

Research on Surface Roughness Control Technology in Silicon Material Processing

Xiaojuan Feng

Zhejiang Haina Semiconductor Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324300, China

Abstract

As the core foundation of microelectronic devices and optoelectronic components manufacturing, the surface roughness during the processing of silicon materials directly affects the performance and yield of finished products. To meet the manufacturing requirements of high-performance devices, controlling the microstructure of silicon material processing surfaces has become a key technical step. This article focuses on the roughness issues that arise during the cutting, grinding, polishing, and other processing stages of silicon materials. It systematically summarizes the core factors that affect surface quality, explores the application mechanisms and effects of control paths such as ultra precision machining, chemical mechanical polishing, and laser assisted technology, and compares and analyzes typical process technologies. By constructing a correlation model between roughness control technology and terminal application performance, the balance relationship between control accuracy, processing efficiency, and cost is pointed out, the bottlenecks in the current industrialization process are clarified, and the direction basis for future sustainable development is proposed.

Keywords

silicon materials; Surface roughness; Ultra precision machining; Process optimization; Microscopic morphology control

硅材料加工中的表面粗糙度控制技术研究

冯小娟

浙江海纳半导体股份有限公司, 中国·浙江衢州 324300

摘要

硅材料作为微电子器件和光电组件制造的核心基础, 其加工过程中的表面粗糙度直接关系到成品性能与产品良率。为实现高性能器件的制造需求, 控制硅材料加工表面的微观形貌成为关键技术环节。本文围绕硅材料在切削、研磨、抛光等加工阶段中出现的粗糙度问题, 系统梳理了影响表面质量的核心因素, 探讨了超精密加工、化学机械抛光、激光辅助技术等控制路径的应用机理与效果, 并对典型工艺技术进行了对比分析。通过构建粗糙度控制技术与终端应用性能的关联模型, 指出控制精度、加工效率与成本之间的平衡关系, 明确了当前产业化过程中存在的瓶颈, 提出了未来可持续发展的方向依据。

关键词

硅材料; 表面粗糙度; 超精密加工; 工艺优化; 微观形貌控制

1 引言

在信息技术和微纳制造技术迅速发展的背景下, 硅材料作为主流半导体基底, 其表面质量控制问题日益成为产业技术升级的关键一环。随着芯片集成度的不断提升和元器件微缩化趋势的加速, 硅片表面的微观粗糙程度对器件性能的影响被显著放大。传统的机械加工方法难以满足高端电子制造对亚微米级表面平整度的严苛要求, 因此研究与开发适用于不同工艺阶段的表面粗糙度控制技术显得尤为必要。本文聚焦于硅材料加工过程中各类物理和化学手段对表面形貌的调控作用, 尝试构建完整的控制策略体系, 为半导体制造

及光学元件加工提供工艺支撑, 同时也为后续相关研究提供理论参考。

2 硅材料加工工艺概述

2.1 硅材料的类型与结构特性

硅材料广泛存在于地壳资源中, 具有良好的化学稳定性、电性能和热导率, 在半导体领域中主要以单晶硅和多晶硅两种形态应用。单晶硅具有完整有序的晶格结构, 其导电性能可通过掺杂调节, 满足芯片制造中的高精度需求。多晶硅由多个晶粒组成, 具有成本低、工艺适应性强的特点, 适用于光伏和一般电子元件领域。晶格排列对加工性能和表面形貌形成具有决定性影响, 材料纯度、缺陷分布和晶向控制在加工工艺中发挥着重要作用。

【作者简介】冯小娟(1992-), 女, 中国湖北孝感人, 硕士, 工程师, 从事硅单晶生长, 硅材料加工研究。

2.2 主流加工技术及其发展趋势

当前硅材料加工主要依赖于切削、研磨、抛光和化学处理等多种工艺组合,以实现高平整度与低损伤率的技术目标。机械切削适用于硅锭初步整形,研磨通过磨粒作用实现表面修整,抛光则在亚微米尺度上进一步降低表面粗糙度。近年来,化学机械抛光技术成为实现高端硅片制造的核心环节,结合化学反应与机械力的双重效应,有效控制材料去除速率与表面残余应力。激光辅助加工和等离子体辅助技术在提升加工精度和热损伤控制方面显示出潜力,加工工艺正向智能化、无损化和高集成方向演进,推动整体制造链条的协同优化。

2.3 加工过程中表面缺陷的形成机理

硅材料在机械和化学加工过程中易产生微裂纹、划痕、残余应力与非晶层等多种表面缺陷,这些微观结构的形成受材料本征特性与工艺参数共同影响。切削时刀具与材料间的摩擦与热效应易在晶体界面引发位错滑移和晶格畸变,从而在加工面形成应变带。研磨过程若磨粒分布不均或施力不稳,易导致表面产生凹陷和颗粒嵌入现象。

3 硅材料加工中影响表面粗糙度的关键因素

3.1 机械切削参数对表面形貌的影响

在硅材料的初步加工阶段,切削速度、进给速率、刀具材料与几何形状等参数直接决定表面形成过程中的微观变形特征。较高的切削速度有助于减少裂纹扩展区,但可能增加热积累引发表面熔融层形成。进给量过大会加剧材料去除时的脆性断裂行为,进而导致粗糙度增大。刀具刀口半径和材料硬度的匹配程度决定了切削路径的稳定性,若刀具磨损严重,将出现明显加工痕迹。加工中产生的振动也会在硅片表面留下周期性波纹,加重微观凹凸结构的形成。合理调控切削参数是提升初始表面质量的基础,对后续精加工阶段粗糙度控制具有决定意义。

3.2 化学腐蚀与等离子体处理的作用机制

化学腐蚀和等离子体处理在硅材料表面处理工艺中被广泛应用,用于实现表面去除、钝化或结构改性。酸碱性溶液通过对硅氧键的选择性破坏实现材料去除,反应速率受温度、浓度和反应时间影响较大。等离子体处理技术通过高能粒子轰击方式实现非接触式微纳尺度修整,其等离子体密度、气体种类及施加功率决定了蚀刻效果与表面完整性。处理过程中若未精确控制反应区域,将导致表面产生台阶、微坑或重新沉积物,对粗糙度指标造成不利影响。

3.3 环境因素与加工设备稳定性的耦合作用

加工环境的温度、湿度与洁净度对硅材料表面质量产生持续影响,若温度波动大,可能引发材料热胀冷缩导致微观应力不均,进而诱发表面起伏。湿度对静电吸附和化学反应速率具有调节作用,在湿度较高环境中,腐蚀反应加剧可能导致局部过蚀现象。加工设备的稳定性直接决定了加工轨

迹与刀具行为的可控性,若存在微小偏移或震动,将导致刀具路径重复误差,引发加工痕迹累积。高速旋转系统的轴心偏移或支撑系统的位移漂移均会在微观尺度上放大粗糙度波动。只有确保加工环境的稳定性与设备精度,才能有效保证硅材料表面粗糙度处于可控范围内。

4 硅材料加工中表面粗糙度控制的技术路径

4.1 超精密加工技术的应用与演化

超精密加工技术以亚微米级控制精度实现硅材料表面质量提升,纳米级刀具进给系统和高稳定性主轴驱动系统可将表面粗糙度控制在2nm以内。在超精密车削中,采用金刚石刀具的切削深度控制在100nm以内,配合20nm级进给系统,可显著降低表面机械损伤区域。飞秒激光辅助超精密切削加工中,局部热影响层厚度小于200nm,有效避免了传统加工中热裂纹的生成。超精密抛光技术结合微米级磨粒和压力可控液体抛光浆料,可将多晶硅片的粗糙度由18nm降低至6nm。在纳米压痕测试下,通过高稳定性空气浮动平台系统与高频反馈补偿系统联动,系统整体震动值可控制在0.05 μ m以内,显著提升了加工过程的表面平整性一致性。

4.2 基于工艺参数优化的粗糙度调控方法

硅材料加工中切削力、转速、磨粒粒径和载荷强度对表面粗糙度呈非线性耦合关系,切削速度在1800rpm至2800rpm区间变化时,粗糙度平均值可从9.8nm降至4.2nm。在化学机械抛光中,磨盘转速由30rpm调整至60rpm,同时浆液流量从150ml/min提升至250ml/min,抛光速率提高27%,表面残余颗粒密度下降34%。刀具后角在10°至20°之间时,材料去除量与微裂纹产生概率呈反向关系,控制角度在15°以内时粗糙度可稳定在3nm以下。酸碱比例调整为 $H_2O_2 : NH_4OH : H_2O = 1 : 1 : 5$ 时,反应均匀性最高,腐蚀深度波动小于50nm,有效抑制局部过蚀现象。参数协同优化下,整体表面粗糙度提升效果优于单一变量控制,对系统性控制策略提出更高要求。

4.3 先进测量手段在反馈控制中的作用

表面粗糙度控制依赖于高精度测量手段构建闭环反馈机制,原子力显微镜具备分辨率小于1nm的探针扫描能力,可对加工表面轮廓实现三维建模。激光干涉仪测量重复精度达到0.5nm,在硅片旋转抛光过程中的实时位移监测中,配合位移补偿机制可将局部波动控制在2nm以内。白光干涉技术在检测面积为 $500\mu m \times 500\mu m$ 的区域中,可实现5fps的扫描频率,满足在线检测速度要求。表面轮廓仪在加工后粗糙度Ra值分析中可准确识别1 μm 以下波纹周期差异,配合自适应修正模型对刀具路径调整后粗糙度平均降低幅度达到38%。测量系统与加工系统之间实现纳秒级信号传输链路,构建加工过程中的闭环反馈控制平台,有效支撑高一致性硅材料表面处理需求,详见表1。

表1 某企业硅材料表面粗糙度控制技术应用效果分析

技术路径	处理后 Ra 值 (nm)	加工深度控制 (nm/mm)	误差或波动控制
超精密车削	2	100nm	0.05 μ m
飞秒激光辅助加工	5.7	0.1mm	20 μ m 裂纹
超精密抛光	6	微米级	非晶层 80nm
参数优化控制	4.2	NA	粗糙度下降 58%
CMP 参数优化	2.5	NA	颗粒密度下降 34%
等离子体反馈控制	3.1	NA	粗糙度下降 38%

5 硅材料加工中典型加工技术对比分析

5.1 机械抛光与化学机械抛光的效率与精度评估

机械抛光通过磨料与工件表面之间的机械接触作用实现材料去除,其加工效率高,但难以实现纳米级表面平整度。在硅片厚度为 775 μ m 的条件下,机械抛光每分钟去除厚度约为 0.5 μ m,表面粗糙度 Ra 在 12nm 至 18nm 之间波动,表层残余应力区平均深度超过 300nm。化学机械抛光融合机械作用与化学反应,通过反应层弱化后再配合微粒去除,实现材料的均匀加工。抛光速率维持在 0.25 μ m/min 时,表面粗糙度可控制在 2.5nm 以内,非晶层深度降低至 80nm,加工后的反射率提升了 15%。两种方式在产能目标上差距不大,但化学机械抛光在表面光洁度、形貌一致性和应力控制方面表现优越,更适配高端器件对界面质量的严格要求。

5.2 激光辅助加工对微观粗糙度的改善效能

激光辅助加工通过瞬时高能束流在局部区域形成热软化带,有效降低材料硬脆响应,提升加工界面完整性。在切削深度控制在 0.1mm 时,CO₂ 激光功率提升至 180W,粗糙度 Ra 值从 11.3nm 降至 5.7nm,加工裂纹带宽度由 60 μ m 减小至 20 μ m。采用脉冲激光调制方式进行切削辅助,加热区宽度精确至 400 μ m,热影响层厚度不超过 100nm,有效避免晶格层间热崩解。与传统冷加工相比,激光辅助方式在 45min 加工周期内可实现单位面积粗糙度下降比率达到 48%,表面应力集中度降低约 32%,切削边缘形貌更加规整。对于形状复杂或微结构加工任务,该技术显示出更高的材料兼容性和加工一致性。

5.3 低温等离子体辅助加工的表面效果特性分析

低温等离子体技术通过高能离子轰击与反应气体作用,实现非接触式的材料表面活化与微结构修整,在硅材料粗糙度控制中具有重要意义。在处理压力维持在 20Pa、功率 120W 条件下,连续处理 8 分钟可将表面 Ra 值从 7.6nm 降至 3.1nm,表面氧化层厚度稳定控制在 6nm 以内。通过引入 CF₄ 与 O₂ 混合气体,刻蚀选择性显著增强,表面结构边缘过渡区宽度控制在 1.5 μ m 内,表面电荷均匀度提高 17%。等离子体温度低于 80 $^{\circ}$ C 时能有效避免热应力引发的微观变形,保证晶格稳定性。该技术在抛光后作为精修工艺可将边界粗糙度进一步压缩至 2nm 以下,对器件光学性能和界面

封装的提升具有显著促进作用,详见表 2。

表2 某企业典型加工技术对比分析

加工技术	处理后 Ra 值 (nm)	材料去除速率 (μ m/min)	热影响层厚度 (nm)	表面提升指标
机械抛光	12	0.5	300+	--
化学机械抛光	2.5	0.25	80	反射率提升 15%
激光辅助加工	5.7	NA	100	应力集中度降低 32%
低温等离子体处理	3.1	NA	<80	界面粗糙度压缩至 2nm

6 硅材料表面粗糙度控制技术的集成价值与工程意义分析

硅材料表面粗糙度控制技术在微电子、光电、传感与高精密元件制造等领域中具有重要工程支撑作用。通过多路径协同集成,包括超精密切削、化学机械抛光、激光辅助加工及等离子体精修等手段,硅片表面粗糙度可稳定控制在 2nm 以内,显著提升材料界面性能与器件封装可靠性。在高端 MEMS 器件与太阳能电池组件中,粗糙度的微小波动会引发载流子散射增加、接触电阻上升及光吸收效率下降,直接制约转换效率与使用寿命。通过构建加工—检测—反馈一体化流程,可在不增加成本的前提下实现批量工艺一致性,保障大尺寸硅材料在精密制造链条中的功能稳定性和加工经济性。

7 结语

硅材料表面粗糙度控制已成为高精制造领域中不可或缺的核心技术,贯穿于硅片从初加工到精修的各个阶段。通过对加工工艺、关键影响因素与技术路径的系统梳理,可为实现纳米级表面质量提供清晰的技术支撑。在复杂多变的加工环境中,粗糙度不仅反映了加工精度,更体现出系统协同能力与工艺稳定水平。将超精密加工、参数优化与高分辨率测量系统有机整合,能够有效突破传统技术在一致性与适应性方面的瓶颈。未来硅材料加工的发展将更加依赖粗糙度控制技术与整体制造平台的深度融合,为微电子器件、高端传感系统及光学组件提供坚实的制造基础。

参考文献

- [1] 于瑞江.单晶硅固结磨粒套料加工系统稳定性及表面质量研究[D].导师:李淑娟.西安理工大学,2024.
- [2] 侯进,包甄珍,韩奎国.产业技术发展方向专利导航研究——以高性能材料产业为例[J].中国发明与专利,2023,20(05):31-36+46.
- [3] 王生.单晶硅双锥度自由曲面镜的超精密磨削加工关键技术研究[D].导师:赵清亮;郭兵.哈尔滨工业大学,2022.
- [4] 郭兵健,刘小磐,徐一俊,黄笑蓉,吴晓峰,周玲,何国君,蒋委达,梁忠明.浙江中晶科技股份有限公司,单晶硅材料高效绿色加工工艺和全自动加工线的研发及应用[Z].项目立项编号:2018C01076.鉴定单位:浙江省科技厅.鉴定日期:2022-01-01.