



# 硅基二维半导体材料与器件重大项目专题简介

徐明生<sup>1\*</sup>, 王欣然<sup>2\*</sup>, 杨德仁<sup>1\*</sup>

1. 浙江大学, 杭州 310027

2. 南京大学, 南京 210093

\* 通信作者. E-mail: msxu@zju.edu.cn, xrwang@nju.edu.cn, mseyang@zju.edu.cn

集成电路适应于新型应用及超越 Si-CMOS 微缩的需求使半导体技术发展面临巨大挑战. 学术界和工业界认识到二维 (2D) 层状材料独特的二维结构及其新颖的光、电、磁以及量子等效应有望解决半导体集成电路信息技术发展面临的一些问题. 二维材料是融合当前硅基 CMOS 技术路线的关键材料之一, 也被美国白宫列为 2024 年《国家微电子研究战略》中的新兴材料首项. *SCIENCE CHINA Information Sciences* 在 2019, 2021, 2023 年连续组织出版了 3 期“新型二维材料与器件应用专题”, 得到了广大读者的高度肯定和广泛引用. 为了促进我国半导体材料与器件研究水平的提升, 支撑我国在后摩尔时代的科技创新, 面向信息技术自主发展的国家重大战略需求, 国家自然科学基金委员会于 2021 年开始立项资助了“硅基二维半导体材料与器件”重大项目计划, 执行期 5 年. 该重大项目以兼容于硅基技术的二维半导体材料基础问题为核心, 旨在发展能够融合于成熟硅基 CMOS 技术的二维半导体材料的可控制备、新型存储器件、逻辑器件、感存算一体器件和光电集成器件, 突破硅基信息器件性能瓶颈, 扩展硅基信息器件的功能. *SCIENCE CHINA Information Sciences* 在 2024 年 67 卷第 6 期组织出版了“二维材料融合硅基技术专题” (Special Topic: Silicon-compatible 2D Materials

Technologies), 介绍该重大项目的部分成果, 专题共收录了 2 篇综述和 5 篇研究论文.

从 2004 年石墨烯研究获得突破性进展至今的 20 年, 二维材料受到学术、产业界广泛关注, 取得了无数原创性成果, 展示了众多新原理原型半导体器件. 同时, 在推动产业化过程中, 基于二维材料的半导体器件技术还存在挑战. 结合 2023 年 8 月在北京召开的国家自然科学基金委第 343 期双清论坛——“二维信息材料与器件技术”, 王欣然、施毅、汪涵、杨德仁组织了 40 多家高校、研究所和产业界的 100 多位专家, 联合撰写了“Two-dimensional materials for future information technology: status and prospects”综述. 该文回顾了二维材料在未来信息技术应用中的重要进展, 尤其是微电子和光电子领域; 全面总结了二维材料制备、表征测量、电子器件、光电子器件以及在硅基二维异质集成方面的关键进展, 概述了二维材料从基础研究向产业化发展过渡的布局规划路线图和关键挑战. 同时, 作者建议开发专门针对二维材料的关键技术和工具, 以满足产业标准, 也期望学术界与工业界紧密合作以推动二维材料走向产业化应用, 促进后摩尔时代集成电路领域的持续发展.

“硅基二维半导体材料与器件”重大项目 (2021-2025) 由浙江大学杨德仁院士负责, 项目团

引用格式: 徐明生, 王欣然, 杨德仁. 硅基二维半导体材料与器件重大项目专题简介. 中国科学: 信息科学, 2024, 54: 1567-1568, doi: 10.1360/SSI-2024-0178

队来自浙江大学杨德仁团队、复旦大学周鹏团队、西安电子科技大学刘艳团队、北京大学吴燕庆/黄如团队和湖南大学潘安练团队。目前该重大项目已经推进到了中期阶段, 产出了一系列成果。在文章“Progress on the program of Si-compatible two-dimensional semiconductor materials and devices”中浙江大学的徐明生、杨德仁等对该重大项目启动至今的主要研究进展进行了综述, 包括硅基二维半导体材料的可控制备、新型存储器件、逻辑器件、感存算一体器件以及光电集成等。同时, 该文也对二维材料与器件, 尤其是硅基二维融合技术的未来研发趋势以及面临的挑战进行了探讨。

二维材料与金属电接触依旧是开发高性能基于二维材料的半导体器件面临的关键科学问题之一, 如何实现稳定的、低接触电阻的接触? 复旦大学周鹏团队发表了研究论文“Contact engineering for temperature stability improvement of bi-contacted MoS<sub>2</sub> field effect transistors”, 提出在半金属 Bi 接触层和金 (Au) 盖帽层之间插入半金属锑 (Sb) 层, 提高 MoS<sub>2</sub> 晶体管的温度稳定性和时间稳定性的接触工程方案。此研究为在不增加工艺复杂性和特定设备要求的情况下提高半金属接触温度稳定性和应用可靠性提供了一条技术途径。

商用 CCD (电荷耦合器件) 长期以来一直面临着诸如工作电压高、响应缓慢和电荷集成度低等不足。浙江大学的徐明生、杨德仁团队的研究论文“Highly responsive broadband Si-based MoS<sub>2</sub> phototransistor on high-k dielectric”利用高介电常数的 HfO<sub>2</sub> 取代常规的 SiO<sub>2</sub>, 在 HfO<sub>2</sub>/Si 上制备了以 2D MoS<sub>2</sub> 作为导电沟道的高响应度宽带光电晶体管, 该光电晶体管不需要施加栅压就能实现光控门功能, 集成了 Si、二维 MoS<sub>2</sub> 和 h-BN 等独特性能, 实现了产生于 Si 的光生电荷到 MoS<sub>2</sub> 沟道的高效耦合。该器件在所测试的从日盲紫外至近红外区具有优异的光响应特性, 展现了低能耗、高性能的 CCD 及相关光电探测领域应用潜力。

将信息的收集、存储和处理集成在单个器件上可以大大降低信息在传输时的功耗和延迟,

使芯片系统尺寸更小, 运行速度更快, 从而满足“大数据”和“人工智能”时代对数据处理的需求。浙江大学赵昱达团队的研究论文“Heterogeneous integration of 2D materials on Si charge-coupled devices as optical memory”提出了一种将硅基电荷耦合器件与二维材料浮栅存储器在垂直方向上异质集成的新型器件结构, 能够在感知光学信号的同时实现对信号的存储。首先在轻掺杂的硅/二氧化硅衬底上转移石墨烯, 随后又定向转移了二维六方氮化硼和硫化钼, 形成了光存储器件。

基于非易失性存储器件和非冯 (non von Neumann) 架构的存内计算在提升速度和能效方面的潜力受到关注, 作为存内计算方案之一的铁电场效应晶体管 (FeFETs) 阵列的高密度集仍是一个巨大的挑战。西安电子科技大学刘艳、罗拯东等的研究论文“Solid-state non-volatile memories based on vdW heterostructure-based vertical-transport ferroelectric field-effect transistors”提出了一种具有垂直电荷输运沟道的铁电场效应晶体管, 为非易失性存储器件和神经形态器件等领域研究提供了新思路。新方案采用了铁电栅极 (P(VDF-TrFE)) 和范德华 (vdW) 异质结沟道 (MoS<sub>2</sub>/MoTe<sub>2</sub>) 垂直集成的方式, 使电荷传输通道方向垂直于衬底面, 有效减小了器件面积。这种 VT-FeFET 不仅表现出稳定的非易失性存储特性, 而且还可用于神经突触器件。

推进基于 2D 材料 CMOS 技术的发展, 不仅需要 n 型晶体管, 也需要性能匹配的 p 型基于二维材料的晶体管技术; 另一方面, 不同于常规半导体掺杂技术, 对原子层厚度的二维材料掺杂是一个难题。北京大学吴燕庆、黄如团队的研究论文“Hole mobility enhancement in monolayer WSe<sub>2</sub> p-type transistors through molecular doping”展示了一种有效的化学掺杂方法用于提升由化学气相沉积法制备的单层 WSe<sub>2</sub> 沟道迁移率, 使其场效应迁移率翻倍, 达到 97 cm<sup>2</sup> · V<sup>-1</sup> · s<sup>-1</sup>, 同时保持器件开关比大于 10<sup>8</sup>, 经掺杂后的 1 μm 沟长晶体管输出电流达到 176 μA · μm<sup>-1</sup>, 为构筑二维 CMOS 逻辑器件提供了 p 型器件优化方案。