



新型二维材料与器件应用专题 (2023) 简介

王欣然^{1*}, 倪振华^{2*}, 何军^{3*}, 吕俊鹏^{2*}

1. 南京大学, 南京 210093

2. 东南大学, 南京 211189

3. 武汉大学, 武汉 430072

* 通信作者. E-mail: xrwang@nju.edu.cn, zhni@seu.edu.cn, he-jun@whu.edu.cn, phyljp@seu.edu.cn

根据最新国际器件与系统路线图, 二维半导体被认为是延续器件尺寸微缩至 1 nm 节点最具竞争力的沟道材料. *SCIENCE CHINA Information Sciences* 在 2019 和 2021 年组织出版了两期“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. 在过去 2 年, 二维材料及其器件与集成领域的研究取得了诸多重要进展与技术突破, 包括晶圆级单晶外延生长与层数控制, 面向性能、功耗、尺寸 (PPA) 优化的器件技术以及异质集成、感存算融合等. 同时, 我们认为未来 10 年将是二维材料从实验室走向产业化的关键时期, 全球产业巨头 (台积电、Intel、三星、IMEC 等) 均在全力推进二维半导体的产业化布局, IEDM、VLSI 等电子器件顶级会议持续报道了业界在材料、器件等方面的核心技术突破. 我们计划在未来几年持续组织二维材料与器件相关专题, 致力于介绍二维材料的最新进展, 并为从事该领域的科研人员提供交流的平台. 2023 年第 6 期, *SCIENCE CHINA Information Sciences* 推出新一期“新型二维材料与器件应用专题” (Special Topic: Two-Dimensional Materials and Device Applications), 该专题共收录了 11 篇文章, 包括 3 篇评述、7 篇研究论文与 1 篇进展报告.

近年来, 二维半导体集成电路研究取得了诸多突破, 多种原型电路相继被研制成功. 华中科技大学缪向水教授、叶镭教授及其团队与香港中文大学合作发表了评述文章“Two-dimensional materials-based integrated hardware”. 文章分别围绕基于电子器件和光电子器件的集成硬件展开, 总结了近几年基于二维材料及其异质结构的

电子和光电子器件集成硬件的研究工作, 展示了二维材料集成化应用的优势.

二维半导体特别是层状 MoS₂ 在阻变存储器领域的应用已成为存储与存算领域的新热点, 湖南大学刘渊教授团队发表了评述文章“Recent progress of layered memristors based on two-dimensional MoS₂”, 详细讨论了基于 MoS₂ 忆阻器的器件结构和制备过程、工作机制及其电学特性. 文章最后总结了基于 MoS₂ 的记忆电阻器目前的挑战和前景, 并指出普适性的器件结构、工作机制以及未来的应用.

将超结构与二维材料结合, 通过光场调控能极大地拓展二维材料的光电应用场景, 北京大学方哲宇教授团队发表的评述文章“Multidimensional modulation of light fields via a combination of two-dimensional materials and meta-structures”介绍了几类代表性的二维材料以及超结构光场调控原理、设计方法、加工和制备工艺. 进一步分析和讨论了将二维材料与超结构相结合的效果, 并提供了具体研究案例. 最后文章从新材料和新结构提供电磁波调控新手段的角度总结和分析了该领域面临的挑战和未来发展方向.

国家纳米中心王振兴教授团队与合作者发表了研究论文“Near-infrared optoelectronic synapses based on a Te/ α -In₂Se₃ heterojunction for neuromorphic computing”, 利用 Te/ α -In₂Se₃ 异质结构构筑了高性能近红外非挥发光电存储器. 红外光脉冲和栅极电脉冲能够有效调控器件的极化状态, 进而编辑其电导状态, 实现了高性能人工突触功能, 展示了铁电半导体异质结构在红外

引用格式: 王欣然, 倪振华, 何军, 等. 新型二维材料与器件应用专题 (2023) 简介. 中国科学: 信息科学, 2023, 53: 1230-1231, doi: 10.1360/SSI-2023-0152

波段光电神经网络中的潜在应用。

在高性能光电子器件与应用中,非破坏性地调节各种激子的弛豫动力学、谷极化、束缚能等一直备受关注。新加坡国立大学 Eng Tuan POH 教授团队发表了研究论文“Selective enriching of trionic emission in a WS₂-ZnO hybrid through type-II band alignment”,通过合理设计 WS₂-ZnO 异质结构,实现了带电激子(trion)-中性激子(exciton)比率的显著增加。激子类型的转变是由于 II 型异质结构空间受限界面处的高效电荷分离引起的,该研究为新型光电子器件和量子光源的设计提供新的机遇。

面向超低功耗逻辑电路应用的基于新机制的超陡亚阈值摆幅器件一直以来都是学术界与产业界关注的焦点。北京大学黄如院士和黄芊芊研究员团队发表了研究论文“A novel negative quantum capacitance field-effect transistor with molybdenum disulfide integrated gate stack and steep subthreshold swing for ultra-low power applications”,通过理论分析和实验评估,提出了一种基于 MoS₂ 栅叠层的新型负量子电容场效应晶体管(NQCFET),可在 5 个数量级的电流范围内实现超陡亚阈值摆幅,体现 MoS₂-NQCFET 在超低功耗领域极大的应用潜力。

掺杂被证明是调节黑磷固有性质的有效方法。中科院苏州纳米所张凯研究员团队发表的研究论文“Growth of uniformly doped black phosphorus film through versatile atomic substitution”通过一步气相沉积实现了硅衬底上均匀掺杂黑磷薄膜的直接生长。文章提出的解耦供源策略显著提高了掺杂效果,并能使黑磷薄膜中的掺杂元素均匀分布。该研究中掺杂黑磷薄膜的直接生长将有力推动黑磷电子和光电子器件的研究与应用进程。

缺陷工程是调节二维材料物理和化学性质的一种有效方法,东南大学吕俊鹏教授和南京师范大学赵云山教授合作发表了研究论文“Simultaneous optimization of phononic and electronic transport in two-dimensional Bi₂O₂Se by defect engineering”,通过热桥方法实验研

究了氧缺陷对二维 Bi₂O₂Se 热输运性能的影响。研究发现通过氧空位的引入可以显著降低 Bi₂O₂Se 的室温热导率(3 倍左右),并且由于极性光学声子散射得到削弱,载流子迁移率大幅度提升。该工作为基于新兴二维材料的热电设计和纳米电子学应用提供了新的思路。

二维半导体的层数控制是其器件应用的关键,通过激光减薄获得少层和单层二维材料可以有效避免光刻、刻蚀等过程的污染。新加坡国立大学 Chorng Haur SOW 教授和 Kuan Eng Johnson GOH 教授发表了研究论文“Bolstering functionality in multilayer and bilayer WS₂ via focused laser micro-engraving”。文章报道了激光减薄技术在将样品减薄至单层时与基底之间存在强烈的附着性。该工作详细研究了激光减薄获得的单层二维半导体的光学性质,并提出该方法有助于实现更快速、更高效的多层样品减薄和光学活性单层区域的图案化。

从电子显微镜图像中提取原子级材料特征对于研究结构—物性关系和发现新材料至关重要。华中科技大学曹元成教授团队发表了研究论文“AtomGAN: unsupervised deep learning for fast and accurate defect detection of 2D materials at the atomic scale”,提出了一种于无监督深度学习方法 AtomGAN,可一次性自动分割二维材料和异质结中的点缺陷和线缺陷,精度达到 96.9%。该技术为二维材料结构表征与结构—物性构效关系的建立提供了全新、高速的解析手段。

南京大学王欣然教授团队联合南京邮电大学、苏州实验室为本期专题撰写了领域进展报告“From lab to fab: path forward for 2D material electronics”。文章回顾了过去 10 年在过渡金属硫族化合物(TMDC)材料、器件和集成技术方面的关键里程碑,概述了 TMDC 材料在面向亚 1 nm 节点器件从实验室到产业转化所面临的挑战和解决方案,提出了性能、功耗、尺寸、成本和设备(P²ACE)作为进一步技术发展的关键指标,并设定了近期和长期目标,为二维材料电子学的发展提供了重要的指导和启示。