



面向后摩尔时代集成电路的二维非硅半导体材料与器件

张跃^{1,2*}¹ 北京科技大学前沿交叉科学技术研究院, 北京 100083;² 北京科技大学新能源材料与技术北京市重点实验室, 北京 100083* 联系人, E-mail: yuezhang@ustb.edu.cn

Two-dimensional beyond-silicon semiconductors and devices for post-Moore integrated circuits

Yue Zhang^{1,2*}¹ Academy for Advanced Interdisciplinary Science and Technology, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;² Beijing Key Laboratory for Advanced Energy Materials and Technologies, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China* Corresponding author, E-mail: yuezhang@ustb.edu.cndoi: [10.1360/TB-2023-0718](https://doi.org/10.1360/TB-2023-0718)

张跃

北京科技大学教授, 中国科学院院士, 发展中国家科学院院士。现任新金属材料国家重点实验室主任、北京科技大学前沿交叉科学技术研究院院长。从事低维半导体材料及其服役行为的研究, 致力于将低维半导体材料前沿研究和国家重大需求相结合。

晶体管尺寸微型化是近几十年来集成电路性能提升的主要驱动力, 成功推动了社会向信息化、智能化方向迅猛发展。然而, 随着传统硅基芯片制造技术逼近尺寸微缩的理论极限, 硅基集成电路面临着材料性能急剧衰退、器件功耗激增和系统集成难度陡升等诸多挑战。研制高端芯片的步伐在14 nm制程后严重放缓, 其发展已然脱离了摩尔定律的预测。为此, 面对大数据、人工智能等新兴应用场景对高算力芯片的迫切需求, 亟待寻找新的非硅半导体材料以延续摩尔定律。

二维过渡金属硫族化合物(TMDCs)半导体材料拥有原子级厚度和平整无悬挂键表面, 可以有效地解决晶体管尺寸微缩带来的短沟道效应难题, 为突破硅基集成电路的性能瓶颈提供了新的机遇。同时, 二维TMDCs材料与其他材料通过范德华作用力连接, 使得载流子在极限微缩尺寸下仍能保持优异的输运性能, 为新原理器件研究提供了高质量界面保障。近年来, 二维TMDCs半导体的高质量制备研究发展迅猛, 为其大规模应用奠定了材料生长基础。二维TMDCs晶体管的关键性能参数, 如开关比、开态电流和接触电阻均已满足国际器件和系统路线图(IRDS)对1 nm制程逻辑器件的指标要求。同时, 研究人员也开展了大量二维逻辑门阵列和复杂逻辑电路研究, 晶圆级二维TMDCs器件产业化制造技术路线可行性也得到初步验证。目前, 各集成电路产业巨头均对二维TMDCs集成电路的产业化应用进行了布局。基于上述进展, 二维TMDCs材料被认为是后摩尔时代集成电路最具竞争力的非硅新材料之一。

我国研究人员在该领域深耕多年并取得了一系列的突破性研究成果。为了集中展示我国学者在本领域的研究成果, 推动二维TMDCs材料的进一步发展, 促进同行之间的学术交流, 《科学通报》组织出版“后摩尔时代二维范德华电子学器件”专题。此专题特邀领域内多位学者撰文, 涉及二维TMDCs材料

的控制制备方法、高分辨表征技术、范德华异质结界面物理新效应及二维范德华电子器件设计构筑新思路等前沿内容。

材料表征研究旨在能够直观展现材料的晶格结构和载流子的输运行为,是二维范德华电子器件应用的前提。刘碧录课题组^[1]建立了一套依靠高分辨摩擦力显微镜成像的二维材料晶格结构表征方法,能够在大气氛围下实现对二维材料晶格结构的快速表征。刘开辉课题组^[2]系统地总结了透射电子显微技术在二维材料生长、异质结制造和范德华器件构筑中的表征作用,揭示了二维材料范德华器件界面处的微观作用机制。谷林课题组^[3]详细介绍了二维TMDCs材料面间和面内的物理特性,提出通过会聚束电子衍射来表征材料实空间的电荷分布,并从精细结构上全面分析了材料界面与物性的关联机制与调控规律。针对二维范德华电子器件研究,张艳锋课题组^[4]针对晶体管金属/二维TMDCs半导体界面接触问题,系统地探讨了金属性二维材料在提升范德华器件金属/半导体接触质量方面的优势。刘渊课题组^[5]详细介绍了超薄二维半导体在垂直晶体管方面的优势与进展,明确指出了二维垂直晶体管所面临的工艺挑战和发展趋势。基于二维TMDCs在材料制备、新原理器件构筑和逻辑电路制造等方面的研究进展与关键挑战,我们认为“与硅基兼容”二维TMDCs集成电路发展路线更具优势、可行性更强。

由于本专题的篇幅有限,我们无法列出二维非硅半导体材料和器件领域的所有最新进展。但是,我们相信,本专题将通过提供有价值的信息和观点,促进二维非硅半导体材料与器件研究的进步,进一步推动后摩尔时代集成电路研究的创新和突破。最后,感谢所有的作者、审稿人和编辑人员在编写本专题时给予的大力支持和贡献。

参考文献

- 1 Zheng R X, Wang J W, Zhang Y H, et al. Crystal lattice imaging of two-dimensional materials by friction force microscopy (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 2924–2933 [郑荣茂, 王经纬, 张云豪, 等. 摩擦力显微镜表征二维材料晶格结构研究. *科学通报*, 2023, 68: 2924–2933]
- 2 Guo Q L, Gu T, Wang C, et al. Interfacial characterization of two-dimensional van der Waals devices by transmission electron microscopy (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 2873–2885 [郭泉林, 顾恬, 王棕, 等. 二维材料范德华器件中界面的透射电子显微表征. *科学通报*, 2023, 68: 2873–2885]
- 3 Yi S, Gong Y, Zheng Q, et al. Fine structure and property of two-dimensional energy storage materials (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 2911–2923 [易莎, 拱越, 郑强, 等. 二维储能材料中的精细结构与物性. *科学通报*, 2023, 68: 2911–2923]
- 4 Wang J L, Hu J Y, Huan Y H, et al. Progress in the preparation and device research of two-dimensional metallic transition metal dichalcogenides for electrical contact applications (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 2886–2900 [王嘉龙, 胡静怡, 郇亚欢, 等. 面向电极接触应用的二维金属性过渡金属硫属化合物的制备和器件研究进展. *科学通报*, 2023, 68: 2886–2900]
- 5 Le Z K, Liu X, Li Y X, et al. Vertical transistors based on two-dimensional semiconductors (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2023, 68: 2901–2910 [乐志凯, 刘潇, 李运鑫, 等. 基于二维半导体的垂直晶体管. *科学通报*, 2023, 68: 2901–2910]