

# 塑封电子元器件温度失效机理研究

路浩天, 卢晓青, 蔡良续

(中国航空综合技术研究所, 北京 100028)

**摘要:**应用非破坏性检测技术和破坏性显微分析技术对塑封电子元器件在温度循环试验中发生的失效进行了分析,通过研究缺陷发展的过程并结合现有检测标准要求,提出了对器件设计改进和完善现有检测标准的建议。

**关键词:**塑料封装; 温度效应; 缺陷

**中图分类号:** V216.5      **文献标识码:** A

**文章编号:** 1672-9242(2012)06-0036-04

## Study on Temperature Effect of Plastic Encapsulated Microcircuit

LU Hao-tian, LU Xiao-qing, CAI Liang-xu

(China Aero-polytechnology Establishment, Beijing 100028, China)

**Abstract:** Failure analysis of plastic encapsulated microcircuit in temperature recycle test was carried out by using non-destructive technique and destructive microscopy analysis technique. The development of defects was studied. Suggestions were put forward on improvement of device design and existing standards.

**Key words:** plastic encapsulated; temperature effect; defects

随着硅单芯片集成度不断提高, I/O 引脚数急剧增加, 其功耗也随之增大, 对集成电路的封装技术提出了更高的要求。尚未封装的半导体器件是十分脆弱的, 金属化图形非常薄, 甚至正常操作都容易使其受到损伤。同时, 由于输入、输出引出端开路, 电荷对地没有任何通路, 使得芯片对静电放电损伤 (ESD) 非常敏感, 因此集成电路必须用封装的方法进行保护才能投入实际使用。在保护芯片的同时, 封装中的缺陷在环境应力的作用下也会使元器件的性能和功能出现异常, 因此研究塑封电子元器件的

温度效应就显得非常重要。

封装形式包括含有腔体的封装和非腔体封装两类, 其中腔体封装包括金属壳封装、陶瓷腔体封装等方式, 非腔体封装则包括塑封、二氧化硅实体封装等形式。金属、陶瓷封装的电子元器件采用气密结构, 可以在相当长的时间内防止污染物的侵入。无论液体、固体和气体, 都无法对其内部结构造成腐蚀等损伤, 在低温下也可减少由液态水造成的失效发生。这些特点非常有利于提高电路特别是有源器件的可靠性。然而, 这类封装工艺复杂、成本较高、生产效

收稿日期: 2012-09-01

作者简介: 路浩天(1982—), 男, 北京人, 硕士, 工程师, 主要从事电子产品检测与失效分析研究。

率相对较低、传热途径单一、体积较大,影响了其进一步的发展。塑封元器件与气密元器件相比,成本明显降低,生产效率较高,芯片尺寸封装(CSP)已经可以使封装面积小于等于芯片面积的1.2倍,体积明显缩小。塑封元器件导热通路包括经过封装底板、引线的热传导和通过塑料传至空气的对流方式。模塑料的热导率较低,虽然Emerson & Cuming生产的Stycast 2851KT在常用的包封材料中热导率相对较高,却只能达到 $2.8 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ,与 $\text{Al}_2\text{O}_3$ (热导率 $17 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ )等材料存在较大差距。制造商通过外露管芯焊盘等方法使其导热能力明显增强,但仍需进一步提高<sup>[1]</sup>。塑料封装为非气密封装,会使水汽或其他污染渗透到电路元件中;同时,内部结构界面,尤其是转角部位,常常存在缺陷。这些问题对元器件可靠性的影响,学术界目前尚无定论,各类检测标准中的判据也多基于统计方法,所以通过物理检测的方法评价塑封元器件的损伤机理就显得尤为重要。

## 1 分析方法

为了研究缺陷的发展,需要使用非破坏性检测手段对样品进行研究,并对失效样品使用破坏性手段进行解剖分析<sup>[2]</sup>。对非腔体封装样品进行非破坏性分析的主要检测方法主要包括C-SAM和X射线DR/CT<sup>[3]</sup>。对于X射线检测方法,图像衬度的产生,依赖于样品的密度。塑料封装材料与内部金属结构的衰减系数差距巨大,塑料封装的裂纹、空洞等缺陷在X射线穿透样品的同时,衬度就会降低到无法被观测到的程度,造成缺陷的漏检。传统的射线造影方法,多针对单一材料或密度差相对较低、同时缺陷尺寸相对较大的样品,例如人体造影所用的碘剂、钆剂等。使用注射等方法将造影剂注入需要造影的空间,但是这些造影剂与注入方法对于电子元器件来说,都无法达到满意的衬度。在试验过程中使用金属氧化物造影剂和真空渗透的方法对样品缺陷部位进行造影分析,对开放型缺陷的裂纹深度、宽度、扩展方向等进行观察。C-SAM检测方法,主要用于检测样品内部分层的情况,包括塑封材料与基板、框架等界面的缺陷<sup>[4-5]</sup>。为了对样品温度效应进行研究,对样品进行了温度试验。为排除温度试验过程中封装吸水和分层处水汽对样品造成影响<sup>[6]</sup>,在每次进行

C-SAM后,将样品放入干燥皿内,干燥72 h后,再进行下一轮温度循环试验。

## 2 试验过程及数据

### 2.1 温度应力对分层缺陷的影响

塑封元器件内部经常存在分层缺陷,在GJB 4027A—2006《军用电子元器件破坏性物理分析》工作项目2.4.3节中规定了使用C-SAM方法对塑封元器件检测的6个界面,其中c条规定了对基板边缘正面与塑封材料的界面进行检测。然而在2.4.4节中却未对该界面的缺陷判据作出明确的说明<sup>[7]</sup>,该处确实出现分层现象较多的区域。在对100只74LS245塑封集成电路的试验中发现,30%以上的样品在该界面存在缺陷。关键是研究这些缺陷是否会扩展,造成样品的最终失效。

为了研究缺陷的扩展,对样品进行 $0\sim 85\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度冲击试验<sup>[8]</sup>。温度冲击液体介质为全氟聚醚,每进行一次温度冲击,对样品进行C-SAM检测和电性能测试。所有存在缺陷的样品,经过温度试验后都发生了分层缺陷的扩展,但除个别样品外,多数样品在经过3~4次试验后,缺陷就会停止扩展;同时,缺陷范围停留在基板范围内,典型C-SAM图像如图1所示。这时,缺陷对样品的电性能不会造成任何影

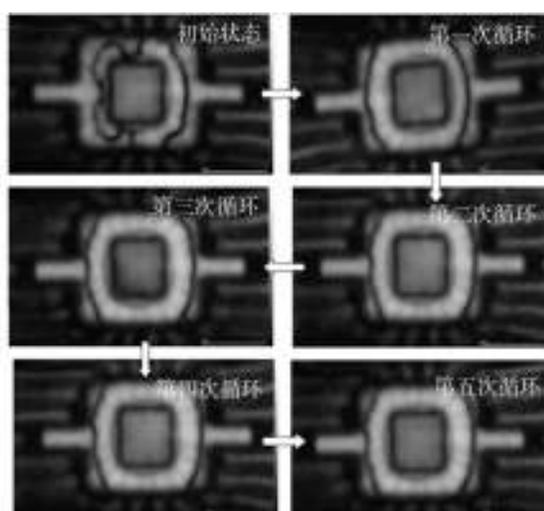


图1 温度循环后器件典型分层发展C-SAM图像

Fig. 1 The C-SAM images of typical hierarchical development of component after temperature cycle

响。在筛选过程中,使用类似的试验方法,通过对少量样品进行试验,确定缺陷发展的边界条件,就可以为筛选条件的选择提供客观依据,非常有利于提高筛选的效率。

### 2.2 温度效应对键合线损伤

在与温度相关的环境试验中,经常出现元器件在高温或低温状态下参数漂移而开路、常温下恢复正常的情况。这些情况的发生一方面可能与界面层的水汽有关<sup>[9]</sup>,另一方面还与热膨胀系数不匹配有关。目前,某些研究认为硅片与塑封材料热膨胀系数相差较大(塑封材料约为  $25 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,硅约为  $2.3 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ),热膨胀系数不匹配,会造成样品芯片表面的损伤,造成最终失效<sup>[10]</sup>。在试验中发现由于键合线包埋在封装材料中,热膨胀系数的不匹配会使界面处键合线反复受力,形成疲劳断裂。在变化早期,由于反复作用,受力处裂纹逐渐萌生,低温状态时,分层距离变大,接触面积变小,甚至断开,造成参数偏移或开路。恢复至常温后,分层尺寸变小,键合线裂纹处碰触恢复连接,电性能和功能恢复正常。上述试验中电参数出现低温异常、常温恢复现象的样品,开帽后内部SEM图像如图2所示。图2a是该芯片的低倍照片,清晰地反映了该器件有键合点断裂,而该键合点对应的引脚正是电性能异常的引脚;图2b为断口形貌,从图中可以看出裂纹从右下角处萌生,裂纹扩展区有相互平行的疲劳条带,条带宽度随裂纹的发展而增大。靠近瞬断区有二次裂纹产生,断口有河流状解理花纹,瞬断区较光滑,此断口具有明显的疲劳断裂特征。

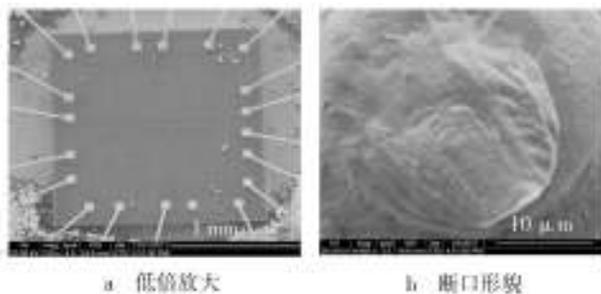


图2 低温电参数异常样品内部SEM形貌

Fig. 2 The SEM images of sample interior with abnormal low temperature electrical parameters

### 2.3 硅橡胶灌封器件的温度效应

目前,电源模块、隔离放大器等复杂的器件多采用硅橡胶灌封,以保护和固定内部连接线及其它结构,同时增加散热通道。这些特性与塑封器件完全相同。然而,有些类型的硅橡胶在固化过程中会发生收缩,从而在内部产生应力。这类器件内部有着许多不同界面,在正常温度下,硅橡胶在各界面处有较强的粘结力,粘结力与内应力保持平衡,不会造成分层等现象的出现;在低温条件下,硅橡胶材料会发生收缩,并且在温度低于  $T_g$  后,硅橡胶会转变为玻璃态,失去原有的弹性,界面处原有的连接失效;当温度恢复常温后,硅橡胶恢复弹性,由于没有界面处的拉力平衡内应力,橡胶在内应力作用下收缩,从而出现较大尺寸的开裂。如果有连接线穿过该处,就有可能在两侧封装材料的拉力作用下发生断裂。

一只失效的隔离放大器X射线三维CT结构如图3所示。该样品在  $-75 \text{ } ^\circ\text{C}$  条件下出现输出异常。通过对样品进行高倍放大DR分析,发现输入端4根线圈引出线中的1根存在断裂现象,此处断裂直接造成器件的输出电压异常,如图4所示。

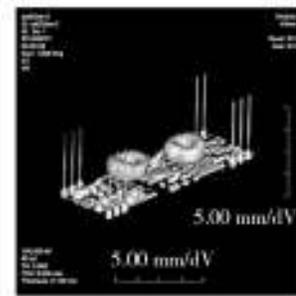


图3 样品内部三维CT结构

Fig. 3 The three-dimensional CT of internal structure of the sample



图4 线圈输入端断线DR分析

Fig. 4 DR pictures of the fracture of input coil

使用光学显微镜对解剖后的失效样品进行观察,发现失效样品内部断线对应线圈外包裹的光滑塑料外套与硅橡胶灌封材料存在明显开裂现象,断线处垂直上方裂缝宽度可达  $282\ \mu\text{m}$ 。同一线圈对侧位置未发现类似现象,如图5所示。

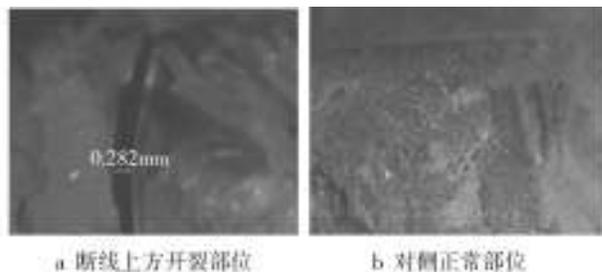


图5 失效样品内部开裂

Fig. 5 Interior cracking of the failure sample

对样品进行进一步解剖,剥离出断线断口,使用扫描电子显微镜对断口进行分析。断口呈现明显的应力积累损伤特征,说明该断裂是在多次应力的作用下产生的,断口形貌如图6所示。综合分析表明,该样品是由于低温条件下灌封料收缩产生应力,造成灌封料与光滑的线圈包覆层之间开裂。由于线圈引出线固定于封装材料中,应力直接作用于线圈引出线。在温度循环过程中引出线所承受的应力超过其强度,多次积累损伤使引出线断裂,造成器件失效。

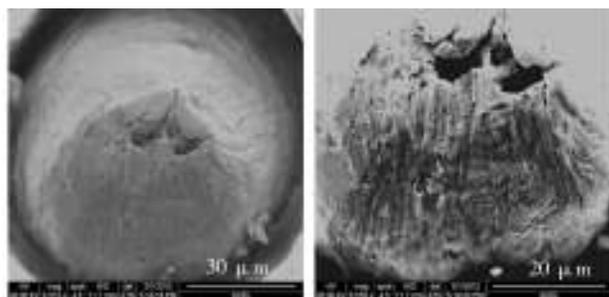


图6 失效样品内部断线断口

Fig. 6 The fracture of broken wire in failure sample

由于硅橡胶内应力的存在,造成分层极易沿各界面扩展。通过使用一些刚性材料隔断连续界面,可以很好地抑制分层的发展。通过使用X射线造影剂和真空渗透方法,对封装材料与引脚存在分层的样品进行X射线图像增强分析,发现封装材料的开

裂只延伸到引脚固定隔框附近就停止扩展,未延伸至内部主要功能区,有效保护了内部结构。引脚造影前与造影后如图7所示。

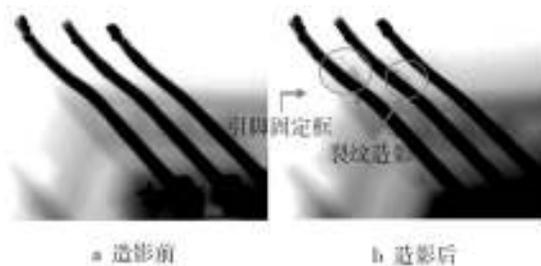


图7 失效样品引脚DR图像

Fig. 7 DR images of pin of failure sample

### 3 结论

通过以上案例对塑料封装电子元器件的温度效应进行了分析和研究,得到了以下结论。

1) 对于塑封电子元器件中存在的界面分层缺陷,虽然其在环境应力作用下会发生扩展,但这种扩展在经过一定的试验后会达到极限。这种特征可以应用于塑封电子元器件的筛选过程,提高产品的可靠性。

2) 热膨胀系数不匹配会使界面处产生应力,如果键合线穿越分层界面,那么在温度应力的作用下,会使键合线发生疲劳断裂,使器件出现功能、性能的异常。因此,在检测中需要对这类缺陷特别注意。

3) 硅橡胶灌封器件中,由于灌封材料内部存在收缩产生的内应力,在低温条件下容易在光滑界面处发生分层,造成失效。因此,在使用此类器件时,必须要注意使用温度极限,防止分层的发生。同时对于自行生产的灌封组件,可以在一些连续界面处设置加强框等分隔结构,阻止缺陷的扩展,提高产品的安全性。

#### 参考文献:

- [1] 查尔斯 A 哈珀. 电子封装材料与工艺[M]. 沈卓身, 贾松良, 译. 北京: 化学工业出版社, 2006: 539—585.
- [2] 宋芳芳, 牛付林. 塑封电子元器件破坏性物理分析方法[J]. 可靠性物理与失效分析技术, 2004, 10(5): 52—55.
- [3] 林湘云, 徐爱斌. 塑封器件无损检测技术探讨[J]. 可靠性

(下转第 43 页)

将式(3)两边取对数,由6种加速腐蚀时间的( $D_{50}, t$ )的数据进行线性回归,可得 $A=6.104, n=0.9736$ 。

$$D=6.104t^{0.9736} \quad (4)$$

由于蚀孔的出现,导致大面积阴极和小面积阳极(孔底)的盐酸腐蚀(蚀孔附近的外表面因发生阴极氧还原反应,使它不受腐蚀,甚至可能钝化),使孔底腐蚀愈来愈严重,形成自催化过程。从而有图5中铝单丝腐蚀深度随腐蚀年限逐年增加的现象。

### 3 结论

1) 在宁波地区的加速腐蚀环境下,年腐蚀质量损失速率在前5年的变化比较剧烈,前3年腐蚀速率有增加的趋势,3年后开始降低,5年后趋于稳定,特别是在7年后腐蚀达到饱和,铝丝不再腐蚀。

2) 腐蚀深度随着腐蚀年限的增加而增加,可以判定该铝单丝的腐蚀模式为典型的点蚀。年腐蚀深度速率在前4年变化比较缓慢,但在第5年增加很快,第6年又趋于缓慢。

比较结论1)和2),年腐蚀质量损失速率在第3年达到最大,而年腐蚀深度速率在第5年达到最大,说明3年后铝丝的腐蚀主要向深度方向发展。这种发展的后果将较大地影响材料的抗疲劳性能;综合1)与2),腐蚀质量损失和腐蚀深度二者有一定的相关性,但规律不尽一致。

综上所述,在为宁波地区选用输电铝导线时,应基于当地腐蚀试验环境谱和输电导线腐蚀动力学

规律,选用抗腐蚀性能好的铝导线。如文献[7]所述的超耐腐蚀导线,在福建平潭岛上就取得了很好的效果。也可以根据输电导线腐蚀动力学规律,及时检修并更换腐蚀失效的输电导线。

#### 参考文献:

- [1] HATCH J E. Aluminum Properties and Physical Metallurgy [M]. Ohio: Metals Park, 1984.
- [2] 刘文珽,李玉海. 飞机结构日历寿命体系评定技术[M]. 北京:航空工业出版社,2004.
- [3] 杨晓华,姚卫星,陈跃良. 加速疲劳寿命试验在飞机结构日历寿命研究中的应用[J]. 腐蚀科学与防护技术,2002, 14(3):172—174.
- [4] 杨晓华,张珂. 宁波地区当量加速环境谱的编制[J]. 装备环境工程,2010,7(4):76—80.
- [5] 蒋祖国. 飞机结构腐蚀疲劳[M]. 北京:航空工业出版社,1992.
- [6] 吴大方,刘文珽. 耐久性分析中疲劳断口 CCD 图像处理技术的研究[J]. 航空学报,1998,19(4):410—413.
- [7] 黄豪士,江建华. 超耐腐蚀型导线及其在平潭岛输电线路上的应用[J]. 电线电缆,2012(2):1—4.

(上接第39页)

- 物理与失效分析技术,2008,26(6):25—27.
- [4] 肖诗满,彭泽亚. 声扫检测中易误判的塑封器件的验证方法[J]. 可靠性物理与失效分析技术,2010,28(6):46—48.
  - [5] 古关华. 用扫描声学显微镜进行塑封器件的封装分层分析[J]. 可靠性物理与失效分析技术,2004(2):14—16.
  - [6] 刘慧丛,邢阳,李卫平. 湿热环境下湿度对塑封器件贮存可靠性的影响[J]. 北京航空航天大学学报,2010,36(9):

1089—1093.

- [7] GJB 4027A—2006, 军用电子元器件破坏性物理分析方法[S].
- [8] 李树桢,晓阳,同敏. 基于温度循环的ALT技术在电子产品中的应用[J]. 装备环境工程,2009,6(6):73—77.
- [9] 赵树峰,庞兴收,姚晋钟. 塑封胶吸湿对器件分层影响的研究[J]. 电子工业专用设备,2008(7):4—9.
- [10] 张鹏,陈亿裕,刘建. 热膨胀系数不匹配导致的塑封器件失效[J]. 电子与封装,2007,7(4):37—39.