

Analysis of the key technology of the temperature control system during the growth of silicon single crystal

Weileng Wang Huanxin Zheng*

Zhejiang Haina Semiconductor Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang, 324300, China

Abstract

As the foundation of semiconductor industry, silicon single crystal material puts forward very high requirements for the accuracy and stability of temperature control in its growth process. As the core component, the temperature control system directly affects the crystal quality, defect control and growth efficiency. This paper focuses on the temperature control system in the growth process of silicon single crystal growth, systematically analyzes the key technical issues such as temperature field uniformity control, dynamic response ability, high temperature stability and system integration reliability, and discusses the path to improve the performance of the temperature control system by combining heat conduction, radiation regulation and intelligent control algorithm. By sorting out the current main technical bottlenecks and future development direction, it provides theoretical support and technical reference for the subsequent optimization and upgrading of silicon single crystal manufacturing equipment, which has important engineering application value.

Keywords

silicon single crystal; temperature control system; thermal field control; dynamic response; system stability

硅单晶生长过程中温控系统的关键技术分析

王伟棱 郑欢欣*

浙江海纳半导体股份有限公司, 中国·浙江 衢州 324300

摘要

硅单晶材料作为半导体产业的基础, 在其生长过程中对温度控制的精度和稳定性提出极高要求。温控系统作为硅单晶生长装置的核心组成部分, 直接影响晶体质量、缺陷控制及生长效率。本文围绕硅单晶生长过程中的温控系统展开研究, 系统分析了温度场均匀性控制、动态响应能力、高温稳定性及系统集成可靠性等关键技术问题, 结合热传导、辐射调节与智能控制算法等手段, 探讨提升控温系统性能的路径。通过梳理当前主要技术瓶颈与未来发展方向, 为后续硅单晶制造装备的优化升级提供理论支撑与技术借鉴, 具有重要的工程应用价值。

关键词

硅单晶; 温控系统; 热场控制; 动态响应; 系统稳定性

1 引言

硅单晶材料广泛应用于集成电路、太阳能电池及光电子器件, 其生长工艺的技术水平已成为衡量半导体制造能力的重要标志。硅单晶的生长依赖于高度复杂的热场环境, 而温控系统正是维持该热场稳定与可控的关键装置。从传统Czochralski法到现代磁控区熔技术, 温控精度始终决定着晶体结构完整性与缺陷抑制能力。然而, 当前温控系统在热分布不均、响应滞后、材料耐高温性不足等方面仍面临挑战。

【作者简介】王伟棱(1977-), 男, 中国浙江杭州人, 本科, 工程师, 从事硅材料加工研究。

【通讯作者】郑欢欣(1981-), 男, 中国浙江杭州人, 工程师, 从事硅材料加工研究。

为了实现更高质量的硅单晶生产, 有必要对温控系统的关键技术要素进行深入剖析, 厘清其运行机制与性能瓶颈, 从而推动硅单晶产业的技术革新与装备升级。

2 硅单晶生长工艺概述

2.1 硅单晶材料的特性与应用前景

硅单晶具有晶格结构完整、电学性能稳定、工艺兼容性强等突出特性, 是当前半导体器件制造的核心材料。其高纯度和高结晶质量满足集成电路、光伏电池等高精度加工需求。在高性能芯片、新能源转换装置及传感器领域, 硅单晶的技术迭代驱动着器件性能的持续提升, 应用前景广阔, 成为引领未来信息与能源技术变革的基础支撑材料。

2.2 硅单晶生长工艺流程与热场需求

硅单晶的生长常采用直拉法与区熔法, 其过程涉及多阶段复杂热场演化, 包括熔融、结晶、拉晶及冷却等环节。

高温环境需保持稳定热场分布,以实现晶体径向和轴向温度梯度的优化控制。热场分布直接影响结晶界面形态、杂质迁移及位错密度,要求加热、散热与热绝缘系统协调运行,构建对晶体质量高度敏感的控温环境。

3 硅单晶温控系统的组成结构与功能分工

3.1 硅单晶炉体加热装置与热源布局

加热系统主要通过电阻加热器、感应线圈或红外辐射源提供高温环境,支撑硅原料熔融与晶体成形过程。热源布局需围绕熔区中心对称布置,以实现稳定的径向温度梯度。加热区域需具备快速响应与高温均匀性双重能力,并与热绝缘结构形成封闭热场,保障晶体生长区域的恒定热输入,提升晶体结构连续性与纯净度。

3.2 硅单晶冷却模块与散热通道设计

冷却系统通过水冷、气冷或热交换板构建多层散热通道,引导系统多余热量向外排散。冷却区域位置与面积直接关系晶体冷却速率与热应力控制水平,需在降温过程中维持轴向热梯度平稳过渡。散热结构设计应避免局部热堆积与冷凝现象,提高热交换效率,有效配合加热系统完成整炉热场的动态调节,确保晶体在收尾阶段稳定成形。

3.3 硅单晶温度感知与测控单元配置

温控系统依赖高精度热电偶、红外测温仪及光纤传感器对多个关键区域实时监测。测温点布置覆盖熔池、晶体生长界面及炉壁等位置,形成空间分布均衡的感知网络。测控单元通过数据采集模块与控制算法联动,根据温度反馈动态调整加热功率与冷却速率,构建闭环控制体系,实现硅单晶生长过程中的高精度温度管理与稳态维持。

4 硅单晶生长温度场均匀性控制技术分析

4.1 硅单晶热传导路径设计与导热特性调控

硅单晶生长过程中的热传导路径设计直接影响温度场的均匀性与晶体的热应力分布。导热结构需根据炉体几何特征与材料热导率特性进行优化配置,实现能量从热源到熔池、从熔池到晶体的高效传递。控温系统应引导热流在不同区域形成稳定梯度,避免局部过热或导热死区产生。通过调整导热材料的类型、厚度及接触界面状态,可有效控制热流分布,保障晶体界面稳定性。

4.2 硅单晶热辐射调节材料与均温策略

热辐射是硅单晶生长中不可忽视的传热机制,辐射调节材料的选用对均温具有显著作用。反射层、吸收层及半透明介质等材料通过调整表面发射率与吸收率影响局部热辐射行为,从而实现对热流的间接调控。结构布局中引入辐射屏蔽装置与可控热镜可增强对热能的定向引导,提升热场对称性。有效的辐射控制策略有助于降低温差波动,增强晶体生长过程中的热稳定性与尺寸一致性。

4.3 生长环境热扰动对硅单晶温控的影响

生长环境中的热扰动源包括外部温度变化、气流扰动、

电磁场波动及操作过程中的系统震动等,这些因素易在热场中引发微观不稳定。扰动影响温度传感器的准确性与控制算法的实时响应,进而诱发熔体波动或晶体偏心。热扰动削弱控温系统的调节能力,导致晶体内部热应力集中和缺陷形成概率上升。环境稳定性与系统抗扰动能力成为实现温度场均匀控制的必要保障条件,需与整体热控设计协同提升。

5 硅单晶温控系统的动态响应与实时调节能力分析

5.1 硅单晶升温降温速率的精准控制

硅单晶生长过程中升温 and 降温速率的精度控制直接关系到晶体热应力管理与结晶界面的形态演化。升温阶段通常要求温度以每分钟 20°C 至 40°C 的速率均匀提升,避免原料熔化不充分或熔池稳定性下降。降温阶段则需维持 0.5°C 至 $2^{\circ}\text{C}/\text{min}$ 的缓慢速率,以防止晶体裂纹和热畸变的产生。实验表明,升温过程中若速率波动超过 $\pm 5^{\circ}\text{C}/\text{min}$,晶体表面将出现微结构不均,缺陷密度可提升至 $1 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$ 以上。高精度控制需配合多级功率调节模块与响应延迟小于 200ms 的执行系统,构建热调节响应闭环结构,实现温度变化过程的即时追踪与稳定控制,提升生长过程对温度扰动的抗干扰能力,确保晶体质量一致性。

5.2 硅单晶生长多点实时温度采集技术

硅单晶温控系统需要依赖多点式温度采集技术进行热场信息的全面感知与反馈调节。当前先进系统一般配置 8 至 12 个高精度热电偶,分布于熔池上方、加热区域中部、晶体下拉通道及炉体壁面,实现对关键热区温度的实时监测。热电偶测量误差控制在 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 以内,采样频率达到 10Hz 至 100Hz ,可满足动态温场变化快速响应的需求。数据采集模块配合信号滤波与数值修正算法,将传感器非线性与环境漂移因素修正至 3% 以内误差范围。系统将多点数据进行集成拟合,形成时空耦合热场模型,提升控温系统的调节灵敏度与空间均匀性维持能力,为复杂晶体结构的稳定生长提供技术保障。

5.3 硅单晶控温中的智能控制算法优化

硅单晶控温系统中传统 PID 控制在面对非线性热响应和多变量耦合问题时响应滞后显著,智能算法优化成为提升调节性能的核心手段。模糊控制与神经网络算法结合,能够根据实时温度梯度变化趋势动态调整控制策略,其系统响应时间可缩短至原有 PID 的 60% 以内。基于模糊推理的控温系统在测试中显示控温误差可降低至 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$,远优于传统算法的 $\pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 。引入自适应学习机制的控制逻辑可在生长全过程中不断修正模型参数,适应不同晶体尺寸与生长速率的变化需求。多目标优化算法可平衡升温速率与晶体质量目标,实现多维调节方案的最优匹配,构建出具备自调节、自识别、自修正能力的高性能温控体系,图 1 为一种直拉硅单晶生长加热器参数优化方法。

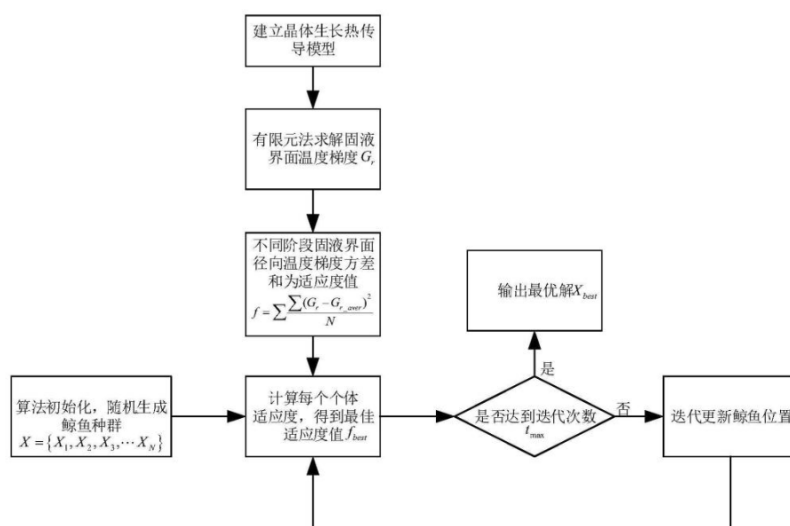


图1 一种直拉硅单晶生长加热器参数优化方法

6 硅单晶高温环境下温控系统的稳定性与可靠性保障分析

6.1 硅单晶控温设备的耐高温性能设计

硅单晶生长过程中炉腔内部常处于 1300℃ 以上高温环境, 温控设备需具备长期耐高温运行能力。加热元件多采用钨、钼或高纯石墨等材料, 其热膨胀系数控制在 $4 \times 10^{-6}/\text{K}$ 以内, 确保在高温循环下尺寸稳定。感温部件需具备高温下导电性能稳定、抗氧化能力强等特性, 热电偶测头包覆层通常选用高纯氧化铝或氮化硼, 提高传感响应精度与热冲击耐受力。控制电缆与传输通道使用高温硅胶或陶瓷纤维材料包裹, 有效隔绝外部热源对信号完整性的干扰, 整体设计需确保各部件在 1500 小时以上高温连续运行测试中无性能退化, 满足工业生产的稳定性需求。

6.2 控制系统在硅单晶生长中的抗干扰机制

硅单晶生长炉内电磁环境复杂, 电源噪声、温度波动和机械振动均可能对控温系统造成干扰, 影响其实时判断与响应精度。抗干扰机制主要通过信号隔离、硬件冗余与滤波算法联合构建, 控制电路采用金属屏蔽与独立接地结构, 减少外部磁场感应电流引入误差。数据采集部分集成抗干扰芯片与多级模数转换校准模块, 对热电偶信号中的低频噪声与脉冲扰动进行滤波修正。软件层面嵌入鲁棒控制逻辑, 提升系统在输入异常或反馈迟滞状态下的自适应能力。关键节点设置故障诊断模块, 在误差超过 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 时自动报警与限幅保护, 确保控温系统在干扰环境中持续稳定运行。

6.3 硅单晶热场密封与绝热系统可靠性分析

硅单晶生长过程对热场密封性与绝热效果的要求极高, 密封结构失效将直接引发热能泄露、温度波动及晶体结构畸变。炉体密封通常采用多层不锈钢框架配合柔性石墨垫圈或陶瓷纤维毡, 其气密性测试需在低于 $1 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 的真空环境

下保持压差稳定不变超过 24 小时。绝热系统采用复合式结构, 内层为高反射性陶瓷涂层, 中层填充轻质多孔绝热砖, 外层辅以氧化铝纤维布, 形成分层阻热结构, 导热系数控制在 $0.08 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ 以下。系统设计需满足长周期运行中不发生剥离、粉化或材料熔蚀, 确保热场能量聚集效率大于 90%。高可靠性的密封与绝热设计不仅提高温控系统效率, 还能显著延长设备使用寿命与运行安全性。

7 结语

硅单晶生长过程中温控系统的技术水平直接决定了晶体质量与工艺稳定性, 是推动高端半导体材料制造能力提升的核心支撑。通过对热传导、热辐射、温场均匀性、动态响应及系统稳定性的系统分析, 可以发现温控系统的各项子模块均需协同优化, 才能实现复杂热环境下的高精度控制。随着智能算法与新型高温材料的不断引入, 温控系统正朝着更高效、更智能、更可靠的方向发展。未来应加强多学科技术融合, 持续攻克系统集成、极端环境适应等关键难题, 为硅单晶产业的技术突破提供坚实保障。

参考文献

- [1] 林海鑫, 高德东, 王珊, 张振忠, 安燕, 张文永. 大尺寸直拉硅单晶生长的多物理场建模与优化[J]. 人工晶体学报, 2025, 54(01): 17-33.
- [2] 万银. 半导体硅单晶生长中缺陷预测与控制研究[D]. 导师: 刘丁. 西安理工大学, 2024.
- [3] 朱佩. 基于 Modbus TCP/IP 协议的硅单晶生长过程监控系统设计[D]. 导师: 弋英民. 西安理工大学, 2024.
- [4] 曹聪. 硅单晶生长过程等径阶段直径模型辨识与可视化研究[D]. 导师: 刘丁; 张晶. 西安理工大学, 2024.
- [5] 吴思源. 硅单晶生长过程机理建模与仿真研究[D]. 导师: 刘丁; 黄伟超. 西安理工大学, 2024.