

多区真空吸附晶圆减薄承片台结构设计研究

贺东葛 梁津 刘国敬

中国电子科技集团公司第四十五研究所, 中国·北京 100176

摘要: 为了满足晶圆减薄工艺对高平整度、高可靠吸附支撑的要求, 本文对多区真空吸附承片台的结构进行了设计。分析了减薄工况下承片台平面度、吸附均匀性、热稳定性综合要求, 论述了多区真空吸附提高容错能力和吸附力分区调节的原理。在此基础上提出多区吸附腔体划分方案、流道布置和密封、均压缓冲层一体化结构设计。利用多物理场耦合仿真, 对关键参数影响吸附性能的规律进行分析, 并且做了结构迭代优化和性能对比验证, 给高精度晶圆减薄承片台的工程研制提供设计依据。

关键词: 多区真空吸附; 晶圆减薄; 承片台结构设计

Research on Structural Design of Multi-Region Vacuum Adhesive Wafer Thinning Carrier Platform

He Dongge, Liang Jin, Liu Guojing

Institute of Electronics, China Electronics Technology Group Corporation, China Beijing 100176

Abstract: To meet the requirements of high flatness and reliable vacuum adsorption support for wafer thinning processes, this paper designs the structure of a multi-zone vacuum adsorption chuck. It analyzes the comprehensive requirements for flatness, adsorption uniformity, and thermal stability under thinning conditions, and discusses the principles of fault tolerance enhancement and adsorption force zoning in multi-zone vacuum adsorption. Based on this, a multi-zone adsorption chamber division scheme, flow channel arrangement and sealing, and an integrated design of a pressure equalization buffer layer are proposed. Using multi-physics coupling simulation, the influence of key parameters on adsorption performance is analyzed, followed by structural iterative optimization and performance comparative verification, providing a design basis for the engineering development of high-precision wafer thinning chucks.

Keywords: Multi-zone vacuum adsorption; Wafer thinning; Chuck structural design

0 引言

在半导体先进封装以及功率器件制造当中, 晶圆减薄属于实现芯片轻薄化、高性能化的关键环节。当晶圆厚度降到几十微米的时候, 材料刚性急剧降低, 对支撑平台的面形精度以及吸附可靠性提出很高的要求。传统的单区真空吸盘存在着局部漏气导致整个真空吸盘失效的缺点, 不能满足超薄晶圆的加工要求。多区真空吸附技术用分区独立控制来提高吸附容错率和均匀性。本文根据多区真空吸附晶圆减薄承片台的功能要求, 对它的结构设计、流道布置和密封方案进行了研究, 并用仿真分析的方法对它们进行了优化验证, 为开发高性能的减薄设备提供理论和技术支持。

1 多区真空吸附晶圆减薄承片台的功能需求与设计基础

1.1 晶圆减薄工艺对承片台的性能要求

晶圆减薄工艺要求在磨削过程中把晶圆厚度精确去掉

到目标值, 晶圆本身很脆, 在厚度小于 100 微米的时候刚性急剧下降, 任何支撑不均都会造成碎裂。因此承片台必须具有很高的平面度, 一般要求达到微米级甚至亚微米级, 保证晶圆背面和台面完全贴合, 防止磨削力使悬空部分断裂。承片台的面形精度要长期保持不变, 不会因为温度变化或者机械疲劳而发生变化。

吸附力的均匀性又是另一个主要的要求。不均匀的吸附力会造成晶圆局部变形, 磨削后会在晶圆表面留下厚度变化, 严重的还会形成残余应力集中区, 降低芯片成品率。另外, 减薄过程中产生的热量要靠承片台有效传导散发出去, 否则就会造成晶圆和台面之间热膨胀失配, 从而破坏吸附状态并产生加工误差。因此承片台的导热性、热稳定性也是设计时必须满足的基本条件。最后, 承片台表面要耐磨、易清洁, 才能满足大批量生产的要求。

1.2 真空吸附原理与多区布局的吸附力分析

真空吸附承片台利用大气压和吸附腔内压差把晶圆固

定住。当吸附腔抽到负压时，晶圆上表面所受的大气压力就把它压紧在台面上。单区吸附结构简单，但是晶圆局部存在微小翘曲或者颗粒污染导致漏气时，整个吸附力就会消失，对高价值晶圆来说是致命的。多区布局把台面分成若干个独立的吸附腔，各个区域各自独立供压，互不影响，即使某一个区域失效，其他区域仍然可以进行吸附，从根本上提高了可靠性^[1]。

在多区布局中，吸附力的分配就成为设计的关键。各个区域的吸附力大小是由有效吸附面积和真空度决定的，而有效面积又与密封筋宽度、槽道形状以及晶圆贴合情况有关。通过改变各个区域的真空度来主动补偿晶圆初始翘曲或者磨削过程中局部卸力的情况，使作用在晶圆上的总吸附力分布更加均匀。从力学角度来讲，磨削力所引起的倾覆力矩要被各个区域吸附力的摩擦力矩来平衡，分区设计要保证这样的平衡裕度足够大，以便于应付工艺参数发生波动时的情况。

1.3 承片台结构设计的关键参数与材料选择

承片台的结构设计要确定一系列重要的几何参数，即台面外径、吸附区数量和分区边界、吸附槽的槽宽和槽深、密封筋的宽度和间距、台面基底整体厚度。这些参数互相影响，槽宽变大可以增大吸附面积，但是槽宽过大会造成台面局部刚度下降，造成晶圆在负压的作用下出现凹陷变形；密封筋太窄虽然可以扩大吸附区域，但是容易在磨削力反复作用下磨损失效。因此参数选取要兼顾吸附面积、面形刚度、使用寿命这三个方面^[2]。

材料选择对于承片台性能起决定性作用。常用的有氧化铝陶瓷、碳化硅陶瓷、多孔石墨、不锈钢和硬质合金。陶瓷材料刚度大、热膨胀系数接近硅晶圆，热稳定性好，但是加工困难、脆性大；金属材料加工性好，便于制作复杂的流道，但是需要镀层处理来解决耐磨和洁净的问题。近些年来，由于具有自带均压效果的多孔材料被人们所重视。材料选定之后，还要按照减薄工艺最后精度的要求，把承片台的设计参数同磨削主轴、进给系统性能指标展开系统匹配。

2 多区真空吸附承片台的结构设计与分区优化

2.1 多区吸附腔体的划分方式与流道布局设计

吸附腔体分区方式决定着承片台的空间控制能力。常见的有三种，同心圆环分区把台面从中心向外分成若干个环形区域，适合旋转对称工艺，结构简单，但是对各向异性的晶圆翘曲适应性差；扇形分区沿圆周方向划分，可以适应不同的方位形态；网格矩阵分区将台面分成许多独立的单元格，调控自由度最高，但是结构复杂，制造难度大。实际设计时会将晶圆形态检测数据综合起来，用混合分区的方法来达到效果和成本的平衡。

流道布置要保证各个吸附腔体的供压路径流阻尽量一致。当不同区域的流道长度或者截面积存在较大差别时，在相同的真空源作用下各个区域的实际负压值就会不一样，从而产生新的吸附不均匀。因此一般用放射状流道或者增加均压腔体来使气体流动路径等长化。流道截面尺寸要同时考虑流量要求和结构强度，在有限台面厚度内实现多路独立供气。流道汇合处的节流元件可以对各个区域的压力进行准确的调节，从而达到分区吸附控制的目的^[3]。

为了直观地对不同的承片台结构方案的综合工艺适配情况进行量化比较，从分区形式、制造难易程度、超薄晶圆适配性、综合成本这四个方面进行对比整理，得到如下对比分析表，见表 1。

2.2 吸附区密封结构与均压缓冲层的一体化设计

密封结构是保持真空度的主要部分。晶圆减薄工况下，密封件不能高出台面破坏平面度，所以传统的凸出密封圈不能使用。替代方案为在台面上直接加工出微间隙沟槽密封或者迷宫结构，利用气流在窄缝中产生的粘滞阻力来达到密封的目的。端面密封形式的密封能力与间隙尺寸、槽道深度、表面粗糙度有关，需要通过流场仿真精确定型，在保证微小泄漏可以接受的前提下达到所需要负压水平。

均压缓冲层设在供气孔和晶圆之间，它起到使负压气流充分扩散，消除供气孔处局部高速射流、压力尖峰的作用。将均压层和密封结构一体化集成可以减小零件装配造成的累积误差，提高整体刚度。常见的形式是在台面上

表1 不同多区真空吸附承片台分区结构综合性能对比表

分区结构类型	超薄晶圆（≤50 μm）适配等级	整机流控系统配套成本	量产长期稳定性评分（满分10分）
纯同心圆环分区	B级（仅适配无明显翘曲晶圆）	低	7.2
纯扇形圆周分区	A级（适配单方向翘曲晶圆）	中	8.1
网格矩阵独立分区	S级（适配多向复杂翘曲晶圆）	高	9.3
圆环+扇形混合分区	A+级（兼顾对称/各向异性翘曲）	中高	8.7
圆环+局部网格复合分区	S级（大尺寸超薄晶圆专用）	很高	9.5
单区传统吸盘（对照组）	D级（易整片漏气失效）	极低	4.0

加工大面积的浅槽区或者镶嵌多孔陶瓷片,使负压均匀地作用在晶圆背面。设计过程中还要留有反吹清洁流道,保证加工下来的碎屑可以被反向气流带走,防止造成均压层孔隙堵塞而引起局部吸附失效,从而保证承片台长期稳定工作。

3 结构性能仿真分析与参数化优化验证

3.1 多物理场耦合条件下的吸附均匀性与变形仿真

承片台工作状态是结构力学、流体动力学和热传递三者相互作用的结果。仿真分析先建立台面、吸附腔、流道、晶圆的有限元模型,把晶圆当作弹性薄板来处理。计算时施加负压载荷于吸附区,同时施加磨削力和热载荷,用流固耦合计算得到晶圆和台面之间的吸附压力分布以及晶圆的变形量。结果表明密封筋附近存在压力梯度峰值,属于敏感区域,设计时应加强或者平缓过渡。

热场分析也不可或缺。磨削热以热流密度的形式进入晶圆表面,通过接触面传到承片台上。温度场分布不均匀会造成热膨胀差异,造成晶圆和台面之间存在间隙,破坏吸附状态^[4]。耦合仿真可以得到稳态温度场以及由此引起的热变形量,检验冷却流道设计是否能够把温度控制在安全范围内。利用多物理场耦合分析,可以预测承片台在真实的工况下吸附的均匀性以及面形保持的能力,从而判断初始设计方案是否满足减薄工艺的精度要求,为之后的优化提供方向。为了直观地体现多物理场耦合仿真中承片台吸附压力分布的不同之处,从中选出仿真云图的结果如图1所示。

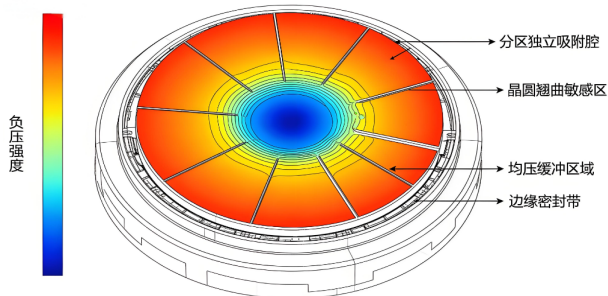


图1 多区真空承片台晶圆背面吸附压力分布仿真云图

3.2 关键结构参数对吸附性能的影响规律分析

利用参数化建模可以对各个结构变量对吸附性能的影响进行系统的探究。将吸附槽宽度、密封筋宽度、台面厚度、供气流道直径等设为可变参数,以吸附压力分布标准差和晶圆最大变形量作为评价指标。仿真结果表明,吸附槽宽度增大可以提高有效吸附面积,但是超过临界值之后形刚度下降的速度变快,存在最优的槽宽区间;密封筋宽度影响泄漏量和承载面积,过窄虽然增大了名义吸附面积,

但是密封失效的风险明显增大。

台面厚度的影响体现在整体刚度与热惯性上。厚度增大可以显著减小磨削力造成的弯曲变形,但是会使台面的热容量增大,使台面达到热平衡的时间变长,从而影响到工艺节拍。供气流道直径对负压产生速度有较大影响,直径过小造成响应滞后,直径过大会占据较多结构空间^[5]。利用正交试验或者多目标优化算法可以对各个参数的敏感度以及相互间的影响进行量化,并且可以得到一套适合于某一晶圆规格及减薄工艺的参数选取准则,从而指导具体的结构设计。

3.3 基于仿真结果的结构迭代优化与性能对比验证

利用多物理场耦合仿真得到的压力分布、晶圆形变、温度场数据,创建“仿真诊断-结构修改-二次仿真校核”闭环迭代优化流程,针对初始方案存在的中心负压不够、密封筋应力集中、局部压力梯度过大等问题进行有针对性的改进。针对仿真显示的晶圆中心吸附力偏弱问题,增大中心区域供气通道截面积、加密中心吸附浅槽来提高中心区域负压供给效率;针对密封筋边缘应力集中、易磨损开裂的问题,对筋条棱角做大圆弧过渡处理,同时微调筋宽,在保证泄漏量的情况下提高结构抗疲劳性能;针对流道压差不均问题,在各个分区进气口增加节流调压结构,使各个腔体的真空响应速度趋于一致。

每一轮的结构调整之后重新建立有限元模型,并且把磨削载荷、热载荷以及负压边界条件一起导入进去,以吸附压力不均匀度、晶圆最大弯曲变形、台面热变形量这三个指标作为评价的标准,不断迭代直到所有的指标都达到了工艺的阈值为止。迭代结束后,用优化后的结构和初代方案进行全维度性能对标,对吸附均匀性、负压响应速度、热稳定性和结构刚度这四个主要指标进行量化比较,得出优化后性能提高的幅度。

为了检验仿真模型的可信度以及优化方案的实用性,加工承片台实体样件搭建模拟减薄试验平台,采用压力传感阵列、激光面形检测仪在真实的磨削温度、磨削力工况下实测晶圆背面压力分布和超薄晶圆形变数据,将实测结果与仿真输出的云图、数值进行对比较准。仿真和试验数据互相验证之后,得出本次分区、流道、密封一体化优化方案具备工程可行性的结论,创建起一套标准化参数迭代设计办法,有效缩减了同类高精度承片台的研发周期并削减了试制迭代的成本。

4 结语

文中对同心圆环、扇形、网格和复合分区方案的适配

性、制造成本以及长期稳定性进行比较, 给出混合分区、放射式等长流道、无凸起微间隙密封 + 多孔均压缓冲层一体化集成的完整结构方案, 解决超薄晶圆贴合、负压均匀供给、磨削碎屑清洁、热变形抑制等工程问题。利用流固热多物理场耦合仿真, 系统地探究吸附槽尺寸、密封筋规格、台面厚度、供气通道直径等主要参数同吸附均匀性、晶圆形变化、热稳定性的关系, 创建参数化迭代优化流程, 完成结构改善及指标检验。

经过仿真对标和样件试验校核, 优化后的多区真空承片台可以有效地抑制超薄晶圆磨削变形, 大大降低局部漏气整片失效的风险, 面形精度、热稳定性、长期耐磨性能都满足先进封装和功率器件减薄量产的要求。填补了国内高精度晶圆减薄承片台自主设计的理论空白, 给国产半导体减薄设备核心承载部件的设计提供完整的思路、参数和仿真验证的方法。后续可以利用现有的结构方案进行批量的工艺试验, 根据晶圆在线翘曲检测结果来实现分区负压

动态自适应调节, 使该结构实现产业化。

参考文献:

- [1] 齐东东. 晶圆减薄用托盘及晶圆减薄方法研究[J]. 机械工程与自动化, 2026, 55(3): 155-156.
- [2] 郭垚峰, 韩宝杰, 邵佳明等. 晶圆减薄砂轮智能生产实践与创新[J]. 金属加工 (冷加工), 2026(2): 86-90.
- [3] 许继元. 晶圆减薄机智能控制系统设计[D]. 天水师范学院, 2025.
- [4] 衣忠波, 丛瑞, 常庆麒. 超薄晶圆减薄工艺研究[J]. 电子工业专用设备, 2020, 49(1): 36-40+49.
- [5] 白阳, 刘文平, 王仲康. 非接触测量仪在减薄设备中的应用研究[J]. 电子工业专用设备, 2019, 48(6): 50-53+64.

作者简介: 贺东葛 (1989.07-), 男, 汉族, 北京人, 本科, 副高级工程师, 研究方向: 从事半导体减薄机机械结构设计研究。