

Analysis of the key technology development trend of large-size silicon single crystal growth equipment

Weileng Wang Huanxin Zheng*

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

Abstract

As the core material supporting the high-end development of semiconductor and photovoltaic industry, large-size silicon single crystal growth equipment technology is facing the transformation challenge of complicated structure, process precision and intelligent control. The thermal field system, traction mechanism and atmosphere control device in the equipment play a key role in ensuring the quality and size improvement of crystals, but there are still technical bottlenecks in crystal defect suppression, interface stability control and temperature gradient uniformity. This paper focuses on the large size silicon single crystal growth equipment system composition and function characteristics, deeply analyzes the core of silicon single crystal quality and efficiency, and system combing innovation technology path, discusses the magnetic field auxiliary control, intelligent temperature control and modular structure of advanced technology application prospect, combined with the industry demand analysis equipment development trend, in order to silicon single crystal equipment technology independent breakthrough to provide theoretical support and direction.

Keywords

large-size silicon single crystal; growth equipment; thermal field control; defect suppression; technological innovation

大尺寸硅单晶生长设备的关键技术发展趋势分析

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

大尺寸硅单晶作为支撑半导体和光伏产业高端发展的核心材料, 其生长设备技术正面临结构复杂化、过程精密化和控制智能化的转型挑战。设备中的热场系统、牵引机构及气氛控制装置在确保晶体质量与尺寸提升方面发挥关键作用, 但在晶体缺陷抑制、界面稳定调控及温度梯度均匀性方面仍存在技术瓶颈。本文聚焦大尺寸硅单晶生长设备的系统构成与功能特征, 深入剖析制约硅单晶品质与效率的核心障碍, 并系统梳理创新技术路径, 探讨磁场辅助控制、智能温控与结构模块化等先进技术的应用前景, 同时结合产业需求分析设备发展趋势, 以期为我国硅单晶装备技术的自主突破提供理论支撑与方向引导。

关键词

大尺寸硅单晶; 生长设备; 热场控制; 缺陷抑制; 技术创新

1 引言

随着半导体制造和光伏能源技术的迅猛发展, 对高质量、大尺寸硅单晶材料的需求显著提升。硅单晶直径的不断扩大, 对生长设备的热工性能、结构强度与控制精度提出更高要求。传统硅单晶生长设备在尺寸适应性与过程稳定性方面逐渐显现出局限, 促使行业加快关键装备的升级迭代。现阶段, 大尺寸硅单晶生长不仅是材料层面的技术挑战, 更在于其装备系统的高度集成与智能调控能力。为应对日益复杂

的生产工艺需求, 亟需从设备结构优化、热场调控技术提升及自动化系统构建等维度, 系统开展研究, 推动生产设备向高性能、高适配方向演进。

2 大尺寸硅单晶生长设备的系统结构与功能特征

高温热场系统在硅单晶生长过程中承担着晶体成核、扩展与界面稳定的多重控制任务, 其温度梯度分布直接影响熔体对流状态与晶体形貌演化。通过合理配置加热器与隔热材料, 可形成均匀稳定的径向与轴向温差, 从而有效抑制晶体翘曲与应力集中。热场系统的动态调节能力亦决定了长晶过程中的界面平整性和形核速率稳定性, 对实现大尺寸硅单晶的低缺陷、高均匀度生长具有决定性意义。牵引与旋转系统负责控制硅单晶从熔体中提拉的速率和旋转角速度, 其动

【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。

态响应能力直接关系到晶体界面稳定性与直径控制精度。在大尺寸硅单晶生长中，系统需实现低波动、高同步的驱动输出，以防止晶体在生长过程中出现径向涨缩或界面扰动。通过精密步进电机与闭环反馈机制，牵引系统可实现对晶体直径的实时调节，旋转装置则有助于平均熔体温度分布，提升晶体对称性与结构一致性。

3 大尺寸硅单晶生长过程的关键技术瓶颈分析

3.1 热场分布不均引发的硅单晶晶体缺陷问题

热场系统在大尺寸硅单晶生长中处于核心地位，其分布均匀性直接决定了晶体内部应力状态与缺陷生成概率。随着单晶尺寸的不断扩大，径向与轴向热传导难以保持平衡，局部过热或冷却区域易形成热应力集中，从而诱发位错、滑移或夹杂等晶体缺陷。热场分布的动态变化还可能引起熔体对流模式不稳定，进而干扰晶体界面形貌并造成形核异常。加热器布局、热屏蔽结构与反射材料配置若无法实现对温度场的精确调控，将导致生长过程中的晶体畸变风险上升，影响硅单晶的结构完整性与电学性能。热场不均亦限制了大尺寸晶体的生长速率提升空间，阻碍设备生产效率的进一步突破，对整套生长系统的优化提出了更高的热工设计要求。

3.2 大尺寸硅单晶生长界面的稳定控制难题

硅单晶生长界面的稳定性对晶体质量与尺寸控制具有决定性作用，在大尺寸晶体制备中尤为关键。随着直径增加，界面处受热场扰动、熔体波动与牵引速率变化的耦合影响加剧，极易导致界面形貌不稳定，引发结晶紊乱和缺陷堆积。若界面由凹形向平面或凸形剧烈波动，将影响晶体生长方向与位错扩展路径，削弱整体晶格的一致性。界面控制还受限于热场响应滞后、反馈系统精度不足等技术瓶颈，使得即便小幅调整牵引参数，也可能引起生长面的大幅偏移。在高熔温环境下，硅熔体粘性较低，界面形状更易受扰动影响而失稳，需要依赖精密协调的温度控制、牵引调整与旋转同步机制进行综合调控。现有技术长在晶过程动态界面识别与实时调节能力方面尚存不足，制约了大尺寸硅单晶成品率的进一步提高。

3.3 缩短硅单晶生长周期与保持结晶质量之间的技术矛盾

在硅单晶规模化生产背景下，提高长晶效率与保证晶体质量之间存在天然矛盾。缩短生长周期需提高牵引速率与冷却效率，但过快的生长节奏将导致晶体内残余应力增加，诱发结构缺陷或界面波动。大尺寸硅单晶生长过程中热传导路径增长，温度梯度控制难度加大，若未能实现热场系统的快速响应与动态补偿，易出现局部过热或温降突变，破坏晶体稳定成核与均匀扩展的条件。结晶质量对位错密度、氧含量与电阻均匀性的要求极高，在生长速率提升的同时需保持全过程的热流与力学环境一致。当前生长设备在传感精度、反馈响应与执行系统协同效率方面仍存在优化空间，难以满

足快速生产条件下的高品质硅单晶制备需求。在推进工业化与保障晶体性能双重目标下，亟需构建跨系统的整体优化机制，协同调控效率与质量的关键参数。

4 大尺寸硅单晶生长设备的创新技术路径

4.1 基于磁场调控的硅单晶热场均匀化技术

在大尺寸硅单晶生长中，热场均匀性直接决定晶体的缺陷密度与界面稳定性。采用磁场调控技术可有效抑制熔体对流不稳定现象，提高热场的空间一致性。研究表明，在直径 200 mm 以上的硅单晶生长中引入 0.1 T 至 0.3 T 的轴向静磁场，可将熔体中心区域的径向温度梯度控制在 3 K/cm 以内，相较未加磁场条件下减少波动幅度达 40%。磁场的约束作用使得熔体流动趋于层流化，避免热扰动对晶体界面造成冲击，有利于晶体形貌稳定维持。对于 300 mm 硅单晶生长过程，应用磁场调控技术后位错密度可由 $3 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$ 降至 $1 \times 10^4 \text{cm}^{-2}$ ，晶体电阻均匀性提升超过 15%。为适应尺寸持续扩大的趋势，磁场系统需与热场加热结构紧密耦合，同时具备实时响应调节能力。目前国内外高端设备已逐步配备双磁场复合系统，在动态长晶阶段可实现磁感应强度 $\pm 0.05 \text{T}$ 范围内的精准控制，为实现低缺陷、高均匀度的大尺寸硅单晶提供了稳定热环境保障，图 1 为一种直拉法单晶硅生长设备的剖析图。

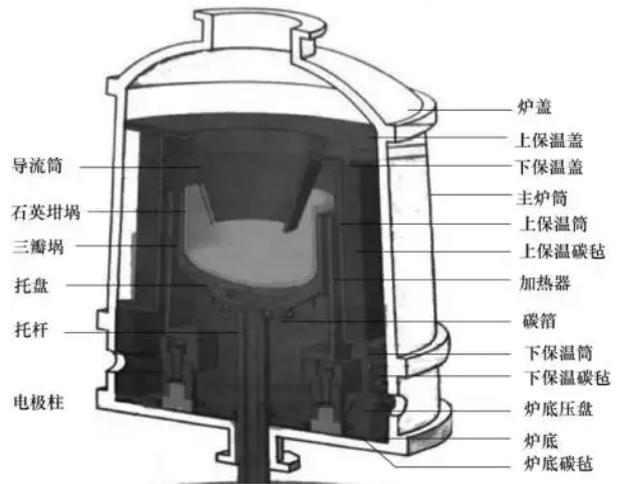


图 1 一种直拉法单晶硅生长设备的剖析图

4.2 智能控制系统在硅单晶生长全过程中的集成应用

智能控制系统在硅单晶生长设备中的全面集成已成为提升生产稳定性与晶体品质的关键路径。当前主流设备配置了以 PLC 为核心的闭环反馈系统，结合热场、拉速、旋转与气氛多个子系统的实时数据进行集中控制。在 300 mm 硅单晶生产中，集成智能算法后长晶界面波动幅度控制在 $\pm 0.2 \text{mm}$ 范围内，相较传统系统降低近 35%。利用 AI 建模对温度、牵引速率与界面形貌间关系进行动态预测，可实现以秒级为单位的响应调整，显著提高系统调节效率。在

实际生产中,配备智能系统的设备平均良品率可提升8%至12%,同时故障率下降超过20%。智能化控制还使得远程监控与参数云端优化成为可能,在自动补偿热场漂移、识别晶体异常增长行为等方面展现出明显优势。未来大型硅单晶生长设备将通过与传感网络、仿真平台和边缘计算系统融合,构建出具备自主学习与自修正能力的控制架构,推动生产线向高度智能化方向迈进。

4.3 适配超大尺寸硅单晶的模块化与一体化设备设计

为应对硅单晶尺寸由300 mm向450 mm乃至更大规格扩展的需求,设备结构向模块化与一体化方向演进已成为必然趋势。模块化设计通过功能单元的解耦布局,可实现热场单元、拉晶机构与气氛控制模块的独立升级与替换,缩短维护周期超过40%。一体化结构则提升了设备整体刚性与传热效率,降低系统耦合误差,保障长时间稳定运行。在450 mm硅单晶实验生产平台中,采用整体吊装式炉体与嵌入式热屏蔽结构的设备,其运行稳定性提高25%,控温精度达到 $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$ 。结构集成化设计有效减少设备占地面积约20%,便于生产线布置与批量扩展。模块化还支持多种规格炉体的互换配置,适应不同晶体直径的柔性需求。一体化与模块化的结合能够兼顾系统复杂度与制造效率,使设备具备快速响应市场需求与技术演进的能力,推动硅单晶生长工艺的柔性化、智能化与规模化协同发展。

5 大尺寸硅单晶应用驱动下的产业发展趋势

大尺寸硅单晶在半导体和光伏领域的战略地位不断提升,直接推动上下游产业链加速重构与技术升级。在集成电路制造中,12英寸硅片已成为主流工艺平台,而向18英寸过渡的技术预研正快速展开,对单晶尺寸提出更高要求。在光伏领域,为提升单位硅料发电效率,210 mm及以上大尺寸硅片的市场占比持续扩大,带动硅单晶生长设备向更高稳定性与更低成本方向演进。产业链企业正在加快布局超大尺寸晶体材料的产能扩张,部分头部厂商已建成300 mm以上单晶年产超2000吨的生产线,设备国产化率同步提升至

65%以上。装备制造企业也在聚焦热场系统、拉晶机构与智能控制等核心技术的专利化与平台化构建,推动形成标准化、模块化的产业生态。全球市场竞争格局出现向东亚地区集中的趋势,特别是中国大陆地区依托完整供应链与政策支持在规模与技术双重驱动下已具备主导地位,未来硅单晶产业将在应用倒逼与设备创新协同作用下持续向高端、高效、高集成方向迈进。

6 结语

大尺寸硅单晶生长设备的发展正处于技术集成与结构重构的关键阶段。热场控制、界面稳定、智能调节与系统结构等核心技术环节决定着硅单晶品质与生产效率的上限。面对集成电路与光伏制造对高性能晶体材料的迫切需求,设备技术的创新突破已成为产业竞争的制高点。未来应在材料、控制与制造体系间构建高度耦合的协同机制,推动装备向高精度、高稳定、高柔性的方向持续演进,为硅单晶大尺寸化、高质量化提供坚实技术支撑与系统保障。

参考文献

- [1] 刘丁,姜雷.西安理工大学,大尺寸半导体硅单晶生长设备和成套工艺转化及产业化[Z].项目立项编号:20GXSF0001.鉴定单位:国家知识产权局.鉴定日期:2022-11-01.
- [2] 张雨雨.硅单晶批次生产过程迭代学习预测控制研究[D].导师:刘丁.西安理工大学,2022.
- [3] 曹建伟,朱亮,梅德庆,傅林坚,张俊,汪延成,高宇,欧阳鹏根,石刚,严绍军,叶钢飞,王巍.浙江晶盛机电股份有限公司,浙江大学.大尺寸半导体直拉硅单晶生长关键技术研发及产业化[Z].项目立项编号:2009ZX02011-001.鉴定单位:中国机械工业联合会.鉴定日期:2020-11-29.
- [4] 曹建伟,傅林坚,朱亮,李林,沈文杰,高宇,胡建荣,叶钢飞,倪军夫,王小飞.浙江晶盛机电股份有限公司,大尺寸半导体级硅单晶生长设备的关键技术及应用[Z].鉴定单位:中国电子专用设备工业协会、中国电子材料行业协会.鉴定日期:2018-01-23.
- [5] 张晶,刘丁,赵跃,惠一龙,姜雷.四极磁场下大尺寸直拉硅单晶生长三维数值模拟[J].材料热处理学报,2015,36(09):238-243.