

集成电路电化学腐蚀失效案例分析及改善策略

刘寅杰

上海泰矽微电子有限公司 上海 200131

摘要: 本案例分析了集成电路在特定环境条件下发生的电化学腐蚀失效问题。通过详细的失效分析和实验验证,发现封装材料的吸湿性、封装工艺的缺陷以及电路设计中的电应力分布不均是导致腐蚀失效的主要原因。针对这些问题,提出了一系列改善策略,包括优化封装材料、改进封装工艺、重新设计电路以减少电应力,以及实施严格的环境控制措施。这些策略的实施显著提高集成电路的抗腐蚀能力,降低失效风险。

关键词: 集成电路; 电化学腐蚀失效; 案例分析; 改善策略

引言: 随着现代电子技术的飞速发展,集成电路作为电子设备的核心部件,其可靠性和稳定性对于设备的整体性能至关重要。在实际应用中,集成电路常常面临各种失效问题,其中电化学腐蚀是一种常见的失效模式。本文旨在通过一起典型的集成电路电化学腐蚀失效案例,深入分析失效原因,并探讨相应的改善策略。通过这一研究,期望能够为集成电路的设计、制造和使用提供有益的参考,进一步提高集成电路的可靠性和使用寿命。

1 集成电路电化学腐蚀基础理论

1.1 电化学腐蚀原理

电化学腐蚀是金属表面与离子导电的介质发生电化学反应而产生的破坏。当金属与电解质接触时,会形成一个腐蚀原电池,其中金属作为阳极,电解质中的某些离子或物质作为阴极。在阳极上,金属原子失去电子成为离子状态并转移到介质中,这个过程被称为阳极氧化。而在阴极上,介质中的去极剂(如氧气、氢离子等)吸收来自阳极的电子,发生还原反应。这两个反应是相互独立而又同时进行的,构成了电化学腐蚀的基本过程。在集成电路中,当电路工作于高温高湿环境中时,铝电极等金属部件可能会与空气中的湿气、盐类等形成电解质溶液,从而引发电化学腐蚀。阳极腐蚀时,铝电极是正电位,负离子(如氯离子)被吸引过来,与铝发生化学反应,导致铝的腐蚀。而阴极腐蚀则是由于铝电势是负电位,正离子(如钠离子、钾离子)被吸引过来,与氢氧根离子等发生反应,形成氢氧化铝而产生腐蚀。

1.2 影响集成电路电化学腐蚀的因素

影响集成电路电化学腐蚀的因素主要包括几个方面:(1)电解质的性质:电解质的浓度、pH值和氧含量等都可以改变电化学腐蚀的速率。较高的浓度和较低的pH值通常会促进腐蚀反应的进行。(2)金属的组成和

形状:不同金属的电位差异会导致电子从一个金属转移到另一个金属,引发电化学反应,金属的表面形状和微观结构也会影响腐蚀的发生和速率。不平整的金属表面会形成电化学细胞,加速腐蚀的发生。(3)温度:温度的升高会加速电化学反应的进行,从而加速腐蚀速率。(4)环境条件:湿度、氧气浓度、氯离子浓度等环境条件都会对腐蚀速率产生影响。高湿度和氯离子浓度会加速电化学腐蚀的进行,因为它们提供了更好的电子和离子传递媒介^[1]。(5)金属的表面处理:金属表面的氧化膜、涂层或镀层等处理措施可以影响电化学腐蚀的速率。例如,完整的氧化膜可以保护金属免受腐蚀,而涂层或镀层则可以隔离金属与电解质的直接接触。

2 集成电路电化学腐蚀失效案例分析

2.1 案例一:芯片引脚腐蚀失效

2.1.1 失效现象描述

芯片引脚腐蚀的外观特征明显,通常表现为引脚表面覆盖有一层不均匀的腐蚀产物,这些产物可能呈现为白色、绿色或黑色的粉末状、薄膜状或块状。腐蚀产物主要分布在引脚与封装体接触的边缘区域,以及引脚裸露在外的部分。腐蚀导致引脚表面变得粗糙,失去了原有的金属光泽。在电气性能方面,腐蚀引脚可能出现电阻增加、开路或短路的情况。电阻增加是由于腐蚀产物在引脚表面形成了一层导电性较差的覆盖层,阻碍了电流的顺畅流动。开路则是由于腐蚀严重,导致引脚与电路板的连接点断裂。而短路则可能由于腐蚀产物在引脚间形成导电桥接,使得原本不相连的引脚之间产生了意外的电流通路。

2.1.2 原因分析

运用扫描电子显微镜(SEM)和能量散射光谱(EDS)等材料分析技术,对腐蚀产物进行成分分析,发现腐蚀介质主要来源于空气中的湿气、盐类或腐蚀性

气体。这些介质在引脚表面形成电解质溶液，与引脚金属发生电化学反应，导致腐蚀的发生。通过电路分析和模拟，发现电应力在引脚腐蚀过程中起到了加速作用。当引脚承受较大的电流或电压时，会加剧腐蚀反应的进行，封装工艺缺陷如引脚镀层不均匀、封装体密封性不足等也与引脚腐蚀密切相关。这些缺陷使得腐蚀介质更容易渗透到引脚表面，从而加剧了腐蚀的发生。

2.2 案例二：封装内部金属线路腐蚀失效

2.2.1 失效现象呈现

封装内部金属线路腐蚀后，微观形貌发生显著变化。线路表面出现断裂、缺损或变薄的现象，部分线路甚至完全断裂，导致电路功能异常。腐蚀线路的表面变得粗糙不平，失去了原有的光滑度。在电路功能方面，腐蚀导致的信号传输中断是常见的失效表现。腐蚀线路无法有效地传递电信号，导致芯片功能失效或性能下降，腐蚀还可能引起相邻线路之间的短路，进一步加剧电路功能的异常。

2.2.2 原因探究

检测封装内部的湿气含量和离子污染情况发现，较高的湿气含量和离子污染是导致金属线路腐蚀的主要原因。湿气为腐蚀反应提供了必要的电解质环境，而离子污染则作为腐蚀介质参与了电化学反应。研究金属线路材料与封装材料之间的界面反应发现，某些材料组合在特定条件下会发生化学反应，生成具有腐蚀性的产物。这些产物会破坏金属线路与封装材料之间的结合力，导致线路腐蚀的发生。制造过程中可能引入的腐蚀隐患也是导致封装内部金属线路腐蚀的重要原因。光刻工艺残留、清洗不彻底等问题都可能为腐蚀介质提供通道，使其更容易接触到金属线路表面。

2.3 案例三：芯片表面钝化层腐蚀失效

2.3.1 失效现象阐述

芯片表面钝化层作为关键的防护屏障，其完整性对于芯片的长期可靠性至关重要。当钝化层遭受腐蚀后，其表面状态会发生显著变化，具体表现为钝化层出现开裂、剥离或变薄的现象。这些变化使得钝化层在部分区域甚至完全失去了对芯片内部结构的保护作用。随着钝化层的腐蚀加剧，其下方的金属层开始暴露出来，这使得芯片更容易受到环境中的湿气、盐类或其他腐蚀性物质的直接侵蚀。这种侵蚀不仅会导致芯片性能的逐渐下降，还会严重缩短芯片的寿命，甚至在某些情况下，可能引发芯片的完全失效。对芯片表面钝化层的腐蚀问题进行深入研究，并采取相应的改善措施，对于保障芯片的可靠性和延长其使用寿命具有重要意义^[2]。

2.3.2 原因剖析

采用化学分析方法检测钝化层成分变化发现，腐蚀介质的侵蚀途径和方式主要通过钝化层中的微小缺陷或裂缝进入。这些缺陷可能是由于钝化层制备工艺参数不当（如厚度不均匀、存在孔隙等）导致的。芯片制造工艺中钝化层制备工艺参数的影响也不容忽视。例如，过薄的钝化层无法提供足够的保护；而过厚的钝化层则可能因应力过大而开裂。这些工艺参数的不当选择都会导致钝化层腐蚀的发生。研究芯片使用环境中的电磁场等因素发现，虽然电磁场本身对钝化层腐蚀的直接作用有限，但电磁场可能通过影响芯片表面的电荷分布和电场强度，从而间接影响腐蚀反应的进行，在特定条件下，电磁场也可能成为钝化层腐蚀的潜在影响因素之一。

3 集成电路电学腐蚀改善策略

3.1 材料优化选择

3.1.1 芯片材料改进

为了应对集成电路的电学腐蚀问题，首要策略是研发和选用耐腐蚀性能更好的芯片材料。这包括探索新型半导体材料，这些材料在化学稳定性上表现出色，能够有效抵抗腐蚀介质的侵蚀。具有防腐涂层的材料也是一个不错的选择，它们能在芯片表面形成一层保护层，隔绝腐蚀介质与芯片的直接接触，优化材料制备工艺同样重要，通过降低材料内部缺陷和杂质含量，提高材料的纯度，从而增强其抗腐蚀能力。

3.1.2 封装材料优化

封装材料的选择同样对集成电路的抗腐蚀性能有着至关重要的影响。应选择具有低吸湿性、低离子杂质含量的封装材料，如高性能塑封材料和新型引线框架材料等。这些材料能够有效阻挡湿气和离子杂质的侵入，保护芯片免受腐蚀的侵害。同时对封装材料进行表面处理或改性也是提高其抗腐蚀能力的有效途径。例如，采用化学镀、等离子体处理等先进技术，可以在封装材料表面形成一层致密的保护膜，进一步增强其耐腐蚀性能。

3.2 环境控制措施

3.2.1 封装工艺改进

在集成电路领域，封装工艺的持续改进对于增强其抗腐蚀性能起着举足轻重的作用。封装结构设计的优化是首要任务，经过精心设计的封装结构，能够极大地增强其密封性，如同为芯片打造一座坚固的堡垒，将外界的湿气、灰尘等有害因素阻挡在外，有效防止其侵入芯片内部。防潮性能的提升也至关重要，良好的防潮设计可以避免水分在芯片表面凝结或渗透，减少腐蚀发生的可能性。在这样的环境中，芯片被有效隔绝与外界腐蚀性物质的接

触,大大提升抗腐蚀能力。气密封装则采用特殊的气密封材料和工艺,确保封装内部的气体无法与外界交换,为芯片创造一个稳定、低氧且干燥的空间^[3]。这些先进技术的应用,如同为芯片穿上一层坚不可摧的防护铠甲,不仅显著提升集成电路的抗腐蚀能力,更在延长其使用寿命方面发挥着关键作用,保障集成电路在复杂环境下的稳定运行。

3.2.2 使用环境管理

除了在封装工艺环节下功夫,对集成电路使用环境进行科学有效的管理也是不可或缺的重要举措。为集成电路营造适宜的使用环境是关键所在,温度和湿度这两个关键因素必须严格控制在合理的范围之内。通过采用恒温恒湿设备,能够精准地调节环境温度和湿度,使其始终保持在集成电路最佳工作状态所需的条件。在高温高湿的环境中,集成电路容易受到腐蚀和损坏,而恒温恒湿设备可以有效避免这种情况的发生。同时,安装空气净化装置也是保障集成电路稳定运行的必要措施。空气净化装置能够像忠诚的卫士一样,有效过滤空气中的污染物,尤其是那些含有腐蚀性气体的杂质。在一些工业环境或空气质量较差的地区,空气中可能含有二氧化硫、氮氧化物等腐蚀性气体,这些气体会对集成电路的金属线路和元件造成严重侵蚀。空气净化装置通过吸附、过滤等多种方式,将这些有害气体去除,为集成电路提供一个纯净的空气环境,使其免受腐蚀威胁。通过实施这些全面且细致的环境控制措施,可以全方位、多层次地为集成电路的稳定运行提供坚实有力的保障,确保其在各种复杂环境下都能高效、可靠地工作。

3.3 电路设计与电应力控制

在集成电路领域,电化学腐蚀是一种常见的失效模式,它可能导致电路性能下降甚至完全失效。以下是一个关于集成电路电化学腐蚀失效的案例分析,重点探讨电路设计与电应力控制如何影响腐蚀过程及相应的改善策略。某电子设备制造商在生产过程中发现,其使用的集成电路在潮湿环境下出现了严重的电化学腐蚀现象。通过失效分析,发现腐蚀主要发生在集成电路的封装引脚和焊点处。进一步研究发现,该集成电路的封装材料具有较高的吸湿性,且在封装过程中未能完全排除内部的湿气和氧气。电路设计中存在不合理的电应力分布,

导致在特定条件下,封装引脚和焊点处的电位差增大,加速了电化学腐蚀的进程。针对这一问题,制造商采取了改善策略;第一、封装材料优化:选择具有低吸湿性和良好防潮性能的封装材料,以减少湿气和氧气对集成电路的侵蚀。同时对封装材料进行严格的筛选和测试,确保其质量符合要求。第二、封装工艺改进:优化封装工艺,确保在封装过程中能够完全排除内部的湿气和氧气。采用先进的封装技术,如真空封装或气密封装,以提高封装的密封性和防潮性能。第三、电路设计优化:重新设计电路,优化电应力分布,降低封装引脚和焊点处的电位差。通过合理的电路设计,减少电化学腐蚀的风险^[4]。第四、环境控制措施:为集成电路提供适宜的使用环境,控制温度、湿度在合理范围内。采用恒温恒湿设备,确保集成电路在最佳的工作条件下运行,安装空气净化装置,减少空气中的污染物对集成电路的侵蚀。通过以上改善策略的实施,制造商成功地解决了集成电路电化学腐蚀失效的问题,提高了产品的可靠性和稳定性。这一案例表明,电路设计与电应力控制在防止集成电路电化学腐蚀方面起着至关重要的作用。通过合理的电路设计和有效的环境控制措施,可以显著降低电化学腐蚀的风险,提高集成电路的可靠性和使用寿命。

结束语

通过对集成电路电化学腐蚀失效案例的深入分析,不仅揭示失效的根本原因,还提出一系列有效的改善策略。这些策略的成功实施,不仅解决当前面临的问题,也为未来集成电路的设计和制造提供宝贵的经验和启示。坚信在持续的技术创新和优化下,集成电路的抗腐蚀能力将得到进一步提升,为电子设备的可靠性和稳定性提供更加坚实的保障。

参考文献

- [1] 魏建虎.浅析化工机械设备腐蚀原因及防腐措施[J].中国设备工程,2019(24):79-80.
- [2] 魏者聪,高阳,王长红,张鹤.化工机械设备电化学腐蚀与防护方法研究[J].粘接,2019,40(10):107-110.
- [3] 王懋,侯建国,许成进,等.新形势下宇航电子标准化工作方向探讨与思考[J].航天标准化,2018(4):21-25.
- [4] 毛寒松,王腾.混合集成电路制造工艺文件体系研究[J].机电工程技术,2021,50(06):61-64.