

专题: 二维材料与未来信息器件

基于二维材料的集成与应用

杨高琛 马辰龙 徐浪浪 史文昊 黄鑫宇 孙铭君 毕铭 何啸
孟潇涵 吕晟杰 林维佳 贺敏 童磊[†] 叶镭[‡]

(华中科技大学集成电路学院, 武汉 430074)

(2025 年 10 月 13 日收到; 2025 年 11 月 14 日收到修改稿)

在后摩尔时代, 随着器件物理尺寸的缩放极限和冯·诺依曼架构的局限性逐渐显现, 传统硅基集成电路领域面临严峻挑战. 然而, 二维层状材料凭借无悬挂键、高载流子迁移率、高光生载流子浓度等独特的物理特性, 有望突破这些瓶颈. 目前, 许多二维材料已经实现了规模化生长与应用, 在高性能单一功能器件、多功能融合器件、逻辑电路和集成芯片制造与应用当中展现出巨大的潜力. 本文综述了二维材料的基本特性、构成的基础功能器件、功能电路模块以及三维集成等方面的研究进展, 重点探讨了二维材料在规模化集成方案方面的挑战和解决路径, 并为未来的发展方向提出了展望.

关键词: 二维材料, 基础功能器件, 逻辑电路, 规模化集成**DOI:** 10.7498/aps.75.20251386**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251386

1 引言

随着摩尔定律在缩小器件物理尺寸和降低计算功耗上遇到瓶颈, 传统硅基集成电路在延续半个世纪辉煌后, 发展已进入极限^[1,2]. 并且随着人工智能、大数据处理和高性能计算 (HPC) 等领域对算力与能效的需求迅速攀升, 对传统硅基路线硬件提出更高要求. 因此, 寻求新型材料并开发新型硬件架构成为突破上述挑战的关键思路^[3-5]. 在此背景下, 二维材料凭借其独特的物理特性, 如无悬挂键、高载流子迁移率、优异的光电响应等, 展现了巨大的应用潜力. 尤其是石墨烯、过渡金属硫族化合物 (transition metal dichalcogenides, TMDs)、六方氮化硼等, 在电子、光电、柔性传感等多个领域表现出了独特的优势^[6-8]. 它们不仅支持高性能逻辑、传感、存储等器件的开发, 且其可调控的物理性质在多功能集成器件、神经形态电路和新型架

构芯片等应用领域展示了广阔的前景^[9-11]. 因此, 性能优异的二维材料成为继硅基材料之后, 推动集成电路材料和硬件架构革新的重要力量之一^[12,13].

尽管二维材料在实验室环境中展示了卓越的性能, 但将其推广到大规模生产、器件集成和实际应用中仍然面临着巨大的挑战^[14-16]. 特别是在二维材料的规模化生长、器件与电路的大规模制造, 以及三维集成和芯片级应用等方面, 如何有效解决上述挑战, 仍然是科研和产业界亟待解决的关键问题.

本综述针对上述问题展开讨论, 介绍了近几年二维材料集成与应用方面具有代表性的研究成果. 第 2 节介绍常见的二维材料的结构、性质; 第 3 节讨论基于常见二维材料制备的各类器件, 包括单一功能和多功能融合的逻辑、存储、传感器件与新型神经形态器件; 第 4 节讨论基于二维材料器件构建的基本电路单元与模块, 包含数字、模拟电路单元; 第 6 节讨论基于二维材料的器件、电路模块实现的

[†] 通信作者. E-mail: leitong@hust.edu.cn[‡] 通信作者. E-mail: leiye@hust.edu.cn

三维集成方案与芯片应用; 最后第 7 节对该领域未来的发展进行展望.

2 二维材料的基本特性

作为支持未来新型非硅基硬件发展的新兴材料, 二维材料在过去十余年内受到学界广泛的关注. 近些年研究指出, 使用二维材料作为沟道可以在更小的工艺节点克服短沟道效应, 降低漏电流与功耗; 同时在极薄的厚度下保持高室温迁移率^[16–18]. 2018 年, Jiang 等^[18] 研究证明使用基于二维材料的器件进行三维 (3D) 集成可以克服上述困难, 研究实现二维材料可以制作更小的 FET、拥有良好的热导与极小的内应力等. 此外, 二维材料拥有不同于体材料的丰富而奇异的物理特性, 比如带隙随层数可调^[19]、拓扑奇异性^[20] 等. 这些性质使二维材料不仅适合于替代硅制作 FET 以满足 IRDS 关于 More Moore 的发展目标, 而且可以制作集成化的传感、存储、逻辑器件等满足 More than Moore 和 Beyond CMOS 的技术路线^[21]. 本节将分析一些常见二维材料的性质, 结尾总结了现在常见的二维材料的特性.

2.1 石墨烯

石墨烯 (graphene) 是一种从块体状石墨上分离出的具有单原子层晶格的二维材料. 其具有 D_{6h} 对称性, 其中的原子以 sp^2 杂化结合, C—C 键长为 0.142 nm, 原子间呈六角蜂窝状紧密排列在同一个平面内 (图 1(a), (b))^[22]. 石墨烯特殊的六角对称性使其能带结构非常特别, 在六角布里渊区的 K 点附近具有被称为狄拉克锥的锥形结构^[23] 并

呈现出线性的能量色散关系 (图 1(c))^[24]. 由于石墨烯的导带底与价带顶在狄拉克点重合, 因此石墨烯的带隙是 0.

石墨烯独特的结构使其在多个方面都展现出优异的性能^[25]. 例如, 石墨烯具有良好的结构与环境稳定性、极高的机械强度^[26] 与良好的导热性. 石墨烯的结构稳定性使其内部难以出现晶格缺陷或掺入杂质, 从而抑制了电子传输过程中的散射干扰, 因此其室温下载流子迁移率高达 $2 \times 10^4 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 低温下甚至达到 $2.5 \times 10^5 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ ^[25,27,28], 远远超过了硅. 同时, 石墨烯的导电性能非常好, 是世界上电阻率最小的材料. 在光学领域, 石墨烯具有零带隙半金属特性, 展现出几乎全波段的光谱吸收. 单层石墨烯的光学透射率为 97.7%, 几乎完全透明^[29].

2.2 过渡金属硫族化合物

过渡金属硫族化合物 (TMDs) 是一种结构类似石墨烯的二维层状材料. TMDs 的化学通式是 MX_2 , 其中 M 代表过渡金属元素, X 代表硫族元素. 常见的 TMDs 有 MoS_2 , MoTe_2 , WS_2 , WSe_2 等. 单层 TMDs 的元素排布类似三明治结构, 上下两层的硫族元素原子将过渡金属元素原子夹在中间, M 与 X 原子间形成共价键相连. 多层 TMDs 中层与层之间通过较弱的范德瓦耳斯 (vdW) 力结合. TMDs 常见的结构类型有 1T 与 2H 相, 其中 1T 相又存在畸变相 1T' 相 (图 2(a), (b))^[30]. TMDs 具有一些与石墨烯类似的性质与应用^[28,31], 比如具有较好的稳定性、透光性与机械韧性, 可以制作柔性光电子器件. 与石墨烯不同的是, TMDs 天然地具有一定的带隙 (1—3 eV), 因此大部分是半导体材料, 也有一部分是金属或半金属^[28,32]. 例如, MoS_2 ,

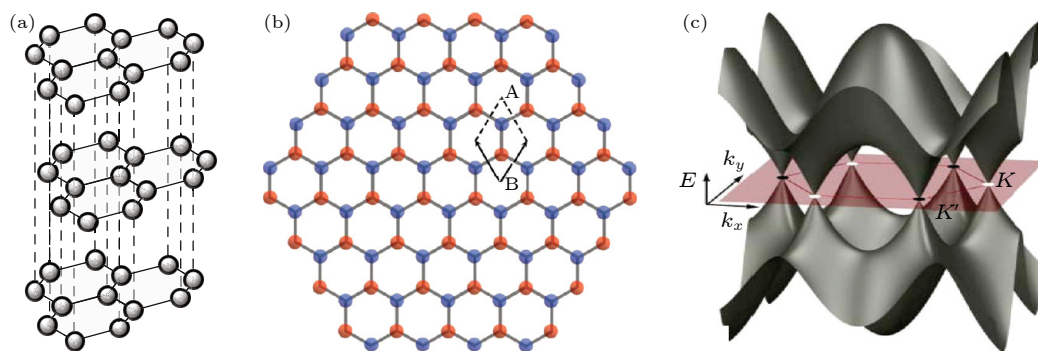


图 1 (a) 石墨烯的三维结构图^[22]; (b) 石墨烯的六角蜂窝状晶格, 每个晶胞含有 A, B 两个原子^[22]; (c) 石墨烯的三维能带结构^[24]
Fig. 1. (a) 3D structure of graphene^[22]; (b) hexagonal honeycomb lattice of graphene with two atoms (A and B) per unit cell^[22]; (c) 3D band structure of graphene^[24].

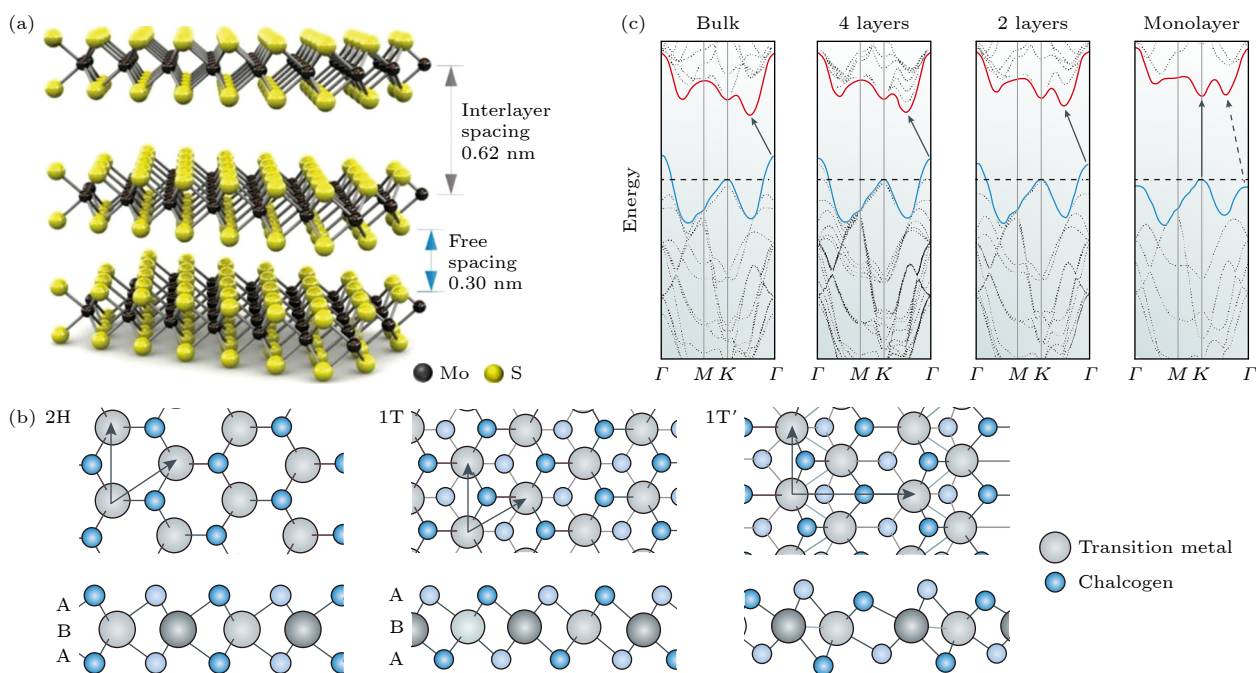


图 2 (a) MoS₂ 的三维结构图^[36]; (b) 2H, 1T 和 1T' 相单层 TMDs 的原子结构, 图中指出了晶格矢量与原子平面的堆叠方式^[30]; (c) 计算得到的厚度递减的 2H-MoS₂ 样品的能带结构的演化^[30]

Fig. 2. (a) 3D structure of molybdenum disulphide^[36]; (b) atomic structure of single layers of TMDs in their trigonal prismatic (2H), distorted octahedral (1T) and dimerized (1T') phases, lattice vectors and the stacking of atomic planes are indicated^[30]; (c) evolution of the band structure of 2H-MoS₂ calculated from samples of decreasing thickness^[30].

WSe₂ 是半导体而 MoTe₂ 是半金属. 作为半导体材料的 TMDs 是制作 FET 沟道的理想材料^[1], 通过外栅压可以有效调控材料本身的载流子浓度. MoS₂ 材料 FET 的室温迁移率约为 200 cm²/(V·s), 而 WSe₂ FET 的开关比可达 10⁸^[28]. 此外, TMDs 的带隙范围使其能够吸收从紫外到近红外波段的光, 并且具有较高的吸收效率, 是光电探测的理想材料^[33]. TMDs 的另一个重要性质是可以通过改变材料的层数、外加偏压、施加应力等方式改变其能带结构 (图 2(c))^[30,34-36], 进而影响其电学、光学等特性. 例如, 将 MoS₂ 从双层减薄到单层时, 带隙由 1.3 eV 变为 1.7 eV; 并且由间接带隙变为直接带隙^[34]. 直接带隙的材料在与光子相互作用的过程中, 不需要声子的介入即可直接产生电子空穴对, 因此具有良好的光致发光能力.

2.3 六方氮化硼

氮化硼是由等量氮、硼原子通过共价键结合构成的二元化合物. 氮化硼有多种类型, 比如立方氮化硼 (c-BN)、菱方氮化硼 (r-BN)、六方氮化硼 (h-BN) 等, 其中 h-BN 拥有类似石墨烯的层状结构. h-BN 层间通过 vdW 力结合, 各层以 ABABAB 结

构堆叠, 层内 N 原子与 B 原子形成 sp² 杂化键合. 因为 B 原子与 N 原子的电负性不同, 所以 B—N 键存在极性, 显示出部分离子键的特征, 这使得 h-BN 层间难以剥离.

由于结构上的高度相似, h-BN 与石墨烯有一些共同的特性, 比如优秀的机械强度与导热性等. 另一方面, h-BN 具有较大的带隙 (6 eV), 因此呈现绝缘体的特征. 这一特点结合 h-BN 较大的击穿场强、良好的化学稳定性, 使其适合于制作器件的绝缘层或 FET 的栅介质^[37]. h-BN 在 200—220 nm 波段的深紫外区有强吸收, 因此可以用于深紫外区域的光电探测. h-BN 丰富的特点使其被广泛应用于纳光电子学、热管理 (散热层)、电子封装、能量管理 (超级电容器) 等领域^[37,38]. 表 1 列出了二维材料电学性质的对比^[25,28,31,37,39-47].

3 基于二维材料构成的器件

二维材料作为突破传统硅基电子器件物理极限的热门材料体系^[48], 其优势使其逐渐成为构建高性能逻辑器件、存储器件、传感器以及多功能融合器件和神经形态器件的理想平台^[49-51]. 第 2 节

表 1 二维材料电学性质对比

Table 1. Comparison of the electronic properties of 2D materials.

材料类型	材料名称	带隙/eV	迁移率 /cm ² ·(V·s) ⁻¹	开关比	文献
单元素 二维材料	石墨烯	0	2×10 ⁴	100	[25]
	黑磷	0.3—2	~10 ³	10 ⁶	[39]
	碲	0.31—0.92	1485	~10 ⁴	[40]
	硅烯	1.1	329	~10 ⁶	[41]
TMDs	MoS ₂	1.8	217	>10 ⁶	[31]
	WSe ₂	1.2—1.6	~250	10 ⁸	[28]
	HfS ₂	~1.45	7.6	>10 ⁸	[42]
III-VI族 化合物	GaTe	1.7	0.2	—	[43]
	InSe	~1.26	10 ³ —10 ⁴	10 ⁸	[44]
二维 氮化物	GaN	~5.0	160	~10 ⁶	[45]
	h-BN	5.95—6.1	—	—	[37]
二维金属 氧化物	MoO ₃	3.3	1.1×10 ³	<10 ³	[46]
二维有机 化合物	Ni ₃ (HITP) ₂	—	45.4	2.29×10 ³	[47]

了解二维材料的丰富特性后, 接下来将探讨如何利用这些独特的特性开发各种功能性器件, 包括单一功能器件和多功能融合器件.

3.1 可调制晶体管

晶体管器件的研究是实现各种功能器件的基础, 其原理是通过栅极电压调节沟道的导电性, 从而控制源极 (source) 和漏极 (drain) 之间的电流. 其性能直接影响计算系统的能效与速度. 二维材料通过超薄体结构和可调电子输运特性, 为开发高性能逻辑器件提供了新机遇.

早在 2011 年, Radisavljevic 等 [52] 基于单层 MoS₂ 制备的 n 型晶体管表现出超过 1×10⁸ 的室温电流开/关比和 200 cm²/(V·s) 的迁移率 (图 3(a)), 与硅薄膜或石墨烯纳米带中实现的迁移率相当. 研究结果为实现基于二维材料的电子和低静态功耗的集成电路迈出了重要的一步, 激起了科学家们对二维材料电子器件的研究热情.

而由于强电子掺杂和界面电荷固有的结构缺陷, 大多数二维半导体都是 n 型的. 此外, 金属/二维半导体界面处的费米能级钉扎导致更高的空穴注入肖特基势垒 [53], 显著制约了 p 型二维半导体晶体管制备 [54,55]. 2018 年, Wang 等 [56] 制造了碲 p 型场效应晶体管 (图 3(b)), 该晶体管在室温下表现出两个多月的空气稳定性能, 开/关比约为 10⁶,

场效应迁移率约为 700 cm²/(V·s).

除了构造单一极性的晶体管外, 一些二维材料如 ReSe₂ 和 WSe₂ 表现出双极载流子行为 [57,58]. 在外部电场的影响下, 这些双极材料显示出可调的载流子类型, 从而大大丰富了逻辑器件性能和功能 [57]. 2019 年, Lee 等 [59] 制备了一种具有六方氮化硼栅极电介质的双极全二维 ReSe₂ 场效应晶体管 (FET) (图 3(c)), 通过改变背栅电压 (V_{bg}) 和漏源电压 (V_{ds}) 的静电场来调制, 实现 n 型晶体管和 p 型晶体管功能切换. 而通过多栅极调控可以赋予双极性材料更多特性. 2020 年, Pan 等 [60] 展示了一种具有两个独立栅极的电可调谐同质结 (ETH) 器件 (图 3(d)), 并选择 WSe₂ 作为通道材料. 根据两种栅极电压的不同极性组合, 使该器件可以获得 4 种不同 (n-n, p-p, p-n, n-p) 的通道状态. 表 2 总结了基于二维材料的晶体管与传统的 CMOS 工艺晶体管性能的对比 [52,61–67].

3.2 存储器

二维材料存储器的特点包括高密度、高性能、低功耗、优异的耐用性与稳定性. 这些优势使得基于二维材料的存储器在未来的信息存储和处理系统中具有广泛的应用潜力.

3.2.1 闪存器件

二维材料闪存通常是在二维半导体材料沟道 (如 MoS₂, WS₂, WSe₂, 黑磷等) 上, 堆叠“隧穿介质/存储层/阻挡介质/控制栅”的 4 层薄膜而构成的 FET 型非易失性存储器件. 对控制栅施加编程偏压, 使沟道载流子通过直接/费勒-诺德海姆 (FN) 隧穿或陷阱辅助隧穿 (TAT) 进入存储层, 改变晶体管的阈值电压来实现器件的电导变化. 二维材料在浮栅和电荷陷阱闪存器件中都具有显著优势, 能够提高编程/擦除速度、数据保留和耐用性 [68,69].

2021 年, Wu 等 [70] 通过堆叠 vdW 异质结 (InSe/hBN/MLG), 制备了二维材料异质结构的浮栅晶体管 (图 4(a)), 在纳秒时间尺度 (21 ns 脉冲宽度) 内实现超快编程/擦除周期和 9 个数量级的开关比. 除了浮栅闪存, 另一种基于二维材料的存储技术是电荷陷阱闪存, 这类器件能够通过材料中捕获电荷来存储数据. 2025 年, Wu 等 [71] 通过在 200 °C 下缓慢热氧化掺杂 WSe₂ 沟道材料, 并通过 ALD 沉积 Al₂O₃/HfO₂/Al₂O₃ 栅极堆栈制备了电荷阱型

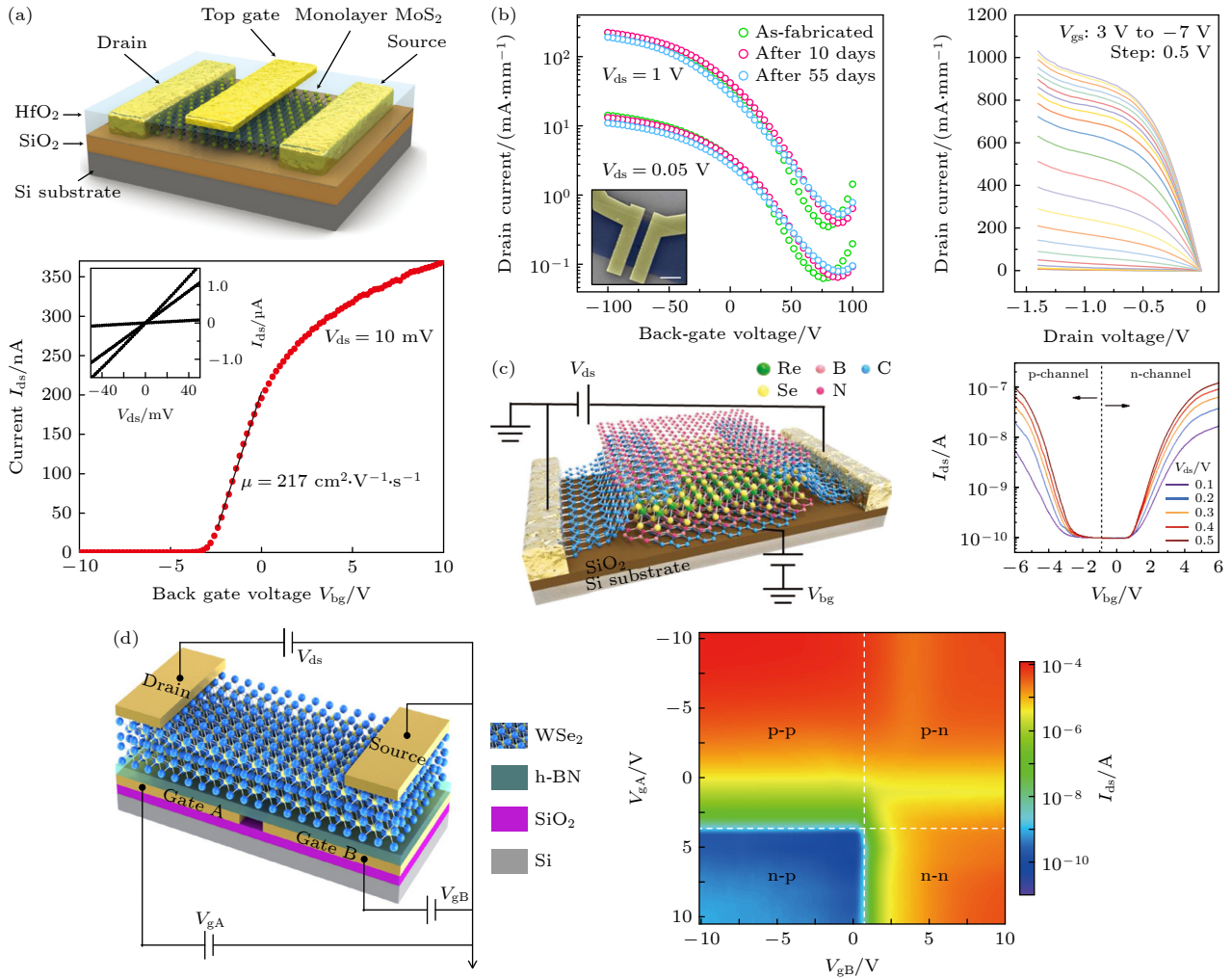


图 3 逻辑器件的结构示意图与电学特性 (a) MoS₂ n 型晶体管^[52]; (b) WSe₂ p 型晶体管^[56]; (c) ReSe₂ 双极性晶体管^[59]; (d) WSe₂ 同质结晶体管^[60]

Fig. 3. Schematic diagram and electrical characteristics of logic devices: (a) MoS₂ n-type transistor^[52]; (b) WSe₂ p-type transistor^[56]; (c) ReSe₂ bipolar transistor^[59]; (d) WSe₂ homojunction transistor^[60].

表 2 二维材料与传统硅基材料晶体管性能对比

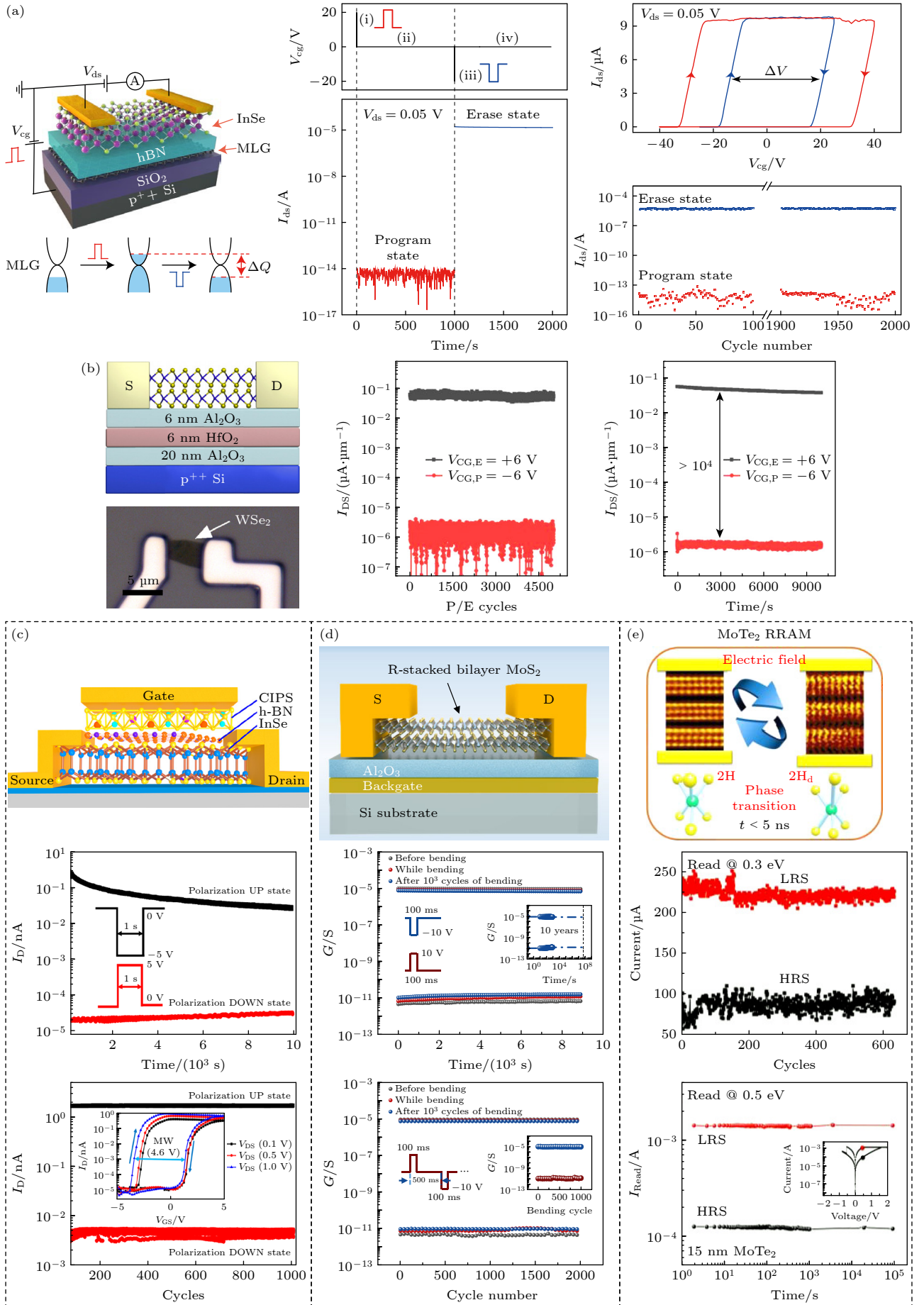
Table 2. Comparison of performance between two-dimensional materials and traditional silicon-based materials in transistors.

材料类型	材料名称	器件沟道尺寸/nm	跨导/ $(\mu\text{S} \cdot \mu\text{m}^{-1})$	亚阈值摆幅/ $(\text{mV} \cdot \text{dec}^{-1})$	开关比	静态功耗/W	文献
Si基	MOS	45	~ 0.1	—	$< 10^5$	$< 10^{-9}$	[61]
	GAA-Si	4560	15	63	10^{10}	$< 10^{-11}$	[62]
	Fin-Si	14+24×2	433.87	67.02	10^7	$< 10^{-13}$	[63]
TMDs	2L-MoS ₂	400	~ 10	65	10^6	$< 10^{-13}$	[64]
	1L-MoS ₂	—	~ 10	76	10^8	$< 10^{-15}$	[52]
	2L-WSe ₂	120	80	200	10^8	$< 10^{-10}$	[65]
	ML-WSe ₂	1500	—	875	10^7	$< 10^{-13}$	[66]
Ⅲ—Ⅵ族化合物	InSe	10	6000	75	10^7	$< 10^{-15}$	[67]

闪存器件 (图 4(b)). 在 5000 次运行周期后表现出超过 10^4 的开/关比, 没有明显的退化, 两种电流状态可以稳定维持 10^4 s , 表明具有优异的耐久性和稳定性.

3.2.2 铁电非易失存储器

二维铁电非易失存储器 (2D FeNVM) 的工作原理是基于铁电材料的自发极化特性. 铁电材料能够在外部电场的作用下切换其极化方向, 并能够在



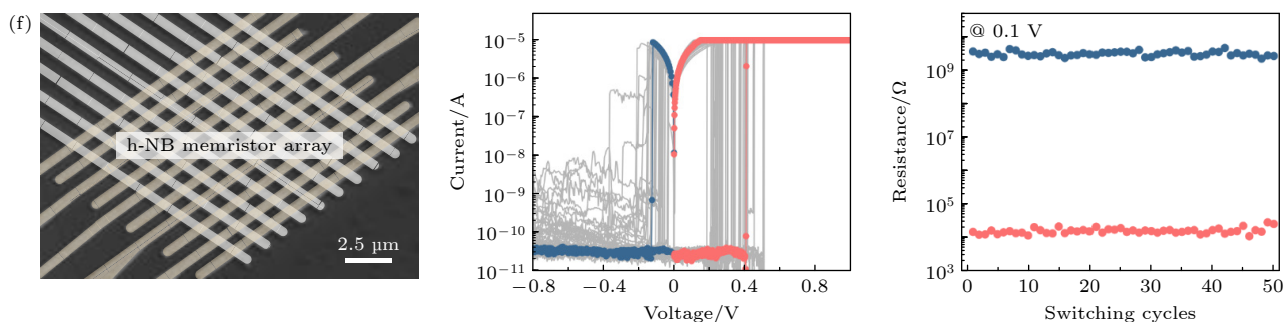


图 4 存储器件的结构示意图与电学特性 (a) InSe/hBN/MLG 浮栅型闪存^[70]; (b) WSe₂/Al₂O₃/HfO₂/Al₂O₃ 电荷俘获型闪存^[69]; (c) InSe/h-BN/CIPS 铁电存储器^[73]; (d) 3R-MoS₂ 滑移铁电存储器^[74]; (e) MoTe₂ 相变型忆阻器^[76]; (f) Ag/h-BN/Au 导电细丝型忆阻器^[77]

Fig. 4. Schematic diagram and electrical characteristics of memory devices: (a) InSe/hBN/MLG floating gate flash memory^[70]; (b) WSe₂/Al₂O₃/HfO₂/Al₂O₃ charge trapping flash memory^[69]; (c) InSe/h-BN/CIPS ferroelectric memory^[73]; (d) 3R-MoS₂ sliding ferroelectric memory^[74]; (e) MoTe₂ phase change memristor^[76]; (f) Ag/h-BN/Au conductive filaments memristor^[77].

去除电场后保持这种极化状态. 数据存储通过极化方向的变化来实现, 通常表示为两种稳定的极化状态 ($P \uparrow$ 或 $P \downarrow$), 分别表示存储的逻辑“1”和“0”或者多级存储^[72].

2022 年, Singh 等^[73] 制备了一种用 CuInP₂S₆ (CIPS), h-BN 作为电介质和 InSe 作为铁电半导体通道制备的二维 vdW FeFET (图 4(c)). 该器件具有大存储器窗口 (4.6 V, 5 V 电压扫描)、高开/关比 ($>10^4$)、高耐用性和长数据保留 ($>10^4$ s), 作为非易失性存储器 (NVM) 表现出优异的性能. 除了利用铁电材料调控沟道的电导外, 一些具有高导电性的铁电材料通过自身层间滑移产生的极化翻转, 产生非易失极化态, 实现存储功能. Li 等^[74] 用二维滑动铁电半导体-菱面体堆叠双层 MoS₂ 制备了非易失性存储器 (图 4(d)). 二维滑动铁电存储器 (SFeMs) 具有 >8 V 的大存储窗口、 10^6 以上的高开关比、大于 10 年的长保留时间以及大于 10^4 个周期的编程耐久性, 表现出卓越的性能.

3.2.3 忆阻器

二维材料通常具有极高的电导率, 因此二维材料忆阻器能够在较低的工作电压和功耗下实现较快的电导切换, 这使得它们在高性能存储和快速计算中更具优势^[75], 为高性能存储和神经形态计算系统提供了新的发展方向. 2018 年, Zhang 等^[76] 提出了一种基于 MoTe₂ 的忆阻器的相变开关机制 (图 4(e)). 通过电场诱导从稳定的半导体 2H 相到导电性更强的 2Hd 相的相变, 实现电导态的切换. 实现了超过 10^5 的保持时间和 600 次循环寿命. 之

后 Chen 等^[77] 制备了一种银/六方氮化硼 (h-BN)/金三明治结构的忆阻器 (图 4(f)), 利用银离子在单晶 h-BN 材料当中形成导电丝来实现不同的阻态, 将二维材料忆阻器的开关比提升至 10^4 . 实现与传统的氧化物忆阻器开关比达到同一水平, 但读写电压下降一个数量级, 具有良好的应用前景.

3.3 传感器

二维材料与传统硅基材料非易失器件性能对比见表 3^[70,73,74,77-81]. 与传统的硅基材料传感器相比, 二维材料具有强吸附、高比表面积、优异的生物相容性、快速的光响应和机械柔性^[82], 在传感器领域具有广泛的应用价值^[83]. 本文以光电、气体、压力、温度 4 类传感器为例进行简单介绍.

3.3.1 光电传感器

早在 2013 年, Lopez-Sanchez 等^[84] 利用机械转移法制备了具有超灵敏器件迁移率和导电电流的单层 MoS₂ 光电晶体管 (图 5(a)). 实现在 561 nm 波长下显示出 880 A/W 的最大外部光响应率. 后来随着二维材料化学气相沉积 (CVD) 工艺的不断改进, 科学家们成功实现了大面积的光电传感器制备. Yore 等^[85] 通过 CVD 工艺在蓝宝石衬底上制造单层 MoS₂ 光电探测器的大型阵列, 可以实现暗电流低至 10 fA, 0.5 ms 的高速光电流响应时间. 2025 年, Shen 等^[86] 采用 BiOCl 辅助的化学气相沉积法, 成功实现了基于单质 Re 前驱体的大面积单层 ReX₂ ($X = S/Se$) 的低温 (400 °C) 生长制备. 制备的大面积 ReSe₂ 的近红外探测器展现出良好

表 3 二维材料与传统硅基材料非易失器件性能对比

Table 3. Comparison of performance between two-dimensional materials and traditional silicon-based materials in non-volatile devices.

材料类型	材料名称	存储状态数目	编程速度/ns	编程周期/次	保留时间/s	开关比	文献
Si基	HfO ₂ /Al ₂ O ₃	≥2	>1000	>10 ³	10 ⁸	>10 ³	[78]
	SiO ₂ /nc-Si/SiN _x	≥2	>10×10 ⁵	>10 ⁵	>10 ⁵	5×10 ⁴	[79]
TMDs	MoS ₂	≥30	—	>10 ³	>2×10 ²	>10 ⁵	[80]
FGT	WSe ₂	≥4	106	8×10 ⁶	10 ⁸	>10 ³	[81]
	InSe	≥4	21	>2×10 ³	10 ⁸	10 ⁹	[70]
FE FET	CuInP ₂ S ₆	≥4	—	>10 ³	>10 ⁴	>10 ⁴	[73]
	3R-MoS ₂	≥9	—	>10 ⁴	10 ⁸	>10 ⁶	[74]
MRAM	h-BN	≥4	—	—	>10 ⁴	10 ⁴	[77]

的室温红外成像能力. 从 532 nm 可见光到 1064 nm 近红外光下都表现出快速而显著的光响应. 这为阵列化器件制造、高灵敏度和高速结合的光子学应用提供了巨大的潜力.

3.3.2 气体传感器

早在 2016 年, Hassan 等 [87] 利用化学气相沉积法生长的 MoS₂ 制备了氧气浓度传感器. 通过在材料表面生长叉状电极, 增大了氧气分析物吸附通道的表面积, 从而能够吸附更多的氧分子电荷供体, 改变器件的电导状态, 实现了对空气中氧气体积分数为 10⁻⁶ 的高灵敏度检测. 2021 年, Niu 等 [88] 通过机械剥离和全干转移法成功制备了一种基于 n-MoS₂/p-GaSe 异质结的光伏自供电 NO₂ 气体传感器 (图 5(b)). 在 405 nm 可见光照射下, 对体积分数为 10⁻⁶ 的 NO₂ 表现出显著的响应. 该器件的检测限为 20×10⁻⁶, 成功实现迄今为止报道的自供电室温气体传感器中最低的 NO₂ 检测限. 进一步, Venkatesan 等 [89] 通过机械剥离和全干法转移法制备了 ReS₂/GaSe 异质结构的 NO₂ 气体传感器, 实现总响应和恢复时间小于 4 min (分别约 38 s 和 174 s), 实现对体积分数为 10⁻⁹ 的 NO₂ 的最佳响应和恢复时间.

3.3.3 压力传感器

2019 年, Yang 等 [90] 制备了一种新型三维石墨烯电极的超灵敏柔性电容式压力传感器, 具有高灵敏度 (3.19 kPa⁻¹)、快速响应 (30 ms)、超低检测限 (1 mg)、可调灵敏度、高柔韧性和高稳定性. 此外, 通过对称的双微保形石墨烯电极成功实现了 7.68 kPa⁻¹ 的高灵敏度. 除了石墨烯材料, 硫化钼材料也表现出灵敏的压电响应特性. 2022 年, Xu

等 [91] 提出了一种基于单层 MoS₂ 的柔性离子电子压力传感器 (图 5(c)). 利用 MoS₂ 的优异机械性能和大插层电容, 传感器展示了超高灵敏度 ($S_{\max} = 89.75 \text{ kPa}^{-1}$) 和宽传感范围 (722.2 kPa). 其响应时间为 3 ms, 表明能快速响应外部压力. 此外, 在 138.9 kPa 压力下, 传感器在超过 5000 次循环后几乎无退化, 证明了其在生理监测和柔性机器人中的应用潜力.

3.3.4 温度传感器

2022 年, Daus 等 [92] 通过直接转移技术在薄 (约 5 μm) 柔性基板上制造柔性单层 MoS₂ 温度传感器 (图 5(d)). 传感器在 27—120 °C 之间表现出 ~1—2%/K 的高温度系数, 并且在薄 (约 35 nm) 氧化铝封装后具有稳定的响应. 它们可以在几微秒内检测温度变化, 比柔性薄膜金属传感器快 100 倍以上. 除了高温响应探测器件还有低温探测器件. 2023 年, Matthus 等 [93] 设计了由 MoS₂/WSe₂ 异质结组成、hBN 封装的低温线性温度测量的传感器. 该传感器实现在 40—300 K 的范围内, 灵敏度约为 2 mV/K, 与现有硅基低温传感器相当.

3.4 多功能融合器件

虽然二维材料基础功能器件在各自的应用中已经取得了显著进展, 但随着计算需求的日益增长, 单一功能的器件已难以满足现代技术的要求 [94]. 因此, 如何将多个功能集成在一个器件中, 成为当前的研究热点. 二维材料在实现多功能融合器件方面具有独特的优势, 且与其他材料或技术结合, 形成如传感、存储、计算等多种功能集成的器件, 这为高效、紧凑的智能硬件提供了全新的解决方案.

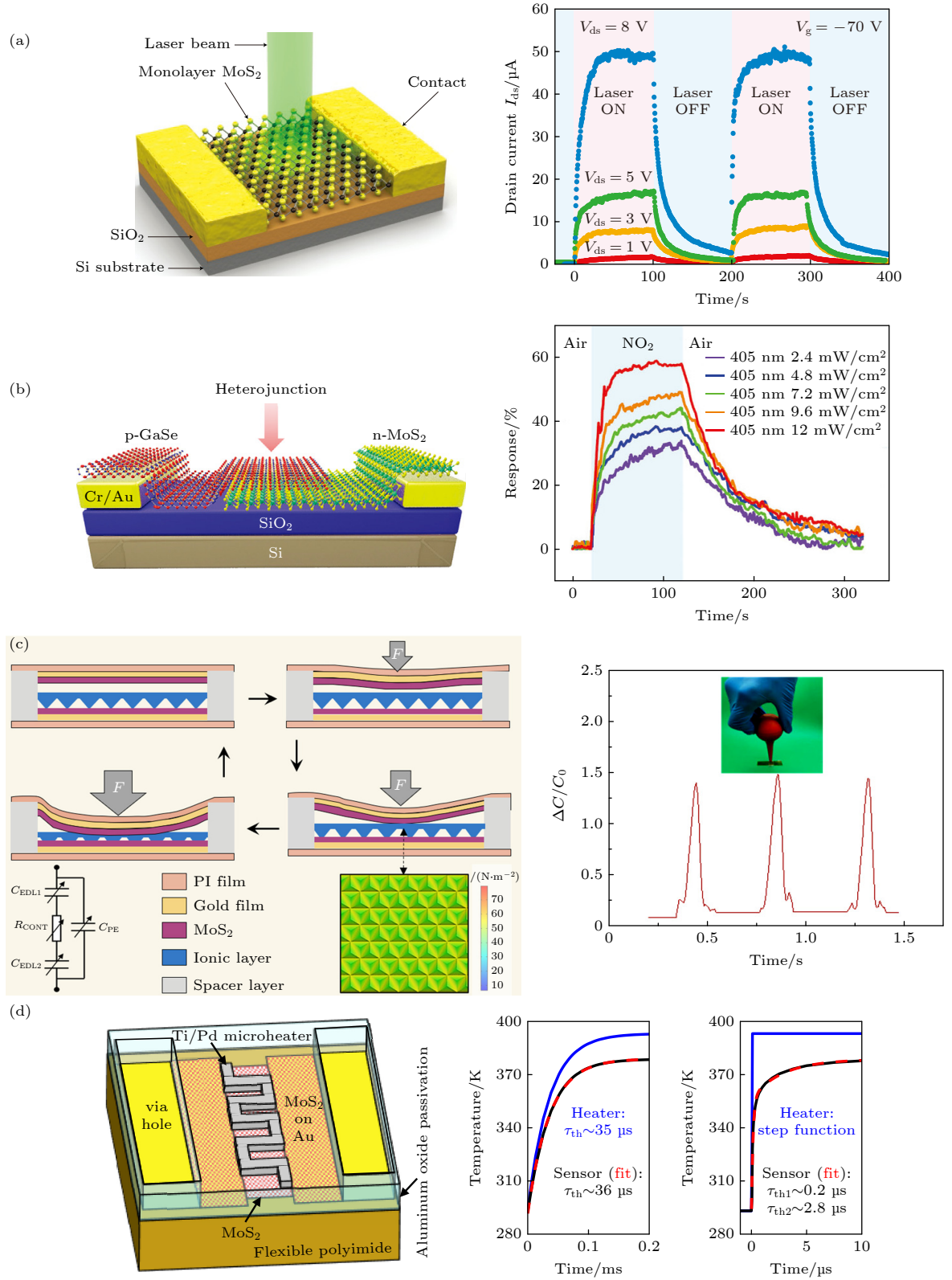


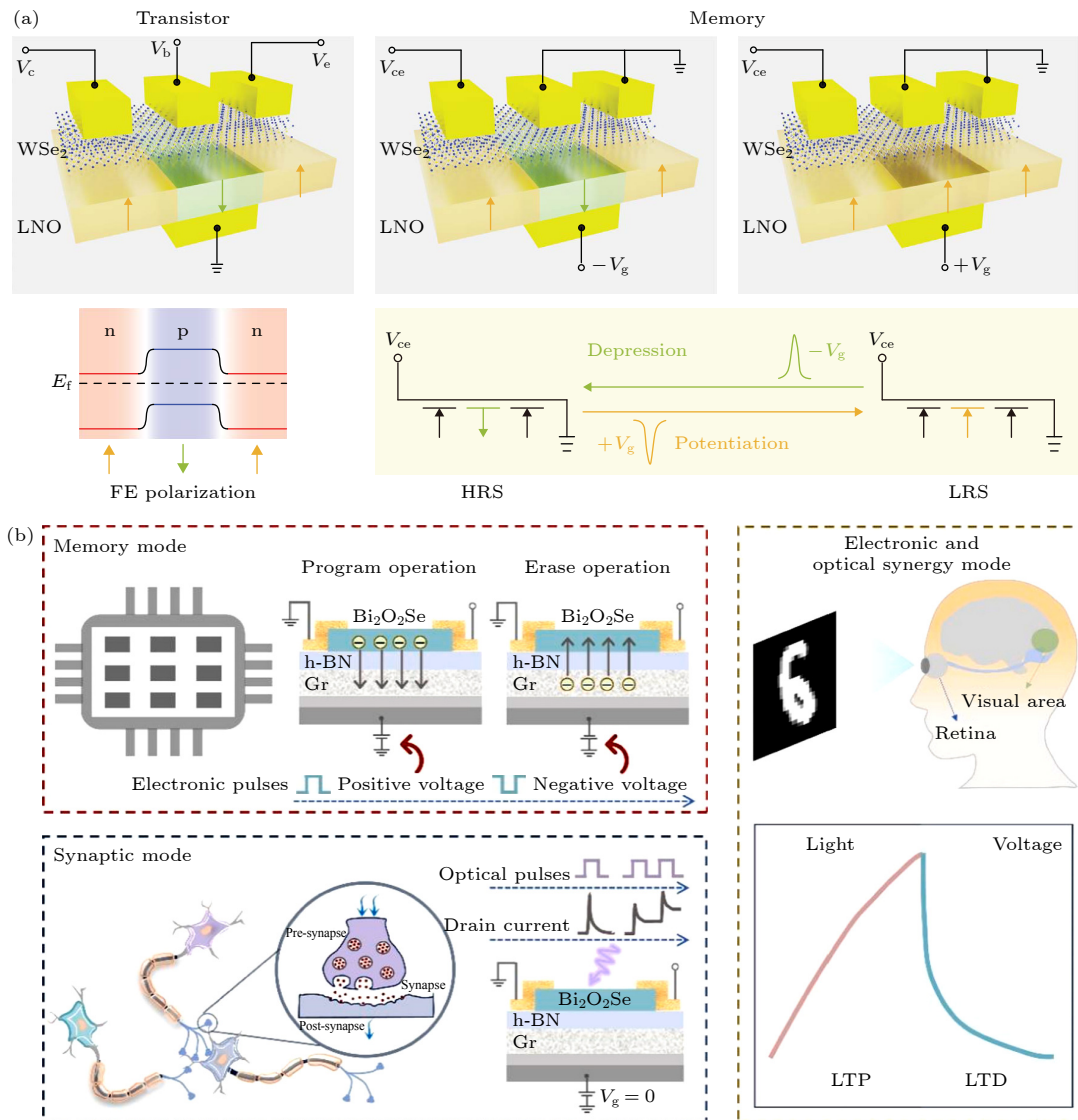
图 5 传感器的结构示意图与电学特性 (a) MoS₂ 光电探测器^[84]; (b) n-MoS₂/p-GaSe 嗅觉传感器^[88]; (c) MoS₂ 压力传感器^[91]; (d) MoS₂ 温度传感器^[92]

Fig. 5. Structure and electrical characteristics of the sensors: (a) MoS₂ photodetector^[84]; (b) n-MoS₂/p-GaSe olfactory sensor^[88]; (c) MoS₂ pressure sensor^[91]; (d) MoS₂ temperature sensor^[92].

2021年, Tong等^[95]在包含 WSe_2 沟道, 铌酸锂(LNO)介质的单器件实现极化可调的三极管功能(图6(a)). 其中E, C, B电极下的LNO介质分别具有向上、向下、向上(Pu-Pd-Pu)的极化分布, 对 WSe_2 构成n-p-n掺杂. 当G接地, 该器件具有双极结型晶体管(BJT)功能. 当E, B接地, 通过栅压改变基区下方LNO的极化方向, Pu-Pd-Pu和Pu-Pu-Pu极化分布分别为高阻态和低阻态, 实现非易失存储功能.

除了非易失存储与放大器功能融合, 还可以实现存储与神经形态功能融合. 2025年Sun等^[96]提出了用于光电突触浮栅非易失性存储器 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}/\text{h-BN}/\text{石墨烯}$ 异质结构, 创建了一种集传感、存储和计算功能于一体的三端浮栅器件(图6(b)). 该器件具有超过 10^4 的高开/关比, 保留时间达到 10^3 s, 循环寿命为500次循环. 其在365 nm波长脉冲光

刺激下以超低功耗(每个尖峰0.35 pJ)有效模拟光诱导的短期和长期可塑性和配对脉冲促进的突触行为. 此外, 它还表现出宽光谱光响应(365—1050 nm). 该器件还可实现多位存储与具有六值输出的光电逻辑功能, 并通过光电协同作用刺激视网膜光适应. 使用人工神经网络进行手写数字识别, 准确率达到92.24%. 同年, Wang等^[97]实现在单个三端晶体管当中实现了双模态感知功能融合(图6(c)), 这归因于应变的二维 NbOI_2 中同时存在出色的铁电、压电和光电特性. 该器件能够通过光和应变的协同调制来更新突触权重. 该突触结合了应变2D NbOI_2 的综合铁电性(用于突触行为)、压电性(用于触觉调制)和光电响应性(用于视觉检测), 实现了对指纹的增强识别, 展示了二维材料在多模态融合感知与可调谐多功能神经形态器件集成方面的应用潜力.



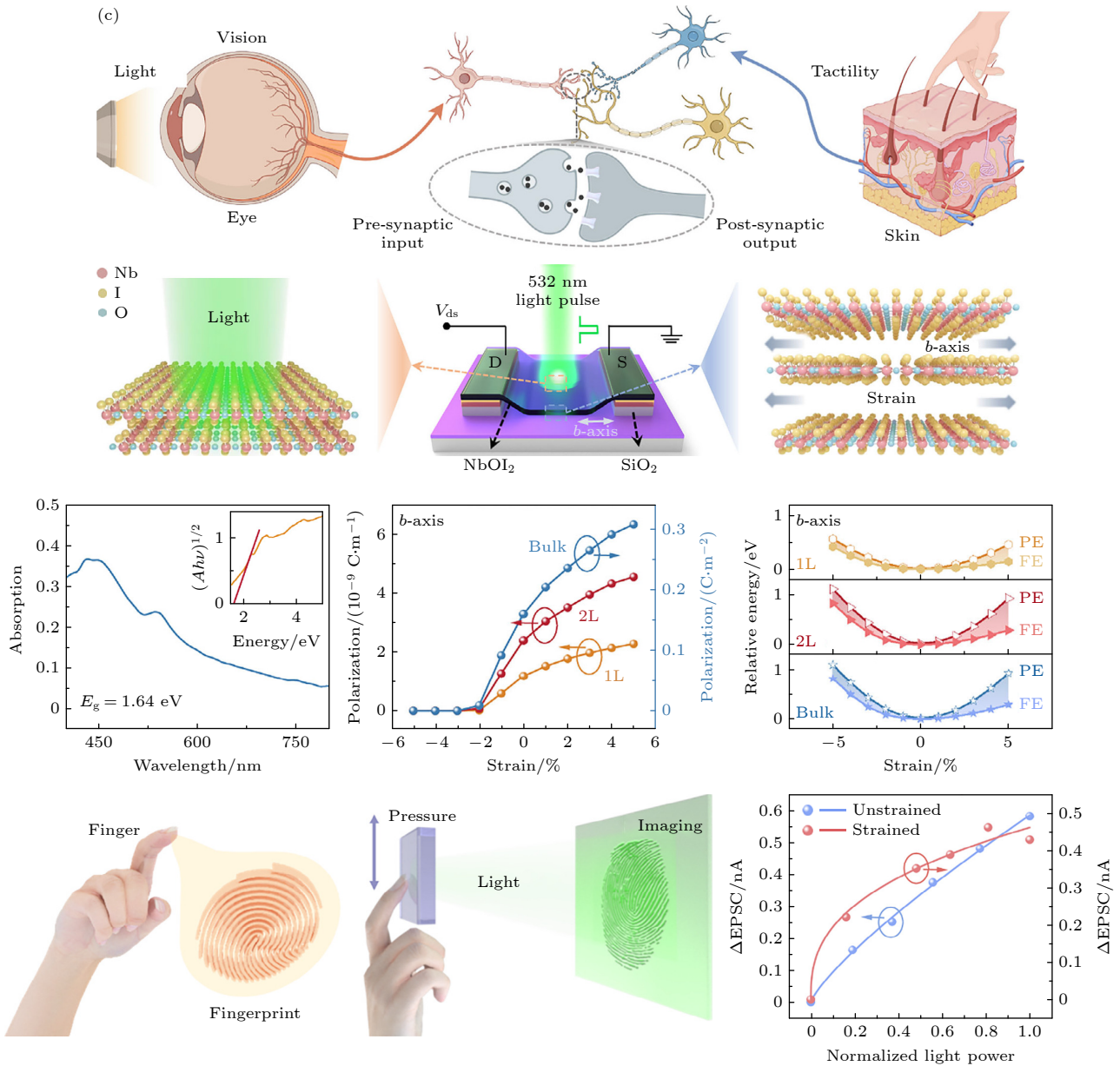


图 6 多功能融合器件的构造示意图与电学特性 (a) WS_2/LNO 铁电晶体管^[95]; (b) $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}/\text{h-BN}/\text{Gr}$ 光电浮栅晶体管^[96]; (c) NbOI_2 双模态突触晶体管^[97]

Fig. 6. Schematic diagram and electrical characteristics of multifunctional hybrid devices: (a) WS_2/LNO ferroelectric transistor^[95]; (b) $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}/\text{h-BN}/\text{graphene}$ photonic floating-gate transistor^[96]; (c) NbOI_2 bimodal synaptic transistor^[97].

3.5 多功能融合器件

神经形态器件的研究逐渐成为人工智能和类脑计算领域的前沿方向. 这类器件可以模拟大脑神经元和突触功能, 具有高度的并行计算能力和低功耗特性, 适用于深度学习等计算密集型任务. 通过对二维材料神经元和突触器件的研究展现了其在神经形态计算和人工智能硬件系统中的巨大潜力^[98-100]. 这些器件通过模拟生物神经系统中神经元和突触的功能, 能够进行信息处理、学习和记忆.

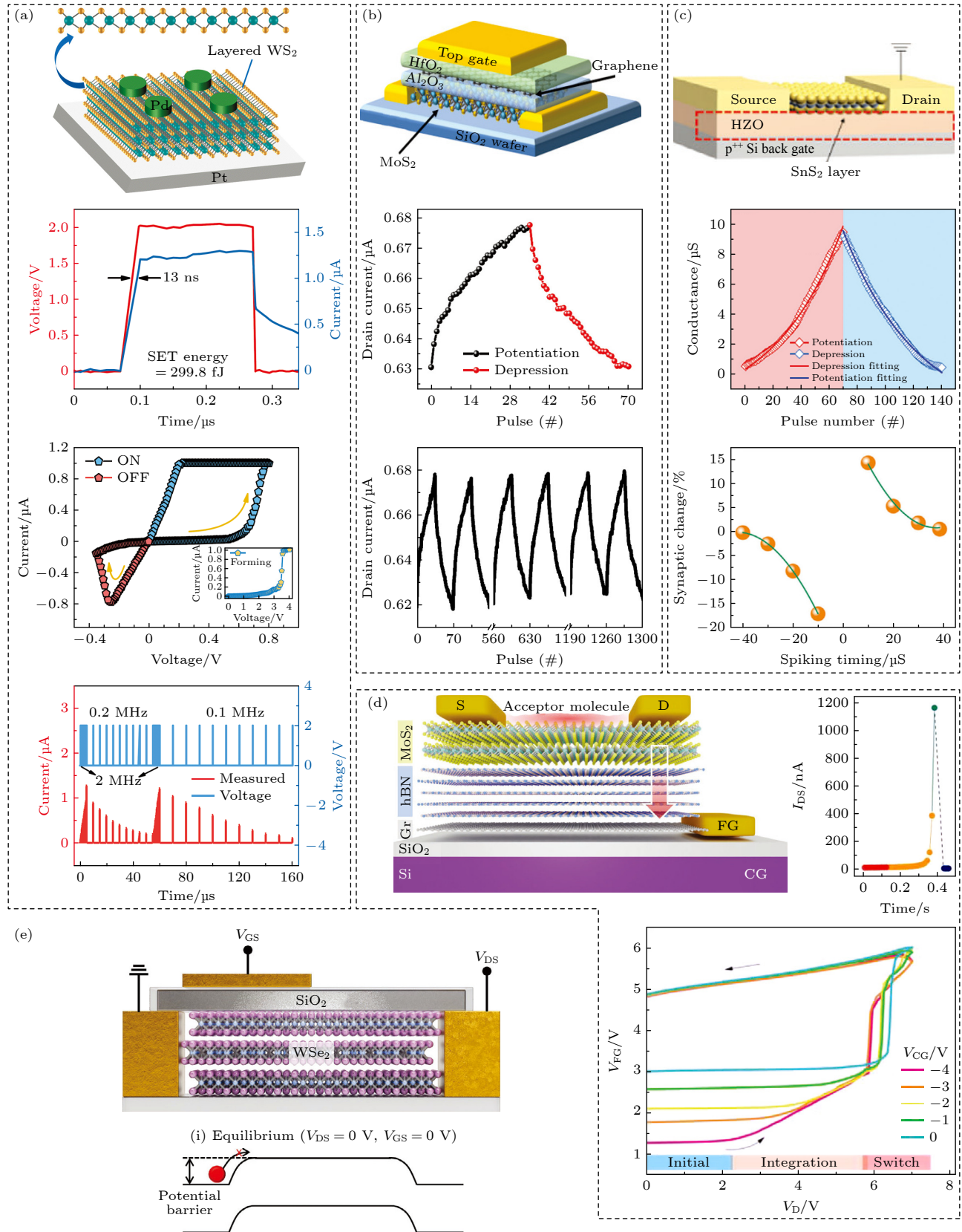
下面介绍一些典型的二维神经形态突触和神经元器件.

3.5.1 突触器件

2019 年, Yan 等^[101] 通过将 WS_2 分散液滴铸到 Pt 基板上来制备 WS_2 薄膜, 利用硅硬掩模版蒸镀 Pd 电极, 制备完整的两端 WS_2 忆阻器 (图 7(a)). 该忆阻器实现了 13 ns (14 ns) 的快速开 (关) 时间, 以及低至飞焦耳水平的 SET (RESET) 能量, 成功模拟出低功耗的生物突触功能. 接下来在 2020 年,

Park 等^[102] 制备了三端的浮栅晶体管突触器件. 他们采用 MOCVD 生长的 MoS_2 作为器件沟道和 CVD 生长的石墨烯作为浮栅层, 制备了基于二维

材料的顶栅调控的浮栅突触器件 (图 7(b)). 使用 HfO_2 ($\kappa \sim 25$) 作为阻挡层, Al_2O_3 ($\kappa \sim 10$) 作为隧道氧化物, 以提高电容的耦合比, 提高隧穿效率,



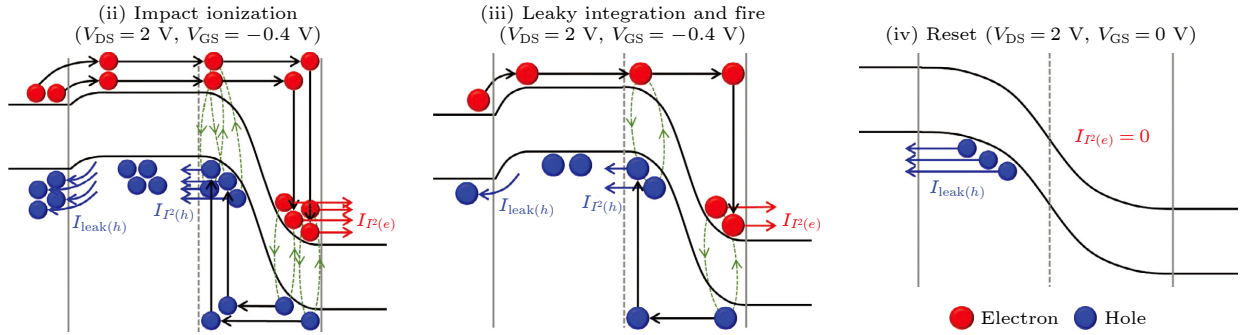


图 7 神经形态器件突触和神经元的结构示意图与电学特性 (a) WS₂ 忆阻器突触^[101]; (b) MoS₂ 浮栅突触^[102]; (c) HZO/SnS₂ 铁电突触^[103]; (d) MoS₂/h-BN/Gra 神经元^[104]; (e) WSe₂ 冲击电离晶体管神经元^[105]

Fig. 7. Schematic diagram of synapse and neuron structures in neuromorphic devices and their electrical characteristics: (a) WS₂ memristor synapse^[101]; (b) MoS₂ floating-gate synapse^[102]; (c) HZO/SnS₂ ferroelectric synapse^[103]; (d) MoS₂/h-BN/graphene neuron^[104]; (e) WSe₂ impact ionization transistor neuron^[105].

成功证明了生物突触行为 (线性突触权重更新和 STDP). 该器件在增强和抑制方面表现出非线性, 分别约为 1.9 和 2.2 连续施加 1330 个脉冲后进行的重复测量确保了设备在工作过程中进行多次突触更新的鲁棒性. 此外, STDP 结果表明, 突触器件适用于基于 SNN 的神经形态硬件系统. 通过使用 CVD 生长的 2D 材料, 展示了构建大规模神经形态计算阵列的可能性.

随后在 2024 年, Song 等^[103] 利用二维 SnS₂ 薄膜和纳米级 HZO 铁电材料制备了 FeFET (图 7(c)), 利用铁电材料磁畴翻转的超低功耗优点, 将突触权重更新功耗降低至 aJ 级别. 制造的 FeFET 器件 2Pr 超过 30 $\mu\text{C}/\text{cm}^2$ 、存储窗口约为 2.5 eV, 并且表现出 10^5 s 保持特性和 μs 级的响应速度, 以及 10^7 的稳定的循环特性.

3.5.2 神经元器件

2023 年, Wang 等^[104] 报道了一种表现出陡峭阈值开关行为的二维范德瓦耳斯浮栅晶体管 (FGT), 以及用于自适应感觉处理的异调制神经元功能 (积分和发射、S 形激活) 的模拟 (图 7(d)). 与传统的 FGT 不同, 该器件的阈值开关行为源于通道中的冲击电离和耦合电荷注入浮栅. 当积分电压达到阈值时, 晶体管电导增加超过 10^4 倍, 触发低于 30 mV/dec, 典型开关时间约为 ms.

更进一步, 2025 年 Choi 等^[105] 实现了一种无需浮栅结构的新颖的 2D 脉冲神经元 (图 7(e)). 通过一个栅极覆盖的栅控区域和一个非栅控区域组成 WSe₂ 冲击电离晶体管 ($I^2\text{FET}$). 这种结构有利于电场在局部非栅控区域的集中. 通过充分增加施

加偏置 (即 $V_{ds} > V_{br}$, $V_{gs} > V_{th}$), 非栅控区载流子的动能超过冲击电离阈值能 (E_g), 从而触发冲击电离. 这种操作机制通过冲击电离模拟 LIF 行为, 具有在短时间内电流突然增大的特征.

3.6 基于二维材料制备器件的挑战

尽管二维材料在电学、光学和热学等领域展现出巨大的应用潜力, 尤其在器件和探测器中, 但在实现其规模化应用之前, 仍面临着不少挑战.

首先, 二维材料的生长工艺仍存在诸多问题, 尤其是在材料的均匀性、尺寸可控性和缺陷控制方面. 目前, 二维材料的生长大多依赖于化学气相沉积 (CVD) 和分子束外延 (MBE) 等方法, 这些方法在大面积生长和高质量控制方面仍面临挑战^[106]. 如何在大面积上实现二维材料的均匀生长, 并保持材料质量的一致性, 是制备高性能器件的前提.

此外, 随着二维材料在各个领域的广泛应用, 材料质量评估显得尤为重要. 然而, 目前针对二维材料的质量评估标准相对局限, 缺乏统一的国际标准, 这使得不同实验室和生产商之间的质量差异难以统一和比较^[107,108]. 因此, 需要制定统一的质量评估标准, 以确保材料的可靠性和一致性. 其次, 在器件制备过程中, 准确预测和优化其在实际应用中的表现至关重要. 然而, 目前二维材料器件的设计与优化仍缺乏足够完善的仿真工具, 特别是尚未开发出能够涵盖多物理场耦合效应的仿真方法^[109]. 最后, 针对基于二维材料的器件, 目前尚缺乏系统的可靠性预测工具^[110]. 特别是如何准确预测器件在长时间运行过程中, 尤其是在温度、湿度、电场等环境因素影响下的性能衰减, 是一个重要的挑

战. 通过开发先进的仿真工具, 能够提前识别潜在的故障模式, 并优化设计, 以提升器件的长期可靠性和稳定性.

4 基本 IC 单元及模块构建

在讨论了基于二维材料的单个器件性能后, 接下来将着重研究如何将这些器件集成到功能电路中, 从而理解各个组件如何协同工作, 构建复杂系统以执行特定任务. 二维材料在集成电路基础单元及模块构建中展现出变革潜力, 为突破硅基技术极限提供了新路径. 在晶体管单元层面, 过渡金属硫化物 (如 MoS_2) 等高迁移率半导体可作为沟道材料, 构建超短沟道、低功耗的场效应晶体管^[111], 有效抑制短沟道效应, 并有望延续摩尔定律的微缩趋势; 在模块层面, 石墨烯凭借其高导电性和透光性, 可用于互连线、射频器件及柔性电极^[112], 而 h-BN 的绝缘特性使其成为理想的隧穿层或栅极介质^[113].

这些材料通过范德瓦耳斯力异质集成, 打破了晶格匹配的限制, 为新型逻辑门、存储器及光电集成模块的构建提供了可能, 为开发下一代高性能、低功耗和柔性化芯片奠定了基础. 本节将介绍一些基于二维材料器件构建的电路模块.

4.1 基于二维材料的逻辑门构建

2020 年, Gee 等^[114] 制备了一个 $12\text{ nm} \times 12\text{ nm}$ 的浮栅晶体管阵列, 包含可编程的两输入单元 (two-input) 和三输入单元 (three-input) 用于实现复杂的逻辑功能 (图 8(a), (b)). 进一步 Lee 等^[115] 提出了两种基于二硫化钼的分裂栅场效应晶体管 (SG-FET) 结构, 并展示了它们在实现 NAND 和 NOR 逻辑门中的应用 (图 8(c), (d)). 这些 SG-FET 结构的创新设计不仅能实现传统的逻辑门, 还能推动多值逻辑和可重构设备的实现. 这为二维材料在集成电路和逻辑运算中的应用提供了新的思路, 推动了未来电子设备的多功能性和高集成性发展.

4.2 基于二维材料的数模转换单元构建

近年来, 集成多个二维材料器件以实现复杂逻辑功能, 包括相互连接的装配工程已成为一种新的研究趋势. Huang 等^[116] 在 2025 年提出了一种基于二维 MoS_2 的可重构模拟硬件 (RAH)(图 9(a)).

该硬件利用 MoS_2 场效应晶体管阵列的电导可调特性, 通过协同编码模块内部状态和互连关系, 支持多种线性/非线性计算功能 (如数模/模数转换、卷积运算)(图 9(b)). 在 ADC/DAC 应用中, RAH 展现出显著潜力. 实验实现了 8 位分辨率 (可重构至 4/6 位以适配任务需求)(图 9(c))、50 kHz 带宽及单次转换周期最大功耗仅 $750\text{ }\mu\text{W}$, 其单位量化电压 (UQV) 达 14.15 mV 且信噪比达 55.4 dB , 证明了二维材料器件通过栅压调控电导状态可实现高保真信号转换, 同时动态调整分辨率避免了传统固定架构的资源浪费. 这种基于二维材料的可重构特性为开发高效能、自适应混合信号处理系统提供了新途径.

4.3 基于二维材料的动态存储器构建

2021 年, Liu 等^[117] 提出了一种基于二维材料的静态随机存取存储器 (图 10(a), (b)), 研究表明, 在先进技术节点 (尤其是 $1\text{--}2.1\text{ nm}$) 下, 单层二维材料 FET 因其优异的静电控制能力, 能显著改善 SRAM 单元的读写冲突问题, 提升读取静态噪声容限 (RSNM) 和写入静态噪声容限 (WSNM), 并降低读取时间和写入时间. 通过进一步优化了接触电阻、迁移率和等效氧化层厚度等参数, 展示了二维材料晶体管在 1 nm 节点下可与硅基纳米片晶体管 (NSFET) 相媲美的性能, 并指出采用纳米片环栅 (GAA) 结构可进一步提升电流驱动能力和集成密度.

在这一基础上, Xiao 等^[118] 于 2024 年提出了突破性的硅-二硫化钼 (Si-MoS_2) 异质嵌入式动态随机存储器 (eDRAM)(图 10(c)—(f)), 从结构和集成层面实现了显著进展. 不仅将二维材料的应用场景从 SRAM 扩展至 eDRAM. 更通过异质集成和三维架构, 解决了存储器件在保持时间、读取性能与集成密度等多方面的瓶颈问题. 其通过结合硅基器件 (用做读取晶体管) 和二硫化钼 (MoS_2 , 用做写入晶体管) 的优势, 解决了传统增益单元 (GC) eDRAM 存储保持时间短和单晶体管单位电容 (1T1C) eDRAM 需要复杂柱状电容的问题. 具体来说, MoS_2 写入晶体管凭借其极低的关断电流 (I_{OFF}) 实现了超长的数据保持时间 (高达 6000 s), 而硅读取晶体管则提供了高驱动电流 (确保 $35\text{ }\mu\text{A}/\mu\text{m}$ 的读取裕度) 并保障与现有 CMOS 逻辑工艺的兼容. 与全硅基或全 MoS_2 的 eDRAM 相比, 该设计

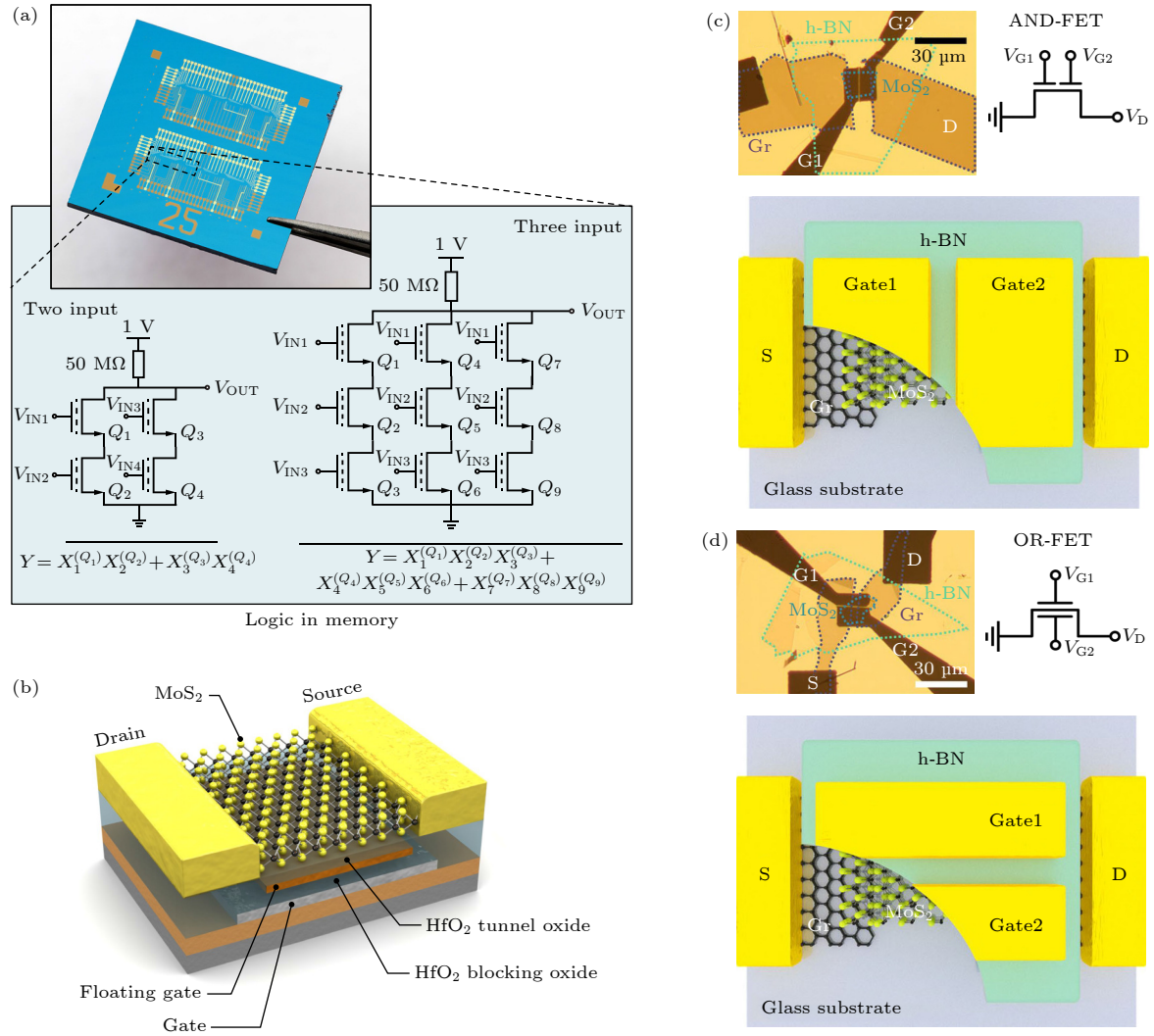


图 8 (a) 内存逻辑单元阵列的制造的 12 mm×12 mm 芯片的照片^[114]; (b) 基于 MOCVD 生长的单层 MoS₂ 的浮栅存储器件的三维视图^[114]; (c) AND FET^[115]; (d) OR-FET^[115]

Fig. 8. (a) Photograph of a fabricated 12 mm×12 mm die with logic-in-memory cell arrays^[114]; (b) 3D view of a floating gate memory device based on monolayer MoS₂ grown by MOCVD^[114]; (c) AND FET^[115]; (d) OR-FET^[115].

将数据储存时间提高了 1000 倍, 读取裕度提高了 100 倍. 此外, 该器件还实现了 5 ns 的访问速度, 并通过后端制程工艺 (BEOL) 将 MoS₂ 器件堆叠在硅晶体管上, 实现了异质三维集成, 大幅度提高集成密度. 这种 Si-MoS₂ 异质 2T-eDRAM 技术, 为高性能处理器中的大容量缓存提供了一种有前景的实现路径, 有望突破当前计算系统的带宽瓶颈.

4.4 基于二维材料运算放大器和射频电路的构建

2021 年, Tong 等^[95]提出了一种用于解决神经形态硬件中传统异质器件 (外围电路与存储单元物理分离) 导致的模块集成和电阻匹配难题

(图 11(a)—(c)); 该架构利用铁电材料 (铌酸锂, LiNbO₃) 的邻近效应对二维材料 (二硒化钨) 通道进行可控掺杂, 构建了级联器件单元, 该单元既能作为非线性晶体管 (如 BJT) 实现模拟信号处理 (ASP) 功能 (如运算放大器设计, 增益 β 达 11.2, 支持信号放大、加法及积分运算), 又能作为非易失性存储器 (MO) 实现突触权重存储 (通过栅压调控铁电极化态改变内置电势, 获得高达 10⁶ 的开/关电阻比和稳定的电导更新); 基于此同质架构, 研究者展示了 ASP-MO 集成系统在二元模式分类中的应用, 并设计了高电阻比 (HRS/LRS = 898.4) 的三态内容寻址存储器 (TCAM), 为神经形态硬件的高能效集成提供了新方案. 在射频电路方面, Huang 等^[119]提出了一种利用丝网印刷与滚压压缩

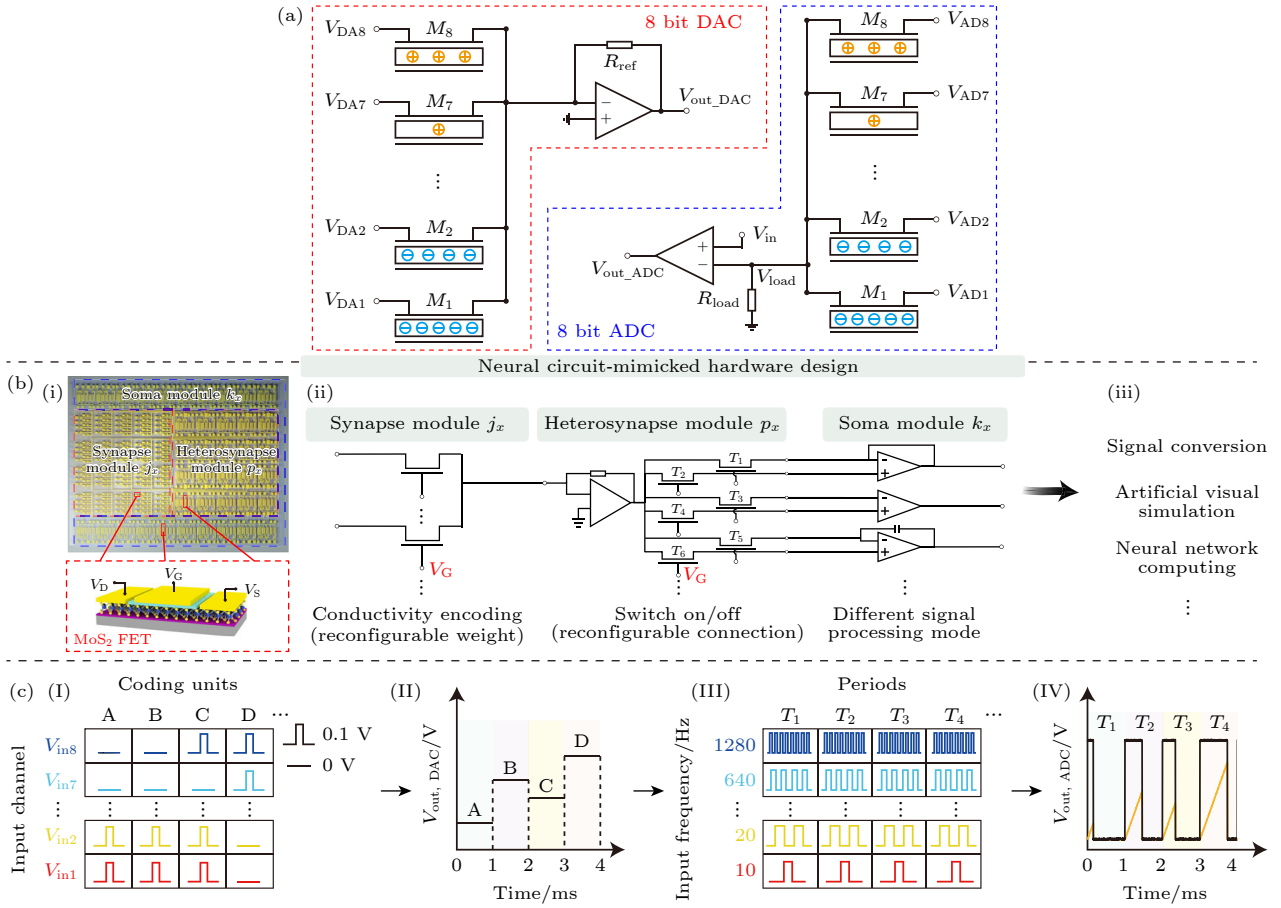


图 9 (a) 8 位 DAC 和 ADC 简化电路结构图^[116]; (b) MoS₂ FET 阵列^[116]; (c) 数据转换过程, 包括数字信号输入 V_{in1} — V_{in8} ^[116]
 Fig. 9. (a) 8-bit DAC and ADC^[116]; (b) cascaded MoS₂ FET arrays^[116]; (c) entire data conversion process, including digital signal input V_{in1} — V_{in8} ^[116].

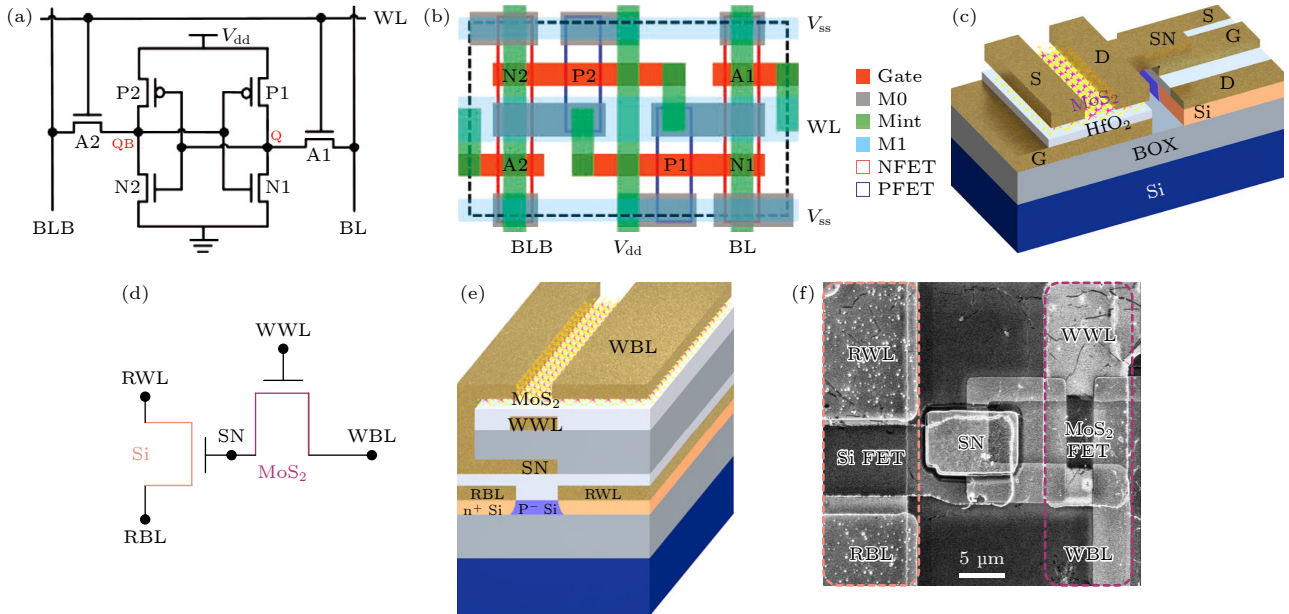


图 10 (a) SRAM 电路图^[117]; (b) SRAM 器件图^[117]; (c) 异构 2T-eDRAM 的示意图^[118]; (d) 相应的等效电路图^[118]; (e) Si-MoS₂ 异构垂直 2T-eDRAM 的示意图^[118]; (f) 2T-eDRAM 的 SEM 图像^[118]
 Fig. 10. (a) SRAM circuit diagram^[117]; (b) SRAM device diagram^[117]; (c) schematic diagram of the heterogeneous 2T-eDRAM^[118]; (d) corresponding equivalent circuit diagram^[118]; (e) schematic diagram of the Si-MoS₂ heterogeneous vertical 2T-eDRAM^[118]; (f) SEM image of the 2T-eDRAM^[118].

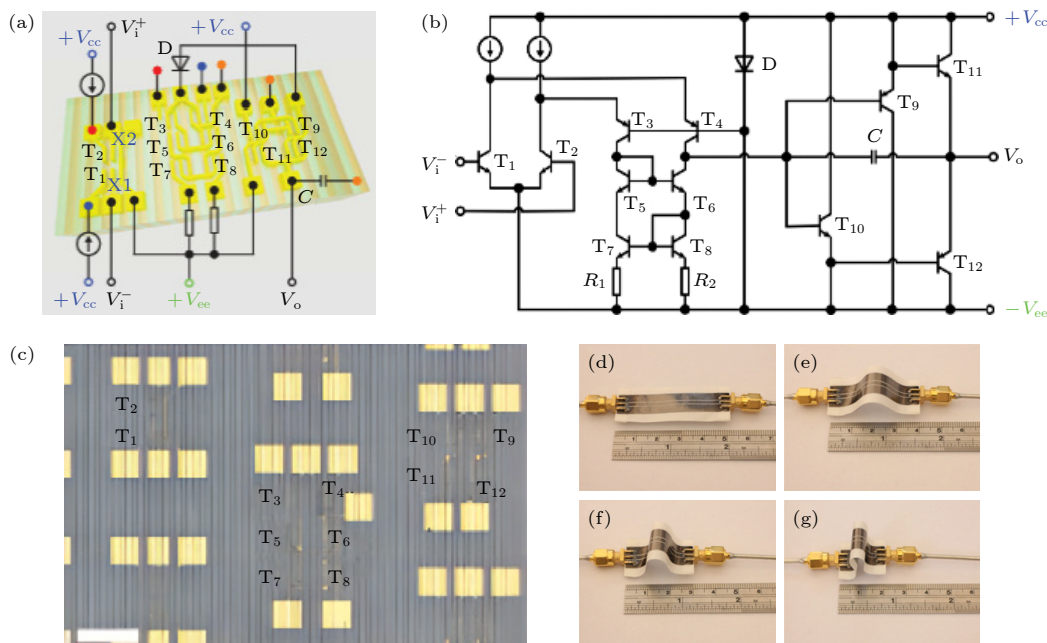


图 11 (a) 运算放大器的实验装置^[95]; (b) 运算放大器相应的等效电路图^[95]; (c) 运算放大器的光学图像^[95]; (d) 原始长度为 50 mm 的未弯曲 CPW TL^[119]; (e) 弯曲的 CPW TL, 端口到端口的距离为 40 mm^[119]; (f) 弯曲的 CPW TL, 端口到端口的距离为 30 mm^[119]; (g) 弯曲的 CPW TL, 端口到端口的距离为 20 mm^[119]

Fig. 11. (a) Experimental setup of the operational amplifier^[95]; (b) corresponding equivalent circuit diagram of the operational amplifier^[95]; (c) optical image of the operational amplifier^[95]; (d) unbent CPW TL with an original length of 50 mm^[119]; (e) bent CPW TL with a port-to-port distance of 40 mm^[119]; (f) bent CPW TL with a port-to-port distance of 30 mm^[119]; (g) bent CPW TL with a port-to-port distance of 20 mm^[119].

技术制备的高导电性石墨烯墨水, 实现在纸质柔性基底上制造射频与微波无源元件 (包括共面波导传输线、开路/短路谐振器以及宽带天线)(图 11(d)—(g)), 通过实验证明, 经压缩后的石墨烯电导率显著提升 (最高达 4.3×10^4 S/m), 所制备的元件在弯曲甚至扭曲条件下仍保持良好的电学性能 (如传输线衰减变化小、谐振频率稳定、天线带宽达 110%), 展现出优异的机械柔韧性和高频适用性, 为低成本、可穿戴电子设备的量产提供了可行的技术路径。

4.5 二维材料 IC 单元及模块构建挑战

二维材料在构建下一代集成电路基础单元与模块方面展现出巨大潜力, 有望通过其原子级厚度和优异电学特性助力突破传统硅基电路的性能上限, 实现 1 nm 以下技术节点的先进逻辑、数字计算模块、高密度存储单元 (如 SRAM 与 eDRAM)^[18,21]。然而, 其从实验室走向产业化仍亟待攻克一系列核心实际问题: 在器件方面, 不同的二维材料与同种金属的功函数匹配不一致, 需要精细调节器件尺寸的差异实现性能的一致性, 还需要抑制不同金属-二维材料界面高接触电阻; 且不同元件之间的寄生

电容与静电耦合也是器件设计必须考虑的重要因素之一, 因为它们会带来信号衰减或延迟、噪声与串扰。对于单个器件的影响在于阈值电压偏移与漏电流增大^[120,121]。为此, 在版图设计阶段应该仔细分析各元件之间的布线、间距以避免影响。可以使用一些低 κ 材料用作掩蔽层以减小影响。使用掺杂石墨烯作为掩蔽层已有研究。此外, 还需要考虑选取材料表面特性、热导、热扩散系数的影响。

在工程设计方面, 在传统硅平台中, 电路设计依赖于器件模型与版图规则的高度标准化与工程可预期性。而在基于二维材料构建的新型电路系统中, 缺乏明晰的设计规则。目前缺乏适用于二维材料器件的专用设计套件 (PDK) 实现电路级别的仿真, 且需要制定适用于二维材料器件的设计规范和流程, 以实现二维材料搭建的不同功能模块可以实现阻抗匹配。

5 基于二维材料的三维集成与芯片应用

通过对单个组件和基本电路模块的详细讨论,

下一步是探索集成电路设计中的新前沿,即三维堆叠技术. 这项技术有望进一步提升集成系统的性能和密度,尤其在传统二维电路接近物理极限时具有重要意义.

国际器件与系统路线图 (IRDS) 指出,在 2025 年以后的后摩尔时代,集成电路的发展方向之一应该是三维堆叠与集成技术. 与平面 CMOS 工艺不同,三维堆叠与集成技术充分利用第三个维度的空间进行器件 (晶体管、模块、芯片) 的堆叠以提升单位面积内的晶体管密度,从而实现计算性能的提升. 目前已经有大量关于 3D 集成的硅基电路的研究和应用,比如 3D 集成技术的引入使 NAND 闪存领域的发展产生了革命化的改变. 在硅基三维堆叠的器件中,不同层之间的电学互连是通过硅通孔 (TSV) 实现的^[122]. 但是通孔较大的面积与较差的对准精度限制了器件集成密度的提升. 硅基晶体管的极限物理尺寸还受到物理定律的制约,限制了集成密度. 此外,堆叠器件的功率密度上升,发热会更加严重,导致器件性能下降与容易老化. 多层堆叠器件还会导致下层器件承受大的机械应力,对芯片的结构设计提出更高要求^[123].

在这种背景下,具有原子级厚度、优异的电学和热学性能的二维材料的三维集成与芯片应用展现出独特的意义和优势. 通过二维材料的应用,未来三维集成技术有望突破现有的物理与工程限制,推动芯片技术向着更高性能、更小尺寸、更低功耗的方向发展. 下文围绕二维材料的三维集成方案与芯片级别应用进行具体展开.

5.1 基于二维材料的三维集成方法与界面工程

完全依靠二维材料组成的电子系统可以充分利用二维材料的原子层级厚度,实现超薄的器件结构^[124],还可以进一步利用范德瓦耳斯力堆叠技术实现超高密度的 3D 集成^[125–127],并形成功能性的异质结构^[128],此外二维材料的本征机械柔性有助于实现全柔性电路,其对后段 CMOS 工艺兼容,无需从头研发工艺设备,降低了硬件研发与生产成本^[129]. 并且在二维材料集成技术中,界面工程起着至关重要的作用. 通过精确调控不同材料间的界面相互作用,二维材料不仅能在保持各自本征特性的同时,实现材料之间的高效协同,还能在器件性能与集成度等方面带来显著提升^[129–131]. 因此,本部

分内容根据二维材料不同的集成方式与界面工程来进行介绍.

5.1.1 基于转移的三维集成

转移是最简单基本的 3D 集成方式,将二维材料转移到预制好下层结构的目标衬底上,然后再制作电极、介质 (ITD) 与互连通孔 (MIV/ITV) 等结构. 根据转移过程使用的材料可以将转移分为多聚物辅助转移和金属辅助转移这两类 (图 12(a))^[129]. 基于多聚物的转移方式先将基底上的二维材料表面覆盖一层多聚物 (比如 PMMA),然后通过刻蚀剂或机械剥离的方式去除基底并转移材料到目标衬底上,最后通过化学溶剂去除多聚物. 例如, Xie 等^[132]使用聚苯乙烯辅助的湿法转移制备 MoS_2 FET 并与垂直阻变存储器 (VRRAM) 组合成 3D 堆叠的 1T-4R 高密度存储单元 (图 12(b)). Pendurthi 等^[127]则使用 PMMA 辅助转移 WSe_2 ,制备互补场效应晶体管 (CFET) 的双层单片 3D 集成电路 (图 12(c)). 然而,基于多聚物的转移方式具有一些缺点^[129,133],比如多聚物与材料之间较差的黏合性会降低产率,以及多聚物的使用与清洁过程容易在材料表面引入缺陷等. 使用金属辅助转移材料可以有效解决上述问题,其过程类似^[134]. 例如, Li 等^[113]使用 Au 辅助转移分子束外延生长的 HfSe_2 薄膜. 转移过程中 Au 保护了易氧化的二维薄膜,同时无界面残留,最后多余的 Au 还可以通过刻蚀作为顶电极使用.

上述基于转移的 3D 集成技术在制作电极、介质与 MIV 时都需要使用原子层沉积、电子束蒸发等高温高能的工艺,因此容易破坏二维材料脆弱的表面,引起强烈的费米能级钉扎效应,严重制约器件性能. 针对此问题, Lu 等^[114]提出了一种 120 °C 低温下的单步 vdW 层压方法实现低温低能的三维集成. 研究者首先在牺牲层上整体预制电路层 (ITD、ITV、电极),然后通过 vdW 层压的方式将电路层转移到二维材料上,逐层重复上述过程搭建 10 层的单片 3D 集成电路 (图 12(d)). 与蒸发或刻蚀制备的器件相比,该方法制备的 FET 具有更好的迁移率和开关比.

5.1.2 基于生长的三维集成

基于转移的集成方式难以保证薄膜的保形性,同时存在对准精度、多层堆叠材料转移后薄膜质量

差的问题. 相比之下, 直接在目标衬底上生长二维材料可以免去转移过程, 从而避免可能引入的缺陷/杂质并且具有很好的保形性^[129,126]. 在 3D 集成过程中, 为保护下层制作好的电路结构, 生长温

度需要低于 400 °C, 而这种情况下制得的薄膜是多晶并且晶粒很小, 会导致迁移率下降且薄膜容易断裂, 所以这项技术的难点在于需要在低温下生长单晶材料.

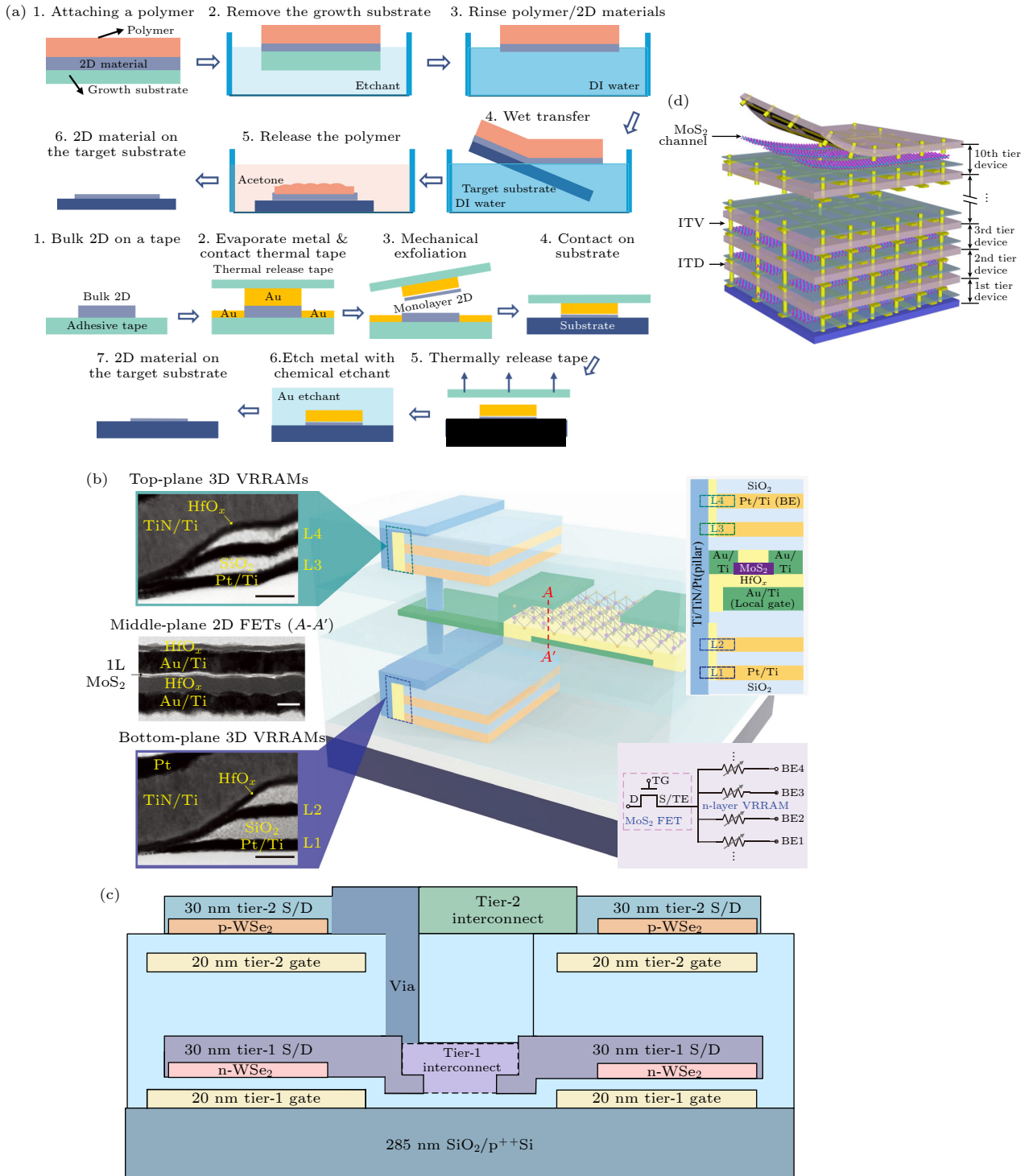


图 12 (a) 多聚合物辅助的转移方法^[129]; (b) 由 MoS₂ FETs 与 VRRAMs 单片 3D 集成的 1T-4R 结构^[132]; (c) 单片 3D 集成的 CMOS 与非门示意图^[127]; (d) 通过范德瓦耳斯层压制作的 10 层单片 3D 集成系统^[126]

Fig. 12. (a) Polymer-assisted transfer^[129]; (b) monolithic 3D integration of MoS₂ transistors and VRRAMs into a 1T-4R structure^[132]; (c) schematic of a monolithic 3D-integrated CMOS NAND circuit^[127]; (d) schematic of a 10-tier monolithic 3D system integrated by van der Waals lamination^[126].

Kim 等^[135]首次报道了低温下在多晶或非晶表面生长单晶 TMDs 的方法. 他们的思路是使用选择性生长的 SiO_2 作为限制性掩膜引导 WSe_2 在 Si/HfO_2 表面的成核生长 (图 13(a)). 根据密度泛函理论 (DFT) 的模拟, 在 SiO_2 边缘处的 WSe_2 同时与 SiO_2 和 HfO_2 接触具有更大的结合能, 倾向于优先成核. 通过设计用于低温下成核生长的沟槽的分布与尺寸, 确保 1 个沟槽中仅有 1 个成核位点. 足够小的沟槽尺寸可确保在 2 次成核前完成单晶的横向生长. 作者基于此展示了垂直单晶 FET 阵列的无缝单片 3D 集成 (图 13(b)).

5.1.3 CMOS 兼容的异质集成与界面工程

科学家对于二维材料的研究不仅限于它们能够制作更小更高性能的 FET, 还关注其与硅基 CMOS 后道 (BEOL) 工艺的集成^[21,136]. 后者的研究目的是利用现有成熟 CMOS 工艺降低成本的同时, 结合二维材料的独特性能, 实现电学性能与可制造性的协同增强. 二维材料的异质结构与界面工程是实现高性能器件与异质集成的重要技术路线, 通过界面调控和缺陷工程, 二维材料在保持本征特性不变的同时, 能够实现不同材料之间的协同工作, 从而推动新型复合结构的开发.

这一领域早期的代表性工作是 2017 年 Goossens 等^[137]制作的石墨烯与 CMOS 图像传感器单片 3D 集成的 388×288 像素宽谱图像传感器 (图 14(a)).

该器件的光探测机制是光栅控效应与量子点和石墨烯之间的电荷转移, 可以实现较高的增益与光响应度. 石墨烯显著提高了器件的动态范围、响应度与宽谱探测能力. 2022 年, Tong 等^[138]将 MoS_2 转移到 HfO_2 覆盖的硅基 FET 上, 制作了异质 3D 集成的 CFET 电路 (图 14(b), (c)). 使用 SOI 技术制作的 Si pFET 的空穴迁移率与晶圆级 MoS_2 nFET 的电子迁移率相当, 这解决了硅基器件中电子与空穴迁移率不同导致的器件性能失配问题. Zhu 等^[139]使用低温工艺将 h-BN 转移到预制好的 Si CMOS 微芯片上以制作忆阻器. 通过集成一晶体管一忆阻器 (1T1M) 单元, 他们探索了异质架构用于存内计算.

二维材料也可以通过与 BEOL 兼容的直接生长过程与 Si CMOS 进行集成. 例如, Zhu 等^[140]巧妙地设计了一种可以隔离高温区域与低温生长区域的有机金属化学气相沉积方法. 该方法可以直接在 Si CMOS 晶圆上以 275°C 的低温生长 MoS_2 , 并且可以与 Si CMOS 电路进行 BEOL 集成. 研究者还证实整个工艺过程对于下层的硅基电路几乎没有影响.

除此之外, 局部极性转换技术也是近年来异质集成中的一个关键创新. 通过界面工程、缺陷调控或异质堆叠结构的引入, 可以实现二维材料的载流子浓度与类型的调节, 使其与 CMOS 所需的类型匹配^[141]. Kong 等^[142]设计了一种无掺杂的方法,

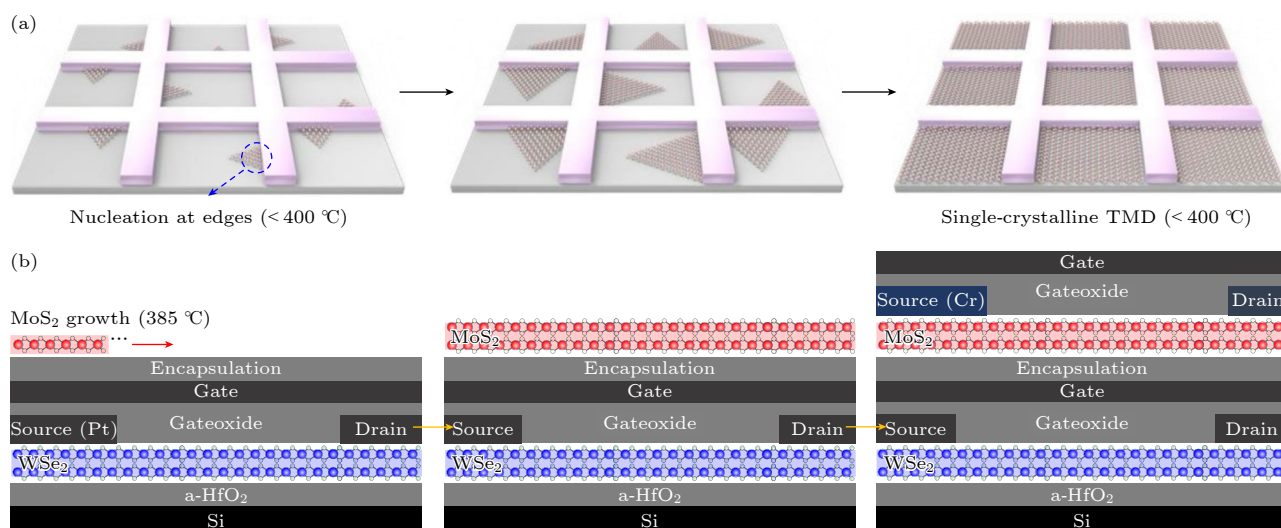


图 13 (a) 单晶 TMD 阵列的低温生长示意图, 突出展示了在图案化结构的边缘或角落成核的趋势^[135]; (b) 无缝单片 3D 集成示意图^[135]

Fig. 13. (a) Schematic showing low-temperature growth of single-crystalline TMD array, highlighting the tendency of nuclei to form at edges or corners of the patterned structure^[135]; (b) schematic of seamless monolithic 3D integration^[135].

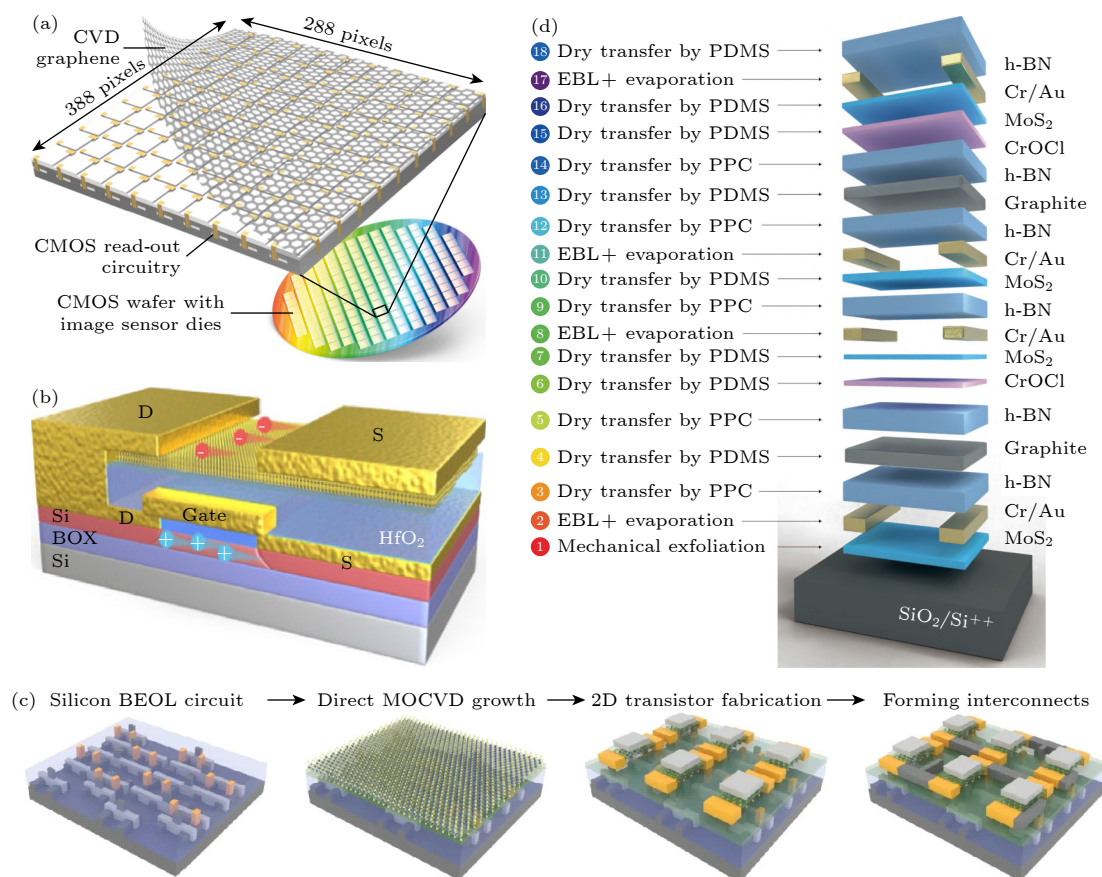


图 14 (a) 用于光电器件的二维材料与硅基 CMOS 电路的 3D 集成^[137]; (b) SOI-MoS₂ 异质 3D 堆叠 CFET 示意图^[138]; (c) 二维材料-硅基电路异质 3D 集成流程图^[138]; (d) 由 14 层 vdW 异质结构垂直堆叠搭建的 3D 与非逻辑门^[143]

Fig. 14. (a) 3D integration of 2D materials with silicon logic for optoelectronics^[137]; (b) schematic of the SOI-MoS₂ heterogeneous 3D-stacked CFET^[138]; (c) schematic of the 2D-silicon heterogeneous 3D integration process^[138]; (d) 3D NAND logic made of vertically stacked 14-layer vdW heterostructure^[143].

在使用相同金属接触下通过改变金属电极的集成方式调节 WSe₂ 的极性. 通过采用 vdW 集成 Au 电极形成干净的弱相互作用界面可以得到 p 型 FET; 使用热蒸发法制备 Au 电极形成存在缺陷的界面, 得到 n 型 FET. 这 2 种方法都可在低温下实现, 与 BEOL 兼容, 并且能在同一材料上实现 p/n 型共存且性能均衡. 作者基于此构建了高性能的 CMOS 电路. Guo 等^[143] 则采用 TMDs 与反铁磁绝缘体氯化铬 (CrOCl) 堆叠异质结构, 利用两个异质材料的强 vdW 界面耦合作用实现 TMDs 从 n 到 p 型的可逆转换 (图 14(d)). DFT 计算说明其原理是 CrOCl 的高功函数引发了 TMDs 的电荷转移, 使 TMDs 的费米能级上移至价带附近而表现为 p 型. 作者据此实现 14 层垂直异质堆叠的 CMOS 电路.

5.2 芯片化应用

近几年随着二维材料 3D 集成技术的不断

发展, 其已经在逻辑芯片、边缘计算、柔性电子、光电芯片、感算一体等领域展现出了广阔的应用前景^[144–146].

5.2.1 基于二维材料的逻辑芯片

二维材料因其独特的二维结构使得在纳米尺度下的电子器件更为高效, 并能有效降低器件尺寸, 有助于推动逻辑电路的微型化与高性能化. Wachter 等^[147] 基于 CVD 生长的 MoS₂ 薄膜成功制备了首个基于二维材料的微处理器, 包含了 115 个晶体管, 并实现了算术逻辑单元、累加器和指令寄存器等核心模块, 证明了二维材料用于构建复杂数字系统的可行性. Chen 等^[148] 首次将机器学习辅助的工艺优化方法应用于 MoS₂ 晶圆级制造, 并成功实现了包含 156 个晶体管的 4 位全加器等复杂功能电路. 在此基础上, Ao 等^[149] 成功开发了基于 MoS₂ 的 RISC-V 微处理器, 其包含 5900 个晶

晶体管, 产率高达 99.77%(图 15(a)), 是目前报道中最大规模的全二维材料集成处理器, 为未来的超薄柔性电子设备提供了可能。

5.2.2 低功耗边缘 AI 芯片

随着物联网与移动终端带来的数据爆炸, 传统

冯·诺依曼架构因存算分离带来的能耗和延迟已经难以满足边缘 AI 的需求, 二维材料凭借独特的电子结构可以在相同面积下实现更高的器件密度并保持极低的静态功耗, 更进一步, 借鉴人脑“存算一体、事件驱动”的思想构建的神经形态计算范式为边缘端的 AI 应用提供了全新的解决方案^[150–152]。

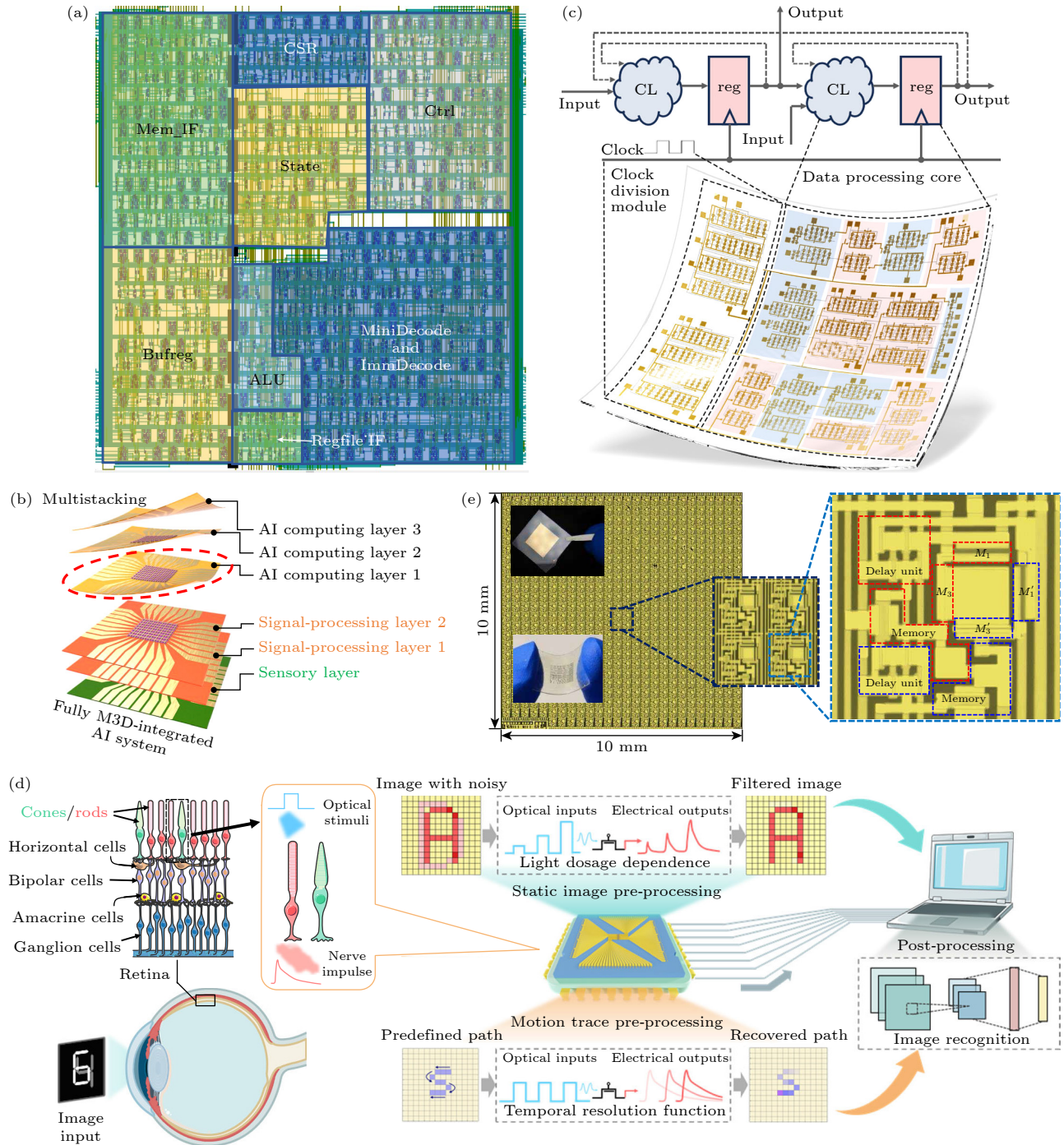


图 15 二维材料的集成应用 (a) 基于二维材料的逻辑芯片^[149]; (b) 基于二维材料的边缘 AI 芯片^[154]; (c) 基于二维材料的柔性电子^[158]; (d) 基于二维材料的感算一体^[165]; (e) 基于二维材料的光电芯片^[167]

Fig. 15. Integrated applications of two-dimensional materials: (a) Logic chips based on two-dimensional materials^[149]; (b) edge AI chips based on two-dimensional materials^[154]; (c) flexible electronics based on two-dimensional materials^[158]; (d) sensing-computing integration based on two-dimensional materials^[165]; (e) optoelectronic chips based on two-dimensional materials^[167].

Zhu 等^[139]将 h-BN 忆阻器集成在 CMOS 工艺的后端互联层上, 实现了高可靠性的超小忆阻器单元, 成功模拟了生物突触的脉冲时序依赖可塑性 (STDP) 核心特性, 通过实测数据仿真在构建的脉冲神经网络上获得了 MNIST 手写数据集识别 90% 的成功率. Jain 等^[153]实现了一个 32×32 规模的基于 HfSe_2 忆阻器的 1S1R 交叉阵列, 实现了 89% 的器件良率并通过后道工艺 (EBOL) 集成有效抑制了潜电流, 实现了一个高速度、高耐久、高能效的边缘 AI 推理芯片, 在英文字母识别任务上取得了 97.5% 的准确率. Kang 等^[154]将 6 层 $\text{WSe}_2/\text{h-BN}$ 忆阻器阵列与 MoS_2 晶体管阵列垂直堆叠, 构成 3D 1T-1R 架构, 在无需硅通孔与晶圆键合的条件下实现了大面积、低应力的洁净界面二维材料多层异质集成, 在边缘端完成了 DNA 序列识别的卷积运算, 为二维材料的边缘应用提供了有力的候选方案.

5.2.3 柔性电子芯片

随着物联网与可穿戴电子设备的快速发展, 柔性电子技术正在成为研究热点, 二维材料因为其原子级厚度、优异的电学特性以及机械柔韧性, 在弯曲状态下仍然可以保持优异电学性能, 被认为是实现高性能柔性电子器件的理想候选材料^[155]. 在二维材料柔性集成方面, 多项研究取得了重要进展. Shinde 等^[156]实现了 4 英寸 (1 英寸 = 2.54 cm) 晶圆级 MoS_2 薄膜晶体管阵列与逻辑电路的高保真、无残留集成, 其开发的无刻蚀水转移技术有效避免了传统工艺中的材料损伤与污染问题, 并实现了生长衬底的循环利用. 在此基础上, Tang 等^[157]通过引入超薄高 κ 介质/金属栅技术, 成功制备出可在 1 V 超低电压下工作的全功能大规模柔性集成电路, 显著降低了系统功耗. 为进一步展示其系统应用潜力, Peng 等^[158]在柔性基底上进一步集成了包含超过 100 个晶体管的中等规模电路 (图 15(c)), 成功演示了从半加器、锁存器到触发器、时钟分频器等完整的组合与时序逻辑功能.

5.2.4 光电芯片

二维材料的优异光电特性与硅工艺兼容性使其成为构建高性能光电探测设备的理想平台^[159,160], 基于二维材料的光电探测器与 CMOS 电路集成, 可以实现紧凑的光子设备, 而光波导与传感器的集成极大简化了光学信息的片上处理流程, 为快

速、海量的数据片上计算带来了可能^[161]. Goossens 等^[137]创新性地提出了石墨烯-量子点混合型光电导探测器的像素结构, 实现了良率接近 100% 的低温无损集成的宽谱带、可调谐、高灵敏度的 338×338 像素的光电探测阵列. 进一步, Zhang 等^[162]首次将全石墨烯透明光晶体管阵列做成了可级联的焦栈式成像芯片, 在芯片级尺度上完成了 3D 空间信息捕获与实时重建, 且不需要外加激光扫描, 进一步展示了波段扩展和规模扩展的潜力. Chen 等^[163]在 4 英寸晶圆上集成了特征尺寸达到 500 nm 的 h-BN/Si 结构的光子忆阻器阵列, 实现了从紫外到近红外的宽光谱响应, 通过调节入射激光功率实现了非易失性、易失性以及非阻变模式之间的切换.

5.2.5 智能传感器/传感计算一体芯片

冯·诺依曼架构的传输延迟与高功耗问题也催生了全新的计算范式, 感算一体 (in-sensor Computing, ISC) 技术将传感、储存与数据处理整合在数据采集点, 可以实现实时、低功耗运行^[159], 同时避免了大量数据的远距离传输与模数转换^[164]. 二维材料因为其优异的光电特性以及优良的异质材料兼容特性, 在感算一体领域展现出了独特的优势, 其可以带来更高的开关比和更长的循环寿命.

Mennel 等^[165]实现了基于 WSe_2 的光电二极管阵列感算一体图像传感器 (图 15(d)), 在同一 3×3 像素阵列内完成光信号采集与人工神经网络乘-加运算, 无需模数转换即可在纳秒级时间内完成图像分类和自编码等任务. Huang 等^[166]基于 $\text{HbS}_2/\text{MoS}_2$ 异质结构制备了 10×10 像素的神经形态光学传感器阵列, 实现了感知、存储与预处理功能的硬件化集成, 可以在原位自动实现静态图像的对比度增强以及动态图像中运动轨迹的捕捉. Ma 等^[167]实现了包含 619 个基于 MoS_2 的像素的视觉增强芯片 (图 15(e)), 在传感芯片上集成了模数转换和图像处理功能, 实现了 90 dB 的高动态范围光响应, 并在毫秒级响应时间内实现了图像对比度增强和去除噪声任务.

5.3 二维材料 3D 集成与芯片化应用挑战

二维材料在 3D 集成与芯片化应用中具有显著优势, 但其发展还处于早期阶段. 这是一项系统化的工程, 受到材料制备、结构设计、3D 集成与应用端的适配性等多种因素影响, 设计时应多方面协

同优化. 具体来说, 材料/器件的规模化制备工艺、表面平坦化、热预算、寄生电容与封测都是在设计时需要考虑的因素^[21,124]. 本部分将分析关键技术挑战.

二维材料 FET 的沟道长度可以缩放至亚纳米级别, 但是它们的性能受到粗糙的界面以及二维材料与电介质不规则的接触面引起的缺陷的严重影响^[21]. 将二维材料转移到不平整的基底上还会产生表面应力, 对器件性能造成负面影响. 使用高 κ 介质的 FET 器件整体变薄, 因而对平整表面的需求更高. 因此, 需要使用表面平坦化技术来获得一致、极光滑与无缺陷的表面. 目前, 使用最多的平坦化方法是化学机械抛光 (CMP). 将基底压在抛光板上并施加抛光浆, 浆液由化学试剂与研磨料组成, 可以促进化学反应并且控制刚度, 并和施加在基板上的力一起有效打磨抛光表面^[168,169]. 目前, 该领域的研究重点是减少缺陷, 开发 CMP 填充合成技术, 改进 CMP 后清洗方法与制造环保型浆料. 这些需要对晶圆界面的化学与机械相互作用有清晰良好的理解与分析.

3D 集成电路在更高的器件集成度下, 产热量增大, 因此需要良好的热预算管理^[18,124]. 在 3D 集成电路中, 发热点的有效热耗散过程需要材料具有高热导性, 同时热触点或通路应该有低热阻. 二维材料比如石墨烯具有良好的热导性, 可用于替代 Cu 或 Al. 此外, 还有研究关注二维材料器件的局域热

生成、vdW 层之间的高热隔离以及热膨胀系数不匹配的影响等. 相关领域需要更多器件建模与实验的研究, 包括开发导热通孔、扩散器、散热器、微流体通道等集成设计与封装方案^[38]. 二维材料的集成应用总结见表 4.

6 总结与展望

二维层状材料 (含 TMDC 等) 凭借原子级厚度、可调能带与优异界面特性, 已在逻辑、存储、传感与神经形态等器件层面展示出超越传统硅基的潜力, 并在范德瓦耳斯异质堆叠、CMOS 后端工艺兼容三维集成与柔性电子等方向实现了系统级验证. 然而, 二维材料规模化生长质量、金属接触与转移过程引入的缺陷、热管理与功耗密度, 仍是走向工程化与产业化的关键瓶颈^[169-172].

在此, 可认为二维材料正从“器件可行性”迈向“系统可用性”, 需要跨越工程化挑战极限, 需同时补齐二维材料与器件晶圆级制造与特性仿真-电路模块匹配标准化仿真设计-三维集成的可靠性工程与热管理生态三大支柱, 并重点强化产业化能力与标准化体系建设.

在材料生长和器件制备方面, 需要开发更优异的材料生长工艺与器件仿真工具, 建立二维材料片上质量评估标准, 引入多物理场可靠性建模工具, 预测材料、器件寿命与稳定性^[173-176].

表 4 二维材料的集成应用总结
Table 4. Summary of integrated applications of two-dimensional materials.

材料	集成方法	器件数量	单元器件平均面积/ μm^2	应用领域	参考文献
MoS ₂	生长	115	5217	逻辑	[147]
MoS ₂	生长	156	—	逻辑	[148]
MoS ₂	生长	5900	1525	逻辑	[149]
h-BN	2D+CMOS	—	0.053(功能区)	边缘AI	[139]
HfSe ₂	转移	1024	1503	边缘AI	[153]
WSe ₂ /h-BN/ MoS ₂	转移	—	250000	边缘AI	[154]
MoS ₂	转移	—	—	柔性电子	[156]
MoS ₂	转移	—	30000	柔性电子	[157]
MoS ₂	转移	100+	15600	柔性电子	[158]
石墨烯	2D+CMOS	101124	3(功能区)	光电芯片	[137]
石墨烯	2D+CMOS	16	111111	光电芯片	[162]
h-BN	2D+CMOS	—	3.14(功能区)	光电芯片	[163]
WSe ₂	2D+CMOS	9	115.5	感算一体	[165]
HbS ₂ /MoS ₂	2D+CMOS	100	7412	感算一体	[166]
MoS ₂	生长	619	11.650	感算一体	[167]

在电路模块设计中,需优化不同二维材料器件间的一致性、寄生电容与阻抗匹配,开发适配异质集成的多物理场仿真工具和 EDA 模型库,实现自动化版图生成,从而推动二维材料电路从实验室走向工程化与规模化^[158,159].

在三维集成方面与芯片设计方面,需要考虑材料的堆叠界面的表面平坦化问题,并且需要建立基于功能、制程、功率分配与热管理等综合设计流程.对电路层级有正确的划分,对于不同的结构模块组合采用不同的连线与堆叠方式,保持层间信号传输的完整性.将高功耗模块安排在热通道附近,并进行动态负载均衡;采用中空通道或相变材料辅助散热,提升芯片架构层面的热可靠性^[55,177–180].

进一步而言,加速二维材料产业化,必须在“技术-标准-生态”之间实现协同建设.具体而言,量产路径应通过以下步骤推进:“小规模试制-良率优化-规模化推广”.在此过程中,依托材料与系统的协同优化框架,打通“材料均匀性-器件良率-电路功能”的传导链路,从而有效解决复杂电路(如微处理器、存储阵列)中的产率损失问题.此外,国际标准的建设也至关重要.需要学术机构、晶圆厂和 EDA 企业携手制定涵盖材料表征(如电子迁移率、禁带宽度测试方法)、工艺规范(如 CVD 生长温度、压力、蚀刻气体配比)和性能指标(如晶体管开关比)等方面的国际统一标准.这将促进“材料生长-器件制造-电路设计-系统应用”环节的数据互认与流程标准化,避免工艺不适配和重复研发,从而提升全球产业协同效率^[181].

未来,需围绕边缘 AI、感算一体、三维异质集成与柔性系统等应用开展验证与小规模量产试点,有望将二维材料的物理优势转化为能效、面积和功能密度的系统级红利.且随着标准化与工具链的完善以及产业与学术的紧密协同,二维材料将在后摩尔时代的多路线演进中,将成为连接基础研究与产业落地的关键桥梁.特别是在 AI 硬件、可穿戴电子和类脑计算等新兴领域,二维材料凭借其独特的物理特性,解决传统计算架构的瓶颈.反过来,AI 技术的进步,大量二维材料的工艺、测试数据通过 AI 整合训练,也将加速二维材料的多模态性能仿真、生长与制备工艺预测等方面研究与应用,形成良性循环.随着 AI 辅助设计的进一步发展,二维材料有望在更多领域展现革命性应用潜力,尤其是在大规模制造与器件集成等关键挑战得到解决

后,将成为后摩尔时代的重要支柱.

参考文献

- [1] Zidan M A, Strachan J P, Lu W D 2018 *Nat. Electron.* **1** 22
- [2] Kim K S, Kwon J, Ryu H, Kim C, Kim H, Lee E K, Lee D, Seo S, Han N M, Suh J M, Kim J, Song M K, Lee S, Seol M, Kim J 2024 *Nat. Nanotechnol.* **19** 895
- [3] Thompson N C, Spanuth S 2021 *Commun. ACM* **64** 64
- [4] Kudithipudi D, Schuman C, Vineyard C M, Pandit T, Merkel C, Kubendran R, Aimone J B, Orchard G, Mayr C, Benosman R, Hays J, Young C, Bartolozzi C, Majumdar A, Cardwell S G, Payvand M, Buckley S, Kulkarni S, Gonzalez H A, Cauwenberghs G, Thakur C S, Subramoney A, Furber S 2025 *Nature* **637** 801
- [5] Mehonic A, Kenyon A J 2022 *Nature* **604** 255
- [6] Aslam Mohd, Raman A P S, Rana I, Singh M B, Ranjan K R, Verma C, AlFantazi A, Singh P, Kumari K 2025 *Coordin. Chem. Rev.* **543** 216890
- [7] Aftab S, Hegazy H H 2023 *Small* **19** 2205778
- [8] Naclerio A E, Kidambi P R 2023 *Adv. Mater.* **35** 2207374
- [9] Qiu H, Yu Z H, Zhao T G, Zhang Q, Xu M S, Li P F, Li T T, Bao W Z, Chai Y, Chen S L, et al. 2024 *Sci. China Inf. Sci.* **67** 160400
- [10] Wu Y W, Wu Y J, Li H M, Liu S 2025 *Chip* **5** 100161
- [11] Zhang Q M, Zhao Z H, Tao L 2025 *Mater. Today Phys.* **53** 101710
- [12] Xie P S, Li D J, Wang W J, Ho J C 2025 *Small* 2503717
- [13] Goel N, Kumar R 2025 *Nano-Micro Lett.* **17** 197
- [14] Zhang L N, Dong J C, Ding F 2021 *Chem. Rev.* **121** 6321
- [15] Knobloch T, Selberherr S, Grasser T 2022 *Nanomaterials* **12** 3548
- [16] Chhowalla M, Jena D, Zhang H 2016 *Nat. Rev. Mater.* **1** 16052
- [17] Zeng S F, Liu C S, Zhou P 2024 *Nat. Rev. Electr. Eng.* **1** 335
- [18] Jiang J K, Parto K, Cao W, Banerjee K 2019 *IEEE J. Electron Devices Soc.* **7** 878
- [19] Chiu M H, Zhang C, Shiu H W, Chu C P, Chen C H, Chang C Y S, Chen C H, Chou M Y, Shih C K, Li L J 2015 *Nat. Commun.* **6** 7666
- [20] Wang Y J, Liu E F, Liu H M, Pan Y M, Zhang L Q, Zeng J W, Fu Y J, Wang M, Xu K, Huang Z, Wang Z L, Lu H Z, Xing D Y, Wang B G, Wan X G, Miao F 2016 *Nat. Commun.* **7** 13142
- [21] Jayachandran D, Sakib N U, Das S 2024 *Nat. Rev. Electr. Eng.* **1** 300
- [22] Liu C S, Chen H W, Wang S Y, Liu Q, Jiang Y G, Zhang D W, Liu M, Zhou P 2020 *Nat. Nanotechnol.* **15** 545
- [23] Novoselov K S, Geim A K, Morozov S V, Jiang D, Katsnelson M I, Grigorieva I V, Dubonos S V, Firsov A A 2005 *Nature* **438** 197
- [24] Avouris P 2010 *Nano Lett.* **10** 4285
- [25] Novoselov K S, Fal'ko V I, Colombo L, Gellert P R, Schwab M G, Kim K 2012 *Nature* **490** 192
- [26] Lee C G, Wei X D, Kysar J W, Hone J 2008 *Science* **321** 385
- [27] Hwang E H, Sarma S D 2008 *Phys. Rev. B* **77** 115449
- [28] Dai C H, Liu Y Q, Wei D C 2022 *Chem. Rev.* **122** 10319
- [29] Nair R R, Blake P, Grigorenko A N, Novoselov K S, Booth T J, Stauber T, Peres N M R, Geim A K 2008 *Science* **320** 1308

- [30] Manzeli S, Ovchinnikov D, Pasquier D, Yazyev O V, Kis A 2017 *Nat. Rev. Mater.* **2** 17033
- [31] Wang Q H, Kalantar-Zadeh K, Kis A, Coleman J N, Strano M S 2012 *Nat. Nanotechnol.* **7** 699
- [32] Han G H, Duong D L, Keum D H, Yun S J, Lee Y H 2018 *Chem. Rev.* **118** 6297
- [33] Mak K F, Shan J 2016 *Nat. Photon.* **10** 216
- [34] Han S W, Kwon H, Kim S K, Ryu S, Yun W S, Kim D H, Hwang J H, Kang J S, Baik J, Shin H J, Hong S C 2011 *Phys. Rev. B* **84** 045409
- [35] Jaikissoon M, Koroglu C, Yang J A, Neilson K, Saraswat K C, Pop E 2024 *Nat. Electron.* **7** 885
- [36] Oviroh P O, Jen T C, Ren J W, Duin A V 2023 *npj Clean Water* **6** 14
- [37] Roy S, Zhang X, Puthirath A B, Meiyazhagan A, Bhattacharyya S, Rahman M M, Babu G, Susarla S, Saju S K, Tran M K, Sassi L M, Saadi M A S R, Lai J W, Sahin O, Sajadi S M, Dharmarajan B, Salpekar D, Chakingal N, Baburaj A, Shuai X T, Adumbumkulath A, Miller K A, Gayle J M, Ajnsztajn A, Prasankumar T, Harikrishnan V V J, Ojha V, Kannan H, Khater A Z, Zhu Z W, Iyengar S A, Autreto P A D S, Oliveira E F, Gao G H, Birdwell A G, Neupane M R, Ivanov T G, Taha-Tijerina J, Yadav R M, Arepalli S, Vajtai R, Ajayan P M 2021 *Adv. Mater.* **33** 2101589
- [38] Chen Z W, Zhang J J, Wang S Z, Wong C P 2024 *Fundament. Res.* **4** 1455
- [39] Li L K, Yu Y J, Ye G J, Ge Q Q, Ou X D, Wu H, Feng D L, Chen X H, Zhang Y B 2024 *Nat. Nanotechnol.* **9** 372
- [40] Huang X C, Guan J Q, Lin Z J, Liu B, Xing S Y, Wang W H, Guo J D 2017 *Nano Lett.* **17** 4619
- [41] Lee J, Kwon J, Seo D, Na J, Park S, Lee H J, Lee S W, Lee K Y, Park T E, Choi H J 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 42512
- [42] Fu L, Wang F, Wu B, Wu N, Huang W, Wang H L, Jin C H, Zhuang L, He J, Fu L, Liu Y Q 2017 *Adv. Mater.* **29** 1700439
- [43] Liu F, Shimotani H, Shang H, Kanagasekaran T, Zolyomi V, Drummond N, Fal'ko V I, Tanigaki K 2014 *ACS Nano* **8** 752
- [44] Yang H W, Hsieh H F, Chen R S, Ho C H, Lee K Y, Chao L C 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 5740
- [45] Al Balushi Z Y, Wang K, Ghosh R K, Vilá R A, Eichfeld S M, Caldwell J D, Qin X, Lin Y C, DeSario P A, Stone G, Subramanian S, Paul D F, Wallace R M, Datta S, Redwing J M, Robinson J A 2016 *Nat. Mater.* **15** 1166
- [46] Balendhran S, Deng J K, Ou J Z, Walia S, Scott J, Tang J S, Wang K L, Field M R, Russo S, Zhuiykov S, Strano M S, Medhekar N, Sriram S, Bhaskaran M, Kalantar-zadeh K 2012 *Adv. Mater.* **25** 109
- [47] Wang B F, Luo Y Y, Liu B, Duan G T 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 35935
- [48] Liu Y, Huang Y, Duan X F 2019 *Nature* **567** 323
- [49] Kong L G, Chen Y, Liu Y 2021 *Nano Res.* **14** 1768
- [50] Xue F, Zhang C H, Ma Y C, Wen Y, He X, Yu B, Zhang X X 2022 *Adv. Mater.* **34** 2201880
- [51] Zhang J, Liu L, Yang Y, Huang Q W, Li D L, Zeng D W 2021 *Phys. Chem.* **23** 1542
- [52] Radisavljevic B, Radenovic A, Brivio J, Giacometti V, Kis A 2011 *Nature Nanotech.* **6** 147
- [53] Chen R S, Ding G L, Zhou Y, Han S T 2021 *J. Mater. Chem. C* **9** 11407
- [54] Tang L, Zou J Y 2023 *Nano-Micro Lett.* **15** 230
- [55] Li X F, Wu Z H, Rzepa G, Karner M, Xu H Q, Wu Z C, Wang W, Yang G H, Luo Q, Wang L F, Li L 2025 *Fundament. Res.* **5** 2149
- [56] Wang Y X, Qiu G, Wang R X, Huang S Y, Wang Q X, Liu Y Y, Du Y C, Goddard W A, Kim M J, Xu X F, Ye P D, Wu W Z 2018 *Nat. Electron.* **1** 228
- [57] Lemme M C, Akinwande D, Huyghebaert C, Stampfer C 2022 *Nat. Commun.* **13** 1392
- [58] Zhao Y H, Sun H R, Sheng Z, Zhang D W, Zhou P, Zhang Z X 2023 *Chin. Phys. B* **32** 128505
- [59] Lee K C, Yang S H, Sung Y S, Chang Y M, Lin C Y, Yang F S, Li M J, Watanabe K, Taniguchi T, Ho C H, Lien C H, Lin Y F 2019 *Adv. Funct. Materials* **29** 1809011
- [60] Pan C, Wang C Y, Liang S J, Wang Y, Cao T J, Wang P F, Wang C, Wang S, Cheng B, Gao A Y, Liu E F, Watanabe K, Taniguchi T, Miao F 2020 *Nat. Electron.* **3** 383
- [61] Sun Y L, Li M J, Ding Y T, Wang H P, Wang H, Chen Z M, Xie D 2022 *InfoMat.* **4** e12317
- [62] Liu Q, Mu Z, Liu C, Zhao L, Chen L, Yang Y, Wei X, Yu W 2021 *IEEE Electron Device Lett.* **42** 657
- [63] Kaur G, Gill S S, Rattan M 2020 *Int. J. Smart Sens. Int.* **13** 1
- [64] Desai S B, Madhvapathy S R, Sachid A B, Llinas J P, Wang Q, Ahn G H, Pitner G, Kim M J, Bokor J, Hu C, Wong H S P, Javey A 2016 *Science* **354** 99
- [65] Shi X, Wang X, Liu S, Guo Q, Sun L, Li X, Huang R, Wu Y 2022 *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* San Francisco, CA, USA, December 1–5, 2022 p7.1.1
- [66] Resta G V, Sutar S, Balaji Y, Lin D, Raghavan P, Radu I, Catthoor F, Thean A, Gaillardon P E, De Micheli G 2016 *Sci. Rep.* **6** 29448
- [67] Jiang J F, Xu L, Qiu C G, Peng L M 2023 *Nature* **616** 470
- [68] Yu X X, Xu L L, Shi W H, Meng X H, Huang X Y, Peng Z R, Tong L, Sun H J, Miao X S, Ye L 2025 *Mater. Horiz.* **12** 8409
- [69] Wu H, Shi J K, Ye Z L, Yan Z 2025 *Appl. Phys. Lett.* **127** 043101
- [70] Wu L M, Wang A W, Shi J N, Yan J H, Zhou Z, Bian C, Ma J J, Ma R S, Liu H T, Chen J C, Huang Y, Zhou W, Bao L H, Ouyang M, Pennycook S J, Pantelides S T, Gao H J 2021 *Nat. Nanotechnol.* **16** 882
- [71] Fan Z W, Qu J Y, Wang T, Wen Y, An Z W, Jiang Q T, Xue W H, Zhou P, Xu X H 2023 *Chin. Phys. B* **32** 128508
- [72] Liu Z, Deng L J, Peng B 2021 *Nano Res.* **14** 1802
- [73] Singh P, Baek S, Yoo H H, Niu J, Park J H, Lee S 2022 *ACS Nano* **16** 5418
- [74] Li X Z, Qin B, Wang Y X, Xi Y, Huang Z H, Zhao M Z, Peng Y L, Chen Z T, Pan Z T, Zhu J D, Cui C Y, Yang R, Yang W, Meng S, Shi D X, Bai X D, Liu C, Li N, Tang J S, Liu K H, Du L J, Zhang G Y 2024 *Nat. Commun.* **15** 10921
- [75] Elhman M M, Samad Y A, Gul J Z, Saqib M, Khan M, Shaikat R A, Chang R, Shi Y, Kim W Y 2025 *Prog. Mater. Sci.* **152** 101471
- [76] Zhang F, Zhang H, Shrestha P R, Zhu Y, Maize K, Krylyuk S, Shakouri A, Campbell J P, Cheung K P, Bendersky L A, Davydov A V, Appenzeller J 2018 *IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)* San Francisco, CA, USA December 1–5, 2018 p22. 7. 1
- [77] Chen X, Yang D L, Hwang G, Dong Y J, Cui B B, Wang D C, Chen H G, Lin N, Zhang W Q, Li H H, Shao R W, Lin P, Hong H, Yao Y G, Sun L F, Wang Z R, Yang H 2024 *ACS Nano* **18** 10758
- [78] Spassov D, Paskaleva A 2023 *Nanomaterials* **13** 2456
- [79] Yu X Y, Ma Z Y, Shen Z X, Li W, Chen K J, Xu J, Xu L

- 2022 *Nanomaterials* **12** 2459
- [80] Cao Y, Balijepalli A, Sinha S, Wang C C, Wang W P, Zhao W 2009 *FNT Electron. Design Autom.* **3** 305
- [81] Huang X H, Liu C S, Tang Z W, Zeng S F, Wang S Y, Zhou P 2023 *Nat. Nanotechnol.* **18** 486
- [82] Zhang D Z, Pan W J, Tang M C, Wang D Y, Yu S J, Mi Q, Pan Q N, Hu Y Q 2023 *Nano Res.* **16** 11959
- [83] Lou Z, Liang Z Z, Shen G Z 2016 *J. Semicond.* **37** 091001
- [84] Lopez-Sanchez O, Lembke D, Kayci M, Radenovic A, Kis A 2013 *Nature Nanotech.* **8** 497
- [85] Yore A E, Smithe K K H, Jha S, Ray K, Pop E, Newaz A K M 2017 *Appl. Phys. Lett.* **111** 043110
- [86] Shen S W, Wu W X, Yue X F, Qin S K, Sheng C X, Xia D C, Guo J Y, Chen J J, Han J K, Liu B J, Lu Y, Hu L G, Liu R, Qiu Z J, Cong C X 2025 *Adv. Mater. Technol.* **10** 2500214
- [87] Hassan H U, Mun J, Kang B S, Song J Y, Kim T, Kang S W 2016 *RSC Adv.* **6** 75839
- [88] Niu Y, Zeng J W, Liu X C, Li J L, Wang Q, Li H, Rooij N F D, Wang Y, Zhou G F 2021 *Adv. Sci.* **8** 2100472
- [89] Venkatesan A, Ryu H, Devnath A, Yoo H, Lee S 2024 *J. Mater. Sci. Technol.* **168** 79
- [90] Yang J, Luo S, Zhou X, Li J L, Fu J T, Yang W D, Wei D P 2019 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **11** 14997
- [91] Xu D D, Duan L, Yan S Y, Wang Y, Cao K, Wang W D, Xu H C, Wang Y J, Hu L W, Gao L B 2022 *Micromachines* **13** 660
- [92] Daus A, Jaikissoon M, Khan A I, Kumar A, Grady R W, Saraswat K C, Pop E 2022 *Nano Lett.* **22** 6135
- [93] Matthus C D, Chava P, Watanabe K, Taniguchi T, Mikolajick T, Helm M, Erbe A 2023 *IEEE J. Electron Devices Soc.* **11** 359
- [94] Huang Z, Li Y, Zhang Y, Chen J, He J, Jiang J 2024 *Int. J. Extrem. Manuf.* **6** 032003
- [95] Tong L, Peng Z R, Lin R F, Li Z, Wang Y L, Huang X Y, Xue K H, Xu H Y, Liu F, Xia H, Wang P, Xu M S, Xiong W, Hu W D, Xu J B, Zhang X L, Ye L, Miao X S 2021 *Science* **373** 1353
- [96] Sun L, Xu Y S, Huo G H, Hou Y X, Li W, Zheng Y F, Shi J J, Jiang Y M, Su J, Zhuge F, Bando Y, Zhai T Y, Gao Y H, Wang Z L 2025 *Nano Energy* **143** 111311
- [97] Wang M Q, Ouyang D C, Dai Y, Huo D, He W K, Song B L, Hu W H, Wu M H, Li Y, Zhai T Y 2025 *Adv. Mater.* **37** 2500049
- [98] Hong Y W, Liu Y M, Li R N, Tian H 2024 *J. Phys. Mater.* **7** 032001
- [99] Wang P F, Chen M Y, Xie Y Q, Pan C, Watanabe K, Taniguchi T, Cheng B, Liang S J, Miao F 2023 *Chin. Phys. Lett.* **40** 117201
- [100] Gong Y C, Ming J Y, Wu S Q, Yi M D, Xie L H, Huang W, Ling H F 2024 *Acta Phys. Sin.* **73** 207302 (in Chinese) [贡以纯, 明建宇, 吴思齐, 仪明东, 解令海, 黄维, 凌海峰 2024 物理学报 **73** 207302]
- [101] Yan X B, Zhao Q L, Chen A P, Zhao J H, Zhou Z Y, Wang J J, Wang H, Zhang L, Li X Y, Xiao Z A, Wang K Y, Qin C Y, Wang G, Pei Y F, Li H, Ren D L, Chen J S, Liu Q 2019 *Small* **15** 1901423
- [102] Park E, Kim M, Kim T S, Kim I S, Park J, Kim J, Jeong Y, Lee S, Kim I, Park J K, Kim G T, Chang J, Kang K, Kwak J Y 2020 *Nanoscale* **12** 24503
- [103] Song C, Kim D, Lee S, Kwon H 2024 *Adv. Sci.* **11** 2308588
- [104] Wang H, Lu Y L, Liu S B, Yu J, Hu M, Li S N, Yang R, Watanabe K, Taniguchi T, Ma Y, Miao X S, Zhuge F, He Y H, Zhai T Y 2023 *Adv. Mater.* **35** 2309099
- [105] Choi H, Baek S, Jung H, Kang T, Lee S, Jeon J, Jang B C, Lee S 2025 *Adv. Mater.* **37** 2406970
- [106] Dong J C, Zhang L N, Dai X Y, Ding F 2020 *Nat. Commun.* **11** 5862
- [107] Cao G X, An F 2022 *Mater. Today Commun.* **33** 104802
- [108] Zhang G Q, Chen Y, Yue S Y, Zhang Y W, Qin H S, Liu Y L 2023 *J. Mech. Phys. Solids* **181** 105466
- [109] Liu R K, Lin S, Wan J, Li L, Zhang G Q, Qin H S, Liu Y L 2025 *Thin-Walled Structures* **213** 113261
- [110] Tsang C I, Pu H H, Chen J H 2025 *APL Mach. Learn.* **3** 016115
- [111] Hua Q L, Gao G Y, Jiang C S, Yu J R, Sun J L, Zhang T P, Gao B, Cheng W J, Liang R R, Qian H, Hu W G, Sun Q J, Wang Z L, Wu H Q 2020 *Nat. Commun.* **11** 6207
- [112] Xiao X Y, Peng Z X, Zhang Z R, Zhou X Y, Liu X Z, Liu Y, Wang J J, Li H Y, Novoselov K S, Casiraghi C, Hu Z R 2024 *Nat. Commun.* **15** 10491
- [113] Hu Z H, Krisnanda T, Fieramosca A, Zhao J X, Sun Q L, Chen Y Z, Liu H Y, Luo Y, Su R, Wang J Y, Watanabe K, Taniguchi T, Eda G, Wang X R, Ghosh S, Dini K, Sanvitto D, Liew T C H, Xiong Q H 2024 *Nat. Commun.* **15** 1747
- [114] Migliato Marega G, Zhao Y, Avsar A, Wang Z, Tripathi M, Radenovic A, Kis A 2020 *Nature* **587** 72
- [115] Lee M, Park C Y, Hwang D K, Kim M, Lee Y T 2022 *Npj 2D Mater. Appl.* **6** 45
- [116] Huang X Y, Tong L, Xu L L, Shi W H, Peng Z R, Li Z, Yu X X, Li W, Wang Y L, Zhang X L, Gong X, Xu J B, Qiu X M, Wen H Y, Wang J, Hu X B, Xiong C H, Ye Y, Miao X S, Ye L 2025 *Nat. Commun.* **16** 101
- [117] Liu C J, Wan Y, Li L J, Lin C P, Hou T H, Huang Z Y, Hu V P H 2022 *Adv. Mater.* **34** 2107894
- [118] Xiao K, Wan J, Xie H, Zhu Y X, Tian T, Zhang W, Chen Y X, Zhang J S, Zhou L H, Dai S, Xu Z H, Bao W Z, Zhou P 2024 *Nat. Commun.* **15** 9782
- [119] Huang X J, Leng T, Chang K H, Chen J C, Novoselov K S, Hu Z R 2016 *2D Mater.* **3** 025021
- [120] Sarker S, Kumar A, Elhteshamuddin M, Dasgupta A 2023 *IEEE J. Electron Devices Soc.* **11** 510
- [121] Liu X F, Xing K J, Tang C S, Sun S, Chen P, Qi D C, Breese M B H, Fuhrer M S, Wee A T S, Yin X M 2025 *Prog. Mater. Sci.* **148** 101390
- [122] Jiang T F, Ryu S K, Zhao Q, Im J, Huang R, Ho P S 2013 *Microelectron. Reliab.* **53** 53
- [123] Lu T, Serafy C, Yang Z, Samal S K, Lim S K, Srivastava A 2017 *IEEE Trans. Comput. Aided Des. Integr. Circuits Syst.* **36** 1593
- [124] Sun Y J, Zhang R J, Teng C J, Tan J Y, Zhang Z H, Li S N, Wang J W, Zhao S L, Chen W J, Liu B L, Cheng H M 2023 *Mater. Today* **66** 9
- [125] Cao W, Bu H M, Vinet M, Cao M, Takagi S, Hwang S, Ghani T, Banerjee K 2023 *Nature* **620** 501
- [126] Lu D L, Chen Y, Lu Z Y, Ma L K, Tao Q Y, Li Z W, Kong L G, Liu L T, Yang X K, Ding S M, Liu X, Li Y X, Wu R X, Wang Y L, Hu Y Y, Duan X D, Liao L, Liu Y 2024 *Nature* **630** 340
- [127] Pendurthi R, Sakib N U, Sadaf M U K, Zhang Z, Sun Y, Chen C, Jayachandran D, Oberoi A, Ghosh S, Kumari S, Stepanoff S P, Somvanshi D, Yang Y, Redwing J M, Wolfe D E, Das S 2024 *Nat. Nanotechnol.* **19** 970
- [128] Zhang Q, Li M H, Li L, Geng D C, Chen W, Hu W P 2024 *Chem. Soc. Rev.* **53** 3096
- [129] Kim S J, Lee H J, Lee C H, Jang H W 2024 *npj 2D Mater.*

- Appl.* **8** 70
- [130] Yang S L, Liu C S, Yu S H, Jiang P, Hao H, Zhang L, Liu Y S, Zheng X H **2025** *Chin. Phys. Lett.* **42** 090705
- [131] Wang H, Xu M, Zheng R K **2020** *Acta Phys. Sin.* **69** 017301 (in Chinese) [王慧, 徐萌, 郑仁奎, **2020** 物理学报 **69** 017301]
- [132] Xie M S, Jia Y Y, Nie C, Liu Z H, Tang A, Fan S Q, Liang X Y, Jiang L, He Z Z, Yang R **2023** *Nat. Commun.* **14** 5952
- [133] Schranghamer T F, Sharma M, Singh R, Das S **2021** *Chem. Soc. Rev.* **50** 11032
- [134] Li S F, Pam M E, Li Y S, Chen L, Chien Y C, Fong X Y, Chi D Z, Ang K W **2021** *Adv. Mater.* **34** 2103376
- [135] Kim K S, Seo S, Kwon J, Lee D, Kim C, Ryu J E, Kim J, Suh J M, Jung H G, Jo Y, Shin J C, Song M K, Feng J, Ahn H, Lee S, Cho K, Jeon J, Seol M, Park J H, Kim S W, Kim J **2024** *Nature* **636** 615
- [136] Hu Z Y, Li H T, Zhang M D, Jin Z M, Li J X, Fu W K, Dai Y Y, Huang Y, Liu X, Wang Y L **2025** *Nano Res.* **18** 94907225
- [137] Goossens S, Navickaite G, Monasterio C, Gupta S, Piqueras J J, Perez R, Burwell G, Nikitskiy I, Lasanta T, Galan T, Puma E, Centeno A, Pesquera A, Zurutuza A, Konstantatos G, Koppens F **2017** *Nat. Photon.* **11** 366
- [138] Tong L, Wan J, Xiao K, Liu J, Ma J Y, Guo X J, Zhou L H, Chen X Y, Xia Y, Dai S, Xu Z H, Bao W Z, Zhou P **2023** *Nat. Electron.* **6** 37
- [139] Zhu K C, Pazos S, Aguirre F, Shen Y Q, Yuan Y, Zheng W W, Alharbi O, Villena M A, Fang B, Li X Y, Milozzi A, Farronato M, Munoz-Rojo M, Wang T, Li R, Fariborzi H, Roldan J B, Benstetter G, Zhang X X, Alshareef H N, Grasser T, Wu H Q, Ielmini D, Lanza M **2023** *Nature* **618** 57
- [140] Zhu J D, Park J H, Vitale S A, Ge W J, Jung G S, Wang J T, Mohamed M, Zhang T Y, Ashok M, Xue M T, Zheng X D, Wang Z E, Hansryd J, Chandrakasan A P, Kong J, Palacios T **2023** *Nat. Nanotechnol.* **18** 456
- [141] Katiyar A K, Choi J, Ahn J H **2025** *Nano Conver.* **12** 11
- [142] Kong L G, Zhang X D, Tao Q Y, Zhang M L, Dang W Q, Li Z W, Feng L P, Liao L, Duan X F, Liu Y **2020** *Nat. Commun.* **11** 1866
- [143] Guo Y M, Li J X, Zhan X P, Wang C W, Li M, Zhang B, Wang Z R, Liu Y Y, Yang K N, Wang H, Li W Y, Gu P F, Luo Z P, Liu Y J, Liu P T, Chen B, Watanabe K, Taniguchi T, Chen X Q, Qin C B, Chen J Z, Sun D M, Zhang J, Wang R S, Liu J P, Ye Y, Li X Y, Hou Y L, Zhou W, Wang H W, Han Z **2024** *Nature* **630** 346
- [144] Tang H N, Wang Y T, Ni X Q, Watanabe K, Taniguchi T, Jarillo-Herrero P, Fan S H, Mazur E, Yacoby A, Cao Y **2024** *Nature* **632** 1038
- [145] Sharma S, Faizee M, De Sarkar A **2025** *Nanotechnology* **36** 242001
- [146] Miao S J, Liu T L, Du Y J, Zhou X Y, Gao J N, Xie Y C, Shen F Y, Liu Y H, Cho Y **2022** *Nanomaterials* **12** 2100
- [147] Wachter S, Polyushkin D K, Bethge O, Mueller T **2017** *Nat. Commun.* **8** 14948
- [148] Chen X Y, Xie Y F, Sheng Y C, Tang H W, Wang Z M, Wang Y, Wang Y, Liao F Y, Ma J Y, Guo X J, Tong L, Liu H Q, Liu H, Wu T X, Cao J X, Bu S T, Shen H, Bai F Y, Huang D M, Deng J N, Riaud A, Xu Z H, Wu C J, Xing S W, Lu Y, Ma S L, Sun Z Z, Xue Z Y, Di Z F, Gong X, Zhang D W, Zhou P, Wan J, Bao W Z **2021** *Nat. Commun.* **12** 5953
- [149] Ao M R, Zhou X C, Kong X J, Gou S F, Chen S F, Dong X Q, Zhu Y X, Sun Q C, Zhang Z J, Zhang J S, Zhang Q R, Hu Y, Sheng C M, Wang K X, Wang S Y, Wan J, Han J, Bao W Z, Zhou P **2025** *Nature* **640** 654
- [150] Zhang W H, Ma S C, Ji X L, Liu X, Cong Y Q, Shi L P **2024** *Nat. Electron.* **7** 954
- [151] Yang Z Y, Zhang Z, Huo S D, Meng F Y, Wang Y, Ma Y X, Liu B Y, Meng F Y, Xie Y, Wu E X **2025** *SmartMat* **6** e70005
- [152] Zhai Y B, Xie P, Hu J H, Chen X, Feng Z H, Lv Z Y, Ding G L, Zhou K, Zhou Y, Han S T **2023** *Appl. Phys. Rev.* **10** 11408
- [153] Jain S, Li S F, Zheng H F, Li L Q, Fong X Y, Ang K W **2025** *Nat. Commun.* **16** 2719
- [154] Kang J, Shin H, Kim K S, Song M, Lee D, Meng Y, Choi C, Suh J M, Kim B J, Kim H, Hoang A T, Park B, Zhou G Y, Sundaram S, Vuong P, Shin J, Choe J, Xu Z, Younas R, Kim J S, Han S, Lee S, Kim S O, Kang B, Seo S, Ahn H, Seo S, Reidy K, Park E, Mun S, Park M, Lee S, Kim H, Kum H S, Lin P, Hinkle C, Ougazzaden A, Ahn J, Kim J, Bae S **2023** *Nat. Mater.* **22** 1470
- [155] Jin T Y, Gao J, Wang Y N, Chen W **2022** *Sci. China Mater.* **65** 2154
- [156] Shinde S M, Das T, Hoang A T, Sharma B K, Chen X, Ahn J H **2018** *Adv. Funct. Mater.* **28** 1706231
- [157] Tang J, Wang Q Q, Tian J P, Li X Z, Li N, Peng Y L, Li X Z, Zhao Y C, He C L, Wu S Y, Li J W, Guo Y T, Huang B Y, Chu Y B, Ji Y R, Shang D S, Du L J, Yang R, Yang W, Bai X D, Shi D X, Zhang G Y **2023** *Nat. Commun.* **14** 3633
- [158] Peng Y L, Cui C Y, Li L, Wang Y C, Wang Q Q, Tian J P, Huang Z H, Huang B Y, Zhang Y K, Li X Z, Tang J, Chu Y B, Yang W, Shi D X, Du L J, Li N, Zhang G Y **2024** *Nat. Commun.* **15** 10833
- [159] Chen J L, Wang W G, Yan X D **2025** *npj Unconve. Comput.* **2** 19
- [160] Steeneken P G, Soikkeli M, Arpiainen S, Rantala A, Jaaniso R, Pezone R, Vollebregt S, Lukas S, Kataria S, Houmes M J A, Álvarez-Diduk R, Lee K, Suryo Wasisto H, Anzinger S, Fueldner M, Verbiest G J, Aljani F, Hoon Shin D, Malic E, van Rijn R, Nevanen T K, Centeno A, Zurutuza A, van der Zant H S J, Merkoçi A, Duesberg G S, Lemme M C **2025** *2D Mater.* **12** 023002
- [161] Meng Y, Feng J G, Han S, Xu Z H, Mao W B, Zhang T, Kim J S, Roh I, Zhao Y P, Kim D, Yang Y, Lee J, Yang L, Qiu C, Bae S **2023** *Nat. Rev. Mater.* **8** 498
- [162] Zhang D H, Xu Z, Huang Z Y, Gutierrez A R, Blocker C J, Liu C H, Lien M, Cheng G, Liu Z, Chun I Y, Fessler J A, Zhong Z H, Norris T B **2021** *Nat. Commun.* **12** 2413
- [163] Chen M L, Ma Y C, Aslam N, Liu C, Chen Y Q, Luo L Q, Zhang X W, Mai K R, Xiao H, Zhu K C, Alharbi O, Zheng D X, Xu X M, Liao H G, Yang Y M, Wang H, Zhou Z C, Wang H W, Tian B, Li J Z, He X, Chang K, Wan Y T, Shamim A, Alshareef H N, Lanza M, Anthopoulos T D, Han Z, Xue F, Zhang X X **2025** *Nat. Nanotechnol.* **20** 1633
- [164] Dang B J, Zhang T, Wu X L, Liu K Q, Huang R, Yang Y C **2024** *Nat. Electron.* **7** 991
- [165] Mennel L, Symonowicz J, Wachter S, Polyushkin D K, Molina-Mendoza A J, Mueller T **2020** *Nature* **579** 62
- [166] Huang P Y, Jiang B Y, Chen H J, Xu J Y, Wang K, Zhu C Y, Hu X Y, Li D, Zhen L, Zhou F C, Qin J K, Xu C Y **2023** *Nat. Commun.* **14** 6736
- [167] Ma S L, Wu T X, Chen X Y, Wang Y, Ma J Y, Chen H L, Riaud A, Wan J, Xu Z H, Chen L, Ren J Y, Zhang D W, Zhou P, Chai Y, Bao W Z **2022** *Sci. Adv.* **8** 9328
- [168] Zhao G Y, Wei Z, Wang W W, Feng D H, Xu A X, Liu W L, Song Z T **2020** *Nanotechnol. Rev.* **9** 182

- [169] Akbulut M, Scholar E A 2018 *IEEE Nanotechnol. Mag.* **12** 19
- [170] Song H F, Liu J M, Liu B, Wu J Q, Cheng H M, Kang F Y 2018 *Joule* **2** 442
- [171] Wu F, Tian H, Shen Y, Zhu Z Q, Liu Y M, Hirtz T, Wu R, Gou G Y, Qiao Y C, Yang Y, Xing C Y, Zhang G, Ren T L 2022 *Adv. Mater. Interfaces* **9** 2200409
- [172] Woon W Y, Kasperovich A, Wen J R, Hu K K, Malakoutian M, Jhang J H, Vaziri S, Datye I, Shih C C, Hsu J F, Bao X Y, Wu Y, Nomura M, Chowdhury S, Liao S S 2025 *Nat. Rev. Electr. Eng.* **2** 598
- [173] Kumari M, Singh N K, Sahoo M, Rahaman H 2022 *Silicon* **14** 4473
- [174] Rizzi L, Zienert A, Schuster J, Köhne M, Schulz S E 2019 *Comp. Mater. Sci.* **161** 364
- [175] Guo C H, Xu J Q, Ping Y 2021 *J. Phys. Condens. Matter.* **33** 234001
- [176] Yu W, Cheng S C, Li Z Y, Liu L, Zhang Z F, Zhao Y P, Guo Y Z, Liu S 2024 *Fundament. Res.* **4** 1442
- [177] Chen S X, Zhang H Y, Ling Z C, Zhai J W, Yu B 2025 *ASPAC'25: 30th Asia and South Pacific Design Automation Conference* Tokyo, Japan, January 20–23, 2025 p285
- [178] Das Sharma D, Pasdast G, Tiagaraj S, Aygün K 2024 *Nat. Electron.* **7** 244
- [179] Gupta S, Zhang J J, Lei J C, Yu H, Liu M J, Zou X L, Yakobson B I 2025 *Chem. Rev.* **125** 786
- [180] Wang S X, Yu S X, Chen W T, Wang Y, Bi A T, An Z Y, Diao Y, Li W, Wang Y C 2025 *Appl. Therm. Eng.* **279** 127699
- [181] Sheng C M, Dong X Q, Zhu Y X, Wang X Y, Chen X Y, Xia Y, Xu Z H, Zhou P, Wan J, Bao W Z 2023 *Adv. Funct. Mater.* **33** 2304778

SPECIAL TOPIC—2D materials and future information devices

Integration and applications of two-dimensional materials

YANG Gaochen MA Chenlong XU Langlang SHI Wenhao HUANG Xinyu
 SUN Mingjun BI Ming HE Xiao MENG Xiaohan LYU Shengjie
 LIN Weijia HE Min TONG Lei[†] YE Lei[‡]

(School of Integrated Circuits, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

(Received 13 October 2025; revised manuscript received 14 November 2025)

Abstract

As Moore's Law encounters limitations in scaling device physical dimensions and reducing computational power consumption, traditional silicon-based integrated circuit (IC) technologies, which have enjoyed half a century of success, are facing unprecedented challenges. These limitations are especially apparent in emerging fields such as artificial intelligence, big data processing, and high-performance computing, where the demand for computational power and energy efficiency is growing. Therefore, the exploration of novel materials and hardware architectures is crucial to address these challenges. Two-dimensional (2D) materials have become ideal candidates for the next-generation electronic devices and integrated circuits (ICs) due to their unique physical properties such as the absence of dangling bonds, high carrier mobility, tunable band gaps, and high photonic responses. Notably, 2D materials such as graphene, transition metal dichalcogenides (TMDs), and hexagonal boron nitride (h-BN) have demonstrated immense potential in electronics, optoelectronics, and flexible sensing applications.

This paper comprehensively reviews the recent advancements in the application of 2D materials in integrated circuits, analyzing the challenges and solutions related to large-scale integration, device design, functional circuit modules, and three-dimensional integration. Through a detailed examination of the basic properties of 2D materials, their constituent functional devices, and multifunctional integrated circuits, this paper presents a series of innovative ideas and methods, demonstrating the promising application prospects of

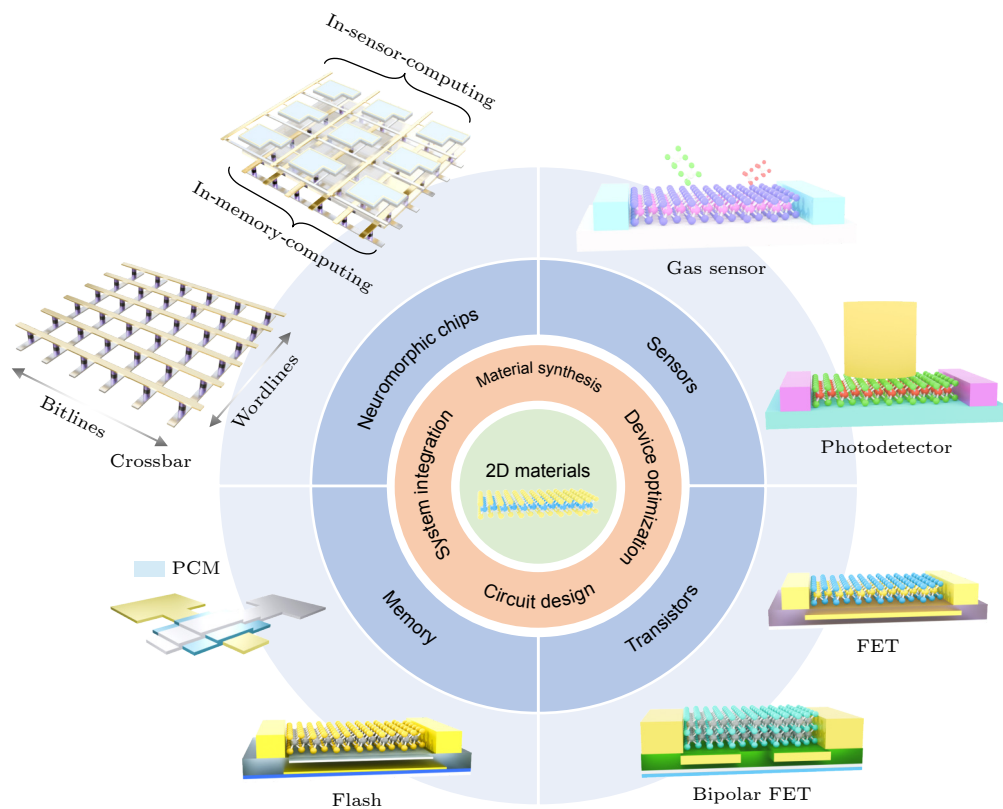
[†] Corresponding author. E-mail: leitong@hust.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: leiye@hust.edu.cn

2D materials in future ICs.

The research method involves a detailed analysis of the physical properties of common 2D materials such as graphene, TMDs, and h-BN, with typical application cases explored. This paper discusses how to utilize the excellent properties of these materials to fabricate high-performance single-function devices, integrated circuit modules, and 3D integrated chips, especially focusing on solving the challenges related to large-scale growth, device integration, and interface engineering of 2D materials. The comparison of the performance and applications between various materials demonstrates the unique advantages of 2D materials in the semiconductor industry and their potential in IC design.

Although 2D materials perform well in laboratory environments, there are still significant challenges in practical applications, especially in large-scale production, device integration, and three-dimensional integration. Achieving high-quality, large-area growth of 2D materials, reducing interface defects, and improving device stability and reliability are still core issues that need to be addressed in research and industry. However, with the continuous advancements in 2D material fabrication technology and optimization of integration processes, these challenges are gradually being overcome, and the application prospects of 2D materials are expanding.



Keywords: two-dimensional materials, basic functional devices, logic circuits, large-scale integration

DOI: [10.7498/aps.75.20251386](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251386)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251386](https://cstr.net.cn/urn:cn:32037.14.aps.75.20251386)



基于二维材料的集成与应用

杨高琛 马辰龙 徐浪浪 史文昊 黄鑫宇 孙铭君 毕铭 何啸 孟潇涵 吕晟杰 林维佳 贺敏 童磊 叶镭

Integration and applications of two-dimensional materials

YANG Gaochen MA Chenlong XU Langlang SHI Wenhao HUANG Xinyu SUN Mingjun BI Ming
HE Xiao MENG Xiaohan LYU Shengjie LIN Weijia HE Min TONG Lei YE Lei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 010810 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251386

CSTR: 32037.14.aps.75.20251386

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251386>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

集成二维材料非线性光学特性研究进展

Research progress of nonlinear optical properties of integrated two-dimensional materials

物理学报. 2023, 72(17): 174202 <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230729>

基于二维材料光电器件的传感器内计算与应用进展

Progress in in-sensor computing and applications based on photodetectors of two-dimensional materials

物理学报. 2025, 74(22): 228501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251093>

二维材料与人工视觉系统的多维融合: 前沿突破与范式革新

Multidimensional heterogeneous integration of two-dimensional materials and artificial visual systems: Frontier innovations and paradigm-shifting advancements

物理学报. 2025, 74(17): 178502 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250703>

基于拓扑/二维量子材料的自旋电子器件

Spintronic devices based on topological and two-dimensional materials

物理学报. 2024, 73(1): 017505 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20231166>

二维材料在生物传感器中的应用

Applications of two-dimensional materials in bio-sensors

物理学报. 2021, 70(6): 064701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201613>

二维材料宽谱光电探测器研究进展

Research progress of broadband photodetectors based on two-dimensional materials

物理学报. 2025, 74(22): 228503 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20251115>