

半导体芯片厂房洁净工程计价难点与造价优化路径探析

王少红

长鑫集电(北京)存储技术有限公司 北京 100000

摘要: 半导体芯片厂房洁净工程计价受洁净度等级、工艺复杂度、材料设备特殊性、价格波动、施工难度与质量控制等多重因素影响,导致计价复杂且成本高昂。造价优化路径包括:合理布局分区设计、优化气流组织;选用适配性材料与国产设备,集中采购;精细化施工管理,强化质量与安全控制;运维阶段优化能源管理、建立预防性维护制度,加强人员培训,以实现全周期成本精准控制。

关键词: 半导体芯片厂房; 洁净工程; 计价难点; 造价优化路径

引言: 半导体芯片产业作为高科技领域的核心,其生产环境对洁净度要求极为严苛。洁净工程作为保障芯片质量与良率的关键环节,不仅涉及复杂的空气净化、温湿度控制等技术,还需应对高洁净度标准、工艺多样性及材料设备特殊性等挑战。然而,当前洁净工程计价缺乏统一规范,存在技术差异大、材料价格波动、施工难度高等问题,导致造价难以精准控制。本文旨在分析其计价难点,并提出全周期造价优化路径,为行业提供参考。

1 半导体芯片厂房洁净工程概述

1.1 洁净工程的概念与分类

洁净工程是指通过采取空气净化、气流组织、压力控制等技术措施,控制室内空气的微粒、有害气体、微生物等污染物浓度,营造满足特定生产或实验要求的洁净环境的系统性工程。其分类依据相关标准可分为多种类型:(1)按洁净度等级分类,依据ISO14644-1标准,可分为ISO1-9级,等级数字越小,洁净度要求越高,允许的微粒数量越少;(2)按用途分类,可分为工业洁净室、生物洁净室等,半导体芯片厂房洁净工程属于工业洁净室范畴;(3)按气流组织形式分类,可分为乱流洁净室、层流洁净室(垂直层流、水平层流)。

1.2 半导体芯片厂房洁净工程的特点

半导体芯片厂房洁净工程具有极高的特殊性要求:

(1) 洁净度要求严苛,芯片制程越先进,对洁净度等级要求越高,高端芯片生产需达到ISO1-3级,需严格控制微小颗粒污染;(2) 温湿度控制精准,需将温度控制在20-24℃、相对湿度45%-55%的窄幅范围,避免温湿度波动影响芯片制程精度;(3) 防静电设计严格,芯片及相关元器件对静电敏感,需通过接地、防静电材料等措施将静电电位控制在安全范围;(4) 微震动控制严格,光刻等核心设备对震动极度敏感,需采用隔震地基、减震

装置等控制微震动干扰^[1]。

1.3 洁净工程在半导体芯片生产中的作用

洁净工程是半导体芯片生产的核心保障:(1) 保障产品质量,通过控制微粒、有害气体等污染物,避免芯片制程中出现缺陷,确保芯片性能达标;(2) 提高生产效率,稳定的洁净环境可减少因环境问题导致的生产中断,保障生产流程连续顺畅;(3) 提升良品率,精准的温湿度、防静电及微震动控制,可大幅降低芯片报废率,尤其在先进制程中,洁净工程的完善程度直接决定良品率高低,是芯片量产的关键支撑。

2 半导体芯片厂房洁净工程计价难点分析

2.1 洁净度等级差异导致的计价复杂

(1) 不同洁净度等级的工程要求差异显著。ISO1-3级为超高洁净等级,需配备高效HEPA或ULPA过滤器、垂直层流气流组织,建筑材料需具备极高密封性和抗污染性,地面多采用无缝环氧自流平;ISO3-5级洁净室过滤器效率和气流均匀性要求次之,可采用局部层流设计;ISO5-7级对气流组织和材料密封性要求相对宽松,过滤器等级适配降低。不同等级在系统风量、换气次数等参数上的差异,直接导致工程耗材和系统配置成本的层级式提升。(2) 计价标准的多样性加剧计价难度。目前行业内缺乏统一的洁净工程计价规范,不同地区定额标准对洁净度等级对应的工程量计算规则存在差异;同时,不同企业对相同洁净等级工程的质量标准和服务范围界定不同,部分企业包含系统调试运维费用,部分仅计施工造价,导致相同等级工程的计价结果差异较大,难以形成统一的价格参照体系。

2.2 工艺复杂度对计价的影响

(1) 芯片制造工艺的多样性对洁净工程提出差异化要求。光刻工艺需超高洁净度、微震动控制和精准温湿度环境,对应的洁净工程需额外配置隔震系统和高精度

空调；刻蚀、沉积工艺对有害气体过滤和排气处理要求严苛，需增设专用废气处理设备；封装工艺洁净度要求较低，但需加强防静电设计。不同工艺对应的洁净工程配置差异大，导致计价时需针对性拆分成本项，增加计价复杂度^[2]。（2）工艺变更带来计价不确定性。半导体技术更新迭代快，芯片产品升级可能导致工艺参数调整，如洁净度等级提升、新增工艺区域等，进而要求洁净工程进行改造升级。工艺变更往往发生在工程实施过程中，需重新核算工程量、调整设备材料配置，导致原计价方案失效，需多次修订计价，增加计价工作量和难度。

2.3 材料设备的特殊性及其价格波动

（1）特殊材料的使用推高成本且价格不固定。高效/超高效过滤器、防静电地板、彩钢板、密封胶等是核心特殊材料，此类材料需满足无尘、防静电、耐腐蚀等特殊性能，生产工艺复杂，供应商相对集中，价格普遍偏高且受原材料行情影响波动较大；同时，部分高端材料依赖进口，关税和物流成本进一步增加价格不确定性，直接影响工程计价的准确性。（2）设备品牌与配置及价格波动影响计价。空气净化设备、温湿度控制系统等核心设备，进口品牌与国产品牌价格差距可达30%-50%，且不同配置的功能模块差异导致价格梯度明显；此外，设备价格受全球供应链、汇率波动等因素影响较大，如芯片短缺可能导致智能控制系统涨价，进而影响工程总造价，增加计价预判难度。

2.4 施工难度与质量控制要求

（1）施工工艺的复杂性提升计价成本。洁净工程需采用无尘施工、精密密封处理、气流均匀性调试等特殊工艺，要求施工人员具备专业资质和丰富经验，需配备专用无尘施工设备和检测仪器；同时，施工过程中需采取防尘、防污染措施，如设置临时洁净区，这些都增加了施工人工、设备租赁和措施费成本，且不同施工难度对应的成本标准难以精准量化。（2）质量控制的高标准增加计价风险。洁净工程质量控制关键指标包括洁净度、温湿度精度、密封性等，需采用专业仪器全程检测，检测费用较高；若质量不达标，需进行返工整改，额外产生材料损耗、人工和工期延误成本。计价时需预留质量整改备用金，但备用金的额度难以精准测算，进一步增加了计价难度^[3]。

3 半导体芯片厂房洁净工程造价优化路径

3.1 规划设计阶段的优化

（1）合理布局与分区设计是造价优化的基础。采用模块化设计理念，将厂房科学划分为核心生产区、辅助

区和缓冲区，依据各区域洁净度等级和功能需求精准布局，既能减少交叉污染，又能降低无效洁净空间的建设成本。例如，将光刻、刻蚀等高洁净度要求的核心工艺区置于洁净区中心，利用核心区的洁净气流形成防护屏障；将设备维护区、物料暂存区等辅助区布置在外围，采用较低洁净等级标准建设，同时设置专用通道连接各功能区，避免不同区域人员、物料交叉流动导致的洁净度破坏，从而减少高等级洁净区域的面积占比，降低整体造价^[4]。（2）气流组织优化可显著降低设备投资与能耗成本。通过CFD三维模拟技术对洁净室内气流组织进行仿真分析，精准规划风机过滤单元（FFU）的密度、布局及送风、回风路径，避免因气流冗余设计导致的设备过度配置。如某12英寸晶圆厂项目，通过三维模拟优化气流组织后，FFU布置密度根据区域洁净需求差异化调整，核心区保持高密度配置，辅助洁净区适当降低密度，最终FFU数量减少12%，仅设备初期投资就降低约800万元，同时空调系统风量匹配更合理，年能耗成本也降低15%以上。

3.2 材料设备选型与采购优化

（1）材料选择遵循“适配性”原则，实现成本精准控制。根据不同区域的洁净度要求、使用场景及性能需求，差异化选择建筑材料，避免盲目选用高端材料。例如，键合区因需频繁接触精密元器件且清洁要求极高，墙面采用耐腐蚀、易清洁的不锈钢材料；其他普通洁净区域则选用性价比更高的彩钢板；地坪采用环氧自流平与局部PVC防静电地板结合的方案，核心生产区采用环氧自流平保障洁净与承重，人员通道及静电敏感区域铺设PVC防静电地板，既满足各区域功能需求，又较全区域采用高端材料降低30%以上的材料成本。（2）设备选型优先国产化，建立科学供应商评估体系。当前国产洁净工程设备技术日趋成熟，在性能达标前提下，优先选用性能稳定、价格合理的国产设备，可大幅降低设备采购成本。如某半导体企业洁净工程中，采用国产微环境控制系统替代进口产品，单台设备成本从80万元降至52万元，批量采购后整体设备成本降低35%。同时，建立涵盖设备性能、价格、售后服务、交付周期等多维度的供应商评估体系，筛选优质供应商，确保设备质量的同时，获得更有利的合作条件。（3）推行集中采购与战略合作，降低采购成本。通过整合项目全周期材料设备需求，实施集中采购，以较大的采购量提高与供应商的谈判议价能力，争取更优惠的采购价格和付款条件。此外，与优质供应商建立长期战略合作关系，签订框架协议，不仅可保障材料设备的稳定供应，还能享受供应商

的专属折扣、技术支持及售后优先服务,减少采购环节的中间成本和风险,进一步优化采购成本^[5]。

3.3 施工管理阶段的优化

(1) 精细化进度管理,缩短工期降低管理成本。建立土建、机电、洁净工程三级进度计划,明确各阶段施工任务、时间节点及衔接要求,通过关键路径法梳理核心施工环节,在保障施工质量的前提下,实现关键路径重叠作业,压缩整体工期。如合肥某半导体芯片厂房洁净工程项目,通过三级进度计划管控,将原本18个月的工期压缩至14个月,不仅减少了4个月的现场管理费用、设备租赁费用,还提前实现厂房投产,创造了额外的经济效益,仅管理成本就节约300万元。(2) 强化施工质量管理,避免返工成本增加。建立严格的质量检验制度,从材料进场检验、施工过程巡检到竣工检测,全流程把控施工质量。实施“三区两通道”管理模式,划分施工区、清洁区、成品区,设置人员和物料专用通道,避免交叉污染;材料进场前设置48小时清洁缓冲间,确保材料带入的污染物得到有效清除。严格的质量管控可显著降低后期清洁验证不达标、工程返工的概率,据项目数据统计,科学的质量管控可使后期清洁验证成本降低50%。(3) 筑牢施工安全防线,减少安全事故损失。加强施工现场安全管理,建立健全安全管理制度,定期开展安全培训和应急演练,对高空作业、用电作业等危险环节实施重点管控,配备充足的安全防护设施和器材。通过预防安全事故的发生,可避免因事故导致的人员伤亡、设备损坏、工期延误等经济损失,保障工程顺利推进,间接降低工程造价。

3.4 运维阶段的成本优化

(1) 优化能源管理,降低能耗成本。安装全流程能源监测系统,实时采集空调系统、照明系统、FFU机组等主要耗能设备的能耗数据,通过数据分析识别能耗浪费环节,针对性开展节能改造。如对FFU机组实施变频控制改造,根据洁净室压差传感器反馈的压力数据,自动调节机组转速,在非生产时段或洁净度需求较低的情况下,转速降至70%,该改造可使FFU机组年耗电量减

少180万度,显著降低运维能耗成本。(2) 建立设备预防性维护制度,延长设备使用寿命。制定完善的设备维护保养计划,定期对空气净化设备、温湿度控制系统、过滤系统等核心设备进行巡检、清洁、校准和零部件更换,及时排查潜在故障,避免设备突发故障导致的维修成本增加和生产中断。例如,采用EU9+HEPA+H14三级过滤组合,通过定期维护延长各层级过滤器使用寿命,将初效过滤器每片成本控制在800元以内,更换周期从2个月延长至3个月,过滤器年耗材费用下降28%。(3) 加强人员培训与管理,优化人工成本。定期组织运维人员开展专业技能培训,提升其设备操作、故障排查和维护保养水平,减少因人为操作失误导致的设备损坏和生产中断。同时,根据运维工作需求优化人员配置,明确各岗位职责,推行绩效考核机制,提高工作效率,避免人员冗余,从而降低人工成本。

结束语

半导体芯片厂房洁净工程计价受多重因素制约,需从技术、管理、市场等维度综合施策。通过科学规划布局、优化气流组织、适配材料设备选型及集中采购等措施,可有效降低建设成本;强化施工管理与运维阶段能源、设备、人员管控,能进一步提升全周期成本效益。未来,随着行业标准化推进与技术迭代,洁净工程计价将更趋精准,为半导体产业高质量发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 王向东.基于EPC模式装配式建筑项目成本控制策略探究[J].陶瓷,2023(2):188-190.
- [2] 彭宇扬,沈巍.BIM技术在EPC项目成本控制中的应用与研究[J].广东建材,2023,39(6):77-80.
- [3] 杨小慧.EPC总承包模式下的全过程造价控制与管理[J].砖瓦,2023(4):126-128.
- [4] 刘霏霏.论建设项目的工程造价控制[J].市政工程,2020(6):95-97.
- [5] 任涛.论建设项目的工程造价控制[J].文化科学,2020(10):80-83.