

Research on the Failure Mechanism of Electronic Components Based on Destructive Physical Analysis

Peng Zhang Huan Yang

Shaanxi Hengtai Electronic Technology Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi, 710021, China

Abstract

As the core foundation of equipment systems, the reliability of electronic components directly determines the overall performance and mission success or failure. This article uses destructive physical analysis (DPA) as the main research method to systematically explore the failure mechanism of electronic components. Through structural dissection, material characterization, and microscopic analysis of typical components, the results show that DPA can reveal the physical essence of material defects at the microscopic scale, accurately locate key failure links, and further identify the interaction path of coupled stress and the physical mechanism of failure. These analysis results can provide scientific basis for the selection of packaging materials, process optimization, and reliability enhancement design. On this basis, this article proposes an optimization strategy for failure traceability methods based on DPA, including standardization of detection processes, refinement of characterization methods, and systematization of data traceability, in order to improve the accuracy and engineering application value of component reliability assessment.

Keywords

destructive physical analysis; Electronic components; failure mechanism

基于破坏性物理分析的电子元器件失效机理研究

张鹏 杨欢

陕西恒太电子科技有限公司, 中国·陕西 西安 710021

摘要

电子元器件作为装备系统的核心基础,其可靠性直接决定整机性能与任务成败。本文以破坏性物理分析(DPA)为主要研究方法,系统探究电子元器件的失效机理。通过对典型元器件进行结构剖解、材料表征与微观分析,结果表明:DPA能够在微观尺度上揭示材料缺陷的物理本质,精准定位失效的关键环节,并进一步识别耦合应力的交互路径与失效物理机制。这些分析结果可为封装材料选择、工艺优化以及可靠性强化设计提供科学依据。在此基础上,本文提出基于DPA的失效溯源方法优化策略,包括检测流程规范化、表征手段精细化和数据溯源体系化等,以提升元器件可靠性评估的准确性与工程应用价值。

关键词

破坏性物理分析; 电子元器件; 失效机理

1 引言

国产化替代进程加速的背景下,DPA在电子元器件质量提升中的作用愈发重要。当前,大部分的电子系统故障都源于元器件早期失效,而传统外观筛查等非破坏性检测只能发现表面问题,不能实现对封装内部的有效定位和材料微观层面缺陷的检测,致使失效分析停留在现象描述层面。破坏性物理分析通过定向拆解、显微观察和成分检测,可对电子元器件内部的封装分层、材料杂质等微观异常进行充分揭示,为设计优化和工艺改进工作的有序开展,提供有效的数

据支持。

2 破坏性物理分析的相关阐述

2.1 破坏性物理分析的定义

破坏性物理分析(Destructive Physical Analysis, DPA),是一种针对电子元器件的严格检测方法,旨在评估器件的内部结构、材料和工艺质量,即破坏性物理分析可以通过一系列物理试验和解剖分析手段,来验证电子元器件的设计、结构、材料以及制造质量是否契合预定用途或相关规范要求^[1]。DPA的主要作用包括验证器件是否符合规格要求、识别器件制造缺陷和工艺问题、评估器件的可靠性和寿命以及鉴别假冒伪劣产品。

2.2 破坏性物理分析的技术特点

破坏性物理分析具备以下技术特点,包括微观可视化、

【作者简介】张鹏(1987-),男,中国陕西渭南人,本科,助理工程师,从事电子元器件检测、可靠性试验、破坏性物理分析研究。

无损与有损协同和全流程覆盖：①微观可视化^[2]。利用扫描电子显微镜（SEM）、透射电子显微镜（TEM）等工具，实现对微米、纳米级缺陷的高精度观测；②无损与有损协同。依托X射线检测（X-ray）、声学扫描显微镜（SAM）等无损手段，对异常区域进行有效定位，并在此基础上，开展针对性拆解活动，避免出现全局破坏的情况，并有效平衡信息获取和样品完整性；③全流程覆盖。DPA可以实现从互连结构到材料界面、从封装外壳到内部芯片的全环节检测和分析。

3 基于破坏性物理分析的电子元器件失效机理分类与归因

3.1 封装结构缺陷相关失效机理

材料物理特性不匹配、界面结合强度不足和封装工艺控制不当，是致使封装结构缺陷相关失效的主要因素，也是电子元器件早期失效的常见原因。从破坏性物理分析的角度出发，可以将封装结构缺陷相关失效机理划分为以下三种类型：①材料热膨胀失配引发的界面分层。陶瓷、塑封料等不同封装材料，具有显著差异的热膨胀系数（CTE），其中，典型陶瓷CTE约为 $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 、常用塑封料CTE介于 $20 \sim 30 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 之间。当电子元器件经历温度循环时，材料间会因CTE差异产生剪切应力：高温下膨胀速率快的材料试图拉伸膨胀慢的材料，低温下则反向收缩，从而致使界面区域反复承受拉压应力循环。X-ray断层扫描、声学扫描显微镜等可直观揭示分层位置和拓展路径：初期表现为微米级空洞，随应力循环累积逐渐连通形成宏观分层。当分层区域扩展至互连结构附近时，会导致键合拉力下降、电信号传输中断，严重时甚至引发封装壳体开裂。②封装内部空洞与气密性失效。塑封料流动不充分等工艺缺陷会致使内部残留空洞，不仅会降低封装结构的机械完整性，更会破坏器件的环境隔离能力。并且，空洞也可能导致水汽、氧气渗透，从而引发内部金属化层氧化。对于非气密性塑封器件而言，空洞内部可能会积聚潮湿气体，且在高温条件下，形成蒸汽压力，加速界面分层以及塑封料开裂。破坏性物理分析通过切片观察，可确认空洞和周边材料的结合状态。③键合界面缺陷与互连可靠性下降。引线框架的连接等引线键合以及倒装焊的凸点互连质量，会对封装结构的电学与机械可靠性产生直接影响，常见缺陷包括键合空洞、键合根部撕裂、焊盘金属间化合物（IMC）生长过度等。基于破坏性物理分析，可通过扫描电子显微镜，观察键合截面并发现：键合空洞区域在振动或温度循环应力下易成为裂纹萌生点、过厚的IMC层会降低键合界面延展性。此外，封装设计缺陷也会加剧应力集中，进一步恶化键合可靠性。破坏性物理分析通过微观尺度证据可以揭示这些缺陷的物理本质，为封装材料选择、工艺优化和可靠性强化提供直接依据^[3]。

3.2 材料与工艺缺陷相关失效机理

材料本身的固有缺陷和工艺参数偏离设计等，是促使

材料与工艺缺陷相关失效的主要因素，也是导致器件性能退化或早期失效的重要诱因^[4]。基于破坏性物理分析视角，可以将材料与工艺缺陷相关失效机理划分为以下三种类型：①材料固有缺陷与微观结构不均匀性。半导体材料、金属互连线和绝缘介质的特定物理特性，与电子元器件的核心功能息息相关，但晶格畸变、杂质偏聚等材料内部预存的微观缺陷，会在外部载荷下演变为失效核心，加速失效进程，如位错堆积引发微裂纹、金属互连线中Cu、Sn界面金属间化合物层厚度不均引起电阻异常升高、焊料合金冷却速率失控形成非晶相。破坏性物理分析可以实现对这些缺陷的有效诊断：利用透射电镜（TEM）衍射斑点分析，可以基于晶面间距偏差 $> 0.02\text{nm}$ 的预判标准，识别晶格畸变；利用电子探针（EPMA）成分扫描，可以基于局部杂质浓度 $>$ 基体10倍的预判标准，识别杂质偏聚；利用X射线衍射（XRD）物相定量，可以基于非平衡相占比 $> 15\%$ 的预判标准，识别相分布异常。②工艺过程缺陷与参数控制失效。一旦制造工艺参数偏离设计窗口，便会在极大程度上致使关键结构未达到预期性能，故而，制造工艺的精准控制对电子元器件的可靠性至关重要。一般情况下，若溅射镀膜环节腔室真空度 $> 5 \times 10^{-3}\text{Pa}$ ，则会导致金属膜层孔隙率 $> 3\%$ ，电阻漂移；若回流焊接环节峰值温度 $> 250^{\circ}\text{C}$ 或 $< 220^{\circ}\text{C}$ ，则会出现虚焊、IMC过厚的情况；若塑封成型环节固化压力 $< 4\text{MPa}$ ，则会导致内部气泡率 $> 0.1\%$ ，引发分层。破坏性物理分析通过X射线检测焊接孔洞、SAT扫描界面分层，可实现对异常区域的有效锁定，进而可以确定工艺缺陷类型。③杂质与污染引入的可靠性退化。电子元器件制造过程中引入的微量杂质、环境污染物等，可以通过改变材料电学特性、催化化学反应的方式，切实降低元器件可靠性。通常情况下，铜、钠等金属离子会在半导体器件中形成深能级陷阱，增加漏电流，或引发阈值电压漂移；钠离子可从封装材料、工艺设备中引入，在高温或电场作用下迁移至芯片表面，与二氧化硅中的硅结合形成导电通道，致使绝缘失效；封装过程中的水汽残留会在高温下形成蒸汽压力，加剧塑封料和芯片间的分层。破坏性物理分析视角下，二次离子质谱可检测材料深处的杂质元素分布、电感耦合等离子体质谱（ICP-MS）可定量分析杂质浓度、环境试验后结合SEM观察腐蚀形貌可验证污染物的失效贡献。破坏性物理分析通过微观尺度证据精准定位失效的源头环节，可以为材料选择、工艺优化和设计改进等提供不可替代的科学依据。

3.3 电应力与环境应力耦合失效机理

电子元器件实际应用环境中，电应力与环境应力耦合失效是典型模式。从破坏性物理分析的角度来看，电应力与环境应力耦合失效并非电应力或环境应力的独立作用，而是二者通过物理机制以及化学机制相互增强，致使材料性能退化加速、缺陷扩展阈值降低、失效模式复杂化。该失效机理可以划分为以下两种类型：①电-力耦合应力下的机械结构失效。环境机械应力和电负荷同时作用时，会致使封装结构

的机械载荷显著增加,从而引发裂纹萌生、扩展。如连接器在高频电流下产生的电磁力和机械振动的共同作用下,镀层和基底金属的结合界面会产生剪切应力,导致镀层剥落或微裂纹;引线键合线在温度循环引发的热膨胀位移和大电流电惯性力协同作用下,会令线弧根部承受拉压-弯曲复合应力,优先发生断裂。破坏性物理分析视角下,利用扫描电子显微镜可观察显示键合线根部裂纹拓展路径、利用动态力学分析仪(DMA)验证材料在电-力复合载荷下的疲劳寿命^[1]。

②电-热耦合应力下的材料性能退化与击穿。若电子元器件承受高电负荷,则所引发的焦耳热效应、开关损耗等,会导致局部温度显著升高。同时,高温环境会进一步放大电负荷的热效应,形成“电生热-热加剧电效应”的正反馈循环。如互连线在大电流密度与高温共同作用下,原子迁移速率呈指数级增长,阳极侧空洞快速扩展导致断路;功率器件的栅极氧化层在高温与高栅压协同作用下, SiO₂ 介质中的陷阱电荷加速积累,导致电场分布畸变,局部电场强度超过材料本征击穿场强的临界阈值,引发氧化层击穿。破坏性物理分析视角下,利用能谱分析可以揭示高温下金属互连线界面生成的氧化层增厚、利用透射电子显微镜可观察显示氧化层中陷阱电荷聚集形成的缺陷簇。破坏性物理分析通过微观尺度证据揭示了耦合应力的交互路径与失效物理本质,为可靠性设计和应用环境适配提供了关键科学依据。

4 基于破坏性物理分析的失效溯源方法优化策略

电子元器件的传统失效方法往往停留在现象描述、简单归因层面,不能对根本原因进行精准溯源。破坏性物理分析视角下,需要构建系统化、层次化的分析流程,进而实现对失效机理的精准定位。首先,可以从宏观特征分析、微观形貌解析、成分深度剖析和结构完整性评估四个维度入手,搭建多维度证据链。从宏观特征分析的视角来看,要主动利用外观检查、X-ray 透视、声学扫描显微镜等技术,确定失效位置、模式,建立失效的第一现场证据;从微观形貌解析

的视角来看,要利用扫描电子显微镜、聚焦离子束切片等技术,观察失效区域的微观结构特征,揭示失效的物理形态;从成分深度剖析的视角来看,要利用能谱分析、二次离子质谱、电感耦合等方法,确定关键区域的元素分布与杂质浓度,特别是迁移性离子的分布特征;从结构完整性评估的视角来看,要利用透射电子显微镜等技术,分析晶体结构缺陷、界面结合质量与材料相组成。通过搭建多维度证据链,可有效避免单一证据的误判。其次,要结合大量 DPA 案例数据,建立电子元器件失效模式数据库,即要按照材料类型、器件结构、应用环境等维度,系统分类常见失效模式,且建立不同失效特征与潜在失效机理的对应关系规则库,从而实现从个案分析到系统归因的有效跨越。^[6]

5 结语

新时期,电子元器件的可靠性挑战日益严峻。本文基于破坏性物理分析视角,对电子元器件的失效机理和失效溯源方法优化策略进行了分析,可以为可靠性设计、制造工艺优化、质量控制提供靶向依据。未来,要持续深耕失效机理研究,切实增强电子元器件可靠性。

参考文献

- [1] 王爽,周钦沅. 电子元器件破坏性物理分析方法国内外发展趋势[J].标准科学,2025,(S1):227-232.
- [2] 刘飞,赫兰齐,叶峻豪,等. 基于2.5D/3D封装集成电路的破坏性物理分析(DPA)方法研究[J].产业科技创新,2024,6(05):125-128.
- [3] 戴晨阳,王文辉,楼艳仙,等. 破坏性物理分析(DPA)技术对国产电子元器件质量保障的作用[J].工业控制计算机,2024,37(05):135-136+139.
- [4] 张庆瑞. 浅谈军用航空电子元器件的破坏性物理分析和质量控制[J].中国设备工程,2024,(06):153-155.
- [5] 杨智帆,阳川,李凌博,等. 基于破坏性物理分析的假冒翻新器件识别方法[J].电子产品可靠性与环境试验,2022,40(04):47-51.
- [6] 于春宏,贾兴辉,朱涛. 电子元器件失效分析及发展探究[J].电子元器件与信息技术,2025,9(04):32-34. DOI:10.19772/j.cnki.2096-4455.2025.04.009.