一致

- 其余每层均为两位数

【电子元器件可靠性】

电子元器件可靠性=固有可靠性+使用可靠性

- 固有可靠性是针对构成电子元器件的原材料性能及制成后在运行中所受应力情况，在**设计阶段**所赋予，在**制造过程**加以保证得到的；是**设计赋予、制造保证**的
- 使用可靠性是指电子元器件在实际使用中表现出的可靠性。包括电子元器件使用单位合理选用电子元器件、正确使用电子元器件等方面。

【电子元器件可靠性的影响因素】：

- **设计过程**
- **制造过程**：制造过程工艺因素、人员因素、机器因素、材料因素、技术与方法、环境因素
- **检验过程**：目的为发现早期失效，主要设计入厂检验、测试、筛选、DPA
- **使用过程**：合理选用，正确使用

1.2 电子元器件标准体系和质量等级

【电子元器件相关标准】：

按标准**级别**分类：

- 国家标准：国家标准（GB）、国家军用标准（GJB）
- 行业级标准
- 企业级标准

按标准**类型**分类

- 规范

包括元器件的**总规范**和**详细规范**，统称产品规范。元器件的总规范对某一类元器件的质量控制规定了共性的要求；详细规范是对某一类元器件中的一个或一系列型号规定的具体性能和质量控制要求。

总规范：

国军标/国标编号	国军标/国标名称
GJB 33A-1997	半导体分立器件总规范
GJB 597A-1996	半导体集成电路总规范
GJB 2438B-2017	混合集成电路通用规范
GJB 63B-2001	有可靠性指标的固体电解质钽电容总规范
GJB 65B-1999	有可靠性指标的电磁继电器总规范

国军标/国标编号	国军标/国标名称
GB/T 4589.1-2006	半导体器件、分立器件和集成电路总规范
GB/T 8976-1996	膜集成电路和混合膜集成电路总规范

详细规范：

国军标/国标编号	国军标/国标名称
GJB 33A/12-2003	半导体分立器件 2CK36 型硅大电流开关二极管详细规范
GJB 9147-2017	半导体集成电路运算放大器测试方法
GJB 2438/1-2001	混合集成电路 HB系列DC/DC变换器详细规范
GJB 63A/1A-1991	有可靠性指标的JCAK型固体电解质钽电容器详细规范
GJB 65/26-2017	JRW-130M型有失效率等级的微型电磁继电器详细规范

- 标准

涉及可靠性试验方法、测量检验规范、失效分析方法和生 产线认证标准等

- **指导性技术文件（标红）**

如指导正确选择和使用元器件的指南、用于电子设备可靠 性预计的手册等

标编号	国军标/国标名称
GJB/Z 299C	电子设备可靠性预计手册
GJB/Z 35	元器件降额准则
GJB/Z27	电子设备可靠性热设计手册

【电子元器件质量等级】：

- 元器件的可靠性一般由**失效率或质量等级**来表征（**主要是质量等级**）
- **元器件的质量**是指元器件在设计、制造、筛选过程中形成的品质特征，可通过质量认证试验确定。**元器件的质量等级**则是指元器件装机使用前，按产品执行标准或供需双方的技术协议，在制造、检验及筛选过程中质量的控制等级，用于表示元器件的**固有可靠性**（引自GJB 299C）。**具有相同物理结构、功能和技术指标的元器件可能具有不同的质量等级**
- **不同标准体系中规定的质量等级不同**
- 在元器件预计标准体系中，GJB 299C-2006《电子设备可靠性预 计手册》（参考美军标MIL-HDBK-217F）和GJB/Z 108A《电子设备非工作状态可靠性预计手册》所规定的质量等级用**质量系数（ $\pi Q$ ）**表 征，反映了同类元器件不同质量等级的相对质量差异。

## Chapter 2：电子元器件的分类

## 2.1 分类标准

GJB 8118-2013 《军用电子元器件分类与代码》

## 2.2 分类方法

XXXX XX XX XX XX

## 2.3 各类常用电子器件功能简介

### 2.3.1 电阻器

【定义】：

电阻器简称电阻，在电路中起限流、分压、负载、阻抗匹配等作用，也可与电容配合构成滤波器。电阻是最普通、最廉价的电路元件，自身可靠性相对较高

【分类】：

- 阻值可调：
  - 固定电阻器
  - 电位器
- 封装形式：
  - 插装电阻
  - 表贴电阻
- 电阻材料
  - 金属膜电阻；玻璃釉电阻器
  - 碳膜电阻器；

【特殊电阻器】

- 
- 包括熔断电阻器和敏感电阻器
    - 熔断电阻器又称为**保险丝电阻器**，超过其额定功率，可以熔断，使电路开路，从而保护贵重元件，防止故障扩大
    - 敏感电阻器也称为**半导体电阻器**。常见的有热敏、光敏、磁敏、气敏、力敏等电阻器。

### 2.3.2 电容器

【贴片式电容器结构】：陶瓷介质、陶瓷外壳、金属内电极、金属外电极

【分类】

- 
- 按电容材料：
    - 纸介、薄膜、瓷介、云母、玻璃釉和电解质电容器等
  - 按结构容量：
    - 固定电容器

- 有机介质（如涤纶、聚碳酸酯等）
  - 无机介质（如云母、瓷介等）
  - 电解介质（如铝、钽、氧化铌、真空等）
  - 瓷介质
- 可变电容器
  - 电容网络
  - 其他电容器

### 2.3.3 敏感元器件和传感器

【敏感电阻器】：热敏电阻、压敏电阻、光敏电阻

### 2.3.4 开关

【定义】

开关是一种在电路中起接通、断开、转换和连接等作用的元件，可将电力信号从一个电路转移到另一个电路

【分类】

- 按工作范围：
  - 电流电路转换器开关
  - 电源电路转换开关
- 按结构操作形式：
  - 按钮开关
  - 扭子开关
  - 旋转开关
  - 微动开关

### 2.3.5 电连接器

【定义】

**电连接器是将一个电路或传输单元的导线与另一个电路或传输单元的导线相连接的元件。**在各类电子系统中，电连接器在器件与器件、组件与组件、系统与系统之间进行电气连接和信号传递，是构成一个完整系统所必须的基础元件

【分类】

- 射频连接器
- 低频连接器
  - 圆形电连接器
  - 矩形电连接器
  - 印制电路板电连接器
- 组合连接器
- 特种连接器等

### 2.3.6 电感器

#### 【定义】

电感器(电感线圈)是用绝缘导线绕制成的电磁感应元件。电感器根据线圈的自感作用原理工作，其主要作用是对交流信号进行隔离，或与电容器、电阻器组成谐振电路或滤波电路

#### 【分类】

- 按磁芯类型：空芯、磁芯、铁芯、铜芯
- 按容量：固定、可调、微调
- 按安装方式：立式、卧式、贴片

### 2.3.7 变压器

#### 【定义】

变压器是一种传递电能的静止电器，它能把某一电压或电流的交流电转换成同频率的另一电压或电流的交流电。在电子线路中，变压器经常被用来作为阻抗变换或隔离元件

#### 【分类】

- 按相数：三相变压器、单相变压器
- 按铁芯形状：有芯式变压器（绕组包围铁心柱）、壳式变压器（铁心包围绕组）

### 2.3.8 继电器

#### 【定义】

继电器是利用电磁原理、机电原理使接点闭合或断开来驱动或控制相关电路的

#### 【分类】

- 电磁继电器（机电元件）、固体继电器、真空继电器、簧管式继电器

### 2.3.9 二极管

#### 【定义】

半导体二极管使用半导体单晶材料制成的，具有两个电极的器件。几乎所有的电子电路中，都要用到半导体二极管，应用也非常广泛，包括整流、稳压、限幅、检波、温度补偿、电子开关等

#### 【分类】

- 按材料：锗二极管、硅二极管、砷化镓二极管、磷化镓二极管
- 按封装形式：塑料封装、玻璃封装、金属封装
- 用途功能：稳压二极管、整流极管、开关二极管、变容二极管、检波二极管、阻尼二极管、雪崩二极管、微波二极管

### 2.3.10 晶体管

#### 【分类】

- 按照材料：锗管、硅管、砷化镓晶体管
- 按照极性：NPN型和PNP型
- 按照用途和功能：开关晶体管、达林顿管、高反压功率管、微波功率管等
- 按照封装材料形式：塑料封装、玻璃封装、金属封装、陶瓷封装

### 2.3.11 闸流晶体管

【定义】：闸流晶体管简称为晶闸管，又可称做可控硅整流器，以前被简称为可控硅

【分类】：普通、双向、逆导和门极关断晶闸管等种类

### 2.3.12 微电路

#### 【定义】

微电路（也称集成电路）是采用半导体工艺，在一块较小的单晶硅片上制作出许多晶体管及电阻器、电容器等元器件，并按照多层布线或隧道布线的方法将元器件组合成完整的电子电路。

#### 【分类】

- 按器件类型：双极型（BJT）集成电路、单极型（MOS）集成电路、Bi-CMOS型集成电路
- 按制造工艺：半导体集成电路、厚薄膜混合集成电路；
- 按规模：小规模集成电路；中规模集成电路；大规模集成电路；超大规模集成电路；特大规模集成电路
- 按用途：接口电路；电源电路；射频电路；专用电路；霍尔电路；存储器；微处理器；微波集成电路
- 按处理信号：模拟集成电路；数字集成电路；数模混合集成电路

### 2.3.13 光电子器件

#### 【定义】

- **光敏二极管**又称光电二极管，是通过它把光信号转换成电信号，用于对光信号的探测
- **发光二极管**
- **光电耦合器**是以光为媒介，用来传输电信号的器件

## Chapter 3：电子元器件制造技术

---

### 3.1 半导体集成电路制造技术

#### 【基本工艺流程】

- 基础：圆形的硅片；最后再经过封装测试成为成品
- 前工艺:氧化、掺杂、薄膜淀积、光刻、蚀刻等步骤的单独或组合重复制作器件，再通过**电极制备、多层布线**实现各器件间的互连



- 后工艺:封装、测试

【硅片制备】

- 多晶硅生产、单晶生长、硅圆片制造
- 直拉法生长单晶
  - 抽真空：多晶硅装入炉内石英坩埚中，抽真空
  - 旋转加热：籽晶杆绕轴旋转，坩埚反方向旋转，加热熔化多晶硅料
  - 生成单晶：将籽晶下降与多晶硅接触，多晶硅结晶，随籽晶上升而生长成棒状单晶
- 硅片切割磨片
  1. 单晶生长
  2. 单晶切割分段--滚磨 外圆-定位面研磨
  3. 切片-清洗
  4. 磨片-清洗
  5. 抛光-清洗
  6. 最终晶片

【氧化】：在硅基表面上生长一层氧化层是硅基集成电路制造技术的一个重要的步骤

- 二氧化硅特性
  - 化学稳定性高
  - 绝缘
  - 对某些杂质能起到掩蔽作用
- 氧化层的作用
  - 器件的保护层、钝化层
  - 电性能隔离
  - 绝缘介质层和电容器的介质
- 生长方法
  - 热氧化法
  - 等离子氧化法
  - 热分解沉积法
  - 溅射法
  - 真空蒸镀法

【氧化】

- 热氧化法
  - 干氧化：以干燥纯净的氧气作为氧化气氛
  - 水汽氧化：以高纯水蒸汽为氧化气氛，氧化速率较高
  - 湿氧化法：干氧化和水汽氧化的混合
- 实际生产应用：干氧化 ->湿氧化->干氧化

- 优点：避免干氧化慢、避免湿氧化表面易在光刻时会产生浮胶

### 【图形转移】

将集成电路的单元构件图形转移到圆片上的工艺，包括光刻和刻蚀

常规的光刻工艺过程：清洗烘干-旋转涂胶-前烘-曝光-显影-坚膜-腐蚀(刻蚀)-去胶

### 【掺杂】

- 掺杂：在硅中加入少量特定杂质，改变其结构与电导率，形成N型与P型的半导体区域
- 主要技术手段
  - 高温热扩散法：集成度增加，无法精确控制杂质分布形式和浓度
  - 离子注入：掺杂浓度控制精确、位置准确

### 【薄膜沉积】

- 物理气相沉积(PVD)：物理气相沉积是指在真空条件下，采用物理方法将材料源表面气化成气态原子、分子或部分电离成离子，并通过低压气体或等离子体过程，在基片或衬底表面沉积具有某种特殊功能薄膜的技术。
  - 物理气相沉积技术：真空蒸镀、溅射镀膜、离子镀、分子束外延、脉冲激光沉积
- 化学气相沉积(CVD)：化学气相沉积技术是指利用含有薄膜元素的一种或几种气相化合物或单质，在衬底表面上进行化学反应生成薄膜的技术
  - 化学气相沉积技术：金属有机化合物化学气相沉积、等离子化学气相沉积、激光化学气相沉积、超声波化学气相沉积

### 【键合、封装】

集成电路的键合、封装过程，包括**芯片的粘接、键合互连和器件封装**三部分

- 对已经制作完成的晶圆片进行减薄和划片，分割成许多独立完整的单个芯片
- 将芯片装配到管壳底座或引线框架上，在芯片键合区与外引线端或外引线框架间键合内引线
- 封装是采用塑料、金属或陶瓷的封装形式把芯片包封起来，从而得到有效的机械、绝缘等方面的保护

### 【成品检测】

为确保芯片功能，上述工艺完成后要对每一个被封装的集成电路进行检测，以满足制造商的电学和环境的特性参数要求。集成电路成品检测合格后才能出货

### 【双极型晶体管制作工艺】

1. 一次氧化
2. 光刻基区
3. 基区硼扩散、氧化
4. 光刻发射区
5. 发射区磷扩散、氧化
6. 光刻引线孔
7. 蒸镀铝膜
8. 刻蚀铝电极

#### 【双极型集成电路反相器工艺】

- 经过5次氧化
- 对二氧化硅薄层进行5次光刻，刻蚀出供扩散掺杂用的图形窗口
- 最后还经过两次光刻，刻蚀出金属铝互连布线和钝化后用于压焊点的窗口。

## 3.2 混合集成电路制造技术

#### 【集成电路的结构类型】

- 单片集成电路(IC)：指电路中所有元器件都制作在同一块半导体基片上的集成电路
- 混合集成电路(HIC)：指将多个半导体集成电路芯片或半导体集成电路芯片与各种分立元器件通过一定的工艺进行二次集成，构成一个完整的、更复杂的功能器件，该功能器件最后被封装在一个管壳中，作为一个整体使用

#### 【混合集成电路工艺】

- 混合集成电路 PK 印刷电路板
  - 混合集成电路可比等效的印刷电路板体积小4~6 倍、重量轻10倍
  - 散热
    - 混合电路中，大功率器件可以直接装在导热好的陶瓷基片上
    - 印刷电路板上要将元器件贴到电路板上，且用粘结剂粘上很重的散热板或使用金属芯的电路板
- 混合集成电路 PK 半导体集成电路
  - 混合电路设计容易，成本更低，投产快，适合中小批量产品的生产

#### 【厚膜混合集成电路】

- 膜厚一般在**几微米至几十微米**
- 一般采用**丝网印刷工艺**，是一种非真空成膜技术
- 设计更为灵活、工艺简便、成本低廉
- 常用在高压、大电流、大功率耐高温混合集成电路以及较低频段的微波集成电路方面

#### 【薄膜混合集成电路】

- 薄膜的膜厚大多小于**1微米**
- 薄膜电路采用的是真空蒸发、磁控溅射等工艺方法，是一种真空成膜技术
- 常用在高精度、高稳定性低噪声电路以及微波集成电路，抗辐射电路方面

#### 【混合集成电路失效问题】

混合集成电路主要失效：主要包括器件失效、互连失效、基片失效、封装失效和沾污失效。

## Chapter 4：微电子器件的封装技术

---

## 4.1 微电子封装概述

【封装的作用】：

- 电源与信号的分配：使芯片与电路流通电流
- 散热通道：硅芯片面积小，但发热量大，封装可增大芯片的表面积
- 机械支撑：固定芯片，连接引线
- 环境保护：隔绝灰尘和空气中的腐蚀性物质 防止芯片上细小的电路被划断

【封装材料】：

- 金属
  - 采用金属作为壳体或底座，芯片安装在外壳或底座上；
  - 散热能力和电磁场屏蔽性良好
  - 常用于高可靠要求和定制的专用气密封
- 陶瓷
  - 价格低于金属封装
  - 采用多层布线，具有的布线密度很高
  - 导热率高，适合于散热能力强的器件
  - 航空航天、军事及许多大型计算机方面有广泛应用
- 塑料
  - 重量轻、尺寸小，重量约为陶瓷封装的1/2，适合于薄型封装
  - 成本低，约为陶瓷封装的55%
  - 存在一些可靠性的问题，需要干燥包装、增加防静电包装

## 4.2 微电子封装工艺

【微电子封装工艺】

微电子的封装属于半导体制造中的后工艺，一般包括：晶片减薄和划片、芯片贴装、引线键合或互连、封装、打标、检查测试等多道工序

【典型微电子封装工艺流程】

1. 晶片减薄和划片
2. 芯片贴装
3. 引线键合
4. 塑封成型
5. 打标
6. 晶片切筋打弯

【芯片互连技术】

- 引线键合 (WB)
  - 热压键合

- 超声键合
- 超声球键合
- 载带自动焊 (TAB)
- 倒装焊 (FCB)

芯片互连技术是实现**芯片与芯片、芯片与基板、器件与系统**等之间的互连，实现信号的传递和分配的技术

## 4.3 封装的分类及其特点

### 【插装型封装】

- T0封装、金属封装、塑料封装
- 单列直插式封装SIP
- 双列直插式封装DIP
- Z型引脚直插式封装ZIP
- 针栅阵列式封装PGA

### 【表面安装型封装】

- 小外形晶体管封装(SOT-Small outline Transistor)
- 小外形IC封装 (SOP-Small Outline Package)
- 四边引线扁平封装 (QFP- Quad Flat Package)
  - 按照材料可分为PQFP和CQFP；CQFP气密性好和价格较高，主要用于可靠性要求较高的电子设备中
- 有引脚片式载体封装 (LCC- Lead Chip Carrier)——CLCC、PLCC
- 球栅阵列封装 (BGA-Ball Grid Array Package)：基板下面按阵列方式引出球形引脚的方式
  - 按照基板的种类分为：塑封PBGA、陶瓷封装CBGA
- 芯片尺寸封装 (CSP-Chip Scale Package)

### 【多芯片组件 (MCM) 】

多芯片组件 (MCM) 把多个**高集成度、高性能、高可靠性的**芯片，在**高密度多层互 联基板**上用SMT技术组成多种多样的电子模块系统

## 4.4 先进封装技术

### 【晶圆级封装】

晶圆级封装是对整片晶圆进行封装测试后再切割得到单个成品 芯片的技术，封装后芯片尺寸可以做到与裸片一致

晶圆级封装主要分为扇入 (Fan-in) 和扇出 (Fan-out) 两种形式

- 扇入型封装：先封装后切割，裸片封装后与裸片本身的尺寸相同
- 扇出型封装：通过重布线层 (RDL) 技术将芯片I/O端口扇出、增加I/O端口数量，进行重新排布

晶圆级封装的关键技术即**重布线层技术 (Redistribution Layer, RDL)**和**凸焊点制作技术**

### 【3D封装】

- 三维（3D）封装技术又称立体封装技术，在3D封装中，多个芯片垂直或水平（x轴，y轴）地叠层在一起，这样可以在第三个方向（z轴）上进行电互连。
- 优点：封装密度高、减小了各个芯片之间互连线的长度，从而提高了器件的运行速度
- 3D封装三个主要的类别：叠层芯片、叠层封装以及折叠封装

### 【系统级封装】

系统级封装SiP，即通过将多个不同的工艺和功能芯片和元件封装在单一封装体，在一块多功能电路 基板上可集成微波电路、低频控制电路、数字电路和电源等的子系统来实现整机系统的功能

优点：系统级封装SiP为整机系统的功能多样化和小型化提供 多种可能的实现。

### 【微组装技术】

微组装技术（MPT）综合应用了高密度互连基板技术、多芯片组件技术、系统/子系统组装技术、3D 组装技术等关键工艺技术，把构成电子电路的各种微型元器件（集成电路芯片和片式元器件）组装 起来，形成3D结构的高密度、高性能、高可靠、微小型和模块化电路产品的先进电子装联技术

### 【先进封装技术的发展】

更高的速度、集成度、可靠性以及更低的成本是集成电路封装追求目标，引线键合技术已 证明了其具有低成本和高可靠等优势，但远远不能满足需求。现代封装的目标是通过增加芯 片密度来减少内部互连数

## Chapter 5：电子元器件可靠性试验技术

---

### 5.1 电子元器件可靠性试验概述

#### 【电子元器件可靠性试验的定义】

元器件可靠性试验是指对受试样品施加一定的应力，在这些应力作用下，使受试样品反映出性能的变化，从而来判断元器件是否失效的试验。简要地说，为评价分析元器件的可靠性而进行的试验。

元器件可靠性试验是评价元器件可靠性的重要手段：

- 测试：是判定其性能参数是否符合元器件的技术指标
- 试验：温度、机械、气候等环境应力
- 分析：结构、物理、化学等工艺质量分析
- 评价：通过数理统计方法进行定量分析，评估元器件可靠性

#### 【电子元器件可靠性试验阶段】

- 研制阶段：暴露元器件在设计、材料、工艺阶段存在的薄弱环节，对设计者、生产者提供改进建议
- 设计定型阶段：考核并确定元器件是否已达到预定的质量水平和可靠性指标
- 生产阶段：生产工艺、过程、质量一致性等是否稳定可控进行评价，出厂前剔除不合格品
- 使用阶段：装机前剔除质量或可靠性缺陷的产品，分析不同的工作、环境条件下的失效规律，失效模式，失效机理等

#### 【元器件可靠性试验的分类】

- 按工作方式分类：现场试验、模拟试验

- 按试验的性质分类：破坏性试验、非破坏性试验
- 按试验目的分类：可靠性鉴定试验、寿命试验、筛选试验、耐久性试验、可靠性增长试验等
- 一般习惯将元器件可靠性试验按着试验项目分为四类：环境试验、寿命试验、特殊检测试验和现场使用试验

## 5.2 电子元器件可靠性基础试验

### 【电子元器件可靠性基础试验的定义】

元器件可靠性试验是为完成特定的目的而进行，它由一系列通用的基本试验单元——可靠性基础试验组成的，我们把组成各种可靠性试验的最基本的试验叫做可靠性基础试验

### 【可靠性基础试验分类】

一般通用的可靠性基础试验可分为电+热应力试验、环境应力试验、物理试验、空间环境试验等。

## 5.3 电子元器件寿命试验

### 【电子元器件可靠性寿命试验定义】

寿命试验是为评价分析元器件产品寿命特征值而进行的试验，是元器件可靠性试验的一个重要内容

### 【电子元器件寿命试验内涵】

它是在实验室里模拟元器件实际工作状态或贮存状态，投入一定数量的样品进行试验，记录样品数量、试验条件、失效个数、失效时间等，试验结束后进行统计分析，从而评估元器件的寿命特征、失效规律，计算元器件的失效率和平均寿命等可靠性特征量

特点：试验样品多、试验时间长

### 【元器件寿命试验分类】

- 按试验结束的方式来分类，则可分为定时截尾(试验达到规定试验时间就停止)试验和定数截尾(试验达到规定的失效数就停止)试验
- 按试验时间长短来分类，可分为长期寿命试验和加速寿命试验
- 长期寿命试验又可分为长期贮存寿命试验和长期工作寿命试验
  - 长期贮存寿命试验：是指模拟元器件在规定环境条件下处于非工作状态时，评价其存放寿命的试验。由于贮存试验是处于非工作状态，一般失效率较低，寿命较长，需要抽出较多的样品进行较长的时间来做试验，周期长达3-5年或更长
  - 长期工作寿命试验：是指模拟元器件在规定环境应力条件下，加上负荷使之处于工作状态时，评价其工作寿命的试验，试验周期在1000小时以上的称为长期工作寿命试验

### 【元器件可靠性寿命试验方案设计】

寿命试验一般包括**试验设计（准备）、试验实施和试验后数据处理**3个部分。

其中试验设计一般包括：1) 样品的数量确定 2) 确定试验类型（定时、定数结尾等） 3) 确定试验应力（温度、振动、电应力）和试验设备 4) 试验截止时间和测试周期 5) 参数测试方法和失效判据 6) 试验后数据处理方法

### 【元器件加速寿命试验】

加速寿命试验是指在不改变受试样品的失效机理的前提下，采用加大应力的方法促使样品在短期内失效，预测其在正常工作条件或贮存条件下可靠性的试验

## 5.4 电子元器件鉴定试验

### 【电子元器件鉴定试验定义】

可靠性鉴定试验是为验证元器件设计是否达到规定的可靠性要求，按选定的抽样方案，抽取产品在规定的条件下进行的试验

### 【电子元器件鉴定试验目的】

有可靠性指标要求的新研或改进元器件，特别是任务关键或新技术含量较高的元器件，应进行可靠性鉴定试验，确定厂家是否有能力成批生产符合规范要求的专用元器件，验证产品的设计是否达到规定的可靠性要求水平

### 【鉴定试验与其他试验的区别】

鉴定试验侧重验证元器件产品是否达到质量和可靠性等级要求，不同于筛选试验主要侧重于暴露并剔除引起早期失效的不良品，也不同于增长试验侧重于暴露产品缺陷并采取纠正措施提高产品质量和可靠性。只有通过鉴定试验的产品才能装机使用

### 【电子元器件鉴定试验方法】

元器件鉴定试验方法根据元器件的不同类型，一般按照相应的军用标准以及每个产品详细规范来进行：

- GJB597B-2012 半导体集成电路通用规范
- GJB33A-1997 半导体分立器件总规范
- 各类电气元件产品总规范 如：GJB733A-1996有可靠性指标的非固体电解质钽固定电容器总规范

### 【电子元器件鉴定试验程序】

1) 鉴定检验批组成 2) 鉴定试验样品抽取 3) 确定测试、试验项目及条件（鉴定检测大纲） 4) 失效判据 5) 允许失效数量 6) 试验实施，原始数据和记录 7) 出具鉴定检测报告 8) 失效报告与纠正措施

## Chapter 6：电子元器件使用可靠性保证

---

### 6.1 军用电子元器件的使用质量管理流程

#### 【军用电子元器件的使用质量管理流程】

使用全过程：选择、采购、监制、验收、二次筛选、DPA、失效分析、保管贮存、超期复验、发放、装联和调试、使用设计、静电防护、评审

#### 【主要工作项目】

- 元器件的选择管理
- 元器件的采购管理
- 监制、验收管理
- 二次筛选管理
- 破坏性物理分析管理
- 失效分析管理



- 使用质量管理
- 元器件的储存管理
- 元器件的评审管理

#### 【元器件选择原则】

除了考虑功能、性能要求外，还应考虑装备的可靠性要求：

- 元器件的技术标准（包括技术性能指标、质量等级等）应满足装备的要求
- 首先从该型号的“元器件优选目录”中选择
- 优先选用国产元器件
- 选择经实践证明质量稳定、可靠性高有发展前途的标准元器件，不允许选择淘汰品种的元器件
- 选择设备适用的元器件质量等级，并应满足设备可靠性指标要求和规定的元器件选择最低质量等级要求

#### 【元器件的采购管理】

- 原则：保证质量，节省经费，尽量集中
- 选择元器件优选目录上列举的生产和供应商
- 实施动态管理、优胜劣汰
- 应该定期跟踪和考察元器件生产及供应商

#### 【元器件监制、验收管理】

- 所谓监制即是到元器件生产单位去对元器件生产过程进行监督。通过监制能够发现影响元器件固有可靠性的各种薄弱环节，使具有潜在严重缺陷的元器件在生产阶段就予以剔除
- 元器件**验收包括下厂验收和到货检验**
  - 下厂验收：采购单位组织具备验收资格的人员，按采购合同中规定的元器件标准或协议，到供货单位进行验收
  - 到货检验：采购单位在元器件到货以后，在一定时间内完成对元器件的检验

#### 【元器件二次筛选】

- 元器件筛选是指为了：（1）选择具有一定特性的产品；（2）剔除早期失效而对100%元器件进行的一种或几种试验。
- 元器件的筛选分为一次筛选和二次筛选
- 一次筛选是元器件生产厂出厂前对元器件进行的筛选。（生产单位）
- 二次筛选（使用单位）
- 筛选按照筛选规范去执行

筛选的典型试验

- 温度循环
- 颗粒碰撞噪声检测
- 老练
- 测试

- 密封性检查

#### 【元器件破坏性物理分析(DPA)】

- 破坏性物理分析（DPA）：是为验证元器件的设计、结构、材料和制造的质量是否满足预定用途或有关规范的要求，对元器件的合格批产品按批次抽样，并对样品进行一系列检验和分析的过程，并做出生产批质量合格与否的结论
- 作用：能发现元器件内部的潜在缺陷，防止有严重缺陷的元器件装机使用，是确保元器件的质量和可靠性的重要手段
- 按GJB4027的要求和方法具体实施。

#### 【元器件失效分析管理】

- 为了寻找和分析失效元器件的失效部位和失效机理,确定失效原因
- 明确应采取的纠正措施，以提高元器件的可靠性

#### 失效分析常用的方法

从外部分析到内部，从非破坏分析到破坏性分析；包括外观检查、电测试、再使用光学、化学、机械、电子等技术分析方法。

a.元器件外观检查; b.元器件解剖前电性能检查、密封性试验、PIND； c.元器件显微镜观察照相； d.解剖元器件； e.元器件解剖后电性能检查。 f. 元器件解剖后其它电性能检查

#### 【军用元器件的失效分析管理要求】

- 对关键的、重要的以及多次出现失效而未找到原因的元器件应进行失效分析,提交专门的失效分析机构或主管部门认可的失效分析机构进行，以便了解元器件失效机理，采取有效纠正措施
- 对一般元器件的失效也应组织有关人员进行分析和试验，找出原因，并采取纠正措施。

#### 【元器件使用设计管理要求】

- 元器件进行降额使用：元器件的失效率与其工作应力直接相关，使元器件实际使用应力低于其规定的额定应力，从而达到降低工作失效率、延长使用寿命的目的
- 开展热设计：温度是影响元器件失效率的重要因素
- 考虑元器件的抗辐射问题：采用抗辐射加固的半导体器件
- 防止元器件的静电损伤

#### 【元器件贮存质量管理要求】

(1) 保管与贮存条件：元器件的保管与贮存必须符合规定的保管贮存条件，特别对需要防潮、防腐、防锈、防老化、防静电等有要求的元器件更应妥善保管

(2) 存放要求：元器件的库房应分一般库房与受控库房。库房存放应做到不同品种分类分批存放，库房内应标志明显、存放合理、排列有序、安全、整洁，温湿度应有记录

#### 【超期贮存元器件质量管理要求】

- 为什么会出现超期贮存的元器件？

国内型号承研单位通常储备一定的元器件，元器件有贮存期的要求，超过了贮存期就是超期元器件

- 超过了规定贮存期的元器件，通过规定的检验，仍然能作为合格的产品用于军工产品上

国军标GJB/Z123-99《宇航用电子元器件有效贮存期及超期复验指南》规定了超期贮存元器件的质保要求

#### 【元器件的评审管理要求】

- 目的：发现元器件选用过程中存在的问题，并提出改进意见
- 内容

a.检查元器件的选用是否符合优选要求？ b.检查关键、重要的元器件选用情况是否正确合理？ c.检查元器件的使用（降额设计、热设计等）是否符合有关规定？ d.是否按规定进行了元器件验收、二次筛选和DPA？ 以及对不合格批的处理？ e.元器件是否符合规定的元器件贮存期要求？ f.是否对失效元器件进行了失效分析？

## 6.2 元器件选择控制要求

#### 【军用产品元器件的选择】

1. 特性选择：根据元器件的使用部位的电性能、体积、重量等要求 选择元器件的品种、规格和供货单位
2. 质量等级选择：按可靠性要求选择元器件执行的规范和质量等级
3. 环境适应性选择：选择元器件工作适用的温度范围、可承受的振动频率范围和量级、以及密封性、静电敏感度、辐射强度保证(RHA)等级等承受环境的能力

#### 【元器件优选目录PPL】

MIL-STD-975《NASA标准电子元器件清单》

MIL-HDBK-979《宇航用标准元器件数据手册》

《航天型号元器件优选目录》

《XX工程元器件优选目录》

## 6.3 电子元器件应用验证

#### 【元器件应用验证的要素】

元器件应用验证是对元器件在**应用前**开展的一系列**试验、评估和综合评价**等工作

元器件基本特性描述元器件出厂时 自身特性，包括元器件功能特性参 数要素和元器件生产工艺要素

元器件应用特性描述元器件在使用过程中的特性，包括电装特性、应 用环境适应性以及长期可靠性

- 功能性能验证要素
- 工艺结构验证要素
- 电装特性验证要素
- 环境适应性要素
- 长期可靠性验证要素

#### 【元器件应用验证方案设计】

(1)试验项目的确定

(2)试验条件的确定

(3)试验分组与抽样

## Chapter 7: 元器件降额设计

---

### 7.1 概述

【降额设计的定义】：降额设计就是将元器件在使用中所承受的应力(电、热、机械应力等)低于其设计的额定值

【降额设计的目的】：

- 通过限制元器件所承受的应力大小，降低元器件的失效率，提高使用可靠性
- 若元器件一直在额定应力下工作，其性能退化速率较快，降额设计能延缓其参数退化，增加工作寿命
- 使设计有一定的安全余量

### 7.2 降额设计的过程

【降额设计的过程】：

1. 确定降额准则
2. 确定降额等级
3. 确定降额参数
4. 确定降额因子
5. 降额计算及分析

【关键降额参数】：

模拟电路：电源电压、输入电压、输出电流、功率、最高结温

### 7.3 降额设计的基本原则

- 关键元器件应保证满足规定的降额因子。一般元器件的降额因子允许做适量调整
- 有些元器件参数不能降额
- 降额到一定程度后，可靠性的提高是很微小的，过度降额反而有害
- 不应采用过度的降额来弥补选用低于要求质量等级的元器件；同样，也不能由于采用了高质量等级的元器件，而不进行降额设计

### 7.4 元器件结温的计算

【热阻值】：

$$R = (T_{j(max)} - T_S) / P_{j(max)}$$

$T_{j(max)}$ ：器件的允许最大额定结温， $^{\circ}\text{C}$

$T_S$ ：最大额定功率的设计环境温度上限，通常为 $25^{\circ}\text{C}$

$P_{j(max)}$ ：器件的最大额定功率， $W$

【小功率器件的结温】：

$$T_j = T_A + RP_j$$

$T_j$ : 结温,  $^{\circ}\text{C}$

$T_A$ : 环境温度,  $^{\circ}\text{C}$

$R$ : 结与管壳间的热阻,  $^{\circ}\text{C}/\text{W}$

$P_j$ : 平均耗散功率,  $\text{W}$

$T_C$ : 管壳温度

#### 【结温的近似计算】

- 晶体管和二极管

小功率: 晶体管  $T_j = T_A + 30$ , 二极管  $T_j = T_A + 20$

中功率: 晶体管  $T_j = T_C + 30$ , 二极管  $T_j = T_C + 20$

- 集成电路

集成电路门数不大于30个或晶体管数不大于120个(不包括存储器):  $T_j = T_A + 10$

集成电路门数大于30个或晶体管数大于120个, 以及所有存储器:  $T_j = T_A + 25$

- 低功耗TTL及MOS电路:

门数不大于30个或晶体管数不大于120个:  $T_j = T_A + 5$

门数大于30个或晶体管数大于120个:  $T_j = T_A + 13$

## Chapter 8: 热设计

---

### 8.1 热设计的目的与作用

- 控制电子设备内部所有元器件的温度, 使其在设备所处的工作环境条件下尽可能的低于规定的最高允许温度
- 防止电子元器件因过热而失效
- 热设计一般分为系统级、电路板级和元器件级, 主要介绍元器件级的热设计

### 8.2 温度对元器件可靠性的影响

- 元器件的失效率随着温度的升高而升高
- 元器件的工作寿命随温度的升高而降低

### 8.3 热设计理论基础

#### 【传热的基本原则】:

- 基本原则: 凡是温差的地方就有热量的传递
- 基本规律:  
热量从高温区流向低温区、高温区发出的热量必定等于低温区吸收的热量
- 传热的基本公式:

$$\phi = KA\Delta t$$

- 三种基本方式：导热、对流和辐射

#### 【热阻及热阻网络】

- 热阻：热流在流动过程中遇到的阻力
  - 内热阻：元器件内部发热部位与表面某部位之间的热阻
  - 外热阻：元器件表面与最终散热器之间的热阻
  - 接触热阻：两种物体接触处的热阻
  - 安装热阻：元器件与安装表面之间的热阻
- 热阻网络：热阻的串联、并联或混联形成的热流路径图

## 8.4 元器件热设计的主要方法

- 降低功耗（设计、制造阶段）
  - 减少电子元器件自身热量的产生
- 热匹配设计（设计、制造阶段）
  - 选用结构完好和物理化学性能稳定的材料
  - 各部分材料的热膨胀系数尽量接近
- 降低热阻（设计、制造阶段）
  - 尽量采用易于散热的封装技术和封装形式
- 利用各种散热方式（使用阶段）
  - 利用热传导、热辐射、热对流技术增强散热功能
  - 安装散热器、强迫空气冷却、液体冷却等手段
- 热分布要合理（使用阶段）
  - 如功率电子元器件要分散、要处于易于散热的位置
  - 远离电路中热敏性元器件等

#### 【热匹配设计的内容】

- 目的：尽可能减少元器件内部相连材料间热膨胀系数的差别，以减少热应力对元器件性能与可靠性的影响
- 关注重点：管芯的热设计、封装键合的热匹配设计、管壳的热匹配设计
- 管芯的热设计主要通过版图的合理布局使芯片表面温度尽可能分布均匀，防止出现局部过热点
- 封装的热匹配设计主要通过合理选择封装、键合和烧结材料，尽可能降低材料的热阻以及材料之间的热不匹配性，防止出现过大的热应力
- 管壳的热设计主要应考虑降低热阻，即对于特定耗散功率的器件，它应具有足够大的散热能力

#### 【元器件使用中的热设计】

- 元器件的自然冷却设计
  - 半导体器件：半导体器件的面积较小，自然对流及其本身的辐射换热不起主要作用，而导热是这类器件最有效的传热方法

- 电阻器
  - 电阻器常采用自然冷却设计，对大功率是靠电阻器本身与金属底座或散热器之间的金属导热
  - 用金属导热夹是一种很好的安装方法，但应保证紧密接触
- 无源器件
  - 无源元件包括电容器、开关、连接器、熔断器和结构元件等。它们本身不产生热，但受高温影响将变质而失效
  - 设计中应采用热屏蔽和热隔离的措施，尽量避免有源器件对其的热影响。保证它们的失效率低于可靠性设计所要求的值
- 元器件的强迫空气冷却散热：半导体器件、电阻器、大功率器件
- 元器件的液体冷却设计
  - 直接液体冷却
  - 间接液体冷却
- 元器件的安装与布局
  - 元器件的安装位置应保证元器件工作在允许的工作温度范围内，应得到最佳的自然对流
  - 元器件应牢靠地安装在底座、底板上，以保证得到最佳的传导散热
  - 产生热量较大的元器件应接近机箱安装，与机箱有良好的热传导
  - 元器件、部件的引线腿的横截面应大，长度应短
  - 温度敏感元件应放置在低温处。若邻近有发热量大的元件，则需对温度敏感元件进行热防护，可在发热元件与温度敏感元件之间放置较为光泽的金属片来实现
  - 元器件的安装板应垂直放置，利于散热
- 元器件在印刷板上的安装与布局
  - 安装在印制电路板上的元器件的冷却，主要依靠导热提供一条从元器件到印制板及机箱侧壁的低热阻路径
  - 元器件在电路板上安装，需要采用一定的安装布局方法
- 减少元器件热应变的安装方法

#### 【功率器件热设计方法】

- 在生产工艺阶段，就要充分考虑器件内部、封装和管壳的热设计，尽量减少器件自身热量的产生
- 为防止元器件由于过热而引起失效，在使用阶段还需对大功率的元器件进行有效的热设计
  - 目前普遍采用在大功率元器件上加散热器进行自然冷却的方法，当热流密度比较大的情况下，也可采用散热器加风冷技术。

## 8.5 热分析

【热分析的目的】：利用仿真手段，在电子产品设计阶段（即在产品制造前）获得其温度分布的有效方法

【热分析方法】：

- 解析法
- 数值法
  - 有限元法

- 有限差分法
- 边界元法
- 有限体积法

## Chapter 9：静电放电损伤及防护

---

### 9.1 静电的产生

- 摩擦生电
- 感应生电：**非导体**不能通过感应产生静电

【湿度对静电的影响】：加湿改善静电

【材料和杂质对静电的影响】：一般状况下，杂质有增加静电的趋势；但如杂质能降低原有材料的电阻率，则加入杂质有利于静电的泄漏

### 9.2 静电源

- 人体静电：是引起半导体器件的静电损伤的主要原因之一，它对半导体器件的危害最大
- 尘埃静电

### 9.3 静电放电（ESD）模型

对于微电子器件而言，通常有三种放电形式，三种基本模型

- 人体模型（HBM）——阻尼双指数衰减
- 充电器件模型（CDM）——振荡衰减
  - 摩擦充电放电
  - 电场充电放电
- 机器模型——指数衰减振荡

### 9.4 半导体器件对静电放电的敏感度

【静电放电的敏感度】：

静电敏感度实质上是器件**抗静电应力**的度量，其用于定量描述不同元器件对静电的敏感程度。按器件抗静电能力的大小可分为**静电放电敏感性器件**和**非敏感器件**

【失效阈值】：

器件所能抗受的**最大静电电压**。它是由器件的结构、输入端静电保护电路的形式、版图设计、制造工艺等所决定的

【测定静电失效阈值的方法】：

在MIL-STD-883的方法3015和GJB548方法3015中规定了对微电路的静电敏感度(ESDS)进行测试的方法与分类的程序

【静电敏感度标志】：



标志应尽可能打印在器件的外壳上，打在外壳上的标志通常是“Δ”，1级用1个Δ标志；2级用2个Δ(ΔΔ)标志；3级无标志。对于外壳太小的器件，也可标志在包装盒或包装箱上。在仓库中储存静电敏感元器件的箱柜上也可打上静电敏感元器件的标志。

## 9.5 静电放电损伤的特点、失效模式和失效机理

### 【静电放电对电子元器件的损伤特点】

静电损伤是一种偶然事件，一般讲是与时间无关的，所以不能通过老炼等筛选方法加以剔除，相反，在老炼过程中，由于器件接地不良、不适当地传递或与老炼设备不适当地连接等反而会提高ESD失效的百分比

- 损伤的**隐蔽性**
- 失效的**复杂性**
- 损伤的**潜在性**
- 损伤的**随机性**

### 【ESD失效模式】：

- 硬失效——击穿、破坏失效，突发性完全失效
  - 发性完全失效是器件的一个或多个参数突然劣化，完全失去规定功能的一种失效，通常表现为开路、短路以及电参数严重漂移。一种是与电压相关的失效，如介质击穿，PN结反向漏电增大、铝条损伤等。另一种是与功率有关的失效，如铝条熔断、多晶电阻熔断、硅片局部区域 融化
- 软失效——潜在性缓慢失效
  - 潜在性缓慢失效是指器件经受ESD应力后，功能正常、常规参数也未严重超差，而实际器件已受到潜在性损伤，并且在器件随后的使用过程中会随时转化为完全失效。潜在性失效降低了器件抗静电的能力，降低了器件的使用可靠性。主要表现为：栅氧化层损伤、栅氧化物愈合或短路、保护电路受损、电荷陷阱、PN结衰减等

### 【ESD失效机理】

- 过电压场致失效（电压型）
  - 电压型主要会造成：介质击穿、气体的电弧放电、表面击穿等
- 过电流热致失效（电流型/功率型）
  - 电流型会造成热二次击穿、金属化层的融化、体击穿等

### 【静电放电失效的检测分析方法】

- 电气测试方法：参数分析仪测试（电源电流、传播延迟、上升时间、下降时间）；I-V特性曲线测试；传输线脉冲TLP测试；阻抗特性测试
- 非电气测试方法：光学显微镜、扫描电子显微镜（SEM）、微光发射显微镜（EMMI）

## 9.6 静电防护

从环境和人员两方面配置基本的静电防护措施？

静电防护应贯彻于电子产品的全过程，即在设计、生产、使用的各环境都要采取相应措施。这可以从两个方面着手：

设计和制造阶段——通过在芯片上设计制作各种静电保护电路或保护结构，来提高器件的抗静电能力；器件应用上增加放电保护回路的设计，瞬态抑制二极管、压敏电阻等。

装机使用阶段——制订并执行各种防静电的措施，以避免或减少器件可能受到的静电的影响。

因此必须在器件设计、制造、测试、试验、传递、包装、运输和使用等各个环节中都采取措施，其中任何一个环节的疏忽，都可能造成静电对器件的损伤

#### 【器件生产设计中的防静电措施】

生产方采取的ESD防护措施，是在器件的版图设计中，在适当部位(如电路的输入端、输出端、MOSFET的栅-源间)加保护网络或保护器件。当有ESD脉冲出现时，栅极电压便被保护网络箝位在预置的低于栅氧击穿的电平下，静电源存储的能量则通过保护网络泄放掉。

生产方除了在器件版图设计时，采取ESD防护措施外，必须重视对ESD元器件的包装，应采用防静电的包装容器。

#### 【器件使用中的防静电措施】

GJB1649-93《电子产品防静电放电控制大纲》中要求电子产品（设备）承制方应按该标准的要求制订、执行和提供ESD控制大纲，并指明适用的控制大纲功能和要素也应用在转承制方和其他有关机构，以便为静电敏感的元器件、组件和设备提供完整的保护

GB/T32304对**EPA(Electrostatic discharge Protected Area)**，即**防静电保护区**相关技术作了规定

GB/T32304-2015《航天电子产品静电防护要求》，对电子产品静电防护提出了“技术+管理”体系化要求，规定了航天电子产品静电防护的一般要求以及策划、培训、防静电工作区、包装、标识、采购和外包、监视和测量、审核、管理评审和改进等详细技术和管理要求。

此外，防静电认证标准中的IEC 61340-5-1标准则较之前的标准新增了增静电防护产品认证要求，进一步优化了静电放电控制方案的管理要求，更好地发挥防静电作用

#### 【静电防护具体措施】

- 避免使用产生静电的材料，各种容器、包装材料、工作台垫、设备垫和地板，表面电阻在  $10^5 \sim 10^9 \Omega$ ，这样使静电泄放慢，放电电流小，可防止电子元器件的损伤
- 静电放电敏感器件必须采用防静电材料包装
- 操作者应穿防静电工作服和鞋子，不能穿化纤(尼龙、涤纶等)工作服和绝缘的鞋子，避免摩擦起电
- 静电防护区内的相对湿度应控制在50%以上，增加环境的湿度，使绝缘体表面电阻大大降低，从而加速了静电的泄漏
- 对各种可能产生静电的物体和人提供放电通路，车间的各种仪器、设备和电烙铁头要接地良好，操作者人体使用接地的肘带、踝带、腕带
- 在不能用接地技术泄放静电荷时，安置空气电离器，用来中和物体上的静电荷。在工作台面，传送带或仪表面板上可涂抹专用抗静电剂，以便防止静电荷的产生和积累
- 尽量选择静电损伤阈值高的器件，在电路设计中增加保护电路
- 对操作静电敏感器件的人员，应进行静电放电防护知识和技术的培训及考核，未经培训或没有通过考核者不允许上岗操作
- 设置防静电工作区，并张贴防静电警示牌，对静电敏感的半导体器件，应在防静电工作区内安装

## Chapter 10：电子元器件筛选

---

## 10.1 筛选的定义与目的

### 【元器件筛选的定义】

元器件的筛选指专为**剔除有缺陷的**或可能引起**早期**失效的或选择具有一定特性的元器件所进行的可靠性试验

### 【元器件筛选的目的】

提高元器件**使用可靠性**的重要手段，通过排除早期失效产品使**整批**器件的固有可靠性接近设计水平；

有效保证出厂成品的**批质量水平**，提高产品的使用可靠性

### 【浴盆曲线】

- I区——早期失效期
- II区——偶然失效期
- III区——耗损失效期

## 10.2 元器件筛选的特点

- 对于性能良好的产品来说是一种非破坏性试验，而对于存在可剔除缺陷的产品来说应能检测出**缺陷或诱发其失效**
- 筛选是**100%**的试验，而**不是抽样检验**。经过筛选试验，对批产品不应增加新的失效模式和机理
- 筛选不能提高产品的**固有可靠性**。但它可以提高批产品的**使用可靠性**
- 筛选一般由**多个试验项目组成**。如常见的组成筛选的试验项目有显微镜检查、颗粒碰撞噪声检测、高温贮存、温度循环、功率老练、电性能测试及密封性试验等

## 10.3 筛选试验分类及介绍

筛选分为**常规筛选**和**特殊环境筛选**。

在一般环境条件下使用的产品只需进行**常规筛选**，而在特殊环境条件下使用的产品则除需进行常规筛选外，还需进行**特殊应力筛选**。常规筛选按筛选性质来分可以分为：**检查筛选、密封性筛选、环境应力筛选和寿命筛选**四大类。

【检查筛选】：检查筛选的目的是使用非破坏性的方式对元器件表面或内部的缺陷进行检测，可以剔除存在功能/性能缺陷的早期失效产品。常用的检查筛选试验包括

- 外部目检
- X射线检查
- 颗粒碰撞噪声监测(PIND)

### 【密封性筛选】

密封性筛选的目的是确定具有空腔的元器件的气密性是否满足规范要求。密封性筛选也称为“**检漏**”，主要用于剔除管壳及密封工艺中存在的潜在缺陷如**裂纹、焊缝开裂、微小裂孔**等

检漏分为粗检漏和细检漏：

- 粗检漏：氟碳化合物(氟油)检漏
- 细检漏：示踪气体(氦)检漏

以漏气速率 $1\text{ Pa}\cdot\text{cm}^3/\text{s}$ 为分界，界定细检漏和粗检查漏

### 【环境应力筛选（ESS）】

环境应力筛选(ESS, Environmental Stress Screening)的主要目的是通过施加加速的环境应力剔除存在潜在缺陷的早期失效产品。

**温度循环和随机振动**都是元器件在实际使用过程中最常见的恶劣环境应力，可以较好地模拟现场环境下的应力类型，较单一的高/低温试验和正弦定频/扫频振动试验的筛选效果更优

- 温度循环筛选

温度循环应力筛选的目的主要是考核测定元器件在短期内反复承受极端高、低温变化的能力，以及极端温度交替突变对器件的影响。剔除因材料**热胀冷缩性能不匹配**、内引线 and 管芯涂料**温度系数不匹配**、**芯片裂纹**、**接触不良**等原因而造成的早期失效产品

- 随机振动筛选

随机振动筛选一般是将元器件紧固在振动台专用的夹具上，并施加激励，模拟各种恶劣的随机振动条件以检验对元器件性能和可靠性的影响。主要能剔除存在**引线焊接不良**、**内引线过长**等潜在缺陷的早期失效产品

### 【老练筛选】

老练筛选指在一定的环境温度下、在较长的时间内对元器件施加连续的电应力，通过热/电综合应力的作用使潜在缺陷提早暴露以达到剔除早期失效产品的效果。

不仅能起到剔除存在表面沾污、引线焊接不良、沟道漏电、硅片裂纹、氧化层缺陷、局部发热点等缺陷的早期失效产品的效果，对无缺陷的器件，老炼试验还能起到稳定其电参数的作用。

老炼的时间越长，温度越高，筛选的效果和效率都可以提高，增加老炼时间，过高的温度可能对元器件本身造成不良影响，降低实际使用寿命

### 【特殊环境筛选】

对于应用环境特殊的电子元器件，还应有针对性地进行特殊环境筛选，特殊环境筛选包括：**抗辐射筛选**，**冷热超高真空筛选**、**盐雾筛选**、**霉菌筛选**，**油雾筛选**等

元器件生产厂或使用单位并非对上述各项筛选项目都要进行，在实际选用时，主要依据实际产品的失效模式和机理，结合可靠性要求，实际使用条件以及工艺结构情况确定

## 10.4 筛选方案设计

- 筛选项目的确定
- 筛选应力强度的确定
- 筛选时间的确定
- 筛选参数的确定
- 筛选判据的确定：通常采用两类拒收判据，即合格/不合格判据和参数漂移极限判据
  - 合格/不合格判据：以元器件规范表中**参数容差极限**作为筛选的拒收判据
  - 参数漂移判据：以允许的**参数最大漂移百分数**作为筛选的拒收判据

## 10.5 筛选效果的评价

【筛选剔除率 $Q$ 】  $Q = \frac{n}{N} \times 100\%$

式中 $n$ 为通过筛选被剔除的产品数； $N$ 为参加筛选的产品总数。在有可靠性指标的产品标准中应规定剔除率 $Q$ 的上限值

确定剔除率 $Q$ 上限值。当实际产品的筛选剔除率超过该上限值时，这批产品就不可能作为高可靠产品交付使用

剔除率太高，有可能是产品本身设计、材料、工艺等存在本质上的严重缺陷，但也可能是筛选应力强度太高

剔除率太低，有可能是产品缺陷少，但也可能是筛选应力的强度和试验时间不足

【剔除效率 $\eta$ 】  $\eta = \frac{r}{R} \times (1 - \frac{n-r}{N-R})$

式中 $n$ 为通过筛选被剔除的产品数； $N$ 为参与筛选试验的产品总数； $R$ 为受试样品中所含早期失效产品数； $r$ 为被剔除样品中所含早期失效产品数

**$\eta$ 值越接近1，筛选方法就越好**

【筛选效果 $\beta$ 】  $\beta = \frac{\lambda_N - \lambda_S}{\lambda_S} \times 100\%$

式中 $\lambda_N$ 为筛选前产品失效率； $\lambda_S$ 筛选后产品失效率。筛选效果表示产品经过筛选后，失效率下降的百分比

当 $\beta = 0$ 时，表示筛选毫无效果；

当 $\beta = 1$ 时，表示筛选后产品的失效率降到零；

当 $\beta = 90\%$ 时，表明筛选后的产品失效率大致能降低一个数量级。

【筛选度】指产品中存在对某一特定筛选敏感的潜在缺陷时，该筛选将该缺陷以失效形式析出的概率

计算公式： $SS = 1 - \exp\{-0.0017(R + 0.6)^{0.6}[\ln(e + V)]^3 N\}$

式中： $R$ 为温度变化范围( $T_U - T_L$ )°C； $V$ 为温度变化速率°C/min； $N$ 循环次数； $e$ 自然对数的底

**筛选度越高越优**

## 10.6 特殊使用条件下进行的筛选

由元器件的生产方进行的筛选试验一般称为“一次筛选”，使用方或委托单位可以再次进行二次筛选、补充筛选、升级筛选等筛选试验以补充生产方筛选的不足。

【二次筛选】

- 二次筛选的项目和程序

二次筛选的试验项目可以参照一次筛选的试验项目，并进行适当地剪裁。试验条件应按元器件的具体使用条件修订

由于经过二次筛选合格的元器件是要交付装机使用的，因此用于二次筛选的试验项目必须是无破坏性的

- 确定二次筛选项目先后顺序的原则是
  - 费用低的试验项目应排在较前，降低成本
  - 安排在前面的筛选项目应有利于元器件在后一个筛选项目中其缺陷的暴露

- 密封和最终电测试两项试验谁先谁后，需要慎重考虑，经电测试合格的器件再经密封性试验，也可能会由于静电损伤等原因引起失效
- 二次筛选中的PDA控制

**PDA: Percent Defective Allowable——批允许不合格率**，即对于某一批进行筛选试验的元器件产品，所允许的最大批缺陷率。当进行筛选试验后若批缺陷率大于PDA，则整批器件拒收。

应用PDA时，首先应选定某一试验项目进行PDA控制，并将其称为 PDA控制点；其次应根据可靠性要求确定PDA的取值；最后根据试验结果计算批缺陷率并判断是否接收。

例如：某批进行老炼试验的1000只正常器件，规定其PDA值为5%。若经过老炼试验后剔除了51只不合格器件，即该试验的批缺陷率为 5.1%。若未执行PDA控制，则合格的949只器件将交付使用。而执行PDA 控制，已经通过筛选的949只器件都将因其可靠性不达标而被拒收。

#### 【升级筛选】

元器件的升级筛选就是指把原来处于一定质量等级的一批元器件，通过一系列的筛选试验、使其应用于高于其质量等级的应用中。

升级筛选——将塑封器件可靠的应用于航空航天领域

- 升级筛选的定义：

升级筛选并不能提高元器件个体的质量等级。升级筛选只是通过一系列的试验验证，证明该批器件可以用于较高质量等级的应用并淘汰有缺陷的产品。它是解决低质量等级的元器件用于高可靠性领域的一种可靠性保证手段

- 升级筛选的意义：
  - 增加了用户设计和选用的范围
  - 加快采购进度并降低成本
  - 元器件升级筛选起到了质量把关作用

## Chapter 11：电子元器件破坏性物理分析

---

密封型单片集成电路DPA和塑封型单片集成电路DPA有什么区别？

### 11.1 破坏性物理分析的定义与目的

#### 【破坏性物理分析的目的】

- 分析评估特性良好的元器件是否存在影响可靠性的缺陷
- 工厂破坏性物理分析——早期发现制造工艺中的异常情况，有利于改进工艺提高产品质量
- 用户破坏性物理分析——有利于发现异常批次的产品，有利于判断采购产品的质量
- 确定元器件生产方在设计及制造过程的中存在的偏离和工艺缺陷，尤其是批次性固有缺陷，某些无法通过筛选暴露缺陷
- 提出和设计、材料或工艺方面改进措施和批次处理意见
- 检验、验证供货方元器件的质量
- 防止有明显或潜在缺陷的元器件装机使用
- 降低在系统试验和现场使用中因元器件固有缺陷所造成故障或失效的概率

## 11.2 破坏性物理分析工作的适用范围和时机

### 【适用范围】

- 应用于**高可靠性要求**领域中的元器件，如航天、航空及军用要求
- 在电子产品或设备中，被列为**关键件或重要件**的元器件，如果失效，可能会导致产品故障或影响任务完成
- 其**质量等级低于**规定要求的元器件
- **超出规定贮存期**的元器件
- 对已装机的元器件需要进行**质量复验**的

### 【开展时机】

- 产品质量鉴定（鉴定检验试验）时进行，既包括国家授权的鉴定机构的鉴定也包括使用方的鉴定
- 产品验收时进行，即在订货合同中提出需进行DPA，下场验收时，使用方可现场监督生产方进行DPA，或生产厂家出厂供货前，由有资质的第三方实验室进行DPA，合格后才能供货
- 对于超过规定贮存期元器件的质量复验，按GJB/Z 123的规定要求进行DPA

## 11.3 破坏性物理分析的工作方法和程序

### 【抽样方法】

- 样本大小应以满足破坏性物理分析的检验项目的需要量为前提，对于一般元器件为生产批总数的2%，但不少于5只也不多于10只；对于结构复杂的元器件，样本大小应为生产批总数的1%，但不少于2只也不多于5只；对于价格昂贵或批量很少的元器件，样本大小可适当减少，但应经有关机构批准。有关机构包括：鉴定机构、采购机构或元器件使用方。
- 国军标GJB4027中规定了应在生产批中随机抽样，也可选最能暴露缺陷的元器件作为样品。在实际的应用过程中可根据情况进行适当调整
- 相关DPA规范中规定其它抽样方案

### 【密封型单片集成电路DPA试验程序】

1. 外部目检
2. X射线检查
3. 颗粒碰撞噪声检测(PIND)
4. 密封
5. 内部水汽含量
6. 内部目检
7. 键合强度
8. 扫描电镜检验
9. 芯片剪切强度

### 【塑封型单片集成电路DPA试验程序】

1. 外部目检
2. X射线检查

3. 声学扫描显微镜检查
4. 内部目检
5. 键合强度
6. 扫描电镜检验
7. 玻璃钝化层完整性检查

【密封型单片集成电路DPA试验程序(裁剪后)】

1. 外部目检
2. 颗粒碰撞噪声监测(PIND)
3. 密封
4. 内部目检
5. 键合强度
6. 芯片剪切强度

【塑封型单片集成电路DPA试验程序(裁剪后)】

1. 外部目检
2. X射线检查
3. 内部目检
4. 键合强度

【电磁继电器DPA试验程序(裁剪后)】

1. 外部目检
2. 颗粒碰撞噪声检测 (PIND)
3. 密封
4. 内部目检

【片式电阻器、片式电容器DPA试验程序(裁剪后)】

1. 外部目检
2. 制样镜检

【DPA项目顺序】

- DPA的试验项目：由非破坏性项目——破坏性项目，不得随意颠倒
- 破坏性物理分析是通过对抽样样品分析出整批的元器件的质量水平，应按程序执行
- 防止因错误操作而导致器件出现缺陷和不合格，对整批器件质量状况进行误判，造成不必要的损失

## 11.4 破坏性物理分析的结论与不合格品的处理

【DPA的结论】

1. DPA中未发现缺陷或异常情况，结论为合格。
2. DPA中未发现缺陷或异常情况，但样品数量小于相关规定，结论为样品通过。



3. DPA中发现相关标准中的拒收缺陷，结论为不合格，但结论中应说明缺陷的属性(如批次性缺陷或可筛选缺陷)。
4. DPA中仅发现异常情况，结论为可疑或可疑批，依据可疑点继续进行DPA

【批拒收】凡是具有以下条件之一的缺陷，即构成了批拒收缺陷

1. 缺陷属于致命缺陷或严重缺陷
2. 具有批次性缺陷（固有缺陷）
3. 具有发展性的（如铝腐蚀等）且难以筛选的缺陷
4. 严重超过定量合格判据的缺陷。

【不合格品的处理】

1. 鉴定检验试验——在鉴定时进行的DPA中，如果发现拒收的缺陷应按鉴定DPA不通过处理。
2. 验收——在验收时进行的DPA中，如果发现拒收的缺陷应按整批拒收处理。只有当缺陷是可筛选的时，可允许生产方进行针对性筛选后，加倍抽样再次进行DPA，若不再发现任何缺陷，可按通过处理。
3. 超期复验时——在超期复验时进行的DPA中，如果发现拒收的缺陷应按整批报废处理。只有当缺陷是可筛选的时，可进行针对性筛选后，加倍抽样再次进行DPA，若不再发现任何缺陷，可按通过处理。
4. 已装机的元器件的质量验证——如果发现拒收的缺陷，一般应对已装机同生产批的元器件作整批更换处理。当设计师进行FMECA后，并经评审确认该元器件的损坏，不致导致型号任务的失败或严重影响型号任务的可靠性，也可不做整批更换处理

## 11.5 假冒伪劣元器件的识别

【识别方法】

1. 外部目检
2. 器件标记检查
3. 引脚检查
4. BGA封装及其互连
5. 耐溶剂性检查
6. 涂覆层试验
7. X射线检查
8. 扫描声学显微镜检查
9. 内部目检
10. 扫描电镜检查

## Chapter 12: 电子元器件失效分析技术

---

破坏性物理分析与失效分析的主要相同点和不同点是什么？

## 12.1 基本概念

### 【失效分析】

失效分析(Failure Analysis)是对已失效的元器件进行失效模式、失效原因和失效机理的确认、分析过程。

对失效的元器件采用电测试以及先进的物理、化学等分析技术，并结合元器件失效前后的具体情况进行分析，以确定元器件的失效模式、失效的原因和失效机理。

- 失效模式：元器件失效的**表现形式**，例如半导体的开路、短路、无功能失效、参数特性退化(劣化)等
- 失效原因：引起失效的**原因**，即造成元器件失效的直接关键因素。失效原因通常可分为内因和外因
- 失效机理：是失效的**内因**，就是引起器件失效的物理或化学变化等内在的原因。失效机理的研究是对失效产品的物理、化学变化过程深度解析研究

### 【目的与作用】

- 发现影响产品可靠性的根源，提出行之有效的改进**设计、工艺**的措施
- 在工艺控制、筛选试验、加速应力试验和评估认证等方面，为器件制造者和质量监督部门制定合理的**最佳试验方法和规范**提供依据
- 为用户**合理选用**元器件、整机**可靠性设计**提供依据
- 通过分清**偶然失效和批次缺陷**，为整批元器件的使用提供决策依据
- 通过实施纠正措施，提高**成品率和可靠性**，减小系统试验和工作时的故障

## 12.2 工作内容及流程

### 【失效分析工作的主要内容】

- 明确分析对象
- 确定失效模式
- 分析失效原因
- 研究失效机理
- 提出预防措施及设计改进方法

### 【失效分析工作流程】

1. 失效信息收集
2. 失效样品保存
3. 外观检查
4. 电特性分析
5. 失效分析方案设计
6. 应力试验分析
7. 故障模拟分析
8. 非破坏性分析
9. 内部分析检查（破坏性）
10. 确定失效原因和失效机理

- 11. 判定失效性质及发生概率
- 12. 纠正措施
- 13. 结果验证

12.3 失效模式及失效机理

【常见的应力类型】

导致元器件失效的应力类型主要分成四类，分别是**机械应力、热应力、电应力和腐蚀应力**

- 机械应力——导致的失效是由于材料的损伤或蜕变而造成的失效，如疲劳断裂、磨损、变形等。对于电子元器件产品，结构性失效主要是由结构件的材料特性及受到随机振动、冲击等的机械应力造成的，有时候也与热应力和电应力有关
- 热应力——温度改变时物体由于外在约束以及内部各部分之间相互约束，使其不能完全自由胀缩而产生的应力。针对元器件来说，受到的可能是大范围温变、温度循环，温度冲击等热应力导致器件失效
- 电应力——超出产品手册规定的电流和电压等相关电学参数造成的应力。针对元器件来说，受到的可能是**大电流、高电压、静电击穿**等电应力导致元器件失效
- 腐蚀应力——产品受到化学腐蚀、电化学腐蚀等使其产生损耗和破坏的过程

【金属膜电阻器的失效模式及失效机理】

主要失效模式	可能的失效机理
短路、开路或阻值超规范	(1)焊点污染、焊接工艺不良、材料成分不当等缺陷造成引线与帽盖虚焊(2)帽盖与基体尺寸配合不良，造成帽盖脱落(3)基体材料有杂质或外力过大，造成基体断裂(4)碱金属离子侵蚀或膜层附着力差，造成膜层大块脱落(5)热不匹配，造成膜层开裂(6)缺陷部分高阻过热或过电应力，造成膜层烧毁(7)制造中有杂质沾污，造成膜层和基体被污染(8)由于机械应力造成膜层划伤或有孔洞(9)膜层材料有杂质造成膜层氧化(10)基体材料不良造成基体不平、厚薄不均、有杂质

【电容器的失效模式及失效机理】

序号	主要失效模式	可能的失效机理
1	击穿(短路呈电阻特性)	(1)电介质中有疵点或缺陷，存在杂质或导电粒子(2)老化 (3)电介质电化学击穿(4)子移(5)在制造中电介质有机械损伤 (6)在高湿度或低气压环境下极间边缘飞弧 (7)在机械应力作用下电介质瞬时击穿
2	开路	(1)击穿引起电极和引线绝缘 (2)引线和电极接触处氧化造成低电平不通(3)电解电容器阳极引出箔被腐蚀短 (或机械折断)(4)作电解质(5)工作电解质冻结 (6)引线(箔)和电极接触不良(7)在机械应力作用下电介质瞬时开路
3	电性能退化	

【半导体分立器件的失效模式及失效机理】

序号	主要失效模式	可能的失效机理
1	参数退化	(1)生产制造过程中工艺缺陷: 沾污、腐蚀、内部缺陷氧化层缺陷、金属化层缺陷、芯片焊接(粘接)缺陷(2)使用过程中过电应力: 过电压、过电流、超功率
2	短路	(1)工艺不良引起:装配缺陷、沾污、片缺陷(2) 过电应力: 过电压、过电流、超功率
3	开路	多与时间因素有关 内引线断裂、芯片脱落、金属化层断裂等(2) 过电应力的使用也会使晶体管发生开路, 熔断互连导线、薄膜金属化层蒸发熔融开裂、芯片短路造成内引线与铝互连导线熔断而开路失效
4	机械缺陷	(1)封装材料、管壳、管脚材料氧化、锈蚀、腐蚀开裂裂纹、结合性能差、不能焊接或熔接引线、密封性能退化等

【单片集成电路的失效模式及失效机理】

序号	关键部位	主要失效模式	可能的失效机理
1	芯片体内表面钝化层	耐压退化, 漏电流增大, 短路, 电流增益退化, 噪声退化, 阈值电压变化	次击穿、可控硅效应, 辐射损伤, 瞬间功率过载, 介质击穿, 表面反型, 沟道漏电沾污物、针孔、裂纹、开裂, 厚度不均
2	金属化系统	开路、短路、电阻增漏电路	金铝合金, 铝电迁移, 铝再结构, 电过应力缺损, 台铝腐蚀, 沾污、铝划伤、空隙、阶断铝, 非欧姆接触, 接触不良, 厚度不均
3	电连接部分	开路, 短路, 电阻增大	焊点脱落, 金属间化合物, 焊点移位, 焊接损伤
4	引线	开路, 短路	断线, 引线松弛, 引线碰接

序号	关键部位	主要失效模式	可能的失效机理
5	键合系统	断开、短路，工作点不稳定，退化，热阻增大	沾污、金属间化合物，键合不良，接触面积不够，脱键，裂纹、破裂
6	封装系统	短路、漏电流增大断裂、腐蚀断线、焊接性差、瞬时工作不良绝缘电阻下降	沾污、金属间化合物，键合不良，接触面积不够，脱键，裂纹、破裂密封不良，受潮、沾污、引线生锈、腐蚀、断裂、多余物、表面退化、封入气体不纯
7	输入输出端	短路，开路，熔断烧毁	电击穿、烧毁、栅穿、栅损坏

【混合集成电路的失效模式及失效机理】

序号	关键部位	主要失效模式	可能的失效机理
1	导电带	开路，接近开路;短路，接近短路;金属化层开路;接触电阻增大或开路	导电带擦伤或粘污;腐蚀(化学物残渣)未对准，接触区域污染
2	芯片分选	开路及可能开路	芯片分选不当，留下龟裂或缺损的芯片
3	芯片粘接	由于过热而使性能退化;短路或间歇短路;芯片翘起或龟裂	衬底与芯片之间有空穴;易熔焊料颗粒溅射与松散;"芯片-衬底"粘接不良;材料不匹配
4	引线键合	引线不牢、断开或间歇工作;键合点翘起开路	键合引线太紧或太松;材料不兼容或压焊区粘污;键合焊点面积或间距不够大;键合点严重压偏;芯片龟裂或碎裂;引线上有刻痕切口及粘附物
5	片式电容粘接	脱落;电参数超差或开路	粘接不良;电极损坏

序号	关键部位	主要失效模式	可能的失效机理
6	最后封装	性能退化;由化学腐蚀或受潮而引起短路或开路;由于反向和沟道作用而使半导体芯片性能退化;漏气使金属化层可能发生短路、开路;间歇工作	密封不良;封装气体不当;可伐-玻璃密封龟裂, 有空穴;引线与金属管壳之间的玻璃密封处有金属电解质或金属物质;封装内有松散的导电粒子

【光电耦合器的失效模式及失效机理】

序号	主要失效模式	可能的失效机理
1	开路	键合颈部受损断裂
2	CTR退化	晶格缺陷、表面劣化
3	暗电流增大	可动离子污染、芯片裂纹
4	输入-输出间绝缘电阻下降	硅凝胶形变使对偶间距离变小

【电磁继电器的失效模式及失效机理】

序号	主要失效模式	可能的失效机理
1	触点断开	(1)引出端接触不良 (2)引出端振动疲劳而脱落 (3)弹机构老化触点压力受损 (4)壳体内有害气体对触点的污染 (5)壳体内有可动绝缘体多余物
2	触点粘结	(1)壳体内有可动导电体多余物(2)由于局部电流密度过高造成触点熔接
3	线圈短、断路	(1)引出端接触不良 (2)引出端振动疲劳而脱落 (3)线圈导线绝缘物热老化 (4)线受潮、电解腐蚀
4	参数漂移	(1)壳体内有害气体对触点的污染, 造成接触电阻增大(2)线圈导线老化造成线圈电阻变化

## 附录

军标代码	全称
------	----

军标代码	全称
GJB 8118-2013	《军用电子元器件分类与代码》
GJB/Z 299C	电子设备可靠性预计手册
GJB/Z 35	元器件降额准则
GJB/Z27	电子设备可靠性热设计手册
GJB/Z62.1	《军用电连接器系列型谱-低频电连接器》
GJB/Z35-93	《元器件降额准则》
GJB1649-93	《电子产品防静电放电控制大纲》
GB/T32304-2015	《航天电子产品静电防护要求》
GJB4027-2000	《军用元器件破坏性物理分析（DPA）方法》
GJB/Z123-99	宇航用电子元器件有效贮存期及超期复验指南
<b>GJB 360B-2009/ MIL-STD-202E</b>	电子及电气元件试验方法
<b>GJB 128B-2021/ MIL-STD-750B</b>	半导体分立器件试验方法
<b>GJB 548C-2021/MIL-STD-883G</b>	微电子器件试验方法和程序
GJB597B-2012	半导体集成电路通用规范
GJB33A-1997	半导体分立器件总规范

补充：

温度应力加速模型：阿伦尼乌斯模型

$$R(t) = A \exp(-\frac{E}{kT})$$

$R(t)$ ——化学反应速率、 $A$ ——常数、 $E$ ——某种失效机理的激活能、 $k$ ——玻尔兹曼常数、 $T$ ——绝对温度