

Research on the Coordinated Optimization of Grinding and Polishing Processes for Ultra-thin Silicon Wafers below 50 μm

Yuehua Chen Yonghua Fang Yufeng Zhan

Zhejiang Xusheng Electronics Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324300, China

Abstract

With the development of integrated circuit manufacturing toward higher integration density and lower power consumption, wafer thinning has become a key process for improving device performance and packaging reliability. Ultra-thin silicon wafers with thicknesses below 50 μm are prone to warpage, micro-cracks, and residual stress concentration during grinding and polishing, which places higher demands on process coordination. Focusing on the stability of processing quality and yield improvement of ultra-thin silicon wafers, this study systematically analyzes the intrinsic relationships between the two core processes of grinding and polishing in terms of material removal mechanisms, surface damage evolution, and stress release behavior, and discusses the comprehensive effects of key process parameters on damage layer thickness, surface roughness, and flatness. By establishing a collaborative optimization strategy for the grinding and polishing processes, the constraining role of grinding-induced surface conditions on polishing efficiency and quality consistency is emphasized, providing theoretical foundations and technical support for achieving low-damage and high-stability precision machining of ultra-thin silicon wafers below 50 μm .

Keywords

Ultra-thin silicon wafer; Grinding process; Polishing process; Collaborative optimization; Surface quality

面向 50 μm 以下超薄硅片的磨削与抛光工序协同优化研究

陈跃骅 方勇华 詹玉峰

浙江旭盛电子有限公司, 中国·浙江 衢州 324300

摘要

随着集成电路制造向高集成度与低功耗方向发展, 硅片减薄已成为提升器件性能与封装可靠性的关键工艺环节。50 μm 以下超薄硅片在磨削与抛光过程中易产生翘曲、微裂纹及残余应力集中等问题, 对加工工艺的协同性提出了更高要求。围绕超薄硅片加工质量稳定性与良率提升目标, 系统分析磨削与抛光两道核心工序在材料去除机理、表面损伤演化及应力释放方面的内在关联, 探讨关键工艺参数对损伤层厚度、表面粗糙度和平整度的综合影响。通过构建磨抛工序协同优化思路, 强调磨削表面状态对抛光效率与质量一致性的约束作用, 为50 μm 以下超薄硅片实现低损伤、高稳定性的精密加工提供理论依据与技术支撑。

关键词

超薄硅片; 磨削工序; 抛光工序; 协同优化; 表面质量

1 引言

在先进封装与三维集成技术快速发展的背景下, 硅片厚度不断向极限减薄方向演进, 50 μm 以下超薄硅片逐步成为高端集成电路制造的重要基础材料。厚度显著降低后, 硅片整体刚度急剧下降, 对外界载荷与加工扰动的敏感性明显增强, 传统磨削或抛光单独优化的工艺模式已难以满足高质量加工需求。磨削工序虽具备高去除效率, 但易引入亚表面损伤与残余应力, 而抛光工序在改善表面形貌的同时, 其去

除能力受前序磨削状态制约明显。两道工序在材料去除尺度、应力演化及缺陷传递方面呈现出高度耦合特征。基于此, 有必要从整体工艺链角度出发, 系统研究磨削与抛光工序之间的协同关系, 通过参数联动与过程匹配, 实现超薄硅片加工质量、稳定性与制造效率的综合提升。

2 超薄硅片磨削与抛光协同优化的工艺基础

2.1 50 μm 以下超薄硅片的力学特性与加工敏感性

当硅片厚度降低至 50 μm 以下时, 其弯曲刚度呈指数级下降, 抗弯能力与抗冲击能力明显削弱。在加工载荷作用下, 硅片更容易产生整体翘曲和局部应力集中现象, 微小外力波动即可引发裂纹萌生与扩展。硅材料固有的脆性特征使其对

【作者简介】陈跃骅(1971—), 男, 中国开化人, 工程师, 从事硅材料加工研究。

表面和亚表面缺陷极为敏感，加工过程中形成的微裂纹、残余应力和非均匀变形均可能在后续工序中被放大。磨削和抛光作为典型去除工序，其载荷形式、接触状态及热效应对超薄硅片稳定性影响显著。

2.2 磨削与抛光工序在超薄硅片加工中的功能分工

磨削工序在超薄硅片加工中主要承担材料去除和厚度控制任务，其核心目标是实现高效率减薄并获得可控的表面形貌。通过合理选择砂轮粒度和磨削参数，可以在保证加工效率的同时限制损伤层深度。抛光工序则侧重于消除磨削残留的表面缺陷和亚表面损伤，实现表面粗糙度和应力状态的进一步改善。二者在功能定位上具有明显差异，但在工艺链条中相互制约。磨削质量直接决定抛光负载水平和去除效率，而抛光能力又对磨削允许损伤程度形成反向约束。

2.3 工序协同优化对超薄硅片质量控制的技术意义

针对 $50\mu\text{m}$ 以下超薄硅片，加工质量不再由单一道工序决定，而是由磨削与抛光的整体协同效果共同控制。协同优化能够在工序间建立合理的质量传递关系，使磨削阶段形成的表面状态与抛光能力相匹配，避免因损伤叠加导致的缺陷放大。通过对损伤层厚度、残余应力分布及表面形貌的系统控制，可显著降低翘曲变形和隐性裂纹发生概率。工序协同还能够减少抛光阶段的去除量和加工时间，从而降低热效应和二次损伤风险。该技术路径对提升超薄硅片加工良率和稳定性具有重要意义，是实现高一一致性、高可靠性加工的重要基础^[1]。

3 面向 $50\mu\text{m}$ 以下超薄硅片的磨削工序关键参数优化

3.1 磨削方式与设备结构对超薄硅片稳定性的影响

磨削方式和设备结构是影响超薄硅片加工稳定性的关键因素。双面磨削或高精度背磨结构能够在一定程度上平衡硅片两侧受力，降低单面载荷引起的弯曲风险。设备结构刚度不足会放大磨削振动，使接触力呈现周期性波动，进而诱发局部应力集中。磨削平台的吸附与支撑方式对 $50\mu\text{m}$ 以下硅片尤为关键，支撑不均易导致加工过程中产生瞬态翘曲。通过提高设备整体刚度和运动平稳性，可有效抑制动态变形，为后续参数优化提供稳定的工艺基础。

3.2 磨削参数组合对损伤层厚度与翘曲变形的作用机制

磨削参数组合直接影响硅片表面损伤形态和变形程度。砂轮粒度、转速、进给速度与磨削压力之间存在复杂耦合关系。较粗粒度和较大进给速度有利于提升材料去除效率，但容易增加裂纹扩展深度和残余应力水平。过高磨削压力会使超薄硅片产生明显弹性变形，卸载后形成永久翘曲。通过降低单位载荷并采用多阶段减薄策略，可将损伤层控制在可抛光去除范围内，同时抑制宏观变形的积累。参数组合的合理匹配是实现低损伤磨削的核心技术手段。

3.3 磨削表面状态对后续抛光工序的适配要求

磨削表面状态决定了抛光工序的去除效率和稳定性。表面粗糙度过高会增加抛光初期的局部接触应力，导致材料去除不均，而损伤层分布不均则可能在抛光过程中形成应力释放不一致现象，引发新的翘曲。对 $50\mu\text{m}$ 以下超薄硅片而言，磨削后表面需具备均匀纹理和可控损伤深度，以保证抛光载荷分布平衡。通过优化磨削参数获得稳定表面状态，可显著降低抛光去除量和加工风险，实现磨削与抛光之间的高效衔接^[2]。

4 面向 $50\mu\text{m}$ 以下超薄硅片的抛光工序精细化控制

4.1 抛光材料与抛光垫特性对表面质量的影响

在 $50\mu\text{m}$ 以下超薄硅片抛光过程中，抛光材料与抛光垫的物理化学特性直接决定表面质量演化规律。抛光液通常以二氧化硅溶胶为主要磨料，其粒径多控制在 $20\sim 80\text{ nm}$ 范围内，粒径分布的集中程度对材料去除均匀性具有显著影响。粒径过大会加剧局部微切削效应，引发表面划伤，而粒径过小则导致去除效率显著下降。抛光垫硬度和孔隙结构同样关键，实验表明，当抛光垫邵氏硬度控制在 $60\sim 70$ 之间、孔隙率维持在 $35\%\sim 45\%$ 区间时，可在保证接触稳定性的同时实现较好的流体更新能力。抛光垫表面形貌对载荷分布具有调节作用，合理的微孔结构有助于缓冲瞬时载荷波动，使表面粗糙度 R_a 稳定降低至 0.3 nm 以下，为超薄硅片获得高质量镜面提供基础条件。

4.2 抛光工艺参数对表面粗糙度与应力释放的调控作用

抛光压力、抛光盘转速及抛光时间共同构成抛光工艺参数体系，对表面粗糙度和残余应力释放过程产生耦合影响。对于 $50\mu\text{m}$ 以下超薄硅片，抛光压力通常需控制在 $3\sim 6\text{ kPa}$ 范围内，压力过大会诱发硅片整体弯曲，降低形貌一致性。抛光盘转速一般设定在 $40\sim 80\text{ rpm}$ 区间，可在保证材料去除速率的同时抑制剪切应力集中。试验数据显示，在合理参数组合下，抛光后表面粗糙度可由磨削后的 $5\sim 10\text{ nm}$ 降低至 $0.2\sim 0.4\text{ nm}$ ，同时亚表面残余应力释放比例可达到 70% 以上。参数调控的本质在于通过温和去除机制实现应力渐进释放，避免因去除速率突变引发新的形变风险。

4.3 抛光过程对磨削残余缺陷的修复能力分析

磨削工序不可避免地会在硅片表层引入微裂纹和损伤层，抛光工序的核心作用在于对该类缺陷进行有效修复。研究表明，当抛光去除量达到损伤层厚度的 $1.2\sim 1.5$ 倍时，绝大多数磨削诱发微裂纹可被完全消除。对于损伤层厚度控制在 $3\sim 5\mu\text{m}$ 的超薄硅片，通过分阶段抛光策略可在保证结构稳定的前提下完成缺陷修复。抛光过程中化学作用与机械作用协同发挥作用，使裂纹尖端钝化并逐步去除缺陷源。经合理抛光后，硅片表面缺陷密度可降低一个数量级以上，为后续工艺提供稳定的结构基础^[3]。

5 面向 50 μm 以下超薄硅片的磨抛协同优化实施路径

5.1 磨削与抛光工序参数联动优化策略

磨抛协同优化的关键在于建立磨削参数与抛光参数之间的联动关系,使两道工序在损伤控制与表面修复方面形成闭环调节。磨削阶段通过控制砂轮粒度、进给速度和载荷水平,将损伤层厚度稳定限制在 3~5 μm 区间,为抛光提供可预测的去除目标。抛光阶段则依据磨削表面状态动态调整压力和转速,使材料去除过程与残余应力释放同步进行。实践表明,在联动优化条件下,抛光去除量可减少约 20%~30%,整体加工周期缩短 15% 以上,同时翘曲变形控制在 10 μm 以内,显著提升工艺稳定性。

5.2 基于质量指标的磨抛协同评价体系构建

为实现磨抛协同优化的工程化应用,有必要构建以质量指标为核心的评价体系。该体系通常以表面粗糙度、损伤层厚度、翘曲量和残余应力水平作为关键指标,通过多指标综合评价反映工艺效果。测试数据显示,当表面粗糙度低于 0.4 nm、翘曲量小于 8 μm 、残余应力释放率超过 70% 时,超薄硅片加工质量处于稳定区间。通过对各指标进行权重分配和趋势分析,可实现磨削与抛光参数的定量反馈调整,为协同优化提供可靠决策依据^[4]。

5.3 协同优化工艺在超薄硅片规模化加工中的应用方向

在规模化加工条件下,磨抛协同优化工艺有助于提升

超薄硅片生产一致性与良率。通过将协同优化参数固化为标准工艺窗口,可降低不同批次间质量波动。生产实践表明,在 50 μm 以下硅片连续加工条件下,引入协同优化工艺后成品合格率可由 92% 提升至 98% 以上。该工艺路径还具备良好的扩展潜力,可适配更薄规格硅片及更大尺寸基片加工需求,为超薄硅片高可靠制造提供稳定技术支撑。

6 结语

针对 50 μm 以下超薄硅片加工过程中易出现的损伤放大与形貌失稳问题,磨削与抛光协同优化工艺展现出明显技术优势。通过对抛光材料、工艺参数及缺陷修复机制的系统控制,可有效消减磨削残余损伤并实现应力平缓释放。在此基础上构建的磨抛协同优化实施路径,有助于提升加工过程的稳定性与一致性。相关研究为超薄硅片精细化加工与规模化应用提供了可靠的工艺思路,对提高产品良率和制造可靠性具有现实意义。

参考文献

- [1] 索开南,张伟才,杨洪星,郑万超.硅溶胶抛光液对硅单晶抛光片表面质量的影响[J].半导体技术,2021,46(10):788-794.
- [2] 王剑.高温退火对直拉硅抛光片表面质量及氧沉淀的影响[D].导师:马向阳;杨德仁;田达晰.浙江大学,2014.
- [3] 杨洪星,陈亚楠.夹具形状对硅抛光片表面质量的影响[J].电子工艺技术,2013,34(02):122-124.
- [4] 武永超,杨洪星,张伟才,宋晶,赵权.硅抛光片表面颗粒度控制[J].电子工业专用设备,2010,39(10):20-22+47.