



## 基于水热法制备三氧化钼纳米片的人工突触器件

郭科鑫 于海洋 韩弘 卫欢欢 龚江东 刘璐 黄茜 高清运 徐文涛

### Artificial synapse based on MoO<sub>3</sub> nanosheets prepared by hydrothermal synthesis

Guo Ke-Xin Yu Hai-Yang Han Hong Wei Huan-Huan Gong Jiang-Dong Liu Lu Huang Qian Gao Qing-Yun Xu Wen-Tao

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 69, 238501 (2020) DOI: 10.7498/aps.69.20200928

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200928>

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

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

物理学报. 2019, 68(9): 098501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182306>

新型忆阻器神经形态电路的设计及其在条件反射行为中的应用

Design of novel memristor-based neuromorphic circuit and its application in classical conditioning

物理学报. 2019, 68(23): 238501 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191023>

四方相多铁BiMnO<sub>3</sub>电控磁性的理论研究

Theoretical study on magnetoelectric effect in multiferroic tetragonal BiMnO<sub>3</sub>

物理学报. 2018, 67(15): 157511 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20180946>

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>

氧化物基忆阻型神经突触器件

Oxide-based memristive neuromorphic synaptic devices

物理学报. 2019, 68(16): 168504 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191262>

层状氧化钼的电子结构、磁和光学性质第一原理研究

First-principles study of electronic structure, magnetic and optical properties of laminated molybdenum oxides

物理学报. 2019, 68(5): 057101 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181962>

专题: 柔性电子

## 基于水热法制备三氧化钼纳米片的人工突触器件\*

郭科鑫 于海洋 韩弘 卫欢欢 龚江东  
刘璐 黄茜 高清运 徐文涛†

(南开大学光电子薄膜器件与技术研究所, 天津市光电子薄膜器件与技术重点实验室, 天津 300350)

(2020年6月16日收到; 2020年10月26日收到修改稿)

近年来, 在神经形态电子中, 能够模拟突触功能的人工突触器件的研发引起了广泛关注. 本文利用水热法制备出高比表面积的基于  $\text{MoO}_3$  纳米片的薄膜, 并将其用于人工突触器件的制备, 成功模拟了如: 突触后兴奋电流 (EPSC)、双脉冲易化 (PPF)、脉冲持续时间依赖可塑性 (SDDP)、脉冲电压依赖可塑性 (SVDP) 及脉冲速率依赖可塑性 (SRDP) 等神经突触的重要功能.

**关键词:** 人工突触, 水热合成, 三氧化钼纳米片, 突触可塑性

**PACS:** 85.35.-p, 73.40.Mr, 77.22.Ej

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200928

## 1 引言

最近, 能够并行信息处理的神经形态系统引起了越来越多的关注<sup>[1-5]</sup>. 由数千亿个神经元与更多神经突触连接而成的神经形态系统有望应用到人脑的模拟. 突触是神经元之间重要的连接部分, 并且通过释放和接收神经递质来传递信息<sup>[6-8]</sup>. 神经形态系统可以模拟大脑的学习、认知和计算能力, 以每秒  $10^{16}$  个浮点数的速度处理大量数据<sup>[9]</sup>. 其较高的计算效率吸引了许多研究者研究人工突触, 并将其应用在未来的人工智能中. 突触之间的连接强度可以通过接收到的信息进行调整. 这为人工突触的学习和计算能力提供了基础<sup>[10-12]</sup>.

迄今为止, 一些材料已经被用作人造突触装置中的活性层. 有机材料, 如聚-3 己基噻吩 (P3HT)<sup>[13]</sup>, 2, 7-二辛基 1 苯并噻吩 [3, 2-b] 1 苯并噻吩 (C8-BT-BT)<sup>[9]</sup> 等. 无机氧化物, 如氧化锌<sup>[14,15]</sup>, 氧化铟锌 (IZO)<sup>[16]</sup>, 氧化铟镓锌 (IGZO)<sup>[17]</sup>, 过渡金属氧化

物<sup>[18,19]</sup> 等. 二维材料, 如石墨烯<sup>[20-22]</sup>, 黑磷<sup>[23]</sup>, 钙钛矿材料<sup>[24]</sup> 等. 其中过渡金属氧化物因其独特的层状结构和固有性质使得其在光电水解<sup>[25]</sup>、锂离子电池<sup>[26,27]</sup> 及场效应晶体管<sup>[28]</sup> 等方面有重要应用.  $\text{MoO}_3$  作为典型的过渡金属氧化物, 已经在化学反应和电子器件中得到了广泛地应用, 例如: 由纳米  $\text{MoO}_3$  和 Al 粉末制备的含能薄膜可以在短时间内释放大量的能量, 在国防和信息安全领域显示了广泛的前景; 同时作为半导体材料也被广泛地应用于制备人工突触器件中. 在已报道的  $\text{MoO}_3$  人工突触器件中, Li 等<sup>[29]</sup> 采用机械剥落法制备; Yang 及其团队采用化学气相沉积 (CVD)<sup>[30]</sup> 及化学气相传输 (CVT)<sup>[31]</sup> 的方式制备  $\text{MoO}_3$  活性层, 构建两端及三端人工突触器件; Wang 与其团队<sup>[32]</sup> 以脉冲激光沉积 (PLD) 的方式制备突触器件中的  $\text{MoO}_3$  薄膜. 本文制备活性层的方法与已报道的方法不同, 以水热法制备  $\text{MoO}_3$  纳米片活性层并且通过  $\text{TiO}_2$  纳米颗粒晶种层来增加  $\text{MoO}_3$  在衬底 Si 上的附着性<sup>[33,34]</sup>, 制备成本较低, 可以通过调控不同

\* 广东省重点领域研发项目 (批准号: 2018B030338001)、天津市杰出青年科学基金 (批准号: 19JCJQJC61000)、天津市自然科学基金 (批准号: 18JCYBJC16000) 和中央高校基本科研业务费 (批准号: 075-63191740, 075-63191745) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wentao@nankai.edu.cn

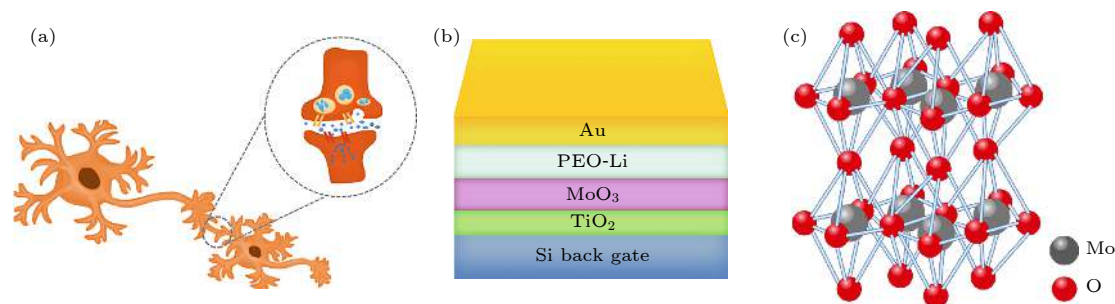


图 1 (a) 生物神经元及神经突触示意图; (b) 人工突触器件结构示意图; (c) MoO<sub>3</sub> 结构示意图

Fig. 1. (a) Schematic diagram of biological neurons and synapse; (b) schematic diagram of artificial synapse device; (c) schematic diagram of MoO<sub>3</sub> structure.

的变量从而来调控产物的尺寸及形貌, 并且高温高压的实验环境有利于生长缺陷少、结晶度较好的晶体. 以此方法所制得的纳米材料具有较大的比表面积, 因此可以提供更大的接触面积, 有较强的界面离子作用. 并且成功模拟了突触的重要功能, 如: 突触后兴奋电流 (EPSC)、双脉冲易化 (PPF)、脉冲持续时间依赖可塑性 (SDDP)、脉冲电压依赖可塑性 (SVDP) 及脉冲速率依赖可塑性 (SRDP), 本工作可能是神经形态研究领域的重要补充.

## 2 器件制备

神经元是神经系统的基本结构及机体单位, 由胞体、树突、轴突和突触构成. 每个神经元可以有一或多个树突, 可以接受刺激并将兴奋传入细胞体. 每个神经元只有一个轴突, 可以把兴奋从胞体传送到另一个神经元或其他组织. 神经突触是神经元之间传递信号的重要一环, 前神经元的神经突触释放神经递质, 经由突触小泡穿过突触间隙传递至后神经元突触的受体上, 完成一次信号的传递, 如图 1(a) 所示.

为了模拟生物突触的结构, 设计两端“三明治”结构用于实现人工突触电子器件. 以 Au 顶电极模拟突触前膜, 高掺杂 n 型 Si 衬底模拟突触后膜, MoO<sub>3</sub> 活性层模拟突触间隙, 以溶胶-凝胶法制备的 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒晶种层来增加 MoO<sub>3</sub> 在衬底 Si 上的附着性, 通过掺有锂盐的聚环氧乙烷 (PEO-Li) 固体电解质来修饰活性层较为粗糙的表面, 同时增大了金属电极与活性层的接触面积, 器件结构如图 1(b) 所示. MoO<sub>3</sub> 晶体是以金属钼原子为中心, 氧原子在角边的八面体为基本结构单元, 各个结构单元之间以链相连, 相似的链边连接成层, 层与层

之间以范德瓦耳斯连接. MoO<sub>3</sub> 这种特殊的八面体成链晶体结构使得其具有广延的离子流通和嵌入通道<sup>[35]</sup>, 其结构如图 1(c) 所示.

## 3 实验方法

水热法制备 MoO<sub>3</sub> 活性层具体实验步骤如下: 称量 0.114 g 乙酰丙酮钼粉末和 35 mL 乙酸并混合, 搅拌 2 h 得到黄色透明溶液, 在搅拌条件下加入 2 mL 去离子水, 得到浅黄色浑浊的前驱体溶液<sup>[36]</sup>. 将长有 TiO<sub>2</sub> 纳米颗粒晶种层的基底以及前驱体溶液置于 50 mL 反应釜中, 于 150 °C 反应 16 h. 分别用乙醇和去离子水冲洗反应后得到的样品, 之后将样品在马弗炉中 500 °C 煅烧 1 h, 得到长有 MoO<sub>3</sub> 纳米片的活性层.

## 4 实验结果与分析

### 4.1 材料晶体结构以及形貌分析

图 2(a) 给出了 XRD 测试结果与标准 PDF 卡片对比之后, 得出 MoO<sub>3</sub> 纳米材料的特征衍射峰:  $2\theta = 12.7^\circ, 23.3^\circ, 25.6^\circ, 27.3^\circ, 33.7^\circ, 49.2^\circ, 51.0^\circ, 55.1^\circ$  分别与晶面 (020), (110), (040), (021), (111), (002), (022), (112), (042) 相对应, XRD 衍射曲线中显示有较强衍射峰——(040) 和 (002), 说明在水热过程中 MoO<sub>3</sub> 纳米材料的生长具有一定的取向性.

图 2(b) 显示了由 SEM 测量到的 MoO<sub>3</sub> 纳米薄膜的表面形貌. 测试结果显示薄膜覆盖较为均匀, 且有呈一定规律排列的趋势. 同时测试结果显示薄膜是由宽约 300 nm、长约 1  $\mu\text{m}$  的片状物质成. MoO<sub>3</sub> 纳米材料的 N<sub>2</sub> 吸附/脱附等温线及相应的 Barrett-Joyner-halen (BJH) 测试结果如图 2(c), 其

结果表明该纳米材料的比表面积为  $11.0380 \text{ m}^2/\text{g}$ , 孔径大小约为  $433.798 \text{ \AA}$ , 表明以水热法制备的  $\text{MoO}_3$  纳米材料具有较高比表面积并且为无介孔结构的片状物质。

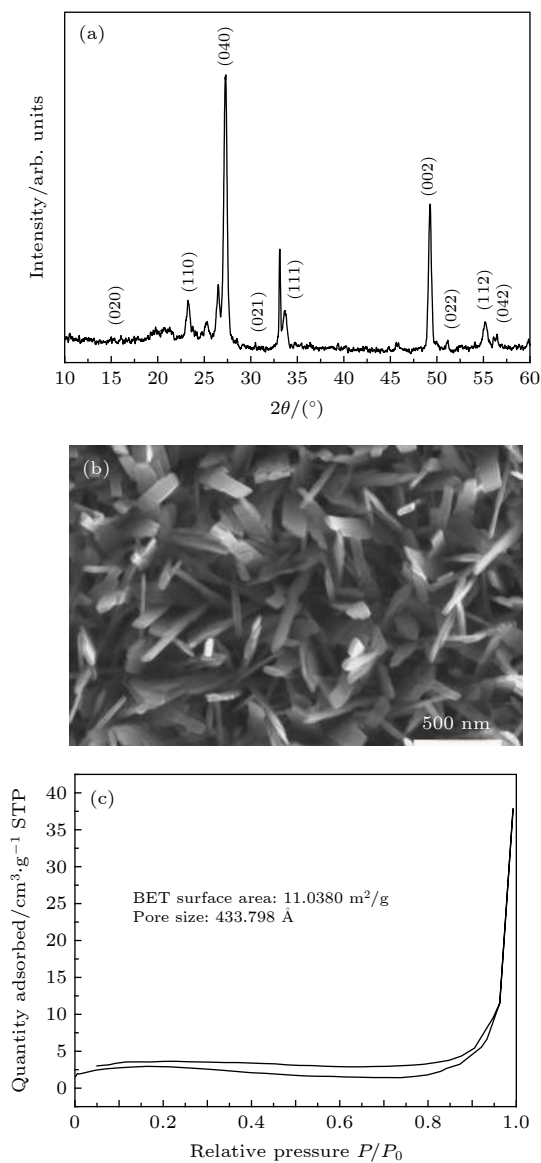


图 2 (a)  $\text{MoO}_3$  纳米材料 XRD 测试图; (b)  $\text{MoO}_3$  纳米材料扫描电镜图; (c)  $\text{MoO}_3$  纳米材料的  $\text{N}_2$  等温吸脱附曲线  
 Fig. 2. (a) XRD of  $\text{MoO}_3$  nanomaterials; (b) scanning electron microscope image of  $\text{MoO}_3$  nanomaterials; (c) nitrogen Isothermal absorption and desorption curve of  $\text{MoO}_3$  nanomaterials.

## 4.2 器件突触性能测试分析

突触可塑性是指突触连接强度可以被持续调节的性质, 会随着自身活动的增强或减弱相应的增强或减弱<sup>[37]</sup>. 突触可塑性可分为两种: 长程可塑性 (LTP) 和短程可塑性 (STP). STP 往往可以实现

短时程行为、短时程记忆的重要功能, 可以在大脑接收大量刺激信号时过滤掉不重要的信息, 是提取有价值的信息的关键<sup>[38]</sup>. EPSC 是突触后膜收到刺激后短暂去极化所形成的现象, 是 STP 的重要表现之一。

为了在制备的人工突触电子器件上模拟这种突触兴奋性行为, 以顶电极和底电极作为突触前膜和突触后膜,  $\text{MoO}_3$  活性层模拟突触间隙. 在底电极上施加一个恒定的偏置电压 ( $0.01 \text{ V}$ ) 作为读取电压, 将幅值为  $1 \text{ V}$  的电压施加在顶电极上建立一个临时的外加电场. 外加电压导致了 EPSC 的产生, 器件受到刺激时电流瞬时增加, 在刺激消失之后突触后电流快速衰退恢复至初始状态如图 3(a) 所示. 这一现象的产生可能是在器件受到刺激的瞬间, 固体电解质中的  $\text{Li}^+$  在外加电场的作用下有序迁移, 聚集在  $\text{MoO}_3$  表面, 引起  $\text{MoO}_3$  中电子的定向移动从而造成突触后电流的瞬时增加. 消除刺激之后电荷扩散到其平衡位置, 因此电流衰减恢复至初始状态. 这一现象与生物性神经突触中的 EPSC 现象对应, 一旦适当的刺激到达轴突末端并激活  $\text{Ca}^{2+}$  通道, 从突触小泡释放的神经递质会迅速扩散穿过突触间隙, 并与突触后细胞膜上的这些受体结合, 最终产生兴奋性突触后电流<sup>[39]</sup>.

PPF 也是突触短时可塑性的一个重要表现, 在视觉和听觉系统中接收和解读瞬时消息中至关重要<sup>[40]</sup>, PPF 体现的是在前突触上施加两次连续的刺激, 第二次刺激造成的突触后兴奋电流高于前一次刺激的现象, 在此器件上模拟的 PPF 现象如图 3(b) 所示. 相同幅值电压下的两次刺激, 第二次刺激造成的 EPSC 与第一次的相比增加  $17.94\%$ . 在第一次刺激下,  $\text{Li}^+$  的迁移导致  $\text{MoO}_3$  活性层中电子的定向移动, 刺激消失后离子逐渐迁移回到其平衡位置. 但如果第二次刺激在其到达平衡位置之前到达, 会有更多数量的离子在临时电场的作用下发生定向移动从而导致活性层中更多的电子发生定向移动, 所以第二次 EPSC 高于第一次. 并且高出值的大小由两次之间的时间间隔有关, 越小的时间间隔会造成更大的 EPSC<sup>[41]</sup>. 相同振幅的电压刺激下, 不同时间间隔的 PPF 如图 3(c) 所示, 可以很明显的看出, 随着时间间隔的增加第二次 EPSC 增益逐渐减小, 在这里将增益 PPF Index 定义为  $(A_2 - A_1)/A_1$ , 其中  $A_1$  是第一次刺激后的 EPSC 峰值,  $A_2$  是连续两次刺激后的 EPSC 峰值。



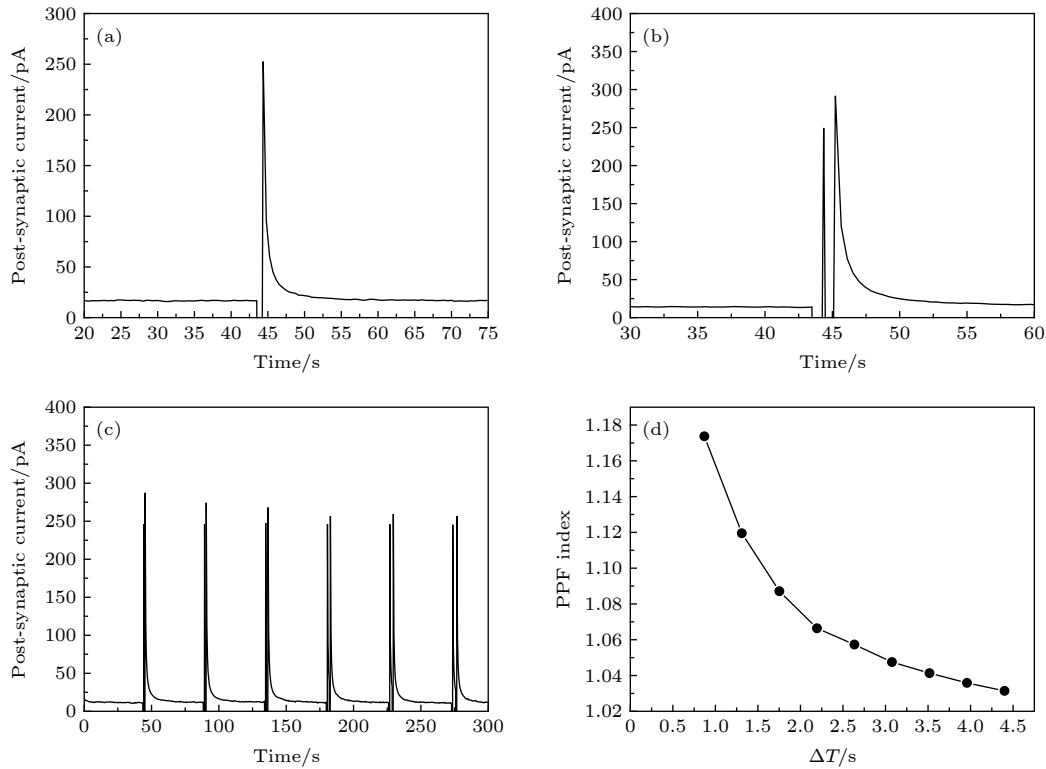


图3 (a) 单个幅值为 1 V 的刺激在 MoO<sub>3</sub> 人工神经突触上引起的 EPSC; (b) 一对幅值为 1 V 的刺激在 MoO<sub>3</sub> 人工神经突触上引起的 PPF; (c) 和 (d) 多对时间间隔不同, 幅值为 1 V 的脉冲引起的 PPF 及 PPF Index

Fig. 3. (a) EPSC triggered by a single 1 V spike at a MoO<sub>3</sub> artificial synapse; (b) PPF triggered by a pair of 1 V spikes at a MoO<sub>3</sub> artificial synapse; (c) and (d) PPF and PPF index triggered by spikes with different time intervals and same amplitudes of 1 V.

持续重复的刺激可以使得突触之间的连接性和信息传递性增加, 联系更加紧密<sup>[42]</sup>. 在神经突触学习规则当中, SRDP 描述的是突触前神经元接收不同频率刺激后释放不同数量的神经递质, 从而导致突触后神经元产生的信号电流不同的现象. 在此器件上施加 0.01 V 的读取电压, 振幅为 1 V 的刺激电压, 以不同的时间间隔来调制施加刺激的频率, 结果如图 4(a) 所示. 从实验结果可以看出, 随着施加的刺激频率的降低, 突触后兴奋电流增长的趋势逐渐降低最后趋于平缓. 这一趋势的产生是由于在较高频率的刺激下, 最初产生 EPSC 的离子在没有回到其平衡位置时下一次刺激就已经到达所以产生了与 PPF 类似的趋势. 而当施加的刺激频率较低时, 在下次刺激达到之前, 造成突触后电流的离子大部分已经回到其平衡位置, 所以形成的趋势较为平缓.

同时, 在生物突触中增加刺激的持续时间和刺激强度也会增加突触前膜释放的神经递质的数量, 这两种现象也是人工突触可塑性中重要的表现, 分别为 SDDP 和 SVDP. 在此器件上模拟的 SDDP

及 SVDP 的结果分别如图 4(b) 和图 4(c) 所示. 从实验结果可以看出传递信息的神经递质的数量是有限的, 随着持续时间的逐渐增加, 引起的 EPSC 的强度由逐渐增加到趋于平缓, 在实验过程中随着所施加的刺激持续时间的增加, 可移动的离子数目逐渐减少, 最后接近全部的离子都参与了信号的传递. 并且脉冲振幅的增大也会引起 EPSC 的增加.

能量消耗也是衡量人工突触性能的一个重要准则, 是人工突触完成一次信号传递消耗的能量. 不同金属氧化物材料作为活性层的能量消耗对比如表 1 所示. 在这里将其定义为  $E = I_{\text{peak}} \times V \times t_d$ , 其中  $I_{\text{peak}}$  是 EPSC 的峰值,  $V$  是施加的脉冲幅值,  $t_d$  是所施加脉冲的持续时间<sup>[43]</sup>. 本文制备的器件在施加振幅为 0.2 V 的刺激时, 完成一次信号传递所消耗的能量为 1.47 pJ, 如图 4(d) 所示. 所制备的 MoO<sub>3</sub> 活性层具有较大的比表面积, 能与其上涂覆的 PEO-Li 有更大的接触面, 在接受刺激时能够引起更多的载流子运动, 因此完成一次信号传递所消耗的能量较小, 而且能量的消耗随着受到刺激振幅的增加而增加.

表 1 不同金属氧化物人工突触器件能量消耗

Table 1. Energy consumption of different metal oxide artificial synaptic devices.

序号	活性层	制备方法	能量消耗/pJ	文献
1	MoO <sub>3</sub>	水热法	1.47	本文
2	MoO <sub>3</sub>	化学气相沉积	9.60	[30]
3	HfO <sub>x</sub> /AlO <sub>x</sub>	溶液法	6.00	[44]
4	Pt/HfO <sub>x</sub> /TiO <sub>y</sub> /HfO <sub>x</sub> / TiO <sub>y</sub> /TiN	磁控溅射	0.30	[45]
5	HfO <sub>x</sub> /CeO <sub>x</sub>	等离子体辅助原子层沉积 (plasma-assisted atomic layer deposition)	~8.00	[46]
6	ZnSnO	静电纺丝	0.44	[47]
7	IZO/SiO <sub>2</sub>	射频磁控溅射	45.00	[48]
8	IZO/GO	滴涂	3.70	[16]

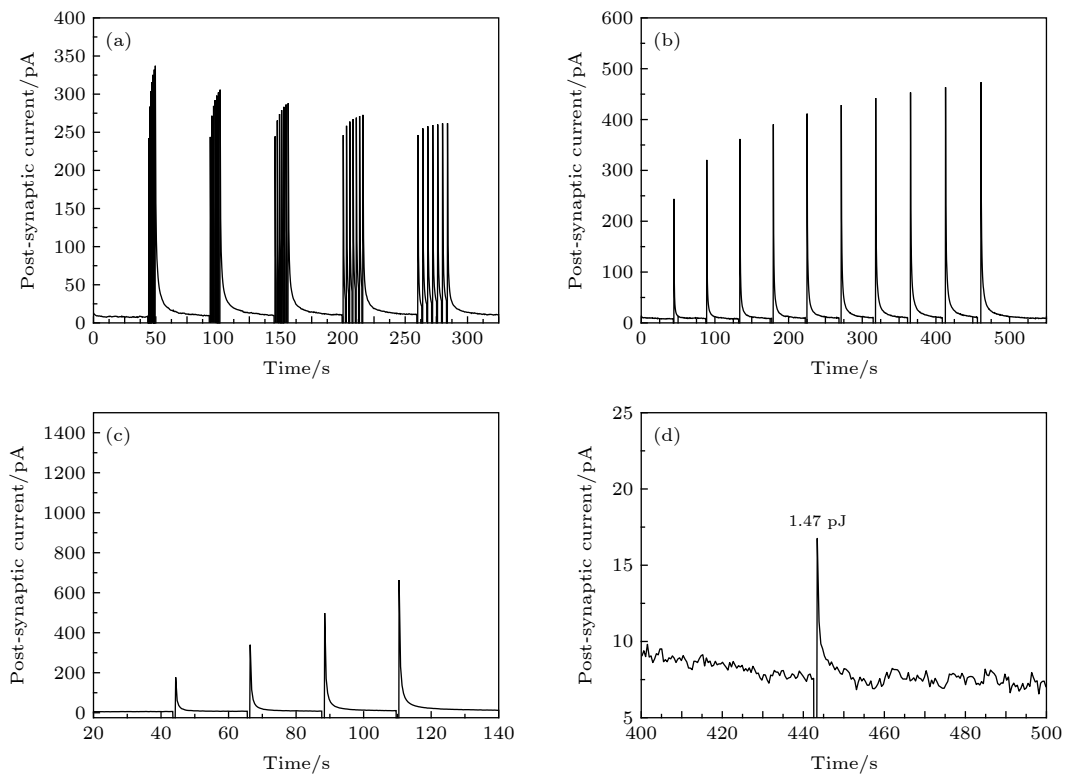


图 4 (a) 施加幅值为 1 V 刺激个数分别为 1, 2, 3, 5, 8 在 MoO<sub>3</sub> 突触器件上引起的 SRDP; (b) 相同幅值不同刺激持续时间造成的 SDDP; (c) 幅值分别为 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 V 的刺激在突触器件上引起的 SVDP; (d) 为施加幅值为 0.2 V 时所获得的兴奋性突触后电流及完成一次信号传递所消耗的能量

Fig. 4. (a) SRDP on MoO<sub>3</sub> synapses triggered by the number of spikes of 1 V applied at 1, 2, 3, 5, and 8; (b) SDDP triggered by different spike duration time with the same amplitude; (c) SVDP triggered by spikes with amplitudes of 0.5, 1.0, 1.5 V, and 2.0 V on synaptic devices; (d) the excitatory postsynaptic current when the applied spike is 0.2 V and the energy consumed to complete a signal transmission.

## 5 结 论

本文用水热法制备了具有较高比表面积的 MoO<sub>3</sub> 纳米片, 并将其作为活性层制备 Si/TiO<sub>2</sub>/MoO<sub>3</sub>/PEO-Li/Au 两端人工突触器件, 成功模拟

了多种人工突触可塑性, 如 EPSC, PPF, SRDP, SDDP 及 SVDP 等. 这一系列人工突触可塑性的实现是由于受到刺激时, Li<sup>+</sup>的运动引起 MoO<sub>3</sub> 中载流子的移动造成的, 由于 MoO<sub>3</sub> 活性层与 PEO-Li 有较大的接触面, 此器件完成一次信号传递所消耗的能量较低.

## 参考文献

- [1] Wang Y H, Liu C, Huang R, Yang Y C 2020 *Chin. Sci. Bull.* **65** 46 (in Chinese) [王洋昊, 刘昌, 黄如, 杨玉超 2020 科学通报 **65** 46]
- [2] Jiang S S, Nie S, He Y L, Liu R, Wan Q 2019 *Modern Electronic Technology* **42** 181 (in Chinese) [姜珊珊, 聂莎, 何勇礼, 刘锐, 万青 2019 现代电子技术 **42** 181]
- [3] Yao Y, Huang X, Peng S, Zhang D, Shi J, Yu G, Liu Q, Jin Z 2019 *Adv. Electron. Mater.* **5** 1800887
- [4] Kim S G, Kim S H, Park J, Kim G S, Park J H, Saraswat K C, Kim J, Yu H Y 2019 *ACS Nano* **13** 10294
- [5] Shi C, Wang J, Sushko M L, Qiu W, Yan X, Liu X Y 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1904777
- [6] Kandel E R 2001 *Science* **294** 1030
- [7] Yang S N, Tang Y G, Zucker R S 1999 *J. Neurophysiol.* **81** 781
- [8] Shouval H Z, Bear M F, Cooper L N 2002 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **99** 10831
- [9] Fang L, Dai S, Zhao Y, Liu D, Huang J 2020 *Adv. Electron. Mater.* **6** 1901217
- [10] Fuller E J, Keene S T, Melianas A, Wang Z, Agarwal S, Li Y, Tuchman Y, Jame C D, Marinella M J, Yang J J, Salleo A 2019 *Science* **364** 570
- [11] Lee Y, Lee T W 2019 *Accounts Chem. Res.* **52** 964
- [12] Wan C, Chen G, Fu Y, Wang M, Matsuhisa N, Pan S, Pan L, Yang H, Wan Q, Zhu L, Chen X 2018 *Adv. Mater.* **30** 1801291
- [13] Han H, Xu Z, Guo K, Ni Y, Ma M, Yu H, Wei H, Gong J, Zhang S, Xu W 2020 *Adv. Intell. Syst.* **2** 1900176
- [14] Balakrishna Pillai P, De Souza M M 2017 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **9** 1609
- [15] Wan C J, Liu Y H, Zhu L Q, Feng P, Shi Y, Wan Q 2016 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** 9762
- [16] Yang Y, Wen J, Guo L, Wan X, Du P, Feng P, Wan Q 2016 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **8** 30281
- [17] Sun J, Oh S, Choi Y, Seo S, Oh M J, Lee M, Lee W B, Yoo P J, Cho J H, Park J H 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1804397
- [18] Yan X, Zhao J, Liu S, Zhou Z, Liu, Q, Chen J, Liu X Y 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1705320
- [19] Murase S, Yang Y 2012 *Adv. Mater.* **24** 2459
- [20] Yang Y, Brenner K, Murali R 2012 *Carbon* **50** 1727
- [21] Schedin F, Lidorikis E, Lombardo A, Kravets V G, Geim A K, Grigorenko A N, Novoselov K S, Ferrari A C 2010 *ACS Nano* **4** 5617
- [22] Li X, Zhu H, Wang K, Cao A, Wei J, Li C, Jia Y, Li Z, Li X, Wu D 2010 *Adv. Mater.* **22** 2743
- [23] Tian H, Guo Q, Xie Y, Zhao H, Li C, Cha J J, Xia F, Wang H 2016 *Adv. Mater.* **28** 4991
- [24] Kim S I, Lee Y, Park M H, Go G T, Kim Y H, Xu W, Lee H D, Kim H, Seo D G, Lee W, Lee T W 2019 *Adv. Electron. Mater.* **5** 1900008
- [25] Li M., Cui Z, Li E 2019 *Ceram. Int.* **45** 14449
- [26] Ji W, Shen R, Yang R, Yu G, Guo X, Peng L, Ding W 2014 *J. Mater. Chem. A* **2** 699
- [27] Wu F, Tian J, Su Y, Guan Y, Jin Y, Wang Z, He T, Bao L, Chen S 2014 *J. Power Sources* **269** 747
- [28] Liu E, Fu Y, Wang Y, et al. 2015 *Nat. Commun.* **6** 1
- [29] Li H, Wu J, Yin Z, Zhang H 2014 *Accounts Chem. Res.* **47** 1067
- [30] Yang C S, Shang D S, Chai Y S, Yan L Q, Shen B G, Sun Y 2017 *Phys. Chem. Chem. Phys.* **19** 4190
- [31] Yang C S, Shang D S, Liu N, Fuller E J, Agrawal S, Talin A A, Li Y Q, Shen B G, Sun Y 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1804170
- [32] Wang Z, Yang R, Huang H M, He H K, Shaibo J, Guo X 2020 *Adv. Electron. Mater.* **6** 1901290
- [33] Yu H Q 2018 *M. S. Thesis* (Shandong: Jinan University) (in Chinese) [于焕芹 2018 硕士学位论文 (山东: 济南大学)]
- [34] Galatsis K, Li Y X, Wlodarski W, Comini E, Faglia G, Sberveglieri G 2001 *Sens. Actuators B Chem.* **77** 472
- [35] Liu Y, Yang S, Lu Y, Chen W, Zakharova G S 2015 *Appl. Surf. Sci.* **359** 114
- [36] Xu Y M, Wang M, Cheng X L, Huo L H, Zhang X F 2016 *CN Patent* CN 105439202A (in Chinese) [徐英明, 王敏, 程晓丽, 霍丽华, 张现发 2016 中国专利 CN 105439202A]
- [37] Zhang C, Chen Y, Yi M, Zhu Y, Li T, Liu L, Wang L, Xie L, Huang W 2018 *Scientia Sinica Informationis* **48** 115
- [38] Zucker R S, Regehr W G 2002 *Annu. Rev. Physiol.* **64** 355
- [39] Jiang J, Hu W, Xie D, Yang J, He J, Gao Y, Wan Q 2019 *Nanoscale* **11** 1360
- [40] Jo S H, Chang T, Ebong I, Bhadviya B B, Mazumder P, Lu W 2010 *Nano Lett.* **10** 1297
- [41] Yang C S, Shang D S, Liu N, Shi G, Shen X, Yu R C, L Y Q, Sun Y 2017 *Adv. Mater.* **29** 1700906
- [42] Bi G Q, Poo M M 2001 *Annu. Rev. Neurosci.* **24** 139
- [43] Yu H Y, Gong J D, Wei H H, Huang W, Xu W T 2019 *Mater. Chem. Front.* **3** 941
- [44] Yu S, Wu Y, Jeyasingh R, Kuzum D, Wong P H S 2011 *IEEE Trans Electron Devices* **58** 2729
- [45] Gao B, Kang J, Zhou Z, Chen Z, Huang P, Liu L F, Liu X Y 2016 *Jpn. J. Appl. Phys.* **55** 04EA06
- [46] Hsieh C C, Roy A, Chang Y F, Shahrjerdi D, Banerjee S K 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 223501
- [47] Zhu Y, Shin B, Liu G, Shan F 2019 *IEEE Electron Device Lett.* **40** 1776
- [48] Zhu L Q, Wan C J, Guo L Q, Shi Y, Wan Q 2014 *Nat. Commun.* **5** 1

SPECIAL TOPIC—Flexible electronics

# Artificial synapse based on MoO<sub>3</sub> nanosheets prepared by hydrothermal synthesis\*

Guo Ke-Xin Yu Hai-Yang Han Hong Wei Huan-Huan Gong Jiang-Dong  
Liu Lu Huang Qian Gao Qing-Yun Xu Wen-Tao<sup>†</sup>

(Key Laboratory of Photoelectronic Thin Film Devices and Technology of Tianjin, Institute of Photoelectronic Thin Film Devices and Technology of Nankai University, Tianjin 300350, China)

( Received 16 June 2020; revised manuscript received 26 October 2020 )

## Abstract

Recently, neuromorphic systems capable of parallel information processing have attracted increasing attention. A neuromorphic system is desired to emulate a human brain, which consists of hundreds of billions of neurons connected with even more synapses. Synapses are important connection parts between neurons to transmit information through release and reception of neurotransmitters. A neuromorphic system could replicate brain learning, cognition and computation of a human brain to process huge data with  $10^{16}$  floating point numbers per second. The high computing efficiency has attracted many researchers to study artificial synapses for application in future artificial intelligence. The synaptic weight could be adjusted by the received information. This provides a basis for the learning and computing capability of artificial synapses.

So far, a number of semiconductor materials have been used in artificial synaptic devices, like some organic materials, e.g. Poly(3-hexylthiophene-2,5-diyl)(P3HT), [1]Benzothieno[3,2-b][1]benzothiophene, 2,7-dioctyl-(C8-BTBT) etc, some inorganic oxides such as zinc oxide, indium zinc oxide(IZO), indium gallium zinc oxide(IGZO), transition metal oxides, etc, and two-dimensional materials, e.g. graphene, black phosphorus, and organic-inorganic hybrid perovskite materials. Among them, transition metal oxides are attractive due to their unique layered structure and inherent properties, which are important in photohydrolysis, lithium ion batteries, and field-effect transistors. MoO<sub>3</sub>, as a typical transition-metal oxide, has been used in artificial synaptic devices, with different preparation methods, such as mechanical exfoliation, chemical vapor deposition (CVD) and chemical vapor transportation (CVT), pulse-laser deposition (PLD). Here, we report the preparation of a semiconductor layer of MoO<sub>3</sub> nanosheets by hydrothermal method, and the use of a TiO<sub>2</sub> nanoparticle seed layer to improve the adhesion of MoO<sub>3</sub> nanosheets. This is a cost-effective and controllable process. The high surface-to-volume ratio of the material provides large contact area at the interface to allow easy ion diffusion. The device emulates important synaptic functions, such as excitatory post-synaptic current (EPSC), paired-pulse facilitation (PPF), spike-duration dependent plasticity (SDDP), spike-voltage dependent plasticity (SVDP) and spike-rate dependent plasticity (SRDP). This work could be an important addition to the neuromorphic research field.

**Keywords:** artificial synapse, hydrothermal synthesis, molybdenum trioxide nanosheets, synaptic plasticity

**PACS:** 85.35.-p, 73.40.Mr, 77.22.Ej

**DOI:** 10.7498/aps.69.20200928

\* Project supported by the Key Area R&D Program of Guangdong Province, China (Grant No. 2018B030338001), the Tianjin Science Foundation for Distinguished Young Scholars, China (Grant No. 19JCQJC61000), the Natural Science Foundation of Tianjin, China (Grant No. 18JCYBJC16000), and the Fundamental Research Funds for the Central Universities, China (Grant Nos. 075-63191740, 075-63191745).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: wentao@nankai.edu.cn