

二维材料类脑器件*

王 爽 梁世军[†] 缪 峰^{††}

(南京大学物理学院 人工微结构科学与技术协同创新中心 固体微结构物理国家重点实验室
南京 210093)

2021-11-05 收到

[†] email: sjliang@nju.edu.cn

^{††} email: miao@nju.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20220504

Two-dimensional materials for neuromorphic devices

WANG Shuang LIANG Shi-Jun[†] MIAO Feng^{††}

(National Laboratory of Solid State Microstructures, Collaborative Innovation Center of Advanced Microstructures, School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

摘 要 研究类脑器件是构建一个能够与大脑相媲美的类脑信息处理系统的重要基础。二维材料凭借优异的电学与光电特性、可多自由度调控以及可三维垂直集成等优势,为设计多功能的类脑器件提供了丰富的材料和机制选择。文章围绕二维材料及异质结类脑器件的设计展开,通过总结最近的重要研究进展,探究该领域未来可能面临的机遇与挑战。

关键词 二维材料, 类脑器件, 感算一体, 存算一体

Abstract Construction of brain-inspired systems that emulate the information processing capability of the human brain relies on studies of neuromorphic devices. Two-dimensional materials, which possess excellent electric and photoelectric characteristics, multiple degrees of freedom of control, as well as great potential in three-dimensional vertical integration, provide the foundation of the device physics for designing multifunctional neuromorphic devices. In this article we present an overview of recent important progress associated with two-dimensional materials and van der Waals heterostructure neuromorphic devices, and also discuss future opportunities and challenges.

Keywords two-dimensional material, neuromorphic device, in-sensor computing, in-memory computing

1 引言

大脑是神经系统中结构最复杂、功能最高级的器官。19世纪伊始,生理学家已开始对大脑及周围组织的功能展开系统性的研究。人脑拥有百

亿数量级的神经元,每个神经元通过数千突触与其他神经元相连接,形成错综复杂的信息处理网络。这个庞大的网络实时接收各感官传递的模拟信息(如图像、声音、气味等),以高度并行的方式进行信息处理。整个过程消耗约20 W左右的能耗,相当于一个灯泡的功率。与此同时,大脑具

* 国家重点研发计划(批准号: 2019YFB2205400, 2019YFB2205402)、国家自然科学基金(批准号: 62034004, 62122036, 61625402, 61974176, 61921005)资助项目;中科院战略性先导科技专项(批准号: XDB44000000)

有学习和适应的能力,这为人工智能的实现提供了最现实的参考范式。可以预见,如果能够将大脑如此卓越的信息处理能力迁移至机器上,构建一个类似大脑的信息处理系统,将会为未来人工智能的发展注入强劲的驱动力。

类脑计算(brain-inspired computing),也被称为神经形态计算(neuromorphic computing),就在这一背景下应运而生。它以神经元和突触接收刺激、信息整合、脉冲发放等过程为设计灵感,构建一系列受脑启发的计算模型、器件原型和集成架构。20世纪90年代,加州理工学院的Carver Mead团队首次提出类脑工程(也被称为“类脑计算”)的概念^[1, 2],并通过大规模硅基集成电路技术对生物神经系统进行了模拟。随后,从神经生物模型中抽象出的“地址—事件协议”在硬件上得以成功实现^[3],与此相关的事件驱动相机也进入商用阶段^[4]。然而,硅基互补金属氧化物半导体(CMOS)技术被认为不是构建类脑系统最理想的技术路线。其一,基于硅基CMOS器件模拟单个突触或神经元往往涉及几十个晶体管的复杂互联。随着类脑系统规模的进一步扩大,系统布线的复杂程度将呈指数式增长,大大增加延迟。其二,生物神经系统往往呈层状分布,数据的传递和处理依靠不同功能层之间的并行信息流动来进行。硅基工艺作为平面集成工艺,在实现生物系统不同功能层之间的三维垂直集成方面面临严峻的挑战。因此,基于新材料的类脑器件探索和研究在近年来受到相关领域研究者的极大关注^[5-12]。

2004年单层石墨烯的成功获得宣告了二维原

子晶体材料的诞生,这为凝聚态物理和新原理器件开拓了崭新的研究视野^[13]。二维材料是一类具有原子级厚度的新型材料,其在器件应用方面具备众多优势,主要包括:(1)基于二维材料的电子器件具有原子级平整度的表面,且载流子迁移被限制在二维平面内,在极限尺度下仍保持着优异的电学性能;(2)二维材料物性调控的自由度异常丰富,包括但不限于电场调控、光场调控、磁场调控、离子调控、应力调控等,通过对器件结构的合理设计,二维材料电子器件的性能和功能可得到进一步的拓展提升;(3)通过采用类似“搭乐高”的方式对二维材料进行堆垛,可形成组合方式和堆叠顺序多样的范德瓦耳斯异质结构^[14-16](也被称为“原子乐高”),实现功能化的器件设计^[17-20]。这也有望为构建不同功能层垂直集成的三维系统提供解决方案。因此,探究二维材料及异质结的基本物性,设计与之相关的类脑器件原型和阵列化扩展方案,对类脑计算的发展和类脑系统的构建具有重要意义。本文针对二维材料及异质结体系在类脑器件方面的应用展开讨论,首先介绍类脑器件的构建条件,再分别对相关领域内的研究进展进行综述,最后讨论未来的发展前景和所面临的挑战。

2 类脑器件的基本构建条件

为了实现高度智能化的技术革新,人们试图通过研究生物神经系统的工作原理(图1(a)),来开发高效、稳定、低能耗的类脑系统硬件平台^[21]。

类脑系统的设计显然不是对生物神经系统直接进行复制和迁移。了解生物神经系统的基本单元,将其行为抽象成易理解的数学表达方式,并为其找到稳定可靠的器件物理模型,是设计类脑系统的基础。生物神经系统由亿万个神经元和突触组成。神经元具有接收刺激、整合信息、传导兴奋的作用,并以神经冲动的形式来进行信息传递。在该过程中,突

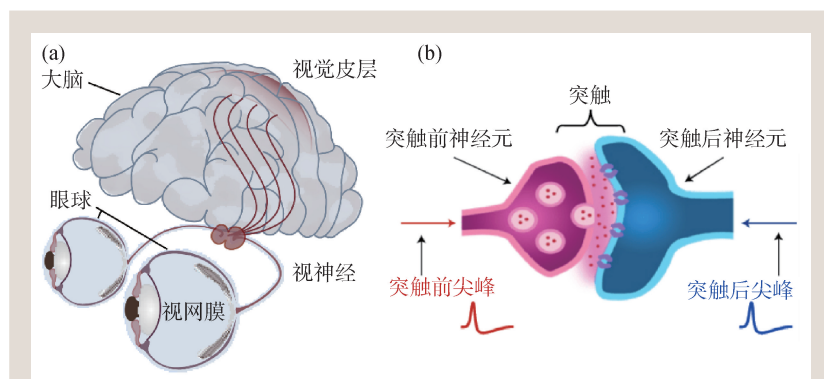


图1 (a)人脑视觉系统^[21]; (b)突触的基本结构^[22]

触起到了连接的作用,其接收来自上一神经元的神经冲动,并传递至下一神经元(图1(b))^[23]。突触的这种连接性会随着神经活动的不同而增强或减弱,这被称为突触可塑性(synaptic plasticity),其中包括短程可塑性(short-term plasticity, STP)、长程可塑性(long-term plasticity, LTP)、脉冲时间依赖可塑性(spike-timing-dependent plasticity, STDP)等。如需进一步了解,可详细阅读相关文章^[23],此处不再赘述。人们广泛认为,突触可塑性是生物体进行学习与记忆的基础。同时,在人工神经网络中,突触可塑性通常被用于建立神经元之间的联系。因此,早期类脑器件的设计,主要围绕突触可塑性的模拟展开。模拟突触可塑性的类脑器件同时具有两个功能:兴奋传递和权值更新。当器件存储状态不变时,对应的突触权值不发生改变。这种情况可用来模拟突触在神经元之间的兴奋传递过程。一个典型的例子是将器件视为满足欧姆定律的纯电阻,则该器件可以通过输入电压信号、测量电流信号的方式进行线性信息传递。在特定输入状态下,器件的阻值随着输入信号的改变而改变。这种情况用于模拟突触随神经活动的变化而变化,即权值更新。由于生物神经系统是纯模拟系统,因此要求类脑器件的阻值可以实现可调的多态。由此可见,类脑器件的设计需要以信息为中心,围绕着信息的接收、存储、处理、传递过程展开。

无独有偶,感算一体^[24](in-sensor computing)和存算一体(in-memory computing)(图2)概念近年来呈现蓬勃发展的态势。二者与以信息为中心的类脑器件的设计思想不谋而合,但具备实现“信息处理”的位置略有不同。对于足够智能的系统来说,早在信息接收端就会产生对“智能”的需求。生物神经系统给出了很典型的例子。例如,视网膜不仅可以感觉外界图像信息,还可以在感觉的同时对图像信息进行预处理。视网膜预处理后的信息相对原始图像拥有更高级的特征,不但大幅提升了信息的传输效率,同时加速了大脑皮层对图像信息的认知。感算一体器件,目前是将生物感受器对外界信息的预处理能力迁移至人工智能系统的最有潜力的器件模型。这将极大地释

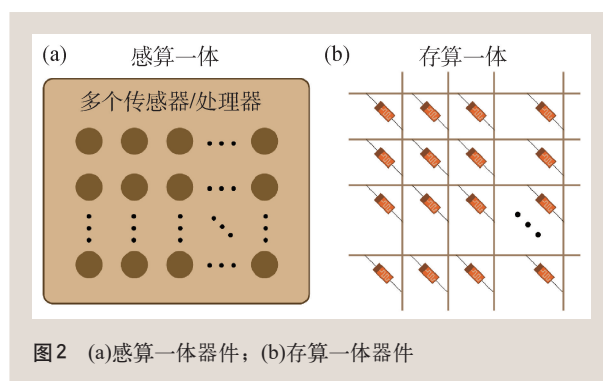


图2 (a)感算一体器件;(b)存算一体器件

放信息传输带宽,降低后端处理器执行任务的复杂程度,并提高任务的完成质量。存算一体概念的提出,旨在解决传统计算机在处理庞大任务时,由于数据存储和数据处理分离带来的功耗和速率问题。它以数据为中心,将数据存储与处理融合在同一硬件中,简化了数据的访问过程,从而突破传统架构的功耗瓶颈和速率瓶颈。目前,静态随机存储器(SRAM)、动态随机存储器(DRAM)、磁随机存储器(MRAM)、阻变随机存储器(ReRAM)、闪存(Flash)、相变存储器(PCM)等均可作为存算一体的硬件选择^[6, 25]。因此,构建一个高效的类脑处理系统离不开感算一体器件与存算一体器件的双轨发展。

3 感算一体器件

生物神经系统通过感受器实时接收自然界产生的信息。这些信息以高度并行的方式源源不断地传入大脑皮层,产生了视觉、听觉、嗅觉、触觉等。其中,视觉信息占据了信息总量的80%以上。生物神经系统这种实时接收并高效处理外界信息的能力,是人工智能技术持续追求的目标之一。近十年来,二维材料及范德瓦耳斯异质结在光、电、磁、热、应力等多方面均展现了出色的易受调控的能力^[18, 26–28]。如果应用于信息的同步感知,将为模拟生物神经系统感受器提供可行的解决方案^[29]。

视网膜是一种具备感觉光信息,并同时进行信息预处理功能的垂直分层结构,主要包括感光细胞、水平细胞、双极细胞等^[30, 31]。对视网膜结构和功能的解析,有助于我们对人类视觉系统强

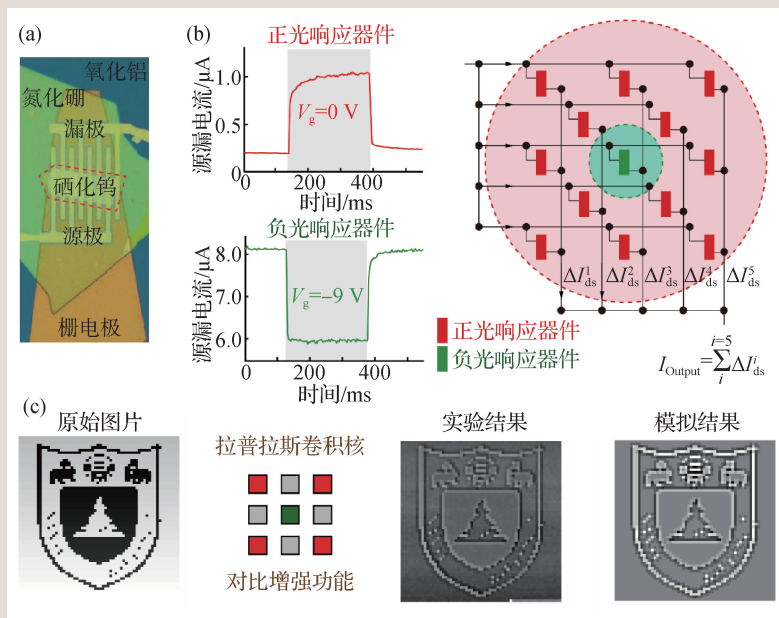


图3 感算一体器件与图像处理应用^[33] (a)视网膜形态传感器的光学图片；(b)视网膜形态传感器的正/负光响应，以及视网膜形态传感器阵列示意图；(c)视网膜形态传感器被编程为拉普拉斯卷积核时，对渐变南京大学校徽图片的处理效果

大的信息处理能力进行重构和迁移。当一束光入射到视网膜，感光细胞负责将光信号转化为电信号。当电信号流经双极细胞时，双极细胞的内禀生物特性会对电信号进一步加工与处理。处理后的视觉信息仅被保留主要的图像特征，并进一步向大脑皮层视觉中枢传递^[32]。借鉴生物视网膜这种信息探测与同步处理的行为，南京大学团队近期提出了基于二维材料垂直异质结的视网膜形态传感器(图3(a))^[33]。视网膜形态传感器，首先需要具备感光的功能。大多数二维半导体材料，如硒化钨、硫化钼、硫化铌等，其带隙与可见光波段的光子能量是匹配的。少部分窄带隙二维材料，如黑磷、黑砷磷，可以将感光范围拓宽至红外波段^[34, 35]。因此，研究人员可以根据不同的感光范围，选择与之能带匹配的二维材料作为感光层。其次，视网膜形态传感器需要模拟双极细胞的生物功能。双极细胞是一类将感光细胞传来的视觉神经冲动转化为正/负两种不同响应极性的细胞。该团队发现，对于薄层硒化钨、氮化硼、氧化铝垂直堆叠而成的异质结器件，通过调控背栅电压的大小与极性，可以实现对双极细胞正/负光响应

的模拟(图3(b))。进一步，视网膜形态传感器被组装成一个 3×3 的小型阵列，从而可以通过调节背栅电压的方式，将计算机图像处理中常用的卷积核映射到阵列中(图3(c))。在实验中，该团队展示了对南京大学校徽图片的边缘增强、风格化、强度校正等图像处理效果，并通过该阵列训练了一个小型的卷积神经网络，成功实现了对“N”、“J”、“U”字母的识别。最后，该团队将预处理后的图像信息输入神经网络进行识别，预处理后的图像相对于原图展示出更快的识别收敛速度^[36]。这一系列工作首次利用二维材料范德瓦耳斯异质结的特性模拟了人类视网膜的结构和功能，有望为新型类脑视觉芯片的实现提供物理基础和技术支撑。

同时，维也纳科技大学团队利用二维材料的光电性质和电场调控能力，构建了一类神经网络图像传感器(图4(a))^[37]。这类图像传感器可以感知和识别出简单的字母，所花费的时间仅有几十纳秒！器件具有如此优异的性能表现，与二维材料自身的物理性质有很大关系。他们选择的图像传感器沟道材料是具有双极性的硒化钨，图像传感器的单个像素采用的是分立栅(split gate)晶体管结构，两个栅极之间存在300 nm左右的狭缝。受分离栅施加的垂直方向电场的调控，硒化钨器件会变成一个横向PN结(或者NP结)的光电二极管，结区势垒高度随分离栅施加的电场而变化。栅极1与栅极2施加的电压信号能够调节二极管的光响应灵敏度。对于单个像素来说，测得的光电流 I 与光响应灵敏度 R 之间满足如下关系： $I=R\cdot P$ ，其中 P 为单个像素的入射光强。这是将单个像素组装成具有识别图像信息能力的神经网络图像传感器的物理基础。通过对器件进行集成，该团队最终制备了 3×3 大小的神经网络图像传感器，

其中每一个像素拥有三个PN结(或者NP结)光电二极管(图4(b))。每一个光电二极管分别与其他八个像素内同样位置的二极管相连接,形成 9×3 的人工神经网络。对于神经网络图像传感器来说,最终测得的光电流满足如下关系:
$$I_m = \sum_{n=1}^N I_{mn} = \sum_{n=1}^N R_{mn} P_n$$
。光响应灵敏度代表人工神经网络中的突触权重值,即此处的 R_{mn} 。经过训练后,该神经网络图像传感器可以实现对 3×3 图像的识别和编码/解码。

4 存算一体器件

正如上文所提到的,存算一体发展至今,已经衍生出了许多类别的硬件原型。而二维材料及范德瓦耳斯异质结凭借其独特的性质,在存算一体器件发展历程中扮演了重要的角色^[38]。它们常常被用于改善存算一体器件的性能表现,或者直接赋予器件一类全新多样的功能。近年来,基于二维材料和范德瓦耳斯异质结的存算一体器件,在国内外均有报道,其阻态开关机制包括但不限于导电细丝^[39, 40](conductive filament)、电荷交换^[23, 41, 42](charge transfer)、材料相变^[43](phase transition)、离子插层^[44, 45](ions intercalation)等。在本节中,我们将从二维材料及异质结的自身特点出发,着眼于其对存算一体器件带来的性能提升,选择几篇代表性工作进行介绍。

忆阻器被认为是最有潜力用于模拟人工神经网络中突触的器件之一。1971年,美国加州大学伯克利分校的蔡少棠(Leon Chua)从理论上预言了忆阻器这类器件^[46];2008年,美国惠普实验室R. Stan Williams团队首次利用金属/金属氧化物/金属三明治结构证实了忆阻器的存在^[5]。此后,金属氧化物忆阻器得到迅速发展,从小规模阵列逐步走向类脑计算芯片原型。与此同时,金属氧化物忆阻器的均一性、可靠性、稳定性等问题一直困扰着研究人员。随着人们对二维材料性能认知的逐步深入,开始有研究团队尝试在金属氧化物忆阻器中引入二维材料,用于解决活性金属导电细丝难以控制等问题^[47—50]。

2018年,南京大学团队利用石墨烯作为电极材料,氧化硫化钼作为开关介质层,制备了范德瓦耳斯结构的垂直异质结(图5(a))^[51]。这种纯二维材料的忆阻器由于具有原子级锐度的范德瓦耳斯界面,展现出媲美传统忆阻器的稳定开关性能,擦写次数大于千万次,擦写时间小于100 ns。值得一提的是,由于石墨烯和氧化硫化钼具有超高的热稳定性,以及石墨烯电极极佳的抗穿透性,使该忆阻器在高达340℃的工作温度下仍具有稳定的擦写性能。这是对传统金属氧化物忆阻器性能极限的一大突破,使存算一体器件在极端环境下的应用成为可能。

同时,利用单种二维材料作为忆阻器开关层,普通金属作为电极,利用二维材料生长获取过程中产生的晶界、位错、缺陷等来实现忆阻器开关的设计思路,也得到了众多关注^[40, 52—58]。例如,美国西北大学团队报道了利用化学气相沉积(CVD)生长的单层硫化钼中的晶界(grain boundary)移动实现了平面结构忆阻器的工作(图5(b))^[53]。美国得克萨斯大学奥斯汀分校团队在CVD生长的单层硫化钼、硒化钼、硫化钨、硒化钨以及氮化硼

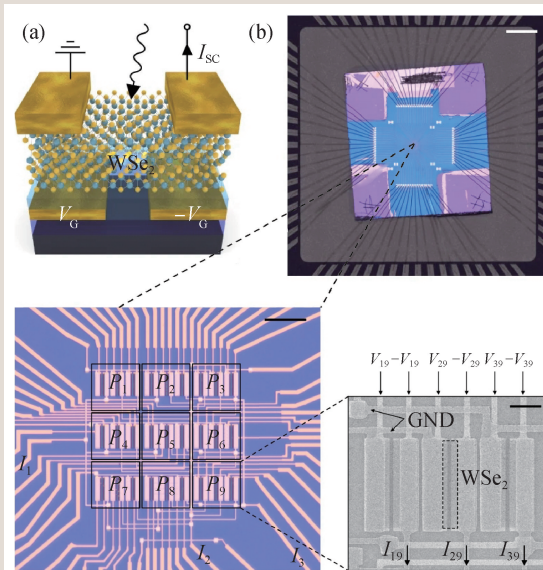


图4 感算一体器件与人工神经网络应用^[34] (a)神经网络图像传感器的器件结构示意图;(b)神经网络图像传感器在两种放大倍数下的光学图片(比例尺:2 mm, 15 μm)以及电镜图片(比例尺:3 μm),其中GND是电线接地端

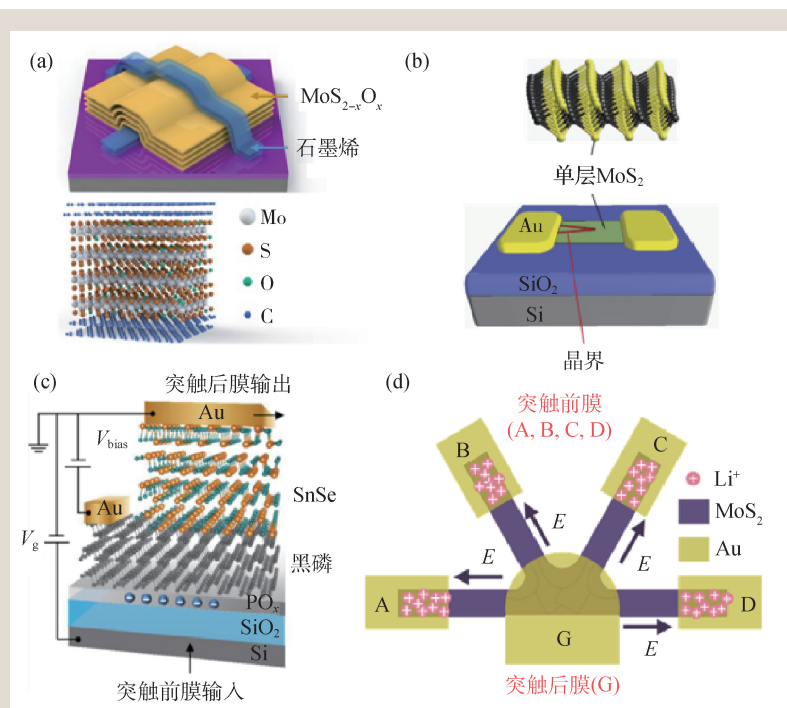


图5 存算一体器件与人工突触应用 (a)耐高温忆阻器^[51]; (b)晶界忆阻器^[53]; (c)垂直异质结突触^[41]; (d)离子调控的多端器件^[45]

垂直结构中均发现了忆阻开关现象,从而将非易失性存储器的垂直开关层厚度推至原子级^[55, 59]。此外,苏州大学团队在CVD生长的多层氮化硼垂直结构中也观察到忆阻现象,并且利用其可调的存储特性模拟了突触可塑性行为^[40]。

二维材料凭借其多样的物性调控自由度,为存算一体器件拓展了更广泛的应用场景。例如,美国南加州大学团队将二维层状黑磷和硒化锡堆叠成垂直异质结(图5(c)),并将其制备成晶体管型的类脑器件,利用电场调控该垂直异质结的界面能带匹配,成功模拟了突触兴奋和抑制两种状态的转变^[41]。华中科技大学和中国科学院上海技术物理研究所合作团队利用二维材料与铁电材料近邻耦合的物理机制,用相同的器件结构分别实现了外围电路和存储器的设计^[60]。一方面,铁电极化层为二维材料沟道提供电学掺杂的非易失性电场,从而可以构建PN结或结型晶体管(BJT)等器件。这些器件作为构建运算放大器的基本器件单元,有助于推动外围电路设计。另一方面,铁电畴的极化翻转可以改变BJT结区的内建势垒,可用于设计非易失性存储器件。二维层状材料具有

多种不同的晶格结构,这些晶格结构具有不同的导电性,并能够通过掺杂手段实现相互转化。美国密歇根大学团队通过电场驱动锂离子在硫化钼层间的水平迁移,通过改变材料内锂离子的浓度使硫化钼发生由2H相(半导体相)到1T'相(金属相)的转变(图5(d))^[45]。利用电场调控的离子迁移实现相变,他们成功模拟了生物神经系统中突触间协作与竞争的关系。

器件结构的合理设计通常会为器件引入更丰富多样的功能。例如,复旦大学团队基于二维层状材料硫化钼,制备了具有顶栅和底栅两个栅极结构的晶体管(图6(a))^[61]。当硫化钼厚度相当薄,大约在几个原子范围内(实验证实

小于4 nm),可认为顶栅和底栅调控同一平面的沟道载流子。在这种情况下,每一个栅极的电压均可以耗尽硫化钼沟道中的载流子。只有两个栅极电压均大于硫化钼阈值电压,方可使硫化钼沟道处于开启态。如果将栅极的电信号输入等效为逻辑输入,源漏的电流输出视为逻辑输出,则只需要一个硫化钼器件,即可实现AND逻辑门的计算。与此同时,任何使硫化钼沟道内载流子数目增加的外界调控因素,如光照,均可以使该硫化钼器件的AND逻辑切换为OR逻辑。这种逻辑状态可以通过在硫化钼的底栅介质中插入石墨烯形成浮栅器件,而得以保留,最终在一个器件融合了逻辑运算和原位存储两大功能。除了利用垂直双栅结构,水平分立栅结构器件也具有可重构的能力。例如,南京大学团队运用二维材料硒化钨的双极性场效应特性和出色的电场调节能力,设计出分立栅结构的二维可调同质结器件^[23](electrically tunable homojunctions, ETH)(图6(b))。通过源漏电压和两个分立栅电压的独立调控,ETH器件共表现出8种丰富的电流开关状态,进而实现P型/N型场效应晶体管、正/反偏二极管等多种

开关功能的切换。基于ETH器件的可重构逻辑电路,在保持大幅度降低晶体管数目、简化电路架构的同时,仍具备与传统硅基技术相媲美的信号输出质量。此外,研究人员将3个ETH器件与1个电容元件进行互联,设计出了可重构的突触电路,实现了对突触时间脉冲依赖可塑性(STDP)、赫布(Hebbian)/反赫布(anti-Hebbian)学习规则的模拟。

随着材料生长工艺的逐步突破,基于二维材料的存算一体器件正在向较大规模集成应用的目标稳步发展。2020年,苏州大学团队实现了六方氮化硼的晶圆级生长,并将其制备成较高密度的忆阻器交叉阵列(图6(c))^[62]。整个忆阻器阵列保持着98%的器件良率,较低的循环测试差异性(1.53%)和器件之间差异性(5.74%),展现了二维材料忆阻器阵列实现大规模应用的潜力。同年,瑞士洛桑联邦理工学院团队用金属有机化学气相沉积(MOCVD)生长的单层硫化钼作为浮栅晶体管的沟道层,实现了厘米级存算一体阵列(图6(d))的功能展示^[63]。研究人员利用硫化钼阈值电压受到浮栅层中存储电荷数目和栅极电压的共同影响,实现了整体高电平、反相器、整体低电平三种状态的切换。通过分别控制多个级联的硫化钼浮栅器件内部存储的电荷量,可以实现具有NAND门、XOR门、加法器等功能较复杂的逻辑电路,大幅简化了电路结构。复旦大学团队利用机器学习算法,通过对影响二维材料器件电学性能的关键工艺参数进行评估,优化了MoS₂顶栅晶体管的制备工艺,并采用工业标准设计流程和工艺实现了晶圆级器件与电路的制造和测试^[64]。这一系列工作充分展示了在未来存算一体器件的系统级应用方面,二维材料所具有的卓越潜力。

5 总结与展望

将二维材料的独特物性用于设计和组装类脑器件,无疑是为逆向脑工程提供了一种可行且具备优势的解决思路。二维材料“原子乐高”可堆叠的能力,为灵活地设计实现不同类型的二维材料功能层提供了前所未有的强大手段。可期望在未来一段时间内,以二维材料和范德瓦耳斯异质结为材料基础的感/存算一体器件,将作为相关领域研究人员的设计原型,用于实现低能耗、低延迟、高并行度的类脑信息处理系统,并逐步走向应用。

同时,基于二维材料的类脑器件的发展也将为类脑计算领域带来更多的机遇与新的挑战。首先,大规模阵列的类脑芯片功能展示,对二维材料和范德瓦耳斯异质结大面积合成工艺与转移工艺提出了极高的要求。近年来,我国研究人员持续在石墨烯^[65-67]、六方氮化硼^[68, 69]、过渡金属硫化物^[70-72]等二维体系中实现低成本、大面积、

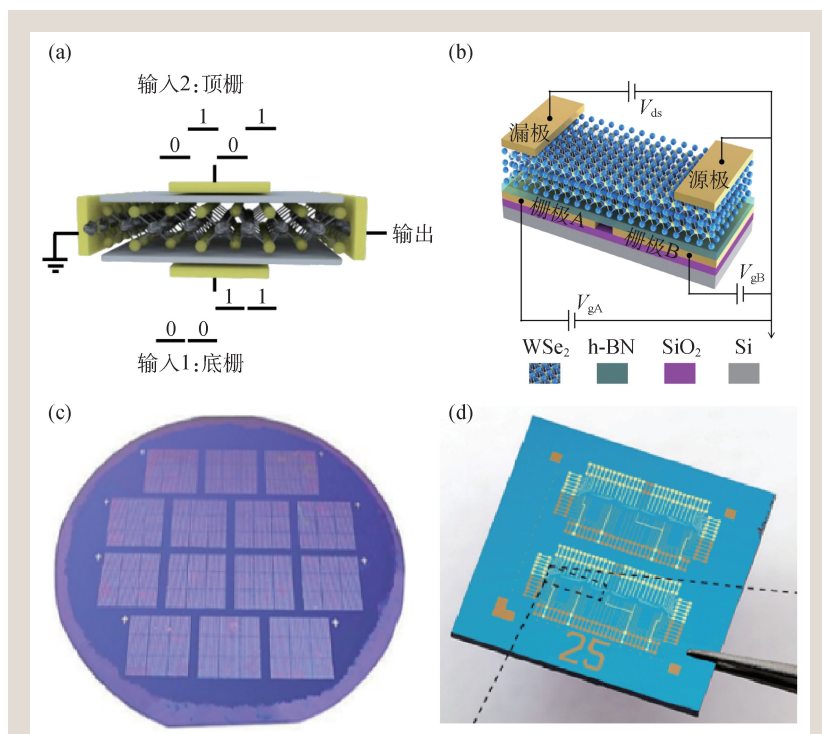


图6 存算一体器件与阵列应用 (a)垂直双栅晶体管^[61]; (b)水平双栅晶体管^[23]; (c)晶圆级忆阻器阵列^[62]; (d)厘米级存算一体阵列^[63]

高质量的材料合成。但是,对于一些已被证实具有优异物性的二维材料及人工异质结,比如黑磷,其大面积生长工艺仍未取得突破。此外,材料转移过程中引入的褶皱、缺陷、杂质对器件均一性和良率的影响不容忽视,甚至可能导致器件性能的退化。其次,在新型类脑器件的发展历程中,器件物理始终是连接材料体系与生物模型的桥梁。对于物理学领域相关的研究人员来说,探索二维材料及异质结的独特物性和新型器件物理,将为实现更具生物相似性,甚至远超生物体功能的类脑器件原型提供原始和基础的推动力。例如,利用范德瓦耳斯异质结构中自旋轨道转矩以及铁电极化等材料物性,可以实现超低功耗的存算一体处理器^[73]。通过对二维材料能带结构的多自由度调控,设计实现宽光谱、宽动态范围的范德瓦耳斯异质结器件,可以使图像处理器具有接近甚至超越人眼视网膜的视觉信息处理能力。

参考文献

- [1] Mead C. Analog VLSI and Neural Systems. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1989
- [2] Mead C. Proceedings of the IEEE, 1990, 78(10): 1629
- [3] Mahowald M A. VLSI Analogs of Neuronal Visual Processing: a Synthesis of Form and Function. California Institute of Technology, 1992
- [4] <https://www.sony-semicon.co.jp/e/news/2021/2021090901.html>
- [5] Strukov D B, Snider G S, Stewart D R *et al.* Nature, 2008, 453(7191): 80
- [6] Yang J J, Strukov D B, Stewart D R. Nat. Nanotech., 2013, 8(1): 13
- [7] Xi Y, Gao B, Tang J *et al.* Proceedings of the IEEE, 2021, 109(1): 14
- [8] Zhu J, Zhang T, Yang Y *et al.* Appl. Phys. Rev., 2020, 7(1): 011312
- [9] Wang S, Zhang D W, Zhou P. Science Bulletin, 2019, 64(15): 1056
- [10] 刘益春, 林亚, 王中强 等. 物理学报, 2019, 68(16): 168504
- [11] Shi T, Wang R, Wu Z *et al.* Small Structures, 2021, 2(4): 2000109
- [12] 缪向水. 忆阻器导论. 北京: 科学出版社, 2018
- [13] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V *et al.* Science, 2004, 306(5696): 666
- [14] Novoselov K S, Mishchenko A, Carvalho A *et al.* Science, 2016, 353(6298): aac9439
- [15] Jariwala D, Marks T J, Hersam M C. Nature Materials, 2017, 16(2): 170
- [16] Liu Y, Huang Y, Duan X. Nature, 2019, 567(7748): 323
- [17] Liu Y, Weiss N O, Duan X *et al.* Nat. Rev. Mater., 2016, 1(9): 16042
- [18] Liang S J, Cheng B, Cui X *et al.* Adv. Mater., 2019, 32(27): 1903800
- [19] Liu C, Chen H, Wang S *et al.* Nat. Nanotech., 2020, 15(7): 545
- [20] Chen Y, Wang Y, Wang Z *et al.* Nat. Electron., 2021, 4(5): 357
- [21] Chua L. National Science Review, 2021, 8(2): nwaal82
- [22] Pan C, Wang C Y, Liang S J *et al.* Nat. Electron., 2020, 3(7): 383
- [23] Citri A, Malenka R C. Neuropsychopharmacology, 2008, 33(1): 18
- [24] Zhou F, Chai Y. Nat. Electron., 2020, 3(11): 664
- [25] Sebastian A, Le Gallo M, Khaddam-Aljameh R *et al.* Nat. Nanotech., 2020, 15(7): 529
- [26] Li X, Tao L, Chen Z *et al.* Appl. Phys. Rev., 2017, 4(2): 021306
- [27] Hu Z, Wu Z, Han C *et al.* Chem. Soc. Rev., 2018, 47(9): 3100
- [28] Miao F, Liang S J, Cheng B. npj Quantum Mater., 2021, 6(1): 59
- [29] Zhou F, Chen J, Tao X *et al.* Research, 2019, 2019: 9490413
- [30] Masland R H. Nature Neuroscience, 2001, 4(9): 877
- [31] Field G D, Chichilnisky E J. Annual Review of Neuroscience, 2007, 30(1): 1
- [32] Gollisch T, Meister M. Neuron, 2010, 65(2): 150
- [33] Wang C Y, Liang S J, Wang S *et al.* Sci. Adv., 2021, 6(26): eab6173
- [34] Gao A, Lai J, Wang Y *et al.* Nat. Nanotech., 2019, 14(3): 217
- [35] Long M, Gao A, Wang P *et al.* Sci. Adv., 2017, 3(6): e1700589

致谢 感谢课题组成员杨悦昆博士、施婧雯在本文写作中的付出。

- [36] Wang S, Wang C Y, Wang P *et al.* National Science Review, 2021, 8(2):nwaa172
- [37] Mennel L, Symonowicz J, Wachter S *et al.* Nature, 2020, 579 (7797): 62
- [38] Wang C Y, Wang C, Meng F *et al.* Advanced Electronic Materials, 2020, 6(2):1901107
- [39] Sun L, Zhang Y, Han G *et al.* Nat. Commun., 2019, 10(1): 3161
- [40] Shi Y, Liang X, Yuan B *et al.* Nat. Electron., 2018, 1(8):458
- [41] Tian H, Cao X, Xie Y *et al.* ACS Nano, 2017, 11(7): 7156
- [42] Liu C, Yan X, Song X *et al.* Nat. Nanotech., 2018, 13(5): 404
- [43] Zhang F, Zhang H, Krylyuk S *et al.* Nat. Mater., 2019, 18(1): 55
- [44] Zhu J, Yang Y, Jia R *et al.* Adv. Mater., 2018, 30(21):1800195
- [45] Zhu X, Li D, Liang X *et al.* Nat. Mater., 2019, 18(2): 141
- [46] Chua L. IEEE Transactions on Circuit Theory, 1971, 18(5):507
- [47] Zhao X, Ma J, Xiao X *et al.* Adv. Mater., 2018, 30(14):1705193
- [48] Liu S, Lu N, Zhao X *et al.* Adv. Mater., 2016, 28(48):10623
- [49] Qian M, Pan Y, Liu F *et al.* Adv. Mater., 2014, 26(20):3275
- [50] Tian H, Chen H Y, Gao B *et al.* Nano Letters, 2013, 13(2):651
- [51] Wang M, Cai S, Pan C *et al.* Nat. Electron., 2018, 1(2):130
- [52] Sangwan V K, Lee H S, Bergeron H *et al.* Nature, 2018, 554 (7693):500
- [53] Sangwan V K, Jariwala D, Kim I S *et al.* Nat. Nanotech., 2015, 10(5):403
- [54] Xiong X, Kang J, Hu Q *et al.* Adv. Funct. Mater., 2020, 30(11): 1909645
- [55] Ge R, Wu X, Kim M *et al.* Nano Letters, 2018, 18(1):434
- [56] Hus S M, Ge R, Chen P A *et al.* Nat. Nanotech., 2021, 16(1):58
- [57] Tian H, Wang X F, Mohammad M A *et al.* Nat. Commun., 2018, 9(1):4305
- [58] Zhang Z, Li T, Wu Y *et al.* Adv. Mater., 2019, 31(3):1805769
- [59] Kim M, Pallecchi E, Ge R *et al.* Nat. Electron., 2020, 3(8):479
- [60] Tong L, Peng Z, Lin R *et al.* Science, 2021, 373(6561):1353
- [61] Liu C, Chen H, Hou X *et al.* Nat. Nanotechn., 2019, 14(7):662
- [62] Chen S, Mahmoodi M R, Shi Y *et al.* Nat. Electron., 2020, 3(10): 638
- [63] Migliato Marega G, Zhao Y, Avsar A *et al.* Nature, 2020, 587 (7832): 72
- [64] Chen X, Xie Y, Sheng Y *et al.* Nat. Commun., 2021, 12(1): 5953
- [65] Deng B, Hsu P C, Chen G *et al.* Nano Letters, 2015, 15(6):4206
- [66] Xu X, Zhang Z, Dong J *et al.* Science Bulletin, 2017, 62(15): 1074
- [67] Yuan G, Lin D, Wang Y *et al.* Nature, 2020, 577(7789):204
- [68] Wang L, Xu X, Zhang L *et al.* Nature, 2019, 570(7759):91
- [69] Chen T A, Chuu C P, Tseng C C *et al.* Nature, 2020, 579(7798):219
- [70] Yu H, Liao M, Zhao W *et al.* ACS Nano, 2017, 11(12):12001
- [71] Li T, Guo W, Ma L *et al.* Nat. Nanotech., 2021, 16:1201
- [72] Yang P, Zhang S, Pan S *et al.* ACS Nano, 2020, 14(4):5036
- [73] Xiao J, Wang Y, Wang H *et al.* Nat. Phys., 2020, 16(10):1028
- [74] Christensen D V, Dittmann R, Linares-Barranco B *et al.* 2021, arXiv:2105.05956



CIOE
中国光博会

光学全产业链 展示及交流平台



**精密光学展&
摄像头技术及应用展**
PRECISION OPTICS EXPO & CAMERA EXPO

2022年9月7-9日

深圳国际会展中心(宝安新馆)



扫码登记免费参观

第24届中国国际光电博览会

240,000M²展示面积 | 10,000+专业观众 | 3,000+参展企业

同期展会



信息通信展
INFORMATION & COMMUNICATIONS EXPO



激光技术
及智能制造展
LASER TECHNOLOGY
& INTELLIGENT MANUFACTURING EXPO



红外技术及应用展
INFRARED APPLICATIONS EXPO



智能传感展
INTELLIGENT SENSING EXPO



光电子创新&
新型显示新技术展
PHOTONICS INNOVATION & NEW DISPLAY TECHNOLOGY EXPO