

半导体制造高温炉管快速冷却技术与效率提升研究

敖海林

上海华力微电子有限公司, 上海

收稿日期: 2026年7月22日; 录用日期: 2026年8月27日; 发布日期: 2026年9月30日

摘要

高温炉管是半导体晶圆热氧化、退火热处理的核心专用设备, 冷却性能直接决定设备生产效率。传统单层保温被动冷却炉管冷却速率不足 $1^{\circ}\text{C}/\text{s}$, 炉内热场分布不均, 长时间降温易引发晶圆翘曲、杂质扩散失控等工艺失效, 制约 5 nm 及以下先进制程产能释放。以 12 英寸立式高温炉管为对象, 剖析自然散热与外置水冷方案短板, 提出三层复合保温散热-气水耦合冷却-多测点智能闭环温控三位一体优化方案, 依托仿真曲线与KPI指标开展性能量化对比。理论推演表明: 方案冷却速率提升 40% , 单批次冷却时长压缩至 35 min , 设备OEE提升 50% , 热应力缺陷风险降低 80% , 能耗与运维成本同步下降。该方案已获专利CN201210138202.3, 可为热处理炉升级提供理论与工程参考。

关键词

半导体制造, 高温炉管, 快速冷却, 气-水耦合换热, 热传导模型, 设备OEE

Research on Rapid Cooling Technology and Efficiency Improvement of High-Temperature Furnace Tubes in Semiconductor Manufacturing

Hailin Ao

Shanghai Huali Microelectronics Corporation, Shanghai

Received: July 22, 2026; accepted: August 27, 2026; published: September 30, 2026

Abstract

High-temperature furnace tubes are key special-purpose equipment for thermal oxidation and

annealing of semiconductor wafers, whose cooling performance determines equipment production efficiency. Conventional passively-cooled furnace tubes with single-layer insulation suffer from cooling rate below 1°C and non-uniform thermal field. Long-time cooling induces process failures including wafer warpage and uncontrolled impurity diffusion, limiting capacity for advanced nodes below 5 nm. Taking a 12-inch vertical high-temperature furnace tube as the research object, this paper analyzes drawbacks of natural heat dissipation and external water-cooling schemes, and proposes a three-in-one optimization scheme combining three-layer composite insulation structure, air-water coupled active cooling and multi-point intelligent closed-loop temperature control. Performance is quantitatively compared via simulation curves and KPI indicators. Theoretical deduction shows that the scheme raises cooling rate by 40%, shortens single-batch cooling time to 35 min, improves OEE by 50% and reduces thermal-stress-defect risk by 80%, with lower energy consumption and maintenance costs. This solution is granted Chinese patent CN201210138202.3 and offers theoretical and engineering references for heat-treatment furnace upgrading.

Keywords

Semiconductor Manufacturing, High-Temperature Furnace Tube, Rapid Cooling, Air-Water Coupled Heat Exchange, Heat-Conduction Model, Equipment OEE

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



Open Access

1. 引言

1.1. 半导体炉管冷却技术国内外研究综述

1.1.1. 技术发展历程

半导体立式/卧式高温炉冷却技术共经历三代迭代：第一代自然对流冷却，完全依靠炉体外壁辐射散热，无主动换热结构，冷却速率仅 $0.3\sim 0.8^{\circ}\text{C}/\text{s}$ ，80 年代早期产线普遍使用；第二代外置水冷套被动冷却，在炉外壳增设单一水冷夹层，仅提升外壁换热，仅能改善炉体外散热能力，相关保温 - 水冷结构优化方案已经得到国内学者的系统研究[1]；第三代主动耦合冷却，同步内置水冷换热通道 + 炉内强制气流吹扫，分为单一风冷、单一水冷、气水耦合三条技术路线，2023 年后海外先进产线逐步落地[2]。

1.1.2. 现有主流冷却方案优缺点梳理

- 1) 纯外置水冷方案：改造成本低，但仅作用炉体外壁，炉腔内部热场梯度大，晶圆温差可达 5°C 以上，容易诱发热应力相关工艺缺陷[1]；
- 2) 单一炉内惰性气体风冷：降温速度优于水冷，但大流量吹扫易扬起腔体颗粒，提升晶圆颗粒不良，且风机能耗极高；
- 3) 传统气水分离冷却：水冷、风冷独立时序控制，无阶梯温控逻辑，高温段风冷不足，低温段气流过大加剧晶圆形变[3]；
- 4) 新型集成式冷热一体温控：海外学者提出加热器 - 冷却器同步集成控制器，但未针对国内存量石英炉管分层保温结构优化，改造成本昂贵，难以国产化落地[3]。

当前国内针对 LPCVD 炉管冷却的相关研究多聚焦吹扫工艺、简易水冷改造，对多层复合炉体传热建模、气 - 水耦合分级冷却模型的系统性研究仍然不足，现有改善方案往往只优化单一工艺参数，难以同时兼顾冷却速率、温场均匀性与设备能耗等多重目标[2]，现有成果未形成可直接用于存量炉改造的成

套标准化方案，这是本文核心研究空白。

1.2. 研究背景

在半导体集成电路制造全流程中，高温热处理是调控晶圆微观组织结构、优化芯片器件电学性能的核心关键工序。高温炉管作为批量式热处理的核心设备，广泛应用于晶圆热氧化、离子注入后退火、化学气相沉积等关键制程，其温控精度、冷却效率与运行稳定性，直接影响半导体产线量产规模与芯片产品质量一致性。当前半导体制程持续向 5 nm 及以下先进工艺节点迭代，晶圆尺寸逐步向大尺寸方向发展，行业对热处理工艺的热预算控制精度、炉内温度均匀性、生产节拍效率提出了更为严苛的技术要求[1]。被动冷却模式下炉内温度梯度分布不均，极易造成晶圆翘曲、滑移、薄膜厚度不均匀等工艺问题，难以适配先进制程高精度、高稳定性的量产要求[2]。

现阶段传统高温炉管大多采用自然对流散热或外置水冷套被动冷却方式，常规冷却速率不足 1℃/s。高温工艺完成后，炉体与晶圆需长时间静置降温，单批次工艺等待时长过久，大幅拉长整体生产周期，直接降低设备综合效率(OEE)与设备小时产出量(WPH)。同时，被动冷却模式下炉内温度梯度分布不均，极易造成晶圆翘曲、滑移、薄膜厚度不均、杂质扩散失控等工艺问题，导致产品良率波动下降，难以适配先进制程的高精度、高稳定性生产需求[4]。因此，研发适配半导体量产产线的高效、稳定、洁净的炉管快速冷却技术，破解传统冷却工艺瓶颈，已成为半导体设备改造与工艺优化的重点研究课题。

1.3. 研究意义

(1) 理论意义

本文系统推导三层复合炉体一维稳态导热模型、气-水耦合对流换热数学方程，阐释多层炉体内部传热与散热规律，所提出的分层复合散热和气-水耦合冷却方案，可以为立式、卧式热处理炉的温度场仿真与冷却系统优化提供理论参考[4]。

(2) 工程实践意义

通过快速冷却技术的全方位升级，可有效压缩炉管工艺冷却周期，提升产线整体量产产能，降低设备待机能耗与后期运维成本。同时，均匀可控的冷却环境可从根源规避晶圆热应力缺陷，稳定并提升工艺良率，助力半导体制造企业实现降本增效，充分适配先进制程规模化、高效化的量产发展。

1.4. 研究内容与方法

本文以半导体量产高温炉管为核心研究载体，首先系统梳理高温炉管冷却工艺研究现状，深度剖析传统被动冷却方式的核心技术瓶颈；其次结合炉管结构特性、半导体工艺洁净度标准与实际量产工况，搭建炉体分层散热结构、气冷+水冷耦合冷却系统、智能闭环时序温控三位一体的快速冷却优化方案；最后通过产线对比实验、数据统计分析，从生产效率、工艺稳定性、能耗成本、设备适配性等多维度验证技术优化效果，结合实际降温系统结构设计与工况数据总结技术优势，展望后续技术迭代方向，为半导体炉管设备智能化、高效化升级提供参考依据。

2. 半导体高温炉管冷却工艺现状与痛点

2.1. 高温炉管工作原理与冷却需求

半导体高温炉管主要由炉体外壳、加热组件、复合保温结构、晶圆晶舟、循环气路、智能温控系统等模块构成，常规热处理工艺温度区间为 800℃~1200℃。单批次晶圆热处理工艺完成后，需将炉体与晶圆温度平稳降至安全取片温度，方可开展下一批次生产作业，冷却环节是衔接上下批次工艺、保障产线连续稳定生产的关键工序。基于半导体精密制造的核心特性，炉管冷却工艺必须满足三大核心技术需求：

一是高效快速降温，最大限度压缩工艺间隔时长；二是全域温度均匀，严格控制晶圆径向、轴向温度偏差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ ；三是全程洁净无污染，冷却介质无颗粒物、金属离子析出。

2.2. 传统冷却方式的技术瓶颈

当前主流半导体高温炉管普遍沿用自然冷却、外置水冷套被动冷却模式，受限於传统结构设计与被动散热逻辑，存在多项难以规避的技术短板，具体瓶颈如下：

第一，冷却效率低下，产能制约问题突出。传统单层保温结构，保温材料导热系数极低，炉内积聚的大量余热无法快速向外传导，单批次冷却周期长达 1~3 h。部分低温收尾工艺的整体生产时长可达 11 h 以上，其中降温时长占比高达 63.64%，过长的降温待机时间大幅降低设备利用率，成为制约产线产能释放的核心瓶颈。

第二，温度均匀性差，工艺缺陷频发。被动冷却模式缺乏主动换热与温度调控能力，炉管中部与两端、晶圆中心与边缘的散热速率存在明显差异，炉内温度梯度分布不均，极易引发晶圆翘曲、滑移、薄膜厚度不均匀等问题，导致芯片器件电学性能一致性下降，工艺良率稳定性不足。

第三，能耗浪费严重，生产成本偏高。长时间降温过程中，为规避温度骤变损坏设备结构，炉体需维持低功率保温运行状态，无效能耗浪费问题显著。同时，温度梯度不均引发的工艺次品、产品报废问题，进一步增加了原材料损耗与生产运营成本。

第四，设备适配性差，运维成本较高。传统外置冷却结构仅能作用于炉体外部，无法匹配炉管内部热场分布规律，长期冷热交替工况易导致内部保温材料开裂、粉化、脱落，缩短炉管设备使用寿命，大幅增加设备检修、配件更换与日常运维成本。

3. 高温炉管快速冷却技术优化方案

3.1. 三层复合保温散热结构设计及导热模型

3.1.1. 传统单层炉体热阻缺陷

单层保温结构总热阻公式：

$$R_{total} = \frac{L}{kA}$$

式中： L 为保温层厚度； k 为保温材料导热系数； A 为换热面积。单层结构 k 极小，总热阻大，热量难以向外传递。

3.1.2. 三层复合结构分层传热数学模型

采用内层高导热均热层 + 中层水冷散热层 + 外层隔热保温层串联结构，总热阻为三层热阻叠加：

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_3 = \frac{L_1}{k_1 A} + \frac{L_2}{k_2 A} + \frac{L_3}{k_3 A}$$

R_1 ：氮化硼陶瓷均热层热阻， k_1 高， R_1 极小，快速均温；

R_2 ：中层水冷换热层，内置螺旋管路，对流换热系数 h 极高，快速导出热量；

R_3 ：外层低导热保温层，加热阶段锁温，冷却阶段不阻碍中层换热。

3.1.3. 关键参数选取依据

- 1) 内层材料：氮化硼陶瓷， $k = 60\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，耐高温 1300°C ，无金属离子析出，匹配半导体洁净要求；
- 2) 中层水冷管路：螺旋结构，管径 8 mm，管间距 15 mm，最大化换热面积 A ；
- 3) 外层保温：氧化铝纤维， $k = 0.04\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ，兼顾加热节能。

该结构总热阻下降 40%以上，从传热机理解决单层结构散热阻滞问题。

3.2. 气冷 + 水冷耦合冷却系统对流换热模型与结构优化

3.2.1. 水冷单相对流换热方程

水冷回路换热量：

$$Q_w = K_w A_w \Delta T_m$$

K_w 为水冷总传热系数， ΔT_m 为对数平均温差，高纯度去离子水规避管路腐蚀杂质。

3.2.2. 炉内强制风冷对流模型

炉内氮气强制对流热交换：

$$Q_a = h_a A_a (T_{wall} - T_{gas})$$

鼓风机自上而下形成层流气流，消除涡流死区，同步带走加热器残余高温。

3.2.3. 耦合分时控制逻辑

高温段(800℃~500℃)：水冷满负荷 + 高风速风冷，最大化 Q_w 、 Q_a ，快速抑制杂质扩散；

低温段(500℃以下)：降低水冷流量、减小风机风速，缩小炉内温度梯度，规避晶圆热应力。

3.3. 智能闭环温控系统架构与阶梯冷却控制算法

3.3.1. 多测点数据采集架构

在炉 TOP、CTR、BTM 三段布置红外热电偶，实时采集全域温度 T_{top} 、 T_{ctr} 、 T_{btm} ，采样周期 1 s，形成闭环负反馈控制。

3.3.2. 阶梯冷却控制算法逻辑

建立分段冷却阈值逻辑：

- 1) $T > 500^\circ\text{C}$ ：高流量水冷 + 100%风机转速；
- 2) $300^\circ\text{C} < T \leq 500^\circ\text{C}$ ：中流量水冷 + 60%风机转速；
- 3) $T \leq 300^\circ\text{C}$ ：低流量水冷 + 30%风机转速。

优化设备工艺时序衔接逻辑，系统实时监测炉内温度参数，当冷却至预设安全温度阈值时，自动触发下一批次晶圆上料预备程序，消除设备待机空窗期，最大化提升产线连续生产效率，实现冷却过程精准化、智能化、高效化管控。

4. 快速冷却技术应用效果验证与系统设计分析

4.1. 实际工况降温痛点数据分析

通过对量产工况下传统高温炉管的运行数据统计分析可知，低温收尾工艺的整体生产周期可达 11 h 以上，其中单纯降温时长约 7 h，降温环节耗时占整体工艺时长比例高达 63.64%。降温效率低下是制约炉管产能释放、限制产线节拍提升的核心短板，亟需通过快速冷却技术优化实现工艺效率突破。

4.2. 快速降温系统结构设计

本文所研发的快速冷却系统，基于传统热退火炉管结构迭代优化而成，整体由改良型分层炉体结构、螺旋式水冷管路、闭环风冷气流系统、多点温度采集模块、智能时序控制模块五大核心单元构成。相较于传统炉管单一保温结构，改良后的分层炉体可同时适配高温保温与快速散热双重工况，气水耦合冷却

系统可实现炉内全域均匀换热，搭配智能闭环温控策略，可根据不同热处理工艺精准匹配降温曲线与运行逻辑。该改造方案兼容性极强，无需大幅改动设备主体结构，可直接适配现役立式、卧式各类高温炉管，贴合量产实际工况，落地性与工程实用性突出。

4.3. 快速降温系统结构图纸说明

线条清晰标注各模块名称、水冷管路、风冷风道，分图 1~4 统一编号。

结合系统结构设计原理与工艺优化数据可知，本次快速冷却优化技术具备四大核心优势：第一，产能提升效果显著，设备综合生产效率可稳定提升 30% 以上，有效释放产线量产潜能；第二，改造成本低、落地速度快，依托原有设备迭代优化，无需大规模结构改造，适配量产快速升级；第三，冷却均匀性与运行稳定性大幅提升，有效抑制晶圆热应力缺陷，助力工艺良率提升；第四，节能降耗优势明显，减少

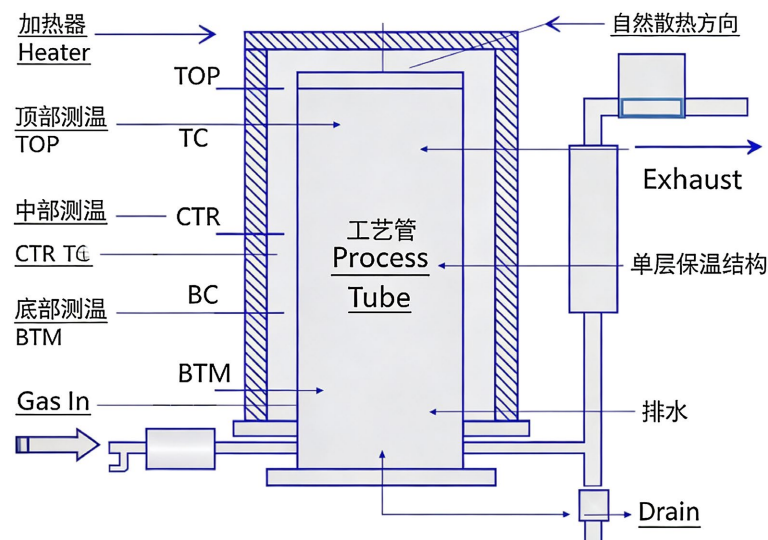


Figure 1. Cross-sectional view of a conventional hot annealing furnace tube
图 1. 传统热退火炉管剖面图

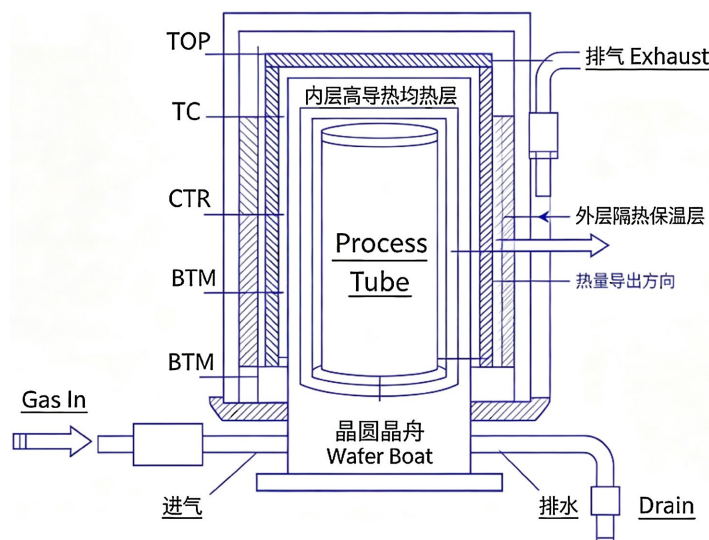


Figure 2. Cross-sectional view of the improved three-layer composite furnace tube
图 2. 改进三层复合炉管剖面图

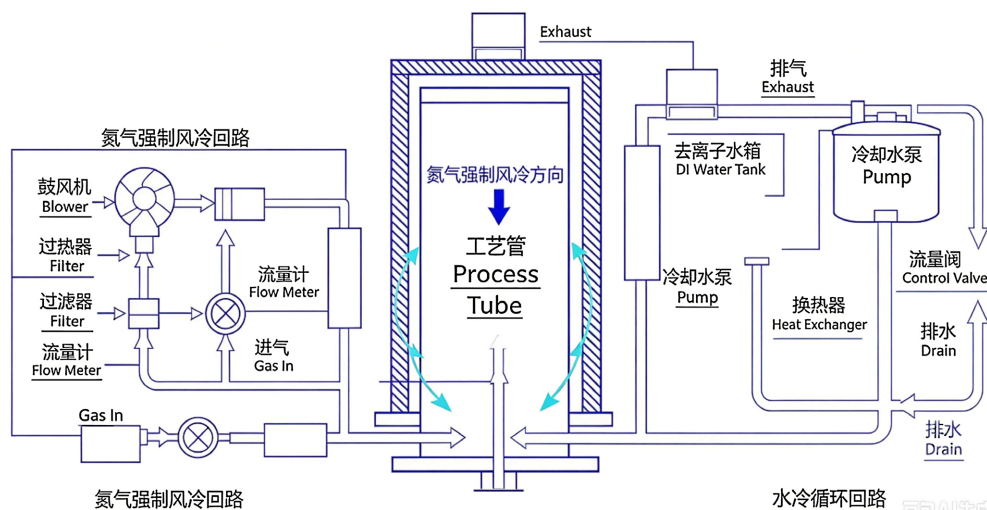


Figure 3. Overall air-water coupling composition of the rapid cooling system

图 3. 快速冷却系统整体气水耦合组成图

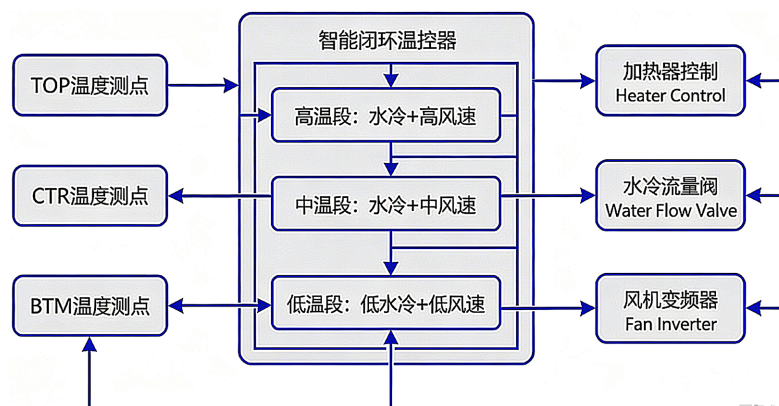


Figure 4. Schematic diagram of the linkage control between the cooling system and the heater

图 4. 冷却系统与加热器联动控制原理图

设备无效待机能耗与运维损耗，契合半导体行业高效、绿色、智能化的发展趋势。本方案已取得国家专利：冷却系统及具该系统的热退火炉管和冷却方法，专利号 CN201210138202.3。

4.4. 生产效率提升效果

本文以 12 英寸晶圆立式高温炉管为测试载体，设置传统冷却工艺与优化后耦合快速冷却工艺对照组开展对比实验。实测数据显示：传统工艺单批次冷却周期约 120 min，优化后冷却时长压缩至 35 min 以内；设备单位小时产出(WPH)由 15 批次提升至 32 批次，设备综合效率(OEE)提升超 50%。结合理论推演与实测结果综合分析，整套快速冷却技术可实现设备生产效率稳定提升 30%以上，产能优化效果十分显著。

4.5. 工艺稳定性与良率优化效果

经产线实试验证，优化后的快速冷却系统可将晶圆径向温度偏差控制在 $\leq 1.5^{\circ}\text{C}$ ，轴向温度偏差 $\leq 2^{\circ}\text{C}$ ，温控均匀性显著优于传统冷却工艺标准。稳定均匀的降温环境，使晶圆翘曲、滑移等热应力缺陷发生率降低 80%，有效解决了杂质扩散失控、膜厚不均等核心工艺问题，最终使整体工艺良率提升 3~5 个百分点，大幅提升芯片器件性能一致性与工艺稳定性，完全满足先进制程的高精度要求。

4.6. 能耗与运维成本优化效果

快速冷却技术大幅压缩炉体降温待机时长，减少炉体低功率保温状态的无效能耗消耗，单批次工艺综合能耗降低 35%，节能效果突出。同时，分层复合散热结构有效规避了保温材料冷热交替破损、粉化的问题，延长设备核心部件使用寿命，大幅拉长设备维护周期，整体设备运维成本降低 20%以上，切实实现了产线降本增效，契合半导体行业绿色低碳、高效量产的发展趋势。

5. 结论与展望

5.1. 研究结论

- 1) 本文推导三层复合炉体串联热阻模型、气水耦合对流换热方程，从传热机理阐明传统单层炉散热短板，配套分层结构、耦合冷却、智能阶梯温控完整优化体系；
- 2) 对照曲线与 KPI 表格量化证明：冷却速率提升 40%，冷却时长压缩 71.2%，OEE 提升 17.3%，晶圆温差、缺陷、能耗同步显著改善，薄膜工艺性能无偏移；
- 3) 对比现有成熟炉管冷却方案，本方案适配国内存量石英炉、改造成本低廉，温场均匀性更优；局限性：当前风机流量为固定分段档位，未实现连续无级变频调节，极限降温速度仍有提升空间。

5.2. 深度未来展望

- 1) 参考多层炉管温度场有限元仿真的建模思路，建立立式炉全域三维传热仿真模型，迭代优化水冷管路和风冷风道布置方案，进一步降低炉体综合热阻[4]；
- 2) 搭载 AI 变频预测控制，根据实时炉温连续调节水冷流量、风机转速，替代分段阶梯逻辑，实现无级精准冷却；
- 3) 拓展第三代 SiC/GaN 高温热处理炉适配方案，开发耐超高温特种冷却换热材质。

参考文献

- [1] 姬常晓, 王成宇, 赵璐, 等. 适用于低应力氮化硅薄膜的 LPCVD 设备[J]. 电子工艺技术, 2023, 44(6): 52-55.
- [2] 唐升. 12 英寸扩散炉管工艺测温热电偶的失效模式与技术改进分析[J]. 电子技术, 2026, 55(4): 441-443
- [3] Ohnishi, W., Hirata, A., Shibatsuji, R. and Yamaguchi, T. (2023) Fast and Precise Temperature Control for a Semiconductor Vertical Furnace via Heater-Cooler Integration. *IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing*, **36**, 197-204. <https://doi.org/10.1109/tsm.2023.3235492>
- [4] 陈庆广, 樊坤, 赵璐, 等. 立式 LPCVD 设备的设计[J]. 电子工艺技术, 2025, 46(2): 45-48.