



基于二维材料的先进光电子学专题简介

魏钟鸣^{1*}, 倪振华^{2*}, 宁静^{3*}

1. 中国科学院半导体研究所, 北京, 100083

2. 东南大学, 南京, 211189

3. 西安电子科技大学, 西安, 710071

* 通信作者. E-mail: zmwei@semi.ac.cn, zhni@seu.edu.cn, ningj@xidian.edu.cn

面向国家在人工智能、先进计算、智能感知与高端信息装备等战略领域的重大需求, 亟需发展兼具高灵敏、低功耗、小型化、多功能集成和智能处理能力的新型材料体系与器件架构. 在后摩尔时代, 传统半导体器件在尺寸微缩、功耗控制和异质集成方面面临日益突出的物理与工艺瓶颈, 探索突破现有技术路线的新材料、新机制和新范式已成为信息科技发展的重要方向. 二维材料因其原子级厚度、无悬挂键表面、可调能带结构以及丰富的范德华异质集成方式, 在新一代光电子器件、智能感知、存算融合和低功耗集成系统中展现出重要应用前景. 近年来, 二维材料研究正从单一材料物性探索逐步走向材料可控制备、界面与接触工程、光电输运机制、器件功能集成以及智能系统应用的协同发展. 特别是在多维光场探测、神经形态视觉、真空紫外探测、可重构逻辑存储和三维集成电子学等方向, 二维材料为突破传统半导体器件在尺寸、功耗、功能密度和异质集成方面的瓶颈提供了新的材料平台和器件范式. 2026年第7期, *SCIENCE CHINA Information Sciences*推出“基于二维材料的先进光电子专题”(Special Topic: Advanced Optoelectronics Based on Two-Dimensional Materials). 本专题围绕二维材料在先进光电子与集成器件中的前沿进展, 共收录7篇文章, 包括2篇综述、4篇研究论文与1篇进展报告, 内容涵盖二维材料光学性质调控、二维光探测器与机器视觉、晶圆级 WSe₂ pMOS 与三维集成等多个方向.

面向智能感知和自主决策的机器视觉系统亟需具备多维光信息获取与实时处理能力, 二维半导体光探测器为突破现有探测器单一感知维度限制提供了重要平台. 中国科学院半导体研究所魏钟鸣研究员、北京交通大学于雅俐博士、华中科技大学王兴华副教授团队发表了综述文章“Advances in machine vision based on two-dimensional photodetectors: device engineering and computational intelligence”. 文章总结了二维半导体光探测器在机器视觉中的最新进展, 重点介绍了二维器件在光强、波长、偏振和时间信息等多维光信号获取方面的优势, 梳理了稳态响应、突触响应和脉冲响应等器件工作机制, 并进一步讨论了其与智能算法结合后在光谱重构、图像识别和运动探测等场景中的应用. 该综述展示了二维光探测器在高维感知与智能处理融合方面的重要潜力.

应变工程能够在不引入化学掺杂和结构污染的情况下调控二维材料的晶格、声子和能带结构, 是实现二维材料光学性质可编程调控的重要手段. 电子科技大学王曾晖教授、夏娟研究员、黄明教授和裴胜海副研究员团队发表了综述文章“Mechanical modulation of optical properties in 2D materials”. 文章围绕应变工程调控二维材料光学性质这一主题, 系统总结了拉伸应变和压缩应变对二维材料晶格结构、声子动力学和能带结构的影响, 讨论了应变传递效率、界面可控性等关键限制因素, 并展望了确定性力学-光学耦合调控在量子技术和

引用格式: 魏钟鸣, 倪振华, 宁静. 基于二维材料的先进光电子学专题简介. 中国科学: 信息科学, 2026, 56: 1865–1866, doi: 10.1360/SSI-2026-0297

Wei Z M, Ni Z H, Ning J. Special Topic: Advanced Optoelectronics Based on Two-Dimensional Materials. *Sci Sin Inform*, 2026, 56: 1865–1866, doi: 10.1360/SSI-2026-0297

自适应光电子器件中的发展前景。

激子态调控是提升低维光电材料发光效率、相干辐射能力和量子信息应用潜力的关键科学问题,二维有机分子晶体为研究分子堆积与激子行为之间的关系提供了独特体系。南京师范大学刘宏微教授、杨昉博士、赵伟玮博士团队与东南大学倪振华教授、吕俊鹏教授合作发表了研究论文“Strong optical emission regulated by exciton state in two-dimensional organic molecular crystals”。该工作研究了二维有机分子晶体中分子堆积模式对明、暗激子态的调控作用,发现低温下由 H 聚集向 H_j 聚集转变可将非辐射三重态特征暗态有效转化为辐射单重态特征亮态,从而显著提升光致发光量子产率并产生超辐射现象。该研究为通过分子堆积调控激子相干性和强光发射提供了新思路。

面向人工智能和边缘计算的低功耗硬件发展迫切需要突破存储与计算分离带来的能耗瓶颈,二维可重构存内逻辑器件为高密度功能集成提供了新思路。西安电子科技大学张进成教授、宁静教授和沈雪助理研究员团队发表了研究论文“Asymmetric WSe₂ reconfigurable devices for logic-in-memory computing: contact barrier engineering and floating gate-controlled operation”。文章构筑了非对称 WSe₂/h-BN/石墨烯可重构浮栅场效应晶体管,通过非对称 Au/石墨烯电极和浮栅电荷存储动态调控肖特基势垒,在单个器件中实现逻辑可重构与非易失存储功能。该器件可通过源漏偏压和背栅电压调控实现 NAND、IMP、NOT、TRUE、AND 和 NIMP 等 6 种布尔逻辑功能,相较传统 CMOS 存内逻辑电路显著减少晶体管数量,并表现出良好的耐久性和保持特性,为高密度、低功耗存算融合器件提供了新的实现路径。

超宽禁带二维材料 hBN 因其强紫外吸收和优异稳定性成为发展高性能真空紫外探测器的理想候选材料。西安交通大学李强副教授、中国科学院长春光机所陈冉升助理研究员与西安电子科技大学宁静教授团队合作发表了研究论文“Mechanism of photocarrier transport in vacuum ultraviolet photodetector based on hexagonal boron nitride nanosheets”。该工作利用液相剥离和自组装方法制备 hBN 纳米片薄膜,并设计了背面叉指、垂直交错和垂直交叉三类电极结构的真空紫外探测器。研

究表明,背面叉指结构可充分利用 hBN 面内高载流子迁移率和无遮挡光敏面积,在 185 nm 波段获得较优综合探测性能;第一性原理计算进一步揭示了面内电场促进能带弯曲和电荷离域,而层间弱范德华耦合限制垂直运输的微观机制。该工作为高性能真空紫外探测器的结构优化提供了清晰的物理图像。

神经形态机器视觉要求器件在感知、存储和计算之间实现高效协同。华南师范大学王幸福研究员、高伟副研究员与厦门大学张峰教授团队发表了研究论文“A platform of MoS₂/4H-SiC heterostructure photonic synapses for low-power neuromorphic machine vision”。文章构筑了基于 MoS₂/4H-SiC 异质结构的超低功耗光突触器件,实现了对生物视觉信息处理过程的模拟。器件在 405 nm 光照下表现出光脉冲增强响应、非易失长时记忆和双脉冲易化等典型突触行为,并在手写数字识别任务中获得较高识别准确率和循环稳定性。该研究展示了二维材料/宽禁带半导体异质结构在低功耗神经形态机器视觉和可扩展集成光突触系统中的应用潜力。

随着硅基器件微缩逐渐逼近物理极限,高性能二维 p 型半导体及其晶圆级集成是实现互补逻辑和三维集成电子学的关键环节。东南大学赵蓓副教授团队发表了进展报告“From wafer-scale growth to 3D integration: 2D WSe₂ pMOS for next-generation”。文章聚焦二维 p 型半导体 WSe₂ 在后硅时代互补逻辑和低功耗电子学中的关键作用,系统回顾了晶圆级 WSe₂ 的化学气相沉积、范德华外延和界面工程生长等策略,总结了接触工程、能带调控和输运优化对高性能 pMOS 器件的重要意义,并讨论了 WSe₂ 基电子学在异质堆叠、单片三维集成和免转移集成中的最新进展,为二维半导体面向下一代三维集成电子系统提供了路线参考。

本专题从材料物性调控、器件结构设计、光电输运机制到智能系统应用,集中展示了二维材料先进光电子领域的最新研究进展。衷心感谢所有为本专题撰稿的作者,并诚挚感谢所有匿名审稿人对稿件及时且细致的评审工作。我们希望本专题能够为相关领域研究人员提供有价值的参考,促进物理、电子工程、光电子学和计算机科学之间的交叉融合,并推动二维材料光电子器件从基础研究迈向高性能、多功能和可集成应用。