

Analysis of Quality Control Strategies in Polycrystalline Silicon Production

Junjie Liu

Xinjiang Jingnuo New Energy Industry Development Co., Ltd., Yanghe, Xinjiang, 834034, China

Abstract

This paper systematically explores the influence of various related factors on the quality in polycrystalline silicon production, elaborates on the key quality indicators, process, and core roles of raw materials and equipment, and analyzes the current overall quality control system from multiple dimensions such as composition, relied technologies, and existing limitations. Based on these analyses and discussions, it proposes optimization directions and forward-looking strategies for the technical innovation direction of key links, the standardization construction path of the management system, and the trend towards predictive intelligent control mode, in order to comprehensively improve the quality control level of polycrystalline silicon production through multi-level improvements.

Keywords

Polycrystalline Silicon; Quality Control; Process Optimization; Process Management

基于多晶硅生产中质量控制策略分析

刘俊杰

新疆晶诺新能源产业发展有限公司, 中国·新疆 杨河 834034

摘要

本文系统探究了多晶硅生产中各关联因素对质量的影响, 阐述了关键质量指标、工艺过程及原材料设备的核心作用, 并且对现行的全过程质量控制体系从构成部分、所依赖的技术以及存在的局限性等多个维度加以剖析, 进而在这些分析和探讨的基础之上, 针对关键环节的技术创新方向、管理体系的标准化建设路径以及朝着预测性智能控制模式发展的趋势, 提出优化方向与前瞻性策略, 以期通过多层面的改进, 全面提升多晶硅生产的质量控制水平。

关键词

多晶硅; 质量控制; 工艺优化; 过程管理

1 引言

多晶硅在目前的电子产品和电池生产中有着重要的应用, 所以在电子市场不断发展的当前社会, 多晶硅的市场需求量巨大。庞大的国内市场吸引了大量国外多晶硅产品涌入, 导致本土产品因质量原因在半导体市场份额占比较低。这种局面对于我国的半导体行业自主发展是非常不利的, 所以国内的多晶硅企业需要积极的进行自身产品的质量, 在生产实践中做质量强调, 这样, 本土企业的产品质量会更稳定, 其在国内、甚至是国外的竞争力会更强。总之, 多晶硅生产中的质量控制与企业的质量意识有非常明显的关系, 所以要改变这种现状, 需要对企业的质量意识进行培养加强。

2 多晶硅生产中的质量要求与影响因素

2.1 产品质量关键指标

多晶硅作为半导体及光伏产业那起着基础性作用的原材料, 其质量会对终端产品的性能与可靠性产生直接的决定作用, 而其质量的关键指标, 首先是在于纯度方面, 特别是电子级多晶硅, 对于金属杂质含量的要求达到了极为苛刻的程度, 通常是需要达到 11N 也就是 99.99999999% 以上的标准; 其次是特定杂质的控制问题, 除了像铁、铜、铬、镍这些常见的金属杂质之外, 施主杂质比如磷、硼以及受主杂质例如铝、镓的含量及比例都必须要被严格地限定, 目的是为了能够确保能够实现精确的电学性能; 再次是结构特性方面, 这主要涵盖了晶粒的尺寸、取向、均匀性以及晶体内部的缺陷密度, 像位错、层错等情况都包含在内, 并且这些结构参数会对多晶硅在后续拉晶或铸锭过程当中的行为产生深刻的影响, 同时也会影响到最终单晶或硅片的机械强度与电学均一性, 所以说, 对这些关键指标进行精准的定义与检测, 成为了构建有效质量控制体系的根本前提, 也是其核心目标

【作者简介】刘俊杰(1992-), 男, 中国甘肃庄浪人, 中级, 从事化工行业多晶硅生产研究。

所在 [1]。

2.2 工艺过程对质量的核心影响

工艺过程是塑造多晶硅质量的核心，各阶段控制的精准度均直接体现在最终产品的关键指标上。在核心的化学气相沉积操作里，还原炉内的温度状况、压力大小、进气的成分比例和流动速度等参数，共同对硅在细棒表面的沉积速度和形态起主导作用。若温度均匀性不够或者出现局部温度过高的情况，容易引发晶格发生畸变以及位错数量增加，进而直接对晶体结构的完整程度产生影响；要是进气中三氯氢硅和氢气的比例不合适，就可能会导致非晶硅或者微晶硅的生成，使沉积效率和产品的致密程度下降。更为重要的是，整个沉积系统的密封性能、材料的耐受能力以及对反应副产物的及时排出能力，从根本上对引入外来污染的风险起到限制作用。前道工序比如三氯氢硅的合成与精馏过程，其分离效果决定了进入还原环节的基础物料纯度的最高水平；而在后处理过程中的破碎、清洗等步骤，如果控制得不好，就会成为表面污染和产生二次缺陷的来源 [2]。所以说，工艺过程不是各个孤立环节的简单串联，而是一个环环相扣的精密体系，任何一个节点出现波动，都会在最终产品的纯度、杂质分布以及晶体结构方面有所体现。

2.3 原材料及设备对质量的制约

原材料与设备的品质共同构成了多晶硅生产的物质基础，其内在制约贯穿于生产全过程，作为决定最终产品纯度起点的原料纯度中，主要原料工业硅所含金属杂质直接决定后续化学提纯工艺负荷极限，而氯气、氢气等辅助原料中微量水分、氧及烃类杂质可能在高温反应中引入不可逆污染，设备制约作用同样显著，所有与物料接触的反应器、管道及阀门材质必须具备优异抗腐蚀性且通常需采用特种合金或高纯石英，不过在持续高温、高压及腐蚀性气氛作用下这些设备仍可能发生缓慢析出或侵蚀并成为铁、镍、铬等金属杂质持续引入源 [3]，另外设备密封完整性、内壁光洁度、热场均匀性以及控制系统精度共同决定工艺条件稳定与精确，任何微小泄漏、温度梯度或测量偏差都会直接转化为沉积硅晶体结构缺陷或杂质分布异常，所以原材料设定质量理论上限而设备状态决定这一上限在实际生产中可实现程度，二者共同作用从根本上约束产品质量提升空间 [4]。

3 现行质量控制策略的构成与局限性

3.1 全过程质量控制的主要环节

现行多晶硅生产的质量控制策略，核心在于构建一个覆盖物料输入至产品输出全流程的系统化监控与管理体系统，该体系主要涵盖入料环节的预防性控制这一关键部分、过程环节的实时性监控与调节这一重要构成以及产出环节的验证性评估与反馈这一必要组件；入料控制作为所有后续工作得以开展的基础，重点在于针对工业硅、氢气、氯气等主要原料建立起严格程度较高的纯度标准与验收规范，并且通过

来料检测这一手段来确保这些原料能够满足工艺方面的要求，从而从源头处对杂质的引入进行限制，而过程控制则贯穿于三氯氢硅合成、精馏提纯、化学气相沉积及后处理等核心工序之中，其核心要点是通过部署在线监测设备的方式，对温度、压力、流量、关键组分浓度等工艺参数实施连续的采集与跟踪操作，以保障生产过程始终处于稳定的设计窗口范围之内，至于产出控制环节则将重点放置在对最终多晶硅产品进行综合性检测与评估之上，依据预先设置的纯度、杂质含量、晶体结构等关键指标来开展分级判定工作，需要注意的是，这三个环节并非以孤立的状态进行运作，而是借助质量数据的实时流转与分析过程形成一个闭环，其目的在于达成从被动检验向主动预防转变的质量管理目标 [5]。

3.2 关键技术手段与依赖条件

为确保多晶硅全过程质量控制策略得以有效执行而当前所主要依赖的一系列关键技术手段，其效能受多重客观条件制约，其中作为质量感知核心的在线监测与高精度分析技术，涵盖如在精馏塔进出口处采用在线气相色谱对三氯氢硅中硼、磷等关键杂质实施实时追踪，以及在化学气相沉积过程中通过激光粒度分析、红外测温等技术对硅棒生长状态与炉内热场分布进行监控的具体应用，而对于最终产品的严格判定，则高度依赖辉光放电质谱、电感耦合等离子体质谱等痕量元素分析技术以及 X 射线衍射、扫描电子显微镜等用于评估晶体结构与表面形态的仪器，不过这些先进技术的有效应用需依赖苛刻条件，一是设备本身需具备极高稳定性、灵敏度与抗干扰能力，因任何仪器的漂移或故障均会造成数据失真，二是需有从传感器到中央控制系统高度集成且可靠的数据传输网络，以确保海量监测数据能被实时、准确采集与处理，三是从根本上需依赖操作与维护人员具备深厚专业素养，从而能够正确解读数据、及时校准设备并排除故障，由此可见，技术手段的先进性与对其依赖条件的满足程度共同对质量控制的实际深度与可靠性起到决定作用 [6]。

3.3 现有策略存在的问题与挑战

尽管已构建覆盖全流程的质量控制体系，但现行策略在实际运行中仍面临一系列由多重因素交织产生的、亟待破解的问题与挑战，首先在技术维度存在显著局限性，例如承担痕量杂质分析功能的气相色谱仪或质谱仪等关键在线监测设备，虽然其检测精度与响应速度处于持续提升的发展态势，但对于生产流程中可能出现的瞬态且微量的异常信号，却依然可能因设备性能边界而存在捕捉延迟现象或识别过程中的困难情况，进而导致质量控制环节出现“盲区”或产生滞后效应；更为复杂的是，源自不同生产环节、以不同格式呈现的海量质量数据与工艺数据，其有效整合过程及深度分析工作均构成巨大挑战，数据孤岛现象的存在极大地限制了基于全流程数据驱动模式的实时预警机制运行与优化决策过程推进；在管理执行层面，质量控制工作高度依赖操作人员的经验积累与判断能力，这使得标准执行的一致性极

易受到人为因素干扰,与此同时,严格的原料控制措施与设备维护要求导致显著的合规成本产生,如何在保障超高质量标准实现与寻求经济效益最大化之间维持持续平衡成为突出难题[7];此外,现有策略大多将关注点集中于已知关键参数的控制范畴,当面对工艺过程中因潜在交互作用引发的复杂质量波动情形,或需要应对更高纯度产品提出的新要求时,策略所具备的适应性与前瞻性则显现出明显不足,上述各类问题通过相互关联、相互影响的方式,共同构成了提升多晶硅质量稳定性与一致性目标实现的主要障碍性因素[8]。

4 质量控制策略的优化方向与措施

4.1 关键环节强化与技术创新方向

多晶硅质量控制策略优化的核心路径在于面向关键环节的强化与技术突破,而在原料预处理这一环节重点需开发更高效的可从源头提升物料质量基线的工业硅深度净化技术以及更高纯度的特种气体纯化工艺,针对核心的沉积过程其技术创新方向则聚焦于两个方面,一方面是发展更先进的可彻底消除质量控制盲区与滞后的在线、原位实时监测技术,诸如能够对反应界面进行分子级表征或者对超痕量杂质进行瞬时捕捉的传感器等,另一方面是推动工艺向精细化、智能化调控升级,通过集成先进过程控制与机器学习算法来构建可自适应调节的智能控制系统以实现热场、气流场等关键参数的动态优化与精准稳定,此外在设备硬件层面研发与应用具有更低杂质析出率、更高耐腐蚀性和更优热稳定性的新型反应器内衬材料与结构设计乃是突破设备制约的根本途径,通过上述关键环节的系统性强化与技术创新致力于将质量控制从被动响应的阶段推向主动预测与精准干预的新阶段[9]。

4.2 管理体系完善与标准化建设

管理体系及标准化建设的持续完善作为从系统层面保障并提升质量控制效能的核心举措,需将前沿技术策略转化为严谨、统一且具可执行性的管理规范,而首要任务在于构建层次分明且覆盖全面的质量管理文件体系,该体系需对原料验收标准、工艺操作规程、设备维护规程、异常处理流程以及成品检验规范等进行系统整合与明文规定,以确保各环节操作均有章可循;其次,全流程标准化作业的大力推进尤为必要,特别是对精馏、沉积等核心工序的关键操作步骤及参数控制范围进行精细化定义与固化,以此最大限度降低因人员经验差异所引发的操作波动;在此基础上,集中统一的

质量数据管理平台的建立不可或缺,通过打通从原料、过程到产品的数据链,实现质量信息的实时共享、可追溯性及深度分析,进而为管理决策提供有力的数据支撑[10];同时,持续的专业培训与严格的资质认证制度需同步实施,其目的在于使各级人员不仅掌握标准,更能理解蕴含其中的质量控制逻辑;最终,通过定期开展的体系审核、管理评审及绩效评估,推动整个质量管理体系形成持续改进的闭环,从而为技术创新成果的稳定转化及产品质量的一致性提供坚实的制度保障。

5 结论

综上所述,多晶硅质量作为支撑下游半导体与光伏产业发展的基础,其质量控制体系覆盖原料、工艺至成品的整个流程。不过,现有策略在技术响应速度、数据整合能力以及管理执行力度方面还存在不足。着眼于未来,需要通过加强关键环节的技术创新,推动管理体系的标准化和智能化建设,把质量控制模式从事后验证转变为实时预测与自适应优化。这种转变是实现产品质量持续提高和产业核心竞争力增强的根本办法。

参考文献

- [1] 裴雅晨, 陈文吉, 张德奇.多晶硅生产中后处理质量控制的分析[J].新疆有色金属, 2024, 51(3): 101-105.
- [2] 徐高敏, 李有斌, 前朝.基于多晶硅生产中质量控制策略分析[J].化工管理, 2023, 45(9): 88-92.
- [3] 苟海龙.多晶硅生产中的质量控制探讨[J].有色金属设计, 2022, 49(2): 45-49.
- [4] 杨丞杰, 张新红.多晶硅生产质量控制探讨[J].云南化工, 2024, 51(4): 67-71.
- [5] 任小红.多晶硅生产过程的质量控制[J].化工管理, 2023, 45(7): 102-106.
- [6] 晋正茂, 李辉, 武振国.多晶硅生产中精制三氯氢硅质量控制的探讨[J].化学工程与装备, 2022, 50(6): 34-38.
- [7] 吴锋, 姜海明, 任小红.生产高品质多晶硅质量控制要点[J].太阳能, 2024, 52(1): 56-60.
- [8] 刘宁, 贾明.西门子法多晶硅生产中的质量控制措施[J].化工管理, 2023, 45(10): 120-124.
- [9] 宋安宁, 贾哲, 吕昌彦.西门子法多晶硅生产中的质量控制难点及措施[J].化工管理, 2022, 44(1): 78-82.
- [10] 刘秀琼, 汪治林, 邓丰.多晶硅生产过程中的质量控制[J].广东化工, 2024, 51(5): 90-94.