

硅基敏感材料：构筑全场景半导体传感器的核心基石

九三学社中央科技委副主任、中国传感器与物联网产业联盟常务副理事长 郭源生

在全球海量传感器产业化体系中，硅基半导体材料的敏感机理最丰富、器件化成熟度最高、产业化应用最广泛，凭借其可改性强、多机理兼容、易微纳集成、电信号易读取四大核心特质，彻底打破了传统金属、陶瓷、高分子传感材料的性能边界与场景桎梏，成为全域智能感知产业的基石性材料。经过数十年技术迭代与产业沉淀，以硅基为核心的半导体敏感材料，已经形成“材料迭代-机理创新-工艺优化-器件制备-性能升级-场景落地”的完整产业闭环。

半导体敏感材料分类与核心特征

半导体敏感材料并非单一材质，而是一套层级清晰、分工明确、迭代有序的复合型材料产业体系。按照产业化成熟度、基材属性、应用定位与技术迭代方向，可划分为主力基材、改性基材、拓展基材三大层级。三类材料各司其职、互补协同：主力基材筑牢量产根基，改性基材实现性能优化，拓展基材布局未来前沿，共同构筑起现代半导体传感产业的材料底座。同时，半导体材料具备区别于传统传感材料的独特通用属性，也是其能够垄断主流传感市场、支撑全场景感知的核心根源。

主力基材：硅（单晶硅、多晶硅）——产业绝对主流、量产核心根基。目前全球商用传感器中90%以上的敏感器件以硅为核心基材，是唯一实现低成本、大规模、全品类量产的半

导体敏感材料，是民用与工业传感产业的基本盘。经过半个世纪的工艺迭代，硅材料的提纯、切片、加工、改性、封装工艺已完全标准化、本土化、规模化，具备极强的产业通用性与成本优势。形成层级互补、场景细分的产业布局。从细分品类来看，单晶硅与多晶硅形成了高低搭配的产业格局：单晶硅是高精度、高稳定性、高一致性高端传感器的首选基材，多晶硅是中低端传感市场的绝对主力。

改性基材：掺杂硅、超掺杂硅、硅基复合结构——性能升级核心载体。纯硅基材受本征物理性能限制，存在灵敏度有限、温漂偏大、感知维度单一等问题，存在天然性能短板，无法满足高精度、极端工况、多参数检测的高端需求。基于纯硅基底的改性技术，成

为硅基材料性能跃迁、适配中高端场景的核心路径，也是当前商用主流传感器的核心制备方案。改性基材不改变硅的基础工艺体系，仅通过微观掺杂、结构复合实现性能升级，兼容性强、落地成本低、产业化成熟度高。掺杂硅是目前应用最广的改性材料，超掺杂硅多用于高端工业与特种传感场景，硅基复合结构实现感知性能与环境适应性的双重升级。

拓展基材：宽禁带半导体、二维半导体材料——前沿进阶核心方向。随着智能感知向极端环境、超高精度、柔性适配、多模态同步检测场景延伸，传统硅基材料的本征瓶颈日益凸显，无法适配高温、高压、强辐射、超微弱信号检测、柔性曲面贴合等高端场景。以宽禁带半导体、二维半导体为代表

的新型拓展基材，成为行业中长期技术迭代的核心方向，目前正处于“实验室突破-小批量试产-初步商用”的过渡阶段，是未来高端传感产业弯道超车与自主可控的核心赛道。宽禁带半导体以碳化硅、氮化镓为核心，二维半导体材料以石墨烯、MXene、过渡金属硫化物为代表。

无论是成熟的硅基基材、改性材料，还是前沿的新型半导体材料体系，均具备四大通用核心特征。一是载流子浓度可精准调控，二是多维度物性可改性升级，三是完美适配MEMS微纳加工体系，四是支持单片集成智能化。依托四大核心特征，半导体材料最终实现了物理、化学、生物全维度全域感知，覆盖民用、工业、医疗、航空、环境全场景需求。

半导体（硅基）成熟敏感机理、特性及对应元器件

当前，行业内真正可实现规模化量产、商业化落地、适配全场景应用的硅基敏感机理仅有七类。它们性能互补、功能协同、场景细分，共同覆盖力学、环境、光学、磁学、化学、红外全维度感知需求。

感知机理特性来看，硅单晶材料具备极强的压阻效应，这是硅材料与生俱来的本征属性。其最大的优势是成本可控、一致性高、稳定性强，完全适配大规模量产。对应商用元器件包括硅压力传感器、加速度传感器、陀螺仪、流量/液位传感器。

载流子浓度调控机理是硅基环境感知的核心支撑，也是仅次于压阻机理的第二大商用主流机理，专门适配温度、气体、湿度三大环境参数检测。该机理结构简单、响应速度快、无须复杂结

构设计、量产成本极低，是民用环境感知器件的首选技术方案，整体产业化成熟度高、批量一致性好、市场渗透率极高。对应商用元器件包括硅温度传感器、气敏传感器、湿敏传感器。

光电转换机理是硅基光学感知的核心主流机理，依托光伏特效应、光电导效应两大成熟物理效应，可实现光信号向电信号的高效、稳定转换，全面覆盖光强检测、色彩识别、光谱分析、成像采集、辐射监测等全维度光学感知场景，是消费电子光学系统、工业视觉检测、精密光学仪器的核心技术底座。对应商用元器件包括光电传感器、色敏传感器、CMOS图像传感器、辐射传感器。

隧道磁电阻机理是硅基高端磁敏感感知的进阶商用机理，主要适配微弱磁场检测、空间地磁感知、精密位置

与电流检测场景，是传统霍尔传感技术的迭代升级方案。其机理核心特性清晰稳定：通过成熟硅基MEMS微纳加工工艺，在硅基底上构筑“铁磁层-绝缘层-铁磁层”的纳米级磁隧道结复合结构，形成结构稳定、性能均匀的磁敏感单元。对应商用元器件包括高灵敏度硅基磁敏传感器、磁场检测芯片。

离子表面势机理是硅基化学感知、生物微量感知的核心成熟机理，专门适配水溶液、土壤、人体体液、化学电解液中的离子浓度检测，是环境监测、现代农业、体外诊断、精准医疗领域的核心商用技术，产业化落地稳定、检测特异性强、微量检测精度高。对应商用元器件包括离子敏感场效应管（ISFET）、硅基化学离子传感器。

微机械光调制机理是硅基精密光

学调控、超高精度物理检测的核心商用机理，依托MEMS微机械形变与光学调制的耦合效应，突破传统单一光学、力学传感的精度极限，专门适配纳米级精密检测、高端光学调控、精密位移与微振动监测场景，目前已实现全流程产业化落地与规模化商用。对应商用元器件包括硅基微光调制传感器、精密光学检测单元。

热释电机理是硅基红外热辐射感知的核心成熟机理，主打常温无源红外检测，无须低温制冷辅助，可稳定适配红外光感知、热辐射采集、非接触测温、热成像监测等场景，是民用消费、工业检测、安防视频监控量产规模最大、性价比最高的红外感知核心技术底座。对应商用元器件包括硅基红外敏感传感器、红外测温检测单元。

半导体敏感材料器件核心工艺路线

优质高纯硅片无法直接用于信号检测，需要一套完整、标准化、闭环化的器件化工艺，才能制作成可商用、高精度、高精度的传感器件。经过数十年产业迭代，现已形成基底预处理-微纳结构加工-材料改性-表面功能化-异质结界外延-封装集成六大核心工艺链路，直接决定器件的灵敏度、稳定性、一致性、良品率与使用寿命，是硅基传感产业价值落地的核心桥梁。

基底预处理是第一道工序，是决定器件基础性能与量产良品率的关键前提。未经处理的原生硅片存在杂质超标、表面粗糙、内部应力不均、晶格缺陷等多等问题。预处理后的硅基底具备高纯度、高平整度、低缺陷、低应力的特质，是后续所有精密工艺的基

础保障。该工艺核心流程包含高纯提纯、精密切片、化学机械抛光和高温退火工艺消除四大环节。

MEMS微纳加工是半导体敏感器件实现微型化、阵列化、高精度化的核心工艺，直接决定着感知精度、体积尺寸与集成度。依托MEMS微纳工艺，可在毫米级硅片上加工出微米、纳米级的敏感微结构，实现器件极致轻量化与超高精度感知。其工艺流程分为光刻图案化、精密刻蚀、薄膜沉积与结构成型三大模块。

纯硅基材的本征性能存在明显短板，灵敏度低、温漂大、感知特异性差。通过人工干预方式，精准调控硅材料载流子浓度、导电类型与敏感特性。通过改性工艺，可针对性提升硅材料的压阻

灵敏度、光电响应效率、气敏特异性、温度稳定性，是器件性能升级的核心手段。目前产业化主流改性工艺分为离子注入工艺和高温扩散掺杂工艺两类。

硅材料原生表面存在大量悬空键、晶格缺陷与活性位点，极易吸附水汽、粉尘、有害气体，长期使用会出现信号漂移、漏电、性能衰减、特异性差等问题。表面功能化工艺就是封堵缺陷、隔绝干扰，是解决器件长期稳定性差、抗干扰弱、特异性不足的核心工艺，可将器件使用寿命提升数倍。工艺核心分为表面钝化、柔性薄膜包覆和功能涂层改性三大方向。

单一硅基材料存在性能上限，无法适配极端工况、多参数同步检测、超高精度感知的高端需求。异质结界外

延工艺是高端传感器、特种传感器件的核心制备技术，通过在硅基底上外延生长不同带隙、不同物性的半导体薄膜，构建复合异质结结构，实现性能互补、机理拓展、场景升级。依托MOCVD、MBE精密外延工艺，可在硅片表面纳米级精准生长碳化硅、氮化镓、砷化镓等新型半导体薄膜，形成晶格匹配稳定的复合结构。

经过微纳加工与改性后的裸芯片结构脆弱、无防护、无信号处理能力，无法直接商用。封装集成是器件化的最后一步，也是连接芯片裸元件与终端应用的关键环节，核心作用是保护芯片、集成电路、标准化输出信号。工艺流程包含封装防护、电路集成、校准测试三大环节。

前沿创新与未来发展趋势

快速缩小与国际高端产品的差距。

在纯硅材料性能挖潜的基础上，突破硅基本征物理极限、布局新一代半导体敏感材料体系，是2026—2035年行业中长期技术跃迁的核心路径。相较于纯硅改性的性能优化，全新材料体系迭代属于底层技术重构，可彻底解决硅基材料温漂大、耐高温差、无柔性、光学波段受限、抗辐射弱等核心短板，构建覆盖极端工况、柔性感知、超高精度探测、超宽光谱响应的全新传感能力矩阵，重塑高端传感产业格局。

器件端智能集成化升级是产业终

局。当前产业化节奏呈现“第三代规模化商用、二维材料小批量落地、第四代前沿突破、超宽禁带前瞻布局”的梯度迭代格局。整体来看，未来半导体敏感材料将形成硅基主力兜底、改性硅升级迭代、宽禁带规模化商用、二维材料柔性赋能、超宽禁带前瞻引领的多层次、差异化材料体系，实现全场景、全精度、全工况的感知覆盖，推动国内传感产业从低端量产向高端自主、前沿引领全面升级。

全场景落地应用领域

半导体敏感材料已实现全产业、全场景规模化落地，彻底渗透国民经济与高端装备核心领域，形成消费电子、工业智能制造、医疗健康、航空航天、环境监测五大核心应用赛道。

消费电子：全域感知赋能智能终端交互升级

全域感知赋能智能终端交互升级。消费电子是半导体敏感材料产业化规模最大、落地最成熟的赛道，是智能终端实现人机交互、智能感知、场景自适应的核心基础。每一台智能手机、智能穿戴、智能家居设备，均集成多颗硅基传感器，实现全维度环境与姿态感知。

在智能手机领域，加速度计、陀螺仪、磁敏传感器实现屏幕旋转、计步、导航、防抖、空间定位；CMOS图像传感器、光电传感器支撑影像成像、环境光自适应、屏下指纹解锁；气压、温湿度传感器实现海拔测算、设备过热保护、环境监测，构建手机全场景智能感知体系。

在可穿戴设备领域，光电传感器监测心率、血氧，温度传感器采集人体体温，压力传感器识别睡眠姿态与运动状态，实现全天候无创健康监测，成为大众日常健康管理的核心工具。

在智能家居领域，温湿度、气体、人体感应传感器实现环境自适应调控、安全预警、无感交互，推动家居场景智能化升级。

工业智能制造：支撑工业精准管控与智能运维

支撑工业精准管控与智能运维。工业智能制造是半导体敏感材料高端化、高精度化应用的核心赛道，是工业自动化、智能运维、安全生产、提质增效的核心底层支撑。工业生产全流程的工艺参数监测、设备状态预警、厂区安全防护，均依赖硅基传感器的精准、稳定、长效感知。

在生产工艺管控中，压力、温度、流量、液位传感器实时监测反应釜、管道、生产线的核心工艺参数，保障生产标准化、产品一致性；在设备智能运维领域，振动、应变传感器实时捕捉电机、风机、机床的运行状态，提前预警疲劳磨损、结构形变故障，实现预测性维护，大幅降低工业停机损失；在安全生产领域，气敏、温湿度传感器实时监测有毒有害气体、温湿度异常，实现泄漏预警、火情预判，筑牢工业安全生产防线，助力工业从人工粗放管控向精准智能自控全面转型。

医疗健康：开启无创精准监测新时代

开启无创精准监测新时代。医疗健康是半导体敏感材料附加值最高、发展潜力最大的核心赛道之一，彻底打破了传统医疗监测设备笨重、有创、间断、昂贵的短板，实现居家化、无创化、长效化、精准化的生理信号监测，支撑智慧医疗、精准医疗、康复医疗的快速发展。

在日常健康监测领域，硅基光电、温度传感器实现体温、心率、血氧常态化监测；在体外诊断领域，离子敏感传感器精准检测血糖、电解质、重金属、体液离子浓度，支撑家用快检与临床筛查；在康复医疗领域，姿态、压力传感器捕捉人体关节运动、肌肉收缩状态，辅助术后康复评估与训练指导；在高端医疗领域，微型化硅基传感单元可植入设备内部，实现微创生理信号监测，为临床诊断、病情预警提供连续数据支撑，全方位守护人体健康。

航空航天与高端装备：极端环境精密感知核心支撑

极端环境精密感知核心支撑。航空航天与高端装备是半导体敏感材料技术壁垒最高、性能要求最严苛的顶级应用场景。飞行器、卫星、火箭、高端特种装备长期工作在极寒、高温、强辐射、高振动、真空的极端环境中，对传感器的精度、稳定性、抗干扰性、耐候性提出极致要求，高端硅基与宽禁带半导体材料是唯一可适配的核心感知基材。

在飞行器控制领域，高精度陀螺仪、加速度计、磁敏传感器实现姿态感知、航向校准、自主导航，保障飞行稳定；在环境监测领域，压力、温度、红外传感器实现高空、太空极端环境参数采集；在结构健康监测领域，微应变、振动传感器实时监测装备结构形变、疲劳状态，预警结构失效风险；在红外探测领域，改性硅基红外传感器实现目标探测、夜视成像、热辐射监测，支撑高端装备的智能化、精准化作业。

环境监测：赋能生态精细化治理

赋能生态精细化治理。半导体敏感材料是生态环境精细化监测、科学化治理的核心技术支撑，可实现大气、水质、土壤、辐射全维度参数的实时网格化监测，为精准治污、生态保护、气象预警提供数据支撑。

在大气监测领域，气敏、光电传感器实时检测甲醛、VOC、二氧化硫、氮氧化物、粉尘颗粒物浓度，实现城市空气质量、工业废气排放实时监测；在水质监测领域，离子、湿度传感器检测水体pH值、重金属、氨氮、余氯参数，守护饮用水安全与流域生态；在土壤监测领域，温湿度、离子传感器监测土壤水肥、离子、酸碱度，助力现代农业精准种植；在特殊环境监测领域，辐射、紫外传感器实现环境辐射剂量监测，防范辐射安全风险，全方位支撑生态环境精细化、数字化治理。