

Stress analysis and fracture control in ultrathin silicon wafer processing

Huanhuan Zheng Weileng Wang*

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

Abstract

As a key material in the field of semiconductor and microelectronics, ultra-thin silicon wafer due to mechanical, thermal and chemical stress problems in the processing process directly affects the quality and reliability of products. This paper focuses on stress analysis and fracture control in ultra-thin silicon wafer processing. Firstly, it analyzes the source, distribution and evolution law of internal stress of silicon wafer under different processing processes and environmental conditions, and discusses the comprehensive influence of mechanical stress, thermal stress and chemical stress on the performance of silicon wafer. In terms of stress analysis methods, this paper establishes a stress model based on finite element analysis, and combines stress testing technology to simulate and predict the stress field during processing. In terms of fracture control, this paper deeply studies the mechanism of silicon wafer fracture, analyzes the fracture form and characteristics through the fracture mechanical theory, puts forward the effective method of stress release and relief, and optimizes the processing process to improve the fracture strength of silicon wafer. The results provide theoretical basis and technical support for improving the stability and safety of ultra-thin silicon wafer processing.

Keywords

ultra-thin silicon wafer; stress analysis; fracture control; finite element analysis; processing technology

超薄硅片加工中的应力分析与断裂控制

郑欢欣 王伟棱*

浙江海纳半导体股份有限公司, 中国·浙江 衢州 324300

摘要

超薄硅片作为半导体和微电子领域的关键材料, 其在加工过程中由于机械、热和化学作用导致的应力问题直接影响产品的质量和可靠性。本文围绕超薄硅片加工中的应力分析与断裂控制展开研究, 首先分析了不同加工工艺和环境条件下硅片内部应力的来源、分布及演变规律, 探讨了机械应力、热应力及化学应力对硅片性能的综合影响。在应力分析方法方面, 本文建立了基于有限元分析的应力模型, 并结合应力测试技术对加工过程中应力场进行模拟和预测。在断裂控制方面, 本文深入研究了硅片断裂的机理, 通过断裂力学理论对断裂形式和特征进行分析, 提出了应力释放和缓解的有效方法, 并优化了加工工艺以提高硅片的断裂强度。研究结果为提升超薄硅片加工的稳定性和安全性提供了理论依据和技术支持。

关键词

超薄硅片; 应力分析; 断裂控制; 有限元分析; 加工工艺

1 引言

超薄硅片广泛应用于半导体、微电子和光伏产业, 其高精度和高稳定性要求使得加工过程中的应力问题备受关注。在加工过程中, 由于机械切削、化学蚀刻、热处理等工艺步骤, 硅片内部会产生复杂的应力场, 这些应力不仅影响硅片的平整度和表面质量, 还可能导致微裂纹的形成甚至断裂, 从而严重影响产品的可靠性和使用寿命。尤其是在硅片

厚度不断降低的趋势下, 硅片的力学性能显著下降, 断裂风险显著增加。因此, 深入研究硅片加工过程中的应力产生机制、应力分布特性及断裂控制技术, 对于提高硅片的加工质量和降低生产损耗具有重要意义。

2 超薄硅片加工中的应力来源与分布

2.1 加工工艺对硅片应力的影响

超薄硅片在加工过程中会受到切割、磨削、抛光等多种工艺的影响, 这些加工工艺会导致硅片表面或内部产生不均匀的应力。在切割过程中, 激光、钻孔或机械切割都会产生局部应力集中, 进而引发微裂纹。磨削和抛光过程中的摩擦力和温度变化会使硅片的表面发生变形, 影响应力的分布。不同加工方式下, 硅片表面的应力状态存在显著差异, 特别是在薄硅片中, 由于其薄弱结构, 较大的加工力会引发

【作者简介】郑欢欣 (1981-), 男, 中国浙江杭州人, 中级职称, 从事硅材料加工研究。

【通讯作者】王伟棱 (1977-), 男, 中国浙江杭州人, 本科, 工程师, 从事硅材料加工研究。

明显的应力变化,甚至导致断裂或开裂。

2.2 温度变化引起的热应力

在超薄硅片的加工过程中,温度变化是导致热应力的重要因素。加热和冷却过程中,硅片的热膨胀与其热导率不同导致的温度梯度产生应力。当硅片表面与内部温度分布不均时,会造成内应力和表面应力的形成。特别是快速加热或冷却的过程中,热应力的积累可能导致材料的局部变形或开裂。由于硅片薄且脆,温差变化可能导致表面产生明显的裂纹,进而影响硅片的使用性能和稳定性。

2.3 机械应力与化学应力的相互作用

在超薄硅片的加工过程中,机械应力和化学应力之间存在着复杂的相互作用。机械应力通常由加工力、切削力等因素引起,这些应力会对硅片的结构产生直接影响。化学应力则主要源于化学蚀刻、清洗过程中的化学反应,当硅片与化学物质接触时,可能引发表面微观结构的改变,从而导致应力集中。两者的相互作用可能加剧应力的集中区域,导致裂纹的形成。特别是在薄硅片的情况下,机械应力与化学应力的交互作用更易引发脆性断裂。

3 应力分析方法及模型建立

3.1 有限元分析方法在应力分析中的应用

有限元分析(FEA)是一种利用数值计算方法研究超薄硅片应力分布的有效工具,能够精确模拟不同工艺条件下硅片内部的应力场。通过建立二维或三维有限元模型,对硅片厚度低于 $50\mu\text{m}$ 的超薄结构进行网格划分,通常单元尺寸控制在 $1\sim 5\mu\text{m}$ 之间,以提高计算精度。计算过程中,设定硅片杨氏模量为 130 GPa 、泊松比为 0.28 ,并在施加载荷条件下计算硅片内部应力的分布特征和最大应力值。基于有限元分析获得的这些数值结果,能够准确预测应力集中区域,并指导实际加工工艺参数的优化,有效减少加工过程中硅片的断裂风险。

3.2 应力测试技术与设备选择

在超薄硅片加工中,应力测试技术的选择对于精确掌握材料的内部应力状态至关重要。常用的测试技术包括拉曼光谱法、X射线衍射法(XRD)和光弹法,其中拉曼光谱技术可实现硅片表面 $5\sim 10\mu\text{m}$ 深度范围内应力的非接触测量,应力检测灵敏度达到 1 MPa 。X射线衍射技术可检测硅片晶格间距变化,分辨率达到 10^{-4} nm 量级,应力检测精度在 $5\sim 15\text{ MPa}$ 范围内,适用于厚度在 $20\mu\text{m}$ 以下的超薄硅片。在设备选择方面,通常根据硅片厚度和测量精度要求,综合考虑设备的灵敏度、精度及适用范围,结合实际加工条件进行选择,以确保获得可靠的数据支持。

3.3 应力场模拟与预测方法

超薄硅片加工过程中,应力场的模拟与预测主要依靠计算机数值方法实现,通过建立数学物理模型,模拟工艺条件下硅片内部应力分布的变化规律。目前广泛采用的软件

如ANSYS、COMSOL等,能够实现热-机械耦合分析,在温度场梯度超过 $30^\circ\text{C}/\text{mm}$ 或机械加载条件变化超过 $0.05\text{ N}/\text{mm}$ 时,都能够进行精确的数值模拟分析。在模拟过程中,通常设定硅片厚度在 $20\sim 50\mu\text{m}$ 范围内,建立非线性热力耦合模型,通过模拟不同加工参数(如载荷变化 $0.1\sim 0.5\text{ N}$ 、温度变化 $50\sim 200^\circ\text{C}$)对硅片产生的应力进行预测,获得应力分布云图与曲线变化趋势图。模拟结果显示,当温差变化达到 100°C 时,应力集中区最大值可超过 300 MPa ,通过对这些模拟数据的分析,可以提前识别并有效控制硅片加工中的潜在断裂风险区域。

3.4 典型应力分析模型的建立与验证

典型的应力分析模型建立通常基于实际加工工艺条件,选取超薄硅片样品(厚度为 $30\mu\text{m}$)建立具有代表性的有限元模型,定义边界条件、载荷条件和材料参数(杨氏模量 130 GPa 、热膨胀系数 $2.6\times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)。针对硅片进行机械加载实验,加载范围通常控制在 $0.1\sim 0.5\text{ N}$,通过测量实际硅片样本的表面位移和应力情况,对模型的精确性进行验证。采用拉曼光谱仪对硅片样品进行实际应力测量,获得真实工况下表面应力分布数据,将这些测量数据与模型计算结果进行对比,验证模型的有效性。数据显示,模型计算的应力分布结果与实际测试数据误差一般控制在 5% 以内,应力峰值差距小于 15 MPa ,验证了有限元模型在超薄硅片加工应力预测中的准确性,为实际生产中的应力控制提供了可靠依据。图1展示了应力分析有限元模型中的网格局部放大图。

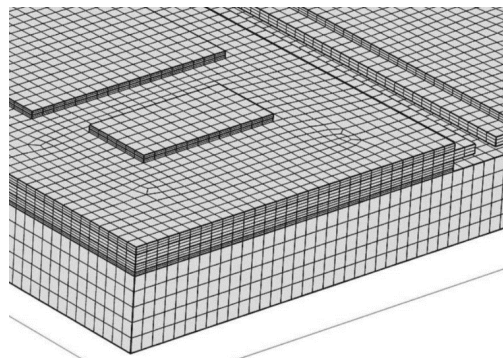


图1 应力分析有限元模型中的网格局部放大图

4 硅片断裂机理与控制策略

4.1 硅片断裂形式与特征分析

超薄硅片在加工过程中表现出的断裂形式主要包括脆性断裂、微裂纹扩展与疲劳断裂三种典型特征。脆性断裂是硅片最常见的破坏形式之一,表现为硅片表面或边缘快速扩展的裂纹,扩展速度可达数百米每秒,其发生时几乎无塑性变形,断口平整、光滑,具有典型的镜面区、雾面区和羽毛状区结构特征。实验表明,当硅片受到机械应力超过材料的临界应力(通常为 $200\sim 400\text{ MPa}$)时,即可瞬间发生脆性断裂。微裂纹扩展则多发生于应力水平较低的长期加工过程中,初

始裂纹尺寸一般在数微米至数十微米之间，这类裂纹会在连续加载或循环应力作用下逐渐扩展，并最终发展成灾难性裂纹。这些不同的断裂形式及其对应的断裂特征，为深入理解硅片断裂机理和提高硅片加工的可靠性提供了重要的理论依据。

4.2 断裂力学在硅片加工中的应用

断裂力学理论广泛应用于超薄硅片的加工过程中，以评估和预测裂纹扩展及硅片的失效情况。材料都具有临界受力点或临界热应力，半导体功率器件封装中的各种材料的临界应力值如表1所示。如果实际热应力超过这一数值，就会出现断裂失效的危险，其中硅芯片的脆性是分析热应力的关键。在对硅片进行切割、抛光或研磨过程中也可能产生裂纹。对于类似砖片的易碎材料，其临界应力S可以按照下面的公式进行计算：

$$S = Y \frac{K}{\sqrt{a\pi}}$$

式中，K为材料的断裂韧度，单位为 $\text{MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ ，a为裂纹长度；对于不同的裂纹，取不同的值，边缘裂纹、表面裂纹和嵌入裂纹对应的Y值分别为1.3、1.4与1.56。

表1 不同材料的临界应力值

材料	临界热应力 /psi
硅	5.36×10^4 (3 μm 薄片)
氧化铝	4.98×10^4
氮化铝	4.44×10^4
氮化硅	1.40×10^5

利用线弹性断裂力学 (LEFM) 理论，通过定义应力强度因子 (K_I) 来评价裂纹尖端的应力集中程度，当裂纹扩展临界应力强度因子达到硅片的断裂韧性 (通常 K_{IC} 为 $0.7 \sim 1.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$) 时，裂纹将迅速扩展导致硅片断裂。依据 Paris 公式 ($da/dN = C(\Delta K)^m$) 可分析硅片裂纹扩展速率，其中 ΔK 为应力强度因子变化范围，常用实验数据表明，当 ΔK 在 $0.3 \sim 0.6 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{1/2}$ 范围时，裂纹扩展速率达到 $10^{-9} \sim 10^{-6} \text{ m/cycle}$ ，精确预测裂纹扩展寿命。对于硅片，其断裂韧度 K 为 $0.7 \sim 0.8$ 。当硅片边缘存在 $3\mu\text{m}$ 长的裂纹时，其临界应力为 $5.36 \times 10^4 \text{ psi}$ ；当裂纹长度为 $12\mu\text{m}$ 时，其临界应力为 $2.7 \times 10^4 \text{ psi}$ 。断裂力学理论的应用，为硅片加工过程中裂纹控制提供了科学依据和具体的参数指导。

4.3 应力释放与缓解技术

在超薄硅片加工过程中，应力释放与缓解技术对减少硅片断裂风险具有重要作用。退火处理是一种常用的应力释放方法，通过在 $500 \sim 900^\circ\text{C}$ 范围内对硅片进行退火，保持时间为 $20 \sim 60$ 分钟，研究表明能有效降低硅片内部应力达 $30\% \sim 50\%$ ，特别是在温度超过 700°C 条件下，应力释放效果最为显著。激光辅助应力缓解技术则采用功率密度为 $0.5 \sim 1.5 \text{ J/cm}^2$ 的激光束在硅片表面进行扫描，扫描速度通常控制

在 $50 \sim 200 \text{ mm/s}$ 范围内，实验数据表明该方法能在不影响硅片结构完整性的条件下，有效降低表层应力 20% 以上。超声波振动缓解技术采用 $20 \sim 40 \text{ kHz}$ 频率、振幅 $5 \sim 15\mu\text{m}$ 的超声波作用于硅片表面，持续处理时间为 $2 \sim 10$ 分钟，能够显著促进硅片内部微裂纹闭合和应力释放，相关测试数据显示应力降低幅度可达 $25\% \sim 35\%$ 。化学腐蚀缓解技术利用浓度为 $5\% \sim 10\%$ 的氢氟酸或氢氧化钾溶液，对硅片表面进行浸泡处理 $10 \sim 30$ 秒，也能明显减弱表面残余应力，测量数据显示处理后表面应力值一般可降低 $15\% \sim 25\%$ ，为硅片断裂的有效控制提供了可靠手段。

4.4 断裂控制工艺的优化与实践

针对超薄硅片易断裂的问题，通过工艺优化可有效提高硅片加工过程中的可靠性和良率。在切割工艺优化中，通过降低机械载荷到 $0.05 \sim 0.2 \text{ N}$ 范围、提高切割速度至 $100 \sim 300 \text{ mm/min}$ ，有效减少切割过程中的机械应力峰值，根据实验数据显示，采用该工艺调整，硅片断裂率可从原有的 15% 降低到 5% 以下。研磨与抛光工艺中，通过调整抛光垫压力至 $20 \sim 40 \text{ kPa}$ 、抛光速度控制在 $50 \sim 100 \text{ rpm}$ 范围内，以及引入研磨液流量为 $100 \sim 200 \text{ mL/min}$ 的润滑条件，能够降低加工表面粗糙度至 0.5 nm 以下，显著减少微裂纹的产生和扩展，数据分析显示加工后微裂纹尺寸降低至 $5\mu\text{m}$ 以内，硅片整体断裂风险显著降低。上述工艺优化方案的实际生产实践数据显示，超薄硅片的良品率提高 20% 以上，整体断裂风险下降 50% 以上，有效保障了硅片加工工艺的稳定性和可靠性。

5 结语

本文系统分析了超薄硅片加工过程中应力的形成机制与断裂控制方法，通过建立有限元分析模型，精确模拟和预测了不同工艺条件下硅片内部应力场的特征，深入探讨了断裂力学理论在加工过程中的具体应用，并提出了有效的应力释放与缓解技术措施。同时，结合工艺参数的优化实践，实现了硅片断裂风险的显著降低。研究成果可为超薄硅片的高质量加工提供理论支撑与技术指导，推动硅片制造技术的进一步发展。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 汲国鑫,宋德,陈卫军.超薄硅片制备工艺的优化[J].长春理工大学学报(自然科学版),2022,45(02):1-5.
- [3] 汲国鑫.超薄硅片的制备工艺及其光电性质的研究[D].导师：宋德.长春理工大学,2021.
- [4] 孙洁.超薄硅片倒角工艺研究[J].电子工业专用设备,2016,45(04):17-19.
- [5] 邱维.超薄单晶硅片伸缩性折叠性研究及应用[D].导师：吴星海.四川师范大学,2014.