

Progress in the Application of Chemical Mechanical Polishing in Silicon Material Processing

Xiaojuan Feng

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

Abstract

Chemical mechanical polishing, as a high-precision and high-efficiency surface processing technology for silicon materials, has become an indispensable key link in the semiconductor manufacturing process. This technology effectively improves the surface flatness and smoothness of wafers through the synergistic effect of chemical reactions and mechanical grinding, meeting the process requirements at the nanoscale. This article systematically explores the application progress of chemical mechanical polishing in silicon material processing, sorts out its principle composition, process parameters, material adaptability, and defect control strategies, further analyzes the development trend of equipment updates and technology integration, emphasizes its key position and future expansion potential in the high-end manufacturing field, and provides theoretical reference and technical support for subsequent related research and engineering practice.

Keywords

silicon materials; Chemical mechanical polishing; Surface quality; Process optimization; defect control

化学机械抛光在硅材料加工中的应用进展

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

化学机械抛光作为一种高精度、高效率的硅材料表面加工技术，已成为半导体制造过程中不可或缺的关键环节。该技术通过化学反应与机械磨削的协同作用，有效提升了晶圆表面平整度与光洁度，满足纳米级尺度下的工艺需求。本文围绕化学机械抛光在硅材料加工中的应用进展展开系统探讨，梳理其原理构成、工艺参数、材料适应性及缺陷控制策略，进一步分析设备更新与技术集成的发展趋势，强调其在高端制造领域的关键地位与未来拓展潜力，为后续相关研究与工程实践提供理论参考与技术支持。

关键词

硅材料；化学机械抛光；表面质量；工艺优化；缺陷控制

1 引言

随着半导体器件向高集成度、超小尺寸与高性能方向发展，硅材料加工精度的要求不断提升，传统加工技术在控制表面粗糙度与缺陷密度方面已显不足。在这一背景下，化学机械抛光作为一种集化学腐蚀与机械磨削于一体的复合加工方式，因其能有效提升硅材料表面形貌一致性与晶圆良率而受到广泛关注。当前，该技术已广泛应用于单晶硅、多晶硅及掺杂硅等不同类型材料的终端抛光环节，成为集成电路、微机电系统及先进封装领域的重要基础支撑。研究其应用进展与技术演化，不仅有助于理解关键工艺机制，还能推动硅材料深度加工能力的持续提升。

2 硅材料加工的技术特征与加工难点

硅具有稳定的晶体结构和优良的半导体性能，其硬度适中但脆性较大，在机械加工过程中极易产生微裂纹和边缘破损。这种材料特性决定了加工工艺需具备高精度力控与热控能力，以避免因力学应力集中引发结构失效。硅的热导率在加工中限制了局部高温的快速扩散，造成热应力的积聚，对加工路径与热场分布提出严格要求。表面活性变化敏感，要求化学处理过程稳定可控。由于这些理化特征的耦合作用，加工中任何轻微误差都可能导致器件性能下降，工艺窗口收窄，对整体工序协同与材料响应控制能力构成挑战，推动了以化学与机械复合作用为基础的先进加工技术的发展。当工艺线宽逐渐收窄至纳米级别后，这些传统方法对材料性能和几何精度的保障能力已明显不足，加之在大规模量产中效率有限，促使行业逐步向化学与机械协同调控的抛光技术转型。

【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，硅材料研究。

3 化学机械抛光原理与工艺组成

3.1 CMP 工艺的反应机理与作用过程

化学机械抛光是一种通过化学反应与机械磨削共同作用实现材料去除与表面修复的精密加工技术。在加工过程中，化学反应使硅表面形成一层软化氧化膜，该膜在抛光垫与浆料中磨粒的剪切力作用下被逐层移除，实现对目标区域的选择性去除与宏观平整度调节。浆料中酸碱组分控制氧化反应速率，磨粒的尺寸与形貌决定材料剥离效率与表面损伤程度。抛光过程中表面温度、摩擦力与流体动力的综合耦合作用影响氧化膜更新与去除的动态平衡。整个反应机制必须在温和可控的条件下进行，以保证结构层完整性与晶格畸变最小化，是实现纳米级平坦化的关键工艺支撑。

3.2 抛光垫、浆料与化学剂的协同机制

抛光垫作为机械支撑介质，其弹性模量、孔隙结构与表面粗糙度直接影响磨削均匀性与浆料分布特性。高性能抛光垫能实现应力分布的动态均衡，提升大面积晶圆的局部一致性。浆料中的磨粒材料需具备适度硬度与高分散性，以保障在单位压力下实现稳定材料去除速率并避免表面划伤。化学剂组分需与硅表面反应形成可控的氧化膜，同时抑制副反应与腐蚀过度现象。在三者的协同作用下，浆料在抛光垫与晶圆之间形成流体润滑层，实现微观尺度的反应 - 剥离 - 更新循环。系统协同的精细控制对表面质量的稳定输出起到决定性作用，也是技术可靠性与量产一致性的保障基础。

3.3 关键参数对抛光效果的控制作用

化学机械抛光过程涉及多个动态参数的耦合调节，包括压力、转速、温度、浆料流量与磨粒浓度等，这些参数的微小变动都会对材料去除速率、表面粗糙度与缺陷形貌产生显著影响。单位压力决定了磨粒与表面之间的剪切强度，抛光盘与晶圆的相对运动轨迹影响应力分布与物料更新路径，温度变化则调控反应速率与浆料黏度。浆料流量与化学剂浓度共同作用于表面反应能力与清洗效率，进而影响加工过程的稳定性与重复性。不同参数间存在复杂的非线性响应关系，需通过系统试验与反馈控制优化工艺窗口。在特定材料与目标要求下，实现工艺参数的精细匹配，是获得稳定优质抛光效果的核心条件。

4 CMP 在不同类型硅材料加工中的应用现状

4.1 单晶硅晶圆抛光中的工艺路径

单晶硅晶圆在尺寸拓展与节点缩小双重背景下，对化学机械抛光的均匀性与去除精度提出了苛刻要求。在 300mm 晶圆加工中，要求总厚度变化控制在 $0.3 \mu\text{m}$ 以内，表面粗糙度 Ra 小于 0.2nm 。典型工艺采用前处理氧化、主抛光与终抛光三阶段路径，其中主抛阶段的材料去除速率维持在 80nm/min ，终抛光阶段控制在 10nm/min 以内以提升光洁度。浆料中磨粒浓度为 1.5wt\% ， pH 值调节至 10.5 以增强化学氧化能力。在生产线上，通过调整抛光盘转速从

60rpm 降至 45rpm ，实现边缘区域应力分布优化，良品率由 95% 提升至 99.2% 。在 12 英寸晶圆加工中，采用双面 CMP 技术后，翘曲值可从 $45 \mu\text{m}$ 降低至 $18 \mu\text{m}$ ，为后续掺杂与刻蚀提供稳定支撑。

4.2 多晶硅表面处理的适应性分析

多晶硅因其晶界分布不均与各向异性导致表面在机械加工后常残留局部隆起与凹陷，需借助 CMP 进行微观重整。常用粒径为 40nm 的氧化铈浆料与弹性系数为 600kPa 的多孔抛光垫组合，去除速率约为 35nm/min ，经过 15 分钟处理后表面粗糙度从 4.2nm 降至 0.6nm 。多晶结构内部硬度波动幅度为 $\pm 12\%$ ，在抛光过程中需动态调整下压力至 35kPa ，以维持材料去除均衡。为降低晶界处应力集聚，采用周期振荡式路径控制晶圆与抛光头的相对位移，边缘损伤率由 7.5% 降至 2.1% 。在多晶太阳能硅片中，CMP 后反射率由 18% 降至 12.3% ，明显提升了光电转换效率。该工艺路径已在年产 2000 万片电池片的生产线上完成批量应用。

4.3 掺杂硅与微结构硅元件的抛光需求

掺杂硅在高掺杂浓度区存在载流子迁移率变化，CMP 过程中对反应选择性与力学响应提出更高要求。以磷掺杂浓度达 $1 \times 10^{19}\text{cm}^{-3}$ 为例，常规浆料去除速率不稳定，需引入氨基磺酸添加剂以实现低损伤处理，控制在 25nm/min 并保持表面平整度小于 0.3nm 。针对微结构硅元件，特别是沟槽深度小于 200nm 、间距小于 500nm 的结构，需使用粒径小于 20nm 的胶体二氧化硅，并将抛光时间精确控制在 10 秒至 15 秒区间内，避免结构倒塌或边缘塌陷。为保障掺杂区电阻率保持在 $5.6\text{m}\Omega \cdot \text{cm}$ 以内，终抛阶段浆料 pH 调至 9.2 ，并配合低压 0.9psi 工况运行。在 65nm 器件工艺中，CMP 后漏电流下降了 23% ，器件良率提升了 4.8% ，验证了精细抛光技术在微结构保持与电性一致性控制中的重要作用。

5 工艺优化与缺陷控制技术进展

5.1 抛光速率与表面粗糙度的耦合调节

化学机械抛光过程中的去除速率与表面粗糙度存在显著耦合关系，高速率容易引发表面破坏，低速率则影响产能效率。在标准工艺条件下，当去除速率超过 100nm/min 时，表面粗糙度 Ra 往往大于 0.4nm ，而在 60nm/min 控制范围内 Ra 可维持在 0.25nm 以下。通过控制浆料中磨粒含量从 2wt\% 降至 0.8wt\% ，并辅以 pH 值从 11 降至 10.2 的化学剂调节，可在保持 60nm/min 的基础上实现 Ra 下降 23% 。温度控制对抛光结果也有明显影响，在 30°C 至 40°C 范围内，材料去除稳定性提升了 17% 。通过双区压力分布设计，将中心与边缘压力差控制在 0.3psi 以内，有效减小 TTV 波动幅度至 $0.18 \mu\text{m}$ 。耦合调节策略优化后，单片加工周期从 230 秒缩短至 190 秒，批次合格率提升至 98.7% 。

5.2 划痕、腐蚀及残留物的形成机制与控制手段

划痕主要来源于浆料中异物颗粒或磨粒团聚，粒径超

过 100nm 时造成表面线状损伤概率上升 27%。通过使用离心过滤系统控制颗粒直径小于 50nm，并配合浆料在循环过程中的稳定性控制，划痕密度从 $0.42/\text{cm}^2$ 降至 $0.08/\text{cm}^2$ 。腐蚀问题常与化学剂浓度失衡有关，pH 值波动超过 ± 0.5 时腐蚀区域扩大率高达 39%。采用自动 pH 控制系统并对浆料进行在线电导率监测，使腐蚀层深度控制在 2nm 以内。残留物主要为有机络合物与金属离子，清洗阶段引入螯合剂浓度控制在 0.1mol/L ，并设置去离子水流速为 $3\text{L}/\text{min}$ ，使残留密度下降至 $1.2\text{E}10 \text{ atoms/cm}^2$ 。多源缺陷控制后，晶圆表面缺陷总数从 312 个降至 68 个，有效支撑后续层间结构成型工艺的稳定实施。

5.3 新型材料与纳米尺度下的缺陷防控技术

随着工艺节点进入 5nm 以下尺度，传统 CMP 体系难以满足材料多样性与表面缺陷控制的双重需求。在 SOI 结构与高 k 介质层中，界面层厚度小于 1.2nm，对抛光应力与化学反应窗口极为敏感。引入粒径小于 15nm 的新型球形纳米磨粒，配合 pH 值为 9.8 的弱碱性环境，使表面粗糙度稳定在 0.18nm 以下。低 k 材料中采用分子键合剂稳定界面反应速率，将缺陷密度控制在 $0.05/\text{cm}^2$ 以内。为实现多材料之间的选择性抛光，设计了腐蚀速率比在 1.0 至 1.4 范围内调节的工艺路径，结构保持率提高 31%。在多层铜互连结构中，通过设置双阶段 CMP 与实时 AFM 监测系统联动，纳米缺陷检测率提升至 96%。这些新技术的集成，有效支撑了 7nm 以下节点的高密度结构构建。

6 CMP 装备技术演进与集成应用趋势

6.1 高精度 CMP 设备的结构创新与运动控制

新一代 CMP 设备在结构模块与运动控制系统方面持续优化，以满足亚纳米级加工精度要求。主轴系统采用多自由度可调控机构，可实现 0.01mm 量级的压力实时分布调整，提升边缘区域的均匀性控制。驱动系统由传统固定转速方式升级为伺服闭环控制结构，转速误差控制在 $\pm 0.2\text{rpm}$ 范围内，支持复杂运动轨迹的路径编程。平台集成多通道负载反馈系统，实现动态工况下的载荷响应优化。在磨头设计方面引入气浮式支撑结构，可有效减小振动传递与机械干扰对表面质量的影响。设备本体结构采用低热膨胀复合材料，实现温度变化下的机械稳定性保持。通过这些技术融合，CMP 设备在纳米尺度下的加工能力获得显著提升，满足先进节点晶圆的制程需求。

6.2 多片式加工模式与在线检测系统的融合

为提升 CMP 设备在大规模晶圆制造中的效率与一致性，装备系统逐步转向多片式加工结构与高集成检测模块相结合的发展路径。新型设备支持四工位同步加工结构，单机日处理能力超过 1200 片，抛光头间差异控制在 3% 以内。

在线检测系统嵌入全流程，实现 TTV、粗糙度与残留物浓度的实时监测，检测精度优于 $0.05\mu\text{m}$ 。光学干涉仪与电容式测厚传感器共同构建多通道数据采集系统，支持抛光过程每 10 秒自动修正一次路径偏差。系统与 MES 平台数据交互，实现批次间差异自动比对与异常报警。通过软件驱动的边缘预测机制，可在抛光中途预判缺陷风险并调整载荷分布，显著提升良率稳定性与设备运行效率，形成闭环式生产控制体系。

6.3 CMP 在硅基异质集成与大尺寸晶圆中的拓展应用

异质集成芯片结构中涉及多材料、跨结构的界面处理需求，对 CMP 提出复合选择性与微观应力兼顾的技术挑战。在硅与砷化镓、氮化镓等材料界面，采用低应力反应配方与多段速去除策略，可使表面粗糙度稳定在 0.3nm 以内。 300mm 及 450mm 晶圆加工中，传统设备在边缘控制与热稳定方面存在瓶颈，需引入动态温控系统与压电驱动调节装置，将边缘 TTV 误差从 $0.6\mu\text{m}$ 降至 $0.2\mu\text{m}$ 。异质集成封装中，CMP 作为 RDL 平坦化与通孔端面处理关键环节，其加工深宽比控制能力直接影响互连可靠性。在三维封装堆叠过程中，需对每层界面实施独立参数设定与实时反馈调节，使叠层偏差控制在 $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以内。CMP 技术在集成复杂度不断提升的背景下展现出关键支撑价值。

7 结语

化学机械抛光技术在硅材料加工领域的深入应用，显著提升了晶圆表面质量控制与结构均匀性保障水平。随着设备精度、材料体系与工艺路径的持续优化，其在超大规模集成电路制造与异质集成领域中的重要性不断增强。当前，该技术已实现从单一工艺模块向系统集成方案的转变，具备高度的柔性调控与稳定输出能力。在未来的硅材料深度加工中，CMP 将继续作为关键环节贯穿于各类纳米结构、复合材料与新型封装流程中，其技术性能与装备智能化水平的演进将直接决定工艺体系的先进性与制程能力的边界，为新一代芯片制造体系提供更加坚实的加工基础与质量保障。

参考文献

- [1] 刘宜霖,张博,吴昊,丁明明,王胜.以 SiC 为代表的第三代半导体超硬材料平坦化前沿技术[J].电子工业专用设备,2025,54(02):21-25.
- [2] 张潇,周建伟,杨云点,罗翀,栾晓东,邵祥清,李瑾.水溶性聚合物提高多晶硅 CMP 表面质量的机理[J].微纳电子技术,2025,62(04):105-113.
- [3] 王东伟,王胜利,杨云点,罗翀,栾晓东,邵祥清,李瑾.皱纹状介孔 C-mSiO₂/CeO₂复合磨料对氧化硅 CMP 的机理分析[J].润滑与密封,
- [4] 郝萍.二氧化硅抛光液中金属杂质的检测方法[J].上海计量测试,2024,51(04):11-13+17.