

# 单晶硅片的清洗检验工艺分析

钟 峰

四川晶科能源有限公司 四川乐山 614000

**摘 要：**随着现代信息技术的迅猛发展，作为国民经济重要支柱的半导体工业具有举足轻重的作用，而作为半导体器件基础材料的单晶硅，其性能的优劣将直接影响器件的性能与可靠性。硅片表面洁净度及缺陷控制是保证半导体器件高品质制造的重要环节之一，因此，深入开展单晶硅晶圆清洗与检测技术研究，具有重要的理论与实际意义。

**关键词：**单晶硅片；清洗检验；工艺分析

单晶硅在生产过程中要经历多道工序（如切割、研磨、抛光），每个加工过程中都会在硅片表面形成颗粒物、金属离子、有机物残留等污染物。这些杂质与缺陷如果不能得到及时有效的去除，将直接影响到后续器件的制备与性能，进而导致器件的失效或性能退化。为保证单晶硅单晶的高纯度及表面完整性，需要优化清洗工艺，完善检测手段，所以分析单晶硅片的清洗检验工艺，为当前相关行业热议话题。

## 一、单晶硅片清洗检验工艺的影响因素分析

### 1. 清洗工艺参数影响因素

在单晶硅生产中，清洗过程对去除硅片表面的污染物、粒子及有机物质具有重要意义，其中，清洗工艺参数对硅片洁净度及表面质量的影响很大。首先，清洗效果受温度影响较大；在合适的温度范围内，清洗液活性增强，可以更有效地去除芯片表面的污染物。但是，如果温度过高，则会引起溶液的挥发，严重时还会损坏硅片的表面<sup>[1]</sup>。其次，清洁时间也是一个重要的参数，选择合适的清洗时间，可确保清洗液与硅片表面充分接触，去除杂质。但是，如果时间过长，可能会对硅片表面造成过多的腐蚀，从而影响后续工艺。最后，选择合适的溶液浓度也是非常重要的，不同清洗液对污染物的去除效果是不同的，其浓度直接影响到清洗效果，浓度太低可能不能有效地去除杂质，太高又会破坏硅片表面。

### 2. 检验工艺的影响因素

首先，测试仪器的精度是决定单晶硅测试结果好坏的一个重要因素，高精度检测设备可为单晶硅晶圆的实际质量提供更为准确、可靠的测试数据。常用的检测设备有光学显微镜、扫描电镜、原子力显微镜等，装置可对单晶硅表面缺陷、显微组织及表面粗糙度的检测具有

重要意义。但是，由于设备本身的设计和制造水平以及在服役期间的维护保养等因素，影响着设备的精度。高精度仪器需要经过严格的标定及定期维修，才能保证其长期稳定可靠地工作，另外，操作人员的技术水平及经验对仪器的使用效果有很大的影响。其次，单晶硅检测过程中，环境条件对检测结果有很大影响，温度、湿度是环境中的两个重要参量，单晶硅材料在高温、低温条件下，其物理性质会发生变化，进而影响检测结果的准确度。较高的湿度会使单晶硅表面吸附水汽，形成水膜，从而影响检测仪器的正常工作；但湿度过低会产生静电，从而影响检测结果的稳定性。

### 3. 外部环境因素

首先，在单晶硅单晶硅片生产过程中，洁净程度是决定其质量的一个重要外在因素，在半导体加工过程中，任何微小的微粒污染都有可能导致单晶硅表面缺陷的产生，从而影响其电学性能及可靠性。为确保单晶硅晶圆的洁净度，通常需要采用无尘车间技术对空气中颗粒物进行控制，以保证其洁净度<sup>[2]</sup>。这些标准对洁净室的空气洁净度、温度和湿度的控制以及空气流动的组织进行了详细的规定，无尘室的建造与维护费用高昂，但在保证单晶硅质量方面具有不可替代的作用。其次，温度、湿度控制在车间环境管理中也占有非常重要的地位，温度、湿度变化直接影响单晶硅材料的物理性质及化学反应历程，进而影响单晶硅材料的质量。温度过高会在单晶硅单晶中引起热应力，从而影响晶体的结构稳定性；温度太低会导致材料的脆性，增加断裂的危险。较高的湿度会使单晶硅表面吸附水蒸气，影响清洗及检测结果；如果湿度太低，就会产生静电，从而增加污染的危险。

## 二、单晶硅片清洗检验工艺提升的策略分析

### 1. 优化清洗剂配方

对单晶硅清洗工艺进行优化,关键在于清洗剂的选择与配比,可针对不同类型的污染物,选用不同类型的化学剂,利用它们之间的协同效应。有机溶剂如异丙醇(IPA)、丙酮等可用于有机污染物;对于无机污染物,可选用诸如氢氟酸(HF)、氢氧化钾(KOH)之类的酸或碱溶液。在实际生产过程中,一般的清洗过程可能包含多道工序,每个工序都有不同的清洗方法和条件。如可以用去离子水(DI Water)冲洗以除去表面上的疏松微粒,然后,用混合酸(如盐酸与 $H_2O_2$ 混合液)对其进行化学腐蚀,除去其表面的氧化物层及金属杂质。该工艺条件为盐酸与 $H_2O_2$ 的体积比1:1、温度 $60^\circ\text{C}$ 、10分钟,为提高清洗效果,可考虑不同药剂间的协同作用,可将少量氢氟酸加入到混合酸中,可进一步加强氧化作用,此时,可将混合酸的比例调节为盐酸、双氧水、氢氟酸的体积比为2:1:0.5、温度 $70^\circ\text{C}$ 、5分钟,该配方能有效地提高硅片的清洗效率,并能有效地降低硅片表面的缺陷。在选用环保型清洗剂时,应充分考虑清洗剂的生物降解性,毒性及对环境的影响<sup>[3]</sup>。

### 2. 优化清洗工艺参数

最佳清洗时间尤为重要,如果清洗时间太短,则不能完全清除芯片表面的污物;如果清洗时间太长,可能会造成芯片表面的过度腐蚀。研究表明,在诸如氢氟酸(HF)或氢氧化钾(KOH)等普通化学清洁溶液中,清洁时间的最佳范围一般为1~5分钟,具体时间应视硅片初始清洁程度及清洗液浓度而定。例如,当用1%的HF溶液清洗硅片时,用3分钟的清洁时间可以有效地除去表面的氧化物层和颗粒,在实际生产中,可根据试验数据的反馈及经验的积累,逐步确定不同工艺条件下的最佳清洗时间。清洗温度对清洗效果也有一定的影响,温度升高可加快反应速率,提高清洗效率,但过高则易引起表面反应和破坏。一般来说,清洗硅晶片的温度为 $25\sim 60^\circ\text{C}$ 。以氨水( $\text{NH}_4\text{OH}$ )/过氧化氢混合液为例,发现 $50^\circ\text{C}$ 时,清洗效果最好,可有效去除水中的有机物及金属离子,在实际操作中,可利用温度控制装置对清洗温度进行精确控制,根据清洗液及工艺要求调整清洗液。

在清洗过程中,溶液浓度的优化是另一重要环节,浓度太低可能不能充分除去污染物,太高又会过量消耗化学物质,增加成本。如氢氟酸,清洁时一般用0.5%~2%的溶液,1%氢氟酸溶液对硅片表面无过度腐蚀,

仅需3分钟即能有效地除去硅片表面的微细颗粒及氧化层<sup>[4]</sup>。在实际应用中,可根据实际情况对清洗效果及溶液浓度进行定期检测,及时调整配方,以获得最好的清洗效果及经济效益。

### 3. 提高检验设备精度

采用高精度的测试仪器是提高测试准确性的前提,高分辨检测设备可对单晶硅表面微小缺陷及污染物进行更精确的捕获与鉴别。目前市面上最先进的光学显微镜、扫描电镜等,都可以提供纳米级的分辨能力,其中,光学显微镜能够达到200纳米的分辨能力,而扫描电镜则能够达到小于1nm的分辨能力,不仅可以对芯片表面微小缺陷进行检测,而且可以对芯片表面进行化学成分分析,为下一步的清洗、维修提供依据。在长期使用过程中,检测设备因机械磨损和电子元器件老化等原因,可能造成测量精度的降低,因此,设备的定期校验与维修十分必要。一般来说,校准周期是根据设备的使用频率及环境条件决定的,通常建议每3~6个月做一次完整的校准,在校准过程中,可采用标准样对仪器进行校准,以保证测量结果的准确。另外,要定期更换老化的电器零件及润滑零件,亦可延长其使用寿命,维持其运转稳定。在实际应用中,不同的检测仪器对校准标准及参数的要求也不同<sup>[5]</sup>。如光学显微镜的标定参数主要有光源的亮度、物镜的焦距、分辨率等,具体而言,显微镜的分辨率及焦距可利用标准光刻掩膜进行标定,以确保可精确成像及测量。对扫描电镜而言,其标定参数主要包括加速电压、探测器灵敏度、扫描速度等,可用标准硅晶片试样,比较其表面特征图谱,可对扫描电镜测试参数进行标定。

### 4. 增强数据分析能力

目前,机器学习与人工智能技术已被广泛地应用于制造领域,可针对单晶硅片清洗检测过程,利用有监督学习与无监督学习两种方法,对生产过程中产生的海量数据进行分析。如,可利用有监督的学习算法对清洗结果进行预测,提前发现潜在的问题并做出相应的调整;而无监督学习算法能够发现数据中存在的异常模式,有助于发现隐藏的问题。另外,可通过在清洗设备及检测设备上安装传感器,实时获取清洗液温度、浓度、流速、硅片表面清洁度等参数,利用物联网技术将采集的数据传输至中央数据处理中心,实现实时分析与监测,当发现异常状况时,系统能及时报警,并对有关参数进行调整,以保证清洗过程的平稳运行。

同时,大数据分析技术在单晶硅晶圆清洗检测过程中的应用,也是一种重要的技术手段,通过分析历史数据,找出工艺运行的规律与趋势,从而指导工艺优化。可通过对不同批次硅片清洗效果的分析,确定影响清洗效果的主要因素,并对清洗工艺参数进行优化。同时,可利用大数据分析技术,对设备进行预知性维护,使设备能够在最短时间内发现潜在的故障,从而避免因设备故障而造成的生产中断。例如,可将清洁液温度设定为 $70^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ 、浓度为 $5\% \pm 0.5\%$ 、流速为 $2 \text{ L/min} \pm 0.1 \text{ L/min}$ ,在此基础上,对各参数进行实时监测与分析,从而保证清洗过程的稳定。另外,可通过分析检测数据,确定硅片表面洁净度的标准参数,如颗粒数, $0.5 \mu\text{m}$ 以下颗粒数等,同时进行实时监测、分析各参数,保证硅片表面清洁。

### 三、单晶硅片清洗检验工艺的协同优化分析

#### 1. 建立反馈机制

单晶硅晶圆清洗时,通常要使用大量的化学剂,这些化学剂既能清除硅片表面的杂质,又会对环境造成污染,因此,建立一种实时反馈机制,可以实时监测化学药剂浓度、温度、清洗时间等参数,根据检测结果及时调整,是实现环境友好清洗的重要途径。通过在清洗装置上加装传感器及监测装置,可实现清洗液pH、温度、电导率等参数的实时采集;通过物联网技术将数据传输至中央控制系统,可按照预先设定的标准与实时数据对比,若发现异常,可自动调整清洗参数,保证清洗过程的稳定与环保。清洗干净的单晶硅片需经过严格检测,保证表面清洁度及物理性能达到要求<sup>[6]</sup>。建立快速响应机制,及时将检测结果反馈至清洗过程,及时调整发现的质量问题,对于提升生产效率与产品质量具有重要意义。建立智能化生产管理系统,实现检测数据和清洗过程参数的关联分析,当检测发现芯片表面有污渍或细小颗粒时,该系统能自动分析清洗液浓度不足、清洗时间不足等可能产生的原因,并对相应的清洗参数进行调整,以保证下一步硅片的质量达标。

#### 2. 多工艺联动优化

单晶硅的清洗与检测是紧密联系的两个过程,任何一步的优化都可能影响到另一步,因此,在工艺优化过

程中,应充分考虑清洗与检测过程的协同作用,寻求最佳平衡。如在清洁时,过量使用化学药品,虽可提高清洁效果,却增加了检查的难度,由于化学试剂的残留可能会腐蚀仪器,从而影响检测结果的准确。因此,在优化清洗工艺的过程中,应充分考虑检测设备的承受能力,选用合适的清洗方法及试剂,以确保芯片表面清洁,而不影响检测设备。可采用基于清洗与检测的协同优化方法,实现单晶硅晶圆生产效率的大幅提升,在环境保护上,通过减少化学试剂的使用量,减少废水的排放量,达到绿色生产的目的。

#### 结束语

综上所述,单晶硅片的清洗检验工艺分析有助于提高硅片的质量与性能,并为半导体工业的发展提供助力。高效率、高精度的清洗工艺与科学的检测手段相结合,将极大地提高生产效率,提高产品的可靠性。在未来,随着技术的进步,清洗检测技术也会不断优化,为促进半导体生产效率和环境友好化做出重要贡献,必将给行业带来新的突破与发展机遇。

#### 参考文献

- [1]黄宸,黄丹丹,王剑,孙业荣,鲍官培.单晶硅片的电化学-固结-游离磨料复合加工表面完整性[J].半导体技术,2024,49(06):549-554+560.
- [2]李涛,吕国强,李遇贤,钱益超,张杰.光伏单晶硅片冲洗过程中应力分布的研究[J].材料导报,1-13.
- [3]李志强,王杰,赵怡怡,王哲,刘迪.单晶硅片循环包装设计 with 可靠性分析[J].包装工程,2024,45(05):286-291.
- [4]宋爽,勾究芳,王丽婷,黄国平,姜利凯,曹华斌.硅片表面织构对PERC单晶硅太阳能电池电性能影响的研究[J].太阳能,2023,(06):50-58.
- [5]秦朗,何翠翠,商剑,齐锦刚,张峰.不同条件下单晶硅片磨抛过程中的应力应变模拟[J].电子元器件与信息技术,2023,7(05):1-4.
- [6]张立安.超薄单晶硅片加工检测技术的研究进展[J].现代工业经济和信息化,2022,12(09):27-29.