

集成电路薄膜制造中的污染控制

殷兴平

芯恩（青岛）集成电路有限公司 山东 青岛 266426

摘要：随着集成电路制造技术的不断发展，薄膜工艺在芯片制造中扮演着至关重要的角色。然而，薄膜制造过程中存在的污染问题严重影响了芯片的良率和性能。本文旨在探讨集成电路薄膜制造中的污染控制方法，通过分析污染类型、来源、影响及相应的控制措施，为薄膜制造过程中的污染控制提供理论指导和实践建议。

关键词：集成电路；薄膜制造；污染控制；颗粒污染；金属离子污染

引言

集成电路制造是一个高度复杂且精密的过程，其中薄膜工艺是关键制造步骤之一。薄膜工艺包括蒸发、溅射、化学气相沉积等，用于在基片上形成各种电子元件和互连线。然而，薄膜制造过程中容易引入各种污染物，如颗粒、金属离子、有机物等，这些污染物会严重影响芯片的良率和性能。因此，污染控制成为薄膜制造中不可忽视的重要问题。

1 集成电路薄膜制造中的污染类型

1.1 颗粒污染

颗粒污染，作为薄膜制造中最直观且难以完全避免的污染形式，其存在对集成电路的制造构成了严峻挑战。这些微小的颗粒，可能源自多个方面：洁净室空气中未被完全过滤掉的尘埃、设备内部因机械运动或材料磨损产生的碎屑、传输系统在晶片搬运过程中的带入、以及反应气体和清洗液体中潜在的杂质。尽管这些颗粒在宏观世界中看似微不足道，但在集成电路制造的微观尺度下，它们却足以引发一系列严重问题。颗粒污染对集成电路的影响主要体现在两个方面：一是直接造成芯片表面的物理损伤，如划痕、凹陷等，这些缺陷会破坏芯片表面的平整度，进而影响后续制程的精度和稳定性；二是颗粒作为异物存在于芯片表面，可能干扰光刻、刻蚀等关键工艺步骤，导致图案失真、线条断裂或短路等严重问题，从而降低产品的良率和可靠性。特别是在集成电路线宽微缩至40nm甚至更小的情况下，颗粒污染的控制变得尤为关键，因为即使是最微小的颗粒也可能导致整个IC的失效。

1.2 金属离子污染

金属离子污染，相较于颗粒污染而言，其危害更为隐蔽且长远。在湿法刻蚀或清洗过程中，溶液中的金属离子会粘附在晶片表面，并在随后的薄膜沉积过程中扩散到膜层内部。这些金属离子，如铁、铜、钠等，一

旦进入薄膜，就会对薄膜的物理、化学性质产生深刻影响，成为薄膜中的“隐形杀手”。金属离子污染对薄膜及集成电路的影响主要体现在三个方面。首先，金属离子在薄膜中的扩散会改变薄膜的导电性和介电常数，进而影响器件的电气性能。例如，铁离子在硅中的快速扩散会导致漏电流增加，影响器件的开关速度和功耗特性。其次，金属离子还可能引发电迁移现象，导致电路中的金属线出现短路或断路，严重影响电路的稳定性和可靠性^[1]。最后，金属离子的存在还可能降低薄膜的机械强度和粘附性，增加薄膜开裂和剥离的风险。

1.3 有机物污染

有机物污染，作为薄膜制造中的另一类常见污染，其来源广泛且复杂，包括化学品残留、设备油脂、人体分泌物以及空气中的有机污染物等。这些有机物一旦附着在薄膜表面，就会对薄膜的性能和后续制程产生显著影响，成为薄膜表面的“隐形威胁”。有机物污染对薄膜及集成电路的影响主要体现在两个方面。首先，有机物会破坏薄膜的平整度和均匀性，影响薄膜的粘附性和稳定性。在后续制程中，这些有机物还可能分解产生有害副产物，如挥发性有机化合物（VOCs），对生产环境造成污染，甚至危及操作人员的健康。其次，有机物污染还可能影响薄膜与后续层之间的粘附力，导致层间剥离等问题。在多层薄膜结构中，层间粘附力的减弱会严重影响整个电路的可靠性和稳定性。更为严重的是，有机物污染还可能引发一系列连锁反应。例如，在光刻过程中，有机物污染可能导致光刻胶与薄膜之间的粘附力下降，进而影响光刻图案的精度和稳定性。在刻蚀过程中，有机物污染可能阻碍刻蚀液的渗透和反应，导致刻蚀不完全或过度刻蚀等问题。这些连锁反应不仅会降低产品的良率和可靠性，还可能增加生产成本和制造难度。

2 集成电路薄膜制造中的污染源

在集成电路薄膜制造这一高精尖领域，污染源的管

控是确保产品质量与性能的关键。污染源种类繁多,且各自具有独特的产生类型和级别,需实施针对性控制策略以满足严格的净化标准。空气,作为无处不在的媒介,其携带的尘埃、微生物及挥发性有机物成为薄膜制造中的首要污染源。人员活动,尤其是未充分净化的操作,会引入皮屑、汗液及呼吸产生的微粒,对薄膜造成直接污染。工艺使用水,若处理不当,会含有溶解的矿物质、微生物及有机物残留,成为薄膜沉积过程中的潜在威胁。工艺化学气体,如掺杂气体中的杂质,会直接影响薄膜的纯净度与性能。溶液,包括清洗剂、刻蚀液等,其纯度与稳定性至关重要,任何微小的杂质都可能污染薄膜表面。静电,虽非传统意义上的“污染”,却能吸附尘埃、引发放电,对薄膜造成间接损害。工艺设备,作为薄膜制造的核心,其内部清洁度、材料选择及运行状态均对薄膜质量产生深远影响。因此,对以上各污染源的细致识别与严格控制,是保障集成电路薄膜制造高质量、高效率的必由之路。

3 集成电路薄膜制造中的污染控制方法

3.1 洁净室管理

洁净室,作为薄膜制造的核心区域,其环境控制对于污染控制具有举足轻重的地位。洁净室的设计与管理需严格遵循相关标准,以确保空气中的颗粒浓度和微生物数量控制在极低水平。高效过滤系统是洁净室的核心设备,通过多级过滤机制,有效去除空气中的尘埃、微生物及挥发性有机物。这些过滤器需定期更换与维护,以保持其过滤效率。同时,洁净室内的气流组织也至关重要,通常采用层流方式,确保气流均匀分布,避免涡流与死角,从而进一步降低污染风险。风淋室与层流罩是洁净室管理的重要辅助设施。风淋室在人员进入洁净室前进行全身吹淋,有效去除衣物及体表附着的尘埃与微粒^[2]。层流罩则用于保护特定区域或设备,提供更为洁净的工作环境。这些设施的使用需严格遵守操作规程,以确保其净化效果。此外,洁净室的人员管理同样关键。所有进入洁净室的人员需经过严格的净化程序,包括更衣、洗手、戴口罩与手套等。同时,应限制人员数量与活动范围,减少不必要的流动与接触,从而降低污染物的引入风险。设备与物料的进出也需遵循洁净室管理规定,经过严格的清洁与消毒处理,确保无污染或污染程度在可控范围内。

3.2 薄膜沉积技术

薄膜沉积过程中的污染控制对于确保薄膜的纯净度与性能至关重要。通过优化沉积工艺参数,如温度、压力、气体流量等,可以显著减少薄膜污染。这些参数的

调整需基于深入的工艺研究与实验验证,以确保在最佳工艺条件下进行薄膜沉积。先进的沉积技术,如原子层沉积(ALD)与化学气相沉积(CVD),在减少污染方面具有显著优势。ALD技术通过逐层沉积原子层级别的薄膜,实现了对薄膜厚度与成分的精确控制,从而有效避免了污染物的混入。CVD技术则通过气态前驱物的化学反应在硅片表面形成薄膜,过程中需严格控制反应条件与气体纯度,以确保薄膜的纯净度。此外,沉积设备的清洁与维护也是减少污染的关键环节。沉积室内需定期清理,去除附着在壁面与部件上的污染物。同时,沉积源与气体管路也需定期更换与清洗,以确保沉积过程中无杂质混入。通过这些措施的实施,可以显著提升薄膜的纯净度与性能。

3.3 硅片清洗技术

硅片清洗是去除表面污染物的关键环节,对于确保薄膜的纯净度与附着力具有重要意义。传统的化学湿法清洗(RCA清洗)通过水溶性药物与物理或化学机理的结合,有效去除薄膜、有机物、无机物、金属及颗粒污染。RCA清洗通常包括多个步骤,如碱性清洗、酸性清洗、氧化清洗及漂洗等。碱性清洗用于去除硅片表面的有机物与颗粒污染;酸性清洗则用于去除金属离子与无机污染物;氧化清洗则通过氧化剂的作用去除硅片表面的氧化层与残留物;最后通过漂洗去除清洗液残留,确保硅片表面的洁净度。随着技术的进步,干法清洗技术也逐渐得到应用。干法清洗技术利用物理或化学方法直接去除硅片表面的污染物,无需使用化学药剂。例如,氧等离子体清洗技术通过氧等离子体的氧化作用去除光刻胶与有机物污染;氟气等离子体轰击技术则通过氟气等离子体的物理轰击作用去除通孔内的氧化层与有机聚合物。干法清洗技术具有清洗效率高、无污染、对硅片损伤小等优点,特别适用于对清洗要求极高的薄膜制造过程^[3]。然而,干法清洗技术也存在设备成本高、操作复杂等局限性,因此在实际应用中需结合具体情况进行选择。无论是湿法清洗还是干法清洗,都需严格控制清洗条件与操作规范。清洗液的选择需根据污染物的性质与硅片的材质进行确定;清洗温度、时间与压力等参数也需经过优化与验证;同时,清洗后的硅片需进行严格的漂洗与干燥处理,以确保其表面的洁净度与稳定性。

3.4 湿法处理

湿法处理是薄膜制造中常用的污染控制方法,通过化学反应去除污染物,确保薄膜的纯净度与性能。湿法处理通常包括酸洗、碱洗、氧化洗及还原洗等多个步骤,每一步都需严格控制反应条件与操作规范。酸洗用

于去除硅片表面的金属离子与无机污染物。常用的酸洗液包括盐酸、硫酸、氢氟酸等。这些酸洗液能够与金属离子及无机污染物发生化学反应,生成可溶性的盐类或气体,从而将其从硅片表面去除。然而,酸洗过程中也需注意控制反应时间与温度,避免过度腐蚀硅片表面或引入新的污染物。碱洗则用于去除硅片表面的有机物与颗粒污染。常用的碱洗液包括氢氧化钠、氢氧化钾等。这些碱洗液能够与有机物发生皂化反应或溶解作用,将其从硅片表面去除。同时,碱洗还能够软化并去除硅片表面的颗粒污染,提高硅片的洁净度。氧化洗则通过氧化剂的作用去除硅片表面的氧化层与残留物。常用的氧化剂包括双氧水、臭氧等。这些氧化剂能够与硅片表面的氧化层及残留物发生化学反应,生成可溶性的产物或气体,从而将其去除。氧化洗还能够提高硅片的亲水性,有利于后续工艺的顺利进行。还原洗则用于去除硅片表面可能存在的氧化层或污染物中的氧元素。常用的还原剂包括氢氟酸、氨水等。这些还原剂能够与氧化层或污染物中的氧元素发生化学反应,将其还原为可溶性的产物或气体,从而去除污染。湿法处理过程中需严格控制反应条件与操作规范。反应时间、温度、浓度等参数都需经过优化与验证,以确保去除污染物的同时不损伤硅片表面或引入新的污染物。同时,湿法处理后的硅片需进行严格的漂洗与干燥处理,以去除残留的清洗液与水分,确保硅片表面的洁净度与稳定性。

3.5 原材料与化学品控制

原材料与化学品是薄膜制造中不可或缺的元素,同时也是污染的重要来源之一。因此,严格控制原材料与化学品的质量与纯度对于确保无污染生产至关重要。首先,应建立严格的原材料与化学品采购制度。选择信誉良好、质量可靠的供应商,确保所采购的原材料与化学品符合生产要求与标准。同时,对供应商进行定期评估与审核,确保其持续提供高质量的产品。其次,对原材

料与化学品进行严格的入库检验。通过化验、测试等手段对其纯度、成分及污染程度进行检验与分析,确保其无污染或污染程度在可控范围内。对于不符合要求的原材料与化学品,应拒绝入库并退回供应商处理^[4]。此外,对原材料与化学品进行特殊的处理与储存也是减少污染的关键环节。对于易产生污染的原材料与化学品,应采取真空包装、氮气保护等特殊处理措施,以减少其与外界环境的接触与反应。同时,将其储存在干燥、阴凉、通风良好的仓库中,避免受潮、受热或受污染。最后,应定期对原材料与化学品进行盘点与清查。及时发现并处理过期、变质或受污染的原材料与化学品,避免其流入生产环节造成污染。同时,对库存量进行合理控制,避免积压过多导致管理难度增加与污染风险提高。

结语

集成电路薄膜制造中的污染控制是一个复杂而重要的问题。通过洁净室管理、薄膜沉积技术、硅片清洗技术、湿法处理以及原材料与化学品控制等多方面的措施,可以有效地减少污染物的引入和传播,提高芯片的良率和性能。未来,随着集成电路制造技术的不断发展,污染控制方法也将不断创新和完善,为薄膜制造提供更加可靠的技术保障。

参考文献

- [1]赵万鹏.透明氧化锌薄膜晶体管的电学性能与集成电路研究[D].浙江大学,2023.
- [2]张露露.应用于集成电路互连的有序多孔OSG薄膜的研究[D].北方工业大学,2021.
- [3]丁培军,12英寸先进集成电路制程金属化薄膜沉积设备研发及产业化.北京市,北京北方华创微电子装备有限公司,2021-02-01.
- [4]李云鹏.SnO_x薄膜晶体管和基于氧化物半导体的CMOS集成电路研究[D].山东大学,2019.