

超声波硅片清洗机的设计与清洗效率优化研究

吴昆

浙江艾科半导体设备有限公司

DOI:10.12238/jpm.v6i5.8024

[摘要] 针对超声波硅片清洗机设计与清洗效率的优化困境，提出一套基于超声波技术的清洗机系统优化方略，本文对超声波频率、功率和清洗液物理化学特性影响清洗效率的情况展开分析，搭建清洗效率的数学模型，并借助遗传算法及粒子群优化算法对关键参数开展优化配置。优化过后的系统在维持清洗效率切实降低了能源耗费，提升设备的性能水平，经过优化的清洗机可高效去除硅片表面的微小颗粒，降低能源的无谓浪费，提高设备使用寿命，此研究为超声波清洗设备的优化设计赋予了新的思路 and 方案。

[关键词] 超声波清洗机；超声波技术；清洗效率；遗传算法；性能优化

Study on the design and cleaning efficiency optimization of ultrasonic silicon wafer cleaning machine

Wu Kun

Zhejiang Aike Semiconductor Equipment Co., LTD.

[Abstract] In response to the challenges in designing and optimizing ultrasonic silicon wafer cleaning machines, this paper proposes an optimization strategy for a cleaning machine system based on ultrasonic technology. The analysis focuses on how ultrasonic frequency, power, and the physicochemical properties of the cleaning solution affect cleaning efficiency. A mathematical model of cleaning efficiency is established, and genetic algorithms and particle swarm optimization algorithms are used to optimize key parameters. After optimization, the system maintains cleaning efficiency while significantly reducing energy consumption and enhancing equipment performance. The optimized cleaning machine can efficiently remove tiny particles from the surface of silicon wafers, reduce unnecessary energy waste, and extend the service life of the equipment. This study provides new ideas and solutions for the optimal design of ultrasonic cleaning devices.

[Key words] ultrasonic cleaning machine; ultrasonic technology; cleaning efficiency; genetic algorithm; performance optimization

引言

随着电子设备小型化发展及高精度要求的递增，怎样实现硅片清洗效率提高，降低能耗成为行业关注的关键焦点，超声波清洗机凭借其可实现高效且低损耗的清洗性能，成为优化清洗效果的有力手段。在实际应用过程中，清洗机的设计参数设定与优化工作依旧面临一定挑战，在对超声波清洗机工作参数与系统设计开展优化后，提高清洗成效，降低能源的开销，增进设备的存活寿命，再一步推动超声波清洗技术在工业制造中

的应用。

1. 系统设计与结构分析

1.1 清洗机工作原理

超声波硅片清洗机把高频超声波振动引入清洗液里，引发强劲的气泡震荡效果，当超声波波动穿越液体介质之际，局部地带会形成空穴，空泡的急剧崩裂释放出大量能量，形成微小的冲击波浪。此微小冲击力可有效破除硅片表面的污染物，尤其是亚微米档次的污渍，在清洗作业进行当中，超声波频率和

功率的设定会直接影响气泡生成及破裂的频率，于是对清洗效率及效果造成影响，采用精准操控频率及功率，可实现对硅片表面的精细清洗，保证污垢被彻底除掉，同时避免损伤硅片表面。

1.2 设备结构与组成

超声波发生器承担着把电信号转变为高频声波信号的职责，继而依靠换能器把这些信号转成机械振动，进而输送至清洗液，换能器一般采用压电陶瓷材料制作，体现出较高的转换效率和稳定性^[1]。设备还囊括清洗槽、液体循环体系和温控体系，清洗槽能容纳待清洗的硅片及相应清洗液，槽内设计了科学合理的液体流动体系，可让清洗液在硅片表面均匀分布且有效清除污垢，液体循环系统于清洗时可维持清洗液的流动特性，杜绝污物重新附着到硅片之上，温控系统借助调节液体温度，增高超声波的清洁功效，实现清洗过程优化。

1.3 清洗效果的关键因素

频率过高会造成气泡生成短缺，降低清洗成效；而当频率过低时，也会造成气泡冲击力过强，致使硅片表面出现损伤，损害清洗的质量，功率大小会直接左右超声波的穿透力以及气泡的破裂频率，功率过大可引起过度的气泡碰撞，进而损害硅片的表层结构；功率过小可能引起清洗的不足，不能除掉表面顽固脏物。清洗液的甄选也是关键环节之一，清洗效果受清洗液粘度、表面张力及其与硅片表面物质亲和性的左右，温度也有着至关重要的意义，适宜温度能加速气泡的形成和破碎，提高清洗成效。

2.清洗效率模型与算法优化

2.1 清洗效率的数学建模

清洗效率与超声波频率、功率、清洗液的物理化学性质（如粘度、表面张力等）、硅片表面的污染物类型及其附着力等因素相关。针对这些因素，首先建立了清洗效率的基本公式：

$$E_{\text{clean}} = f(f, P, \eta, C, T)$$

其中， E_{clean} 代表清洗效率， f 为超声波频率， P 为超声波功率， η 为清洗液的黏度， C 为污染物浓度， T 为清洗液的温度。

通过实验数据判定不同超声波频率与功率下的清洗效率，在维持其余变量恒定不变的情形下，以实验数据为依据拟合出频率与功率对清洗效率的影响函数。清洗液的抉择根据其跟污染物的相互作用特质，尤其针对液体表面张力在气泡形成与破裂过程中的影响开展了优化建模，清洗液的黏度和温度被当作

影响气泡振动频率及能量传递效率的关键因子，采用热力学模型测算其对清洗效率的影响程度。

2.2 优化算法的选择与应用

采用遗传算法进行初始参数搜索，采用交叉、变异等动作生成多个候选解，采用适应度函数评定每个解的清洗效率，较大的搜索空间适合采用遗传算法，采用对频率、功率、温度等参数进行多次迭代调校，探寻可实现最大清洗效率的参数组合，采用粒子群优化算法对遗传算法所获解进行精细调校，进一步增进参数搜索的精准水平，降低局部最优解的干扰。依靠粒子群优化算法的整体搜索能力，可在多维参数空间中探求更为精细的最优解，具体途径为设置粒子的位置跟速度，依靠计算每个粒子的适应度值，改变其位置与速度，以求搜索出全局最优解，在清洗效率优化的实施当中，采用调整超声波频率和功率、清洗液粘度及温度等参数的办法，使清洗效率达到峰值，同时防止过多能量消耗与系统过度负载。

2.3 算法性能评估

性能评估主要针对计算精度、收敛速度和稳定性三个方面开展，凭借实验数据与预测模型的对比，计算优化后清洗效率跟实际的误差，评价优化算法于清洗效率提升方面的准确性^[2]。此流程采用均方根误差（RMSE）作为评估的判定指标，算出实际清洗效率跟优化模型预测情况的不同，保证优化后的参数规划可精准展现实际清洗效果，估测算法的收敛速度，即算法在搜索到最优解时所需的迭代次数，与其他优化算法（像模拟退火算法）开展对比，验证遗传算法及粒子群优化算法的卓越性，保证在合理时段内找出全局最优解，评估算法的稳定性需在不同的实验条件下运行算法，检测其是否始终能稳定地收敛到最优解，避免因参数挑选不当产生的计算不稳定现象。

3.关键技术与创新应用

3.1 超声波技术的应用与优化

在超声波清洗操作里，频率的抉择举足轻重，高频段的超声波，尤其处于 700kHz 到 2MHz 这个范围，可造就更细微的气泡，加剧冲击强度，进而更高效地清扫微小颗粒，为实现超声波技术应用的优化，首先对不同频率状态下的超声波清洗效果做了实验测试，探讨了频率与功率设置对清洗效率的关联。频率过低会造成气泡偏大，即便具备较突出的机械冲击性，然而会增加硅片表面受损伤的潜在风险，而高频则可产生更细密的气泡，适合去清洗微米级的污垢，尤其契合对表面状况要求较高的半导体行业，为进一步增进清洗的成效，引入超声波的功

率调节手段，采用调节功率密度的方式优化能量分布，避免过多能量在某一区域集中引起局部损伤，同时让硅片表面被足量冲击波覆盖。

3.2 清洗机设计中的创新方案

传统超声波清洗机的能量往往分布得比较均匀，但这种均匀性也致使某些区域清洗效果不充分，抑或局部清洗过度，从而对硅片表面造成损伤^[3]。为攻克这一难题，采用定向式的超声波能量传递系统，凭借精准打造的换能器与声波导管，实现清洗机里能量的定向输出。此方案借助多点激励技术，让清洗液中的气泡能在硅片表面均匀分布，而非聚集于某一区域，由此规避了硅片局部的过度清洗与损伤现象，清洗机还携有智能温控系统，凭借实时查看清洗液的温度，自动更改加热装置的运转情形，保证清洗过程处于最优温度区间，杜绝过高温度给硅片表面造成负面结果，清洗机内部流体动力学设计也进行了优化，采用了线条流畅的结构和多重过滤组合，能切实减少污染物的二次附着现象，保障清洗液始终维持有效状态。

3.3 材料选择与耐用性改进

清洗机换能器一般采用压电陶瓷材料制作，这些材料得在高频振动的条件下维持高效能量转换能力，而且要具备不错的机械强度和热稳定性，为增进材料的使用寿命及耐用特性，采用高性能的压电陶瓷复合材质，这些材料不光展现出优异的电气性能，还可承受超声波清洗进程中产生的应力及温度变动。清洗机内、外部结构采用了抗腐蚀的金属材质，尤其针对清洗液接触的区域，采用了抗腐蚀表现更出色的合金材料，这些材料能很好地抗拒长时间使用时清洗液酸碱性及高温引发的腐蚀，为进一步强化耐用特性，还对清洗机的关键部件开展表面处理事宜，采用涂覆耐磨涂层或实施硬化处理，提高部件表面的硬度及耐磨特性，增加设备的使用年限。

4. 系统性能评估与优化策略

4.1 清洗效率与能耗分析

采用实验测量 700kHz 到 2MHz 频率区间的清洗效率，且与功率消耗数据进行结合，审定不同操作条件下的能效比值，清洗液的温度于其中扮演关键角色，较高的温度能促进超声波传播效率提高，但过高的温度会引起能量浪费的增加，系统应在一定温度范围中优化超声波功率跟频率的设置，以保证在提高清洗效能期间，防止能源的过分消耗。开展能耗分析这一工作，采用功率监测系统对清洗环节中超声波发生器和电路系统功率实时监测，保证各阶段功率输出均达到最佳状态，采用构建

清洗效率和能耗的数学模型，以能量平衡法实施系统优化，研究清洗过程中各设备的能源效率展现。

4.2 系统性能优化策略

频率和功率的优化而言，综合前文提及的清洗效率与能耗分析结果，经多次实验对不同频率及功率值的清洗效果做比较，保证在实现清洗效率最大化期间，杜绝过度功率带来的热量消耗^[4]。依靠精细化操纵功率输出，采用闭环反馈控制方案调整功率及频率，以应对不同的负载变动，实现最佳的去污效果。实施清洗液的优化行动，采用改变清洗液的成分，调节该清洗液的黏度与表面张力，进一步增进超声波的传播成效，降低液体存在的阻力，提高气泡破裂的频率与能量集中度，进而强化清洗本领，系统里添加了智能控制模块，可依据实时的清洗需求与设备状态自动对操作参数做出调整，诸如温度的调节、清洗液流速的控制之类，采用算法改进，系统能依据硅片的污染情形自动挑选最恰当的清洗模式，防止无谓的能量浪费，系统又引入了高功效电力变换模块，能高效地把电能转换成超声波所需的振荡能量，减少转换阶段的能量耗费。

结语

借助对超声波硅片清洗机设计及优化的深入探究，制订基于超声波技术的系统优化实施办法，采用合理调整超声波频率、功率及清洗液参数的方式，成功实现清洗效率提升并降低了能耗。实验佐证了优化后的系统在硅片清洗中的高效节能特质，验证了优化设计的可行程度与实用意义，该成果为超声波清洗设备的后续改良与应用奠定了理论基础，还为工业范畴内高精度清洗技术的发展贡献一臂之力。

[参考文献]

- [1]杨慧毓，李相鑫，许璐，等.无损单晶圆片声波清洗系统的研究与应用[J].电子测试，2019，（22）：93-94.
- [2]刘玉林.CMP 超精密抛光元件超声波清洗工艺和应用[J].清洗世界，2017，33（12）：43-45.
- [3]滕宇，陈洁，冯晓敏，等.无损单晶圆片声波清洗装置的研发[J].半导体技术，2016，41（11）：857-863.
- [4]王文丽，夏楠君，陈仲武.湿法清洗中超声波清洗工艺与应用[J].清洗世界，2015，31（01）：38-41.

作者简介：吴昆，出生年月：1967 年 2 月，男，民族：汉，籍贯：浙江嘉兴，学历：大学本科，职称：高级工程师，研究方向：半导体大尺寸硅片清洗设备的研发制造。