文章编号: 1007 − 4252(2025)01 − 0064 − 06 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0007

基于二维铁电钙钛矿的人工光突触晶体管制备与性能研究

章 鹏, 陈耿旭*
(福州大学物理与信息工程学院, 福建 350108)

摘要: 神经形态计算通过模拟生物神经系统的突触可塑性, 为构建低功耗、高容错的智能感知系统提供了新思路。本文提出了一种基于二维铁电钙钛矿材料 $(PMA)_2PbCl_4$ 的光突触晶体管。该材料兼具铁电极化特性和宽光谱光响应能力。通过将其与高迁移率的有机半导体 PDVT-10 结合, 设计了一种新型人工光突触器件。实验结果表明, 该器件在光脉冲下能够成功模拟兴奋性突触后电流 (EPSC) 和双脉冲易化(PPF)等生物突触功能。基于该器件的神经网络在 Fashion-MNIST 数据集分类任务中表现出优异的抗噪声性能。本研究为开发高性能的神经形态视觉系统提供了新的材料与器件设计策略。

关键词: 人工突触; 神经形态计算; 铁电钙钛矿; 二维材料
中图分类号: TN321+.5 **文献标志码:** A

Studies on the fabrication and performance of artificial optical synaptic transistor based on 2D perovskite ferroelectrics

ZHANG Peng, CHEN Geng-xu*
(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fujian 350108, China)

Abstract: By simulating the synaptic plasticity of biological nervous systems, neuromorphic computing provides a new idea for building intelligent sensing systems with low power consumption and high fault tolerance. In this paper, an optical synaptic transistor based on a two-dimensional perovskite ferroelectrics $(PMA)_2PbCl_4$ is proposed, which has both ferroelectric polarization characteristics and wide-spectrum photoresponsiveness. By combining it with the high mobility organic semiconductor PDVT-10, a novel artificial optical synaptic device was designed. Experimental results show that the device successfully simulates biological synaptic functions such as excitatory post synaptic current (EPSC) and paired pulse facilitation (PPF) under light pulses. The neural network based on this device shows excellent anti-noise performance in the classification task of Fashion-MNIST dataset. This study provides a new material and device design strategy for the development of high-performance neuromorphic vision systems.

收稿日期: 2025−02−12; **修订日期:** 2025−02−26
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. NFSC-62274035); 福建省自然科学基金项目 (No. 2024J01253).
作者简介: 章 鹏(2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为神经形态器件(E-mail: 1351737628@qq.com).
通信作者: 陈耿旭 (1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为神经形态器件 (E-mail: gxchen@fzu.edu.cn).

Key words: artificial synapse; neuromorphic computing; perovskite ferroelectrics; two-dimensional material

0 引言

随着人工智能技术的快速发展, 基于传统的冯·诺依曼架构的计算系统在图像识别任务中面临功耗高、实时性差以及抗干扰能力不足等挑战, 尤其在复杂环境 (如光照变化、传感器噪声) 下, 图像分类的准确性显著下降[1-3]。例如, 在安防监控、自动驾驶等领域, 常因背景干扰或传输噪声导致目标物体的特征模糊, 传统神经网络需依赖大量数据增强或预处理算法来提升其鲁棒性, 这不仅增加了计算复杂度, 也限制了边缘设备的能效。受生物视觉系统中神经元与突触的高度并行、自适应学习机制的启发, 神经形态计算通过模拟突触可塑性, 为构建低功耗、高容错的智能感知系统提供了新思路[4, 5]。

神经形态计算的核心在于通过模拟生物神经系统中的神经元和突触功能, 构建高效的计算模型与硬件设备。人工光突触器件中所使用的光信号的高带宽特性, 使其频率范围远超传统的电信号系统[6]。相较于传统电突触器件, 光突触器件能够支持对多通道光信号的并行处理, 同时可以避免电突触中常见的串扰和信号失真问题, 这使其计算吞吐量得到显著提升。光突触器件在高速计算任务中表现出显著优势, 能够以更快的速度和更高的精度完成图像处理任务。然而, 现有光突触器件多受限于材料光电响应范围窄、载流子传输效率低等问题, 难以在宽光谱范围内实现高效光信号处理, 更缺乏对噪声干扰的动态适应能力。因此, 开发高性能光突触晶体管的关键, 在于选择具有优异光电特性的材料, 以满足神经形态计算与显示应用的需求。

近年来, 人们已经在多种材料上开展了研究, 来制造人工突触晶体管, 其中包括硫族化合物[7]、金属卤化物钙钛矿[8]、金属氧化物[9]和有机半导体[10]。而在这些材料中, 二维钙钛矿材料因其可溶液加工的特点和优异的光电特性, 而在神经形态器件中展现出了巨大的潜力。但同时, 钙钛矿的低载流子输运也会对器件性能造成一定的影响[11-14]。

在本研究中我们提出了一种基于二维铁电钙钛矿材料 $(PMA)_2PbCl_4$ 的光突触晶体管。该材料兼具铁电极化特性与优异的光响应能力, 可在溶液中加工; 通过将其与高迁移率有机半导体 PDVT-10 结合, 设计了一种新型光突触晶体管。实验表明, 器件在不同波长光脉冲的刺激下成功模拟了生物突触的核心功能: 兴奋性突触后电流 (EPSC) 和配对脉冲促进 (PPF), 同时还实现了突触权重的多级调控, 为动态光信号处理奠定了硬件基础。此外, 我们所制备的人工光突触晶体管可以用于噪声环境图像识别, 显著提升了图像分类的鲁棒性, 从而减少了对复杂后端去噪算法的依赖。本研究通过铁电材料与有机半导体的结合, 展示了光突触器件在复杂环境下的应用潜力, 为开发高鲁棒性神经形态视觉系统提供了新策略。

1 实验

1.1 材料准备与测试

氯化铅 ($PbCl_2$, 99% +) 和苄胺盐酸盐 (PMACl, 99% +) 均来自 Adamas-beta 公司, 二甲基亚砜 (DMSO, 99.9%) 来自 Sigma-Aldrich。p 型高分子量 π 延伸聚合物半导体聚 [2,5-双 (烷基) 吡咯-[3,4-c] 吡咯-1,4(2H,5H)-二-5,5 ' -二 (噻吩-2-基)- 2,2 ' -(E) -2-(2(噻吩-2-基) 乙烯基) 噻吩](PDVT-10, Mw=183 K), 购自 1-Materials。含 100 nm 二氧化硅层的硅片来自苏州晶矽电子科技有限公司。

器件转移特性曲线等晶体管性能的测试均通过半导体参数分析仪 (Keysight B2912A) 在室温、大气环境中完成。

1.2 人工光突触晶体管的制备

人工光突触晶体管为底栅顶接触的结构。晶体管的栅极为硅基底, 硅基底上有 100 nm 厚的 SiO_2 绝缘层。硅片在经过三次丙酮、异丙醇、去离子水超声清洗后, 用高纯度 N_2 吹干。制备的二维铁电钙钛矿前驱体溶液中 $PbCl_2$ 和 PMACl 的浓度分别为 0.1 M 和 0.2 M, 溶剂为 DMSO。将前驱体溶液旋涂 (3 000 rpm, 60 s) 至硅片上, 在大气环境下退火 (130 ℃, 2 h) 后, 形成二维铁电钙钛矿薄膜层。将溶解于氯苯中的 PDVT-10(5 mg/mL) 旋涂

(1 000 rpm, 60 s) 在钙钛矿层上，在大气环境下退火 (150 ℃, 2 h)，以形成半导体层。最后通过掩模 (L = 30 μm, W = 1 000 μm)，以热蒸发的方式蒸镀 50 nm 厚的金电极，作为晶体管源漏电极。

2 结果与讨论

2.1 人工光突触晶体管的基本电学性能测试

晶体管为底栅顶接触结构，如图 1 所示。考虑到载流子的高效稳定传输，和半导体层与二维铁电钙钛矿材料 $(PMA)_2PbCl_4$ 的能级需要足够匹配的要求，我们最终采用 PDVT-10 作为器件的半导体层材料。

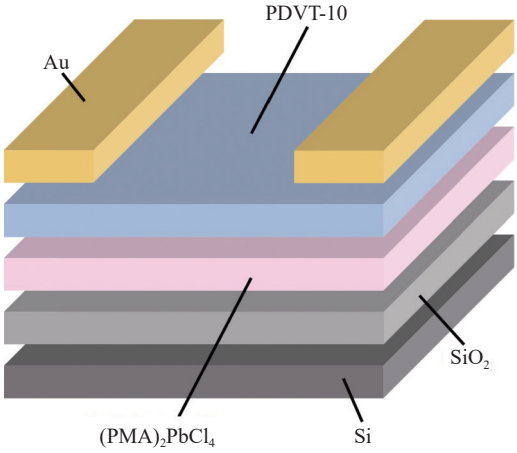

图 1 人工光突触晶体管结构图

Fig. 1 Schematic structure of the artificial optical synaptic transistor.

图 2(a)展示了 PMA_2PbCl_4 和 PDVT-10 的光吸收特性。从中可以看到，PMA_2PbCl_4 在 310 nm 的短波段具有较强的光吸收特性，而在 400~500 nm 波段二者均具有较高的光吸收特性，这为器件的光突触性能提供了前提。如图 2(b) 所示，$(PMA)_2PbCl_4$ 薄膜在室温下的呈现出明显的极化-电压 (P-V) 迟滞曲线，证实了 $(PMA)_2PbCl_4$ 薄膜在室温下具有明显的铁电行为。因此，基于二维铁电钙钛矿材料的晶体管器件，可以用于模拟生物突触的功能。图 2(c) 为制备的人工光突触晶体管的双扫回滞曲线，其展现出明显的迟滞行为。栅极电压在−10 V 到+10 V 范围的记忆窗口较小，说明在低栅极电压下，二维铁电钙钛矿层处于低极化状态；当栅电压的范围逐渐增大时，由于极化状态逐渐增强，可以观察到明显的窗口增大行为。

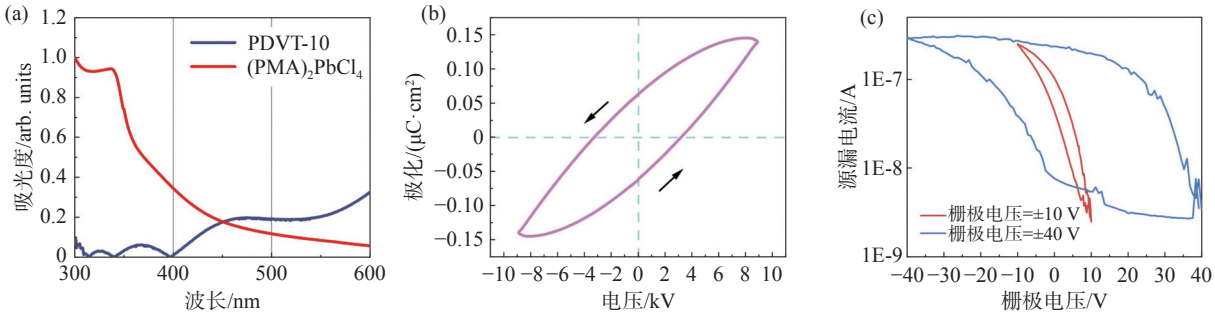

图 2 (a) $(PMA)_2PbCl_4$ 和 PDVT-10 的吸收光谱；(b) $(PMA)_2PbCl_4$ 的 P-V 迟滞曲线；(c) 晶体管的双扫回滞曲线

Fig. 2 (a) Absorption spectra of $(PMA)_2PbCl_4$ and PDVT-10. (b) P-V hysteresis curve of $(PMA)_2PbCl_4$. (c) Double sweep hysteresis curves of the transistor.

2.2 有机薄膜晶体管的突触性能测试及机理解释

图 3(a) 展示了生物突触的结构示意图。突触作为连接两个神经元的关键节点，是通过前膜释放神经递质至后膜，了实现神经元间的信息传递的。突触连接强度可通过训练进行动态调整，这一机制被认为是生物体实现学习与记忆功能的重要基础。如图 3(b) 所示，我们通过对晶体管栅极施加 1 V 的栅极电压使二维铁电钙钛矿薄膜发生极化后，分别用 310 nm (1 mW/cm^2, 1 s) 和 425nm (0.95 μW/cm^2, 1 s) 的光脉冲对晶体管进行兴奋性突触后电流响应测试。结果表明，晶体管对两种波段的光脉冲均可产生光响应，而在 425 nm 的光脉冲刺激下，半导体层和二维铁电钙钛矿薄膜层共同产生的光电流的叠加峰值更高。当撤去光刺激时，突触后电流迅速衰减到低电流状态。这意味着突触的连接强度可以通过外部刺激来调节。

突触器件的学习记忆能力本质上源于其可塑性特性。基于时间尺度，可塑性通常被划分为短时

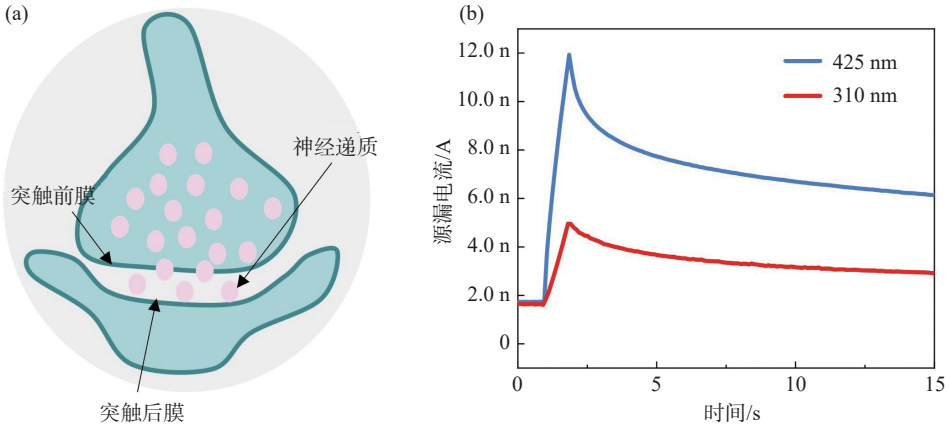

图 3　(a) 生物突触示意图; (b) 人工突触晶体管的 EPSC 响应

Fig. 3　(a) Schematic diagram of a biological synapse; (b) EPSC responses of the artificial optical synaptic transistor.

程可塑性 (Short Term Plasticity, STP) 和长时程可塑性 (Long Term Plasticity, LTP) 两种类型。其中, 双脉冲易化 (Paired Pulse Facilitation, PPF) 是 STP 的典型表现形式, 其表现为在连续双脉冲刺激下会出现第二次突触后电流幅值的增强现象。为验证器件的 PPF 行为, 实验采用间隔 30 ms、持续时间 1 s 的双光脉冲序列, 对晶体管进行刺激。突触后电流的幅值出现了显著的增大现象, 如图 4(a) 所示。这是因为, 首次光脉冲诱导的电子被铁电缺陷态捕获后形成内建电场, 当二次脉冲作用时, 该电场使更多的电子被铁电钙钛矿层捕获, 进一步加速了空穴在沟道层的积累过程, 从而实现了突触后电流幅值的增大。在经过不断地施加外部刺激与训练后, 突触的短程可塑性 (STP) 可以自发性地转变为长程可塑性 (LTP), 长期学习和记忆的能力与突触的长程可塑性密切相关。为了探索人工光突触晶体管从短程可塑性到长程可塑性的转变, 我们对器件施加了 10 个连续光脉冲刺激 (脉冲间隔时间仍为 30 ms), 来观察后电流的变化。图 4(b) 展示了晶体管在多个连续光脉冲持续刺激后的响应。可以看出, 随着脉冲刺激数量的不断增加, 兴奋性后电流的峰值也随之增大; 而在脉冲结束后, 兴奋性后电流的衰减变得缓慢, 即该电流可以保持在一个较高的水平。这是突触长时程可塑性的体现, 由此可以看出晶体管显现出了从 STP 到 LTP 转变的趋势。

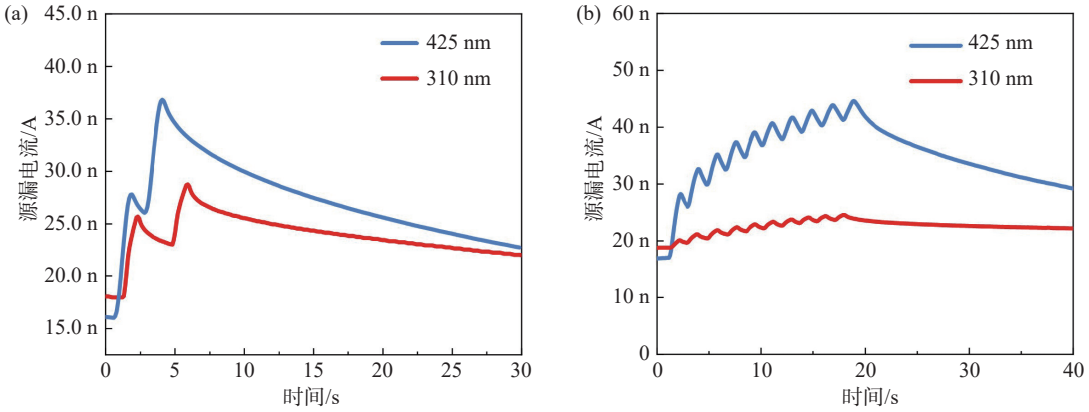

图 4　人工光突触晶体管的短程和长程可塑性。(a) PPF 响应; (b) 多个连续脉冲刺激下 EPSC 响应

Fig. 4　Short term plasticity and long term plasticity of the artificial optical synaptic transistor. (a) PPF response. (b) EPSC response under multiple consecutive pulse stimuli.

为了说明器件的工作机理, 我们对黑暗和存在光刺激这两种情况下的载流子情况进行了模拟, 如图 5 所示。在黑暗环境下, 晶体管中不会产生光生载流子, 所以无法在器件的源漏电极检测到电流。铁电钙钛矿层在光刺激下可以产生空穴和电子, 因能级的差异, 这些空穴可以很容易地穿过钙钛矿层

和半导体之间的低能带，半导体层中空穴的积累提高了沟道电导；而光生电子很难隧穿 PDVT-10 和 $(PMA)_2PbCl_4$ 之间较高的势垒，这阻碍了半导体层中积累的空穴与电子的复合，导致器件表现出非易失性。在光刺激停止后，这些光产生的载流子逐渐重组并消散回铁电层，导致电导出现衰减。其中正偏压振幅的增加，使铁电层的极化从初始状态逐渐过渡到向上极化状态，促进了光生空穴对能带的隧穿和光生载流子即将发生的重组，导致器件受到光刺激所产生的 EPSC 会快速增长至峰值；而随着时间推移，EPSC 会逐渐降低，并接近初始状态。因此，可以通过控制铁电层的极化来调节器件中的突触动力学，从而使器件实现多样化的功能。

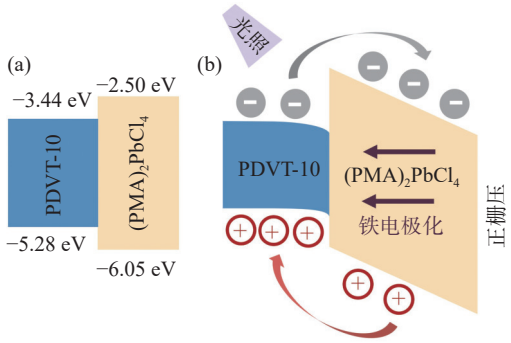

图 5 器件工作机理图。(a) 黑暗条件下的情况；(b) 存在光刺激的情况

Fig. 5 Diagram of device working mechanism. (a) The situation under dark condition. (b) The situation with light stimulation.

2.3 人工光突触晶体管在噪声环境图像识别中的应用

在监控和自动驾驶等领域，传统神经网络存在因背景干扰或传输噪声而导致目标物体特征模糊的缺点，需依赖大量数据增强或预处理算法来提升图像处理的准确度，这对计算复杂度和边缘设备的能效都产生了不利影响。为了进一步探索人工光突触晶体管在神经形态计算中的应用，我们将该器件应用于基于人工神经网络 (Artificial neural network, ANN) 的模式识别算法中。

图 6(a) 展示了本研究采用的三层人工神经网络架构，其中包括输入层、隐藏层和输出层。针对 Fashion-MNIST 数据集的 28×28 灰度图像，输入层通过 784 个神经元提取图像的特征信息。隐藏层包含 100 个神经元，采用激活函数 ReLU 对输入特征进行非线性变换与特征提取。输出层由 10 个神经元组成，分别对应 T 恤、裤子、包等 10 类日常用品的分类结果，每个神经元在最后会输出一个分类概率，然后由激活函数 Softmax 来选择最高的分类概率，作为预测结果。神经元间通过突触连接，其连接强度由突触权重来表征。在训练过程中，权重更新机制实现了突触强度的动态调整，这一过程模拟了生物神经系统的可塑性特性，为神经网络的学习与记忆功能提供了硬件基础。如图 6(b) 所示的电路为人工神经网络的等效电路，我们的器件所形成的权重矩阵可以用来实现人工神经网络计算，其中的源线 (SL)、字线 (WL) 和位线 (BL) 与晶体管的源极、栅极和漏极一致。为验证系统的抗噪能力，实验在输入图像中分别注入 25% 和 50% 的随机噪声(椒盐噪声模型)，并进行了三次独立的分类测试。

图 6(c) 中的结果显示，基于光突触的神经网络在噪声干扰下仍保持高稳定性：经过 20 个训练周期后，在 25% 和 50% 噪声水平下的平均分类准确率分别为86.31% 和 80.29%，相较于无噪声输入的

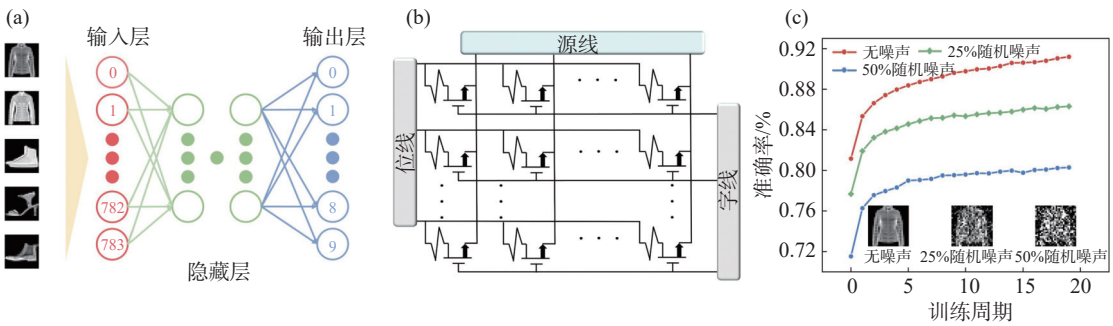

图 6 (a) 人工神经网络示意图；(b) 利用人工光突触晶体管实现的人工神经网络等效电路原理图；(c) ANN 对添加不同程度随机噪声的图像分类准确率随着训练周期的变化

Fig. 6 (a) Schematic of an ANN. (b) Schematic of the equivalent circuit of ANN realized by the artificial optical synaptic transistor. (c) The accuracy of ANN to classify images with different degrees of random noise as a function of training epoch.

情况 (91.19%), 准确率的下降幅度小于 12%。这一优势源于光突触的模拟计算特性——神经网络通过光突触器件, 可直接实现输入层与隐藏层的权值映射, 其连续的权值更新机制可自适应补偿噪声引起的特征失真。

3　结论

本文基于二维铁电钙钛矿 $(PMA)_2PbCl_4$ 和有机半导体 PDVT-10, 制备了可用于噪声环境下图像识别的人工光突触晶体管, 并成功模拟了突触的 EPSC、PPF、STP 和 LTP 等基本行为。结果表明, 通过控制铁电层的极化, 可以调节突触的权重及其对光脉冲的响应, 并调节突触器件的连接强度。在噪声环境下的图像识别任务中, 突触晶体管在 25% 和 50% 噪声水平下的分类准确率相较无噪声输入的情况仅下降了不到 12%。本文中基于人工突触晶体管所搭建的神经网络, 减少了对复杂后端去噪算法的依赖, 为神经形态计算的发展提供了硬件基础与一种新的策略。

参考文献:

[1] Zhang W, Jin L, Song E, et al. Removal of impulse noise in color images based on convolutional neural network[J]. Applied Soft Computing, 2019, 82: 105558.

[2] Qi S, Zhang Y, Wang C, et al. Representing Noisy Image Without Denoising[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2024, 46(10): 6713-6730.

[3] Vonneumann J. THE PRINCIPLES OF LARGE-SCALE COMPUTING MACHINES[J]. Annals of the History of Computing, 1989, 10(4): 246-256.

[4] Fuller E J, El Gabaly F, Leonard F, et al. Li-Ion Synaptic Transistor for Low Power Analog Computing[J]. Advanced Materials, 2017, 29(4): 1604310.

[5] Liu Y, Zhong J, Li E, et al. Self-powered artificial synapses actuated by triboelectric nanogenerator[J]. Nano Energy, 2019, 60: 377-384.

[6] Zhang J, Guo Z, Sun T, et al. Energy-efficient organic photoelectric synaptic transistors with environment-friendly $CuInSe_2$ quantum dots for broadband neuromorphic computing [J]. Smartmat, 2023, 5(4): e1246.

[7] Liu L, Cheng Z, Jiang B, et al. Optoelectronic Artificial Synapses Based on Two-Dimensional Transitional-Metal Trichalcogenide[J]. Acs Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(26): 30797-30805.

[8] Xu W, Cho H, Kim Y-H, et al. Organometal Halide Perovskite Artificial Synapses[J]. Advanced Materials, 2016, 28(28): 5916-5922.

[9] Sun L, Qu S, Du Y, et al. Bio-Inspired Vision and Neuromorphic Image Processing Using Printable Metal Oxide Photonic Synapses [J]. Acs Photonics, 2023, 10(1): 242–252.

[10] Wang X, Hao D, Huang J. Dye-sensitized perovskite/organic semiconductor ternary transistors for artificial synapses[J]. Science China-Materials, 2022, 65(9): 2521-2528.

[11] Li B-W, Osada M, Kim Y-H, et al. Atomic Layer Engineering of High-κ Ferroelectricity in 2D Perovskites[J]. Journal of the American Chemical Society, 2017, 139(31): 10868-10874.

[12] Sha T-T, Xiong Y-A, Pan Q, et al. Fluorinated 2D Lead Iodide Perovskite Ferroelectrics[J]. Advanced Materials, 2019, 31(30): 1901843.

[13] Zhang F, Zhu K. Breakthrough: Phase-Pure 2D Perovskite Films[J]. Joule, 2021, 5(1): 14-15.

[14] Guo L, Liu X, Cong R, et al. Patterned 2D Ferroelectric Perovskite Single-Crystal Arrays for Self- Powered UV Photodetector Boosted by Combining Ferro-Pyro-Phototronic and Piezo-Phototronic Effects[J]. Nano Letters, 2022, 22(20): 8241-8249.