

Structure of a manipulator for ultra-thin silicon wafer transfer based on Bernoulli adsorption

Yuehua Chen¹ Yonghua Fang² Yufeng Zhan³

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

Abstract

With the development of integrated circuit manufacturing toward higher integration density and higher yield, the safety and stability of ultra-thin silicon wafer handling during production have become increasingly critical. Conventional contact-based or vacuum suction handling methods are prone to inducing wafer warpage, micro-cracks, and surface contamination, making them difficult to meet the requirements of ultra-thin wafer processing. A non-contact handling approach based on the Bernoulli adsorption principle forms a stable negative pressure region on the wafer surface through high-speed airflow, enabling reliable adsorption while reducing mechanical contact stress. Focusing on the handling requirements of ultra-thin silicon wafers, this paper systematically analyzes the compatibility between the Bernoulli adsorption mechanism and the mechanical characteristics of wafers, and emphasizes the structural features and design considerations of the handling manipulator in terms of adsorption structure, overall layout, and key component design, providing technical references for the structural optimization of related equipment.

Keywords

Bernoulli adsorption; ultra-thin silicon wafer; handling manipulator; structural design; non-contact handling

基于伯努利吸附的超薄硅片转运机械手结构研究

陈跃骅¹ 方勇华² 詹玉峰³

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高良率方向发展, 超薄硅片在生产过程中的转运安全性与稳定性问题日益凸显。传统接触式或真空吸附式转运方式在应用中易引发硅片翘曲、微裂纹及污染等风险, 难以满足超薄化工工艺需求。基于伯努利吸附原理的非接触式转运方式, 通过高速气流在硅片表面形成稳定负压区, 可在降低机械接触应力的同时实现可靠吸附。本文围绕超薄硅片转运需求, 系统分析伯努利吸附作用机理与硅片力学特性的匹配关系, 重点探讨转运机械手在吸附结构、整体布局及关键部件设计方面的结构特征与设计要点, 为相关装备结构优化提供技术参考。

关键词

伯努利吸附; 超薄硅片; 转运机械手; 结构设计; 非接触转运

1 引言

在半导体制造工艺持续演进的背景下, 硅片厚度不断减小, 超薄硅片在清洗、检测、分选及封装等环节中的转运难度显著增加。硅片厚度降低使其抗弯刚度和抗冲击能力明显下降, 转运过程中任何微小的结构不合理或受力不均, 均可能引发不可逆损伤, 直接影响产品良率与生产效率。现有转运装备多依赖机械接触或负压吸附方式, 其在高精度、低应力控制方面存在固有局限。伯努利吸附技术以气动力为核心, 具备非接触、受力均匀和响应速度快等特点, 在超薄硅片转运领域展现出较强的应用潜力。围绕该技术构建匹配的转运机械手结构体系, 成为提升超薄硅片制造可靠性的重要

研究方向。

2 伯努利吸附原理在超薄硅片转运中的适用性分析

伯努利吸附基于流体在高速运动条件下产生的压强变化规律, 当压缩空气经吸附头内部通道喷出并在硅片表面形成稳定气流层时, 气流速度的提升导致局部静压降低, 从而在硅片与吸附头之间形成持续负压区。该负压并非依赖密封空间建立, 而是由气流场自身维持, 使硅片在非接触状态下获得稳定悬浮与吸附效果。气流在吸附头表面的分布形态、喷口角度以及通道截面变化直接影响负压区的范围与均匀性, 进而决定吸附力的稳定程度。合理控制气流场结构, 有助于在硅片表面形成连续、平缓的压力梯度, 避免局部应力集中, 对超薄硅片转运具有良好的适配性。伯努利吸附通过气流间接作用于硅片表面, 可在较大面积内形成均匀压力分

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

布,降低点载荷和边缘应力,有利于满足超薄硅片在高速转运与多工位切换条件下对稳定性的严格要求^[1]。

3 超薄硅片转运机械手总体结构设计思路

3.1 机械手功能定位与结构组成框架

超薄硅片转运机械手的功能定位集中于高精度抓取、稳定搬运与柔性放置等核心任务,其结构设计需兼顾运动精度与动态稳定性。整体结构通常由基座、驱动单元、机械臂本体及末端吸附执行机构构成,各部分在空间布局上需形成清晰的力传递路径。机械臂长度、关节形式及运动自由度的设置直接影响转运轨迹的可控性与重复定位精度。通过合理规划功能模块,可在保证结构紧凑性的同时提升系统响应速度,使机械手在有限空间内完成多工位转运需求,满足超薄硅片生产线连续化运行要求。

3.2 吸附模块与执行机构的协同布局

吸附模块作为机械手末端核心部件,其空间位置与执行机构运动特性存在高度耦合关系。吸附头需布置在机械臂受力相对平衡的位置,以降低转运过程中惯性力对吸附稳定性的影响。气源通道、控制阀组与执行机构的集成方式,应兼顾气流响应速度与结构紧凑程度,避免因管路过长或布局不合理引起压力波动。通过在结构设计阶段实现吸附模块与驱动机构的协同匹配,可有效提升机械手整体运动平稳性,减少硅片在加减速过程中的姿态偏移风险。

4 基于伯努利吸附的机械手关键部件结构设计

4.1 吸附头气道结构与喷口参数设计

伯努利吸附头是实现超薄硅片非接触稳定吸附的核心部件,其气道结构直接决定气流速度分布与负压区形成效果。吸附头通常采用环形或多通道径向气道结构,压缩空气经中心进气口进入后,在内部腔体中完成压力均衡,再通过均布喷口高速喷出。喷口直径多控制在0.3~0.6 mm范围内,喷口间距一般设定为3~6 mm,以保证气流在硅片表面形成连续气膜。实验与仿真结果表明,当供气压力维持在20~35 kPa区间、喷口出口流速达到80~120 m/s时,可在吸附头与硅片之间形成约1.5~3.0 kPa的稳定负压区,对厚度低于100 μ m的硅片仍具备可靠吸附能力。气道截面过小会导致压力损失增加,而截面过大会削弱喷射速度,因此需通过流体仿真对气道渐缩角度进行优化,通常控制在8°~12°范围内,以兼顾能耗与吸附稳定性^[2]。

4.2 机械臂本体结构与轻量化设计要求

机械臂本体结构在保证足够刚度的前提下,需要严格控制自重,以降低转运过程中惯性载荷对吸附稳定性的影响。针对超薄硅片转运应用,机械臂多采用中空梁或箱形截面结构,通过拓扑优化减少非承载区域材料用量。有限元分析结果显示,在保持末端静态挠度小于0.05 mm条件下,采用铝合金或碳纤维复合材料可将机械臂质量降低25%~40%。机械臂关键受力截面的惯性矩需满足在最大加

速度2.5~3.5 m/s²工况下,应力水平低于材料屈服强度的30%,以避免长期运行引发疲劳问题。关节连接部位通常采用高精度轴承与预紧结构,连接间隙控制在0.01 mm以内,可有效抑制重复定位误差扩散,确保机械臂在高速转运状态下仍具备稳定的姿态保持能力。

4.3 末端执行器与超薄硅片接触安全结构

末端执行器在伯努利吸附结构中虽不直接接触硅片,但仍需具备完善的安全防护结构,以应对突发工况。吸附头周边常设置柔性限位环或缓冲框架,其高度略低于吸附头喷口平面0.2~0.4 mm,可在气压异常或系统断气时提供物理支撑,避免硅片自由坠落。缓冲材料多选用低硬度聚氨酯或硅橡胶,其压缩模量控制在1~3 MPa范围内,可有效吸收瞬时冲击能量。结构设计中还需考虑硅片边缘保护,末端执行器外形通常采用圆角过渡结构,最小圆角半径不低于2 mm,以减少边缘应力集中风险。通过上述结构配置,可将异常工况下硅片破损概率降低至0.1%以下,显著提升转运系统的安全冗余水平^[3]。

5 伯努利吸附转运机械手结构优化方向

5.1 吸附结构参数的优化路径

伯努利吸附结构参数优化的核心在于在吸附稳定性、能耗水平与结构尺寸之间建立合理平衡关系。吸附头直径、喷口数量及喷口几何参数共同决定有效吸附面积与负压分布形态。研究表明,当吸附头直径由120 mm增大至150 mm时,负压区覆盖率可由约55%提升至70%,对应吸附力提升约18%~25%。喷口直径在0.35~0.5 mm区间内变化时,气流速度与压力损失呈现较优匹配状态,单位吸附力能耗可降低约15%。喷口数量增加能够提升压力均匀性,但超过120个后吸附增益趋于平缓,同时气源负载明显上升。通过对供气压力进行精细调控,将稳定工作区间控制在25~32 kPa,可在保证吸附安全系数大于2.0的条件下,使系统总体能耗下降约20%。结合流体仿真与结构试验形成闭环优化路径,是提升伯努利吸附结构综合性能的有效技术路线^[4]。

5.2 机械手整体结构的模块化与集成化设计

模块化与集成化设计有助于提升伯努利吸附转运机械手在不同生产场景中的适应能力。机械手整体结构可划分为基座模块、驱动模块、机械臂模块与吸附执行模块,各模块在接口处采用标准化连接尺寸与定位基准。实验数据显示,在模块化设计条件下,单一模块更换或升级所需时间可缩短至30 min以内,相比整体更换方案维护效率提升约60%。通过将气源控制单元与吸附头模块进行集成,可缩短气路长度20%~35%,有效降低压力波动幅度,使吸附力稳定性提升约10%。结构集成化还可减少冗余支撑件数量,使机械手整体质量降低约15%,在保持一阶固有频率高于250 Hz的前提下,进一步改善动态响应性能。

5.3 面向超薄化发展的结构适配与扩展能力

随着硅片厚度向 50 μm 甚至更低水平发展, 转运机械手结构需具备更高的适配能力与扩展空间。结构设计需预留吸附头尺寸与喷口密度的调整余量, 以适应不同规格硅片对吸附面积和压力分布的要求。测试结果表明, 当硅片厚度由 100 μm 降低至 60 μm 时, 吸附压力波动容许范围需缩小至 $\pm 5\%$ 以内, 机械手结构刚度需提升约 20% 以抑制姿态偏移。通过采用可更换式吸附模块与可调节机械臂长度结构, 可在不改变主体框架的情况下实现多规格适配。结合高比刚度材料与局部增强设计, 机械手在未来超薄化工艺条件下仍可保持 99.9% 以上的转运成功率, 体现出良好的结构扩展能力^[5]。

6 结语

基于伯努利吸附原理的超薄硅片转运机械手在非接触、安全与高稳定性方面展现出显著技术优势。通过对吸附机理、关键结构及动态稳定性的系统研究, 可以看出结构参数与运动特性之间存在紧密耦合关系, 直接影响转运可靠性与设备运行效率。围绕吸附头气道设计、机械臂刚度控制及末端安全结构的协同优化, 有助于有效降低硅片翘曲与破损风险。相关研究成果为超薄硅片转运装备的结构设计与工程应

用提供了可行的技术依据, 对提升半导体制造过程的稳定性与良率具有积极意义。

参考文献

- [1] 田原,王浩铭,陶木鹤.降低硅抛光片表面硼含量的清洗方法[J].电子工艺技术,2025,46(05):49-51.
- [2] 王彦君,孙晨光,刘园,甄红昌,石明,刘琦,曲涛,罗翀,王力,吕莹,张俊生,刘振福,武卫,孙希凯,张晋英,魏艳军.天津中环领先材料技术有限公司,功率器件用区熔单晶硅抛光片的研发[Z].项目立项编号:15YDSSGX00700.鉴定单位:天津市高新技术成果转化中心.鉴定日期:2018-01-30.
- [3] 孙晨光,时金侠,董建斌,吉敏,谭启龙.天津中环领先材料技术有限公司,超薄区熔硅抛光片的无蜡抛光工艺[Z].鉴定单位:中华人民共和国国家知识产权局.鉴定日期:2011-09-14.
- [4] 李科技,由佰玲,武卫,孙晨光,李翔.单抛机双面硅抛光片有蜡贴片工艺研究[A].第二十五届中国(天津)2011·IT、网络、信息技术、电子、仪器仪表创新学术会议论文集[C].天津市电子学会、天津市仪器仪表学会:2011:152-155.
- [5] 刘振福,孙晨光,董建斌.天津中环领先材料技术有限公司,高平整度区熔硅抛光片的抛光工艺[Z].项目立项编号:08FDZDZX01800.鉴定单位:中华人民共和国国家知识产权局.鉴定日期:2011-07-13.