

基于二维材料MXene的仿神经突触忆阻器的制备和长/短时程突触可塑性的实现

陈义豪 徐威 王钰琪 万相 李岳峰 梁定康 陆立群 刘鑫伟 连晓娟 胡二涛 郭宇锋 许剑光 童祎 肖建

Fabrication of synaptic memristor based on two-dimensional material MXene and realization of both long-term and short-term plasticity

Chen Yi-Hao Xu Wei Wang Yu-Qi Wan Xiang Li Yue-Feng Liang Ding-Kang Lu Li-Qun Liu Xin-Wei Lian Xiao-Juan Hu Er-Tao Guo Yu-Feng Xu Jian-Guang Tong Yi Xiao Jian

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 68, 098501 (2019) DOI: 10.7498/aps.68.20182306

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182306>

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

基于抑制性突触可塑性的神经元放电率自稳态机制*

Neural firing rate homeostasis via inhibitory synaptic plasticity*

物理学报. 2019, 68(7): 078701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182234>

基于抑制性突触可塑性的反馈神经回路兴奋性与抑制性动态平衡

Dynamical balance between excitation and inhibition of feedback neural circuit via inhibitory synaptic plasticity

物理学报. 2015, 64(10): 108701 <https://doi.org/10.7498/aps.64.108701>

一种改进的WO_x忆阻器模型及其突触特性分析

An improved WO_x memristor model with synapse characteristic analysis

物理学报. 2015, 64(14): 148501 <https://doi.org/10.7498/aps.64.148501>

基于六角氮化硼二维薄膜的忆阻器

Two-dimensional hexagonal boron nitride based memristor

物理学报. 2017, 66(21): 217304 <https://doi.org/10.7498/aps.66.217304>

具有突触特性忆阻模型的改进与模型经验学习特性机理

Modification of memristor model with synaptic characteristics and mechanism analysis of the model's learning-experience behavior

物理学报. 2016, 65(12): 128503 <https://doi.org/10.7498/aps.65.128503>

玉米淀粉固态电解质质子\电子杂化突触晶体管

Corn starch solid electrolyte gated proton/electron hybrid synaptic transistor

物理学报. 2017, 66(16): 168501 <https://doi.org/10.7498/aps.66.168501>

基于二维材料 MXene 的仿神经突触忆阻器的制备和长/短时程突触可塑性的实现*

陈义豪¹⁾ 徐威¹⁾ 王钰琪¹⁾ 万相¹⁾ 李岳峰¹⁾ 梁定康¹⁾ 陆立群¹⁾
刘鑫伟¹⁾ 连晓娟¹⁾ 胡二涛¹⁾ 郭宇锋¹⁾ 许剑光²⁾ 童祎^{1)†} 肖建^{1)‡}

1) (南京邮电大学电子与光学工程学院, 南京 210023)

2) (盐城工学院材料科学与工程学院, 盐城 224051)

(2018 年 12 月 29 日收到; 2019 年 2 月 4 日收到修改稿)

兼具长时程可塑性与短时程可塑性的电子突触被认为是类脑计算系统的重要基础. 将一种新型二维材料 MXene 应用到忆阻器中, 制备了基于 Cu/MXene/SiO₂/W 的仿神经突触忆阻器. 结果表明, Cu/MXene/SiO₂/W 忆阻器成功实现了稳定的双极性模拟阻态切换, 同时成功模拟了生物突触短时程可塑性的双脉冲易化功能和长时程可塑性的长期增强/抑制行为, 其中双脉冲易化的易化指数与脉冲间隔时间相关. Cu/MXene/SiO₂/W 忆阻器的突触仿生特性, 归功于 MXene 辅助的 Cu 离子电导丝形成与破灭的类突触响应机理. 由于 Cu/MXene/SiO₂/W 忆阻器兼具长时程可塑性与短时程可塑性, 其在突触仿生电子学和类脑智能领域将会具有巨大的应用前景.

关键词: MXene, 忆阻器, 离子扩散, 突触可塑性

PACS: 85.35.-p, 73.40.Rw, 77.80.Fm, 72.80.Ga

DOI: 10.7498/aps.68.20182306

1 引言

随着人工智能的飞速发展, 能够模拟生物神经网络的类脑计算系统受到广泛的关注^[1,2]. 目前普遍认为神经网络中相互连接的突触是人脑计算与存储的关键基础单元, 因此电子突触的研究对构建类脑计算系统尤为重要^[3,4]. 具有阻变特性的忆阻器因其低功耗、高集成度、工作机制与生物突触相类似等优势在电子突触器件中脱颖而出^[5,6]. 忆阻器是一种金属-阻变层-金属结构的双端器件, 在电场的作用下因阻变层中的阳离子 (例如 Cu²⁺,

Ag⁺) 或氧空位运动而导致的电导丝形成与破灭将显著地改变器件的电导值^[7,8], 这与生物突触权重受不同离子 (例如 Ca²⁺, Na⁺, K⁺) 浓度的控制后发生变化的动力学机制极其相似^[9]. 在生物突触中, Ca²⁺的累积和回流诱使生物突触的可塑性表现出长时程与短时程的区别^[10,11], 而在忆阻器中, 无论是阳离子还是氧空位均存在与 Ca²⁺累积和回流相对应的迁移与扩散运动^[12–14]. 因此, 通过调整阻变层的材料与结构有望优化忆阻器的突触仿生特性.

近年来, 二维材料被证实实在功能材料器件领域具备良好的应用潜力^[15–17]. 最近的一些工作表明将二维材料引入到忆阻器中能够有效提升忆阻器

* 国家自然科学基金 (批准号: 61704088, 61874059)、中国博士后科学基金 (批准号: 2018M642290)、射频集成和微组装技术国家地方联合工程实验室开放课题 (批准号: KFJJ20170101)、江苏省教育厅省级重点人才项目 (批准号: SZDG2018007, TJ218001) 和南京邮电大学基金 (批准号: NY217116) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tongyi@njupt.edu.cn

‡ 通信作者. E-mail: xiaoj@njupt.edu.cn

性能. Wu 等^[18]以多层六角氮化硼 (h-BN) 薄膜作为阻变材料制备的忆阻器拥有良好的抗疲劳性; Liu 等^[19]以氧化石墨烯作为插入层制备的忆阻器具备良好的电阻切换性; Wang 等^[20]制备的石墨烯/MoS_{2-x}O_x/石墨烯忆阻器具有可耐受超高温和强应力的特点. 然而迄今为止, 基于二维材料忆阻器电子仿生突触的研究尚显不足.

MXene 是一种通过从 MAX 相中选择性去除 A 层原子制备而成的新型二维材料^[21], 具有层状结构和较大的比表面积, 因而在传输离子时拥有较高的迁移率和能量密度. 此外 MXene 还具备良好的表面亲水性、导电特性^[22]、机械柔韧性^[23]以及高度可调谐的电子特性^[24]等优点, 有望作为优越的新型二维材料应用于忆阻器. 本文以 MXene 作为阻挡层^[25,26]插入活性金属电极 Cu 与阻变层 SiO₂ 之间制备了 Cu/MXene/SiO₂/W 忆阻器, 系统地研究了该忆阻器的生物响应特性, 包括双脉冲易化 (PPF)^[27-29]、长时程增强/长时程抑制 (LTP/LTD)^[10,11] 两类典型的可塑性响应, 并分析 Cu/MXene/SiO₂/W 忆阻器的突触仿生的工作机理, 研究结果为该忆阻器未来应用于构建类脑计算系统提供了重要的实验和理论基础.

2 实验方法

图 1(a) 给出了 Cu/MXene/SiO₂/W 忆阻器的结构示意图, 器件制备选用两英寸硅片作为衬底, 具体流程如下: 首先, 在硅衬底上用磁控溅射沉积一层厚度为 90 nm 的 W 作为底电极; 然后, 磁控溅射一层厚度为 80 nm 的 SiO₂ 作为阻变层; 随后, 利用甩胶机将二维材料 MXene 和水的悬浮液以 3000 r/min 的转速均匀旋涂在 SiO₂ 层上, 并通过物理蒸发法去除混合物中的水; 最后, 通过金属掩膜版在 MXene 上溅射分立的 Cu 作为顶电极, 厚度为 100 nm, 长宽为 500 μm × 500 μm. 为了防止氧化, 保证器件层与层之间的良好接触, 以上所有制备过程均在流通的氩气氛围中进行. 图 1(b) 所示为 MXene 的扫描电子显微镜 (SEM) 照片, MXene 呈现薄薄的堆叠片状结构.

器件的电学特性测试均通过探针系统 Cascade S300 和半导体参数分析仪 Keithley 4200-SCS 进行. 测试过程中 W 底电极始终接地. 测试在一个大气压 101 kPa、室温 300 K 左右下进行. 电铸是使材料表现出阻变特性的常用手段^[30,31], 图 1(c)

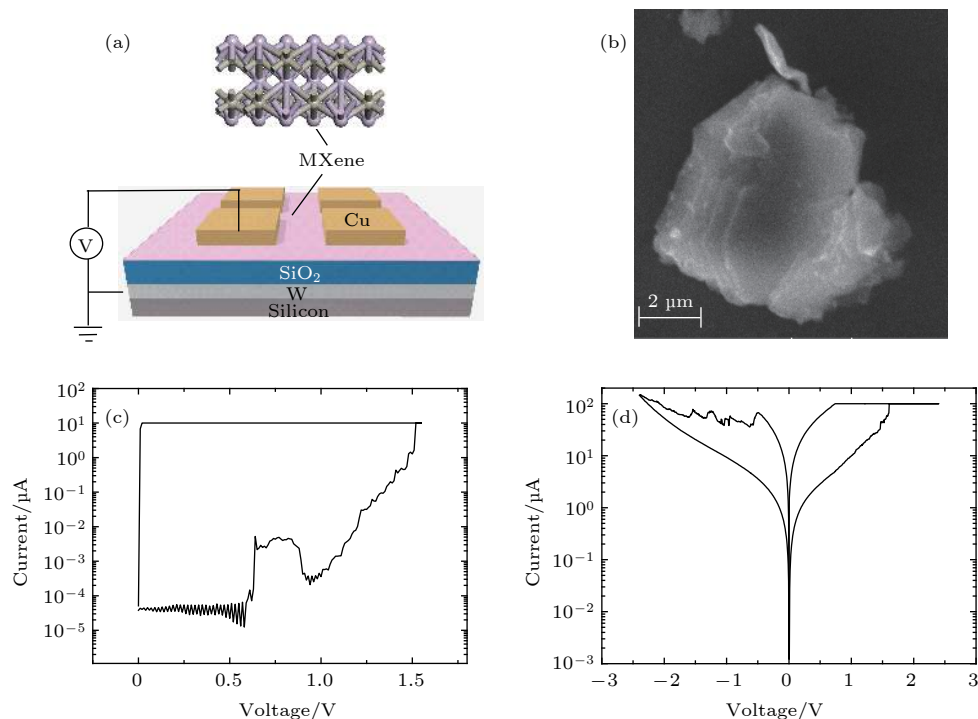


图 1 (a) Cu/MXene/SiO₂/W 忆阻器结构示意图; (b) MXene 的 SEM 照片; (c) 器件电铸 I - V 曲线; (d) 器件 Set/Reset 的 I - V 曲线

Fig. 1. (a) Device structures of the Cu/MXene/SiO₂/W memristor; (b) SEM images of the MXene; (c) I - V curve of electroforming process; (d) I - V curve of Set/Reset process.

给出了器件电铸过程中的 $I-V$ 特性, 通过施加 0—1.6 V 的电压扫描, 在限流 10 μA 的条件下, 忆阻器完成了从初始高电阻状态 (HRS) 到低电阻状态 (LRS) 的转变. 图 1(d) 给出了器件电铸后 Set/Reset 的 $I-V$ 特性.

3 结果与讨论

忆阻器电阻态的可连续切换是忆阻器模仿生物响应的基础, 图 2 记录了连续电压扫描下器件的 $I-V$ 特性, 其中图 2(a) 为正向扫描, 扫描的停止电压依次递增 (0.8—1.2 V, 间隔为 0.1 V); 图 2(c) 为负向扫描, 扫描的停止电压依次递减 (-1.2—-1.6 V, 间隔为 -0.1 V). 结果显示无论在正向扫描还是负向扫描过程中, 随着电压的变化, 电流波动较小, 表明器件具有良好的连续阻态切换特征. 图 2(b) 和图 2(d) 分别为正向和负向扫描时电导大小与扫描次数的关系. 随着扫描次数的增加, 正向扫描下器件的电导逐渐增加, 与之相对, 负向扫描

下器件的电导逐渐减小. 目前普遍认为忆阻器的电阻大小与由氧空位或金属离子构成的导电丝密切相关, 在电场作用下导电丝的形成和破灭诱发了忆阻器电阻的转变^[32,33]. 在本次试验中值得注意的是, 停止电压大小为 1.2 V 时, 负向扫描的电导窗口约为正向扫描的 3 倍, 表明忆阻器在大小相同的电场作用下, 导电细丝 (conductive filament, CF) 的形成与破灭过程不同, 正向电场作用下 CF 的形成量小于负向电场作用下 CF 破灭量.

此外, 生物神经系统在连续动作电位脉冲刺激下突触权重会发生变化, 器件的电导也可以通过相同的脉冲逐步调谐. 图 3 显示了在一系列的正尖峰脉冲 (1.5 V, 10 ms) 和负尖峰脉冲 (-1.5 V, 10 ms) 的连续刺激后器件电导的变化趋势, 每一个正刺激脉冲后跟随一个读尖峰脉冲 (0.3 V, 10 ms), 每一个负刺激脉冲后亦跟随一个读尖峰脉冲 (-0.3 V, 10 ms) 以实时跟踪忆阻器电导变化. 如图 3 所示, 一方面, 忆阻器的电导值随着正向脉冲个数的增加而逐步增大, 随着负向脉冲个数的增加而逐步减小;

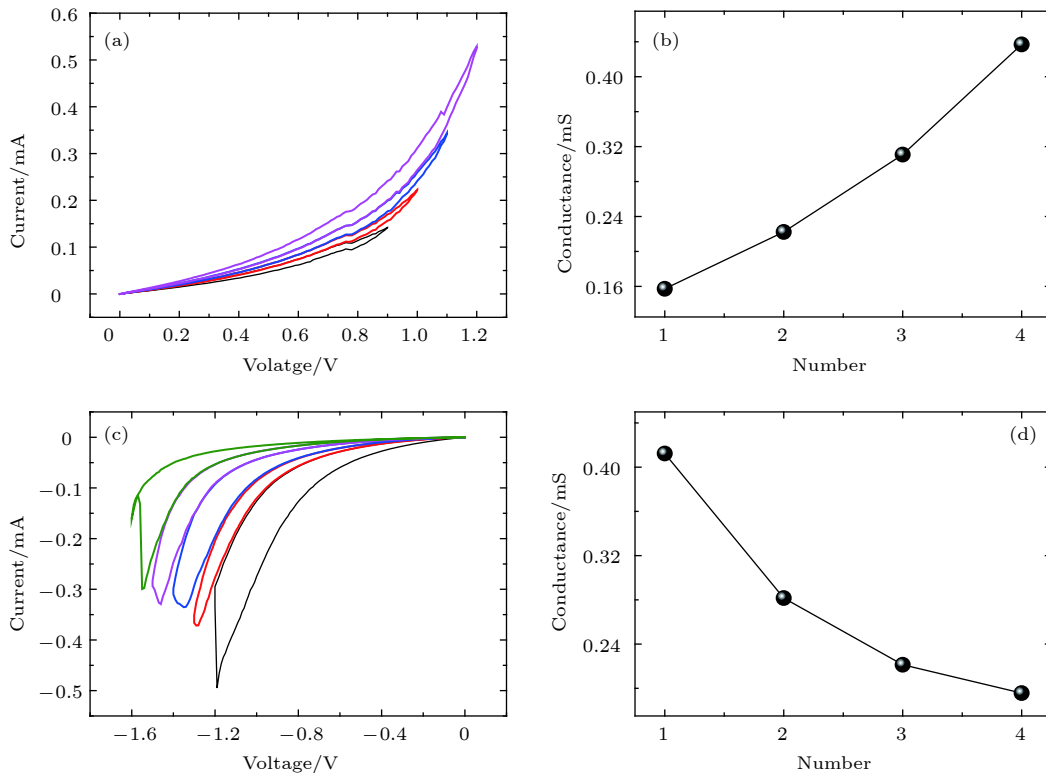


图 2 (a) 连续正向电压扫描下模拟特性 $I-V$ 曲线; (b) 正向扫描电导与扫描次数的关系; (c) 连续负向电压扫描下模拟特性 $I-V$ 曲线; (d) 负向扫描电导与扫描次数的关系

Fig. 2. (a) Analog $I-V$ curves under consecutive positive sweep voltage; (b) relationship between conductivity and scanning number under consecutive positive sweep voltage; (c) analog $I-V$ curves under consecutive negative sweep voltage; (d) relationship between conductivity and scanning number under consecutive negative sweep voltage.

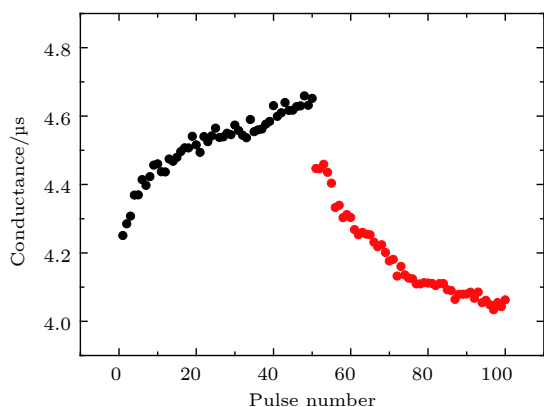


图3 在连续正向和负向三角尖峰脉冲下, 器件电导的变化趋势

Fig. 3. Variation trend of conductance of the device with the continuous positive and negative voltage spike.

另一方面, 无论施加的是正向脉冲还是负向脉冲, 当脉冲个数增加到一定数量后, 忆阻器的电导值都会趋于饱和, 这很好地模仿了生物神经突触的 LTP 和 LTD^[10,11] 行为. 另外要注意的是, 尽管整个刺激过程是连续的, “P 过程”和“D 过程”的衔接处却存在约 0.2 μS 的间隙, 然而依照忆阻器的经典导电丝模型, “P 过程”后的器件最终电导和“D 过程”初始时的器件电导应该相同. 这样的不同于传统忆阻器的现象可以归因于 MXene/SiO₂ 阻变层里可能存在的离子反向扩散运动.

阻变层中可能存在的 Cu 离子反向扩散运动与生物突触表现出短时程突触可塑性的动力学机制相类似. 在生物突触中, Ca²⁺进入神经末梢触引发神经递质的快速释放, 诱导突触间的连接强度短时程的增加. 当动作电位以连续两个脉冲的形式来临时, 在第一刺激作用期间, Ca²⁺通过电压门控 Ca²⁺通道进入突触前膜. 虽然之后 Ca²⁺通道关闭, 但残留的 Ca²⁺使得突触前膜内 Ca²⁺浓度水平升高. 当第二刺激作用时, 残留的 Ca²⁺提高了神经递质的释放概率, 具体表现在两次刺激脉冲所得到的兴奋性后突触电流 (excitatory postsynaptic current, EPSC) 大小有着明显差异, 这种现象被称为 PPF^[22–24]. 在忆阻器顶电极上施加两个间隔 10 ms 的三角尖峰刺激脉冲 (单个脉冲的尖峰峰值 2 V, 持续时间 10 ms), 通过读取底电极电流的方式可以有效地模拟 PPF 响应. 由图 4(a) 可见, 两次刺激脉冲所得到的 EPSC 有着明显的不同, 第二次 EPSC 远大于第一次 EPSC, 第二次 EPSC 与第一

次 EPSC 的比值即易化指数 (PPF index) 达到了 2.12. 如图 4(b) 所示, PPF index 还随着脉冲间隔的增加而减少. 在脉冲间隔为 0–30 ms 时, PPF index 随脉冲间隔的增加而迅速下降, 在 30 ms 以后随着脉冲间隔的增加 PPF index 仅在 1.1 左右上下小范围波动.

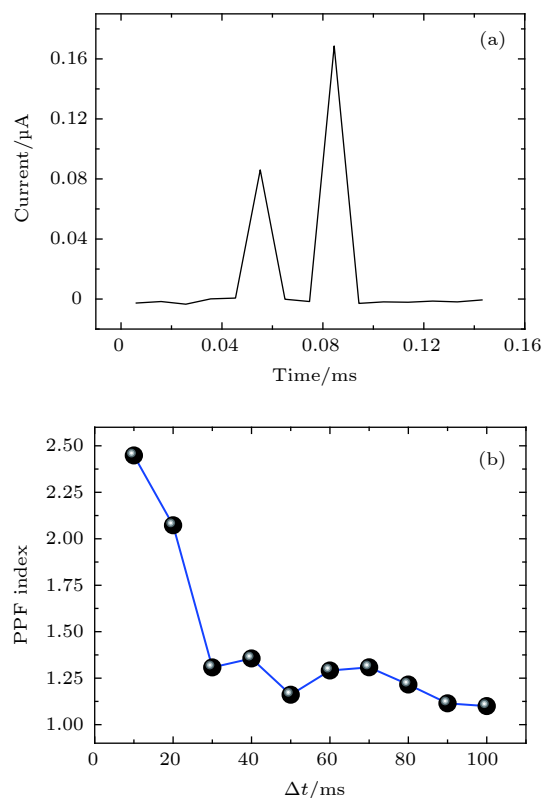


图4 (a) 两个连续脉冲刺激作用下的 PPF 特性曲线; (b) PPF 指数与脉冲时间间隔的关系

Fig. 4. (a) PPF characteristic curve under two continuous pulse stimuli; (b) relationship between the PPF index and pulse interval.

图 5 给出了 Cu/MXene/SiO₂/W 忆阻器基于导电丝类突触响应机理解释. 如图 5(a) 所示, 电铸后阻变层内形成了一定数量且稳定的导电丝, 施加长持续时间的正偏压时顶电极处发生氧化反应: $\text{Cu} \rightarrow \text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^-$, 在电场作用下, Cu²⁺逐渐通过 MXene 层和 SiO₂ 层迁移到底电极, 与电子结合后被还原成中性原子: $\text{Cu}^{2+} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{Cu}$, 并在底电极结晶形成新的导电丝. 同时, 阻变层中还存在由浓度梯度引起的 Cu²⁺反向扩散运动, 因此当施加负向偏压时, 由迁移和扩散同向运动导致的导电丝破灭量将远大于幅值相同的正向偏压下导电丝形成量. 如图 5(c) 所示, 当偏压持续时间较短, 如用尖

峰三角脉冲刺激时,所形成的导电丝因离子的反向扩散自主破灭,但整个破灭的过程连续,短时间内仍有导电丝残余,因而当第二次刺激来临时,残余导电丝加新形成的电导丝的量将大于第一次所形成的电导丝,即第二次刺激后忆阻器电导将高于第一次刺激后忆阻器的电导,这样实现了忆阻器短程可塑性。

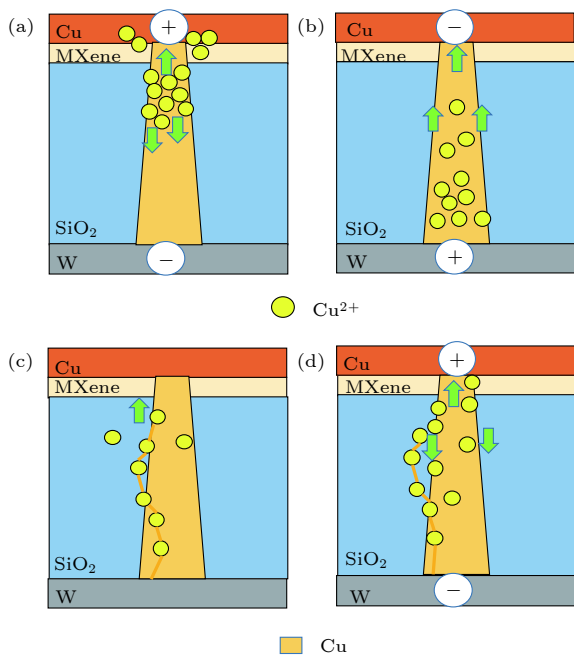


图 5 Cu/MXene/SiO₂/W 忆阻器生物响应机理 (a) 正偏压下 Cu²⁺ 的扩散与迁移运动; (b) 负偏压下 Cu²⁺ 的扩散与迁移运动; (c) 撤去偏压, 导电丝的自主破灭; (d) 残余电导丝与新形成的电导丝

Fig. 5. Synapse-like mechanism of Cu/MXene/SiO₂/W memristor: (a) Diffusion and migration of Cu²⁺ under positive voltage; (b) diffusion and migration of Cu²⁺ under negative voltage; (c) spontaneous rupture of conductive filament when the voltage is removed; (d) residual conductive filaments and newly formed conductive filaments.

4 结 论

本文将新型二维材料 MXene 应用到忆阻器中, 制备了具有 Cu/MXene/SiO₂/W 结构的忆阻器. 由于阻变层中存在的 Cu 离子扩散运动, 忆阻器表现出不同于传统忆阻器的独特性质. 除了具有稳定的双极性模拟阻态切换特征外, 器件兼具生物突触的长时程可塑性和短时可塑性, 能有效模拟 LTP, LTD 和 PPF, 其中 PPF 的易化指数与脉冲间隔相关. 这将在该类忆阻器用于构造电子突触以及类脑计算系统时提供重要的理论和实验依据。

参考文献

- [1] Chen Y H, Yu H Y, Gong J D, Ma M X, Han H, Wei H H, Xu W T 2019 *Nanotechnology* **30** 012001
- [2] Mead C 1990 *Proc. IEEE* **78** 1629
- [3] Zhao Y H, Jie J 2018 *J. Nanosci. Nanotechnol.* **18** 8003
- [4] Liang D K, Chen Y H, Xu W, Ji X C, Tong Y, Wu G D 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 237302 (in Chinese) [梁定康, 陈义豪, 徐威, 吉新村, 童祎, 吴国栋 2018 *物理学报* **67** 237302]
- [5] Dmitri B S, Gregory S S, Duncan R S, Williams R S 2008 *Nature* **453** 80
- [6] Jeong H, Shi L P 2019 *J. Phys. D: Appl. Phys.* **52** 023003
- [7] Waser R, Dittmann R, Staikov G, Kristof S 2009 *Adv. Mater.* **21** 2632
- [8] Yu Z Q, Liu M L, Lang J X, Qian K, Zhang C H 2018 *Acta Phys. Sin.* **67** 157302 (in Chinese) [余志强, 刘敏丽, 郎建勋, 钱楷, 张昌华 2018 *物理学报* **67** 157302]
- [9] Chang T, Jo S H, Lu W 2011 *ACS Nano* **5** 7669
- [10] Kim M K, Lee J S 2018 *ACS Nano* **12** 1680
- [11] Hirano T 2018 *Cerebellum* **17** 756
- [12] Wang C H, He W, Tong Y, Zhao R 2016 *Sci. Rep.* **6** 22970
- [13] Wang Z Q, Xu H Y, Li X H, Yu H, Liu Y C, Zhu X J 2012 *Adv. Funct. Mater.* **22** 2759
- [14] Zhang X M, Liu S, Zhao X L, Wu F C, Wu Q T, Wang W, Cao R R, Fang Y L, Lv H B, Long S B, Liu Q, Liu M 2017 *IEEE Electron Dev. Lett.* **38** 1208
- [15] Wang F, Ke S I, Qin C Z, Wang B, Long H, Wang K, Lu P X 2018 *Opt. Laser Technol.* **103** 272
- [16] Sun D, Ye D L, Liu P, Tang Y G, Guo J, Wang L Z, Wang H Y 2018 *Adv. Energy Mater.* **8** 1702383
- [17] Cai Z Y, Liu B L, Zou X L, Cheng H M 2018 *Chem. Rev.* **118** 6091
- [18] Wu Q T, Shi T, Zhao X L, Zhang X M, Wu F C, Cao R R, Long S B, Lv H B, Liu Q, Liu M 2017 *Acta Phys. Sin.* **66** 217304 (in Chinese) [吴全潭, 时拓, 赵晓龙, 张续猛, 伍法才, 曹荣荣, 龙世兵, 吕杭炳, 刘琦, 刘明 2017 *物理学报* **66** 217304]
- [19] Liu C Y, Zhang Y X, Yang C P 2017 *Sensors Mater.* **30** 463
- [20] Wang M, Cai S H, Pan C, Wang C Y, Lian X J, Zhuo Y, Xu K, Cao T J, Pan X Q, Wang B G, Liang S J, Yang J J, Wang P, Miao F 2018 *Nat. Electron.* **1** 130
- [21] Voigt C A, Ghidui M, Natu V, Barsoum M W 2018 *J. Phys. Chem. C* **122** 23172
- [22] Shalhzad F, Alhabeab M, Hatter C B, Anasori B, Hong S M, Koo C M, Gogotsi Y 2016 *Science* **353** 1137
- [23] Wu Y T, Nie P, Wu L Y, Dou H, Zhang X G 2018 *Chem. Eng. J.* **334** 932
- [24] Jiang X T, Liu S X, Liang W Y, Luo S J, He Z L, Ge Y Q, Wang H D, Cao R, Zhang F, Wen Q, Li J Q, Bao Q L, Fan D Y, Zhang H 2018 *Laser Photon. Rev.* **12** 1700229
- [25] Zhao X L, Liu S, Niu J B, Liao L, Liu Q, Xiao X H, Lv H B, Long S B, Banerjee W, Li W Q, Si S Y, Liu M 2017 *Small* **13** 1603948
- [26] Zhao X L, Ma J, Xiao X H, Liu Q, Shao L, Chen D, Liu S, Niu J B, Zhang X M, Wang Y, Cao R R, Wang W, Di Z F, Lv H B, Long S B, Liu M 2018 *Adv. Mater.* **30** 1705193
- [27] Scott T, Salvatore A, Woo P, Lee Y Y, Salvati E A, Della Valle A G 2018 *J. Arthroplast.* **33** 1120
- [28] Tempia F, Hoxha E, Negro G, Alshammari M A, Alshammari T K, Panova-Elektronova N, Laezza F 2015 *Front. Cell. Neurosci.* **9** 205
- [29] Liu S L, Friel D D 2008 *J. Physiol.-London* **586** 4501
- [30] Yang J J, Miao F, Pickett M D, Ohlberg D A A, Stewart D R, Lau C N, Williams R S 2009 *Nanotechnology* **20** 215201

- [31] Liu D Q, Cheng H F, Zhu X, Wang G, Wang N N 2013 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **5** 11258
- [32] Liu Q, Zhang X M, Luo Q, Zhao X L, Lv H B, Long S B, Liu

- M 2018 *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* **61** 088711
- [33] Suk J W, Kitt A, Magnuson C W, Hao Y, Ahmed S, An J, Swan A K, Boldberg B B, Ruoff R S 2011 *ACS Nano* **5** 6916

Fabrication of synaptic memristor based on two-dimensional material MXene and realization of both long-term and short-term plasticity*

Chen Yi-Hao¹⁾ Xu Wei¹⁾ Wang Yu-Qi¹⁾ Wan Xiang¹⁾ Li Yue-Feng¹⁾
 Liang Ding-Kang¹⁾ Lu Li-Qun¹⁾ Liu Xin-Wei¹⁾ Lian Xiao-Juan¹⁾
 Hu Er-Tao¹⁾ Guo Yu-Feng¹⁾ Xu Jian-Guang²⁾ Tong Yi^{1)†} Xiao Jian^{1)‡}

1) (*College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China*)

2) (*School of Materials Science and Engineering, Yancheng Institute of Technology, Yancheng 224051, China*)

(Received 29 December 2018; revised manuscript received 4 February 2019)

Abstract

Compared with conventional computation relying on the von Neumann architecture, brain-inspired computing has shown superior strength in various cognitive tasks. It has been generally accepted that information in the brain is represented and formed by vastly interconnected synapses. So the physical implementation of electronic synaptic devices is crucial to the development of brain-based computing systems. Among a large number of electronic synaptic devices, the memristors have attracted significant attention due to its simple structure and similarities to biological synapses. In this work, we first use two-dimensional material MXene as a resistive material and fabricate an electronic synapse based on a Cu/MXene/SiO₂/W memristor. By using the unique properties of MXene, the conductance of the memristor can be modulated by the accumulation or reflux of Cu²⁺ at the physical switching layer, which can vividly simulate the mechanism of bio-synapses. Experimental results show that the Cu/MXene/SiO₂/W memristor not only achieves stable bipolar analog resistance switching but also shows excellent long-term and short-term synaptic behaviors, including paired-pulse facilitation (PPF) and long-term potential/depression. By adjusting the pulse interval, the PPF index will change accordingly. In a biological system, the short-term plasticity is considered to be the key point for performing computational functions while the long-term plasticity is believed to underpin learning and memory functions. This work indicates that Cu/MXene/SiO₂/W memristor with both long-term and short-term plasticity will have great application prospects for brain-inspired intelligence in the future.

Keywords: MXene, memristor, ion diffusion, synaptic plasticity

PACS: 85.35.-p, 73.40.Rw, 77.80.Fm, 72.80.Ga

DOI: 10.7498/aps.68.20182306

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61704088, 61874059), the China Postdoctoral Science Foundation (Grant No. 2018M642290), the Open Fund of National and Local Joint Engineering Laboratory of RF Integration and Micro-Assembly Technology, China (Grant No. KFJJ20170101), the Provincial Key Talent Project of Education Department of Jiangsu Province, China (Grant Nos. SZDG2018007, TJ218001), and the Nanjing University of Posts and Telecommunications Foundation, China (Grant No. NY217116).

† Corresponding author. E-mail: tongyi@njupt.edu.cn

‡ Corresponding author. E-mail: xiaoj@njupt.edu.cn