

基于 SPC 的晶圆制造过程关键参数控制策略改进

刘 娟

美光半导体（西安）有限责任公司 陕西西安

【摘要】晶圆制造工艺复杂，关键参数控制直接影响产品质量。统计过程控制（SPC）可实现参数的实时监测与分析。本文针对光刻胶薄膜厚度、光刻显影后线宽、套刻精度等关键参数，运用 SPC 控制图表跟踪变化趋势，通过过程能力指数评估工艺质量。据此制定参数优化、异常处理及持续改进策略。经生产验证，改进后的控制策略显著提升了参数稳定性，有效提高产品质量与生产效率，增强企业竞争力。

【关键词】晶圆制造；统计过程控制（SPC）；关键参数；控制策略；过程能力指数

【收稿日期】2025 年 3 月 10 日

【出刊日期】2025 年 4 月 19 日

【DOI】10.12208/j.ijme.20250031

Improving the control strategy for key parameters in wafer manufacturing based on Statistical Process Control (SPC)

Juan Liu

Micron Technology, Inc., Xi'an, Shaanxi

【Abstract】 The wafer manufacturing process is complex, and controlling key parameters directly impacts product quality. Statistical Process Control (SPC) enables real-time monitoring and analysis of these parameters. This paper focuses on key parameters such as photoresist film thickness, line width after lithography and development, and overlay accuracy. By using SPC control charts to track trends and assessing process capability indices, the paper formulates strategies for parameter optimization, anomaly handling, and continuous improvement. Production validation has shown that the improved control strategy significantly enhances parameter stability, effectively improves product quality and production efficiency, and strengthens the company's competitiveness.

【Keywords】 Wafer manufacturing; Statistical Process Control (SPC); Key parameters; Control strategy; Process capability index

引言

在半导体产业蓬勃发展的当下，晶圆制造作为核心环节，其产品质量直接决定芯片性能。制造过程涉及众多复杂参数，任何细微偏差都可能引发产品缺陷，导致良品率降低、成本增加。传统参数控制方式难以满足高精度、高稳定性需求。SPC 凭借其基于统计学原理的优势，能有效监测与控制过程参数，及时察觉异常波动。在此背景下，探索基于 SPC 的晶圆制造过程关键参数控制策略改进，对提升晶圆制造质量、推动半导体产业发展意义重大。

1 识别晶圆制造关键参数

晶圆制造是一个极为复杂且精密的过程，犹如一场微观世界的精密交响乐，每一道工序都是不可或缺或的音符，而其中的关键参数则是决定旋律是否

和谐的核心要素。光刻工序作为晶圆制造的“雕刻师”，其涉及的参数直接影响着芯片图形的成型质量。光刻胶薄膜厚度的均匀性与准确性，就像是画家中画笔的精准度，稍有偏差，便会导致曝光过程中光线吸收与传播的异常，进而使光刻图形出现模糊、变形等问题，这些瑕疵在芯片微观结构中，可能演变成致命的电路缺陷。光刻显影后的线宽更是芯片电路的“生命线”，它决定了芯片内部电路的尺寸与形状，任何细微的误差都可能改变电路的电学性能，使得芯片在运行时出现速度迟缓、功耗异常等状况。在多层光刻工艺中，套刻精度则如同精密仪器的校准器，不同光刻层图形若无法精准对准，芯片内部的电路连接将彻底混乱，最终导致芯片功能丧失。

蚀刻工序在晶圆制造中承担着“塑造者”的角

色,其参数的精准把控关乎半导体器件结构的完整性。蚀刻速率的快慢直接影响着材料去除的效率与精度,速率过快可能导致过度蚀刻,破坏原本设计的器件结构;速率过慢则会延长生产周期,增加制造成本^[1]。而蚀刻均匀性更是决定了器件性能一致性的关键,若蚀刻不均匀,同一批次的晶圆上不同区域的器件性能将出现显著差异,严重影响产品的整体质量。沉积工序作为构建芯片功能层的重要环节,其参数控制同样至关重要。

在实际生产过程中,识别这些关键参数并非易事。由于晶圆制造涉及众多复杂的物理与化学过程,各参数之间还存在着千丝万缕的关联,一个参数的微小变化可能会引发其他参数的连锁反应。需要通过大量的实验研究、工艺分析以及长期的生产经验积累,才能准确界定哪些参数是真正影响产品质量的关键因素^[2]。随着半导体工艺技术的不断进步,制程工艺日益精细化,对关键参数的识别也提出了更高的要求,需要持续关注行业动态,引入新的检测技术与分析方法,确保能够及时、准确地捕捉到影响晶圆制造质量的关键参数,为后续的质量控制奠定坚实基础。

2 构建 SPC 控制策略

构建基于统计过程控制(SPC)的控制策略,是保障晶圆制造过程稳定性与产品质量的重要手段。在这个过程中,控制图表的选择与应用是首要环节。不同类型的参数具有各自独特的特性,就如同不同的工具适用于不同的工作场景一样,需要为它们匹配最合适的控制图表。对于光刻胶薄膜厚度、光刻显影后线宽等能够以具体数值衡量的计量型数据, $\bar{X}$ -S 控制图无疑是理想的选择。它通过实时监测参数的均值与标准差变化,如同精密的仪表盘,能够清晰地呈现出生产过程的稳定性状态。当数据点围绕中心线随机分布在控制限内时,表明生产过程处于稳定受控状态;而一旦数据点突破控制限,或是出现连续多点在中心线同一侧等异常分布情况,就如同亮起了警示灯,提醒工作人员生产过程中可能存在异常因素干扰。

过程能力指数的计算与评估是 SPC 控制策略的核心环节,它如同一把精准的尺子,用于衡量工艺质量水平是否达到要求。 C_p 值反映了过程在理想状态下的潜在能力,它基于规格上限与下限以及过程标准差进行计算,体现了生产过程能够满足规格要求

的固有能力^[3]。而 C_{pk} 值则进一步考虑了过程均值与规格中心的偏移情况,更贴合实际生产过程中的复杂性。通过定期计算关键参数的过程能力指数,企业能够对工艺过程的稳定性与产品质量满足规格要求的程度有一个量化的认知。

异常处理与改进机制是 SPC 控制策略能够持续发挥作用的关键保障。当控制图表发出异常警报后,迅速、有效的应对措施至关重要。此时,需要组织由工艺工程师、设备维护人员、质量管理人员等组成的专业团队,运用鱼骨图、5W1H 等科学分析方法,如同侦探破案一般,层层深入挖掘异常产生的原因^[4]。从设备故障的排查、工艺参数的重新审视,到原材料质量的检测,不放过任何一个可能的因素。针对不同的原因,制定详细、可操作的改进措施,如对故障设备进行维修与调试、对工艺参数进行优化调整、对不合格原材料进行更换等。

3 实施与优化控制策略

实施基于 SPC 的控制策略,数据采集与系统搭建是基础且关键的一步。在晶圆制造设备与工艺流程的各个关键节点,安装高精度传感器,就如同为生产过程安装了敏锐的“感知器官”,能够实时、准确地捕捉到关键参数的细微变化。这些传感器收集到的数据,通过构建的实时数据采集系统,快速、稳定地传输至基于 SPC 的数据分析与管理平台。该平台犹如整个控制策略的“大脑”,具备强大的数据处理与分析能力。它不仅能够实现数据的自动录入,减少人工操作带来的误差与效率低下问题,还能根据预设的规则自动生成各类控制图表,以直观、可视化的方式呈现生产过程参数状态。当出现异常情况时,平台能够迅速发出报警推送,无论是通过短信、邮件还是生产现场的声光报警装置,确保操作人员与管理人员能够第一时间获取信息。

人员培训与意识提升是确保控制策略有效实施的重要保障。涉及晶圆制造过程的操作人员、技术人员与管理人员,是控制策略的具体执行者与监督者,他们的专业知识与质量意识直接影响着控制策略的落地效果。开展全面、系统的 SPC 知识与技能培训至关重要^[5]。培训内容涵盖 SPC 的基本原理,让员工从理论层面理解统计过程控制的核心思想;深入讲解控制图表的解读方法,使员工能够准确分析图表所传达的生产过程信息;详细教授过程能力指数的计算与应用,帮助员工掌握衡量工艺质量的量化

工具;以及分享异常处理的有效方法与实际案例,提升员工应对突发问题的能力。

持续优化与动态调整是使控制策略始终适应晶圆制造过程变化的关键。晶圆制造是一个动态的过程,受到多种因素的综合影响。设备随着使用时间的增长会逐渐老化,其性能参数可能发生变化;不同批次的原材料在特性上可能存在差异;新的工艺技术不断涌现,对生产过程控制提出了新的要求^[6]。基于 SPC 的控制策略不能一成不变,需要根据实际情况进行持续优化与动态调整。定期对关键参数的控制数据进行回顾分析,如同对生产过程进行一次全面的“体检”,从中总结经验,发现潜在的问题与改进空间。

4 评估控制策略效果

评估基于 SPC 的控制策略效果,关键参数稳定性评估是重要的切入点。通过对比改进前后关键参数在 SPC 控制图表上的表现,能够直观地观察到生产过程稳定性的变化。改进前,控制图表上的数据点可能分布较为分散,频繁出现超出控制限的情况,甚至呈现出明显的上升或下降趋势,这表明生产过程存在较大的波动,关键参数不稳定。而在改进后,若数据点能够更加紧密地围绕中心线随机分布,超出控制限的次数显著减少,趋势变化也趋于平稳,说明控制策略在抑制参数波动方面取得了良好效果。

产品质量提升评估是检验控制策略成效的核心指标。统计改进前后晶圆产品的良品率是最直接、最直观的评估方式。良品率的提高幅度能够清晰地反映出控制策略对产品质量的积极影响,它不仅体现了产品在生产过程中的合格率提升,更意味着企业能够向市场提供更多优质产品,增强市场竞争力^[7]。深入分析产品缺陷类型与数量的变化,能够进一步揭示控制策略在解决具体质量问题上的有效性。改进前,某些类型的缺陷可能频繁出现,严重影响产品质量与生产效率,而在实施控制策略后,若这些缺陷的数量大幅减少甚至消失,说明控制策略成功地针对这些问题采取了有效的改进措施,从根源上解决了质量隐患。

生产效率与成本效益评估是衡量控制策略是否具有实际应用价值的重要方面。对比改进前后生产过程中因参数异常导致的设备停机时间与工艺调整次数,能够直接反映出控制策略对生产效率的影响^[8]。在改进前,由于关键参数不稳定,设备可能频繁

因异常情况停机进行调试,工艺也需要多次调整以保证产品质量,这不仅浪费了大量的生产时间,还增加了人工成本与设备损耗。而在实施控制策略后,若设备停机时间明显缩短,工艺调整次数大幅减少,说明生产过程的稳定性得到显著提升,生产效率也随之提高。

5 结语

基于 SPC 改进晶圆制造过程关键参数控制策略,在提升参数稳定性、产品质量及生产效率方面成效显著。未来,随着半导体技术持续向更小制程节点迈进,对晶圆制造精度与质量要求将更高。需进一步深化 SPC 应用,结合人工智能、大数据分析等新兴技术,实现对关键参数更精准、智能的控制。持续优化控制策略,以适应不断变化的制造环境,助力晶圆制造产业迈向更高质量发展阶段,为半导体行业创新突破奠定坚实基础。

参考文献

- [1] 郭燕涛,曾聪,熊文清.晶圆加工腔室自清洗模块的系统设计[J].自动化应用,2025,66(05):190-193.
- [2] 刘海军.电子产品制造过程中 CMP 材料的应用研究[J].电子产品世界,2025,32(03):21-24.
- [3] 胡志强,吴一全.基于机器视觉的半导体晶圆缺陷检测方法综述[J].中国图象图形学报,2025,30(01):25-50.
- [4] 吴立辉,周秀,张中伟,等.基于 WOA-SVM 的混合式晶圆允收测试关键特征参数选择方法[J].制造业自动化,2024,46(12):17-23.
- [5] 江婷,张新,梅琳.半导体晶圆转运设备制造材料的国产替代——以防滑移壁虎脚垫片制造为例[J].塑料工业,2024,52(12):196-197.
- [6] 高鹏捷,汪俊亮,张洁.面向晶圆制造工期预测的可解释深度学习方法[J].机械工程学报,2024,60(22):179-191.
- [7] 戴敏洁.集成电路制造过程中的质量工具应用[J].集成电路应用,2020,37(06):27-29.
- [8] 戴敏洁.晶圆制造中 APQP 提升研发产品质量的应用[J].集成电路应用,2020,37(05):40-42.

版权声明:©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS