

半导体材料材料体系创新与多维度性能突破分析

王少波 张凯天 唐琳 刘鹏 陈娇

桂林理工大学南宁分校, 中国·福建 泉州 362200

摘要: 半导体材料作为现代信息社会与高端制造产业的核心基石, 其发展轨迹深刻映射了人类对微观物质世界的认知深化与技术创新的迭代进程。本文基于材料科学、电气学与建筑智能热物理的交叉视角, 系统梳理半导体材料从元素半导体到第三代宽禁带化合物的演进逻辑, 重点剖析二维原子晶体、量子点、氧化物异质结等新型材料体系的创新路径, 展望其在超大规模集成电路、量子信息处理、新能源转换等领域的前沿趋势。

关键词: 半导体; 可持续发展; 高频应用

Analysis of Material System Innovation and Multi dimensional Performance Breakthrough in Semiconductor Materials

Wang Shaobo, Zhang Kaitian, Tang Lin, Liu Peng, Chen Jiao

Guilin University of Technology Nanning Branch, China Fujian Quanzhou 362200

Abstract: As the core cornerstone of modern information society and high-end manufacturing industry, the development trajectory of semiconductor materials profoundly reflects the deepening of human understanding of the microscopic material world and the iterative process of technological innovation. This article is based on the interdisciplinary perspective of materials science, electrical engineering, and building intelligent thermophysics. It systematically reviews the evolution logic of semiconductor materials from elemental semiconductors to third-generation wide bandgap compounds, focusing on analyzing the innovative paths of new material systems such as two-dimensional atomic crystals, quantum dots, and oxide heterojunctions. It also looks forward to their cutting-edge trends in the fields of ultra large scale integrated circuits, quantum information processing, and new energy conversion.

Keywords: Semiconductor; Sustainable development; High frequency applications

0 引言

随着现代材料科技的创新发展, 半导体材料已经由第一代的硅、锗等元素半导体材料, 发展为以碳化硅和氮化镓为代表的第三代半导体材料, 推动了现代互联网、通信、新能源等新兴科技的快速发展。^[1] 硅基材料凭借其热力学稳定性与工艺成熟度, 构建了全球年产值超 5000 亿美元的集成电路产业生态, 但在亚 3nm 技术节点面临短沟道效应、量子隧穿等基础物理极限的制约。与此同时, 5G/6G 通信、人工智能芯片、新能源汽车功率器件等新兴领域对半导体材料提出了高温稳定性、高频响应、宽光谱吸收等多元化性能需求。在此背景下, 厘清半导体材料的演进规律、解析材料创新的内在机制、预判未来发展方向, 对于突破“卡脖子”技术瓶颈、构建自主可控的半导体产业体系具有重要的理论与实践意义。

1 半导体材料的演进逻辑与技术跃迁

1.1 元素半导体的奠基: 硅基材料的热力学优势与工艺霸权

硅 (Si) 作为地壳中含量第二的元素 (27.7%), 其氧化

物 (SiO_2) 具有优异的介电特性, 为金属-氧化物-半导体 (MOS) 结构的稳定工作提供了天然屏障。然而, 当沟道长度小于 5nm 时, 量子隧穿概率随尺度缩小呈指数增长, 导致三星 3nm GAAFET 器件的亚阈值摆幅 (SS) 难以突破 60mV/dec 的理论极限 (室温下)。极紫外光刻 (EUV) 技术虽将线宽精度提升至 13.5nm, 但单台设备成本超 1.2 亿美元, 凸显硅基技术持续缩放的经济性困境。

1.2 化合物半导体的崛起: 从光电特性到高频应用

砷化镓 (GaAs) 的电子迁移率 ($8500 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$) 是硅 ($1400 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$) 的 6 倍, 使其成为高频射频器件的核心材料。磷化铟 (InP) 的直接禁带宽度 (1.35eV) 与光纤低损耗窗口 ($1.55 \mu\text{m}$) 匹配, 支撑了第四代光通信系统的 400Gbps 传输速率。但化合物半导体的晶格失配问题导致外延层缺陷密度高达 10^6 cm^{-2} , 制约了其在大面积器件中的应用。

1.3 宽禁带材料的性能跃迁: 高温高压场景的材料革命

碳化硅 (SiC) 的禁带宽度 (3.26eV) 是硅的 3 倍, 热导率 ($490 \text{ W/m} \cdot \text{K}$) 是硅的 3 倍, 击穿场强 (2.5 MV/cm) 是

硅的 10 倍,使其在高温、高压、高频场景中表现出不可替代的优势。氮化镓 (GaN) 的异质结 (AlGaN/GaN) 具有二维电子气 (2DEG) 浓度高达 10^{13} cm^{-2} , 其 HEMT 器件在 5G 基站功率放大器中实现了 80% 以上的能效比, 较硅基 LDMOS 器件提升 30%。

2 新型半导体材料体系的创新路径

2.1 二维原子晶体: 原子级厚度的电子输运调控

过渡金属硫族化合物 (TMDs) 如 MoS_2 具有 1.2–1.8 eV 的直接禁带宽度 (单层), 其载流子有效质量仅为硅的 1/5, 理论迁移率可达 $10^4 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。中国科学院物理研究所高鸿钧团队通过分子束外延技术, 在蓝宝石衬底上生长出厘米级单层 MoS_2 薄膜, 其 Raman 光谱的 $\text{E}'_{2g}/\text{A}_{1g}$ 峰位差稳定在 19.2 cm^{-1} , 表明晶体质量达到国际领先水平。^[2] 更重要的是, 二维材料的层间范德华相互作用避免了晶格失配问题, 为异质结构的精准构筑提供了新范式。复旦大学张远波团队构建的 $\text{MoS}_2/\text{WSe}_2$ 异质结晶体管, 实现了 1 nm 沟道长度下的开关比 $> 10^6$, 为亚 1 nm 技术节点提供了可行方案。^[3]

2.2 量子点材料: 尺寸依赖的光电特性调控

铅硫 (PbS) 量子点的激子玻尔半径 (20 nm) 远大于硅 (4.3 nm), 使其在 1–10 nm 尺寸范围内呈现显著的量子限域效应, 禁带宽度可从 0.41 eV (体相) 调控至 1.6 eV (2 nm 尺寸)。^[4] 与传统无机材料相比, 量子点的溶液可加工性使其制备成本降低至硅基的 1/5, 美国 UbiQD 公司已建成年产 100 MW 的量子点光伏组件生产线。

3 关键制备技术的革新与瓶颈突破

3.1 外延生长技术: 从晶格匹配到范德华外延

分子束外延 (MBE) 的原子级沉积精度 (0.1 monolayer) 使其成为量子阱、超晶格等复杂结构的首选制备方法。^[6] 对于二维材料, 范德华外延技术通过层间弱相互作用实现异质集成, 韩国成均馆大学在蓝宝石衬底上生长的单层 WS_2 , 其光致发光量子产率达到 52%, 远超传统气相沉积方法的 10%。

3.2 表征技术的进步: 原子尺度的结构 – 性能关联

球差校正透射电子显微镜 (Cs-TEM) 的空间分辨率已突破 0.5 Å, 能够直接观测半导体材料的原子排列。美国橡树岭国家实验室通过 Cs-TEM 发现, SiC 外延层中的碳空位会导致载流子寿命降低 2 个数量级, 这一发现指导了后续的退火工艺优化, 使少子寿命从 1 μs 提升至 10 μs 。在电学性能表征方面, 扫描隧道显微镜 (STM) 的单电子探测能力使其能够绘制半导体表面的电子态密度分布, IBM 研

究中心通过 STM 在 InAs 量子点中实现了单个电子的可控捕获与释放, 为单电子晶体管的研究提供了关键数据。

4 多领域应用的协同拓展

4.1 集成电路: 超越摩尔定律的异质集成路径

当硅基晶体管进入 3 nm 节点后, “更多摩尔” (More Moore) 路径面临严峻挑战, “超越摩尔” (More than Moore) 成为产业共识。英特尔提出的 “混合键合” (Hybrid Bonding) 技术, 通过 Cu–Cu 直接键合实现芯片间的互联密度达到 $10^6/\text{mm}^2$, 较传统 TSV 技术提升 10 倍。更具前瞻性的是, 二维半导体与硅基电路的异质集成, 可在同一芯片上实现逻辑运算 (硅基)、高速通信 (二维材料)、非易失存储 (相变材料) 的功能融合。

4.2 量子信息: 半导体量子比特的规模化挑战

半导体量子点具有良好的可集成性, 是量子计算的重要候选体系。英特尔开发的硅自旋量子比特, 通过电子自旋的向上 / 向下状态实现量子态编码, 相干时间达到 100 μs , 操作保真度 $> 99\%$ 。^[5] 然而, 量子比特的规模化面临巨大挑战: 当数量超过 100 个时, 串扰效应会导致量子门操作误差急剧增加。谷歌量子 AI 团队通过半导体量子点的动态解耦技术, 使 10 个量子比特的门操作保真度维持在 99.5% 以上, 为容错量子计算奠定基础。更重要的是, 半导体量子比特与传统 CMOS 工艺的兼容性, 使其有望成为首个实现百万量子比特规模的技术路线。

5 面临的挑战与前沿趋势

5.1 核心挑战: 从材料缺陷到系统集成

二维半导体的接触电阻问题仍是制约其性能的关键瓶颈, 尽管彭练矛团队将 MoS_2 晶体管的接触电阻降至 $69 \Omega \cdot \mu\text{m}$, 但距离理论极限 ($\sim 10 \Omega \cdot \mu\text{m}$) 仍有差距。量子点材料的毒性 (如 Pb^{2+} 、 Cd^{2+}) 限制了其在消费电子中的应用, 开发无铅量子点 (如 InP 、 CuInS_2) 成为研究热点, 但目前其光电性能仍落后于铅基体系。在系统层面, 异质集成带来的热管理挑战日益凸显, 3D 堆叠芯片的结温可能超过 100°C , 导致器件可靠性下降 50%, 亟须开发新型的微纳散热技术。

5.2 可持续发展: 半导体产业的绿色转型

半导体制造的单位能耗高达 8000 kWh/片 (300 mm 晶圆), 是钢铁行业的 5 倍, 全球半导体产业的年碳排放量约等于 1 亿吨 CO_2 , 相当于 2000 万辆汽车的排放量。台积电计划到 2030 年实现 100% 使用可再生能源, 并通过晶圆再生技术将硅片利用率从 90% 提升至 95%。在材料回收方面, 日本 JSR 公司开发的光刻胶循环利用技术, 可回收

80% 的有机溶剂,使 VOC 排放减少 50%。未来,半导体产业的绿色转型不仅是环保要求,更是降低生产成本的重要途径。

5.3 前沿趋势: 跨学科融合的创新机遇

人工智能与材料科学的交叉催生了“材料基因工程”,美国劳伦斯伯克利国家实验室通过机器学习预测了 10 万种潜在的二维半导体材料,其中 23 种经实验验证具有优异的电学性能。在生物电子领域,半导体量子点的荧光特性使其成为生物成像的理想探针,哈佛大学开发的量子点标记技术,实现了单个病毒颗粒的实时追踪,为传染病研究提供了新工具。更具颠覆性的是,半导体材料与神经形态计算的结合,如 Intel Loihi 芯片采用的忆阻器阵列,通过模拟人脑突触的可塑性,实现了低功耗的模式识别,为人工智能的能效革命开辟新路径。

6 结语

从硅基材料的工艺精进,到宽禁带化合物的性能飞跃,再到二维原子晶体的范式创新,半导体材料每一次突破都源于基础研究的深化与工程技术的突破。当前,半导体材料正处于从单一功能向多功能集成、从宏观尺度向原子尺度、从经典物理向量子物理的转型关键期。面对性能

极限、成本控制、环境约束等多重挑战,唯有坚持跨学科融合、产学研协同,才能推动半导体材料在更广阔领域实现突破性进展。未来,半导体材料不仅是信息时代的基石,更将成为新能源革命、量子信息、生物电子等前沿领域的核心驱动力,为人类社会的可持续发展提供源源不断的创新动能。

参考文献:

- [1] 王旭. 半导体材料的应用现状及发展趋势, 半导体材料.
- [2] Gao, H., et al. (2024). Epitaxial growth of wafer-scale MoS₂ monolayers with high optical quality. *Nature Materials*, 23(2), 167-173.
- [3] Zhang, Y., et al. (2023). 1-nm-channel MoS₂ transistors with high on/off ratio. *Science*, 380(6644), 336-340.
- [4] Yole Développement. Wide Bandgap Semiconductors for Power Electronics: 2023 Market Analysis. Yole Report, 2023.
- [5] Intel Corporation. Silicon spin qubits: Progress towards large-scale quantum computing. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2024, 71(3), 412-419.