

基于二维有机 - 无机异质结突触晶体管的研究

杨 凡, 刘友文, 张玲珑*

南京航空航天大学物理学院, 江苏 南京

收稿日期: 2025年5月7日; 录用日期: 2025年6月12日; 发布日期: 2025年6月20日

摘要

随着传统冯·诺依曼架构因“存 - 算分离”导致的能效瓶颈问题日益突出, 神经形态计算通过模拟生物突触可塑性机制, 为突破现有计算范式提供了新思路。本文提出一种基于二硫化钼(MoS_2)-并五苯有机 - 无机异质结的光电突触晶体管, 旨在实现光 - 电协同调控的仿生突触功能。实验结果表明, 该晶体管可模拟多种生物突触行为, 包括成对脉冲促进(PPF)及短期记忆(STM)向长期记忆(LTM)的过渡。在460 nm 光刺激下, 器件表现出高响应度(光强1.464 mW/cm²时PPF指数达158.2%)和非易失性记忆特性, 且通过光脉冲持续时间和次数可调控记忆保持时间, 模拟类脑学习模式。此外, 结合电脉冲“擦除”功能, 器件成功实现光写入与电擦除的协同操作。本研究为开发柔性、低功耗神经形态光电子器件提供了新策略, 在仿生视觉系统与智能感知领域具有重要应用潜力。

关键词

有机 - 无机异质结构, 光电突触晶体管, 突触可塑性, 成对脉冲促进

Research on Synaptic Transistors Based on 2D Organic-Inorganic Heterojunctions

Fan Yang, Youwen Liu, Linglong Zhang*

College of Physics, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing Jiangsu

Received: May 7th, 2025; accepted: Jun. 12th, 2025; published: Jun. 20th, 2025

Abstract

With the increasing prominence of energy efficiency bottlenecks caused by the “memory-process separation” in traditional von Neumann architectures, neuromorphic computing has provided new insights to transcend current computational paradigms by emulating biological synaptic plasticity mechanisms. This study proposes an optoelectronic synaptic transistor based on a molybdenum disulfide (MoS_2)-pentacene organic-inorganic heterojunction, aiming to achieve bio-inspired synaptic

*通讯作者。

functions through optoelectronic co-regulation. Experimental results demonstrate that the transistor can mimic diverse biological synaptic behaviors, including paired-pulse facilitation (PPF) and the transition from short-term memory (STM) to long-term memory (LTM). Under 460 nm optical stimulation, the device exhibits high responsivity (PPF index of 158.2% at 1.464 mW/cm²) and non-volatile memory characteristics. The memory retention time can be modulated by adjusting optical pulse duration and repetition frequency, simulating brain-like learning patterns. Furthermore, by integrating an electrical “erase” function, the device successfully realizes synergistic operations of optical writing and electrical erasing. This work provides a novel strategy for developing flexible, low-power neuromorphic optoelectronic devices, with significant application potential in bio-inspired vision systems and intelligent sensing.

Keywords

Organic-Inorganic Heterostructures, Optoelectronic Synaptic Transistors, Synaptic Plasticity, Paired-Pulse Facilitation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

近年来，随着人工智能、物联网和类脑神经计算的快速发展，传统冯·诺依曼架构因为“存-算分离”导致的能效瓶颈问题日益凸显[1]。受生物神经系统启发，神经形态计算通过模拟人脑的并行信息处理与突触可塑性机制，为突破传统计算范式提供了新的思路[2][3]。其中，光电突触晶体管作为可以实现光-电协同调控的器件，能够快速响应光脉冲并动态调整器件自身的突触权重，在视觉感知、自适应学习和低功耗类脑芯片等领域展现出巨大潜力[4][5]。

然而，传统硅基或氧化物半导体突触器件受限于刚性结构、高工作电压及弱光响应等特性，难以满足柔性电子和高效光神经形态系统的需求[6]。有机半导体材料因其分子可设计性、溶液加工性及优异的机械柔韧性，为构建柔性、低功耗突触器件提供了平台[7]。例如，基于共轭聚合物或小分子的有机突触晶体管已成功模拟短期/长期可塑性、脉冲时间依赖可塑性等生物突触行为[8]。与此同时，二维过渡金属硫族化物(TMDs，如二硫化钼(MoS₂)、二硫化钨(WS₂))凭借原子级厚度、高载流子迁移率及独特的光电特性，在光电子领域备受关注[9][10]。其宽光谱响应范围(可见至近红外)和强光-物质相互作用，为高性能光电突触的实现提供了新机遇。

因此，将有机材料和无机材料结合构成异质结构，成为光电子学中一个新兴课题[11]。有机-无机异质结构结合了无机材料与有机材料的特性，提供了创造具有多种功能器件的可能性。例如，基于有机-无机杂化钙钛矿的高效太阳能电池和性能良好的光电探测器已被证明[12]。通过选择不同的无机和有机材料，可以获得不同的有机-无机异质结构，产生不同的光电性能。

在此，本文提出了一种基于有机-TMDs 异质结构的光电突触晶体管。通过选择合适的有机半导体与TMDs，我们构筑了基于 MoS₂-并五苯异质结构的光电突触晶体管，成功模拟了生物突触的突触行为。

2. 实验部分

2.1. 器件的制备

本文中，选取了并五苯和 MoS₂两种材料作为研究对象，成功构建了基于 MoS₂-并五苯异质结构的光

电突触晶体管，示意图如图 1(a)所示。

并五苯是由五个苯环组成，化学式为 $C_{22}H_{14}$ ，分子结构呈现出平面状。它的平面结构使其分子间以较强的 $\pi-\pi$ 相互作用相连接，使其具有良好的光电性能。它是最早用于研究有机场效应晶体管的有机半导体材料之一[13]。较强的 $\pi-\pi$ 共轭体系，可用于有机发光二极管的发光层材料，有可能提高发光效率和稳定性[14]。

MoS_2 具有良好的电子、光学和光电子特性。它每层由共价键合的 S-Mo-S 六边形单元组成，层间存在弱的范德华键。其本身是一种间接带隙半导体，带隙为 1.29 eV。然而，当 MoS_2 的厚度降低到单层时，它转变为直接带隙半导体，带隙为 1.9 eV，且光致发光增强。

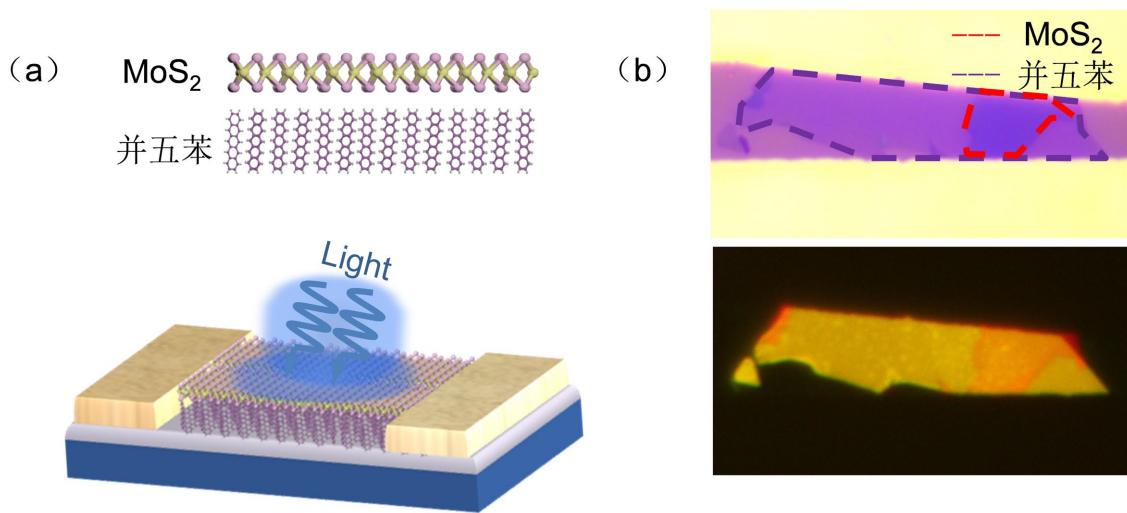


Figure 1. (a) Schematic diagram of the optically stimulated synaptic transistor; (b) Optical microscopy (top) and fluorescence microscopy (bottom) images of the optoelectronic synaptic transistor. Scale bar: 20 μm

图 1. (a) 光刺激突触晶体管的示意图；(b) 光电突触晶体管的光学(上)及荧光(下)显微镜图像，比例尺：20 μm

第一步，异质结构的制备。首先，在 SiO_2/Si 衬底上利用微间距法和等离子体刻蚀技术生长出合适厚度的并五苯，作为光敏层，置于结构的最底部。然后，通过干转移法，将机械剥离的单层 MoS_2 转移到并五苯上，作为水平方向上的载流子传输通道层。异质结构的光学显微镜图像、荧光显微镜图像如图 1(b)所示。

机械剥离法是获取二维材料的基本方法，利用胶带等工具的强粘附力，对依赖范德华力的块状晶体进行反复粘贴和剥离操作，获得少层甚至是单层的二维材料。在本文中，我们将选取 MoS_2 的块状晶体置于胶带(如 Scotch 胶带)上，然后裁取一节胶带与有块状晶体的胶带对叠并快速撕开，重复多次。然后，取一块 PMMA 衬底，将对撕的胶带粘到 PMMA 衬底上并快速撕开。这样，我们就能在 PMMA 衬底上得到少层以及单层 MoS_2 样品。

干转移法是将在衬底上生长或其他方法获得的材料，在干燥环境下，转移到另一种目标衬底上的方法。它利用材料与衬底之间的弱相互作用，将材料转移到另一具有强相互作用的衬底上，实现材料的转移。本文中，我们将机械剥离在 PMMA 衬底上的 MoS_2 ，利用材料与 PMMA 衬底之间的相互作用弱于与并五苯之间的相互作用，将剥离的单层 MoS_2 转移到并五苯上。

机械剥离的单层 MoS_2 和并五苯的光学显微镜图像及光致发光光谱(PL)如图 2 所示。PL 谱显示，异质结构区域(HS)的 PL 谱明显受到并五苯的影响，这些特性为我们器件模拟生物突触提供了基础。

第二步，突触器件的制备。通过挑电极法，在异质结构上平行放置两片 100 nm 厚的金电极作为延伸电极。

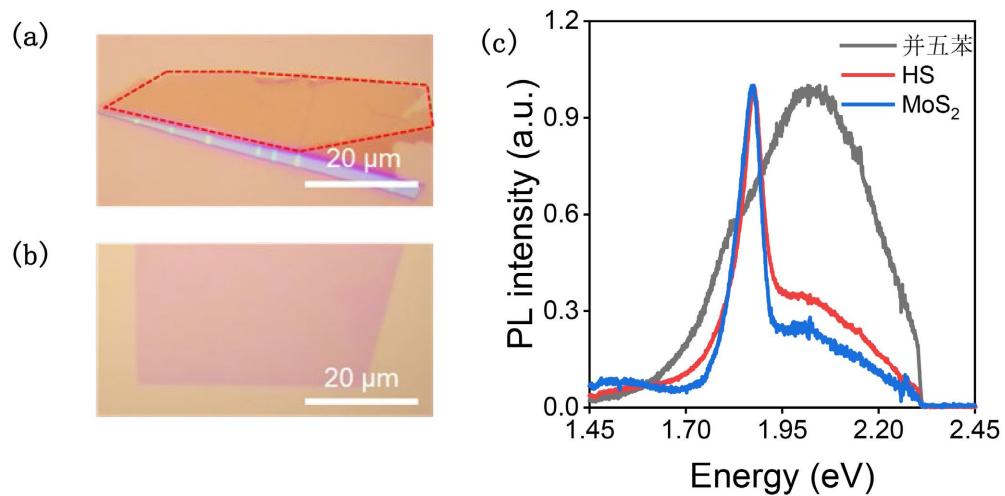


Figure 2. (a, b) Optical microscopy images of mechanically exfoliated MoS₂ (a) and pentacene (b) on SiO₂/Si substrates. Scale bars: 20 μm; (c) Photoluminescence spectra of MoS₂, pentacene, and heterostructure

图 2. (a, b) 在 SiO₂/Si 衬底上机械剥离的 MoS₂ (a) 和并五苯(b) 的光学显微镜图像，比例尺：20 μm；(c) MoS₂、并五苯和异质结构的 PL 谱

2.2. 器件性能测试

本文利用高真密度探针台，Keysight B2902B 精密型源表等仪器对器件进行测试。通过改变光刺激的强度、脉冲宽度及脉冲数量对器件进行调制。得益于异质结构独特的光电特性，该器件实现了多种生物突触功能，如短期可塑性(STP)、长期可塑性(LTP)以及短期记忆(STM)向长期记忆(LTM)的转变。

3. 实验结果

3.1. 器件的光电特性

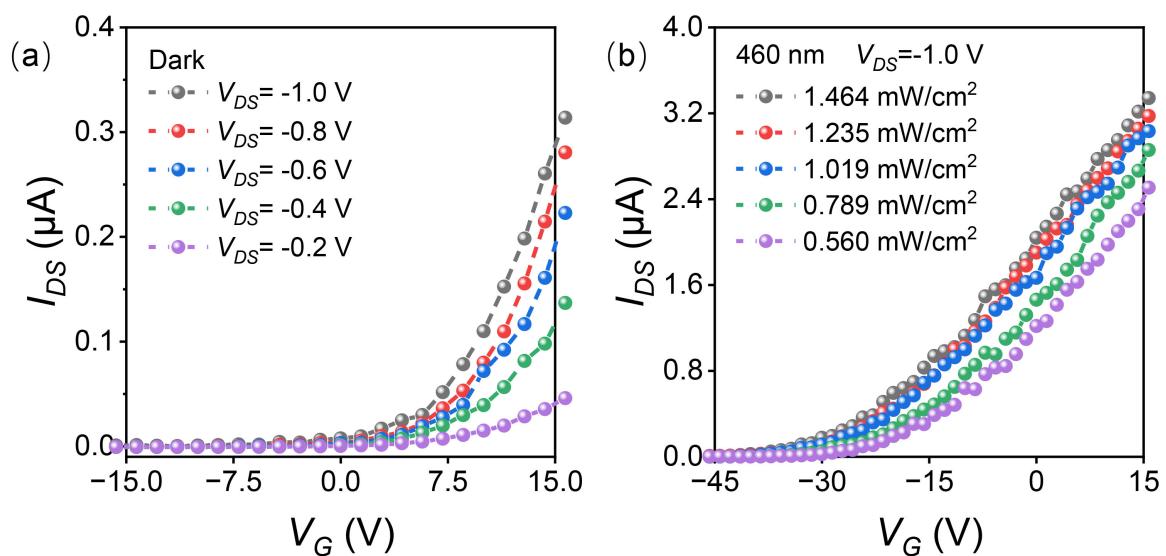


Figure 3. (a) Transfer characteristics of the optoelectronic synaptic transistor; (b) Light-intensity-modulated transfer characteristics under illumination at 460 nm and source-drain voltage (V_{DS}) at -1 V

图 3. (a) 光电突触晶体管的转移特性曲线；(b) 光强可调的转移特性曲线，条件：光源波长 460 nm， $V_{DS} = -1$ V

本文测试了器件在无光照和有 460 nm 光照(不同光强)情况下的转移特性曲线, 如图 3(a)、图 3(b)所示。从 460 nm 光照情况下, 转移特性曲线可以看出: 在光照下, MoS₂作为水平通道层, 其受到并五苯的影响, 在负的栅压(V_G)下仍有一定的光电流。这是由于在负的栅压下, 器件在并五苯层内产生的大量光生电子-空穴对发生分离, 光生电子进入 MoS₂中, 使沟道中产生电流, 这为之后的光刺激突触性能提供了基础。

3.2. 器件的突触行为

生物突触是一种复杂的结构, 由突触前端、突触间隙和突触后端组成(图 4(a))。突触前端含有充满乙酰胆碱等神经递质的囊泡。突触间隙是分隔突触前膜和突触后膜的一个小间隙(约 20~40 nm)。突触后端上有与突触前端释放的神经递质结合的受体。当生物受到外部的刺激后, 突触前端上的囊泡释放出神经递质, 通过突触间隙与突触后端的受体结合, 完成这一部分信号的传递。

器件在负栅极电压下显示出显著的持续光电导率(PPC)效应(图 4(b))。在光刺激时, 光电流迅速上升, 表明快速的光触发响应。当光关闭时, 光电流缓慢地衰减到一个新的平衡状态, 而不是回到零。PPC 状态在 10 s 内保持稳定, 并且可以通过施加正栅极电压快速擦除。

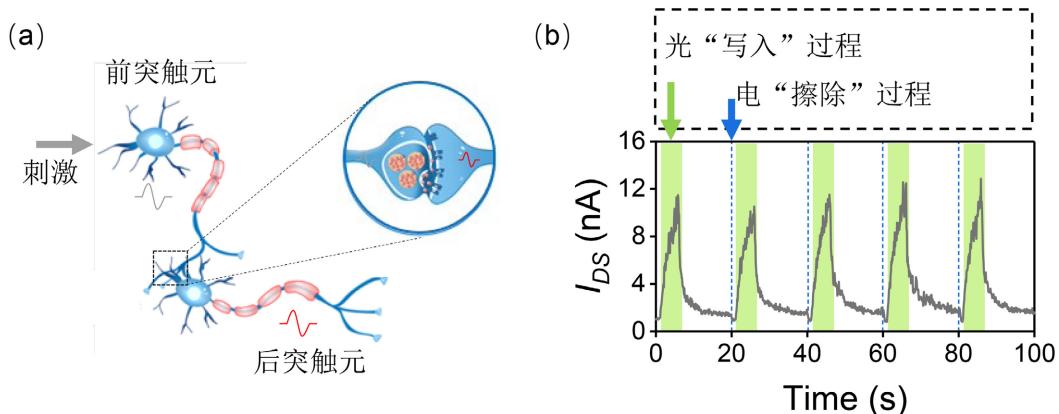


Figure 4. (a) Schematic diagram of a biological synapse; (b) Response of the transistor to five optical “write”/electrical “erase” cycles under $V_G = -50$ V and $V_{DS} = -3$ V. Green shaded regions indicate the duration of optical pulses (1.464 mW/cm², 5 s), and blue dashed lines mark the timing of electrical pulses with a voltage of 20 V

图 4. (a) 生物突触的示意图; (b) 在 $V_G = -50$ V, $V_{DS} = -3$ V 时, 晶体管对五个光“写入”/电“擦除”周期的响应。绿色阴影表示光脉冲的持续时间, 光强 1.464 mW/cm², 持续 5 s。蓝色虚线表示电脉冲的施加时刻, 电压为 20 V

突触活动可以调节相邻神经元之间的连接强度(突触权重), 被称为突触可塑性。在这里, 我们的器件通道电导率被认为是突触权重, 它可以通过调节光照信息来调节, 如光脉冲的持续时间、数量和强度[15]。如图 3(b), 我们通过调节光的强度来改变晶体管的通道电导率。直观来说, 通道的电流随光强变大而变大。

突触可塑性的一个特征性表现是成对脉冲促进[15], 即连续的突触前刺激会引起突触后信号的放大; 它对于视觉或听觉信息的实时解码/识别至关重要。我们的器件的 PPF 行为已经通过向器件施加两个连续的光脉冲(460 nm, 1.464 mW/cm², 0.5 s), 间隔时间为 0.6 s 来证明。如图 5(a)所示, 第二个兴奋性突触后电流(EPSC)值明显高于第一个 EPSC 值, 这是由于注入 MoS₂的光生电子尚未饱和所致。接下来, 我们利用 PPF 指数(A_2/A_1)进一步研究人工突触的 PPF 特性, 其中 A_1 和 A_2 分别为第一和第二 EPSC 的值。PPF 指数由下式给出[15]:

$$\text{PPFinde} = C_0 + C_1 \times \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_1}\right) + C_2 \times \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_2}\right) \quad (1)$$

τ_1 和 τ_2 分别表示快相和慢相的特征弛豫时间，代表器件对电荷的捕获能力。拟合的 τ_1 和 τ_2 分别为~0.039 和~2.14 s， τ_2 比 τ_1 大 2 个数量级，模拟了生物突触的行为。短间隔的双脉冲导致 MoS₂ 中电荷的暂态积累，增强导电通道。 τ_1 代表器件对电荷的快速捕获/释放，由电场驱动的电荷迁移率决定。 τ_2 代表器件的界面态电荷的缓慢弛豫， τ_2 越长代表器件的长期记忆能力越强。随着时间间隔(Δt)从 0.6 s 增加到 10.5 s，PPF 指数从 158.2% 下降到 121.3% (图 5(b))。

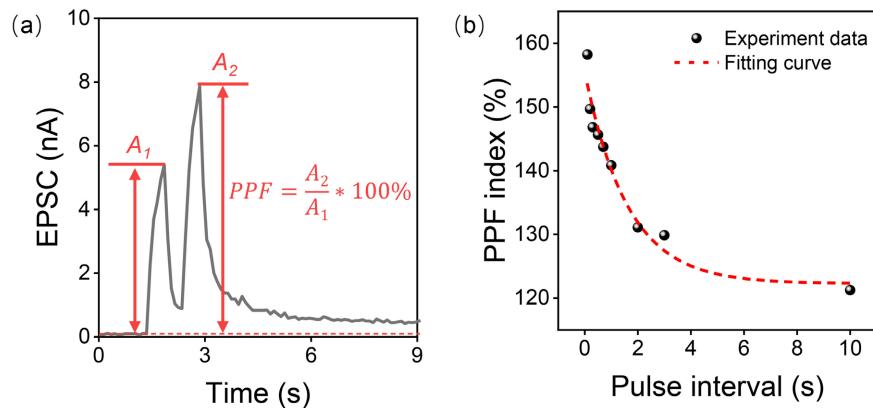


Figure 5. (a) PPF behavior of the transistor. Experimental conditions: light intensity = 1.464 mW/cm², pulse duration = 0.5 s, interpulse interval = 0.6 s at VG = -50 V, VDS = -3 V; (b) PPF index as a function of pulse interval

图 5. (a) 晶体管的成对脉冲促进行为。光强为 1.464 mW/cm²，光持续时间为 0.5 s，间隔为 0.6 s，VG = -50 V，VDS = -3 V；(b) 成对脉冲促进指数随脉冲间隔时间的变化

如图 6(a)、图 6(b)所示，在光刺激下，光生载流子在光敏层中产生。于此同时，在负 V_G 作用下，光生电子-空穴对的空间分离，光生空穴向靠近衬底区域内转移，光生电子转移到 MoS₂ 层改变通道层内电导，导致通道层电流增强。在电“擦除”阶段，通过施加大的正 V_G 尖峰，可以很容易地擦除 PPC 态，使得异质结中的电荷载流子重新分布。

如图 6(c)所示，我们的器件在最先进的设备中仍具有较高的 PPF 值[16]-[21]。

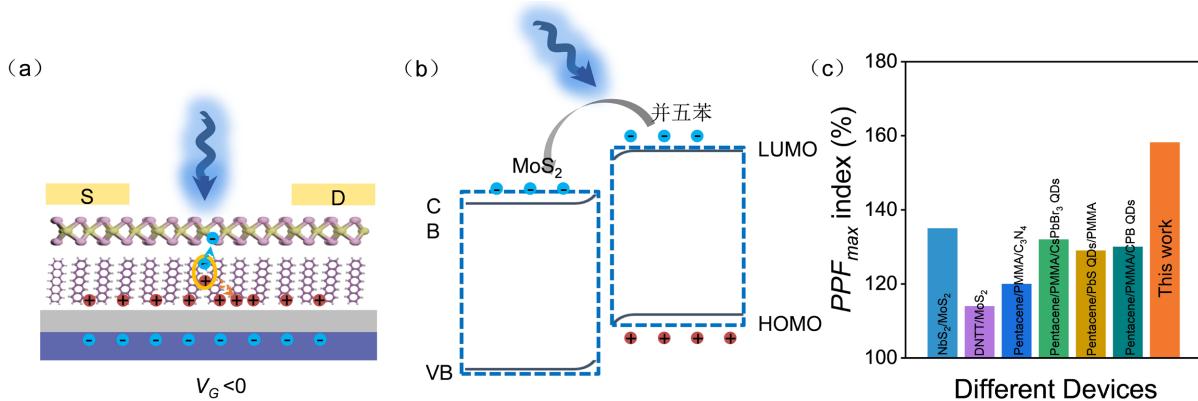


Figure 6. (a, b) Schematic diagram of photogenerated carrier transport (a) and band alignment (b); (c) Comparison with the maximum PPF value reported in previous literature

图 6. (a, b) 光生载流子传输示意图(a)及能带图(b)；(c) 与以前文献报道的最大 PPF 值的比较

3.3. 器件的类脑行为

长期以来，大脑记忆规律一直是人们关注的话题。Atkinson 和 Shiffrin 提出，大脑通过重复学习来巩

固记忆，记忆水平按保留时间可分为短期记忆和长期记忆[22]。如图 7(a)所示，最近传入的信息被瞬间编码并以短期记忆的形式暂时存储在海马中；这些记忆要么通过预演学习转化为长期记忆，要么被遗忘。同样，我们的器件也可以通过改变光脉冲的持续时间、数量来实现 STM 向 LTM 的过渡。在这里，光脉冲的持续时间、次数被视为学习时间、次数。如图 7(b)所示，随着光脉冲持续时间从 0.5 s 增加到 10 s，器件的记忆保持时间显著延长，这意味着 STM 向 LTM 过渡。此外，光脉冲的次数对器件的学习和遗忘行为也有类似的影响(图 7(c))。从 STM 向 LTM 的过渡本质上是器件内部电导状态从瞬态响应到稳态存储的演化过程。这一过程不仅模拟了生物突触的可塑性机制，还为实现类脑计算的低能耗、高鲁棒性提供了物理基础。这些结果表明，我们的器件成功地模拟了大脑的学习和记忆模式。

因此，我们构筑的光电突触器件成功模拟生物神经系统中的突触功能，能够快速响应光信号，快速地将光信号转化为电信号，实现对外部刺激的快速感知、处理。

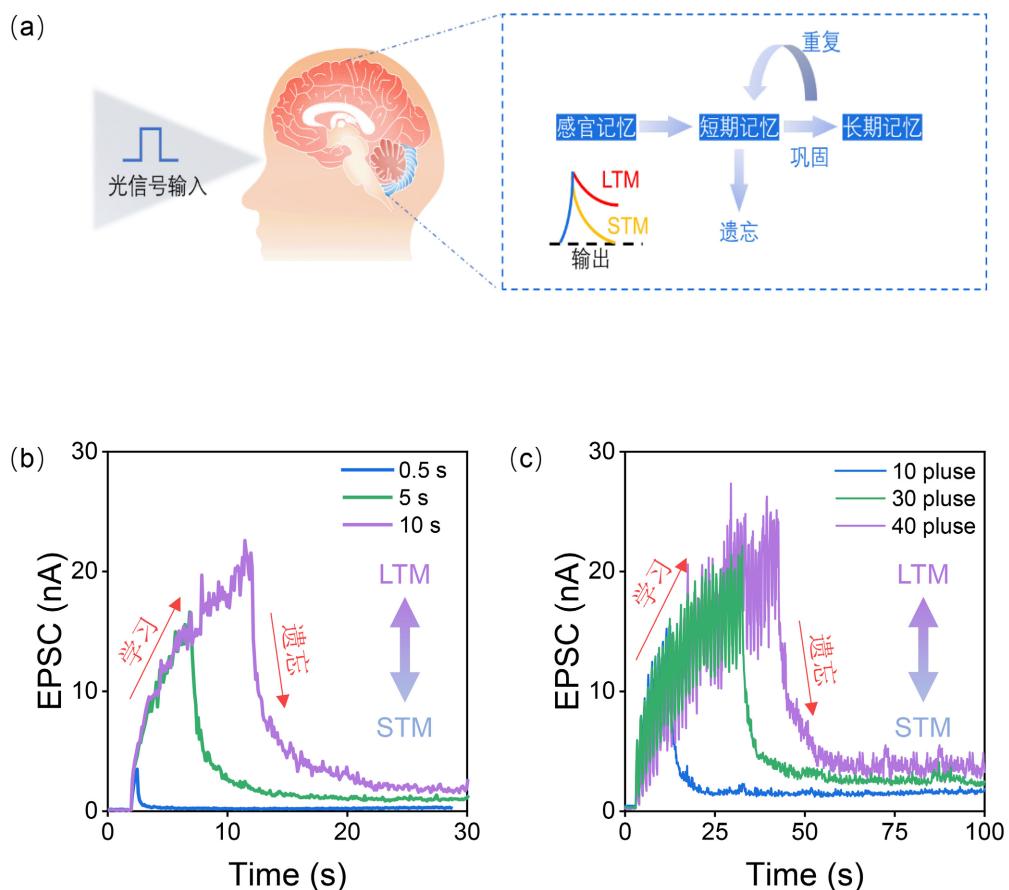


Figure 7. (a) Schematic diagram of human brain memory modes: (b, c) Excitatory postsynaptic current (EPSC) of the transistor as a function of optical pulse duration (b) and number of optical pulses (c) Light intensity: 1.464 mW/cm^2 , $\text{VG} = -50 \text{ V}$, $\text{VDS} = -3 \text{ V}$

图 7.(a) 人类大脑记忆模式示意图；**(b, c)** 晶体管的兴奋性突触后电流与光脉冲持续时间(b)、光脉冲数(c)的关系。光强为 1.464 mW/cm^2 , $\text{VG} = -50 \text{ V}$, $\text{VDS} = -3 \text{ V}$

4. 总结

本文，我们成功堆叠了 $\text{MoS}_2/\text{并五苯}$ 异质结构，同时根据其光电响应能力构筑了基于该结构的光电突触晶体管。我们发现，在使用 460 nm 波长的激光照射时，器件表现出了优异的光响应和记忆能力。我

们通过对器件施加光脉冲，其非易失性能力展现出明显的可调性，并且可以通过施加光刺激和电刺激来实现对器件的“写入”和“擦除”。之后，我们进一步地模拟了其他的突触行为，包括兴奋性突触后电流、成对脉冲促进、脉冲持续时间依赖可塑性、脉冲次数依赖可塑性。随着光脉冲脉冲的持续时间、次数的增强，器件的记忆保持时间显著延长，这意味着器件从 STM 向 LTM 过渡。这些结果表明，我们的器件成功地模拟了大脑的学习和记忆模式。

基金项目

感谢中国国家自然科学基金(NSFC)(62204117)、江苏省青年科学基金 BK20210275、江苏省研究生研究与实践创新计划(KYCX22 0325)的支持。

致 谢

我们感谢南京航空航天大学显微镜与分析中心的光学表征和数据分析。

参考文献

- [1] Zou, X., Xu, S., Chen, X., Yan, L. and Han, Y. (2021) Breaking the Von Neumann Bottleneck: Architecture-Level Processing-in-Memory Technology. *Science China Information Sciences*, **64**, Article ID: 160404. <https://doi.org/10.1007/s11432-020-3227-1>
- [2] Hubel, D.H. and Wiesel, T.N. (1962) Receptive Fields, Binocular Interaction and Functional Architecture in the Cat's Visual Cortex. *The Journal of Physiology*, **160**, 106-154. <https://doi.org/10.1113/jphysiol.1962.sp006837>
- [3] Zhang, L., Wang, S. and Liu, B. (2018) Deep Learning for Sentiment Analysis: A Survey. *WIREs Data Mining and Knowledge Discovery*, **8**, e1253. <https://doi.org/10.1002/widm.1253>
- [4] Tang, W., Yang, Q., Xu, H., Guo, Y., Zhang, J., Ouyang, C., et al. (2024) Review of Bio-Inspired Image Sensors for Efficient Machine Vision. *Advanced Photonics*, **6**, Article ID: 024001. <https://doi.org/10.1111/ap.6.2.024001>
- [5] Dodd, A., Jayachandran, D., Pannone, A., Trainor, N., Stepanoff, S.P., Steves, M.A., et al. (2022) Active Pixel Sensor Matrix Based on Monolayer MoS₂ Phototransistor Array. *Nature Materials*, **21**, 1379-1387. <https://doi.org/10.1038/s41563-022-01398-9>
- [6] Meng, Y., Feng, J., Han, S., Xu, Z., Mao, W., Zhang, T., et al. (2023) Photonic Van Der Waals Integration from 2D Materials to 3D Nanomembranes. *Nature Reviews Materials*, **8**, 498-517. <https://doi.org/10.1038/s41578-023-00558-w>
- [7] Yuan, L., Huang, Y., Chen, X., Gao, Y., Ma, X., Wang, Z., et al. (2024) Improving Both Performance and Stability of n-Type Organic Semiconductors by Vitamin C. *Nature Materials*, **23**, 1268-1275. <https://doi.org/10.1038/s41563-024-01933-w>
- [8] Hao, D., Zhang, J., Dai, S., Zhang, J. and Huang, J. (2020) Perovskite/Organic Semiconductor-Based Photonic Synaptic Transistor for Artificial Visual System. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **12**, 39487-39495. <https://doi.org/10.1021/acsami.0c10851>
- [9] Jiang, Y., Chen, S., Zheng, W., Zheng, B. and Pan, A. (2021) Interlayer Exciton Formation, Relaxation, and Transport in TMD Van Der Waals Heterostructures. *Light: Science & Applications*, **10**, Article No. 72. <https://doi.org/10.1038/s41377-021-00500-1>
- [10] Lopez-Sanchez, O., Lembke, D., Kayci, M., Radenovic, A. and Kis, A. (2013) Ultrasensitive Photodetectors Based on Monolayer MoS₂. *Nature Nanotechnology*, **8**, 497-501. <https://doi.org/10.1038/mnano.2013.100>
- [11] Khan, J., Ahmad, R.T.M., Tan, J., Zhang, R., Khan, U. and Liu, B. (2022) Recent Advances in 2D Organic-Inorganic Heterostructures for Electronics and Optoelectronics. *SmartMat*, **4**, e1156. <https://doi.org/10.1002/smm.2.1156>
- [12] Tian, Y., Zhang, X., Zhao, K., Miao, X., Deng, T., Fan, W., et al. (2024) High-Entropy Hybrid Perovskites with Disordered Organic Moieties for Perovskite Solar Cells. *Nature Photonics*, **18**, 960-966. <https://doi.org/10.1038/s41566-024-01468-1>
- [13] Jurchescu, O.D., Popinciuc, M., van Wees, B.J. and Palstra, T.T.M. (2007) Interface-Controlled, High-Mobility Organic Transistors. *Advanced Materials*, **19**, 688-692. <https://doi.org/10.1002/adma.200600929>
- [14] Zhuo, Z., Ni, M., Yu, N., Zheng, Y., Lin, Y., Yang, J., et al. (2024) Intrinsically Stretchable Fully π-Conjugated Polymer Film via Fluid Conjugated Molecular External-Plasticizing for Flexible Light-Emitting Diodes. *Nature Communications*, **15**, Article No. 7990. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-50358-1>
- [15] Han, C., Han, X., Han, J., He, M., Peng, S., Zhang, C., et al. (2022) Light-Stimulated Synaptic Transistor with High PPF

- Feature for Artificial Visual Perception System Application (adv. Funct. Mater. 22/2022). *Advanced Functional Materials*, **32**, Article ID: 211053. <https://doi.org/10.1002/adfm.202270129>
- [16] Huang, P., Jiang, B., Chen, H., Xu, J., Wang, K., Zhu, C., et al. (2023) Neuro-Inspired Optical Sensor Array for High-Accuracy Static Image Recognition and Dynamic Trace Extraction. *Nature Communications*, **14**, Article No. 6736. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-42488-9>
- [17] Wang, J., Yang, B., Dai, S., Guo, P., Gao, Y., Li, L., et al. (2023) Weak Light-Stimulated Synaptic Transistors Based on MoS₂/Organic Semiconductor Heterojunction for Neuromorphic Computing. *Advanced Materials Technologies*, **8**, Article ID: 2300449. <https://doi.org/10.1002/admt.202300449>
- [18] Park, H., Kim, H., Lim, D., Zhou, H., Kim, Y., Lee, Y., et al. (2020) Retina-Inspired Carbon Nitride-Based Photonic Synapses for Selective Detection of UV Light. *Advanced Materials*, **32**, Article ID: 1906899. <https://doi.org/10.1002/adma.201906899>
- [19] Wang, K., Dai, S., Zhao, Y., Wang, Y., Liu, C. and Huang, J. (2019) Light-Stimulated Synaptic Transistors Fabricated by a Facile Solution Process Based on Inorganic Perovskite Quantum Dots and Organic Semiconductors. *Small*, **15**, Article ID: 1900010. <https://doi.org/10.1002/smll.201900010>
- [20] Zhang, J., Guo, P., Guo, Z., Li, L., Sun, T., Liu, D., et al. (2023) Retina-Inspired Artificial Synapses with Ultraviolet to Near-Infrared Broadband Responses for Energy-Efficient Neuromorphic Visual Systems. *Advanced Functional Materials*, **33**, Article ID: 2302885. <https://doi.org/10.1002/adfm.202302885>
- [21] Wang, Y., Lv, Z., Chen, J., Wang, Z., Zhou, Y., Zhou, L., et al. (2018) Photonic Synapses Based on Inorganic Perovskite Quantum Dots for Neuromorphic Computing. *Advanced Materials*, **30**, Article ID: 1802883. <https://doi.org/10.1002/adma.201802883>
- [22] Shiffrin, R.M. and Atkinson, R.C. (1969) Storage and Retrieval Processes in Long-Term Memory. *Psychological Review*, **76**, 179-193. <https://doi.org/10.1037/h0027277>