

基于局部纳米点调控的类突触非晶态 $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2$ 忆阻器*

朱媛媛 张云飞 王鑫 张苗 王红军†

(陕西科技大学物理与信息科学学院, 西安 710021)

(2025年9月7日收到; 2025年12月4日收到修改稿)

忆阻器作为新一代非易失性存储器, 可应用于神经形态计算等新型计算范式. TiO_2 材料因其高介电常数与热稳定性被广泛应用于忆阻器的功能层, 然而 TiO_2 基忆阻器仍存在稳定性较差及模拟性能欠优等瓶颈. 本文引入非晶态的二维材料 MoS_2 (a- MoS_2) 与非晶态 TiO_2 (a- TiO_2) 构建了异质结结构, 获得了超 200 次循环、高数据保持时间 ($>10^4$ s) 的模拟忆阻器. 此外, $\text{W/a-MoS}_2/\text{a-TiO}_2/\text{Pt}$ 器件可通过控制扫描电压实现多级电导调制功能, 通过导电机理拟合分析构建了一种基于局部纳米点诱导的导电细丝形成及断裂的物理开关模型, 分析了器件实现多级电导调制的物理机制. 最后, 在 $\text{W/a-MoS}_2/\text{a-TiO}_2/\text{Pt}$ 器件上实现了长时程增强与抑制功能. 本文设计构建了 $\text{W/a-MoS}_2/\text{a-TiO}_2/\text{Pt}$ 异质结结构, 为过渡金属氧化物基忆阻器性能改进与应用提供了有效方案.

关键词: 忆阻器, 异质结结构, 非晶态 MoS_2 , 神经形态计算**DOI:** 10.7498/aps.75.20251224**CSTR:** 32037.14.aps.75.20251224

1 引言

随着大数据、人工智能等领域的不断发展, 传统的冯·诺依曼架构下数据处理速度及效率无法满足当前科研生产对海量数据实时处理的需求^[1]. 忆阻器具有存算一体、低功耗、高速响应、长时间数据保持能力等性能, 打破了传统冯·诺依曼架构下存算分离、功耗高等难题, 被誉为最具有应用潜力的下一代非易失存储器之一^[2-7]. 忆阻器根据其忆阻性能可分为数字型忆阻器与模拟型忆阻器^[8,9], 其中, 模拟型忆阻器因其电导可连续调制的性能, 已被成功应用于类脑计算、神经网络等领域, 是神经形态计算领域的理想器件之一^[10].

目前, 科研人员对于忆阻器介质层的材料研究主要集中于: 二维材料^[11]、过渡金属氧化物^[12]、有

机高分子材料^[13]、钙钛矿材料^[14,15]. 其中, 过渡金属氧化物具有高介电常数、氧空位浓度可调控、稳定性好等优点, 得到研究人员们的广泛应用与讨论. TiO_2 材料因其高介电常数、热稳定性好等因素, 成为高性能忆阻器的理想介质层材料之一. Yin 等^[16] 构建了 $\text{TiO}_2/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ 结构的光电忆阻器, 有效地模拟了生物突触功能及巴甫洛夫条件反射实验. Zou 等^[17] 提出了一种 $\text{ZrO}_2/\text{TiO}_2$ 结构的非细丝机制的忆阻器, 模拟了高线性度的长时程增强与抑制 (LTP/LTD) 等生物突触性能. 以上报道都基于 TiO_2 材料构建异质结结构实现了模拟型忆阻行为, 然而, TiO_2 基器件中仍存在过冲电流所导致的模拟性能较差以及数据保持能力较差等问题, 对 TiO_2 基器件性能提升与应用产生阻碍^[18].

本文引入非晶 MoS_2 (a- MoS_2) 与非晶 TiO_2 (a- TiO_2) 构建异质结结构, 利用硫空位吸附 Ti 离

* 陕西省自然科学基金 (批准号: 2025JC-YBMS-001) 和国家自然科学基金 (批准号: 11905119) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wanghongjun@sust.edu.cn

子形成局部导电纳米点, 诱导调控导电细丝的形成与断裂, 获得了具有长时间数据保持能力且电导连续可调的模拟型忆阻性能. 通过设计不同电压扫描与脉冲方案, 成功模拟了包括多级电导调制、长时程增强与抑制等生物突触功能^[19].

2 实验方案

本实验全程采用磁控溅射法制备 W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 忆阻器, 具体方案如下.

1) 选取已制备好的 8 mm×8 mm 的 Pt 底电极, 依次使用丙酮、酒精、去离子水在超声清洗仪中清洗 60 s.

2) 采用直流磁控溅射法在 Pt 底电极上沉积 a-TiO₂ 薄膜层. 抽真空至 8×10^{-4} Pa, 加热样品盘至 100 °C, 起辉压强 4 Pa, 工作压强 0.5 Pa, 溅射功率 150 W, 预溅射 10 min 去除靶材表面被氧化的污染物, 正式溅射 20 min, 氩气流量为 15 mL/min (标准状况下), 氧气流量为 10 mL/min (标准状况下).

3) 随后, 采用射频磁控溅射法以相同步骤在样品表面沉积 a-MoS₂ 层, 加热样品盘至 150 °C, 起辉压强 6 Pa, 工作压强 0.5 Pa, 溅射功率 50 W, 预溅射 10 min, 正式溅射 3 min, 氩气流量为 30 mL/min (标准状况下).

4) 采用直流磁控溅射在 a-MoS₂ 表面沉积 W 顶电极, W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 忆阻器件制备完成.

测试与表征: 样品测试采用与探针台相连的 K2601B 型半导体参数分析仪进行电学性能的测试; 使用扫描电子显微镜 (SEM, FEI Quanta 200F) 对其表面及截面进行扫描, 得到薄膜表面形貌及厚度; 使用 X 射线衍射 (XRD, Bruker D8 Advanced) 分析其晶相结构; 使用 X 射线光电子能谱 (XPS, ESCALAB 250Xi) 确认其化学成分及价态.

3 结果与讨论

W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 器件结构如图 1(a) 所示, 器件整体呈现类三明治结构. 图 1(b) 和图 1(c) 分别展示了器件截面以及表面的 SEM 图像, 本次制备的 TiO₂ 层的厚度约为 330 nm, MoS₂ 层厚度约 41 nm, MoS₂ 表面平整均匀, 未观察到有序的晶体结构. 图 1(d) 展示了 a-MoS₂ 与 a-TiO₂ 的 XRD

测试结果, 本次制备的 MoS₂ 与 TiO₂ 均为非晶态, 其中 MoS₂ 测试结果中 2θ 值为 32.9° 出现的峰为衬底材料 SiO₂ 的 (212) 峰.

图 1(e)–(h) 分别为 a-TiO₂ 薄膜与 a-MoS₂ 薄膜的 XPS 能谱图, 分析其元素组成及价态分布情况. 图 1(e) 为 a-TiO₂ 薄膜中 Ti 2p 的 XPS 谱图及分峰拟合结果. Ti 2p 光谱在结合能为 458.03 eV 与 463.68 eV 处分别出现两个不同的峰, 分别对应 Ti 2p_{3/2} 轨道与 Ti 2p_{1/2} 轨道^[20]. 此外, 在结合能 470.59 eV 处可观察到卫星峰. a-TiO₂ 薄膜的 O 1s XPS 谱图及分峰拟合结果如图 1(f) 所示, 在结合能 529.27 eV 与 530.60 eV 处各出现一个峰, 其中 529.27 eV 处的较高的峰对应 Ti—O 键中的晶格氧, 而 530.60 eV 处较低的峰则源自氧空位^[21]. 此外, 峰的面积比与氧的相对浓度直接相关, 经分析, O 1s 光谱表明晶格氧约占氧含量的 57.87%, 而氧空位约占氧含量的 42.13%. 图 1(g) 为经分峰拟合处理后 a-MoS₂ 薄膜中 Mo 3d 的 XPS 谱图, 在结合能为 229.79, 232.84, 232.92 及 235.97 eV 处出现多个高度不同的峰. 经分析, 在 229.79 与 232.92 eV 处的峰可归因于 Mo 3d_{5/2} 轨道与 Mo 3d_{3/2} 轨道, 而 232.84 eV 与 235.97 eV 处的两个峰则来自 Mo⁶⁺ 3d_{5/2} 与 Mo⁶⁺ 3d_{3/2}, 其中 Mo⁶⁺ 可能来源于 MoS₂ 层中少量被污染形成的 MoO₃^[22,23]. a-MoS₂ 薄膜 S 2p 的 XPS 谱图及分峰拟合结果如图 1(h) 所示, S 2p_{3/2} 轨道与 S 2p_{1/2} 轨道的峰分别出现在结合能 161.98 eV 与 163.13 eV 处^[24]. 图 1(i) 为 a-MoS₂ 薄膜中 O 1s 的 XPS 谱图, O 1s 光谱表明晶格氧约占氧含量的 90.62%, 而氧空位约占氧含量的 9.38%, 证明 MoS₂ 层中存在少量 MoO₃, 可能是制备过程中污染所导致.

W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 器件电学性能测试结果如图 2 所示. 图 2(a) 展示了器件 200 次电压扫描下的 I - V 曲线, 正向限制电流为 10 mA. 在施加 0—2 V 的正向电压扫描时, 器件电流值逐渐上升, 当电压值达到 1 V 左右, 器件电流值突然上升, 器件完成设置 (Set) 过程进入低阻态 (LRS). 反之, 当施加 0 到 -2 V 的反向电压扫描时, 器件电流值随电压升高逐渐升高, 在 -1 V 左右, 器件电流值不再上升, 器件完成复位 (Reset) 过程并进入高阻态 (HRS). 器件 Set 电压的分布情况如图 2(b) 所示. 器件 Set 电压集中在 0.5—1.5 V, 器件 Set 电压平均值约为 0.922 V.

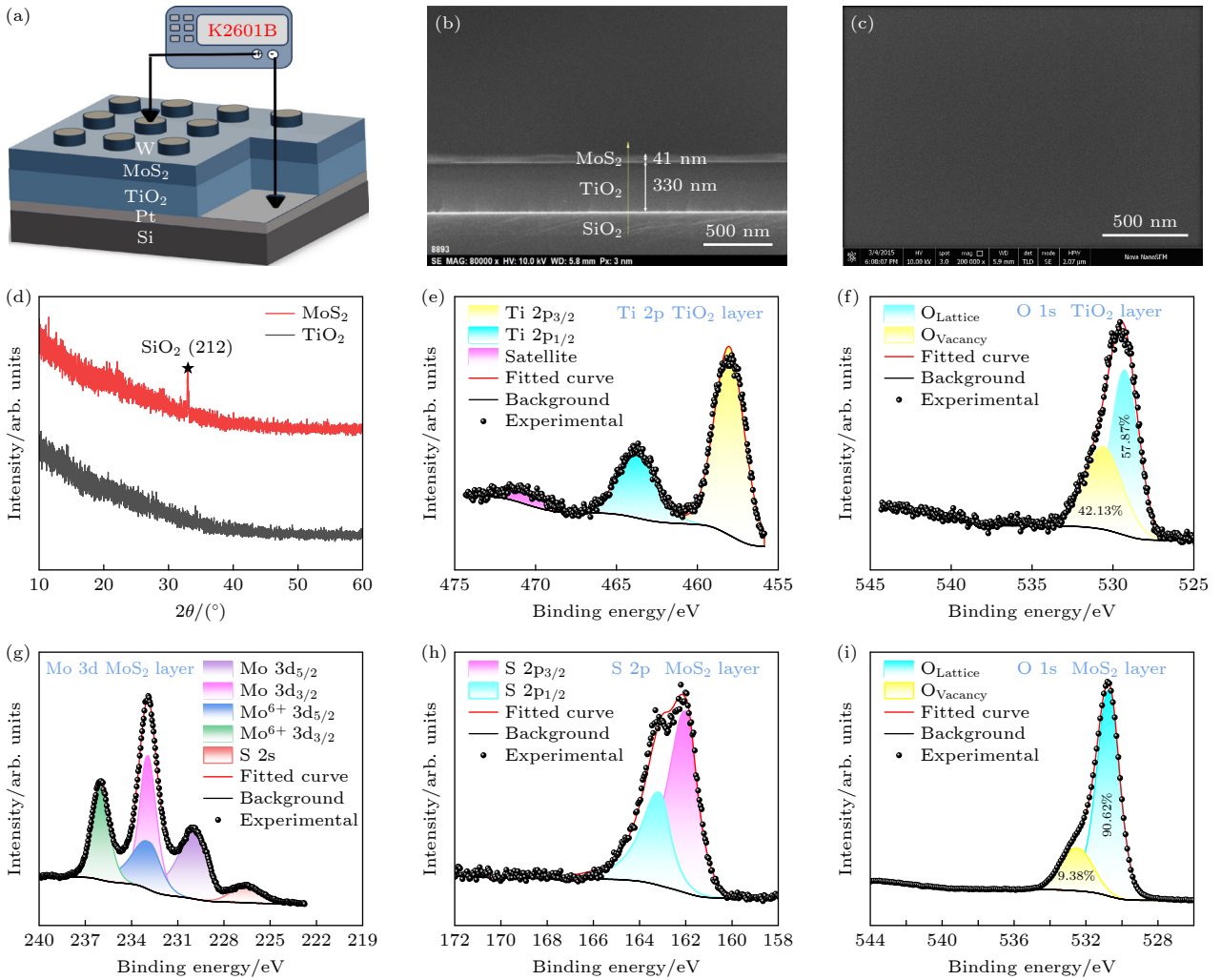


图 1 W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 器件结构示意图与表征测试结果 (a) W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 器件结构示意图; (b), (c) W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 器件截面及表面 SEM 扫描结果; (d) a-MoS₂ 和 a-TiO₂ 薄膜的 XRD 图谱; (e), (f) a-TiO₂ 薄膜中 Ti 2p 和 O 1s 的核心能级谱图; (g)–(i) a-MoS₂ 薄膜中 Mo 3d, S 2p 和 O 1s 的核心能级谱图

Fig. 1. Schematic diagram and characterization test results of the W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt device structure: (a) Schematic diagram of the W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt device structure; (b), (c) cross-sectional and surface SEM scan results of the W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt device; (d) XRD patterns of a-MoS₂ and a-TiO₂ thin films; (e), (f) core-level spectra of Ti 2p and O 1s in the a-TiO₂ thin films; (g)–(i) core-level spectra of Mo 3d, S 2p, and O 1s in the a-MoS₂ thin films.

忆阻器的循环耐受性能与数据保持能力直接影响着数据存储与读取的准确程度. 我们设置了 200 组 +1.5 V/−1.5 V、宽度 20 ms 的方波脉冲进行循环耐受性测试, 测试结果如图 2(c) 所示. 在 0.1 V 读取电压检测下, 器件 LRS 电流值集中分布于 8.15×10^{-4} — 4.9×10^{-4} A, 平均 LRS 电流值约为 6.31×10^{-4} A, 而 HRS 电流值分布于 2.1×10^{-4} — 3.8×10^{-5} A, 平均值约为 1.22×10^{-4} A. 图 2(d) 展示了器件在 10000 s 内 HRS 和 LRS 电流值变化情况. 结果表明, 器件在断电状态下 HRS 与 LRS 电流值均无明显变化, 具备优异的数据保持能力. 图 2(e), (f) 分别展示了器件 Set/Reset 过程的响应时间性能, 在正向脉冲刺激下, 器件仅需 104 μ s 即

可实现从 HRS 到 LRS 的切换行为; 而在反向脉冲作用下, 器件从 LRS 到 HRS 的响应时间更是缩短为 82 μ s.

为探究 a-MoS₂ 层的插入对器件性能的影响, 本文以相同方法分别制备了 W/a-TiO₂/Pt, W/a-TiO₂/a-MoS₂(1 min)/Pt 以及 W/a-TiO₂/a-MoS₂(6 min)/Pt 器件并进行了电学测试, 结果如图 3 所示. 图 3(a) 展示了 4 个不插入 a-MoS₂ 层的 W/a-TiO₂/Pt 器件的 *I-V* 扫描结果, 器件电流值在正向扫描 0.8 V 左右发生明显的突变并进入 LRS, 但在反向扫描过程中, 4 个器件均未能恢复到 HRS, 继续加大反向截止电压后也获得相似结果. 图 3(b) 为 W/a-TiO₂/a-MoS₂(1 min)/Pt 器件 *I-V* 测试结果,

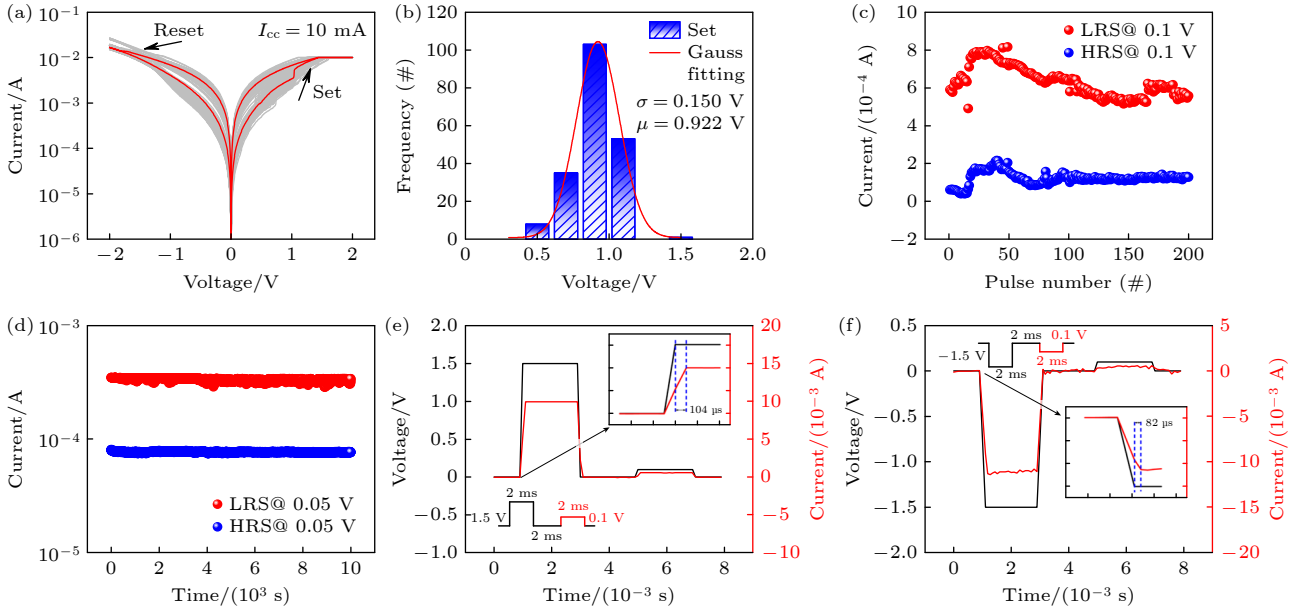


图 2 W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 器件电学性能 (a) 200 次电压扫描下的 I - V 曲线; (b) 200 次电压扫描中 Set 电压分布; (c) 200 次脉冲测试下器件循环耐受性; (d) Set/Reset 过程后器件 10000 s 内保持特性; (e), (f) 分别为 Set 过程和 Reset 过程响应时间测试

Fig. 2. Electrical performance of the W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt device: (a) I - V curves under 200 voltage sweeps; (b) distribution of Set voltages during the 200 voltage sweeps; (c) cycling endurance of the device under 200 pulse tests; (d) retention characteristics of the device for 10000 s after Set/Reset operations; (e), (f) response time tests for the Set process and Reset process, respectively.

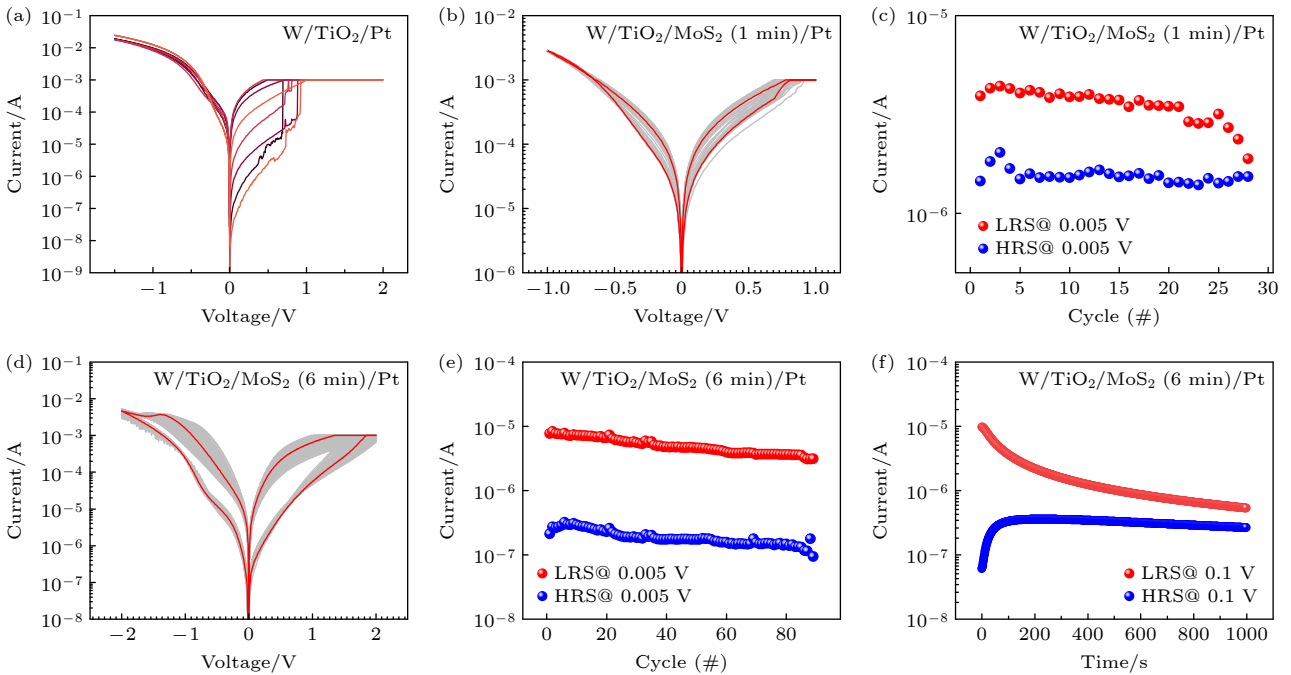


图 3 不插入 a-MoS₂ 层及不同厚度 a-MoS₂ 器件性能对比 (a) W/a-TiO₂/Pt 器件 I - V 扫描结果; W/a-TiO₂/a-MoS₂(1 min)/Pt 器件 (b) I - V 扫描结果及 (c) 循环耐受性测试结果; W/a-TiO₂/a-MoS₂(6 min)/Pt 器件 (d) I - V 扫描结果、(e) 维持时间测试及 (f) 循环耐受性测试结果

Fig. 3. Comparison of device performance without inserting an a-MoS₂ layer and with different thicknesses of a-MoS₂: (a) I - V sweep results of the W/a-TiO₂/Pt device; (b) I - V sweep results and (c) cycling endurance test results of the W/a-TiO₂/a-MoS₂ (1 min)/Pt device; (d) I - V sweep results, (e) retention time test, and (f) cycling endurance test results of the W/a-TiO₂/a-MoS₂ (6 min)/Pt device.

其 $I-V$ 曲线与 $W/a-TiO_2/a-MoS_2(3\text{ min})/Pt$ 器件测试结果相似,不同的是,在第 25 次扫描时,器件窗口值开始逐渐减小,在第 28 次循环时器件失效,无明显阻变行为,取 HRS 和 LRS 下电流值进行统计后结果如图 3(c) 所示. $W/a-TiO_2/a-MoS_2(6\text{ min})/Pt$ 器件 $I-V$ 扫描结果如图 3(d) 所示,与 $W/a-TiO_2/a-MoS_2(3\text{ min})/Pt$ 器件相比,该器件具备更大的开关比(约 30)以及优异的模拟性能,在正向扫描与反向扫描过程中均未发生明显突变.取正向扫描及反向扫描下降过程 0.005 V 电压下的电流值进行处理得图 3(e),在 90 次循环过程中器件 LRS 下电流值约为 4.7×10^{-6} A, HRS 下电流值约为 1.7×10^{-7} A,随着扫描次数的增加 HRS 与 LRS 下电流值虽然均有所下降,但开关比无明显变化.进一步对 $W/a-TiO_2/a-MoS_2(6\text{ min})/Pt$ 器件数据保持能力进行测试,结果如图 3(f) 所示.在 1000 s 内器件 LRS 下电流值由 9.7×10^{-6} A 持续下降至 5.3×10^{-7} A,而在 HRS 下电流值在前 100 s 内迅速由 6.1×10^{-7} A 上升至 3.1×10^{-7} A,在后续 900 s 内趋于稳定,器件整体呈现易失性,与 $W/a-TiO_2/a-MoS_2(3\text{ min})/Pt$ 器件相比数据保持能力较差.因此,选取 $W/a-TiO_2/a-MoS_2(3\text{ min})/Pt$ 器件(后文简化为 $W/a-TiO_2/a-MoS_2/Pt$)进行后续测试.

为进一步展示 $W/a-MoS_2/a-TiO_2/Pt$ 器件在其他 TiO_2 基器件中的性能优势,我们收集整理了近年来已报道的 TiO_2 基异质结器件性能参数,并与 $W/a-MoS_2/a-TiO_2/Pt$ 器件性能进行了对比,结果如表 1 所列^[16,17].综合性能评估表明, $W/a-MoS_2/a-TiO_2/Pt$ 器件具有较低的截止电压,表现出较低的功耗,这在器件的应用中占据着极大的优势.此外, $W/a-MoS_2/a-TiO_2/Pt$ 器件还具备至少 200 次以上循环耐受性能以及 10000 s 以上的数据保持能力,在众多 TiO_2 基异质结器件中也具备较

大优势^[25-27].在开关比方面,虽然 $W/a-MoS_2/a-TiO_2/Pt$ 器件开关比较小,但是与其余器件相比, $W/a-MoS_2/a-TiO_2/Pt$ 器件 $I-V$ 曲线更加规整,初步显示出器件在多级电导调控及模拟生物突触方面巨大的应用潜力.

图 4(a) 为不同限制电流条件下 $W/a-MoS_2/a-TiO_2/Pt$ 器件的 $I-V$ 扫描结果,在 3, 5 及 10 mA 限制电流条件下,器件 0.05 V 处电流值分别达到 10.3, 18.5 与 20.1 μA .因此,在扫描电压不变的情况下,随着限制电流的增大,器件整体电导状态也有所提升.同样地,各限制电流条件对应的 Reset 过程也表现出相似的结果.此外,在 10 mA 限制电流下,器件表现出微弱的自限流特性,因此,在取消限制电流后对器件进行了 $I-V$ 扫描,结果如图 4(b) 所示.在取消正向限制电流后,器件在正向扫描 1.8 V 左右时出现自限流现象,同时,在反向扫描过程中,2 V 的截止电压已不足以支撑器件完成 Reset 过程,器件反向截止电压由 2 V 增大至 2.5 V.

$W/a-MoS_2/a-TiO_2/Pt$ 器件的自限流特性有效地避免了器件在无限流条件下高压区容易发生击穿的问题,这为通过控制截止电压来调控器件电导的方案提供了有力保障.如图 4(c) 所示,通过连续施加截止电压为 1.1—2.1 V 的 6 次正向电压扫描后,器件 6 个电阻状态下的电流值逐级上升,实现了电导连续、渐进增强.同样地,在连续施加 -1.8—2.1 V 的 5 组反向扫描后,器件实现了电导的连续减弱,结果如图 4(d) 所示.为更直观地了解器件在不同截止电压调控下电流的变化,分别取正向、反向电压扫描下降过程中 0.05 V 处电流值进行统计,处理后得图 4(e) 和图 4(f).在正向偏置下,器件 6 个电阻状态下的电流值由 16.2 μA 上升至 34.8 μA ,经过拟合,器件电流值上升趋势具有较高线性度,而在反向偏置下,器件电流值由 30.5 μA

表 1 $W/a-MoS_2/a-TiO_2/Pt$ 忆阻器与其他 TiO_2 基器件电学性能的对比

Table 1. Comparison of electrical performance between $W/a-MoS_2/a-TiO_2/Pt$ memristor and other TiO_2 -based devices.

RRAM structure	V_{stop}	Endurance	Retention time	ON/OFF ratio	Ref.
TiN/ TiO_2 / WO_x /Pt	3 V/-5 V	100	~2000	>50	[25]
Au/ TiO_2 / $Bi_4Ti_3O_{12}$ /ITO	3 V/-3 V	—	>300	~ 10^5	[16]
Al/ ZrO_2 / TiO_2 /Al	4 V/-4 V	> 10^5	—	~ 10^2	[17]
Au/ TiO_2 / Bi_2TiO_4 /LNO/Au	5 V/-5 V	60	> 10^2	>10	[26]
TiN/LiPON/ TiO_x /TiN	2 V/-2 V	—	~ 10^3	> 10^4	[27]
$W/a-MoS_2/a-TiO_2/Pt$	1.5 V/-1.5 V	>200	> 10^4	~10	本文

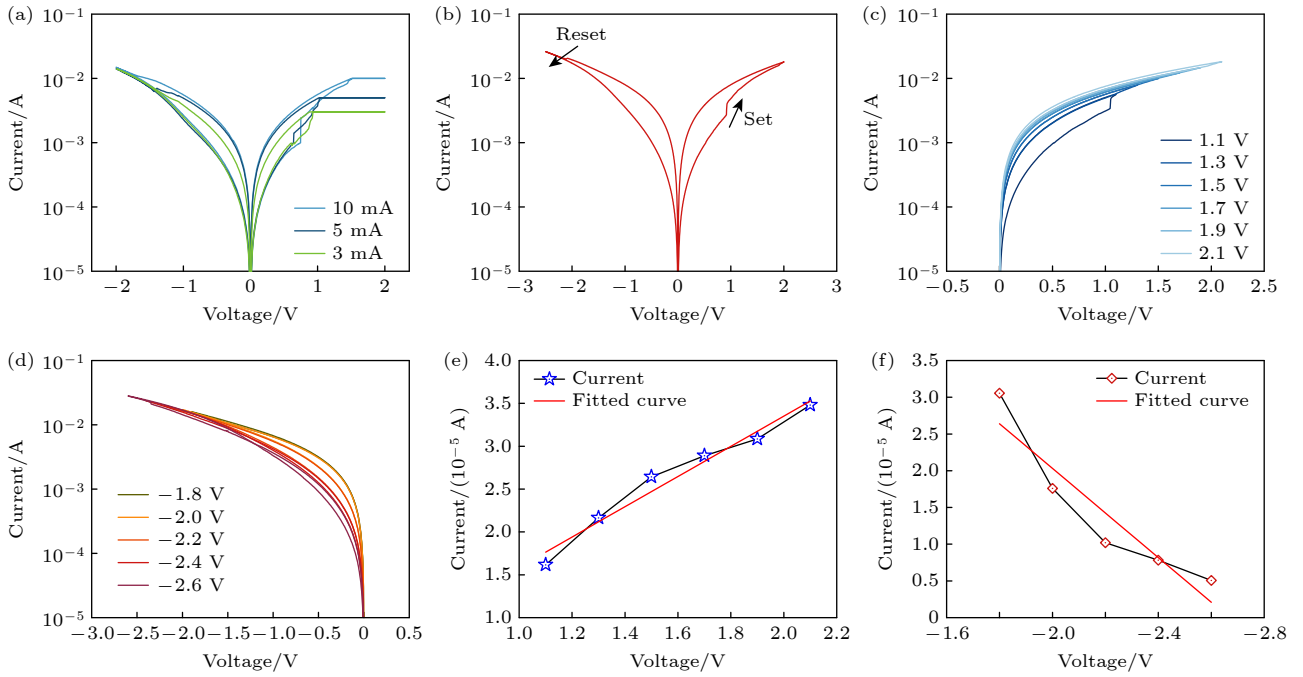


图4 W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 器件的自限流效应及多级电导调制性能 (a) 不同限制电流下器件的多级电导调制能力; (b) 无外部限流条件下器件的自限流效应; (c), (d) 分别控制 Set 和 Reset 截止电压实现器件电导调制; (e), (f) 不同截止电压下器件电流连续增强和连续减弱程度及拟合结果

Fig. 4. Self-current-limiting effect and multi-level conductance modulation performance of the W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt device: (a) Multi-level conductance modulation capability under different compliance currents; (b) self-current-limiting effect without external current compliance; (c), (d) conductance modulation controlled by Set and Reset stop voltages, respectively; (e), (f) current levels under different stop voltages showing continuous enhancement and attenuation characteristics with fitting results.

下降至 5.1 μA , 实现了器件电流值的连续减弱. 这种双向的连续调节电导值的能力类似于生物突触的增强与抑制功能, 也证明了该器件是用于突触仿生及神经形态计算等领域的优质候选者.

为进一步探究 W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 器件的导电机理, 我们对反向、正向 $I-V$ 扫描数据进行 log-log 刻度处理, 红色部分为各阶段线性拟合结果, 处理后结果见图 5. 图 5(a) 展示了器件反向扫描过程中导电机理拟合结果, 整个过程可分为 3 个阶段, 其中 LRS 低压区的阶段 I (0—1.5 V) 斜率约为 1.03, 符合 $\ln(I) \propto \ln(V)$ 的线性关系, 遵循欧姆导电机理. 在 HRS 高压区下阶段 II (-1.5—-0.17 V) 遵循肖特基发射机制. 对于肖特基势垒的形成过程, 我们参考了 Sun 等^[28] 所报道的物理模型. 该模型表明在电场作用下 a-TiO₂ 层中的 Ti 离子向 a-MoS₂ 表面迁移时, Ti 离子会向 a-MoS₂ 层表面进行扩散并寻找硫空位进行填充并吸附, 在此过程中 Ti 离子需足够高的电场与温度来克服 a-MoS₂ 表面的扩散势垒, 然后才能被硫空位所吸附, 这也解释了器件在 HRS 高电压区表现为肖特基发射机

制而非欧姆导电机理这一问题. 随着扫描电压的进一步下降, 器件进入 LRS 低压区的阶段 III(-0.17—0 V), 在该阶段中, 由于电压值过小, 阻变层内部电子处于跃迁状态, 器件导电行为更接近一个纯电阻, 因此器件导电机理仍以欧姆导电机理为主导. 值得注意的是, 在同一阶段可能存在多种导电机理共同作用的情况, 本部分拟合并分析了在该阶段下占据主导地位的传输机制.

图 5(b) 展示了器件正向扫描过程中的导电机理拟合结果, 其中阶段 IV (0—0.14 V) 斜率约为 1.05, 器件电压-电流比值呈线性, 器件以欧姆导电机理为主导. 随着扫描电压的增加, 器件进入阶段 V (0.14—0.88 V), 在此阶段中, 器件导电机理以肖特基发射机制为主导, 在正向电场作用下, Ti 离子会在电场作用下表现出脱离硫空位吸附的趋势, 但由于较大的吸附能, Ti 离子并不能脱离出硫空位, 因此在阶段 V 与 VI (1.5—0.9 V) 中, 器件持续表现出肖特基发射机制为主导的电子传输机制; 而在 LRS 低压区的阶段 VII (0.9—0 V) 中, 器件恢复类金属传导的欧姆导电机理主导.

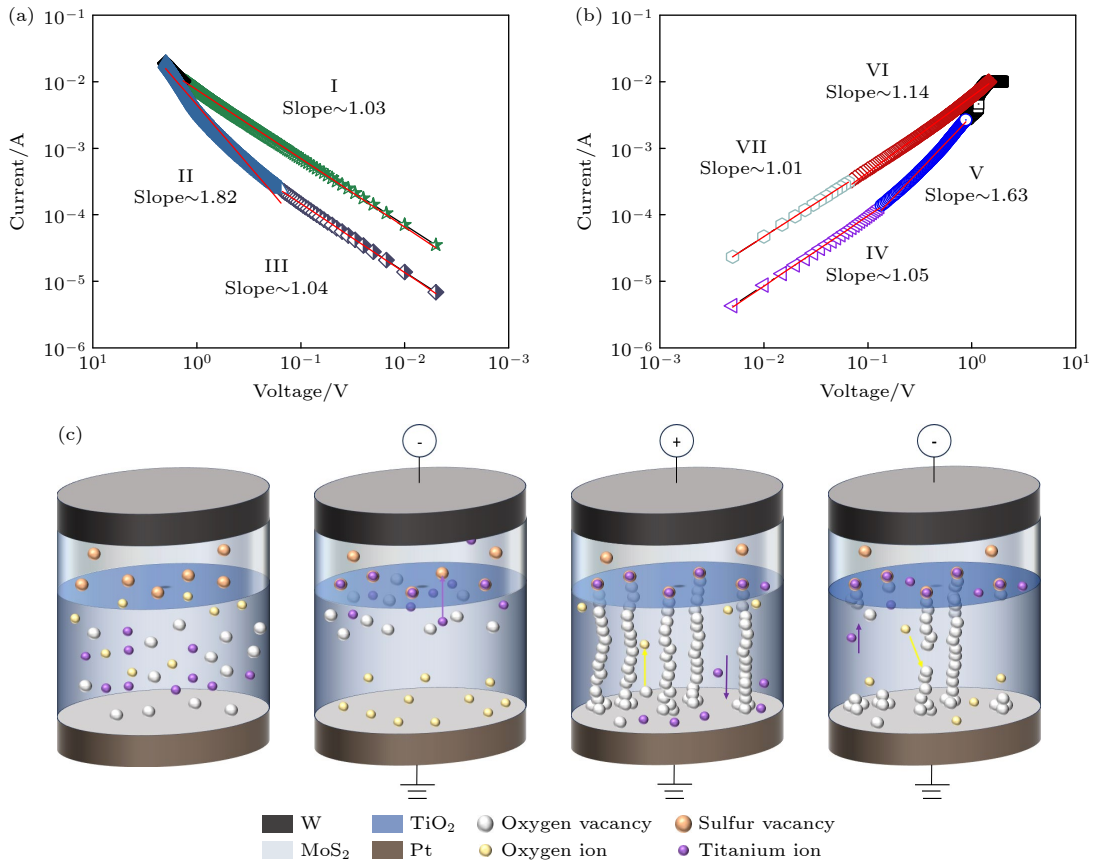


图 5 W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 导电机理分析及物理开关模型 (a) 反向导电机理拟合; (b) 正向导电机理拟合; (c) 物理开关模型
 Fig. 5. Conduction mechanism analysis and physical switching model of W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt: (a) Fitting of reverse conduction mechanism; (b) fitting of forward conduction mechanism; (c) physical switching model.

结合以上导电机理的拟合, 我们建立了 W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 器件的物理开关模型, 如图 5(c) 所示. 当对器件施加反向电压时, Ti 离子在电场作用下向 a-MoS₂ 界面处迁移, 并在电场作用下突破 MoS₂ 界面的扩散势垒, 被 MoS₂ 表面处的硫空位所吸附. 一旦 Ti 离子被硫空位吸附, 该点位处的导电性会得到极大的提升, 这有效地起到了局部导电纳米点的作用^[28]. 当施加正向电压时, TiO₂ 层中氧离子在电场作用下向 a-MoS₂/a-TiO₂ 界面处迁移, 并留下氧空位在底电极处堆叠形成氧空位导电细丝^[29,30]. 由于 MoS₂ 界面处存在多个硫空位吸附的 Ti 离子, 较大的吸附能使得 Ti 离子在电场作用下依旧无法脱离硫空位的吸附, 而氧空位导电细丝会优先连接这些局部导电纳米点, 从而形成多条较细的氧空位导电细丝, 使得器件由 HRS 转向 LRS. 当再次施加反向电压时, 氧离子向底电极处迁移并在途中与氧空位结合, 氧空位导电细丝依次发生断裂, 这也是器件具备优异模拟性能的原因, 当全部导电细丝全部断裂, 器件由 LRS 恢复至 HRS. 因

此, 在图 3(a) 所示的 W/a-TiO₂/Pt 器件中, 在正向电场作用下 a-TiO₂ 层中氧空位在底电极堆叠并可能形成较为粗壮的导电细丝, 导致在反向电场作用下氧空位导电细丝无法完全断裂, 致使器件无法回到 HRS. 在引入 a-MoS₂ 层后, 器件 a-MoS₂ 层中硫空位吸附 Ti 离子形成局部导电纳米点, 并调控氧空位形成多条较细的导电细丝, 使得器件在反向电场作用下更容易恢复至 HRS, 这极大地改善了 TiO₂ 基器件的模拟忆阻性能, 也为过渡金属氧化物基忆阻器的模拟性能优化提供了有效方案.

人类大脑依靠突触中突触前神经元与突触后神经元间的信号传递可完成独立思考、学习与遗忘等复杂的生理活动, 这与忆阻器顶电极与底电极间电子传递有着极高的相似性^[31]. 如图 6(a) 所示, 顶电极 W 对应于生物突触中的突触前膜, 底电极 Pt 则对应于突触后膜, 介质层中离子的迁移与电子的流动则模拟了突触间隙中的信息传递, 随着电刺激的施加, 器件电导值发生增强与减弱, 成功模拟了生物突触中突触权重的变化. 图 6(b) 展示了

W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 器件在 50 个 +1 V、脉宽 50 ms 及脉冲间隔 20 ms 的方波脉冲组合下电流值的变化情况. 经过 50 个正向方波脉冲的刺激, 器件电流值由 3.7 mA 逐渐上升至 4.4 mA, 实现了电流的连续增长, 这一测试模拟了生物突触的连续增强功能. 同样, 在施加 -1 V 的相同方波脉冲组合后, 器件电流值由 -4.5 mA 下降至 -3.5 mA, 成功地模拟了生物突触连续抑制功能, 如图 6(c) 所示. 图 6(d) 展示了器件在方波脉冲方案下的 LTP/LTD 性能, 在 100 组方波脉冲 (± 1 V, 50 ms) 的

刺激下, 器件电导值发生连续增强与抑制, 通过控制施加脉冲的数量可调控器件达到相应的电导值. 为进一步描述器件 LTP/LTD 的线性程度, 对其进行归一化处理与非线性拟合后得到图 6(e), 拟合结果显示器件 LTP 与 LTD 的非线性参数分别为 6.76 与 -5.05. 通过设计不同的脉冲方案可实现 W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 器件电导值的连续调制, 并以此模拟了生物突触的连续增强与抑制、LTP/LTD 等功能, 这预示着忆阻器在神经形态计算等人工智能领域有着极高的应用潜力 [32].

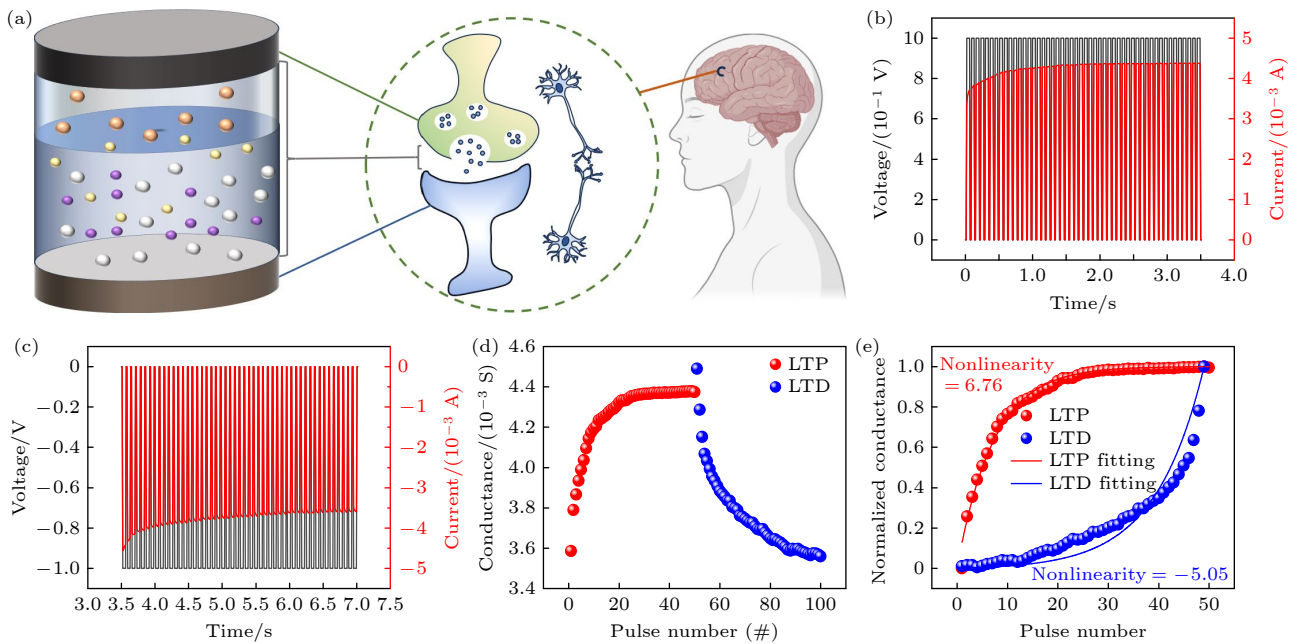


图 6 忆阻器突触仿生与神经形态计算 (a) 模拟生物突触连接的 W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 忆阻器; (b), (c) 器件在方波脉冲方案下模拟连续增强和连续抑制等突触性能; (d) 方波脉冲下器件实现 LTP/LTD 功能; (e) 突触权重变化及非线性拟合结果

Fig. 6. Bio-synaptic emulation and neuromorphic computing based on memristors: (a) W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt memristor simulating biological synaptic connections; (b), (c) device emulation of continuous potentiation and depression synaptic properties under square wave pulse schemes; (d) implementation of LTP/LTD functions in the device under square wave pulses; (e) synaptic weight changes and nonlinear fitting results.

4 总 结

本文设计并构建了 W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt 异质结构忆阻器, 通过引入局部导电纳米点诱导调控导电细丝的形成, 提高器件稳定性与模拟性能. 经过测试, 器件可实现 200 次以上的循环, 超长的数据保持能力 ($>10^4$ s), 微秒级别的开关响应以及优异的模拟忆阻性能等基础器件性能. 依靠以上器件特性, 我们通过控制 $I-V$ 扫描的截止电压实现了器件电导的连续多级调制, 验证了器件模拟生物突触的潜力. 此外, 我们设计了多种脉冲方案, 通过

控制脉冲数量实现了器件电导值的连续增强与减弱, 成功模拟了生物突触的 LTP 和 LTD 性能. 本文工作通过构建非晶异质结结构, 提高了 TiO₂ 基器件的模拟性能与稳定性, 为过渡金属氧化物基忆阻器性能改进与应用提供了有效方案.

参考文献

- [1] Shan X Y, Wang Z Q, Xie J, Zheng J H, Xu H Y, Liu Y C 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 148701 (in Chinese) [单旋宇, 王中强, 谢君, 郑嘉慧, 徐海阳, 刘益春 2022 *物理学报* **71** 148701]
- [2] Guo T, Pan K Q, Jiao Y X, Sun B, Du C, Mills J P, Chen Z L, Zhao X Y, Wei L, Zhou Y N, Wu Y A 2022 *Nanoscale*

Horiz. **7** 299

- [3] Gu Y N, Liang Y, Wang G Y, Xia C Y 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 110501 (in Chinese) [古亚娜, 梁燕, 王光义, 夏晨阳 2022 物理学报 **71** 110501]
- [4] Messaris I, Ascoli A, Demirkol A S, Tetzlaff R 2023 *IEEE Trans. Circuits Syst. Regul. Pap.* **70** 566
- [5] Liu S X, Sun T, Li Y 2025 *Sci. Chin. Mater.* **68** 2582
- [6] Sun K X, Chen J S, Yan X B 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2006773
- [7] Zhou Z, Huang P, Kang J F 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 148507 (in Chinese) [周正, 黄鹏, 康晋锋 2022 物理学报 **71** 148507]
- [8] Zhu Y Y, Zhang Y F, Yang S N, Ma X Y, Lu H B, Liu Y B, Luo D B, Wang Y Q, Zhou J, Wang H J 2025 *Appl. Phys. Lett.* **126** 013507
- [9] Cao Z L, Sun B, Mao S S, Zhou G D, Duan X G, Yan W T, Sun S Y, Chen X L, Shao J Y 2023 *Mater. Today Phys.* **38** 101264
- [10] Abunahla H, Halawani Y, Alazzam A, Mohammad B 2020 *Sci. Rep.* **10** 9473
- [11] Zhou H B, Li S F, Ang K W, Zhang Y W 2024 *Nano-Micro Lett.* **16** 121
- [12] Shan F, Guo H B, Kim H S, Lee J Y, Sun H Z, Choi S G, Koh J H, Kim S J 2020 *Phys. Status Solidi A* **217** 1900967
- [13] Sun B, Ranjan S, Zhou G, Guo T, Xia Y, Wei L, Zhou Y N, Wu Y A 2021 *Mater. Today Adv.* **9** 100125
- [14] Zhu Y Y, Chen M Y, Lu H B, Mi P T, Luo D B, Wang Y Q, Liu Y, Xiong R, Wang H J 2024 *Appl. Phys. Lett.* **124** 063504
- [15] Guo Z C, Xiong R, Zhu Y Y, Wang Z Y, Zhou J, Liu Y, Luo D B, Wang Y Q, Wang H J 2023 *Appl. Phys. Lett.* **122** 053502
- [16] Yin S F, Sun Q J, Liu L F, Liu S Z, Jiang Y P, Tang X G 2025 *Appl. Surf. Sci.* **711** 164049
- [17] Zou Y L, Li X Y, Ghenzi N, Park T, Shin D H, Shin S J, Cho J M, Park T W, Cheong S, Mun S A, Hwang C S 2025 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **17** 47207
- [18] Kim S, Ji H, Park K, So H, Kim H, Kim S, Choi W Y 2024 *ACS Nano* **18** 25128
- [19] Wen X Y, Wang Y S, He Y H, Miao X S 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 140501 (in Chinese) [温新宇, 王亚赛, 何毓辉, 缪向水 2022 物理学报 **71** 140501]
- [20] Yu Z Q, Han X, Xu J M, Chen C, Qu X R, Liu B S, Sun Z J, Sun T Y 2023 *Sensors-Basel* **23** 3480
- [21] Zhu Y Y, Guo Z C, Chen M Y, Zhang P, Shao P, Luo D B, Wang Y Q, Liu Y, Xiong R, Wang H J 2023 *Appl. Phys. Lett.* **123** 083503
- [22] Lin Y H, Pan J Y, Zhuang X M, Guo Q K, Li Y 2025 *Nano Res.* **18** 94907660
- [23] Qin J J, Sun B, Mao S S, Zhou G D, Liu M N, Rao Z W, Lin W, Yang Y L, Zhao Y 2025 *Appl. Mater. Today* **44** 102696
- [24] Liu M R, Chen J B, Tian X H, Jia S J, Liang Y X, Zhang L Z, Ye T, Chen J T, Wang J, Zhao Y, Zhang X Q, Li Y 2025 *Mater. Today Commun.* **43** 111642
- [25] So H, Lee J, Mahata C, Kim S, Kim S 2024 *Adv. Mater. Technol.* **9** 2301390
- [26] Li D D, Tang X G, Zhong W M, Sun Q J, Yang D P, Jiang Y P, Liu Q X 2024 *ACS Sustainable Chem. Eng.* **12** 13361
- [27] Islam R, Shi Y, Silva G V O, Sachdev M, Miao G X 2024 *ACS Nano* **18** 22045
- [28] Sun D D, Zhu X D, Chen S C, Fang H T, Zhu G X, Lan G P, He L X, Shi Y Y 2024 *Nano Lett.* **24** 16283
- [29] Wang Y, Huang H X, Huang X L, Guo T T 2023 *Acta Phys. Sin.* **72** 197201 (in Chinese) [王英, 黄慧香, 黄香林, 郭婷婷 2023 物理学报 **72** 197201]
- [30] Wong H S P, Lee H Y, Yu S M, Chen Y S, Wu Y, Chen P S, Lee B, Chen F, Tsai M J 2012 *P IEEE* **100** 1951
- [31] Lee S U, Kim S Y, Lee J H, Baek J H, Lee J W, Jang H W, Park N G 2024 *Nano Lett.* **24** 4869
- [32] Chen L, Zhou W H, Li C D, Huang J J 2021 *Neurocomputing* **456** 126

High-stability amorphous-MoS₂/amorphous-TiO₂ heterojunction structure analog memristor for bio-synaptic emulation and neuromorphic computing^{*}

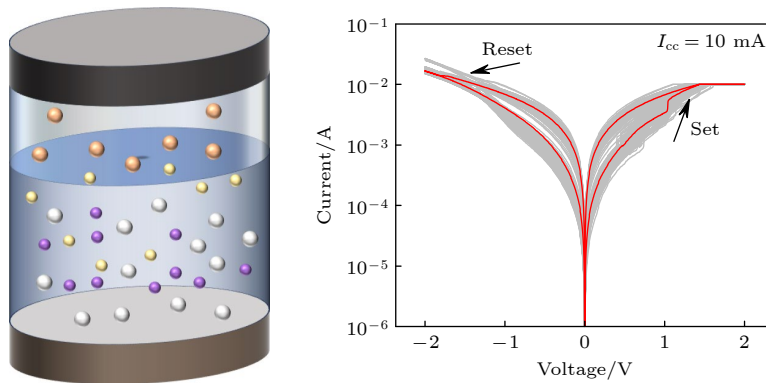
ZHU Yuanyuan ZHANG Yunfei WANG Xin ZHANG Miao
WANG Hongjun[†]

(School of Physics and Information Science, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

(Received 7 September 2025; revised manuscript received 4 December 2025)

Abstract

Memristors, as a new generation of non-volatile memory, can simulate biological synapses. Current research on memristor dielectric materials primarily focuses on transition of metal oxides, perovskites, and organic polymers. Among these, the transition metal oxide TiO₂ is widely used for the switching layer due to its high dielectric constant and excellent thermal stability. However, TiO₂-based memristors face challenges including poor stability and inadequate analog performance, which fundamentally limit their applicability in neuromorphic computing. In this study, a high-performance analog memristor is developed using an a-MoS₂/a-TiO₂ (amorphous MoS₂/amorphous TiO₂) heterostructure, achieving over 200 stable cycles and a long data retention time exceeding 10⁴ s. This device exhibits a lower threshold voltage, higher endurance, and excellent data retention compared with previously reported TiO₂-based heterostructure memristors. Furthermore, various voltage sweep schemes are designed to successfully modulate multi-level conductance in the W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt device. The resistive switching mechanism of the W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt device is elucidated by combining conductive mechanism fitting with a physical model that attributes the switching to the localized formation and rupture of conductive filaments. Finally, synaptic functions such as LTP and LTD are achieved in the device by using square-wave pulses. In this study, a W/a-MoS₂/a-TiO₂/Pt heterostructure is developed, which significantly enhances analog memristive performance and provides an effective strategy for improving transition metal oxide-based memristors.



Keywords: memristor, heterojunction structure, amorphous-MoS₂, neuromorphic computing

DOI: [10.7498/aps.75.20251224](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251224)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251224](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251224)

^{*} Project supported by the Natural Science Foundation of Shaanxi Province, China (Grant No. 2025JC-YBMS-001) and the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 11905119).

[†] Corresponding author. E-mail: wanghongjun@sust.edu.cn

基于局部纳米点调控的类突触非晶态 $\text{MoS}_2/\text{TiO}_2$ 忆阻器

朱媛媛 张云飞 王鑫 张苗 王红军

High-stability amorphous- MoS_2 /amorphous- TiO_2 heterojunction structure analog memristor for bio-synaptic emulation and neuromorphic computing

ZHU Yuanyuan ZHANG Yunfei WANG Xin ZHANG Miao WANG Hongjun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 040707 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251224
CSTR: 32037.14.aps.75.20251224

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251224>

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

忆阻类脑计算

Memristive brain-like computing

物理学报. 2022, 71(14): 140501 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220666>

面向类脑计算的低电压忆阻器研究进展

Recent progress of low-voltage memristor for neuromorphic computing

物理学报. 2024, 73(20): 207302 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20241022>

N型局部有源忆阻器的神经形态行为

Neuromorphic behaviors of N-type locally-active memristor

物理学报. 2022, 71(5): 050502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212017>

光电协控多层 MoS_2 记忆晶体管的阻变行为与机理研究

Resistive switching behavior and mechanism of multilayer MoS_2 memtransistor under control of back gate bias and light illumination

物理学报. 2021, 70(21): 217302 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210750>

基于3D-NAND的神经形态计算

3D-NAND flash memory based neuromorphic computing

物理学报. 2022, 71(21): 210702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220974>

仿生生物感官的感存算一体化系统

Bio-inspired sensory systems with integrated capabilities of sensing, data storage, and processing

物理学报. 2022, 71(14): 148702 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220281>