

二维材料及其神经形态器件与系统：制备、机制与应用

陈嘉远, 武程辉, 刘 锴

(清华大学材料学院, 新型陶瓷材料全国重点实验室, 北京 100084)

摘 要: 与基于冯·诺依曼架构的传统计算机系统不同, 神经形态计算系统具有存算一体的特性, 避免了存储与计算单元之间的大量数据交换, 提高了计算效率并大幅降低了能耗。二维材料具有原子级厚度、表面无悬挂键和性能可调等优势, 是神经形态器件关键材料的有力候选者。本文综述了近年来在二维材料及其神经形态器件与系统方面的研究进展, 首先介绍了二维材料的基本特性与制备方法, 然后讨论了二维神经形态器件的结构与工作机制, 进一步展示了其在存算一体二维神经形态器件与系统、感存算一体智能电子器件与系统以及复杂环境神经形态器件等方面的应用, 最后探讨了二维材料和器件应用于神经形态计算面临的机遇与挑战。

关键词: 二维材料; 忆阻器; 突触器件; 神经形态计算; 存算一体

中图分类号: TN304 文献标志码: A 文章编号: 0454-5648(2026)05-1835-25

网络出版时间: 2026-04-15



在大数据时代, 随着技术不断向亚 2 nm 节点推进, 硅基芯片面临着前所未有的挑战。短沟道效应、漏电流控制难题、栅控效果减弱以及复杂的量子效应, 使得硅基芯片的尺寸微缩举步维艰, 难以满足当下对海量数据实时处理、设备小型化、低功耗运行等需求, 传统摩尔定律也逐渐失效。尽管研究者通过许多手段, 例如设计鳍式场效应晶体管(Fin field-effect transistor, FinFET)、环绕栅极场效应晶体管(Gate-all-around field-effect transistor, GAAFET)等新型架构, 应用极紫外光刻等制造技术, 提高了硅基计算单元与存储器的性能与集成密度, 但在处理复杂问题时, 硅基芯片仍然面临功耗墙、存储墙等问题^[1]。一个重要原因是, 传统计算机采用冯·诺依曼架构, 计算与存储单元分离, 单元间的数据传输不仅消耗大量能量, 还显著降低了系统运行效率。尤其以人工神经网络为代表的复杂任务处理过程, 由于涉及大量数据交换, 更加受到存算分离架构效率瓶颈的限制。Hadke 等^[2]指出, 目前数据中心消耗的电力超过 200 TWh, 在全球总能耗中占据相当比例。数据传输能耗不仅增加了运营成本, 也限制了人工神经网络在小型化、可穿戴终端中的部署以

及设备续航能力。此外, 以深度学习算法为代表的现代计算任务通常需要大量并行计算, 而传统冯·诺依曼架构难以满足实时性与高吞吐量的需求。

近年来, 以忆阻器为代表的神经形态器件, 作为一种新型电子器件逐渐受到了研究者的广泛关注。忆阻器是一种基于电阻变化的非易失性存储器件, 其阻值可以依据流经器件的电荷量进行调整^[3]。以忆阻器为基本单元构建的神经形态计算系统, 将存储与计算单元巧妙地集成于一体, 大幅减少了数据传输瓶颈, 显著提高了数据处理效率^[4]。同时, 忆阻器交叉阵列通过电路的基尔霍夫定律实现原位计算, 具有类似生物神经网络的并行计算特性, 更适合复杂的现代计算任务^[4, 5]。传统三维材料忆阻器主要基于 TiO₂、NiO、TaO_x 等金属氧化物实现, 通过控制导电通道的形成与消失改变器件阻值, 表现出良好的单器件阻变性能与非易失性^[6]。然而, 三维材料的缺陷态、界面效应影响显著, 难以保证忆阻器阵列中的器件稳定性与一致性。例如不同器件的氧空位分布并不均匀, 从而引发阻变特性的波动, 影响器件可靠性。此外, 三维忆阻器在集成度与扩展性等方面仍然存在瓶颈, 散热、寄生效应等问题

收稿日期: 2025-06-25。 修订日期: 2025-08-03。

基金项目: 国家自然科学基金基础科学中心项目(52388201)。

第一作者: 陈嘉远(2002—), 男, 博士研究生。

通信作者: 刘 锴(1981—), 男, 博士, 教授。

Received date: 2025-06-25. Revised date: 2025-08-03.

First author: CHEN Jiayuan (2002—), male, Doctoral candidate.

E-mail: chenjiay24@mails.tsinghua.edu.cn

Correspondent author: LIU Kai (1981—), male, Ph.D., Professor.

E-mail: liuk@tsinghua.edu.cn

限制了器件的进一步微缩与高密度集成^[7]。

在传统忆阻器面临诸多挑战的背景下，二维材料为神经形态器件的发展提供了新机遇^[8, 9]。二维材料具有原子级厚度、表面无悬挂键、高载流子迁移率等优势，在纳米尺寸下仍然保持优异的栅控性能与高速运行能力，是后摩尔时代富有潜力的芯片材料^[10, 11]。此外，二维材料的光滑表面可以与其他材料异质集成，为开发新型纳米器件提供丰富可能^[12–14]。基于优异的电学性能、阻变特性、可扩展性，二维材料在模拟生物突触行为中表现出色，

是存算一体架构的潜在解决方案^[15–18]。二维材料还具有良好的柔性与透明性，在可穿戴设备、生物传感器、植入式医疗器件中表现出广阔的应用场景，例如实时监测并处理生物信号^[19]。如图 1 所示，近年来二维神经形态器件的研究已经从单一的电学器件，逐渐向多功能、阵列化的系统集成阶段发展，在高性能计算、智能视觉等领域发挥重要作用。本文综述了二维电子器件与神经形态计算的研究进展、现存挑战、发展趋势等，为人工智能、物联网、大数据等领域的硬件开发提供参考。

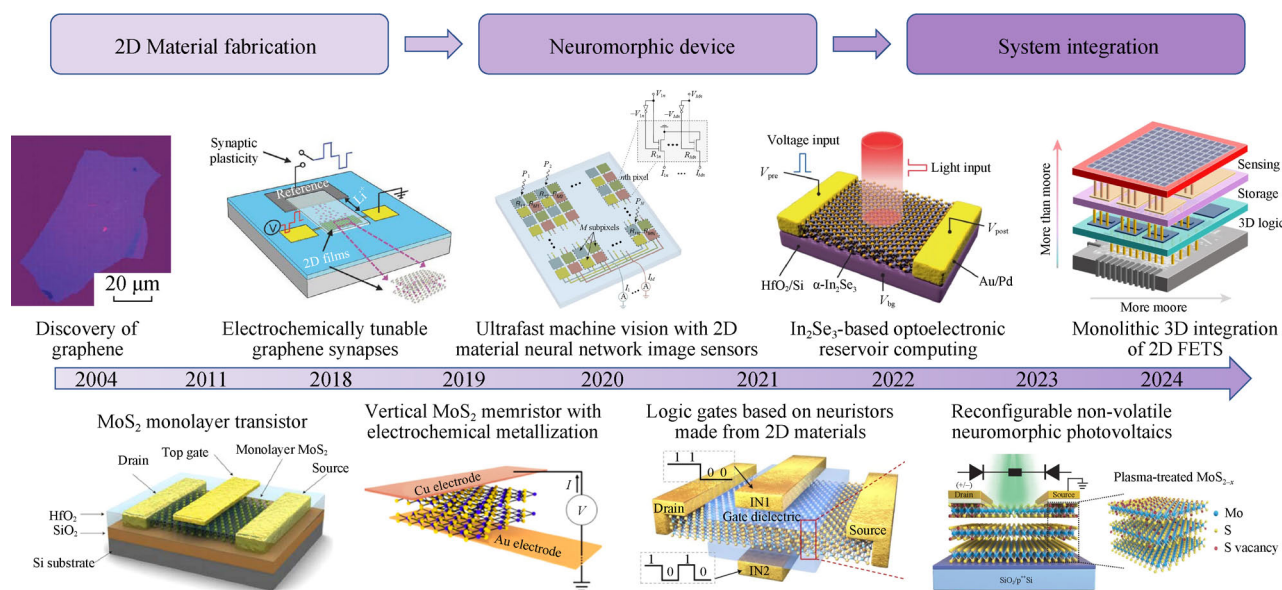


图 1 基于二维材料的电子电路与神经形态器件的发展历程^[20–28]

Fig. 1 Development history of electronic circuits and neuromorphic devices based on 2D materials^[20–28]

1 二维材料的基本特性与制备方法

自 2004 年石墨烯被发现以来，二维材料的研究与日俱增，逐渐成为材料科学的焦点之一^[29–32]。二维材料的核心特征是，在一个维度上具有原子级厚度，在另外两个维度上宏观延伸。范德华层状材料是二维材料的重要来源，它具有强的层内作用力(以共价键为主)与较弱的层间作用力(范德华力)，因而可以通过剥离块体母相得到独立的二维结构。随着制备技术的发展，一些非层状结构的二维材料(例如部分金属氧化物、硫化物等)被成功制备，它们同样具有原子级厚度与宏观平面延伸的特性，是二维材料体系的重要成员^[33]。二维材料种类丰富，涵盖金属性、半导体、绝缘体等特性，如图 2a 和图 2b 所示。石墨烯是一种半金属二维材料，具有独特的狄拉克锥零带隙能带结构，表现出高机械强度与载流子迁移率；六方氮化硼(Hexagonal boron nitride, hBN)

是一种二维绝缘体，带隙达到 5.9 eV，常用于二维电子器件的介电层或封装层；过渡金属硫族化合物(Transition metal dichalcogenide, TMDC)涵盖了 MoS₂、WS₂、WSe₂ 等一系列二维材料，具有丰富的物化特性。二维材料的能带结构与电子特性可调，为各种电子器件与光电器件的开发提供了丰富选择。图 2c 展示了部分二维材料对光波长的响应谱，从紫外波段到远红外波段均可找到能带匹配的二维材料。不同于体材料，二维材料具有平整光滑的表面与层间范德华作用力，可以通过堆叠、外延等方式组成异质结，实现更多特别的物化特性，如图 2d 所示。图 2e 展示了 MoS₂ 能带结构的层数依赖性，从体材料减薄到四层、双层、单层，MoS₂ 的能带隙逐渐增加，并从间接带隙转变为直接带隙^[34]。

二维材料的制备方法主要分为自下而上、自上而下 2 种，其中：自下而上的方法主要包括化学气

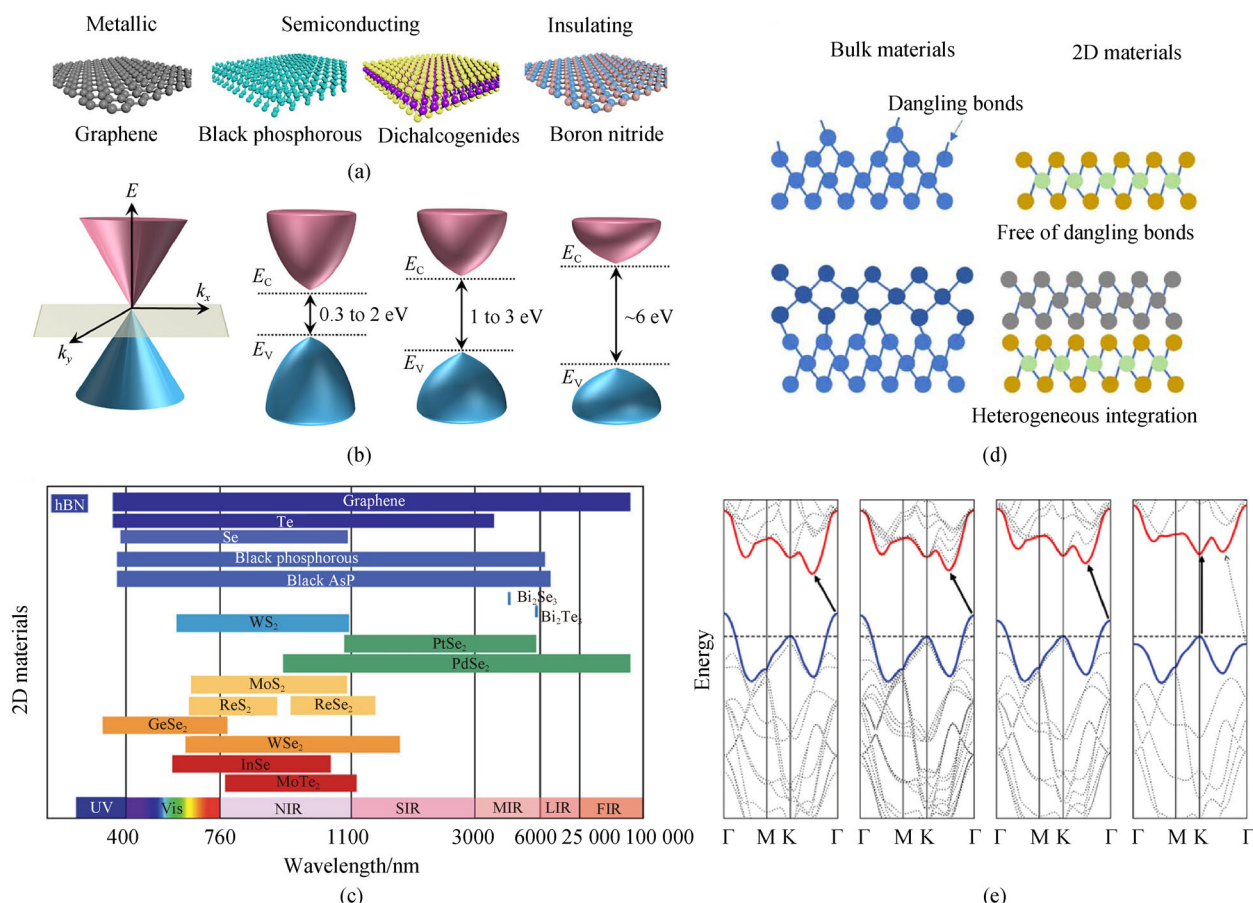


图 2 二维材料的独特物理性质。(a) 电子特性丰富的二维材料, 从零带隙的石墨烯到半导体性的黑磷、过渡金属硫族化合物, 再到绝缘的六方氮化硼, (b) 相应的能带结构^[2]; (c) 部分二维材料对光波长的响应谱^[35]; (d) 相较于体材料, 二维材料表面无悬挂键, 利于异质集成^[8]; (e) 从左到右依次是体材料、四层、双层、单层 MoS_2 的计算得到的能带结构^[34]

Fig. 2 Unique physical properties of 2D materials. (a) Abundant electronic properties of 2D materials, from zero-bandgap graphene to semiconducting black phosphorous, transition metal dichalcogenides, and insulating hexagonal boron nitride with (b) corresponding band structures^[2]; (c) Response spectra of some 2D materials to different light wavelengths^[35]; (d) Compared with bulk materials, the surface of 2D materials has no dangling bonds, conducive to heterogeneous integration^[8]; (e) Calculated band structures of bulk, four-layer, bilayer, monolayer MoS_2 from left to right^[34]

相沉积(Cheical vapor deposition, CVD)、分子束外延(Molecular beam epitaxy, MBE)、原子层沉积(Atomic layer deposition, ALD)等。CVD 法利用气相化学反应, 在衬底表面沉积原子级厚度的固体薄膜, 其原理与装置比较简单、衬底选择广泛、成本低廉, 是生长二维材料的常用方法。图 3a 展示了利用 MoO_3 与硫粉作为前驱体, 使用 CVD 法生长 MoS_2 的示意图。过程中可能形成过渡金属亚氧化物等反应中间体, 它们扩散到衬底表面, 进一步与硫蒸气反应生成 MoS_2 薄膜^[36, 37]。对于典型的二维材料 MoS_2 , 研究者已经实现了 8 英寸乃至 12 英寸晶圆级薄膜的生长^[38, 39]。Jiang 等^[40]实现了厘米级单晶 MoS_2 的直拉生长, 表现出极好的均匀性、高质量与超低的缺陷密度。

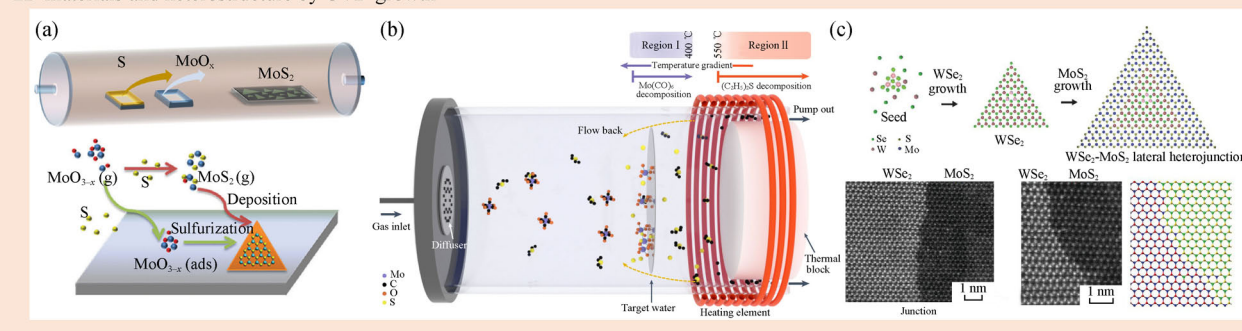
在工业界, 金属有机物化学气相沉积(Metal-

organic chemical vapor deposition, MOCVD)常被用于大规模生长 TMDC 等二维材料。Zhu 等^[41]利用精心设计的 MOCVD 装置, 在互补金属氧化物半导体(Complementary metal-oxide-semiconductor, CMOS)硅基电路上实现了单层 MoS_2 的低热预算合成, 如图 3b 所示。但 MOCVD 使用的金属有机物前驱体毒性较大、设备成本昂贵, 限制了它的应用^[42]。自下而上的生长方法不仅可以得到单种材料, 还能直接构建二维异质结构。Li 等^[43]通过两步法 CVD 制备了 WSe_2 - MoS_2 横向异质结, 并使用高分辨扫描透射电子显微镜(STEM)揭示了面内异质结构的清晰界面, 如图 3c 所示。由于存在自然缺陷, 一般认为 CVD 法得到的二维材料质量通常略低于机械剥离的材料, 但近期也有工作通过生长创新制备高质量、低缺陷的单层材料。Zhang 等^[44]利用硫化聚丙

烯腈释放高反应性单原子 S，成功生长了超高品质单层 MoS_2 ，其缺陷密度低至 $7 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ，光致发光半峰宽仅为 47.11 meV。Wu 等^[45]开发了一种硫属

元素前驱体预熔化与再凝固方法，作为 CVD 生长高质量均匀单层 WS_2 、 MoS_2 、 WSe_2 的前驱体，材料的缺陷密度低至 10^{12} cm^{-2} 量级。

2D materials and heterostructure by CVD growth



2D materials and heterostructure by mechanical exfoliation and transfer

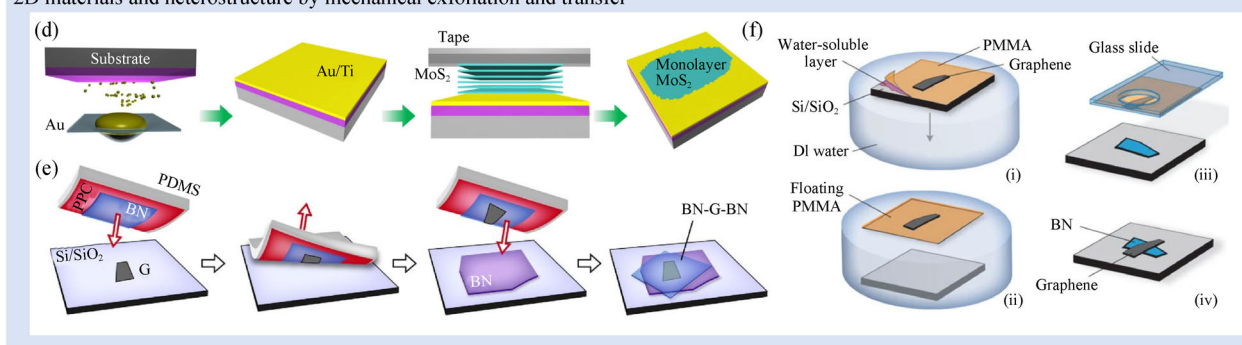


图 3 二维材料及其异质结的制备手段。(a) 使用 MoO_3 与 S 作为前驱体 CVD 生长 MoS_2 的装置示意图与表面外延过程^[36, 37]；(b) MOCVD 系统与沉积过程的示意图^[41]；(c) WSe_2 - MoS_2 横向异质结的生长过程，高分辨 STEM 照片清晰揭示了面内异质结构^[43]；(d) 金辅助剥离大面积单层 MoS_2 材料^[50]；(e) 利用范德华技术实现层状材料的无聚合物组装^[53]；(f) 利用聚甲基丙烯酸甲酯 [Poly(methyl methacrylate), PMMA] 与水溶层实现石墨烯的湿法转移^[54]

Fig. 3 Preparation methods of 2D materials and their heterojunctions. (a) The apparatus and surface epitaxial process for CVD growth of MoS_2 using MoO_3 and S powder as precursors^[36, 37]; (b) Schematic diagram of the MOCVD system and deposition process^[41]; (c) Growth process of WSe_2 - MoS_2 lateral heterojunctions and high-resolution STEM images reveal the clear in-plane heterostructure^[43]; (d) Au-assisted exfoliation of large-area monolayer MoS_2 ^[50]; (e) Polymer-free assembly of layered materials using vdW techniques^[53]; (f) Wet transfer of graphene using PMMA and water-soluble layer^[54]

外延生长是制备高质量二维材料的常用手段，例如 Zhu 等^[46]通过 MBE 制备了二维 Sn 烯，Zhang 等^[47]通过碳在镍基底上的扩散实现了单晶石墨烯的连续外延生长。MBE 在超高真空条件下，将薄膜元素加热为定向分子束，发射到热衬底上进行生长，从而精细控制薄膜厚度并实现可控外延。然而，MBE 所需仪器结构复杂、成膜速率较低，限制了它的大规模应用^[48]。ALD 利用前驱体与衬底之间的化学反应，逐原子层地沉积薄膜，是一种自限式生长方法，但生产效率也较低^[49]。

在自上而下的方法中，首先利用化学气相输运、高温熔融等方法，制备得到二维材料单晶块体，然后通过机械剥离获得高质量的层状二维材料，进而快速应用于科学研究。在机械剥离过程中，材料产量与尺寸通常有限，限制了器件的大规模集成，因

此二维材料的大面积剥离与转移方法也受到了研究者的广泛关注。如图 3d 所示，Huang 等^[50]报道了一种无污染的 Au 辅助机械剥离一步转移方法，成功剥离了 40 种单晶单层材料并构建异质结，展示了该方法的泛用性以及大规模生产潜力。其他可扩展的剥离方法包括电化学插层^[51]、溶液处理^[52]等，但这些处理方法通常会引入缺陷、降低材料质量，对器件性能产生一定影响。

针对不同的二维材料制备方法，研究者开发了丰富的转移手段，以实现材料向目标衬底的转移或范德华异质结构的构建。转移方法主要分为自下而上与自上而下 2 类，均可通过多次重复操作，构建复杂的二维异质结构：自下而上方法逐层转移二维材料薄片，向上堆叠构建垂直结构；自上而下方法利用二维材料层间的范德华作用力，通过上层材料

接触并拾取底层材料,实现整体转移。自下而上方法具有操作简单、转移缺陷少等优点,聚二甲基硅氧烷(Polydimethylsiloxane, PDMS)干法转移是其中最常用的技术。该技术利用 PDMS 在不同剥离速率下的黏弹性差异,实现材料的拾取与剥离,剥离过程中需要缓慢操作以降低 PDMS 的黏弹性^[55]。除 PDMS 外,干法转移还可使用聚碳酸亚丙酯[Poly(propylene carbonate), PPC]、聚苯乙烯(Polystyrene, PS)、聚酰亚胺(Polyimide, PI)等辅助材料,以优化二维材料减薄等工艺流程。然而,在搭建多层异质结时,自下而上方法会在每一个界面残留聚合物污染,影响材料质量。

相比之下,自上而下的拾取-抬起方法利用二维材料的层间作用力直接构建异质结,能保证材料界面的清洁,有利于实现更优的器件性能,但其操作难度大、成功率较低。如图 3e 所示, Wang 等^[53]利用 PPC 辅助干法转移,自上而下逐层搭建了 hBN/Gr/hBN 器件,获得了无杂质或褶皱的清洁界面,使得石墨烯层的载流子迁移率接近理论预测值。

此外,基于聚甲基丙烯酸甲酯[Poly(methyl methacrylate), PMMA]等材料的湿法转移也是大规模制备二维电子器件的常用方法:在带有二维材料的衬底表面旋涂高分子膜并烘干,再通过刻蚀使其与衬底分离,即可得到带有二维材料的柔性薄膜,进行后续转移。图 3f 展示了 Dean 等^[54]使用机械剥离、PMMA 湿法转移的方法,在 hBN 介质层上构建高质量的单层、双层石墨烯器件。湿法转移适配 CVD 生长等前端工艺,具有大范围规模化转移的优势,但溶液处理可能引入污染,导致转移材料质量降低等问题尚待解决。

2 二维神经形态器件的结构与工作机制

2.1 突触及其可塑性

在人脑的神经系统中,神经元之间的信息传递依赖突触的协同作用。通过电信号与化学信号的转换,突触将神经冲动从前神经元传递到后神经元。具体而言,当突触前神经元接收到电信号时,会产生短暂的动作电位,随后突触前膜释放多巴胺、谷氨酸等神经递质,这些化学物质通过突触间隙扩散到突触后神经元,引发其电信号响应。这种电信号与化学信号的转换机制,是神经系统高效传递与处理信息的物质基础,体现了生物突触在神经网络中的关键功能^[56]。

突触的动态特性主要体现于可塑性,即突触传

递强度或有效性的变化,这是神经系统学习与记忆功能的核心机制。心理学家 Donald Hebb 提出了 Hebb 学习规则,指出突触前神经元与后神经元同时放电时,突触的连接强度会发生变化^[57]。这一理论奠定了突触可塑性的基础,成为现代神经科学与人工神经网络研究的重要依据。突触权重调节包括增强与抑制 2 个方向,按照变化维持时间可分为短期可塑性与长期可塑性。短期可塑性包括短期增强(Short-term potentiation, STP)和短期抑制(Short-term depression, STD),此处突触强度变化是短暂的,会迅速恢复到初始状态;长期可塑性包括长期增强(Long-term potentiation, LTP)与长期抑制(Long-term depression, LTD),表现为突触强度的持久性变化。当输入脉冲相对稀疏、间隔较大时,突触通常表现为短期增强;如果输入序列更加密集、脉冲间隔较短,则容易实现突触强度的永久增强。而突触权重随时间的下降代表了短期抑制状态,而突触连接的永久退化对应了长期抑制状态。

突触还具有更多可塑性,例如尖峰时间依赖可塑性(Spike-timing-dependent plasticity, STDP)与尖峰速率依赖可塑性(Spike-rate-dependent plasticity, SRDP)。STDP 依据突触前后神经元尖峰的时间差调节突触权重,若突触前神经元的尖峰早于突触后神经元,突触强度增强,反之则减弱。STDP 具备毫秒级的时间分辨率,使得神经网络能够高效编码、处理时间序列信息。SRDP 依据突触前神经元的尖峰频率调节突触权重,高频率的尖峰会增加突触强度。SRDP 允许神经网络通过输入信号的强度与持续时间调节突触连接,以适应不同强度的环境刺激。突触权重的灵活调节以及易失/非易失存储行为的转变,使人工突触器件在神经形态计算中具备高效存储与处理信息的能力。

与传统突触器件使用的 HfO_x 、 TaO_x 等块体材料相比,二维材料凭借独特的物化性质与丰富的材料选择,在感存算一体器件、神经形态计算等领域展现出巨大潜力。在能带调控方面,体材料的带隙通常是固定的,而二维材料的量子限域效应产生分立的电子能级与态密度变化,使得研究者可通过厚度或应力调节 MoS_2 、黑磷、 MoTe_2 等二维材料的能带结构,实现更丰富的电学性质^[58]。在原子级厚度下,二维材料具有显著高于体相的激子束缚能,同时保持较高的光吸收率,这种强光电耦合特性有利于开发感存算一体的光突触器件^[59, 60]。此外,二维材料表面光滑无悬挂键,减少了载流子散射,器件功耗

显著优于体材料^[61]。二维材料还可通过垂直堆叠实现三维集成, 凭借极薄的原子级厚度实现更高的集成密度^[28, 62]。

图 4a 展示了一种基于二维材料的忆阻器, 它采用三明治器件结构, 通过导电细丝的形成与断裂调控电导。图 4b 展示了一种突触晶体管, 利用栅极控制二维材料晶界, 进而改变沟道电导。图

4c 和图 4d 分别是闪存器件与离子晶体管的结构示意图, 表明二维材料适用于多种器件架构。基于二维材料的双表面通道晶体管(图 4e)、铁电晶体管(图 4f)、范德华异质结晶体管(图 4g)等新型器件也不断涌现, 基于类似结构有望开发更多的二维神经形态器件, 实现高可靠性、高速度、低功耗等优异特性^[25]。

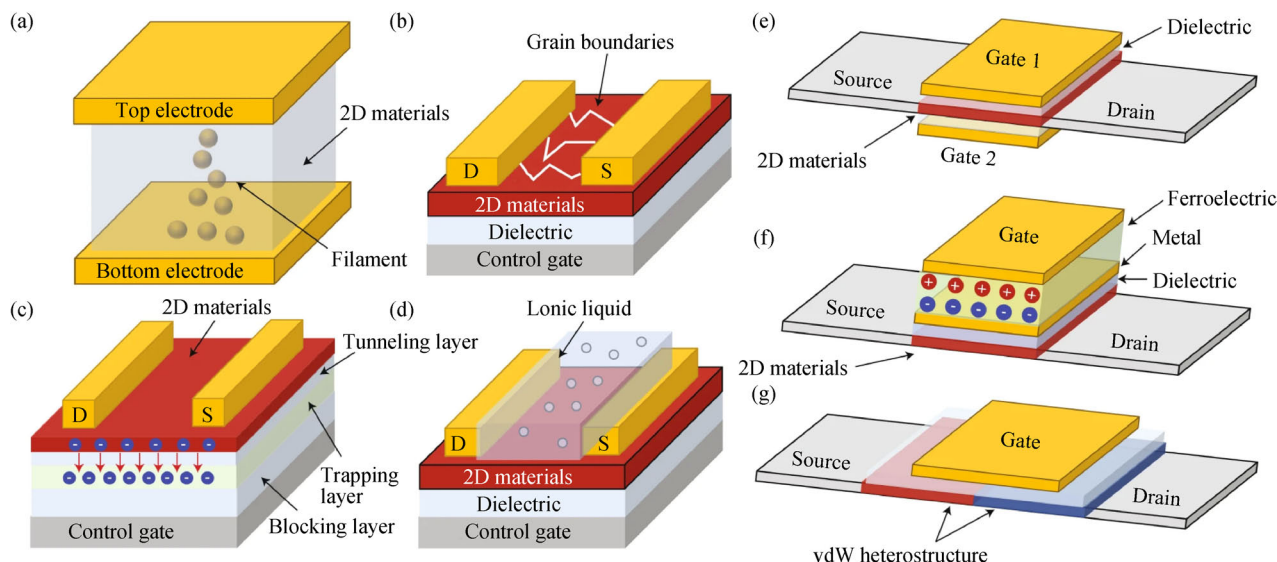


图 4 二维材料神经形态器件常见结构^[25]。(a) 导电细丝忆阻器; (b) 基于晶界, (c) 隧穿捕获层, (d) 离子液体的突触晶体管; (e) 双表面通道晶体管; (f) 二维铁电晶体管; (g) 范德华异质结晶体管

Fig. 4 Common structures of neuromorphic devices based on 2D materials^[25]. (a) Conductive filament memristor; (b) Synaptic transistor based on grain boundary, (c) tunneling and trapping layer, (d) ionic liquid; (e) Two-surface-channel (TSC) FET; (f) Ferroelectric FET; (g) FET based on vdW heterostructure

2.2 两端忆阻器

二维忆阻器主要分为平面型与垂直型 2 种, 采取传统的两端设计, 其中一个电极充当突触前神经元施加电压脉冲, 另一个电极充当后神经元产生突触后电流。通过改变两个电极之间的电阻, 模拟突触权重的变化。二维两端忆阻器的工作机制多样, 包括离子迁移形成导电细丝、空位迁移改变肖特基势垒高度、相变或缺陷调控等。

导电细丝的形成是传统两端忆阻器的主要工作机制。忆阻沟道材料夹在顶电极与底电极之间, 形成垂直的三明治两端结构, 通过施加电压偏置或瞬时脉冲控制导电细丝的形成^[63]。这种基于导电细丝的两端忆阻器常使用 Ag、Cu 等金属作为电化学活性电极, Pt、Pd 等惰性金属作为对电极。二维材料作为金属阳离子扩散迁移的框架, 辅助活性金属原子移动到对电极形成导电细丝, 使器件从高电阻状态切换为低电阻状态。这种导电细丝忆阻器结构简单、易扩展、开关速度快, 受到了早期研究者的广泛关注。

如图 5a 所示, Xu 等^[23]报道了一种基于 MoS₂

电化学金属化作为原子级突触的垂直两端忆阻器, 开关阈值电压接近 100 mV, 并成功模拟了 STDP 等突触行为(图 5b)。图 5c 展示了夹在活性 Cu 顶电极与惰性 Au 底电极之间的双层 MoS₂ 沟道, Cu 离子在双层 MoS₂ 之间扩散形成原子级细丝, 大幅降低了开关电压^[23]。Yan 等^[64]报道了稳定的 Ag/ZrO₂/WS₂/Pt 垂直忆阻器(图 5d 和图 5e), 将二维材料 WS₂ 插入氧化物形成双层忆阻层, 成功改善了电化学金属化存储单元的可靠性, 表现出 10 ns 的高速响应以及超过 10⁹ 次循环的耐久性。Sun 等^[65]在 Ag/hBN/Gr 垂直异质结阈值开关器件中, 实现了 0.62 mV·dec⁻¹ 的开关电压斜率, 并保持了 10¹⁰ 的高开比, 这种性能归因于二维绝缘 hBN 与迁移银原子、惰性石墨烯电极的独特耦合。通过施加足够的电压尖峰, 器件可以从传统的易失性阈值开关转变为非易失的忆阻状态^[65]。Dong 等^[66]开发了二维 Bi₂O₂Se 超快低功耗忆阻器, 其开关速度 < 5 ns、功耗 < 3.02 pJ, 并实现了多种突触可塑性, 包括 LTP/LTD、成对脉冲易化(Paired-pulse Facilitation,

PPF)以及 STDP 等。Liu 等^[67]基于二维过渡金属三硫化物 TiS_3 制造了光电忆阻器, 利用导电铝丝的可控形成与破裂实现了稳定的双极电阻开关, 在 400~808 nm 的光波长范围内实现多级存储, 建立了巴甫洛夫联想学习系统。

此外, 部分二维材料天然具有离子导电的性质, 控制离子形成导电通路也可直接调控沟道电导。Kim 等^[68]制造了用于人工突触活性层的垂直排列二维卤化物钙钛矿薄膜, 利用其中的碘化铅八面体结

构作为离子传输通道。图 5f~图 5h 通过密度泛函理论(Density functional theory, DFT)计算不同路径的碘空位扩散能垒, 确定了 V_I 优先在 PbI_6 八面体内部迁移, 支持了离子迁移的阻变机理。器件具有多级模拟忆阻特性、可编程增强与抑制, 并表现出数月的水分稳定性^[68]。Liu 等^[69]报道了基于 CuInP_2S_6 中 Cu 离子迁移的多功能忆阻器, 使用 $\text{Ag}/\text{CuInP}_2\text{S}_6/\text{Au}$ 结构获得了较高的开关比与循环耐久性, 可作为非易失性存储器或选择器工作。

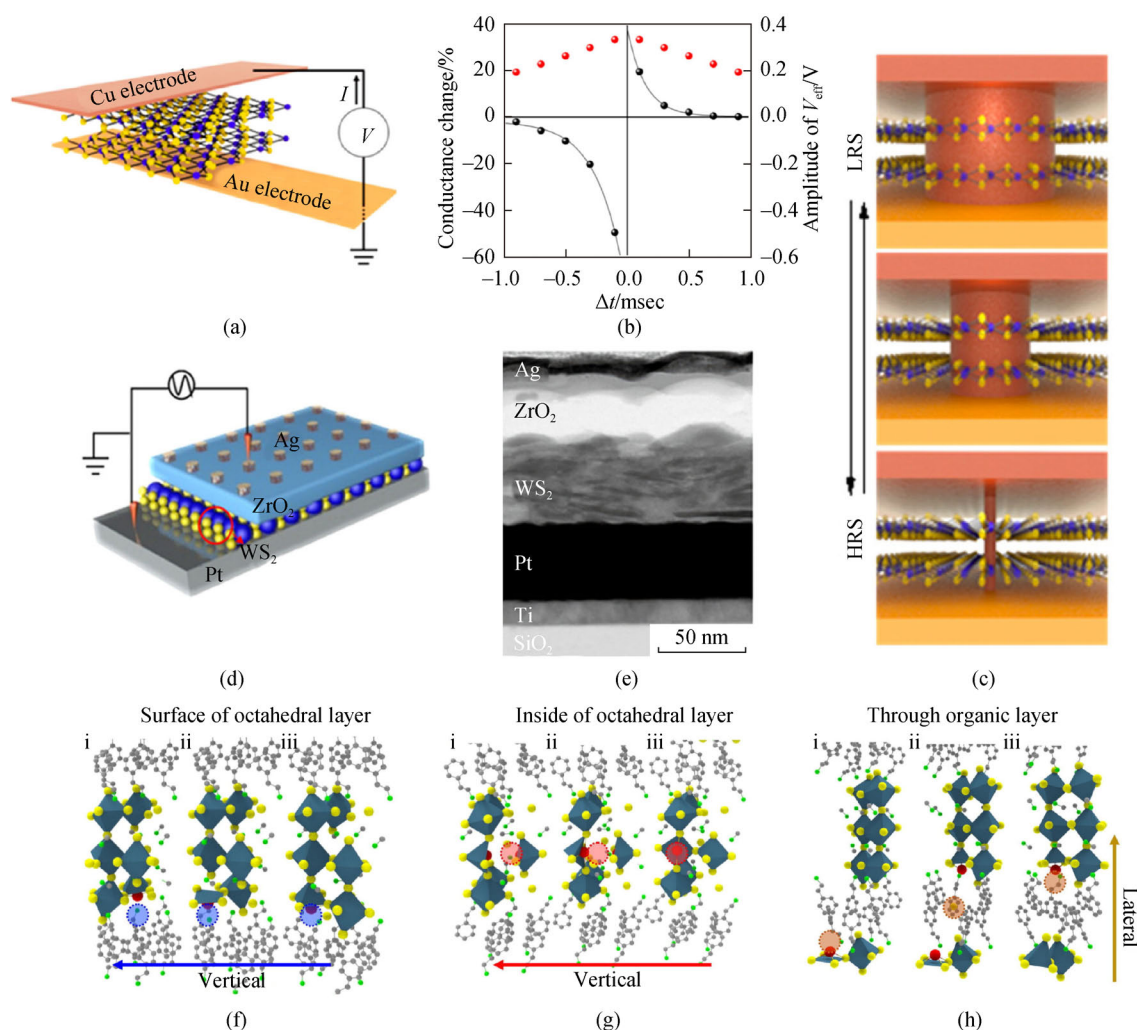


图 5 基于导电细丝或离子通道的两端忆阻器。(a) $\text{Cu}/\text{双层 MoS}_2/\text{Au}$ 忆阻器示意图, (b) 对脉冲时间依赖可塑性的模拟, (c) Cu 导电细丝的变化引起了高低阻态的转变^[23]; (d) $\text{Ag}/\text{ZrO}_2/\text{WS}_2/\text{Pt}$ 忆阻器示意图, (e) 器件结构的截面 TEM 照片^[64]; 卤化物钙钛矿薄膜中, (f) 空位沿表面, (g) 经过 PbI_6 内部, (h) 穿过有机层的扩散能垒比较^[68]

Fig. 5 Two-terminal memristors based on conductive filaments or ion channels. (a) Schematic of $\text{Cu}/\text{bilayer MoS}_2/\text{Au}$ memristor, (b) simulation of spike-timing-dependent plasticity (STDP) and (c) transition between high- and low- resistance states caused by Cu filament changes^[23]; (d) Schematic of $\text{Ag}/\text{ZrO}_2/\text{WS}_2/\text{Pt}$ memristor and (e) cross-sectional TEM image of the device structure^[64]; Comparison of vacancy diffusion barrier (f) along the surface (g) across the inside of PbI_6 octahedral layer (h) through the large organic layer^[68]

然而, 典型的导电细丝忆阻器易受细丝形成位置随机化的影响, 导致阻态的时空调节相对不可控。研究者提出了更多基于二维材料的忆阻器工作原理, 例如相变与空位迁移。其中, 相变忆阻器具有

良好的可靠性与循环稳定性, 并且一般具有多个可编程调控的阻态, 有利于储存更多信息^[70]。传统忆阻器材料的相变一般发生在晶相与非晶相之间, 而以 TMDC 为代表的二维材料, 天然具有半导体、金

属等多种相态并且带隙可调, 通过外加电压、掺杂等方法可以实现非易失的可逆相变, 从而具备神经形态应用的可行性。如图 6a 所示, Zhu 等^[71]研究了 MoS_2 中离子调制与离子耦合效应, 通过电场迁移调控局部锂离子浓度, 控制 MoS_2 的 2H 相与 1T' 相之间的转变, 证明了场驱动离子过程直接调制二维材料的潜力, 其输出曲线如图 6b 所示。Li 等^[72]报道了基于五边形 PdSe_2 2 种复位模式的反常电阻开关行为, 其中电子束辐照诱导局部相变, 在 PdSe_2 中形成异相晶界产生残留细丝, 促进导电细丝的形成。在准复位模式下的器件运行速率相较完全复位提升 6 倍, 表现出更低的工作电压、更长的保留时间以及更多电阻态。

控制二维材料中的缺陷分布, 例如空位或晶界等, 是调节器件沟道电导, 也是调控突触权重的常用方法之一。如图 6c 所示, Wang 等^[73]在单层 MoS_2

中通过激光直写构造 $\text{MoS}_2/\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$ 异质结构, 利用晶界工程实现了低功耗横向突触器件。图 6d 和图 6e 的 Raman 光谱、光镜与元素分布共同证明了激光直写法有效改变了材料性质, 引入了硫空位缺陷^[73]。Hus 等^[74]使用单层 MoS_2 原子片实现了电阻的非易失变化, 并通过原子成像、光谱学、缺陷结构与电子态计算证明了这种电阻变化源于金属取代硫空位的单缺陷。图 6f~图 6h 展示了忆阻器写入/重置过程中, S 空位被 Au 原子取代与恢复的扫描隧道显微镜 (STM) 照片, 对应的电学输出曲线如图 6i 和图 6j 所示^[74]。Yan 等^[75]报道了二维 WS_2 纳米片中空位诱导的突触行为, 指出电阻开关性能源于硫空位、钨空位的产生以及空位间的电子跃迁, 实现了低功耗神经形态计算。Li 等^[76]报道了基于 MoS_2 的横向两端忆阻器, 观察到整流介导与电导介导忆阻行为的转变, 即模拟脉冲编程的开关行为可以转换为具有瞬

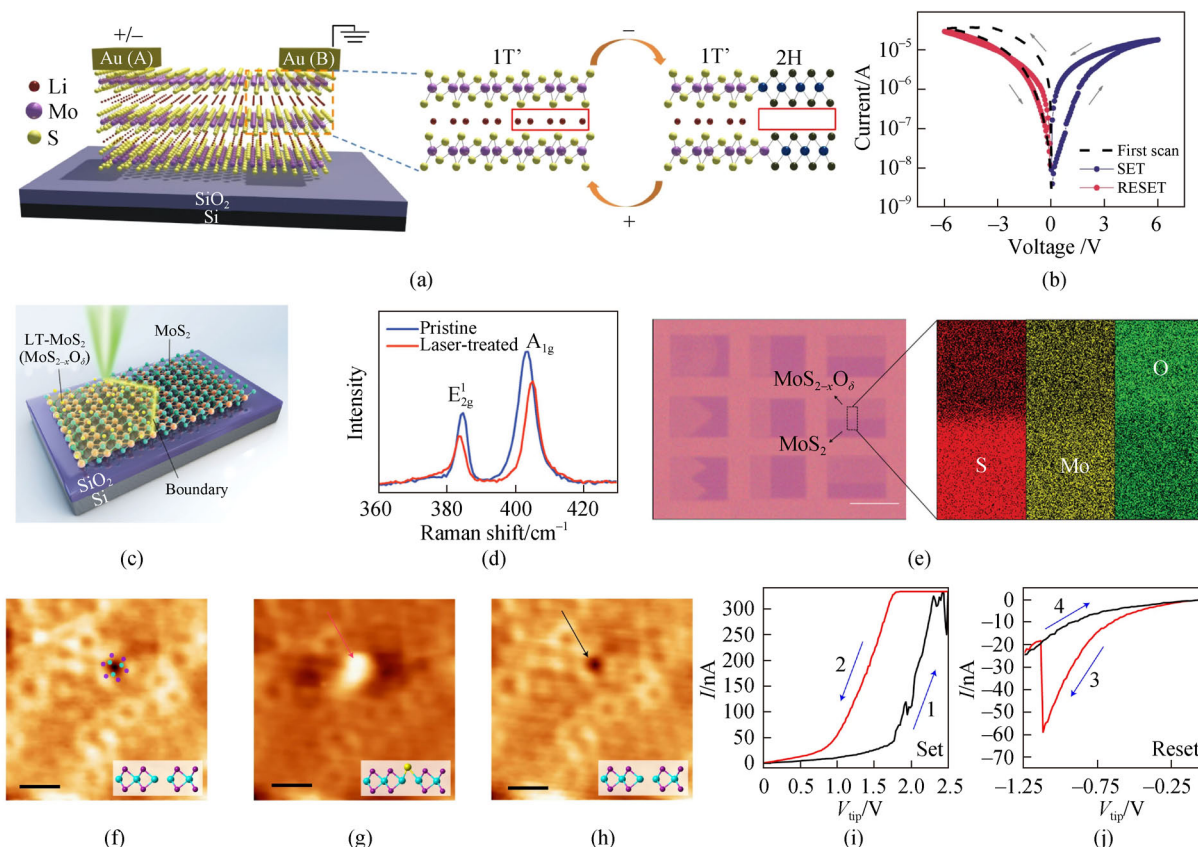


图 6 基于相变或缺陷的两端忆阻器。(a) 通过电场控制 Li^+ 迁移实现 MoS_2 的可逆 2H-1T' 相变, (b) 典型的输出曲线^[71]; (c) 通过激光直写形成单层 $\text{MoS}_2/\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$ 异质结, (d) 单层 MoS_2 激光直写前后的 Raman 光谱, (e) 光镜图像与 S、Mo、O 元素分布^[73]; (f) STM 观察 MoS_2 中单个硫空位缺陷, (g) 写入操作后金原子取代硫空位, (h) 重置操作后恢复初始状态, (i) 写入与 (j) 重置的电学输出曲线^[74]

Fig. 6 Two-terminal memristors based on phase transition or defects. (a) Electric-controlled reversible 2H-1T' phase transition of MoS_2 by Li^+ migration and (b) typical output curves^[71]; (c) Monolayer $\text{MoS}_2/\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x$ heterojunction formed by laser direct writing (d) Raman spectra of monolayer MoS_2 before and after laser direct writing (e) optical image and elemental distribution of S, Mo, O^[73]; (f) STM images of single sulfur-vacancy defect in MoS_2 (g) Au atom substitution of the sulfur vacancy after write operation (h) restoration of the initial state after reset operation (i) electrical output curves of write and (j) reset operations^[74]

间开关行为的准二进制忆阻器，这归因于 MoS_2 与金属电极之间肖特基势垒调制以及空位再分配。Sangwan 等^[77]报道了基于单层 MoS_2 内部晶界的忆阻器件，通过调节晶界触点的电阻实现了 10^3 的开关比以及动态负差分电阻特性。Shi 等^[78]制造的基于 hBN 的电子突触，可以在易失或非易失的状态下工作，从而模拟突触的短期与长期可塑性，忆阻特性源于 hBN 中相邻电极金属离子填充产生的硼空位，待机与编程功耗低至 0.1 fW 与 600 pW。Wang 等^[79]通过在 MoS_2 上外延生长 NbS_2 并自然氧化形成 $\text{MoS}_2/\text{NbS}_2/\text{NbO}_x$ 垂直异质结构，实现高效隧穿导电与近欧姆接触，相较机械剥离的 NbS_2 器件的迁移率提升了 140 倍，并可构建低功耗忆阻器以及各种柔性电子器件。Li 等^[27]基于金属-半导体-金属两端结构，实现了非易失性神经形态器件与光伏探测器的可重构器件。在金属-半导体结处存在脉冲可调的硫空位，用于调制短路光电流的极性与大小，揭示了硫空位运动诱导肖特基势垒的动态调制。尽管二维材料缺陷种类繁多、难以精准预测，但现代人工智能技术或可加速材料筛选与性能预测。Frey 等^[80]利用深度迁移学习、机器学习、第一性原理计算等方法，快速预测二维材料中点缺陷的关键特性，给出了百余种可能的掺杂缺陷结构

预测。

二维材料的忆阻机制十分丰富，常见两端忆阻器的对比如表 1 所示。研究者还利用材料内禀特性或器件结构设计，构造了一些多功能的两端忆阻器件。Zhang 等^[81]利用电场诱导 MoTe_2 发生结构相变，使其从 2H 半导体相转变为 T_d 导电相或 $2H_d$ 瞬态结构，在 MoTe_2 阻变式存储器中实现了 10 ns 的切换速度，并通过合金化降低了相变所需电场强度。Luo 等^[82]报道了基于二维层状 WSe_2 的突触忆阻器，同时具有短期与长期可塑性，表现出典型的双极非易失性电阻开关行为。Zhao 等^[83]基于温和氧化策略制备了双极性 MoTe_2 高性能横向忆阻器，利用 O_2 、 H_2O 的吸附掺杂优化有效栅极电压分布，放大了 2H- MoTe_2 的电阻变化范围，作为人工突触表现出较大的动态范围与良好的线性度。Fu 等^[84]提出了 $\text{Gr}/\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x/\text{Gr}$ 架构的两端光电忆阻器，其中忆阻行为归因于光激发载流子与氧相关离子耦合。器件可通过电荷/光子通量调节非易失性光响应度，在神经形态视觉领域具有重要应用。Wang 等^[85]开发了柔性衬底上一步机械剥离方法以及兼容柔性电子的低温 ALD 工艺，制造了基于 MoS_2 的可穿戴异质突触，具有电调制与光激发 2 种模式，长期增强/抑制的单尖峰能耗低至 18.3 aJ 与 28.9 aJ。

表 1 基于二维材料的两端忆阻器
Table 1 Two-terminal memristors based on 2D materials

Materials	Structure	Mechanism	Retention time/s	Endurance	Merits	Demerits	Reference
MoS_2	$\text{Cu}/\text{MoS}_2/\text{Au}$	Conductive filament	1.8×10^4	20	Low switching threshold	Low on/off ratio and endurance	[11]
ZrO_2/WS_2	$\text{Ag}/\text{ZrO}_2/\text{WS}_2/\text{Pt}$	Conductive filament	4.0×10^4	10^9	High speed and robust endurance	Complicated structure	[65]
CuInP_2S_6	$\text{Ag}/\text{CuInP}_2\text{S}_6/\text{Au}$	Ion migration	1.0×10^4	500	Multifunctional memristor	Trivial endurance	[69]
WS_2	$\text{Pd}/\text{WS}_2/\text{Pt}$	Ion migration	3.5×10^3	75	Ultralow power consumption	Low endurance	[75]
MoS_2	$\text{Au}/\text{MoS}_2/\text{Au}$	Phase change	8.0×10^3	10^4	High on/off ratio and low power consumption	Require precise Li^+ distribution	[71]
MoTe_2	$\text{Ni}/\text{Ti}/\text{MoTe}_2/\text{Au}/\text{Ti}$	Phase change	1.0×10^3		High speed and on/off ratio	Unmeasured endurance	[81]
MoS_2	$\text{Au}/\text{Ti}/\text{MoS}_2/\text{MoS}_{2-x}\text{O}_y/\text{Ti}/\text{Au}$	Grain boundary defect	4.0×10^3		Controllable grain boundary defect and low power consumption	Short electronic retention time	[73]
MoS_2	$\text{Au}/\text{MoS}_2/\text{Au}$	Grain boundary defect	1.0×10^2		Tunable grain boundary resistance	Uncontrollable grain boundary distribution	[77]

2.3 三端神经形态器件

尽管两端忆阻器结构简单、利于制造高密度忆阻器交叉阵列，但较少的端口数目限制了它对生物突触行为的模拟。而基于场效应晶体管(Field effect transistor, FET)的三端突触器件，可以同时实现外部刺激调控以及信号传递：通常使用栅电极作为信

号调制器，而源漏电极模拟突触前后神经元，表现出可控的器件性能与良好的稳定性。本文重点分析的三端突触晶体管将二维材料作为沟道，充分利用其对静电调控、电荷转移高度敏感的特性，使用栅极调节沟道电导。

最典型的三端突触晶体管是利用栅极控制电解

质实现的, 主要分为基于静电耦合机制的双电层 FET 与基于电化学掺杂的电化学晶体管。在双电层 FET 中, 栅极电压在电解质/沟道界面诱导形成纳米尺度双电层, 调节沟道载流子浓度。在电化学晶体管中, 栅极电压驱动沟道的电化学可逆掺杂过程, 实现电导的渐变调节。Zhu 等^[86]开发了基于二维范德华材料的离子栅控突触晶体管, 在过渡金属二硫化物与磷三硫化物层状晶体中, 通过栅极控制离子扩散动力学调控突触行为。Kireev 等^[87]开发了双层

石墨烯人工突触晶体管, 利用干燥的离子选择性膜, 同时实现了柔性(图 7a)、低功耗与生物相容性, 开关能量远低于生物突触的 1 fJ。器件结构如图 7b 所示, PMMA/Gr 薄膜附着在柔性的 Nafion 基底上。图 7c 展示了通过栅极施加的电脉冲调控 Nafion 中的质子团簇分布、进而改变电导态的示意图, 可逆调节多级非易失电导态的实验测量如图 7d 所示^[87]。Yang 等^[88]报道了超低电导的全固态突触晶体管, 利用锂离子基固态电介质与二维 α -MoO₃ 纳米片沟道,

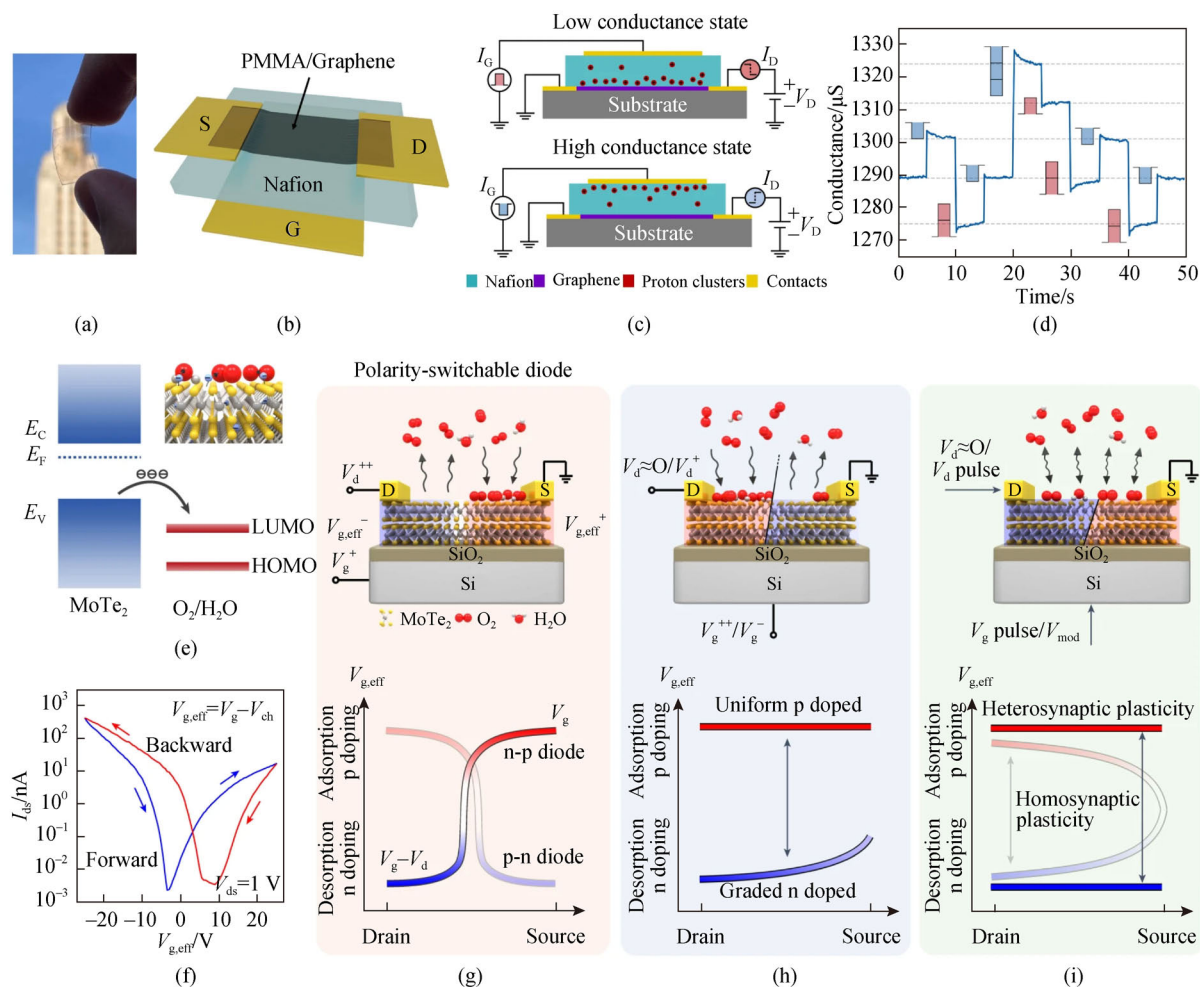


图 7 三端神经形态器件与可重构器件。(a) 生物相容的石墨烯人工突触晶体管图片与(b) 器件结构示意图, (c) 器件在低电导与高电导状态下的运行示意图, (d) 施加栅极电流脉冲实现多种可重复的电导水平^[87]; (e) MoTe₂ 与 O₂/H₂O 分子之间的电荷转移示意图, (f) $V_{ds}=1$ V 下 MoTe₂ 器件的转移特性曲线(有效栅压等于实际施加的栅压, 因为源漏电压很小), (g) 作为 n-p 或 p-n 二极管的工作原理图与有效栅压分布(h)作为存储器的工作原理图, 分别标识了均匀 p 掺杂状态与梯度 n 掺杂状态, (i)作为人工异突触的工作原理图, 在栅极或漏极施加正负脉冲以调节突触权重, 分别模拟异突触可塑性与同突触可塑性^[90]

Fig. 7 Three-terminal neuromorphic and reconfigurable devices. (a) Image of biocompatible graphene artificial synaptic transistor and (b) schematic of device structure (c) operation diagrams of device at low- and high- conductance states (d) current pulses applied to the gate to achieve multiple repeatable conductance states^[87]; (e) Schematic of charge transfer between MoTe₂ device and O₂/H₂O molecules (f) transfer characteristic curves of MoTe₂ device at $V_{ds}=1$ V, where the effective gate voltage equals the applied gate voltage because of the small V_{ds} (g) working mechanism diagram as n-p or p-n diode and effective gate voltage distribution (h) working mechanism diagram as memory device with uniform p-doping and graded n-doping states labeled (i) working mechanism diagram as artificial hetero-synapse, whose weight can be adjusted by positive/negative pulses at gate or drain, emulating hetero- and homo- synaptic plasticity respectively^[90]

基于锂离子在 $\alpha\text{-MoO}_3$ 中的可逆掺杂,可以在不形成细丝的前提下,非易失地调整沟道电导。Guo 等^[89]使用原位光学显微镜对晶体管沟道的局部能级成像,表明有机电化学晶体管的导通分为掺杂前沿传播与均匀掺杂 2 个阶段,而关断仅包含 1 个阶段,解释了有机电化学晶体管的关断快于导通的现象,并指出了离子传输是器件运行速度的瓶颈。Sharbati 等^[22]提出了电化学石墨烯突触,其中石墨烯的电导受到层间锂离子浓度的可逆调制,实现了低于 500 fJ 的开关能耗以及多达 250 个非易失电阻态的模拟可调性,器件具有良好的耐久性、保持性能与对称的电阻响应。

此外,研究者也在开发更多三端器件结构或工

作机制,例如使用铁电材料、浮栅结构或引入更多功能层等,基于二维材料的各种三端神经形态器件对比如表 2 所示。Kamaei 等^[91]将 $\text{WSe}_2/\text{SnSe}_2$ 异质结构与 Si 掺杂 HfO_2 高 k 铁电材料堆栈集成,在单一平台上创建了 2D FET、2D/2D 隧穿 FET、负电容 2D FET、负电容 2D/2D 隧穿 FET 4 种类型的逻辑开关。Paul 等^[92]利用浮栅工程构建了高性能 MoS_2 神经形态器件,展示了脉冲增强、沟道电导弛豫、尖峰时间依赖可塑性等突触特性。Huang 等^[93]通过混合氧化还原活性/非活性光固化/光图案化聚合物,制备了基于离子渗透半导体通道的垂直架构互补有机电化学晶体管,无需宏观电解质接触。

表 2 基于二维材料的三端神经形态器件

Table 2 Three-terminal neuromorphic devices based on 2D materials

Channel materials	Device type	Gate dielectric layers	Spike voltage	On/Off ratio	Merits	Demerits	Reference
Graphene	Electrolyte-gated FET	Nafion		12	Flexibility and ultralow nonlinearity	Low on/off ratio	[87]
MoS_2	Floating-gate FET	hBN	5	10^6	High on/off ratio	Complicated device process	[94]
WSe_2	Ferroelectric FET	P(VDF-TrFE)	8	30	Linearity and reconfigurable polarity	Require two transistors	[95]
$\alpha\text{-In}_2\text{Se}_3$	Ferroelectric semiconductor FET	Al_2O_3	6	10^3	Controllability and easy integration	Unmeasured stability	[96]
MoTe_2	Reconfigurable FET	SiO_2	20	10^4	Abundant reconfiguration with single gate	Slow switching speed	[97]

由于栅电极的引入,三端神经形态器件相较于只有源漏电极的两端器件,具有更多的调控模式,极大拓展了多功能器件的开发潜力。图 7e 展示了 $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$ 的最低未占分子轨道(Lowest unoccupied molecular orbital, LUMO)、最高占据分子轨道(Highest occupied molecular orbital, HOMO)与 MoTe_2 的能带结构,揭示了气体吸脱附过程的电子转移。Peng 等^[90]利用 MoTe_2 的双极特性(图 7f)以及气体吸脱附可逆电荷掺杂,基于栅极电压编程分级掺杂策略,在单栅极器件上实现了多种可重构功能,包括极性可切换二极管(图 7g)、存储器(图 7h)、布尔逻辑门、具有同质/异质可塑性人工突触(图 7i)等。器件作为二极管的开关比高达 10^4 ,作为人工异突触的调节功耗低至 7.3 fW。Pan 等^[97]基于二维 WSe_2 制备的同质结器件,呈现出栅极与漏极电压输入的极性组合控制的不同场效应特性,从而实现可重构的多功能逻辑与神经形态功能,该器件还可级联构建复杂的电路,例如只需要 3 个同质结器件即可实现突触回路的可重构 STDP 以及脉冲可调的突触增

强或抑制。Gao 等^[98]报道了基于生物材料/有机异质结的忆阻器,提出了 F-N 隧穿、络合反应、微孔去除驱动的器件电荷传导模式。

2.4 多端异突触器件

虽然两端忆阻器与三端突触晶体管已能模拟生物神经网络的许多功能,在神经形态计算中表现出可观潜力,但实际的突触权重受到前神经元、调节神经元等多个端口的共同调控。这表明开发多端突触器件,对丰富人工神经网络功能仍具有重要意义,例如引入更多电极端口或者考虑突触对光照、气体、磁场等环境信息的响应。He 等^[99]通过二维 WSe_2 的热氧化,构建了基于 WSe_2/WO_3 横向异质结构的四端器件,实现了每个尖峰 2.7 pJ 的超低能耗,忆阻行为来源于 H_2O 分子对中间过渡层的质子掺杂,促使低电导的 WO_{3-y} 转变为高电导的 $\text{H}_x\text{WO}_{3-y}$ 。基于此,器件电导可通过电压与可见光调控,类似于生物体突触权重可被周围的星形胶质细胞调节,源漏电压扫描可以改变器件阻态,而降低栅极电压将导致低阻态电导增大、高阻态电导基本不变,施加可见光

也可实现类似的栅控效果^[99]。Sangwan 等^[100]报道的多晶单层 MoS_2 上实现的六端忆阻晶体管, 利用偏压诱导 MoS_2 的缺陷运动改变肖特基势垒高度, 在单电阻状态下实现了 4 个数量级的栅极可调谐特性以及高开关比、良好的循环耐久性与状态保持, 并实现了两端忆阻器无法模拟的栅极可调异触功能。He 等^[101]开发的范德华异质结构双栅多端忆阻器件, 表现出优异的非易失多阻态性能, 可实现 50 ns、7.3 fJ 的高速低能耗编程以模拟突触权重更新。

此外, 基于铁电或浮栅等机制的晶体管架构同样可用于制造多端异触装置。Luo 等^[102]开发了用于多功能存内计算的双栅二维铁电晶体管, 利用双铁电耦合效应丰富了二维晶体管的静电行为, 在单极 MoS_2 中实现了逻辑与、逻辑或、逻辑同或等功能, 演示了多种关键突触功能以及人工神经网络的系统级模拟。Cho 等^[103]开发了用于高精度突触操作的双浮栅范德华晶体管, 与单栅极传统器件相比, 该器件表现出更好的非易失存储性能, 实现了大于 100 V 的大存储窗口、约为 1×10^7 的高开关比、大于 5000 s 的保存时间以及 500 次以上的循环耐久性, 这主要归功于电荷存储容量的增加与空间再分布特性。Yan 等^[104]基于不对称双层 Gr/hBN 莫尔异质结构, 实现了在室温下工作的莫尔突触晶体管, 器件功耗低至 20 pW, 不对称的莫尔势产生了稳健的电子棘轮态, 从而可以实现滞回、非易失性电荷载流子注入引起的电导改变, 双栅莫尔异质结构中的不对称栅控实现了多样化的生物神经形态功能, 使其可用于高效存内计算以及边缘硬件加速。Luo 等^[105]开发了基于铁电场效应的二维 TMDC 人工光电忆阻晶体管, 其中二维 WS_2 位于铁电 PZT 薄膜上, WS_2 沟道表现出电压、光照可控的忆阻开关, 归因于下层 PZT 薄膜可通过电学、光学调节的铁电畴模式。

2.5 其他新型二维神经形态器件

基于二维材料的独特物理化学性质以及可扩展性, 研究者开发了更多新型神经形态器件, 其工作机制、器件架构与传统电子器件有明显差异。Mei 等^[106]开发了一种用于处理神经形态信号的仿生二维纳米流体离子晶体管, 利用 MXene 构造亚 1 nm 的层间通道, 通过施加栅控电压产生跨膜电位激活离子晶体管, 实现了~2000 的开关比。通过不对称的 PET/MXene 复合纳米流体, 器件可实现从双极到单极的转变, 获得 $560 \text{ mV} \cdot \text{dec}^{-1}$ 的亚阈值摆幅, 为基于离子的类脑计算提供可能途径。Emmerich 等^[107]基于二维材料的可扩展工艺, 制造了带有机-离子

忆阻开关的纳米流体逻辑门, 利用入口的高度不对称性实现了 9~60 的开关比。Deng 等^[108]开发了一种本征缺陷驱动无栅极神经形态光电晶体管, 通过设计圆顶状形态的缺陷 $\text{Fe}_7\text{S}_8/\text{MoS}_2$ 独特异质结构, 借助相邻 Fe_7S_8 中的本征缺陷实现有效的光载流子捕获。该器件表现出显著的光可调突触行为, 单个光脉冲下的记忆时间长达 800 s。Tsai 等^[109]基于 hBN/ReSe₂/hBN 二维异质结构与光诱导捕获机制, 开发了可作为晶体管与存储器工作的可重构器件。该器件具有非易失性与可调极性, 利用光诱导捕获机制将光生载流子驱动到 hBN 与 SiO_2 衬底之间的界面中。Zha 等^[110]开发的基于 Te 的二维范德华异质结构光电浮栅存储器件, 具有 1×10^8 开关比、100 ns 开关速度、4000 次循环耐久性、4000 s 保持时间以及非易失的多位光电可编程特性。

3 二维神经形态器件与系统的应用

3.1 存算一体忆阻器阵列

作为生物神经网络的典型代表, 人脑由大量神经元与突触组成。同理, 人工神经网络的硬件实现也需要高密度集成的忆阻器。图 8a 展示了常见的忆阻器 Crossbar 集成阵列架构, 它由相互垂直的顶部与底部金属线组成, 分别称为字线和位线, 而忆阻器在字线与位线的交叉处, 对应的等效电路如图 8b 所示。这种交叉阵列利用忆阻器的非易失存储、多阻态调控等特性, 直接模拟神经网络的节点权重, 并实现并行的矩阵运算, 从而加速神经网络的计算。例如图 8c 和图 8d 展示了非平衡、平衡神经网络的忆阻器实现方案, 它们分别使用额外的参考列或成对忆阻器实现权重的负值表示。基于氧化物忆阻器的 Crossbar 阵列已被广泛报道, 例如 Choi 等^[111]使用 $3 \times 10 \times 10$ 氧化钨忆阻器阵列, 开发了用于学习与预测时间序列信息的三维集成多层物理储备池。然而, 传统忆阻器网络的高密度小型化集成, 同样受限于硅基器件微缩后的非理想效应。近年来, 基于二维神经形态器件的电路设计与集成, 日益受到学术界与工业界的广泛关注。

对于垂直结构的二维材料两端忆阻器, 可以直接利用 Crossbar 架构实现规模化集成。Chen 等^[113]使用化学气相沉积的 hBN 作为阻变材料, 制造了高密度忆阻交叉阵列, 图 8e~图 8g 分别展示了阵列器件的光镜图片、SEM 照片、AFM 照片, 清晰显示了沟道材料与阵列电极。图 8h~图 8j 的电学测试证明了 hBN 忆阻器的循环稳定性与器件均一性, 实现

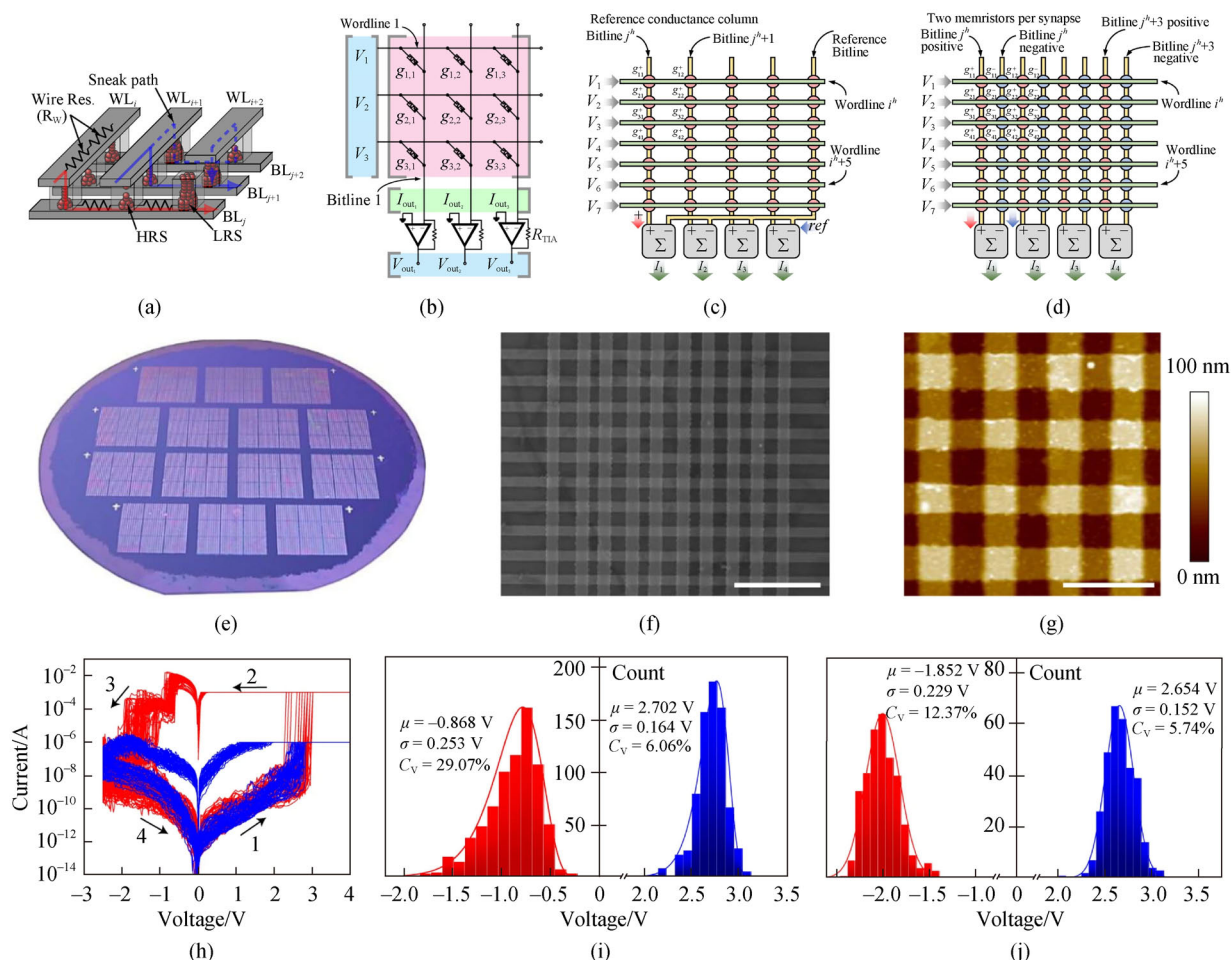


图 8 忆阻器交叉阵列构成的存算一体架构。(a) 交叉阵列的示意图(红线与蓝线表示流经顶部字线与底部位线的电流, 利用导电细丝表示了忆阻器的不同阻态), (b)交叉阵列的等效电路图(展示了输入电压、输出电流以及将电流转化为模拟电压向量的跨阻放大器), (c)非平衡与(d)平衡人工神经网络基于忆阻器的实现^[112]; (e) 分布着 Au/hBN/Au 忆阻器交叉阵列的两英寸晶圆图片, (f) 750 nm×750 nm 的 Ag/hBN/Ag 忆阻器阵列的 SEM 图像与(g) AFM 表面形貌图, (h) 单个 Au/hBN/Au 忆阻器在 120 圈循环中的输出曲线, (i)1 mA 电流限制下, 在 48 个器件中写入与重置电压的累积分布, (j)1 μA 电流限制下, 在 16 个器件中写入与重置电压的累积分布^[113]

Fig. 8 In-memory computing architecture based on memristor crossbar. (a) Sketch of memristor crossbar, where red and blue lines represent the current flowing through the top word lines and bottom bit lines, and conductive filaments illustrate the memristor's different resistance states (b) equivalent circuit diagram of the crossbar, including input voltage, output current and the transimpedance amplifier converting current to analog voltage vector (c) unbalanced and (d) balanced artificial neural network implemented based on memristors^[112]; (e) Optical image of two-inch wafer with Au/hBN/Au memristor crossbar (f) SEM image (g) AFM image of 750 nm×750 nm Ag/hBN/Ag memristor crossbar (h) I - V curves of single Au/hBN/Au memristor over 120 cycles (i) Cumulative distribution of set/reset voltages for 48 devices under 1 mA current limit and (j) for 16 devices under 1 μA current limit^[113]

了 98% 的高产率、1.53% 的低周期间可变性以及 5.74% 的低器件间可变性。Migliato 等^[114]使用晶圆级制造工艺, 开发了基于单层 MoS₂ 存储器的大规模集成向量矩阵乘法处理器, 制备了 32×32 的 MoS₂ 浮栅场效应晶体管阵列。该阵列实现了高良率与低器件差异, 支持单脉冲编程以及多级存储, 允许高效的开环编程方案以及并行的信号处理。Zhu 等^[115]报道了用于神经形态计算的高集成密度 2D-CMOS 混合微芯片, 其中 CMOS 晶体管精准控制了 hBN 忆阻器的电流, 0.053 μm² 的忆阻器具有 500 万次的

循环耐久性, 实现了适用于脉冲神经网络(Spiking neural network, SNN)的尖峰时间可塑性。Tang 等^[116]使用溶液处理方法大规模制备了 MoS₂, 开发了用于存内计算的晶圆级模拟阻变存储阵列, 该阵列器件具有出色的耐用性、长内存维持时间、低器件间差异、高模拟开关比以及线性电导更新特性, 利用片间硫空位扩散调节开关特性, 并可通过堆叠 MoS₂ 实现单片三维内存集成。Lu 等^[62]开发了一种二维材料电路的低温单片三维集成方法, 通过对预制电路层进行范德华层压, 实现了垂直方向上 10

个电路层的单片三维集成,并将加工温度控制在了 120 °C。

利用二维材料的独特电子特性,可以进一步简化电路设计,降低单器件面积或电路模块复杂度。Chen 等^[25]使用二维材料的内在极性制备了神经形态逻辑门,例如双极性 WSe₂ 制备 XNOR 门、p 型黑磷制备 NOR 门、不同厚度的 n 型 MoS₂ 制备 OR 与 AND 门,并利用一个 WSe₂ 神经晶体管与一个 MoS₂ 神经晶体管实现了 2T2R 的配置,相较传统 MoS₂ 电路设计节约了 78% 的面积。Tong 等^[117]探索了神经形态硬件中外围电路与存储器的同构,构筑了基于 WSe₂ 与铌酸锂级联结构的非线性器件,开发了二进制分类系统以及三元内容可寻址存储器。Bessonov 等^[118]研究了用于可印刷电子元件的多级忆阻与电容开关,使用 2 个印刷银电极与溶液处理的 MoO_x/MoS₂、WO_x/WS₂ 构筑器件,该器件表现出可调的大电阻范围与低编程电压,并可通过开关动力学的强非线性实现电脉冲控制的突触可塑性。

3.2 响应环境信号的感存算一体器件与系统

生物体不仅具备计算能力,还可通过视觉、嗅觉、触觉等感官,获取外部环境的信息并处理。尽管一般的忆阻器可以实现存内计算、突破存储墙限制,但是环境信息向电信号的转换仍然需要数模转换器等额外电路,制约了运行效率与集成密度^[119, 120]。通过利用二维材料本身的独特响应性质,研究者开发了兼具传感功能的二维神经形态器件。此类器件不仅能够实现高效的存内计算,还能直接收集环境信号,实现传感模块与存内计算功能的集成。配合脉冲神经网络等算法设计,可构建高效的感存算一体系统^[121]。在生物体中,视觉提供了绝大多数环境信息,而感存算一体神经形态器件的重要应用之一便是视觉感知系统^[122]。

视觉系统的首要功能是分辨不同位置的光强分布,甚至区分不同颜色的信息。Jiang 等^[123]报道了基于双电层 MoS₂ 的多功能光电混合突触晶体管,首次成功证明了光电与时空的四维混合集成。其中光驱动突触表现出增强效果,电驱动突触可表现出增强或抑制效果。Wang 等^[124]使用 MoS₂/PTCDA 异质结构构筑了高效光电双调制多功能混合突触,可实现最小 3% 的抑制以及最大 500% 的增强。图 9a 展示了栅极正/负电脉冲对沟道电导的双向调控,图 9b 展示了光脉冲对沟道电导的增强与 PPF 效应^[124]。Rehman 等^[125]利用氧等离子体处理 GaSe 内存晶体管,在单器件中实现了多种逻辑门与内存行为。利用

GaSe 表面的浅层/深层缺陷态,该器件实现了对载流子的捕获/去捕获,进而产生正/负栅极电压下的负/正光导。1×8 的内存晶体管阵列(图 9c)可用于 ASCII 编码(图 9d),为新兴的神经形态计算提供逻辑与存储器件功能,如图 9e~图 9h 所示^[125]。Ci 等^[126]构建了全范德华的二维铁电 α -In₂Se₃/SnSe 异质 p-n 结,作为光电突触模拟视觉功能,得益于 p-n 结与光诱导铁电极化切换共同调制的可重构内建电场,该器件展现了二维铁电 p-n 结在高精度、多功能光电视觉突触中的巨大潜力。Hou 等^[127]提出的基于晶圆级范德瓦尔斯二烯/Gr/PbS 量子点异质结构的两端光学突触,可以模拟光通路中的兴奋/抑制突触行为,具有多种电导态、低噪声以及线性对称的电导更新曲线,基于此光学突触阵列,可构建可见信息传感记忆处理系统。

对于更大规模的器件集成与应用落地,生物视觉系统可以给予研究者许多启发,例如人类通过视网膜感知视觉信息形成脉冲信号,将其传递到大脑进行图像处理,如图 9i 所示。Zhou 等^[128]利用双末端光电式电阻随机存取存储器(Optoelectronic resistive random access memory, ORRAM)突触阵列装置(图 9j),基于非易失性的光可调突触,配合人工神经网络(Artificial neural network, ANN)实现高效神经形态视觉系统,为边缘计算与物联网提供可能方案。Soliman 等^[129]开发了一种基于 ReS₂/hBN/CuInP₂S₆ 的铁电场效应晶体管,演示了其中铁电极化态的电学与光学控制,实现了高达 1×10^7 的开关比、宽达 7 V 的滞回存储窗口以及超过 1×10^3 s 的多种状态保持时间,该器件的工作机制包括带间光生载流子注入 ReS₂,以及光伏电压进入 CuInP₂S₆ 等。

在弱光或低功耗条件下,需要开发特殊的光电神经形态器件以满足需求。Wang 等^[130]受视网膜启发,提出了基于二维异质结构的中红外(Mid infrared, MIR)光电器件(图 10a),支持数据感知与编码的同步进行,如图 10b 和图 10c 所示。该器件具有宽动态范围、高精度、灵活适应 MIR 强度等优点,可以感知 MIR 的照明强度,并借助全光激发机制与随机近红外(Near infrared, NIR)采样终端,将强度编码为尖峰序列,用于后续的神经形态计算。NIR 采样终端的光脉冲序列均值、标准差可调节,使器件获得最佳的采样精度与动态范围,如图 10d~图 10f 所示^[130]。Zhu 等^[131]开发了双层二维分子晶体 p-n 异质结,实现了高性能的双向突触行为,该器件展现出弱光下的显著响应以及栅极电压可调的

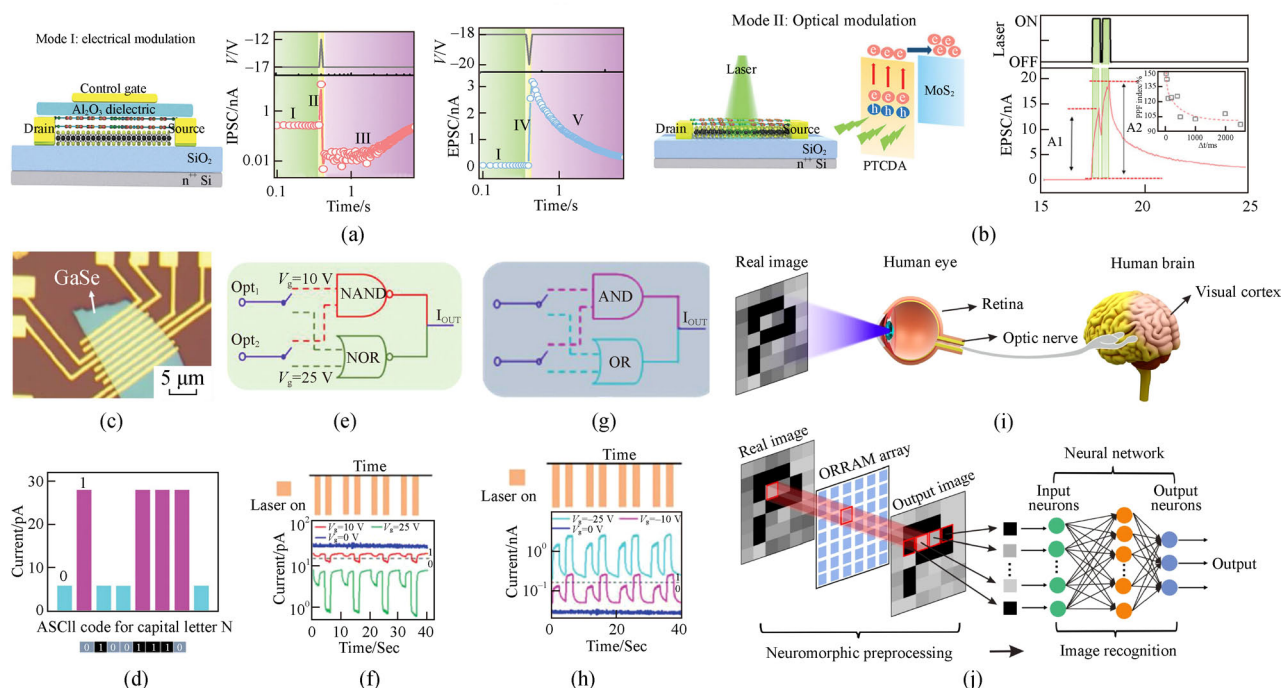


图 9 光电神经形态器件与系统集成。(a) 电调制模式下, 基于 $\text{MoS}_2/\text{PTCDA}$ 杂化异质结的器件架构(正脉冲激发抑制性突触后电流, 而负脉冲激发兴奋性突触后电流), (b) 光调制模式下的器件结构示意图^[124](绿色区域表示激光脉冲照射); (c) 单片 GaSe 上集成的 1×8 忆阻器阵列光学图片与(d) 8 位 ASCII 示例编码字母“N”, (e) NAND、NOR 逻辑门操作示意图与(f) GaSe 器件在零、正栅压下时间依赖的光响应, (g) AND、OR 逻辑门操作示意图与(h) GaSe 器件在零、负栅压下时间依赖的光响应^[125]; (i) 人类视觉系统示意图与(j) 基于光电式电阻随机存取存储器的人工神经形态视觉系统, 可用于图片预处理与图像识别^[128]

Fig. 9 Optical neuromorphic devices and system integration. (a) Device architecture based on $\text{MoS}_2/\text{PTCDA}$ heterojunction in electrical modulation mode, where positive/negative pulses induce IPSC/EPSC (b) optical modulation mode, where the green area indicates laser pulse irradiation^[124]; (c) Optical image of 1×8 memristor array on monolithic GaSe and (d) example of 8-bit letter “N” encoded by ASCII (e) schematic of NAND and NOR logic gate operations and (f) time-dependent photonic response under zero/positive gate bias (g) Schematic of AND and OR logic gate operations and (h) time-dependent photonic response under zero/negative gate bias^[125]; (i) Schematic of human visual system and (j) artificial optical neuromorphic visual system based on ORRAM for image preprocessing and recognition^[128]

兴奋/抑制突触行为, 依此可搭建运动检测网络。Lei 等^[132]展示的基于二维氧化铋纳米片的忆阻器, 表现出双极电阻开关以及光/电诱导的突触可塑性, 为低功率光电突触以及类视网膜器件提供新的材料与策略。Guo 等^[133]展示了一种受视网膜启发的二维 MoS_2 视觉传感器, 实现了宽带感知与预处理功能, 并将三维应力稳定引入柔性光电子传感器中, 改善了传感带宽与光响应度。Wu 等^[134]提出了材料-算法协同设计, 利用具有高效激子解离与空间电荷传输特性的半导体 p-NDI , 开发了基于可穿戴晶体管的动态传感器储备池计算系统, 能够以较低的训练成本模拟人类视网膜功能。

随着物联网的快速发展, 智能视觉的应用场景日益多元化。在自动驾驶、体育赛事等领域, 针对运动物体的识别跟踪技术愈发重要。Zhou 等^[135]报道了计算事件驱动的视觉传感器, 消除了传统基于帧视觉系统的信息冗余, 仅保留关键的动态运动信

息, 如图 10g 所示。该传感器可将捕捉到的动作信息直接转换为可编程、稀疏、信息丰富的尖峰信号, 输入用于运动识别的脉冲神经网络, 从而消除了传感与计算单元间数据传输的限制, 如图 10h 所示。每个视觉传感器由两个极性相反的光电二极管并联组成, 具有 $5 \mu\text{s}$ 的时间分辨率^[135]。Jiang 等^[136]开发了快速可扩展的溶液处理策略, 用于制备纳米粒子掺杂的二维纳米片薄膜, 并通过模拟眼前庭线索的多感官整合, 展示了基于多感官神经形态柔性器件的生物启发运动认知系统。Zha 等^[137]报道了 Te 基二维范德华异质结光电器件, 其中铁电 CuInP_2S_6 与 Te 沟道赋予器件电脉冲长期增强/抑制以及 1550 nm 激光脉冲的短期增强, 进而构建完全忆阻式的传感器内储备池计算系统, 同时实现光纤传输信息的感应、解码与学习。

除视觉外, 嗅觉、听觉、触觉等也是生物体感知环境信息的重要手段, 多种感官信息的融合推理

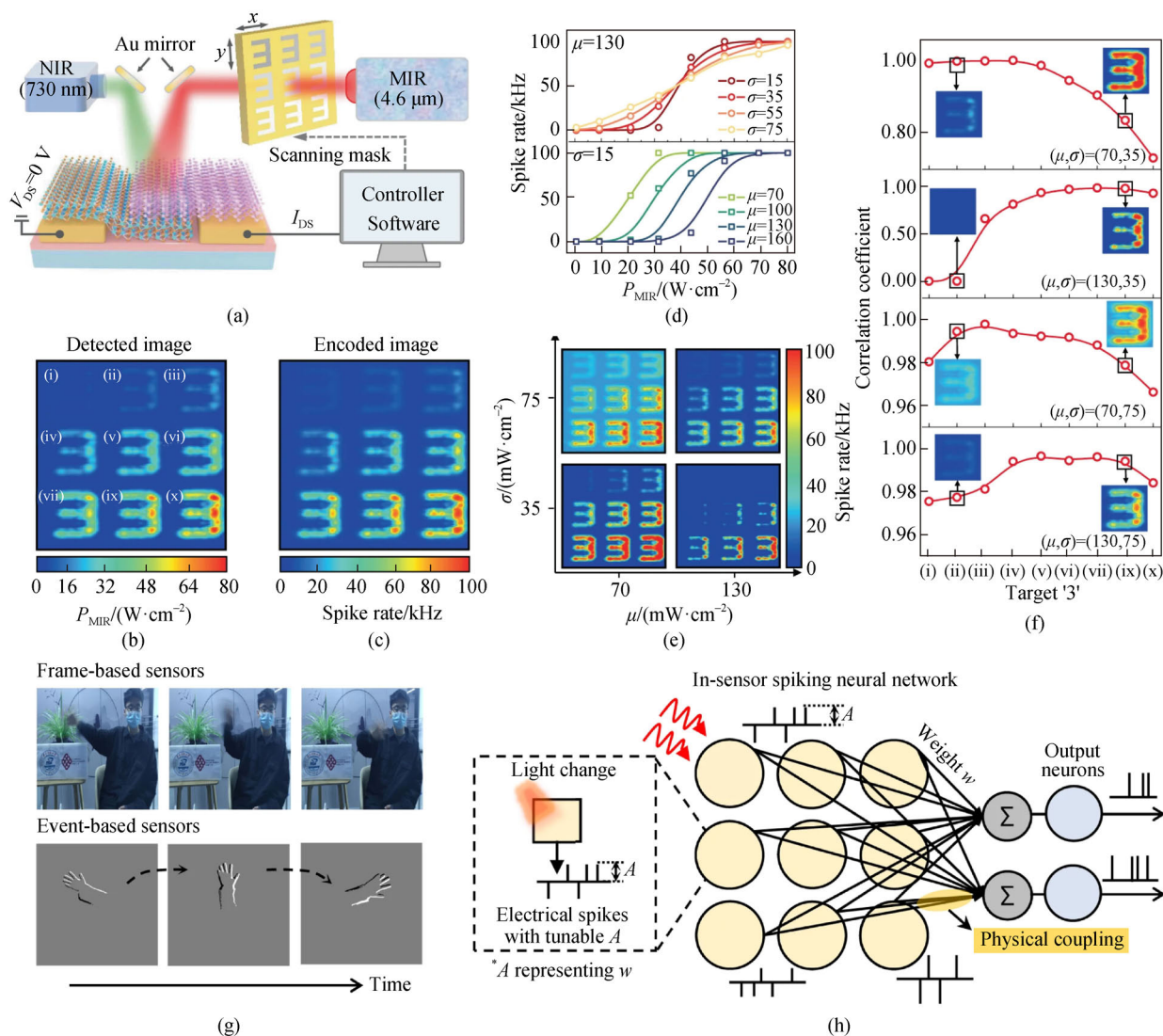


图 10 用于特殊视觉场景的神经形态视觉系统。(a) 光电视网膜感知与编码 MIR 的测试装置示意图(其中金属掩膜提供 9 个数字 MIR 目标), (b) 直接检测到的 9 个 MIR 图像与(c) 编码图像, (d) 尖峰速率随 MIR 光强变化的实验结果, (e) 在不同均值与方差下编码图像的结果(允许可调的动态范围与适配 MIR 光强的编码准确率), (f) 编码目标与原始图像的相关系数^[130]; (g) 基于帧与基于事件的视觉系统比较(前者以固定的帧速率记录所有像素, 包括动态运动与静态背景, 而后者仅异步捕获局部像素级别的光强变化), (h) 结合事件驱动、传感器内计算与脉冲神经网络, 将动作变化转换为可编程的尖峰^[135]

Fig. 10 Neuromorphic visual system for special scenes. (a) Schematic of optical retinomorphic sensing and encoding MIR setup, where the metal mask provides nine digital MIR targets (b) nine directly detected MIR images and (c) encoded images (d) experimental results of spike rate changing with MIR light intensity (e) encoding images under different μ and σ , which allows flexible dynamic range and encoding precision for different MIR light intensity (f) correlation coefficient between encoded targets and original images^[130]; (g) Comparison of frame- and event- based visual systems (h) combination of event-driven sensors, in-sensor computing and spiking neural network to convert motion into programmable spikes^[135]

能够帮助生物体全面了解环境并做出决策。因此在仿生领域, 开发更多感知种类的神经形态感存算系统具有重大意义。Zhao 等^[138]受生物气体受体信号通路的启发(图 11a), 报道了气体-缺陷协同相互作用机制(图 11b), 利用有效栅压调控的气体分子吸附脱附过程, 将二维 TMDC 忆阻器的阻变能力提升了 10 000 倍以上, 实现了超过 200 的动态范围,

如图 11c~图 11e 所示。器件的电阻状态数目达到 256 个, 编程与读取功耗分别低于 100 pW 与 1 pW, 实现了多种突触可塑性的模拟^[138]。Wang 等^[139]基于大规模单片集成纳米管传感器阵列(图 11f), 开发了仿生嗅觉芯片。器件阵列具有较均匀的初始阻值分布, 如图 11g 所示, 变异系数为 48.79%。图 11h 展示了仿生嗅觉系统对 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6}$ 丙酮气

体的动态响应行为,表明气体响应的可靠性以及不同器件的差异化传感行为。通过利用神经网络模型处理不同气氛下的器件电导变化,该系统具备高精度的气体分类功能。对于 8 种不同浓度与湿度的气体,该系统在 500 个训练周期后达到了 99.04% 的预测准确率,展示了气体传感器件阵列与卷积神经网络模型的良好配合,并且最多可区分 24 种气味。将嗅觉芯片与带有视觉传感器的机器狗相结合,可以识别盲盒内的物品^[139]。Das 等^[140]开发了用于音频计算的仿生二维晶体管,器件组成包括多个带有纳米间隙的分离栅极、作为沟道连接源漏电极的半

导体 MoS_2 、可调谐 RC 电路、用于模仿声音定位 Jeffress 模型的双耳时间延迟神经元,实现了高于仓鸮生物体若干数量级的仿生精度。Sun 等^[141]报道了基于焦耳热与多功能掺杂诱导金属-绝缘体相变的突触计算,实现了突触的可调兴奋与抑制,并展示了利用突触对声音强度、频率依赖的响应行为,以实现精确的声音定位。Ding 等^[142]报道的基于不对称离子电荷注入的新型超灵敏水凝胶触觉传感器,仅需数十毫伏的外部工作电压,并具有极低的检测限以及超高灵敏度,在压力测试下的循环可靠性表现出色。

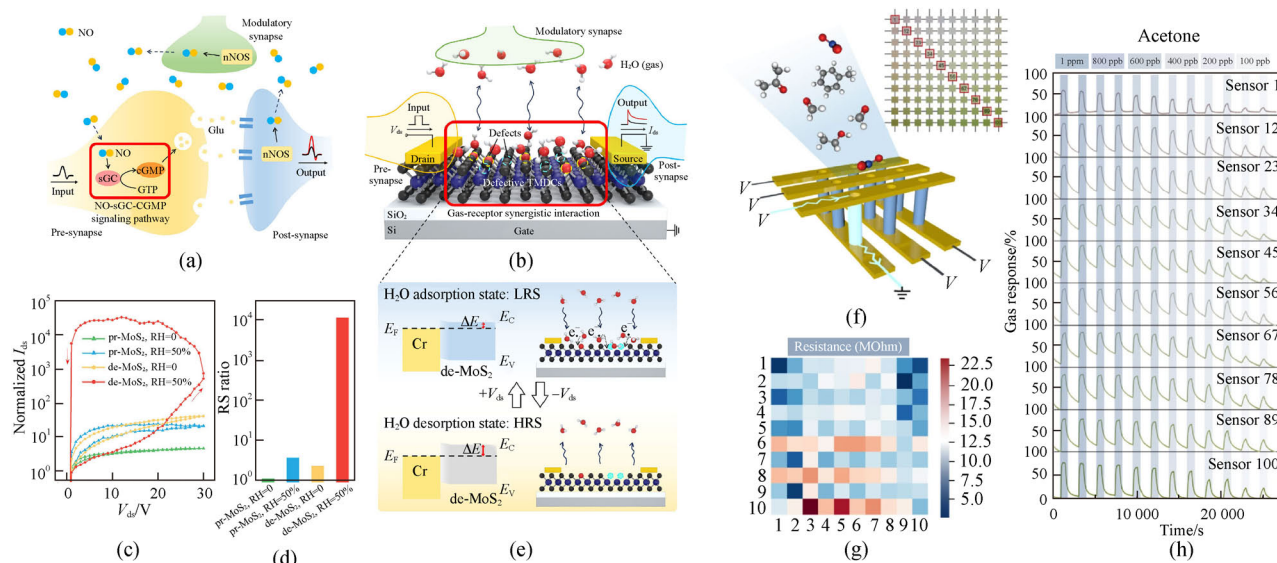


图 11 神经形态嗅觉系统。(a) 生物体中通过 NO-sGC-cGMP 信号通路调控突触可塑性的示意图, (b) 二维 TMDC 神经形态器件中的气体-缺陷相互作用, (c) 原始 MoS_2 与缺陷 MoS_2 晶体管在不同湿度环境中的输出曲线与 (d) 相应的开关比, (e) 基于气体-缺陷相互作用的 MoS_2 忆阻器(通过施加正/负源漏电压可逆调节器件阻态)^[138]; (f) 仿生嗅觉芯片的交叉阵列示意图与 (g) 10×10 气体传感器阵列的电阻分布, (h) 在干燥空气背景下, 传感器阵列芯片对 $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6}$ 丙酮氛围的动态响应^[139]

Fig. 11 Neuromorphic olfactory system. (a) Schematic of synaptic plasticity regulation via the NO-sGC-cGMP signaling pathway in organisms and (b) gas-defect interaction in 2D TMDC neuromorphic devices (c) output curves of pristine/defective MoS_2 in different humidity environments and (d) corresponding on/off ratios (e) MoS_2 memristor based on gas-defect interaction, whose resistance states is reversibly adjusted with positive/negative V_{ds} ^[138]; (f) Schematic of crossbar array on bionic olfactory chip (g) resistance distribution in 10×10 gas sensor array (h) response of sensor array to acetone atmosphere against dry air, from $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-6}$ ^[139]

3.3 面向复杂环境的神经形态器件应用

随着人工智能的高速发展,其应用场景日益复杂多样化,例如深井钻探的井下作业环境温度超过 200°C , 空间探测的航天器表面经历 $-100 \sim 500^\circ\text{C}$ 的剧烈热循环、宇宙高能粒子辐射的冲击,这对神经形态器件的极端环境耐受性提出了苛刻要求^[143, 144]。二维材料具有独特的微缩优势与可调的物化性质、优异的响应能力,为小尺寸、低功耗的极端环境神经形态系统的构建提供了可能的解决方案,尤其在资源受限的应用场景中展现出可观的应用潜力。

在极端环境中,材料与器件的本征稳定性是首要考量因素。尽管二维材料有大量原子暴露于表面,在高温下容易发生氧化或分解,但研究表明部分二维材料仍具有良好的热稳定性。例如单层石墨烯在空气中可耐受 500°C 的高温, hBN 在空气与惰性气氛中分别可耐受 1000°C 与 2850°C 的高温^[145, 146]。对于广泛研究的 MoS_2 材料, Wang 等^[147]报道其在空气氛围的 Si/SiO_2 基底上可耐受 250°C 的高温。Zou 等^[148]在 MoS_2 的顶部与底部封装 hBN,有效隔绝水蒸气与氧气,搭建的场效应晶体管可在 300°C

下工作。Wu 等^[149]在 MoS_2 与电极界面插入单层石墨烯作为缓冲层，有效缓解了高温下的接触界面失效问题，使器件在 350°C 下退火 1 h 仍能保持稳定。

对于二维材料神经形态器件，高温带来的问题包括热扰动导致阻变范围变小、保持时间缩短、功耗增加等。热扰动为系统提供了随机的能量涨落，在高温环境下这种热噪声对突触权重的影响更加显著。以导电细丝忆阻器为例，热扰动会加速原子扩散，导致在未施加编程电脉冲时，导电细丝也会发

生重构，引起器件电导值变化、阻态保持时间下降。基于缺陷、相变等机制的忆阻器，同样面临热扰动带来的空位迁移、界面重构等问题。这种不稳定性宏观表现为器件电导值的漂移，需要更频繁的状态刷新以维持阻态，导致系统能耗增加。

为应对这些挑战，可以通过引入耐高温的开关层或者设计特殊结构以维持高温下稳定的阻变机制^[150]。对于两端忆阻器，主要通过特定二维材料的直接堆叠，构筑耐高温的范德华异质结。如图 12a

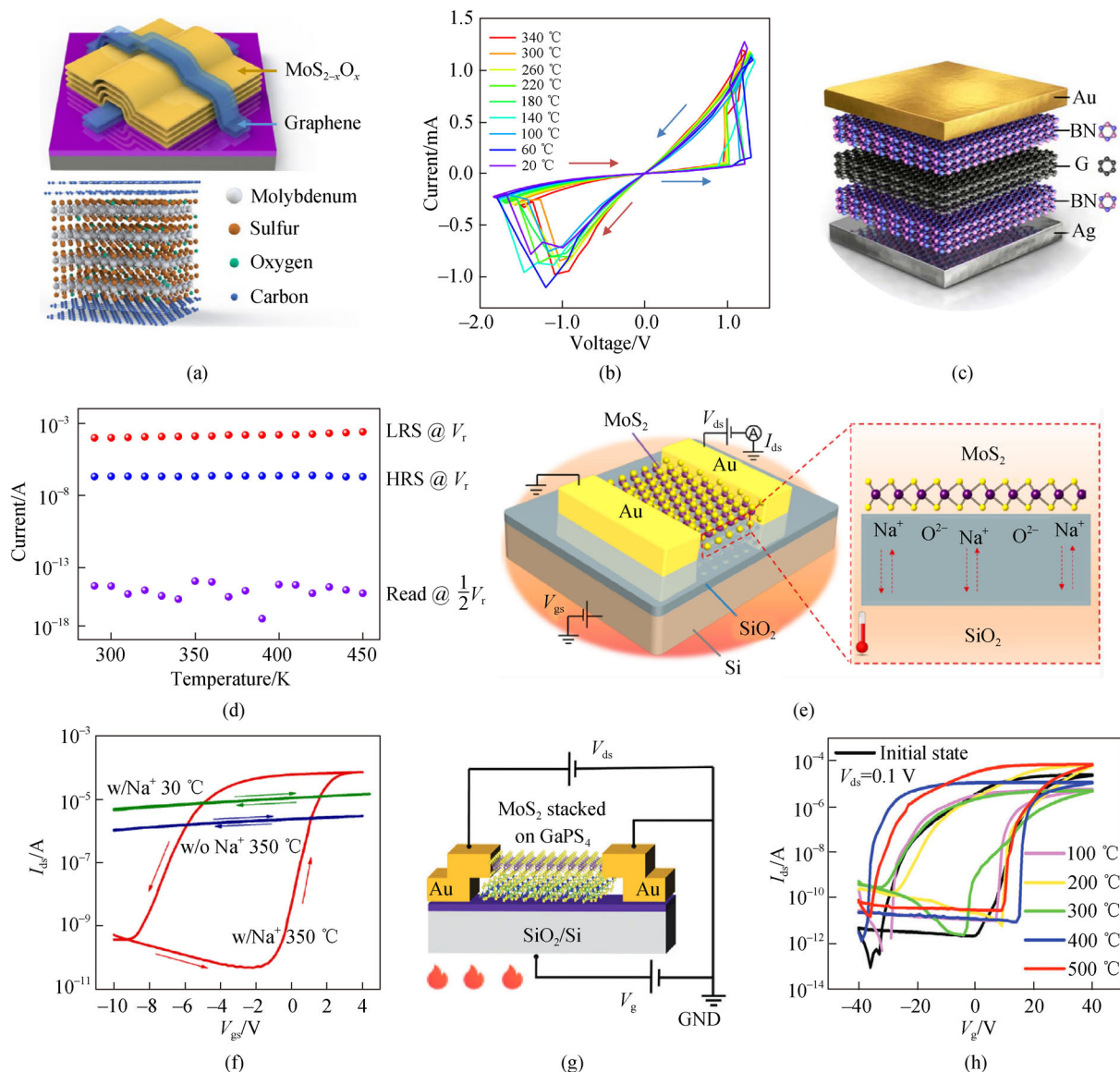


图 12 适用于高温环境的二维神经形态器件。(a) $\text{Gr}/\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x/\text{Gr}$ 器件及其晶体结构示意图与(b) 器件在不同温度下的输出曲线^[151]；(c) $\text{Au}/\text{hBN}/\text{Gr}/\text{hBN}/\text{Ag}$ 器件结构示意图与(d) 290~450 K 温度范围内 3 种电阻态的稳定性^[152]；(e) 掺杂 Na^+ 的 SiO_2 栅介质的突触晶体管结构与工作机制(f) 与无 Na^+ 掺杂器件在常温、 350°C 下的转移曲线^[153]；(g) $\text{MoS}_2/\text{GaPS}_4$ 器件的结构示意图与(h) $100\sim 500^\circ\text{C}$ 下的器件转移曲线^[154]

Fig. 12 Two-dimensional neuromorphic devices for high-temperature environments. (a) Schematic of $\text{Gr}/\text{MoS}_{2-x}\text{O}_x/\text{Gr}$ device and its crystal structure (b) output curves at different temperatures^[151]; (c) Schematic of $\text{Au}/\text{hBN}/\text{Gr}/\text{hBN}/\text{Ag}$ device and (d) stability of three resistance states from 290 K to 450 K^[152]; (e) Structure and working mechanism of synaptic transistor with Na^+ -doping SiO_2 gate dielectric and (f) transfer curves of devices with/without Na^+ doping at room temperature and 350°C ^[153]; (g) Schematic of $\text{MoS}_2/\text{GaPS}_4$ device and (h) transfer curves from 100°C to 500°C ^[154]

所示, Wang 等^[151]通过构筑 Gr/MoS_{2-x}O_x/Gr 范德华异质结, 制备了可在 340 °C 下稳定运行的忆阻器(图 12b), 实现 2×10^7 的循环耐久性以及超过 1×10^5 s 的阻态保持时间。器件的稳定性主要归功于 MoS_{2-x}O_x 的热稳定性与高温稳定的氧离子迁移行为。此外, 石墨烯电极与 MoS_{2-x}O_x 形成了原子尖锐界面, 有效抑制了氧离子向电极的迁移^[151]。如图 12c 和图 12d 所示, Sun 等^[152]开发了基于 Au/hBN/Gr/hBN/Ag 的垂直忆阻器阵列, 实现了 10^3 的阻变比以及 10^6 次循环稳定性, 并在 170 °C 下保持阻态稳定。石墨烯的引入抑制了 Ag 导电丝在高温下的扩散行为, 配合宽带隙 hBN 实现了耐高温的大开关比与耐久性^[152]。

对于高温三端突触晶体管, 现有研究集中在离子栅控或界面电荷捕获两种机制的改进上。如图 12e 所示, Wang 等^[153]将 Na⁺掺入 SiO₂ 底栅介质层中, 制备了基于单层 MoS₂ 的突触晶体管。利用高温下栅极对 Na⁺ 的离子栅控机制, 器件在 350 °C 下表现出 1×10^6 的高开关比与大滞回窗口(图 12f), 并在 150 °C 下模拟了生物突触的长时程增强与抑制^[153]。Cao 等^[154]使用层状宽禁带半导体 GaPS₄ 作为电荷捕获介质、MoS₂ 作为沟道材料, 开发了可在 400 °C 下工作的人工突触器件(图 12g), 表现出 10 pA 量级的低漏电流、 1×10^5 的高开关比以及 1×10^3 的阻态保持时间, 如图 12h 所示。GaPS₄ 的缺陷密度随温度上升而增加, 提供了更多捕获电子的活性位点, 因此器件的滞回窗口随温度上升而变大。

粒子辐照是二维电子器件应用于太空探测、核反应堆等场景时面临的重要问题。Yu 等^[155]的实验表明, 太空环境下二维电子器件仍能表现出辐射耐受性。Vogl 等^[156]利用 γ 射线、电子、质子辐照, 模拟了太空环境的辐射剂量对多种 TMDC 材料以及 hBN 的影响, 发现各类辐照对以上材料的光谱性质与电学性能无显著影响。高剂量辐射一般会在材料中引入空位、掺杂、界面态等缺陷, 甚至导致分解、刻蚀、折叠等宏观结构损伤, 但 Schranghamer 等^[157]统计了上百个基于沟道/栅介质界面电荷捕获的 MoS₂ 忆阻晶体管, 发现在高剂量 γ 射线辐照前后, 器件的亚阈值摆幅、载流子迁移率、光响应度仅略微下降, 例如阻变比从 1×10^7 下降到 1×10^6 , 并不影响多个忆阻晶体管组成的 5 种逻辑门执行逻辑运算的准确性。这表明即使没有外加保护, 基于二维材料的神经形态器件仍有望在深空探测中保持稳定的抗辐照能力。面对核反应堆等极端剂量的辐照环境, 还需要开发更多封装保护技术与辐射屏蔽材料, 与

二维神经形态器件集成, 进而实现感存算一体的极端环境高性能平台。

4 结论与展望

二维材料在神经形态计算及其系统级应用等领域展现了广阔潜力, 但其大规模商业化推广仍面临诸多严峻挑战, 主要集中在材料制备、器件构筑、系统集成等关键层面。在材料制备方面, 开发大面积、高质量二维材料的生长与转移技术, 可以支持更丰富的异质结构与更灵活的衬底选择, 在大规模集成电路、可穿戴设备等领域意义重大, 但已有的制备手段均存在不足。机械剥离可以得到高质量的二维材料, 但所得材料尺寸有限, 不利于大规模集成。传统 CVD 生长可以实现材料的大面积制备, 但存在层数控制等技术瓶颈, 难以保证材料厚度均匀性。MOCVD 法可在较低温度下制备大面积单层二维材料, 一定程度上兼容 CMOS 后端工艺, 但所得材料缺陷较多, 限制了器件性能。原子层沉积与原子层刻蚀结合, 可以实现精确形核与自限式逐层生长, 但生长效率较低、工艺成本高昂。研究者需要继续开发兼容现有半导体工艺的二维材料制备手段, 解决大面积、高质量材料生长的核心难题, 同时关注生产工艺流程中的无损转移、界面控制、温度管理等问题。其中, 空间限域的选区外延生长可以精确控制形核点, 异质界面工程可以优化衬底设计、调控界面缺陷与应力, 深入理解 MOCVD 的前驱体化学与反应动力学可以降低生长温度、抑制缺陷形成, 是解决二维材料生长难题的可能方案。

在器件构筑方面, 立足器件架构与运行原理层面开展底层创新, 是降低二维神经形态器件功耗、改善运行稳定性的有效途径。研究者设计了两端忆阻器、三端突触晶体管、铁电晶体管、可重构器件等器件结构, 提出了导电细丝、材料相变、缺陷工程、纳米流体、自旋电子学等阻变机制。已有器件在运行功耗方面取得了一定突破, 单次读写操作能耗可以低至飞焦耳量级, 但循环稳定性尚无法满足商业化应用的要求。未来需改善低功耗二维神经形态器件的循环稳定性, 深入研究不同神经形态器件的阻变机制与失效原因, 例如缺陷弛豫动力学、离子迁移势垒、电极/沟道界面作用等, 并通过引入界面缓冲层、采用本征高稳定性的阻变机制(例如铁电极化或自旋电子学), 增强器件的可靠耐久性。同时, 确保器件构筑过程与 CMOS 工艺兼容, 解决热管理、材料残留等问题, 是二维神经形态器件商业化

的必由之径。此外,突破二维半导体器件的共同瓶颈,开发范德华金属集成或半金属/相变材料接触工艺,解决金属-半导体接触导致的费米钉扎、沉积金属破坏二维材料等问题,也有助于构筑更加优异的二维神经形态器件。

在系统集成方面,二维忆阻器阵列可用于加速矩阵运算,感存算一体系统利用二维材料的独特物化响应,更可实时获取并分析各种环境信号。其中,基于光电神经形态器件的智能视觉系统最受关注,听觉、嗅觉、触觉仿生系统亦有研究。然而,现有二维神经形态器件阵列的集成密度较低,尚不能比拟人脑中的神经元与突触数目。研究者需要将器件的特征尺寸推进到纳米级,并实现更大规模的集成,这依赖材料制备手段、微纳加工技术、外围电路设计的共同进步,例如极紫外光刻、纳米压印、选择性生长/刻蚀、三维垂直集成等工艺的综合运用。对于感存算一体系统,需要深入挖掘二维材料独特的光、电、力、化学等响应行为,开发更多具备神经形态功能的可靠传感机制。同时,系统集成应兼容成熟的 CMOS 工艺制程,并进行器件-电路-架构协同优化,这有利于二维神经形态器件充分利用已有外围电路,从而极大丰富系统功能、有效降低制造成本,最终实现小型化、高性能、低功耗感存算系统的片上集成。

综上所述,尽管面临材料制备、规模化集成、工艺兼容等方面的挑战,但二维材料得益于独特而丰富的物理化学性质,在神经形态器件与系统中依然具有广阔的应用前景。研究者需要继续开发大面积材料生长与转移手段、设计全新器件结构、完善多功能系统集成,并加强跨学科合作。在人工智能时代,二维材料及其神经形态器件与系统有望实现高效能的类脑信息处理,在边缘计算、智能感知等领域大有可为。

参考文献:

- [1] KIM K S, KWON J, RYU H, et al. The future of two-dimensional semiconductors beyond Moore's law[J]. *Nat Nanotechnol*, 2024, 19(7): 895–906.
- [2] HADKE S, KANG M A, SANGWAN V K, et al. Two-dimensional materials for brain-inspired computing hardware[J]. *Chem Rev*, 2025, 125(2): 835–932.
- [3] STRUKOV D B, SNIDER G S, STEWART D R, et al. The missing memristor found[J]. *Nature*, 2008, 453(7191): 80–83.
- [4] SUN B, GUO T, ZHOU G D, et al. Synaptic devices based neuromorphic computing applications in artificial intelligence[J]. *Mater Today Phys*, 2021, 18: 100393.
- [5] YAO P, WU H Q, GAO B, et al. Fully hardware-implemented memristor convolutional neural network[J]. *Nature*, 2020, 577(7792): 641–646.
- [6] PREZIOSO M, MERRIKH-BAYAT F, HOSKINS B D, et al. Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors[J]. *Nature*, 2015, 521(7550): 61–64.
- [7] ZHANG W Q, GAO B, TANG J S, et al. Neuro-inspired computing chips[J]. *Nat Electron*, 2020, 3(7): 371–382.
- [8] LIU A H, ZHANG X W, LIU Z Y, et al. The roadmap of 2D materials and devices toward chips[J]. *Nano-Micro Lett*, 2024, 16: 119.
- [9] DAS S, SEBASTIAN A, POP E, et al. Transistors based on two-dimensional materials for future integrated circuits[J]. *Nat Electron*, 2021, 4(11): 786–799.
- [10] HUANG Z H, LI Y R, ZHANG Y, et al. 2D multifunctional devices: From material preparation to device fabrication and neuromorphic applications[J]. *Int J Extrem Manuf*, 2024, 6(3): 032003.
- [11] ZHANG Z R, YANG D L, LI H H, et al. 2D materials and van der Waals heterojunctions for neuromorphic computing[J]. *Neuromorph Comput Eng*, 2022, 2(3): 032004.
- [12] LEMME M C, AKINWANDE D, HUYGHEBAERT C, et al. 2D materials for future heterogeneous electronics[J]. *Nat Commun*, 2022, 13: 1392.
- [13] PHAM P V, BODEPUDI S C, SHEHZAD K, et al. 2D heterostructures for ubiquitous electronics and optoelectronics: Principles, opportunities, and challenges[J]. *Chem Rev*, 2022, 122(6): 6514–6613.
- [14] ZHANG S M, DENG X N, WU Y F, et al. Lateral layered semiconductor multijunctions for novel electronic devices[J]. *Chem Soc Rev*, 2022, 51(10): 4000–4022.
- [15] HUH W, LEE D, LEE C H. Memristors based on 2D materials as an artificial synapse for neuromorphic electronics[J]. *Adv Mater*, 2020, 32(51): 2002092.
- [16] LIU C S, CHEN H W, WANG S Y, et al. Two-dimensional materials for next-generation computing technologies[J]. *Nat Nanotechnol*, 2020, 15(7): 545–557.
- [17] SANGWAN V K, HERSAM M C. Neuromorphic nanoelectronic materials[J]. *Nat Nanotechnol*, 2020, 15(7): 517–528.
- [18] YANG J Q, WANG R P, REN Y, et al. Neuromorphic engineering: From biological to spike-based hardware nervous systems[J]. *Adv Mater*, 2020, 32(52): 2003610.
- [19] WANG B L, SUN Y F, DING H Y, et al. Bioelectronics-related 2D materials beyond graphene: Fundamentals, properties, and applications[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, 30(46): 2003732.
- [20] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, et al. Electric field effect in atomically thin carbon films[J]. *Science*, 2004, 306(5696): 666–669.
- [21] RADISAVLJEVIC B, RADENOVIC A, BRIVIO J, et al. Single-layer MoS₂ transistors[J]. *Nature Nanotech*, 2011, 6(3): 147–150.
- [22] SHARBATI M T, DU Y H, TORRES J, et al. Low-power, electrochemically tunable graphene synapses for neuromorphic computing[J]. *Adv Mater*, 2018, 30(36): 1802353.
- [23] XU R J, JANG H, LEE M H, et al. Vertical MoS₂ double-layer memristor with electrochemical metallization as an atomic-scale synapse with switching thresholds approaching 100 mV[J]. *Nano Lett*, 2019, 19(4): 2411–2417.
- [24] MENNEL L, SYMONOWICZ J, WACHTER S, et al. Ultrafast machine vision with 2D material neural network image sensors[J]. *Nature*, 2020, 579(7797): 62–66.
- [25] CHEN H W, XUE X Y, LIU C S, et al. Logic gates based on neuristors

- made from two-dimensional materials[J]. *Nat Electron*, 2021, 4(6): 399–404.
- [26] LIU K Q, ZHANG T, DANG B J, et al. An optoelectronic synapse based on α - In_2Se_3 with controllable temporal dynamics for multimode and multiscale reservoir computing[J]. *Nat Electron*, 2022, 5(11): 761–773.
- [27] LI T X, MIAO J S, FU X, et al. Reconfigurable, non-volatile neuromorphic photovoltaics[J]. *Nat Nanotechnol*, 2023, 18(11): 1303–1310.
- [28] JAYACHANDRAN D, PENDURTHI R, SADAF M U K, et al. Three-dimensional integration of two-dimensional field-effect transistors[J]. *Nature*, 2024, 625(7994): 276–281.
- [29] STANKOVICH S, DIKIN D A, DOMMETT G H B, et al. Graphene-based composite materials[J]. *Nature*, 2006, 442(7100): 282–286.
- [30] 陆亚男, 邹晓莉, 王磊, 等. $\text{ZnIn}_2\text{S}_4/\text{g-C}_3\text{N}_4/\text{MoS}_2$ 三元异质结的制备及其光催化产氢性能[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2023, 36(6): 57–64.
- LU Yanan, ZOU Xiaoli, WANG Lei, et al. *J Liaocheng Univ Nat Sci Ed*, 2023, 36(6): 57–64.
- [31] 江吉周, 李方轶, 熊志国, 等. 二维改性碳基材料用于高效光催化产氢[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2023, 36(1): 73–84.
- JIANG Jizhou, LI Fangyi, XIONG Zhiguo, et al. *J Liaocheng Univ Nat Sci Ed*, 2023, 36(1): 73–84.
- [32] 邹菁, 王浩, 阳曼, 等. 二维黑磷的制备及电化学传感应用研究进展[J]. *聊城大学学报(自然科学版)*, 2023, 36(3): 64–73.
- ZOU Jing, WANG Hao, YANG Man, et al. *J Liaocheng Univ Nat Sci Ed*, 2023, 36(3): 64–73.
- [33] ZHOU N, YANG R, ZHAI T. Two-dimensional non-layered materials[J]. *Mater Today Nano*, 2019, 8: 100051.
- [34] SPLENDIANI A, SUN L, ZHANG Y B, et al. Emerging photoluminescence in monolayer MoS_2 [J]. *Nano Lett*, 2010, 10(4): 1271–1275.
- [35] QIU Q X, HUANG Z M. Photodetectors of 2D materials from ultraviolet to terahertz waves[J]. *Adv Mater*, 2021, 33(15): 2008126.
- [36] LI H N, LI Y, ALJARB A, et al. Epitaxial growth of two-dimensional layered transition-metal dichalcogenides: Growth mechanism, controllability, and scalability[J]. *Chem Rev*, 2018, 118(13): 6134–6150.
- [37] JI Q Q, ZHANG Y, ZHANG Y F, et al. Chemical vapour deposition of group-VIB metal dichalcogenide monolayers: Engineered substrates from amorphous to single crystalline[J]. *Chem Soc Rev*, 2015, 44(9): 2587–2602.
- [38] YU H, HUANG L F, ZHOU L Y, et al. Eight in. wafer-scale epitaxial monolayer MoS_2 [J]. *Adv Mater*, 2024, 36(30): 2402855.
- [39] XIA Y, CHEN X Y, WEI J C, et al. 12-inch growth of uniform MoS_2 monolayer for integrated circuit manufacture[J]. *Nat Mater*, 2023, 22(11): 1324–1331.
- [40] JIANG H, ZHANG X K, CHEN K L, et al. Two-dimensional czochralski growth of single-crystal MoS_2 [J]. *Nat Mater*, 2025, 24(2): 188–196.
- [41] ZHU J D, PARK J H, VITALE S A, et al. Low-thermal-budget synthesis of monolayer molybdenum disulfide for silicon back-end-of-line integration on a 200 mm platform[J]. *Nat Nanotechnol*, 2023, 18(5): 456–463.
- [42] KANG K, XIE S E, HUANG L J, et al. High-mobility three-atom-thick semiconducting films with wafer-scale homogeneity[J]. *Nature*, 2015, 520(7549): 656–660.
- [43] LI M Y, SHI Y M, CHENG C C, et al. Epitaxial growth of a monolayer WSe_2 - MoS_2 lateral p-n junction with an atomically sharp interface[J]. *Science*, 2015, 349(6247): 524–528.
- [44] ZHANG Y H, WANG J W, CHEN Y M, et al. Exclusive generation of single-atom sulfur for ultrahigh quality monolayer MoS_2 growth[J]. *J Am Chem Soc*, 2024, 146(49): 33289–33294.
- [45] WU Q K, NONG H Y, ZHENG R X, et al. Resolidified chalcogen precursors for high-quality 2D semiconductor growth[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2023, 62(29): e202301501.
- [46] ZHU F F, CHEN W J, XU Y, et al. Epitaxial growth of two-dimensional stanene[J]. *Nature Mater*, 2015, 14(10): 1020–1025.
- [47] ZHANG Z B, DING M C, CHENG T, et al. Continuous epitaxy of single-crystal graphite films by isothermal carbon diffusion through nickel[J]. *Nat Nanotechnol*, 2022, 17(12): 1258–1264.
- [48] NAKANO M, WANG Y, KASHIWABARA Y, et al. Layer-by-layer epitaxial growth of scalable WSe_2 on sapphire by molecular beam epitaxy[J]. *Nano Lett*, 2017, 17(9): 5595–5599.
- [49] KIM C, HUR N, YANG J, et al. Atomic layer deposition route to scalable, electronic-grade van der Waals Te thin films[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(16): 15776–15786.
- [50] HUANG Y, PAN Y H, YANG R, et al. Universal mechanical exfoliation of large-area 2D crystals[J]. *Nat Commun*, 2020, 11: 2453.
- [51] WANG C, HE Q Y, HALIM U, et al. Monolayer atomic crystal molecular superlattices[J]. *Nature*, 2018, 555(7695): 231–236.
- [52] LIN Z Y, LIU Y, HALIM U, et al. Solution-processable 2D semiconductors for high-performance large-area electronics[J]. *Nature*, 2018, 562(7726): 254–258.
- [53] WANG L, MERIC I, HUANG P Y, et al. One-dimensional electrical contact to a two-dimensional material[J]. *Science*, 2013, 342(6158): 614–617.
- [54] DEAN C R, YOUNG A F, MERIC I, et al. Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics[J]. *Nature Nanotech*, 2010, 5(10): 722–726.
- [55] YANG L, SHIRAHATA N, SAINI G, et al. Effect of surface free energy on PDMS transfer in microcontact printing and its application to ToF-SIMS to probe surface energies[J]. *Langmuir*, 2009, 25(10): 5674–5683.
- [56] BLISS T V P, COLLINGRIDGE G L. A synaptic model of memory: Long-term potentiation in the hippocampus[J]. *Nature*, 1993, 361(6407): 31–39.
- [57] RAMACHANDRAN V. The perception of phantom limbs. The D. O. Hebb lecture[J]. *Brain*, 1998, 121(9): 1603–1630.
- [58] CHAVES A, AZADANI J G, ALSALMAN H, et al. Bandgap engineering of two-dimensional semiconductor materials[J]. *npj 2D Mater Appl*, 2020, 4: 29.
- [59] HUANG L J, KRASNOK A, ALÚ A, et al. Enhanced light-matter interaction in two-dimensional transition metal dichalcogenides[J]. *Rep Prog Phys*, 2022, 85(4): 046401.
- [60] MAK K F, SHAN J. Photonics and optoelectronics of 2D semiconductor transition metal dichalcogenides[J]. *Nature Photon*, 2016, 10(4): 216–226.
- [61] DUAN H, CHENG S Q, QIN L, et al. Low-power memristor based on two-dimensional materials[J]. *J Phys Chem Lett*, 2022, 13(31): 7130–7138.
- [62] LU D L, CHEN Y, LU Z Y, et al. Monolithic three-dimensional tier-by-tier integration via van der Waals lamination[J]. *Nature*, 2024,

- 630(8016): 340–345.
- [63] CHEN S C, ZHANG T, TAPPERTZHOFEN S, et al. Electrochemical-memristor-based artificial neurons and synapses: Fundamentals, applications, and challenges[J]. *Adv Mater*, 2023, 35(37): 2301924.
- [64] YAN X B, QIN C Y, LU C, et al. Robust Ag/ZrO₂/WS₂/Pt memristor for neuromorphic computing[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11(51): 48029–48038.
- [65] SUN L F, HWANG G, CHOI W, et al. Ultralow switching voltage slope based on two-dimensional materials for integrated memory and neuromorphic applications[J]. *Nano Energy*, 2020, 69: 104472.
- [66] DONG Z L, HUA Q L, XI J G, et al. Ultrafast and low-power 2D Bi₂O₂Se memristors for neuromorphic computing applications[J]. *Nano Lett*, 2023, 23(9): 3842–3850.
- [67] LIU L, CHENG Z Q, JIANG B, et al. Optoelectronic artificial synapses based on two-dimensional transitional-metal trichalcogenide[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13(26): 30797–30805.
- [68] KIM S J, LEE T H, YANG J M, et al. Vertically aligned two-dimensional halide perovskites for reliably operable artificial synapses[J]. *Mater Today*, 2022, 52: 19–30.
- [69] LIU Y Q, WU Y H, WANG B L, et al. Versatile memristor implemented in van der Waals CuInP₂S₆[J]. *Nano Res*, 2023, 16(7): 10191–10197.
- [70] LIU K, TIAN Z T. Advances in phase-change materials[J]. *J Appl Phys*, 2021, 130(7): 070401.
- [71] ZHU X J, LI D, LIANG X G, et al. Ionic modulation and ionic coupling effects in MoS₂ devices for neuromorphic computing[J]. *Nature Mater*, 2019, 18(2): 141–148.
- [72] LI Y S, LOH L, LI S F, et al. Anomalous resistive switching in memristors based on two-dimensional palladium diselenide using heterophase grain boundaries[J]. *Nat Electron*, 2021, 4(5): 348–356.
- [73] WANG X W, WANG B L, ZHANG Q H, et al. Grain-boundary engineering of monolayer MoS₂ for energy-efficient lateral synaptic devices[J]. *Adv Mater*, 2021, 33(32): 2102435.
- [74] HUS S M, GE R J, CHEN P A, et al. Observation of single-defect memristor in an MoS₂ atomic sheet[J]. *Nat Nanotechnol*, 2021, 16(1): 58–62.
- [75] YAN X B, ZHAO Q L, CHEN A P, et al. Vacancy-induced synaptic behavior in 2D WS₂ nanosheet-based memristor for low-power neuromorphic computing[J]. *Small*, 2019, 15(24): 1901423.
- [76] LI D, WU B, ZHU X J, et al. MoS₂ Memristors exhibiting variable switching characteristics toward biorealistic synaptic emulation[J]. *ACS Nano*, 2018, 12(9): 9240–9252.
- [77] SANGWAN V K, JARIWALA D, KIM I S, et al. Gate-tunable memristive phenomena mediated by grain boundaries in single-layer MoS₂[J]. *Nature Nanotech*, 2015, 10(5): 403–406.
- [78] SHI Y Y, LIANG X H, YUAN B, et al. Electronic synapses made of layered two-dimensional materials[J]. *Nat Electron*, 2018, 1(8): 458–465.
- [79] WANG B L, LUO H, WANG X W, et al. Bifunctional NbS₂-based asymmetric heterostructure for lateral and vertical electronic devices[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(1): 175–184.
- [80] FREY N C, AKINWANDE D, JARIWALA D, et al. Machine learning-enabled design of point defects in 2D materials for quantum and neuromorphic information processing[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(10): 13406–13417.
- [81] ZHANG F, ZHANG H R, KRYLYUK S, et al. Electric-field induced structural transition in vertical MoTe₂²⁻ and Mo_{1-x}W_xTe₂-based resistive memories[J]. *Nature Mater*, 2019, 18(1): 55–61.
- [82] LUO S W, LIAO K H, LEI P X, et al. A synaptic memristor based on two-dimensional layered WSe₂ nanosheets with short- and long-term plasticity[J]. *Nanoscale*, 2021, 13(13): 6654–6660.
- [83] ZHAO B C, XU L L, PENG R X, et al. High-performance 2D ambipolar MoTe₂ lateral memristors by mild oxidation[J]. *Small*, 2024, 20(43): 2402727.
- [84] FU X, LI T X, CAI B, et al. Graphene/MoS_{2-x}O_x/graphene photomemristor with tunable non-volatile responsivities for neuromorphic vision processing[J]. *Light Sci Appl*, 2023, 12: 39.
- [85] WANG T Y, MENG J L, HE Z Y, et al. Ultralow power wearable heterosynapse with photoelectric synergistic modulation[J]. *Adv Sci*, 2020, 7(8): 1903480.
- [86] ZHU J D, YANG Y C, JIA R D, et al. Ion gated synaptic transistors based on 2D van der Waals crystals with tunable diffusive dynamics[J]. *Adv Mater*, 2018, 30(21): 1800195.
- [87] KIREEV D, LIU S, JIN H, et al. Metaplastic and energy-efficient biocompatible graphene artificial synaptic transistors for enhanced accuracy neuromorphic computing[J]. *Nat Commun*, 2022, 13: 4386.
- [88] YANG C S, SHANG D S, LIU N, et al. All-solid-state synaptic transistor with ultralow conductance for neuromorphic computing[J]. *Adv Funct Mater*, 2018, 28(42): 1804170.
- [89] GUO J J, CHEN S E, GIRIDHARAGOPAL R, et al. Understanding asymmetric switching times in accumulation mode organic electrochemical transistors[J]. *Nat Mater*, 2024, 23(5): 656–663.
- [90] PENG R X, WU Y H, WANG B L, et al. Programmable graded doping for reconfigurable molybdenum ditelluride devices[J]. *Nat Electron*, 2023, 6(11): 852–861.
- [91] KAMAEI S, LIU X, SAEIDI A, et al. Ferroelectric gating of two-dimensional semiconductors for the integration of steep-slope logic and neuromorphic devices[J]. *Nat Electron*, 2023, 6(9): 658–668.
- [92] PAUL T, AHMED T, KANHAIYA TIWARI K, et al. A high-performance MoS₂ synaptic device with floating gate engineering for neuromorphic computing[J]. *2D Mater*, 2019, 6(4): 045008.
- [93] HUANG W, CHEN J H, YAO Y, et al. Vertical organic electrochemical transistors for complementary circuits[J]. *Nature*, 2023, 613(7944): 496–502.
- [94] HU M, YU J, CHEN Y Y, et al. A non-linear two-dimensional float gate transistor as a lateral inhibitory synapse for retinal early visual processing[J]. *Mater Horiz*, 2022, 9(9): 2335–2344.
- [95] ZHOU Y, WANG Y S, ZHUGE F W, et al. A reconfigurable two-WSe₂-transistor synaptic cell for reinforcement learning[J]. *Adv Mater*, 2022, 34(48): 2107754.
- [96] WANG L, WANG X J, ZHANG Y S, et al. Exploring ferroelectric switching in α -In₂Se₃ for neuromorphic computing[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, 30(45): 2004609.
- [97] PAN C, WANG C Y, LIANG S J, et al. Reconfigurable logic and neuromorphic circuits based on electrically tunable two-dimensional homojunctions[J]. *Nat Electron*, 2020, 3(7): 383–390.
- [98] GAO K K, SUN B, CAO Z L, et al. Biomaterial/organic heterojunction based memristor for logic gate circuit design, data encryption, and image reconstruction[J]. *Adv Funct Mater*, 2024, 34(36): 2401132.
- [99] HE H K, YANG R, HUANG H M, et al. Multi-gate memristive synapses realized with the lateral heterostructure of 2D WSe₂ and WO₃[J]. *Nanoscale*, 2020, 12(1): 380–387.
- [100] SANGWAN V K, LEE H S, BERGERON H, et al. Multi-terminal memtransistors from polycrystalline monolayer molybdenum

- disulfide[J]. *Nature*, 2018, 554(7693): 500–504.
- [101] HE C L, TANG J, SHANG D S, et al. Artificial synapse based on van der Waals heterostructures with tunable synaptic functions for neuromorphic computing[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12(10): 11945–11954.
- [102] LUO Z D, ZHANG S Q, LIU Y, et al. Dual-ferroelectric-coupling-engineered two-dimensional transistors for multifunctional in-memory computing[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(2): 3362–3372.
- [103] CHO H, LEE D, KO K, et al. Double-floating-gate van der Waals transistor for high-precision synaptic operations[J]. *ACS Nano*, 2023, 17(8): 7384–7393.
- [104] YAN X D, ZHENG Z R, SANGWAN V K, et al. Moiré synaptic transistor with room-temperature neuromorphic functionality[J]. *Nature*, 2023, 624(7992): 551–556.
- [105] LUO Z D, XIA X, YANG M M, et al. Artificial optoelectronic synapses based on ferroelectric field-effect enabled 2D transition metal dichalcogenide memristive transistors[J]. *ACS Nano*, 2020, 14(1): 746–754.
- [106] MEI T T, LIU W C, SUN F S, et al. Bio-inspired two-dimensional nanofluidic ionic transistor for neuromorphic signal processing[J]. *Angew Chem Int Ed*, 2024, 63(17): e202401477.
- [107] EMMERICH T, TENG Y F, RONCERAY N, et al. Nanofluidic logic with mechano-ionic memristive switches[J]. *Nat Electron*, 2024, 7(4): 271–278.
- [108] DENG Y, LIU S H, MA X X, et al. Intrinsic defect-driven synergistic synaptic heterostructures for gate-free neuromorphic phototransistors[J]. *Adv Mater*, 2024, 36(19): 2309940.
- [109] TSAI M Y, HUANG C T, LIN C Y, et al. A reconfigurable transistor and memory based on a two-dimensional heterostructure and photoinduced trapping[J]. *Nat Electron*, 2023, 6(10): 755–764.
- [110] ZHA J J, XIA Y P, SHI S H, et al. A 2D heterostructure-based multifunctional floating gate memory device for multimodal reservoir computing[J]. *Adv Mater*, 2024, 36(3): 2308502.
- [111] CHOI S, SHIN J, PARK G, et al. 3D-integrated multilayered physical reservoir array for learning and forecasting time-series information[J]. *Nat Commun*, 2024, 15: 2044.
- [112] AGUIRRE F, SEBASTIAN A, LE GALLO M, et al. Hardware implementation of memristor-based artificial neural networks[J]. *Nat Commun*, 2024, 15: 1974.
- [113] CHEN S C, MAHMOODI M R, SHI Y Y, et al. Wafer-scale integration of two-dimensional materials in high-density memristive crossbar arrays for artificial neural networks[J]. *Nat Electron*, 2020, 3(10): 638–645.
- [114] MIGLIATO M G, JI H G, WANG Z Y, et al. A large-scale integrated vector-matrix multiplication processor based on monolayer molybdenum disulfide memories[J]. *Nat Electron*, 2023, 6(12): 991–998.
- [115] ZHU K C, PAZOS S, AGUIRRE F, et al. Hybrid 2D-CMOS microchips for memristive applications[J]. *Nature*, 2023, 618(7963): 57–62.
- [116] TANG B S, VELURI H, LI Y D, et al. Wafer-scale solution-processed 2D material analog resistive memory array for memory-based computing[J]. *Nat Commun*, 2022, 13: 3037.
- [117] TONG L, PENG Z R, LIN R F, et al. 2D materials-based homogeneous transistor-memory architecture for neuromorphic hardware[J]. *Science*, 2021, 373(6561): 1353–1358.
- [118] BESSONOV A A, KIRIKOVA M N, PETUKHOV D I, et al. Layered memristive and memcapacitive switches for printable electronics[J]. *Nature Mater*, 2015, 14(2): 199–204.
- [119] ZHOU F C, CHAI Y. Near-sensor and in-sensor computing[J]. *Nat Electron*, 2020, 3(11): 664–671.
- [120] WAN T Q, SHAO B J, MA S J, et al. In-sensor computing: Materials, devices, and integration technologies[J]. *Adv Mater*, 2023, 35(37): 2203830.
- [121] CAO Y Q, CHEN Y, KHOSLA D. Spiking deep convolutional neural networks for energy-efficient object recognition[J]. *Int J Comput Vis*, 2015, 113(1): 54–66.
- [122] CHEN J X, XU W T. 2D-materials-based optoelectronic synapses for neuromorphic applications[J]. *eScience*, 2023, 3(6): 100178.
- [123] JIANG J, HU W N, XIE D D, et al. 2D electric-double-layer phototransistor for photoelectronic and spatiotemporal hybrid neuromorphic integration[J]. *Nanoscale*, 2019, 11(3): 1360–1369.
- [124] WANG S Y, CHEN C S, YU Z H, et al. A MoS₂/PTCDA hybrid heterojunction synapse with efficient photoelectric dual modulation and versatility[J]. *Adv Mater*, 2019, 31(3): 1806227.
- [125] REHMAN S, KHAN M A, KIM H, et al. Optically reconfigurable complementary logic gates enabled by bipolar photoresponse in gallium selenide memtransistor[J]. *Adv Sci*, 2023, 10(17): 2205383.
- [126] CI W J, XUE W H, WANG P, et al. All-In-one optoelectronic neuristor based on full-vdW two-terminal ferroelectric p-n heterojunction[J]. *Adv Funct Mater*, 2024, 34(15): 2305822.
- [127] HOU Y X, LI Y, ZHANG Z C, et al. Large-scale and flexible optical synapses for neuromorphic computing and integrated visible information sensing memory processing[J]. *ACS Nano*, 2021, 15(1): 1497–1508.
- [128] ZHOU F C, ZHOU Z, CHEN J W, et al. Optoelectronic resistive random access memory for neuromorphic vision sensors[J]. *Nat Nanotechnol*, 2019, 14(8): 776–782.
- [129] SOLIMAN M, MAITY K, GLOPPE A, et al. Photoferroelectric all-van-der-Waals heterostructure for multimode neuromorphic ferroelectric transistors[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15(12): 15732–15744.
- [130] WANG F K, HU F C, DAI M J, et al. A two-dimensional mid-infrared optoelectronic retina enabling simultaneous perception and encoding[J]. *Nat Commun*, 2023, 14: 1938.
- [131] ZHU X T, GAO C S, REN Y W, et al. High-contrast bidirectional optoelectronic synapses based on 2D molecular crystal heterojunctions for motion detection[J]. *Adv Mater*, 2023, 35(24): 2301468.
- [132] LEI P X, DUAN H, QIN L, et al. High-performance memristor based on 2D layered BiOI nanosheet for low-power artificial optoelectronic synapses[J]. *Adv Funct Mater*, 2022, 32(25): 2201276.
- [133] GUO P W, JIA M M, GUO D, et al. Retina-inspired in-sensor broadband image preprocessing for accurate recognition via the flexophotonic effect[J]. *Matter*, 2023, 6(2): 537–553.
- [134] WU X S, WANG S C, HUANG W, et al. Wearable in-sensor reservoir computing using optoelectronic polymers with through-space charge-transport characteristics for multi-task learning[J]. *Nat Commun*, 2023, 14: 468.
- [135] ZHOU Y, FU J W, CHEN Z R, et al. Computational event-driven vision sensors for in-sensor spiking neural networks[J]. *Nat Electron*, 2023, 6(11): 870–878.
- [136] JIANG C P, LIU J Q, NI Y, et al. Mammalian-brain-inspired neuromorphic motion-cognition nerve achieves cross-modal perceptual

- enhancement[J]. *Nat Commun*, 2023, 14: 1344.
- [137] ZHA J J, SHI S H, CHATURVEDI A, et al. Electronic/optoelectronic memory device enabled by tellurium-based 2D van der Waals heterostructure for in-sensor reservoir computing at the optical communication band[J]. *Adv Mater*, 2023, 35(20): 2211598.
- [138] ZHAO B C, XIN Z Q, WANG Y C, et al. Bioinspired gas-receptor synergistic interaction for high-performance two-dimensional neuromorphic devices[J]. *Matter*, 2025, 8(4): 102044.
- [139] WANG C, CHEN Z S, CHAN C L J, et al. Biomimetic olfactory chips based on large-scale monolithically integrated nanotube sensor arrays[J]. *Nat Electron*, 2024, 7(2): 157–167.
- [140] DAS S, DODDA A, DAS S. A biomimetic 2D transistor for audiomorphic computing[J]. *Nat Commun*, 2019, 10: 3450.
- [141] SUN L F, ZHANG Y S, HWANG G, et al. Synaptic computation enabled by joule heating of single-layered semiconductors for sound localization[J]. *Nano Lett*, 2018, 18(5): 3229–3234.
- [142] DING H Y, XIN Z Q, YANG Y Y, et al. Ultrasensitive, low-voltage operational, and asymmetric ionic sensing hydrogel for multipurpose applications[J]. *Adv Funct Mater*, 2020, 30(12): 1909616.
- [143] WATSON J, CASTRO G. A review of high-temperature electronics technology and applications[J]. *J Mater Sci: Mater Electron*, 2015, 26(12): 9226–9235.
- [144] GUAN Q L, HANG C J, LI S L, et al. Research progress on the solder joint reliability of electronics using in deep space exploration[J]. *Chin J Mech Eng*, 2023, 36: 22.
- [145] NAN H Y, NI Z H, WANG J, et al. The thermal stability of graphene in air investigated by Raman spectroscopy[J]. *J Raman Spectrosc*, 2013, 44(7): 1018–1021.
- [146] ZHANG K L, FENG Y L, WANG F, et al. Two dimensional hexagonal boron nitride (2D-hBN): Synthesis, properties and applications[J]. *J Mater Chem C*, 2017, 5(46): 11992–12022.
- [147] WANG X W, FAN W, FAN Z W, et al. Substrate modified thermal stability of mono- and few-layer MoS₂[J]. *Nanoscale*, 2018, 10(7): 3540–3546.
- [148] ZOU Y X, LI P, SU C Z, et al. Flexible high-temperature MoS₂ field-effect transistors and logic gates[J]. *ACS Nano*, 2024, 18(13): 9627–9635.
- [149] WU Y H, XIN Z Q, ZHANG Z B, et al. All-transfer electrode interface engineering toward harsh-environment-resistant MoS₂ field-effect transistors[J]. *Adv Mater*, 2023, 35(18): 2210735.
- [150] WANG W X, WU C H, LI Z L, et al. Interface engineering of 2D materials toward high-temperature electronic devices[J]. *Adv Mater*, 2025, 37(12): 2418439.
- [151] WANG M, CAI S H, PAN C, et al. Robust memristors based on layered two-dimensional materials[J]. *Nat Electron*, 2018, 1(2): 130–136.
- [152] SUN L F, ZHANG Y S, HAN G, et al. Self-selective van der Waals heterostructures for large scale memory array[J]. *Nat Commun*, 2019, 10: 3161.
- [153] WANG B L, WANG X W, WANG E Z, et al. Monolayer MoS₂ synaptic transistors for high-temperature neuromorphic applications[J]. *Nano Lett*, 2021, 21(24): 10400–10408.
- [154] CAO D W, YAN Y, WANG M N, et al. Layered wide bandgap semiconductor GaPS₄ as a charge-trapping medium for use in high-temperature artificial synaptic applications[J]. *Adv Funct Mater*, 2024, 34(28): 2314649.
- [155] YU L X, SUN S R, JIA Y, et al. Space environment adaptability of 2D semiconductor materials[J]. *Natl Sci Rev*, 2025, 12(4): nwaf064.
- [156] VOGL T, SRIPATHY K, SHARMA A, et al. Radiation tolerance of two-dimensional material-based devices for space applications[J]. *Nat Commun*, 2019, 10: 1202.
- [157] SCHRANGHAMER T F, PANNONE A, RAVICHANDRAN H, et al. Radiation resilient two-dimensional electronics[J]. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15(22): 26946–26959.

作者贡献声明:

陈嘉远: 构思论文框架、调研并综述文献、撰写论文、对全文内容进行审核、修订与润色

武程辉: 参与撰写“面向复杂环境的神经形态器件应用”部分内容

刘 锴: 构思论文框架、提供整体学术指导、对全文内容进行审核、修订与润色

Two-Dimensional Materials and Their Neuromorphic Devices: Fabrication, Mechanism, and Applications

CHEN Jiayuan, WU Chenghui, LIU Kai

(State Key Laboratory of New Ceramic Materials, and Key Laboratory of Advanced Materials (MOE), School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Extended Abstract

In the information era, conventional silicon-based chips face significant challenges to meet the demands of real-time data processing, device miniaturization, and low-power operation due to the short-channel effects, leakage current control, and quantum effects. The von Neumann architecture, with its separation of computing and storage units, leads to a bottleneck that the massive data transfer between units consumes a substantial energy and reduces a system efficiency. To address these issues, neuromorphic computing systems based on memristors have attracted much attention. These systems integrate storage and computing together, thus enhancing a computational efficiency and reducing an energy consumption. Two-dimensional (2D) materials, with their atomic-scale thickness, free of dangling bonds on the surface, and tunable properties, emerge as promising candidates for key materials in neuromorphic computing.

This review provides a comprehensive overview on the applications of 2D materials in neuromorphic computing. The synthesis methods of 2D materials and their heterojunctions are introduced, and then various architectures and operating principles of 2D

neuromorphic devices are discussed. The review also represents the unique advantages of 2D materials, such as their high carrier mobility and excellent mechanical flexibility, which make them suitable for a wide range of applications, including wearable devices, biosensors, and implantable medical devices. In terms of device structures, the review mainly covers two-terminal memristors and three-terminal synaptic transistors. Two-terminal memristors, with their simple structure and high scalability, are ideal for high-density memristor crossbar arrays. Three-terminal synaptic transistors offer a more controllable performance and a better stability. The review explores emerging multi-terminal heterosynaptic devices, which can simulate more complex synaptic behaviors.

This review further examines the integration of 2D materials into neuromorphic systems, including in-memory computing architectures and sensory-processing-computing integrated systems. In-memory computing architectures, such as memristor crossbar arrays, leverage the non-volatile storage and multi-resistance states of memristors to directly simulate neural network node weights and perform parallel matrix operations. Sensory-processing-computing integrated systems utilize the unique response properties of 2D materials to collect environmental signals, such as light, gas, and sound, as well as integrate sensing modules with in-memory computing to achieve efficient data processing.

This review addresses the challenges of applying 2D materials to neuromorphic computing, including material preparation, device design, and system integration. While laboratory-scale preparation methods like mechanical exfoliation can yield high-quality 2D materials, they are not suitable for large-scale integration. Wafer-scale growth methods, such as chemical vapor deposition (CVD) and molecular beam epitaxy (MBE), offer a better scalability but face some challenges in controlling the number of layers, achieving a uniform thickness or a high production efficiency. In terms of device design, 2D neuromorphic devices exhibit diverse architectures and operating principles, such as conductive filaments, phase changes, and defect engineering. However, further efforts are needed to reduce power consumption and improve cyclic stability.

Summary and Prospects The review outlines future research directions, such as the development of large-area material growth and transfer techniques, the design of novel device structures, and the integration of multi-functional systems. 2D materials are expected to play a crucial role in the advancement of neuromorphic computing through interdisciplinary collaboration and continuous innovation, paving a way for the development of artificial intelligence, the Internet of Things, and big data technologies.

Keywords two-dimensional materials; memristors; synaptic devices; neuromorphic computing; in-memory computing