电子产品可靠性评价与物理模型应用探讨

支越,孙大鹏,王之哲,罗宏伟

(工业和信息化部电子第五研究所,广东广州 510610)

摘要:该文以电子产品的故障为出发点,从集成电路-封装、集成电路-芯片、电路板(或线路板)、电子元件、系统和多系统的角度论述了不同任务环境下电子器件的故障机理特点。系统论述了故障模式、影响及危害性分析(FMECA)和故障模式、机理与影响分析(FMMEA)两种故障机理分析方法,同时结合低周疲劳、高周疲劳、裂纹萌生、反应论模型、芯片失效等失效机理对故障物理元模型进行分类讨论,对电子产品可靠性评价与物理模型应用进行了系统的探讨,为电子产品可靠性评价及失效物理评估模型的选取提供了依据。

关键词:电子产品;可靠性;故障机理分析;失效物理

中图分类号:TN60;V461 **文献标识码:**A **DOI:**10.11977/j.issn.1004-2474.2019.04.033

Study on Reliability Evaluation and Physical Model of Electronic Products

ZHI Yue, SUN Dapeng, WANG Zhizhe, LUO Hongwei

(The Fifth Institute of Electronics of Ministry of Industry and Information Technology, Guangzhou 510610, China)

Abstract: In this paper, the failure mechanism characteristics of electronic devices under different service environments for package, chip, circuit board, electronic components, systems and multiple systems are discussed. The analytical methods for failure mechanisms such as FMECA and FMMEA have been studied. The failure physical models are classified and discussed in combination with failure mechanisms such as low cycle fatigue, high cycle fatigue, crack initiation, reaction theory model, and chip failure. The reliability evaluation of electronic products and the application of physical models are systematically discussed, which provides a basis for the reliability evaluation of electronic products and the selection of failure physical models.

Key words: electronic products; reliability; failure mechanism analysis; failure physics

0 引言

随着电子系统的快速增长,半导体器件失效机理和模型选取依据成为电子行业的迫切需求。目前电子设备发展迅速,电子产品容量越来越大,生命周期越来越短,封装形式也在不断变化。相同的封装可以包封类型和容量完全不同的器件,同一个器件也包括几种不同的外形。不同供应商的半导体器件形式、材料、结构种类繁多,其对应的失效隐患也多样,包括点迁移、腐蚀、与时间相关的介质层击穿、热载流子注入、软误差等。

在进行电子产品可靠性评价与物理模型应用时,需要先了解电子产品和产品经历的任务,即内因不确定性和外因不确定性。内因不确定性是指在由于工艺误差等因素导致的产品参数波动,包括尺寸、材料和特性参数。外因不确定性是指同一批次电子产品在使用过程中由于完成的任务不同,使用的地

区、季节不同,用户使用方式不同而导致产品经历的环境应力具有不确定性。根据电子产品业界的要求,迫切需要基于以上信息对产品的失效机理与失效模型进行限定。

本文首先以电子产品的故障为出发点,从集成电路-封装、集成电路-芯片、电路板(或线路板)、电子元件、系统和多系统的角度论述了不同任务环境下电子器件的故障机理特点;然后,系统论述了故障模式、影响及危害性分析(FMECA)和故障模式、机理与影响分析(FMMEA)等故障机理分析方法;最后,对故障物理元模型进行梳理和探讨,为电子产品可靠性评价及失效物理评估模型的选取提供了依据。

1 电子产品的故障机理

1.1 集成电路-封装相关故障机理

集成电路-封装相关的故障机理主要关注封装中相关基本互连、密封、载体构件的故障问题。因此

收稿日期:2019-07-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61804032);广州市科技计划基金资助项目(201904010457)

作者简介:支越(1966-),男,江苏镇江人,高级工程师,博士,主要从事电子元器件检测与质量管理的研究。王之哲(1988-),男,浙江金华人,高级工程师,博士,主要从事元器件可靠性评价与失效分析的研究。

国内外开展了大量的研究。Men 等^[1]提出了一种用于球栅阵列封装焊点热疲劳寿命预测的疲劳裂纹扩展模型。陈颖等^[2]建立了球栅阵列封装焊点的三维有限元模型,通过分析焊点应力分布和预测焊点热疲劳模型,实现焊点寿命的快速工程估算。

整体看来,故障机理主要分为以下几类:

1) 引线键合互连主要为拉伸疲劳、剪切疲劳、金属间化合物、柯肯达尔效应、SDDV、应力迁移、腐蚀等热疲劳。

2) 焊球互连主要为热疲劳、蠕变、振动疲劳、电迁移、金属间化合物、柯肯达尔效应。

3) 塑封料主要为腐蚀、爆米花效应、热膨胀系数不匹配及 α 射线软误差等。

4) 硅芯片主要为芯片疲劳脆断、铝电极腐蚀等。

5) 芯片粘结胶主要为粘结层疲劳断裂等。

1.2 集成电路-芯片相关故障机理

集成电路-芯片相关的故障机理主要关注芯片内部的故障问题。陈颖等^[3]研究了芯片粘接层材料、粘结层厚度、粘结层空洞的面积、空洞的位置对芯片温度分布以及芯片最高温度造成的影响。总体看来,芯片相关故障主要包括热载流子注入、TD-DB、NBTI、界面效果、电迁移、金属间化合物、柯肯达尔效应、ESD 击穿及二次击穿等。故障机理如表 1 所示。

表 1 集成电路-芯片相关的故障机理

部位	故障机理	诱发外因	故障模式
CMOS 芯片互连线	电迁移	电流密度、温度	互连线开路
双极型芯片	热载流子	电压、温度	电流增益下降、PN 结击穿电压蠕变
MOS 器件	热载流子	电压、温度	平带电压, 阈值电压漂移, 跨导减小
MOS 器件	与时间相关的栅氧层击穿	电压、温度	氧化层击穿、短路
PMOS 器件	负偏压温度不稳定	负偏栅压、温度	逻辑电流信号延时增加、阈值电压增加
介质膜和铝线	界面效应	温度	PN 结短路
PN 结与 Si/SiO ₂ 界面	界面效应	温度	PN 结短路
金引线与铝互连线	金与铝的金属间化合物	温度	接触电阻增加, 开路失效
金铝键合处	金与铝的柯肯达尔效应	温度	空洞, 铝膜脱落, 高阻或者开路
PN 结	二次击穿	电压、温度	PN 结短路
PN 结	ESD 损伤	静电	PN 结短路
连线	ESD 损伤	静电	击穿短路
多晶硅电阻	ESD 损伤	静电	击穿放电短路
删氧化层	ESD 损伤	静电	击穿

1.3 电路板(或线路板)故障机理

电路板(或线路板)的故障机理主要关注板级的故障问题。Chen 等^[4]介绍了在单板机上实现可靠性增强试验的过程,包括应力分析、测试程序的设计、监测参数的确定、数据的采集和分析。陈颖等^[5-8]分析了 PBGA 焊点设计及环境温度参数对其可靠性的影响;对目前制造过程镀通孔(多层印刷线路板各层提供电导通的结构)失效的机理与物理模型的研究现状进行总结;以某实验板为例进行了实例分析,并对剩余寿命进行了预测;基于镀通孔应力分布模型,定量地研究了镀通孔线路板厚度与镀通孔直径之比(高径比)、镀通孔半径与镀层厚度之比、线路板有效作用半径与镀通孔半径之比等几何设计参数以及线路板玻璃化温度对镀通孔镀层应变及寿命的影响。通过引入等效温度载荷,给出了不同玻璃化温度下的应力分布模型。

总体来看,板级故障主要表现为镀通孔热疲劳,导电阳极细丝,晶枝生长,锡须,银迁移,腐蚀等。

1.4 电子元件故障机理

电子产品中应用到了大量的电子元件,包括电阻器、电连接器、电解电容器、陶瓷电容器、贴片电阻、固态钽电容器等。在评估电子产品的可靠性时,电子元件的故障机理不容忽视。Wang 等^[9]采用考虑传递率因子的 Steinberg 振动疲劳模型预测电子元件的剩余寿命。Chen 等^[10]提出在一个元件先失效的情况下,随着时间的推移,主备用元件和热备用元件的瞬态失效概率和累积失效概率均会发生变化。

总体看来,电子元件的故障机理主要表现为电阻值退化、固态钽电容退化、电解液干涸、介质击穿、接触退化、介质氧化膜晶化、热膨胀系数不匹配、银离子迁移、电化学腐蚀等。

1.5 系统和多系统故障机理

系统和多系统的故障机理涉及到多种故障机理的竞争、累加、促进、抑制等关系。对于此类故障机理的处理方法多样,由于侧重点不同,也各有利弊。

Chen 等^[10-11]提出了两种失效机制的累积规律,同时还提出了一种改进的基于层次二元决策图的 MS-PMS 可靠性建模与分析方法,以及一种改进的二元决策图和多状态多值决策图(MMDD)模型相结合的方法,用于多状态系统的状态概率评估和可靠性分析。Cao 等^[12]从失效机理的特点出发,研究了失效机理相关性的分类,推导了各单一失效机理相关性的可靠性数学模型,研究了基于可靠性框图的考虑失效机理相关性的电子产品系统可靠性建模方法。Yu 等^[13]介绍了将相似产品法与试验法相结合进行贮存可靠性评估的方法。Chen 等^[14]采用一种考虑功能相关元件失效机理行为的可靠性评估方法。

2 故障机理分析方法

故障机理分析方法包括 FMECA 和 FMMEA,国内外对两种分析方法开展了大量研究。Chen 等^[15-16]对现有的故障模式数据库进行了综述,然后提出了一种基于知识的故障模式管理方法,以便对故障模式进行有效利用;阐述了 FMECA 研究与工程应用现状,同时提出了一种新研航空电子产品硬件综合 FMECA 方法。Zhang 等^[17]提出了一种新的仿真辅助 FMEA 方法,并给出了具体步骤。Chen 等^[18]引入 FMMEA 来得到失效模式、失效机理和失效物理模型,可计算可靠性参数(如故障率和 MTBF)。任占勇等^[19]对产品进行 FMMEA,得到所有潜在故障点的故障模式、机理与对应的物理模型。利用产品材料、结构、工艺、应力等参数建立产品的仿真数字模型,并进行应力分析;利用概率故障物理(PPoF)模型进行损伤分析,得到各潜在故障的寿命分布;最后利用时间竞争的原理对其进行数据融合,得到产品故障率、平均故障间隔时间(MTBF)等可靠性指标。陈颖等^[20-22]根据各阶段应力和环境条件对系统及所有元器件进行 FMMEA 分析,确定系统各元器件在各阶段的主要故障机理及其相关关系;同时,提供一种基于 SBDD 模型的冷储备系统故障行为建模方法;另外,提供了一种基于贝叶斯网络和深度学习算法的故障机理智能分析方法。

FMMEA 是一种系统的分析方法,它是 FMECA 向故障机理层的延伸,通过分析故障的内因和外因,确定产品故障机理并量化其风险的方法。FMMEA 分析基于电子元器件故障机理对应的数据库,提炼推断逻辑关系规则,建立信息不完整情况下的故障推理过程,经算法训练集的深度学习,可以提供条件概率表、联合树推理引擎、贝页斯网络拓扑,最终给出故障机理的智能推理结果。

3 故障物理元模型

从失效机理的特点出发,对单机理、多机理相关性的可靠性数学模型进行分类,常用模型如下。

3.1 低周疲劳模型

3.1.1 焊球/焊柱/引脚/芯片粘接层等热疲劳

$$N_f^{\text{solder}} = \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta\gamma_p}{2\varepsilon_f} \right)^{\frac{1}{C}} \quad (1)$$

式中: N_f^{solder} 为焊球/焊柱/引脚/芯片粘接层的失效平均循环次数; $\Delta\gamma_p$ 为非弹性应变范围; ε_f 和 C 为材料常数。

3.1.2 金-铝键合热疲劳

$$N_f^{\text{Au-Al}} = A_0 (\Delta T)^{-q} \quad (2)$$

式中: $N_f^{\text{Au-Al}}$ 为金-铝键合失效平均循环次数; ΔT 为温度变化范围; $A_0 = 7.3548 \times 10^6$ 为常数; q 为温度循环指数,软金属取值 1~3,典型值为 2。

3.2 高周疲劳模型

引线振动疲劳/焊柱/键合点振动疲劳:

$$L(V) = \frac{1}{MV^n} \quad (3)$$

式中: $L(V)$ 为产品寿命; V 为加速度均方根值; $n = 3.2$; M 为材料相关的常数。

3.3 裂纹疲劳模型

根据疲劳理论,疲劳寿命可以认为是疲劳裂纹形成寿命和疲劳裂纹传播寿命的和。Darveaux 模型是一个包含 4 个参数,描述失效时的循环次数和每次循环积累的平均应变能密度之间关系的模型。Darveaux 本构模型一般用于材料属性为时间无关塑性和时间相关蠕变的情况,所以,最终选用该模型来预测焊点的疲劳寿命。

Darveaux 模型可写成如下形式:

$$\alpha_w = N_0 + \frac{a}{da/dN} \quad (4)$$

式中: α_w 为特征寿命; a 为焊点直径(即最终裂纹的长度); N_0 为出现裂纹时的循环次数; da/dN 为裂纹的传播速度。与裂纹扩展相关的数据包括:

裂纹萌生:

$$N_0 = K_1 \Delta W_{\text{ave}}^{K_2} \quad (5)$$

裂纹扩展:

$$\frac{da}{dN} = K_3 \Delta W_{\text{ave}}^{K_4} \quad (6)$$

式中: ΔW_{ave} 为平均应变能密度; K_1 、 K_2 、 K_3 、 K_4 为 4 个参数。

3.4 反应论模型

Arrhenius 模型是与温度相关的寿命模型,一般只用于评估当温度为主要老化因素时的情形。该

模型的反应速率方程:

$$L(T) = P e^{\frac{E_a}{kT}} \quad (7)$$

式中: L 为平均寿命; P 为待定模型参数; E_a 为激活能; k 为玻尔兹曼常数; T 为绝对温度值。

3.5 芯片电击穿失效模型

缺陷相关击穿模型,该模型适用于硅器件。TDDDB是通过电介质中的局部缺陷形成低电阻介电路径,如MOS器件中的热生长氧化物或其他氧化物。由于加工不良或氧化物生长不均匀,故障通常发生在氧化物层的薄弱处。

$$\tau = Q \exp(-\gamma E_{ox}) \cdot \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (8)$$

式中: τ 为TDDDB效应的寿命时间; Q 为比例常数; γ 为电压加速因子; E_{ox} 为氧化层电场强度。

4 结论

本文系统地对电子产品可靠性评价与物理模型应用进行了探讨,为电子产品可靠性评价及失效物理评估模型的选取提供了依据。其主要工作如下:

1) 以电子产品的故障为出发点,从集成电路封装、集成电路-芯片、电路板(或线路板)、电子元件、系统和多系统的角度论述了不同任务环境下电子器件的故障机理特点。

2) 系统论述了FMECA和FMMEA等故障机理的分析方法。

3) 结合低周疲劳、高周疲劳、裂纹萌生、反应论模型、芯片失效等失效机理对故障物理元模型进行梳理和探讨。

参考文献:

- [1] MEN W Y, CHEN Y, KANG R. Thermal fatigue lifetime prediction of BGA solder joint via a novel fatigue crack propagation model[C]//Norway: IEEE Proceedings of the 28th International European Safety and Reliability Conference, 2018: 2269-2275.
- [2] 陈颖,康锐.球栅阵列封装焊点寿命预测的综合方法[J].焊接学报,2009,30(11):105-108.
- [3] 陈颖,孙博,谢劲松,等.芯片粘接空洞对功率器件散热特性的影响[J].半导体技术,2007(10):859-862.
- [4] CHEN Y, XIE L M, HOU Z B, et al. Reliability enhancement test of a single board computer[C]// Beijing: IEEE Proceedings of the 2012 Prognostics and System Health Management Conference, 2012: 1-5.
- [5] 陈颖,康锐.PBGA封装焊点寿命影响因素的有限元分析[J].半导体技术,2008(7):563-566.
- [6] 陈颖,谢劲松,孔令文.镀通孔制造过程中的失效机理与物理模型[J].电子元件与材料,2007(6):4-7.
- [7] CHEN Y, TANG N, YUAN Z H. Prognostic and remaining life prediction of electronic device under vibration condition based on CPSD of MPI[J]. Shock and Vibration, 2016(2650569): 1-11.
- [8] 陈颖,霍玉杰,谢劲松,等.印刷线路板设计参数对镀通孔可靠性的影响[J].北京航空航天大学学报,2007(8):954-958.
- [9] WANG Z, CHEN Y, MEN W Y, et al. Failure behavior analysis of hot standby system based on BDD method[C]//Shanghai: IEEE Proceedings of the 12th International Conference on Reliability, Maintainability, and Safety, 2018: 2441-2448.
- [10] CHEN Y, LI Y Y, KANG R. Reliability analysis of MS-PM systems based on failure mechanism accumulation method [J]. IEEE Access, 2018 (6): 45707-45714.
- [11] CHEN Y, YE C, ZHANG X Q, et al. Reliability modeling method of electronic products considering failure mechanism dependence[C]//Hongkong: IEEE Proceedings of the 4th Annual International Conference on Cyber Technology in Automation, Control and Intelligent Systems, 2014: 419-423.
- [12] CAO R, CHEN Y, KANG R. Storage reliability evaluation of engine control circuit module[C]//Thailand: IEEE Proceedings of the 2011 International Conference on Quality & Reliability, 2011: 473-476.
- [13] YU X Y, CHEN Y, KANG R. Failure mechanism behavior and reliability of non-repairable system with functional dependence[C]//Milan, Italy: IEEE Proceedings of the 2nd International Conference on System Reliability and Safety, 2017: 175-179.
- [14] CHEN Y, YE C, LI G Q. Failure mode databases and their knowledge-based management[C]//Guangzhou: IEEE Proceedings of the 10th International Conference on Reliability, Maintainability and Safety, 2015: 732-736.
- [15] CHEN Y, YE C, KANG R. Status of FMECA research and engineering application[C]//Beijing: IEEE Proceedings of 2012 Prognostics and System Health Management Conference, 2012: 1-9.
- [16] 陈颖,张晓秦,高蕾,等.一种新研航空电子产品硬件综合FMECA方法:中国,103760886A[P].2014-04-30.
- [17] ZHANG X Q, CHEN Y, MA X, et al. Simulation assisted FMEA of electronic product[C]//Beijing: IEEE Proceedings of 2012 Prognostics and System Health Management Conference, 2012: 1-5.
- [18] CHEN Y, XIE L M, KANG R. Reliability prediction of single-board computer based on physics of failure method[C]//Beijing: IEEE Proceedings of 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, 2011: 1454-1458.
- [19] 任占勇,王昕,陈新,等.基于故障物理的电子产品可靠性仿真试验方法:中国,104462700A[P].2015-03-25.
- [20] 陈颖,李颖异,王泽,等.一种基于Petri网的多阶段任务系统故障行为建模方法:中国,106599454A[P].2017-04-26.
- [21] 陈颖,王泽,李颖异,康锐.一种基于SBDD模型的冷储备系统故障行为建模方法:中国,107766658A[P].2018-03-06.
- [22] 陈颖,王羽佳,康锐.一种基于贝叶斯网络和深度学习算法的故障机理智能分析方法:中国,109063841A[P].2018-12-21.