

# 半导体芯片制造流程中的自动化控制技术研究

王洪建

(中国电子科技集团公司第四十五研究所, 北京 100176)

**摘要** 自动化控制技术是半导体芯片制造流程的核心支撑, 其应用贯穿晶棒制备、光刻工艺至车间流转全环节, 可有效破解人工操作的效率与精度局限。在晶棒制备与硅片加工环节, PID 闭环自动控制技术通过模型建立、数据采集与参数优化, 实现晶棒直径的精准稳定控制; 在光刻工艺中, 对准标记识别、工作台运动补偿与闭环反馈控制协同作用, 保障纳米级套刻精度; 在车间流转环节, AGV 分布式多机协同控制技术依托分层通信架构与动态任务分配, 提升工艺间传输效率。自动化控制技术的合理应用不仅能大幅提升芯片生产线产能与工艺精度, 还能降低人为误差带来的损失, 为芯片高性能与高良率提供坚实的保障。

**关键词** 半导体芯片; 制造流程; 自动化控制

中图分类号: TN3

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.11.024

## 0 引言

半导体芯片制造已进入纳米级工艺时代, 生产效率与工艺精度的提升成为行业发展的核心诉求, 自动化控制技术逐渐成为破解行业瓶颈的关键支撑。当前芯片制造流程复杂度不断提升, 人工操作已无法满足纳米级精度要求, 且易受疲劳、干扰等因素影响, 导致生产效率偏低、产品良率不稳定。同时, 传统控制技术在晶棒生长、光刻对准、车间流转等核心环节的适配性不足, 难以实现全流程精准协同控制。基于此, 聚焦半导体芯片制造的关键工艺环节, 优化自动化控制技术的应用方案, 完善控制体系, 成为推动芯片制造产业高质量发展的重要方向, 也是本次研究的核心目标。

## 1 半导体芯片制造流程中自动化控制的重要性

### 1.1 破解人工局限, 筑牢产能提升根基

自动化控制体系是半导体芯片制造流程中推动生产效率跨越式提升的核心支撑, 其凭借全流程自动化设备的高效协同联动, 彻底冲破了人工操作在时间维度与效率层面的双重局限。相较于人工操作易产生疲劳、必须间歇休息的固有短板, 自动化设备能够全天候 24 小时不间断持续运转, 这一优势有效缩减了人工干预所引发的停机调试耗时, 进而显著提升芯片生产线的整体产能输出。在芯片制造的全流程中, 自动化控制体系始终发挥着统筹调控的关键作用, 它不仅能规避人工操作的低效问题, 更能通过精准调度让各类

设备高效配合, 让整条生产线的运转更具连贯性<sup>[1]</sup>。

### 1.2 赋能核心设备, 挖掘产能提升潜力

如果说自动化控制体系是产能提升的整体支撑, 那么自动化控制技术就是激活芯片制造关键环节效能的核心抓手, 它以精准化、智能化的调控能力, 让芯片制造的核心设备发挥出最大效用。芯片制造的关键环节对作业环境与设备精度有着严苛要求, 光刻机、刻蚀机等核心设备必须在超高洁净度的环境中持续稳定运行, 而自动化控制技术恰好能完美适配这一需求, 它可实时精准调控核心设备的运行参数, 细致把控设备的每一个运行节点, 有效规避人工操作可能带来的环境干扰与设备停机隐患。不同于人工操作的粗放式管控, 自动化控制技术能实现对核心设备的精细化、全流程管控, 它既可以实时监测设备的运行状态, 及时发现并处理设备的微小异常, 也能通过智能化调度优化设备的运行节奏, 最大限度提升核心设备的利用率。

## 2 半导体芯片制造流程中自动化控制技术的应用

### 2.1 晶棒制备与硅片加工, 晶棒直径 PID 闭环自动控制技术

#### 2.1.1 PID 闭环控制系统的模型建立与参数初始化

在晶棒制备与硅片加工环节, 晶棒直径的精准控制直接决定后续硅片质量与芯片性能, 企业可通过 PID 闭环自动控制技术实现对直径误差的精准调控。要实现这一目标, 企业首先需基于大量实验数据与理论分析, 搭建晶棒生长过程的动态模型, 明确输入参数与

作者简介: 王洪建 (1988-), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向: 半导体设备。

输出参数之间的传递函数，为 PID 控制器的高效运行提供理论支撑，具体参数设置如表 1 所示。参数初始化阶段，技术人员需严格按照工艺要求设定晶棒的目标直径，再结合已建立的动态模型特性，合理确定 PID 控制器的初始参数，比例系数直接决定系统的响应速度，积分系数用于彻底消除系统的稳态误差，微分系

数则可有效抑制系统超调或震荡现象。参数调整需严格遵循“先比例、后积分、再微分”的科学顺序，通过阶跃响应实验，细致观察系统的动态特性，逐步优化参数组合，反复调试直至控制器在初始状态下既能实现快速响应，又能保证无超调的基本性能，为晶棒直径的稳定控制筑牢基础<sup>[2]</sup>。

表 1 参数设置

| 技术环节     | 核心控制目标      | 典型参数范围                                       | 关键传感器类型         | 预期控制精度       | 主要挑战         |
|----------|-------------|--|-----------------|--------------|--------------|
| 晶棒直径控制   | 维持生长直径恒定    | 目标直径：150 ~ 300 mm                            | 激光测径仪、CCD 视觉传感器 | ±0.5 mm      | 热场波动、提拉速度稳定性 |
| PID 参数整定 | 系统快速无超调响应   | Kp: 1.5 ~ 3.5, Ki: 0.01 ~ 0.1, Kd: 0.5 ~ 2.0 | —               | 阶跃响应超调量 < 5% | 模型非线性、参数耦合   |
| 执行机构     | 调节加热功率与提拉速度 | 加热功率：20 ~ 80 kW, 提拉速度：0.5 ~ 2.0 mm/min       | 热电偶、编码器         | 功率调节精度 ±1%   | 执行器滞后、非线性    |

### 2.1.2 晶棒生长过程的数据采集与误差处理

晶棒生长过程中，实时、精准的数据采集是确保直径稳定的基础前提，高精度传感器始终承担着核心采集职责。它需持续捕捉晶棒直径的每一个瞬时数据，既不能遗漏关键生长节点，也不能出现数据滞后的情况；为实现信号的高效转换，传感器会快速将模拟信号转化为数字信号，再平稳传输至控制系统，这份高效传输能最大程度规避信号失真的问题。采集频率的把控同样关键，传感器设定的采集频率须高于系统动态响应频率，借此，才能让采集到的数据真实复刻晶棒生长的实时状态，不出现任何偏差；技术人员也会全程监测传感器的运行状态，及时排查采集过程中的各类隐患，确保传感器始终处于最佳工作状态，为后续误差处理与控制输出，提前筑牢精准的数据根基。

### 2.1.3 PID 控制器的控制输出及分项作用

PID 控制器会基于处理后的误差数据快速生成对应控制输出，再通过执行机构作用于晶棒生长系统，进而实现工艺参数的动态调整。比例项会依据瞬时误差迅速做出响应，及时修正误差偏差；积分项则针对长期累积的误差开展调节工作，彻底消除稳态误差；微分项能够精准预测误差变化趋势，提前采取有效措施抑制系统超调或震荡。执行机构需紧密配合控制器输出，其中加热功率调节器、提拉速度伺服电机等设备会协同运作，动态调整晶棒生长的各项工艺参数；调节过程中还需严格实施抗饱和策略，当积分项累计值超过预设阈值时，便立即暂停积分作用，防止系统出现超调现象；同时可借助微分先行或不完全微分算法，优化微分相性能，避免高频噪声被过度放大。

### 2.1.4 PID 控制器的动态参数优化及闭环保障

晶棒生长系统运行期间，工作人员需持续监测 PID

控制器的控制效果，结合实际误差动态调整 PID 参数，全力构建自适应闭环控制体系。既要确保参数调整的及时性与精准性，也要兼顾系统运行的稳定性与可靠性；既要避免参数波动过大导致晶棒直径偏差，也要防止参数调整滞后影响晶棒生长质量。通过动态参数优化，PID 控制器能更好适配晶棒生长全周期的误差变化，让晶棒直径始终稳定于设定值范围内；唯有做好参数优化与实时监测，才能为后续硅片加工提供高质量的晶棒原料，才能保障整个晶棒生长工艺的连续性与规范性<sup>[3]</sup>。

## 2.2 光刻工艺：光刻机纳米级套刻精度自动对准控制技术

### 2.2.1 对准标记的设计与精准识别

对准标记是光刻工艺中实现纳米级套刻精度的核心基准，它的科学设计直接关乎套刻精度的达成与否，更是光刻机精准完成纳米级套刻操作的关键前提。在设计过程中，对准标记需兼顾信号强度与抗干扰能力，通常会采用十字形、棋盘格或同心圆等优化结构，既将自身尺寸严格控制在微米级范围，又把精度打磨至纳米级别，确保后续每一步光刻工序中都能被高分辨率相机精准捕捉；为强化信号识别效果，对准标记的材料需与晶圆表面形成显著对比度，金属标记或沟槽标记便是理想之选，它们能有效提升信号辨识度，从根源上规避识别偏差的出现（见表 2）。不仅如此，对准标记的设计还需适配晶圆的整体加工流程，既要避免与晶圆电路区域发生冲突，又要适配不同光刻步骤的识别需求，让每一处设计都服务于套刻精度的提升，为后续精准识别环节奠定坚实基础，全方位保障纳米级套刻的可行性。

表2 对准标记的设计与精准识别

| 标记类型  | 典型结构   | 尺寸范围        | 材料 / 形成方式    | 对比度增强方法   | 识别算法精度             |
|-------|--------|-------------|--------------|-----------|--------------------|
| 十字线标记 | 正交线条   | 5 μm×5 μm   | 硅片上刻蚀沟槽      | 相差显微镜照明   | 亚像素插值, 重复性< 0.3 nm |
| 棋盘格标记 | 交替黑白方格 | 10 μm×10 μm | 金属(如Cr)沉积    | 优化照明波长与偏振 | 图像相关匹配, 精度< 0.5 nm |
| 同心圆标记 | 多圈同心圆环 | 外径 20 μm    | 浅沟槽隔离(STI)形成 | 光学散射模型校正  | 圆心拟合算法, 精度< 0.4 nm |

2.2.2 光刻机精密工作台的运动补偿控制

光刻机精密工作台运动补偿控制,是实现纳米级对准、保障套刻精度的关键环节,其以工作台为核心执行主体,在自动化控制体系中全面覆盖平移、旋转、缩放三大自由度,每一项补偿动作都紧密围绕“提升运动精准度”这一核心目标有序推进。平移补偿依托压电陶瓷驱动台高效运行,该驱动台凭借0.01纳米的超高分辨率,能实时捕捉晶圆曝光时的微小位移,进而快速修正偏差,从根源上避免位移偏差诱发的套刻误差;旋转补偿由陀螺仪反馈系统全程主导,这套系统通过高速采样晶圆角速度信号,动态校准工作台姿态,且必须将旋转精度严格控制在0.001度以内,以此确保晶圆与掩模板的相对角度分毫不差;缩放补偿则借助激光干涉仪的实时测量数据灵活调整,其通过精准调控掩模板与晶圆的相对距离,有效消解热膨胀、机械应力带来的尺寸偏差。这套完整的运动补偿流程需在毫秒级时间内高效完成,快速响应环境扰动引发的各类偏差,坚决杜绝曝光过程中额外误差的引入,持续维持工作台运动的精准性与稳定性,为纳米级套刻精度筑牢坚实支撑<sup>[4]</sup>。

2.3 车间工艺间流转,金源传输AGV分布式多机协同控制技术

分层式通信架构,是分布式多机协同控制系统实现高效信息交互的载体,其以支撑AGV群体实时互通、保障车间工艺流转稳定为核心使命,全程串联起架构设计、功能划分、指令传递的每一个关键环节。为达成这一目标,分布式多机协同控制系统专门精心搭建了该分层式通信架构,让AGV群体间的信息传递更高效、更精准,为整个车间工艺间的顺畅通转筑牢通信根基。该架构清晰界定上下两层功能模块,互不干扰且协同联动;上层部署的中央调度服务器,主动牵头承担全局任务规划与路径优化的核心职责,全面统筹车间内所有AGV的运行节奏与任务方向,确保全局运行有序可控;下层为每台AGV逐一配备独立本地控制器,精准高效执行中央服务器下发的具体运动指令,同时实时采集自身运行状态数据,第一时间反馈至上层调度

端,最终形成“统筹、执行、反馈”的闭环通信链路。在关键的任务分配阶段,中央调度服务器会优先梳理车间工艺需求,严格遵循光刻、刻蚀、清洗等工序的先后逻辑,科学分层构建任务队列,切实保障任务分配与工艺流转节奏高度契合,让整个通信架构的价值充分发挥。

为实现任务的高效动态分配,系统灵活采用拍卖算法或压力算法,精准筛选空闲AGV并完成任务指派,指派过程中会综合考量AGV当前位置、剩余电量、负载能力以及工艺任务优先级等多重因素,保障分配结果的合理性与可行性。任务分配完成后,中央调度服务器会通过无线通信协议,将分配结果实时、精准地下发至对应AGV的本地控制器,切实确保每一项工艺传输任务都能快速启动、有效执行,为后续AGV的高效运行奠定坚实基础<sup>[5]</sup>。

3 结束语

自动化控制技术在半导体芯片制造各核心环节的应用实践,充分印证了其在提升生产效率、保障工艺精度、优化流转流程中的核心价值。通过针对性的技术优化与体系完善,PID闭环控制、纳米级对准控制、AGV多机协同控制等技术已实现与芯片制造工艺的深度适配,有效解决了传统控制模式下的精度不足、协同性差、效率偏低等问题。

参考文献:

[1] 郭美丽.自动检测技术在半导体芯片制造中的应用研究[J].科技创新与生产力,2025,46(10):114-116,120.  
 [2] 付洋洋,王新新,邹晓兵,等.气体放电与等离子体在芯片制造领域中的应用[J].高电压技术,2025,51(08):4458-4477.  
 [3] 魏峥嵘,庄均珺.半导体芯片制造中缺陷图像的分层诊断策略分析[J].集成电路应用,2025,42(06):356-357.  
 [4] 冯昭奎.中日高科技发展的比较与思考:以半导体芯片制造技术为案例[J].日本研究,2022(03):1-15.  
 [5] 何雨浩,陈伟,裴倩倩.基于离散教与学算法的半导体芯片终端测试阶段调度问题研究[J].自动化应用,2021(12):5-8.