

微型电子元器件可靠性验证的新方法与技术进展

王建昆

河北远东通信系统工程有限公司 河北 石家庄 050000

摘要：随着电子技术的飞速发展，微型电子元器件在各个领域得到了广泛应用。其可靠性直接关系到电子产品的性能、寿命和安全性。本文深入探讨了微型电子元器件可靠性验证的新方法与技术进展。首先分析了传统可靠性验证方法存在的局限性，接着详细阐述了基于加速寿命试验、物理失效分析、智能算法预测等新方法，以及先进的测试设备和技术在微型电子元器件可靠性验证中的应用。旨在为微型电子元器件可靠性验证领域的研究和实践提供有益的参考，推动电子行业向更高可靠性、更高质量的方向发展。

关键词：微型电子元器件；可靠性验证；新方法；技术进展

1 引言

微型电子元器件作为现代电子产品的核心组成部分，其性能和可靠性对电子产品的整体质量起着决定性作用。在航空航天、军事国防、医疗设备、汽车电子等关键领域，对微型电子元器件的可靠性要求极高，任何微小的失效都可能导致严重的后果。因此，开展科学有效的可靠性验证工作，确保微型电子元器件在规定的条件和时间内能够稳定可靠地运行，具有重要的现实意义。

2 传统微型电子元器件可靠性验证方法的局限性

传统微型电子元器件可靠性验证方法存在诸多局限：一是试验周期长，如常规寿命试验需在实际使用条件下长时间运行测试，寿命长的元器件或耗时数年，拉长研发周期、增加成本，降低产品市场竞争力；二是成本高昂，大规模长时间试验需投入大量人力物力财力，涵盖场地建设、设备购置、人员操作及元器件损耗维护等，小型企业或预算有限项目难以承受；三是难以模拟复杂环境，传统方法多只能模拟单一或少数环境因素，无法全面准确呈现实际复杂环境组合，影响结果准确性；四是对潜在失效模式识别不足，侧重观察最终失效，对早期潜在失效模式和机理研究欠缺，难以及时改进，影响产品质量与企业声誉。

3 微型电子元器件可靠性验证的新方法

3.1 加速寿命试验方法

3.1.1 恒定应力加速寿命试验（CSALT）

恒定应力加速寿命试验是将一批微型电子元器件分成若干组，每组在不同的高于正常工作应力的恒定应力水平下进行寿命试验。通过记录各组元器件在不同应力水平下的失效时间，利用加速模型（如阿伦尼斯模型、逆幂律模型等）建立应力与寿命之间的关系，从而外推

得到元器件在正常应力水平下的寿命和可靠性指标。该方法试验原理简单，操作相对方便，能够快速获取元器件的可靠性数据，缩短试验周期。例如，对于一些对温度敏感的半导体元器件，通过提高试验温度作为加速应力，可以显著加快元器件的老化过程，在较短时间内观察到失效现象，进而评估其可靠性^[1]。然而，恒定应力加速寿命试验需要合理选择应力水平和分组数量，应力水平过高可能导致元器件的失效机理发生改变，影响外推结果的准确性。

3.1.2 步进应力加速寿命试验（SSALT）

步进应力加速寿命试验是在试验过程中，按照预定的时间间隔逐步提高施加在元器件上的应力水平。与恒定应力加速寿命试验相比，步进应力加速寿命试验能够在更短的时间内使元器件失效，进一步缩短试验周期。该方法的优点在于可以在较宽的应力范围内对元器件进行测试，同时减少试验所需的样品数量。在实际应用中，通过对元器件施加逐步升高的电压或温度应力，观察元器件在不同应力阶段的表现，利用统计分析方法处理试验数据，能够有效地评估元器件的可靠性。但步进应力加速寿命试验的数据分析相对复杂，需要准确确定应力变化的时间点和对应的失效数据，对试验设计和数据处理技术要求较高。

3.1.3 序进应力加速寿命试验（PSALT）

序进应力加速寿命试验中，施加在元器件上的应力随时间连续增加，应力增加的速率可以是线性的，也可以是非线性的。这种方法能够更加真实地模拟元器件在实际使用过程中所承受的逐渐增大的应力情况，更准确地评估元器件的可靠性。序进应力加速寿命试验可以更快地激发元器件的潜在失效模式，提高试验效率。然而，由于应力随时间连续变化，试验数据的采集和分析

难度较大,需要采用专门的数学模型和算法进行处理,对试验设备和数据分析能力提出了更高的要求。

3.2 基于物理失效分析的可靠性验证方法

3.2.1 失效分析流程

物理失效分析是通过对失效的微型电子元器件进行详细的检测和分析,找出失效的原因和机理,从而为改进元器件的设计、制造工艺和可靠性验证提供依据。其一般流程包括外部目检、X射线检测、声学扫描显微镜检测、开封、内部目检、电性能测试、化学分析、扫描电子显微镜分析等多个步骤。通过这些步骤,能够全面、深入地了解元器件的失效情况,从微观层面揭示失效的本质原因。

3.2.2 关键分析技术

X射线检测技术: X射线检测能够无损地检测元器件内部的结构缺陷,如焊点空洞、芯片裂纹、内部异物等。通过不同角度的X射线成像,可以清晰地观察到元器件内部的三维结构,发现潜在的质量隐患。在微型电子元器件可靠性验证中,X射线检测技术常用于对封装后的元器件进行初步筛选,快速识别出可能存在内部缺陷的产品,避免其进入后续的可靠性试验环节,提高试验效率。

声学扫描显微镜技术(SAM): 声学扫描显微镜利用超声波在材料中的传播特性,检测元器件内部的分层、脱粘等缺陷。该技术对微小的界面缺陷具有较高的灵敏度,能够检测到尺寸在微米级别的缺陷^[2]。在可靠性验证过程中,对于一些容易出现封装界面失效的微型电子元器件,声学扫描显微镜技术可以作为一种有效的检测手段,提前发现潜在的失效风险。

扫描电子显微镜技术(SEM): 扫描电子显微镜具有高分辨率的成像能力,能够观察到元器件表面的微观形貌和结构。在失效分析中,通过扫描电子显微镜可以对失效部位的微观结构进行详细观察,分析失效特征,如晶粒形态、断口形貌等,从而推断失效机理。结合能谱分析(EDS)技术,还可以对失效部位的元素成分进行分析,进一步确定失效原因,如是否存在杂质污染、氧化等问题。

3.3 基于智能算法的可靠性预测方法

3.3.1 神经网络算法

神经网络算法是一种模仿人类神经系统结构和功能的计算模型,具有强大的非线性映射能力和自适应学习能力。在微型电子元器件可靠性预测中,神经网络算法可以通过学习大量的历史可靠性数据,建立元器件的输入参数(如材料特性、制造工艺参数、使用环境条件

等)与输出参数(如寿命、失效概率等)之间的复杂非线性关系模型。利用训练好的神经网络模型,可以根据新的输入参数预测元器件的可靠性指标。例如,对于某种特定类型的集成电路,通过收集其在不同温度、电压和工作频率下的失效数据,训练神经网络模型,然后利用该模型预测在新的工作条件下集成电路的可靠性,为产品的设计和使用提供参考。然而,神经网络算法需要大量的训练数据来保证模型的准确性,且模型的可解释性较差,难以直观地理解输入参数与输出参数之间的内在联系。

3.3.2 支持向量机算法(SVM)

支持向量机算法是一种基于统计学习理论的机器学习方法,其核心思想是在高维空间中寻找一个最优分类超平面,使得不同类别的数据点之间的间隔最大。在可靠性预测中,支持向量机算法可以将元器件的可靠性问题转化为一个分类或回归问题。对于分类问题,可以将元器件分为可靠和不可靠两类;对于回归问题,可以预测元器件的寿命等连续变量。支持向量机算法在小样本情况下具有较好的泛化能力,能够有效避免过拟合问题。与神经网络算法相比,支持向量机算法的计算复杂度相对较低,模型的可解释性也较好。但在处理大规模数据集时,支持向量机算法的训练时间可能较长,需要进一步优化算法以提高计算效率。

4 微型电子元器件可靠性验证的技术进展

4.1 先进的测试设备与技术

4.1.1 高精度电性能测试设备

随着微型电子元器件的集成度不断提高,其电性能参数的测试精度要求也越来越高。现代高精度电性能测试设备采用了先进的测量技术和高精度的传感器,能够实现对元器件微小电流、电压、电阻、电容等参数的精确测量。例如,一些高精度的源表(Source Measure Unit, SMU)设备可以同时提供精确的电压源和电流源,并实时测量相应的电流和电压值,测量精度可达纳安级和微伏级。这些高精度测试设备能够准确获取元器件在不同工作状态下的电性能数据,为可靠性评估提供可靠依据。

4.1.2 环境模拟试验设备

为了更真实地模拟微型电子元器件在实际使用过程中所面临的各种环境条件,环境模拟试验设备不断发展和完善。例如,高低温湿热试验箱可以实现宽范围的温度和湿度控制,温度范围可从-70℃到+180℃,湿度范围可从10%RH到98%RH,能够模拟元器件在不同气候条件下的使用环境。振动试验台可以模拟元器件在运

输、使用过程中所遭受的各种振动环境,通过控制振动频率、振幅和加速度等参数,对元器件进行振动可靠性测试^[3]。此外,还有电磁兼容(EMC)试验设备,用于测试元器件在电磁干扰环境下的性能和抗干扰能力。这些先进的环境模拟试验设备能够为微型电子元器件的可靠性验证提供更加全面、准确的试验条件。

4.1.3 无损检测技术设备

无损检测技术设备在微型电子元器件可靠性验证中发挥着重要作用,能够在不破坏元器件的情况下检测其内部缺陷和结构异常。除了前面提到的X射线检测设备和声学扫描显微镜设备外,还有一些其他的无损检测技术设备。例如,红外热成像仪可以通过检测元器件表面的温度分布来发现潜在的故障点,如局部过热可能是由于元器件内部存在短路或电阻异常等问题引起的。太赫兹时域光谱技术作为一种新兴的无损检测技术,具有高分辨率、非接触等优点,能够对微型电子元器件内部的微观结构和缺陷进行检测和分析。

4.2 多物理场耦合仿真技术

微型电子元器件在实际使用过程中往往受到多种物理场的共同作用,如电场、磁场、热场、力场等。这些物理场之间相互耦合、相互影响,共同决定了元器件的可靠性和性能。多物理场耦合仿真技术通过建立综合考虑多种物理场相互作用的数学模型,利用计算机数值模拟方法对元器件在不同工作条件下的物理场分布和变化规律进行仿真分析,从而预测元器件的可靠性和潜在失效模式。例如,在功率半导体器件的可靠性分析中,需要考虑电场、热场和应力场的耦合作用。器件在工作过程中会产生热量,导致温度升高,而温度的变化又会引起器件内部材料的热膨胀,从而产生应力。同时,电场的分布也会影响器件内部的电流密度和热量产生。通过多物理场耦合仿真技术,可以模拟器件在不同工作电流、电压和环境温度下的电场、热场和应力场分布,分析这些物理场之间的相互作用对器件可靠性的影响,提前发现可能存在的热失效、电迁移等失效模式,为器件的设计优化和可靠性提升提供指导。多物理场耦合仿真技术能够大大缩短产品研发周期,降低研发成本,提高产品的可靠性。

4.3 在线监测与健康管理技术

在线监测与健康管理技术(Prognostics and Health Management, PHM)是一种实时监测微型电子元器件运行状态、预测其剩余使用寿命并采取相应维护措施的技术。通过在元器件或电子系统中集成各种传感器,实时采集元器件的电性能参数、温度、振动等状态信息,并利用数据传输技术将采集到的数据传输到数据处理中心。在数据处理中心,利用数据分析算法和模型对采集到的数据进行分析处理,评估元器件的健康状态,预测其剩余使用寿命^[4]。例如,在航空航天电子系统中,通过在关键电子元器件上安装温度传感器、电流传感器等,实时监测元器件的工作温度和电流变化情况。利用基于机器学习的预测算法,根据历史数据和实时监测数据,预测元器件的剩余使用寿命。当预测到元器件可能即将失效时,及时发出预警信号,以便采取相应的维护措施,在线监测与健康管理技术能够实现从传统的定期维护向基于状态的维护转变,提高电子系统的可靠性和可用性,降低维护成本。

结语

微型电子元器件可靠性验证是保障电子产品质量和可靠性的关键环节。传统可靠性验证方法虽然在一定程度上发挥了作用,但已难以满足现代电子产业快速发展的需求。加速寿命试验方法、基于物理失效分析的方法以及基于智能算法的预测方法等新方法,以及先进的测试设备与技术、多物理场耦合仿真技术、在线监测与健康管理技术等新技术的出现,为微型电子元器件可靠性验证提供了更加有效、高效的手段。未来,通过不断优化新方法、创新新技术,并加强标准化与规范化建设,将有力推动微型电子元器件可靠性验证领域的发展,为电子行业的持续创新和高质量发展提供坚实保障。

参考文献

- [1]洪流,上官国威.微型断路器动作可靠性相关技术问题[J].民营科技,2018,(12):99-100.
- [2]陈白帆,肖飞,陈汐,等.浅谈工程用电子元件产品的制造可靠性问题[J].机电元件,2017,37(05):40-49+56.
- [3]刘玉龙,吕权权,吴浩,等.基于深度学习的电子元件焊点缺陷检测方法[J].电子与封装,2023,23(06):38-43.
- [4]王定标,李昂,吴淇涛,等.电子元件散热结构的拓扑优化设计[J].低温与超导,2023,51(05):37-42.