

文章编号: 1000-7032(XXXX)XX-0001-28

面向神经形态计算的多模态忆阻器研究进展

苗印晖^{1#}, 石 伟^{1#}, 秦 旭¹, 周 嘉^{2,3*}, 牛巧利², 仪明东², 李 雯^{2*}

(1. 南京工业大学 柔性电子(未来技术)学院, 先进材料研究院, 柔性电子全国重点实验室, 江苏 南京 211816;

2. 南京邮电大学 信息材料与纳米技术研究院, 柔性电子全国重点实验室, 类脑电子材料与器件江苏高校重点实验室,
江苏 南京 210023;

3. 南京邮电大学 理学院, 江苏 南京 210023)

摘要: 随着神经形态计算向复杂环境感知与智能决策方向发展, 多模态信息的协同处理有助于提高信息利用效率、减少冗余数据传输并增强系统对复杂环境的认知能力。多模态忆阻器通过引入光、电、热、磁等两种及以上物理信号共同参与导电态调制, 实现多模态信息的协同编码与计算, 近年来受到广泛关注。本文综述了近年来面向神经形态计算的多模态忆阻器研究进展。首先, 介绍了多模态忆阻器的活性层材料体系, 包括无机材料、有机材料及有机-无机杂化材料; 在此基础上, 总结了多模态忆阻器主要工作机理, 包括导电细丝机制、界面效应机制、相变机制以及电荷俘获/释放机制; 进一步介绍了多模态忆阻器在人工突触与神经元模拟、神经网络计算以及多模态光电忆阻器拓展应用等方面的研究进展。最后, 总结了当前多模态忆阻器在材料体系设计、多物理场协同调控、器件稳定性及大规模集成方面面临的挑战, 并对未来发展方向进行了展望。

关键词: 多模态; 忆阻器; 光电忆阻器; 人工突触; 神经形态计算

中图分类号: TN364+. 2

文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20260194

CSTR: 32170. 14. CJL. 20260194

Recent Progress in Multimodal Memristors for Neuromorphic Computing

MIAO Yinhu^{1#}, SHI Wei^{1#}, QIN Xu¹, ZHOU Jia^{2,3*}, NIU Qiaoli², YI Mingdong², LI Wen^{2*}

(1. State Key Laboratory of Flexible Electronics, School of Flexible Electronics (Future Technologies), Institute of Adv.

Mater., Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China;

2. State Key Laboratory of Flexible Electronics, Jiangsu Key Laboratory for Flexible Electronics, Institute of Adv. Mater.,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

3. School of Science, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

* Corresponding Authors, E-mail: iamjzhou@njupt.edu.cn; iamwli@njupt.edu.cn

Abstract: As neuromorphic computing evolves toward complex environmental perception and intelligent decision-making, multimodal information processing has become increasingly important for improving information utilization efficiency and enhancing environmental cognition capability. Multimodal memristors, which employ two or more physical stimuli such as optical, electrical, thermal and magnetic signals to modulate conductance states cooperatively, have attracted extensive attention owing to their unique advantage in synergistic encoding and computation of multimodal information. Herein, the recent research progress of multimodal memristors for neuromorphic computing is reviewed. The active-layer material systems, including inorganic, organic, and organic-inorganic hybrid materials, are first introduced. Then, the major operating mechanisms, including conductive filament formation, interfacial effects, phase transition, and charge trapping/detrapping processes, are summarized. Furthermore, recent advances in artificial synapse and neuron emulation, neural network computing, and multimodal optoelectronic applications

收稿日期: XXXX-XX-XX; 修订日期: XXXX-XX-XX

基金项目: 国家自然科学基金(62375125, 62275130, U25A20256); 江苏省自然科学基金(BK20240138)

Supported by National Natural Science Foundation of China(62375125, 62275130, U25A20256); Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20240138)

are discussed. Finally, the challenges associated with material design, multi-physical-field synergistic modulation, device stability, and large-scale integration are analyzed, and future development directions are prospected.

Keywords: multimodal; memristor; optoelectronic memristor; artificial synapse; neuromorphic computing

1 引 言

数据密集型应用的增长暴露出传统冯·诺依曼计算架构的根本局限,内存与处理单元物理分离造成数据访问效率瓶颈,同时限制了系统速度与能效^[1-3]。与之相比,生物大脑在兼具并行运算和自主认知功能的同时,可实现超低功耗运行。受生物大脑启发,利用新型神经形态计算架构解决这一问题,有望模拟大脑低功耗、并行且自适应的信息处理能力,也是目前科研界和产业界竞相角逐的前沿领域。单个神经元/突触功能可借助多个晶体管和电容组成的电路模块实现,但其复杂的电路结构严重限制了系统整体的集成度。因此,设计并构建新型类脑器件单元是发展神经形态计算系统的核心。

基于忆阻器的神经形态计算架构可在存储单

元内部处理多模态输入,可以用来解决这一问题^[4-6]。忆阻器本身具备非易失性、开关速度快、低功耗、结构简单的特点,已经成为神经形态硬件的核心器件,受到学界关注^[7,8],这种双端口元件可通过多种场刺激调节电阻状态,特别适合用来模拟突触可塑性和神经元动态特性^[9]。与传统互补金属氧化物半导体(Complementary Metal-Oxide-Semiconductor, CMOS)电路需要独立存储器和逻辑单元不同,忆阻器能够实现存储与计算功能的一体化,从而显著降低延迟和功耗^[10,11]。早期研究主要聚焦于单一机制的忆阻器,而近期的研究进展则揭示了多物理场调制的忆阻器的巨大潜力^[12-14]。如图1所示,通过在忆阻器中耦合多种物理效应,可同时处理光、电、热、磁等多种神经形态感官输入信号,这与生物系统的多感官融合能力相对应。

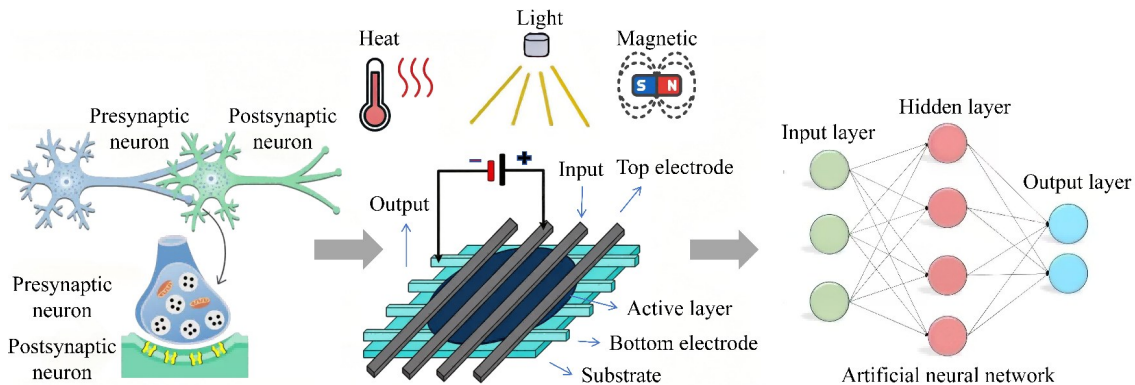


图1 多模态调控的忆阻器关于突触神经元与人工神经网络示意图

Fig. 1 Schematic diagram of multimodal-regulated memristors applied to synaptic neurons and artificial neural networks

多模态忆阻器是指能够响应两种及两种以上不同物理信号,如光、电、磁、热等,并通过这些信号的协同或独立作用来调制电导状态的器件。对仅涉及两种外场、且通常独立作用或仅有简单叠加效果的忆阻器而言,其典型代表包括光电、热电和磁电忆阻器。这类双场响应器件结构简单、物理机制清晰,在低功耗传感、信息存储和感内计算等方面具有独特优势。能够响应三种及以上外场、且不同外场之间存在显著协同耦合效应的忆阻器,则将多模态调控推向新的高度。这类器件中,多场共同激发的载流子之间往往存在复杂的

耦合与竞争关系,例如光生载流子和热激发载流子可协同输运以增强离子迁移,而磁场对导电细丝取向的调控又可能与局域电场发生竞争。这些相互作用使器件能实现光辅助热调制离子迁移、磁场引导导电细丝取向等深度的功能融合,从而对电导态进行多维度、非线性的联合调控。多个物理场调制的多模态忆阻器典型体系涵盖了光-电-磁、光-电-热、光-电-力乃至光-电-磁-热等多物理场耦合的忆阻系统。传统的光电、热电和磁电忆阻器作为双场响应器件,构成了多模态忆阻器的重要基础;而多场协同调控型器件则在响应场

数量、调控维度和信息融合能力上实现了质的跨越,代表了多模态忆阻器向更高阶智能感知与计算发展的核心方向。

本综述系统性地探讨了忆阻器在多模态神经形态计算领域的应用。首先,我们阐明了忆阻器的活性层材料,包括无机材料、有机材料及有机-无机杂化材料。其次,根据其基本工作原理,将其分为导电细丝机制、界面效应机制、相变和电荷俘获/释放机制。然后,综述了目前多模态忆阻器在图像识别,神经网络计算和感存算一体化等领域的应用进展。最后,我们提出了未来研究方向,重点指出材料基因组工程、界面工程及单元间一致性等是突破冯·诺依曼瓶颈、实现真正脑启发式计算系统的关键路径。

2 忆阻器活性层材料

忆阻器采用的活性层材料可以分为无机材料^[15]、有机材料^[15,16]以及有机-无机杂化材料^[17]三类。其中,无机材料如金属氧化物通常具有高稳定性和快速的开关特性,适用于高集成度场景,有机材料如导电聚合物或小分子化合物,则以其良好的柔性和可溶液加工性见长,适合柔性电子设备,有机-无机杂化材料结合了两者的优势,展现出可调的电学性能和多模态响应能力,如图2所示。不同材料体系的性能差异为忆阻器在多模态神经形态计算中的应用提供了多样化的选择。例

如,在模拟视觉、听觉或触觉感知的神经形态系统中,材料的选择直接影响到器件的灵敏度、能效和适应性。因此,可以根据具体应用场景的需求来选择合适的活性层材料,以实现更高效的类脑计算和智能信息处理。

2.1 无机材料

用于忆阻器活性层的无机材料包含了金属氧化物,二维材料,卤化物钙钛矿等。金属氧化物^[18]是忆阻器研究中最系统的一类无机阻变功能材料,凭借其高度成熟的材料体系与丰富的物理内涵,构成了多模态调控研究的重要基石^[19]。其制备工艺稳定、性能可调,为器件设计提供了坚实基础。金属氧化物的多模态特性更多源于其晶格中氧空位、金属阳离子等点缺陷与外界光、磁、热等激励之间的强耦合作用,这种相互作用能动态调制材料的电导状态,实现非易失性存储与逻辑运算^[19-21]。这类材料对外场的响应贯穿于缺陷的产生、迁移与复合全过程,因此可在单一器件平台上实现多种物理信号的协同感知与信息融合,例如在神经形态计算中模拟突触可塑性,或用于多模态传感器集成,提升人工智能系统的环境适应性与能效。

在光-电协同调控方面,宽禁带氧化物具有波长选择性响应特性。图3(a)所示为Ag/Ga₂O₃/Pt忆阻器在不同紫外光强度下的电流-电压特性(*I*-

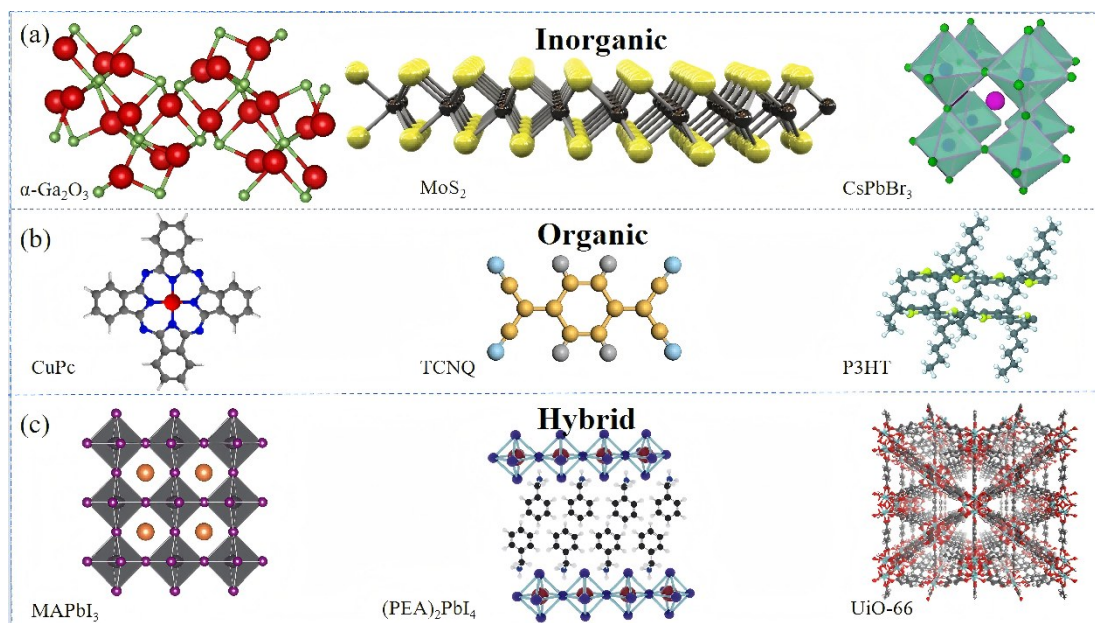


图2 用于忆阻器活性层的材料体系。(a)无机材料;(b)有机材料;(c)有机-无机杂化材料

Fig. 2 Material system for memristive active layer. (a) Inorganic materials. (b) Organic materials. (c) Organic-inorganic hybrid materials

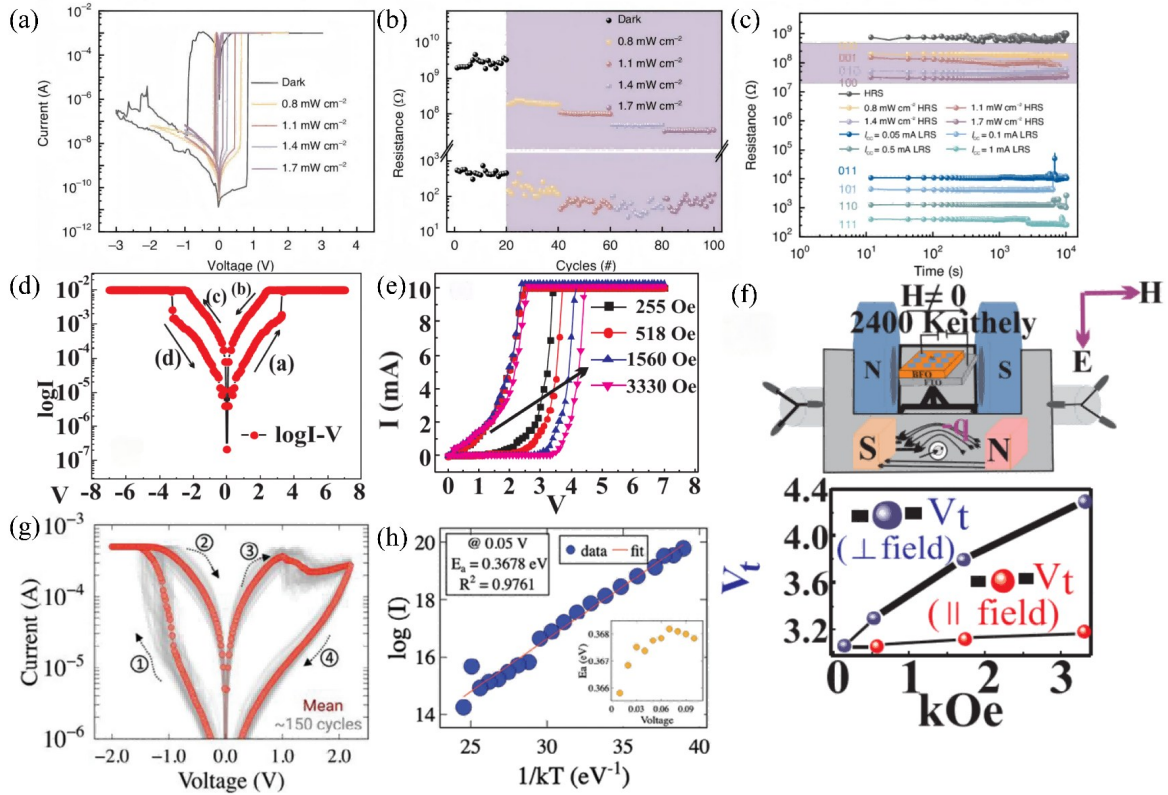


图3 无机忆阻器的多模态调控与多阻态调制。(a) Ag/Ga₂O₃/Pt忆阻器在不同紫外光强度下的典型 I - V 曲线, $I_{cc} = 1$ mA; (b) 在不同紫外光强度下, HRS 和 LRS 中 20 次循环的电阻分布; (c) 八种不同电阻状态的保持特性^[22]; (d) 由 Ag/BFO/FTO 忆阻器获得的 $\log I$ - V 滞后曲线; (e) 不同外加磁场下的阈值变化 (V_t) 调制; (f) 施加的电场与磁场方向及电磁响应图^[32]; (g) Ti/HfO_x/Ti₂AlN 忆阻器的典型 I - V 曲线; (h) 典型热电响应曲线图^[33]

Fig. 3 Multimodal modulation and multistate modulation of inorganic memristors. (a) The typical I - V curves of the Ag/Ga₂O₃/Pt memristor under the different UV intensities with $I_{cc} = 1$ mA. (b) The resistance distribution of 20 cycles in HRS and LRS under different UV intensities. (c) The retention characteristics of eight different resistance states^[22]. (d) $\log I$ - V hysteresis curve obtained from the Ag/BFO/FTO memristor. (e) Threshold variation (V_t) modulation under various applied external magnetic fields. (f) Directions of applied electric and magnetic fields and electromagnetic response diagram^[32]. (g) The typical I - V curves of the Ti/HfO_x/Ti₂AlN memristor. (h) Representative thermoelectric response curve diagram^[33]

V) 曲线, 可见光强增加时开关行为显著变化。基于 Ga₂O₃ 的紫外光电忆阻器因其超宽带隙而对可见光无响应, 却可被深紫外光高效写入与擦除, 图 3(b) 所示为不同紫外光强度下高低阻态在 20 次循环中的电阻分布, 表明光强可有效调制阻态窗口。图 3(c) 展示了八种不同电阻状态的保持特性, 已实现 8 种以上非易失性电导态的多级存储^[22]。基于 ZnO、WO₃、Ta₂O₅ 及多铁氧化物等多种氧化物活性层的忆阻器, 实现了光-电协同、“与”逻辑双模态激活、电致变色-阻变本征耦合的可视化阻态读出、波长选择性光激活以及磁-电多模态调控等多种调制功能, 展示了长保持时间、高耐久及高准确率等性能, 为多感官融合类脑感知与安全存储提供了新范式^[23-31]。图 3(d) 所示为 Ag/BFO/FTO 器件获得的 $\log I$ - V 滞后曲线, 展示了典

型的双极型阻变行为。室温多铁材料 BiFeO₃ 同时具有铁电有序与反铁磁有序, 其忆阻器不仅可由电场通过铁电极化翻转来调控阻态, 还可在外磁场下实现电阻调制。图 3(e) 所示为不同外加磁场下的阈值电压 (V_t) 调制效应, 图 3(f) 提出了施加的电场与磁场方向及电磁响应示意图, 表明 BiFeO₃ 可同时响应电场与磁场, 保持稳定的多级阻变行为^[32]。这一特性使得单个 BiFeO₃ 器件即可融合电写入与磁读取, 为四维存储与非易失性磁电逻辑器件的实现奠定了材料基础。在温-电与极端环境适应性方面, HfO₂ 基忆阻器展现出产业级的多模态耐受能力。图 3(g) 所示为 Ti/HfO_x/Ti₂AlN 器件的典型 I - V 曲线, 图 3(h) 给出了典型热电响应曲线图, 采用 MAX Phase Ti₂AlN 电极的 HfO₂ 忆阻器可在高达 300°C 的环境温度下保持稳

定的电阻态,并能在单个器件中精确调制出9个不同的电阻状态^[33]。Gr/HfO_x/W忆阻器,其在高达700°C的温度下可靠运行,开关电流比大于10³,数据保持时间超过50小时,耐久性超过10⁹次切换周期^[34]。相比之下,基于单层HfO₂的传统忆阻器在相同温度下的开关比通常极低,且多级存储能力严重退化。这一对比表明,电极材料选择和界面工程对于突破开关比与热稳定性之间的制衡关系至关重要。这种在高温下的多阻态保持能力使得同一器件既可执行常规存储与计算任务,又可充当片上温度感知单元,体现了温-电双模态融合的能力。

二维层状材料因其原子级厚度、优异的机械柔韧性和丰富的物理效应,成为构建多模态忆阻器的理想活性层材料^[35-37]。这类材料的范德华层状结构使其对外界电场、光照和磁场等多种刺激极为敏感,能够实现电阻态的多物理场协同调控。尤其是在光电多模态调控方面,二维材料忆阻器展现出十分突出的性能表现。以MoS₂、MoTe₂、 α -In₂Se₃/Gr异质结和黑磷为代表的二维材料忆阻器,通过光-电、力-光-电等多物理场耦合,实现了光电双模态突触可塑性、重构型神经元发放和全光双向响应等行为,可模拟视觉感知、图像识别与微观运动检测。拥有高识别准确率,低图像处理功耗且忆阻器的能耗低于生物突触水平,黑磷忆阻器还展现出高开关比、低工作电压及反复弯曲下稳定的机械鲁棒性,为低功耗多模态感知、柔性电子皮肤等应用提供了新途径^[38-46]。许多二维材料(如WS₂^[47]、MoTe₂^[48])还表现出自旋-能谷耦合特性,可在磁场或圆偏振光激发下调制忆阻行为,开辟了磁-光-电多模态调控的道路。

卤化物钙钛矿是离子-电子混合导体,其软晶格赋予卤素离子极低迁移活化能,展现出高开关比、低开启(SET)电压和复位(RESET)电压以及长保持时间等优异特性^[50,51]。以CsPbBr₃为例,基于CsPbBr₃的忆阻器可实现数字/模拟可调开关,且拥有高开关比和长保持时间,对MNIST手写数字识别准确率达93.2%^[49]。相比之下,同类杂化钙钛矿Cs₂AgBiBr₆器件的开关比虽高,但保持时间短,表明无铅化设计在稳定性上仍有一定的劣势。通过界面钝化工程,器件循环耐久和识别准确率进一步提升,在CIFAR-10和MNIST数据集中均取得90%以上的分类准确率。尤其是自供电

多模态应用,基于三阳离子体系的器件更实现了自供电光突触可塑性、可重构逻辑运算及高精度储备池计算(Reservoir Computing, RC)^[52],充分展现了其在感算一体化视觉系统中的巨大潜力。

无机材料体系在多模态忆阻器应用中呈现出一系列显著优势:金属氧化物具备高稳定性、与CMOS工艺的良好兼容性以及卓越的热耐受性,适用于高温极端环境中的前端感知与神经形态计算任务。二维材料以其原子级厚度、范德华异质结构集成能力以及丰富的物理效应而著称,在柔性器件、超低功耗应用以及多物理场协同型器件中展现出巨大潜力。卤化物钙钛矿则凭借其低离子迁移活化能、高光吸收系数以及显著的光伏效应等特性,在自供电光突触及感算一体化视觉系统中具有独特优势。然而,该体系亦存在若干显著局限性:金属氧化物的光响应波段通常较窄,主要集中于紫外或部分可见光区域。二维材料的大面积均匀制备及其与CMOS后道工艺的兼容性仍是亟待解决的挑战;卤化物钙钛矿的水氧敏感性严重限制了其长期可靠性。因此,在实际应用中,需依据具体应用场景进行权衡选择:对于高温或高辐照环境,金属氧化物是优选,柔性可穿戴系统则适用二维材料,而对于自供电及低功耗视觉计算应用,钙钛矿材料则更具潜力。

2.2 有机材料

用于忆阻器活性层的有机材料包含了聚合物材料,有机小分子材料,生物与天然有机材料,有机框架材料等。聚合物忆阻材料凭借其溶液可加工性、机械柔韧性以及高度的分子结构可设计性,在柔性忆阻器领域中占据核心地位。共轭聚合物如P3HT凭借主链高度离域的 π 电子体系赋予了薄膜本征的电荷传输能力,可通过电场调控掺杂水平与氧化还原态,实现多级电导态的光滑渐变^[53]。图4(a)所示为P3HT忆阻器的 I - V 特性曲线,分别对应正电压和负电压扫描,显示出典型的双极型阻变行为。图4(b)展示了串联电压脉冲作用下的电流渐变变化曲线,表明电导可实现连续可调的突触权重更新,基于P3HT的光电突触器件展现出5000次连续循环的耐久性及10⁴ s的数据保持时间,并可对光电信号进行协同调制,图4(c)展示了光增强过程及电压脉冲电擦除过程,成功模拟了光触发与电擦除的协同操作。成功实现了光触发多信号模式响应与操作条件反射的模

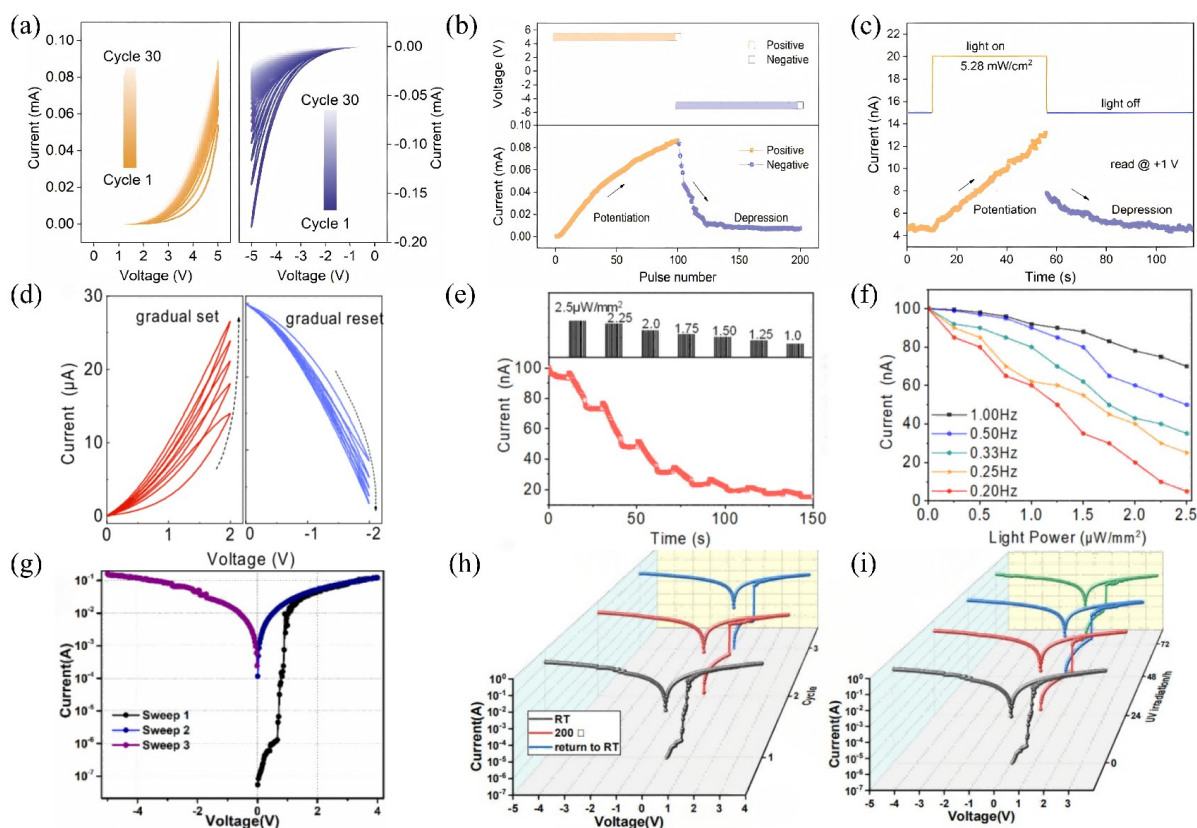


图4 有机忆阻器的多模态调控。(a)P3HT忆阻器的 I - V 特性曲线分别对应正电压(+5 V,左图)和负电压(-5 V,右图)扫描测试结果;(b)P3HT忆阻器在串联电压脉冲(增强脉冲:+5 V;抑制脉冲:-5 V)作用下的电流渐变变化曲线;(c)P3HT忆阻器的光增强过程(单次光脉冲强度:5.28 mW/cm²,持续时间:40 s)及电压脉冲(幅度:+1 V)电擦除过程^[54];(d)Au/CuPc/FTO忆阻器在模拟开关存储器模型中的光响应特性;(e)不同光功率(2.5-1.0 μ W/mm²)刺激下的电导下降响应;(f)电导调制的频率依赖性^[62];(g)室温下FTO/O-MWCNT-CS(8%)/Ag忆阻器的 I - V 特性曲线(显示扫描顺序);(h)200℃时及冷却至室温后的 I - V 曲线;(i)不同照射时间下原位紫外光照射下的 I - V 曲线^[64]

Fig. 4 Multimodal Modulation of Organic Memristors. (a) I - V characteristics of the P3HT memristive device respond to positive (+5 V, left) and negative (-5 V, right) voltage sweeps. (b) Gradual current change of the P3HT memristive device with a series voltage pulses (+5 V for potentiation, -5 V for depression) ITO/P3HT/Al. (c) The light-potentiation process with a single light pulse (intensity: 5.28 mW/cm², duration: 40 s) and electrical erase process with a voltage pulse (amplitude: +1 V) of the P3HT memristive device^[54]. (d) Light response for the memristor Au/CuPc/FTO in the analogue switching memory model. (e) Conductance decreasing operation by different stimuli with light power ranging from 2.5 to 1.0 μ W/mm². (f) Frequency dependency of conductance modulation^[62]. (g) FTO/O-MWCNT-CS (8%)/Ag memristor at room temperature: I - V characteristics curve showing sweeping order. (h) I - V curves at 200℃ and after cooling to room temperature. (i) I - V curves under in-situ UV irradiation with different times^[64]

拟,基于该器件构建的3×3突触阵列已初步展示了人工视觉系统的应用潜力^[54]。与纯P3HT忆阻器相比,基于P3HT:PCBM共混的Ag/ZnO/P3HT-PCBM/ITO忆阻器显著提升了开关比,同时展现出同样优越的耐久性和保持特性^[55]。非共轭聚合物凭借无定形基体为活性金属离子提供低势垒迁移路径,在较低操作电压下实现了稳定的阻变开关特性与长数据保持能力^[56,57]。此外,部分聚合物还展现出湿度、温度和pH等多重环境因子的电阻响应,为多模态环境感知忆阻器提供了材料基

础。同时,基于有机忆阻器的可穿戴感存算一体系统已取得初步进展。将P3HT:PCBM忆阻器集成到柔性聚酰亚胺衬底上,与压电传感器共同构成电子皮肤单元,可同时感知压力、温度和湿度,并在弯曲半径5 mm下保持稳定的阻变特性。此外,丝素蛋白/银纳米线复合忆阻器被用于智能贴片,实现人体运动应变和肌电信号的原位存储与预处理,展示了“感知-存储-计算”融合的柔性架构^[58]。这些进展表明,有机材料凭借其本征柔性和可溶液加工性,在电子皮肤、可穿戴健康监测

和边缘智能设备中具有独特优势。

有机小分子材料凭借明确的分子结构、溶液加工性和丰富的分子间弱相互作用,可通过分子工程实现能级与堆积方式的精密调控。基于ITO/TCNQ/Al的忆阻器在低操作电压下实现了高开关比、超快开关速度以及长保持时间,成功模拟了脉冲时序依赖可塑性(Spike-Timing-Dependent Plasticity, STDP)、双脉冲易化(Paired-Pulse Facilitation, PPF)等多种核心突触可塑性^[59]。基于DTT-TCNQ有机电荷转移的全光突触忆阻器则突破了传统人工突触在光谱响应范围和突触可塑性线性方面的技术瓶颈,实现了光控忆阻行为^[60]。图4(d)展示了Au/CuPc/FTO忆阻器在模拟开关中的光响应特性;图4(e)呈现了不同光功率刺激下电导下降的响应行为;图4(f)则描述了电导调制的频率依赖性。并五苯、酞菁及其金属配合物和茚二酰亚胺衍生物等有机小分子同样展现出优异的光-电双模态调控能力^[61-63],其堆积方式与分子构象可被热退火、机械压力和溶剂蒸气等外界因素高度调控,引起宏观电导的显著变化,使单一小分子薄膜成为多物理场协同响应的多模态忆阻平台。

生物与天然有机材料因可再生性、可生物降解性及生物相容性,构成了忆阻器领域一个快速兴起的绿色材料体系。基于纯丝素纳米微纤的超薄生物忆阻器则利用其本征离子导电性和纳米级厚度降低了工作电压,实现了超过180次的稳定电阻切换及 10^5 s的阻态保持时间,并在交叉阵列中实现了图像记忆和逻辑运算功能^[65]。在复合材料路线方面,Ag/丝胶蛋白/Au忆阻器展示了超过 10^6 的开关比和超过 10^3 s的保持时间,其多级阻态存储能力已在图像重构任务中得到验证^[66]。多糖类材料方面,图4(g)展现了室温下FTO/O-MW-CNT-CS(8%)/Ag器件的*I-V*特性曲线,图4(h)所示为200℃时及冷却至室温后的*I-V*曲线,图4(i)给出了不同照射时间下原位紫外光照射下的*I-V*曲线。基于扭曲羧基化多壁碳纳米管-壳聚糖复合材料的生物忆阻器实现了高达 10^4 的开关比和低至0.86 V的置位电压。其同时还具有优异的耐热性(200℃)和抗紫外辐照稳定性(72 h暴露)^[64]。碳量子点-壳聚糖共面纳米间隙电极忆阻器进一步拓展了多糖材料的忆阻器架构选择。纯纤维素纤维基忆阻器也可在不添加额外金属掺杂

的条件下展现非易失性阻变特性。

有机框架材料是一类以分子构建单元通过强化化学键有序连接而成的晶态多孔固体,其规整的拓扑结构、可精确设计的孔道尺寸和高度可调的骨架化学组成,为忆阻器调控提供了原子级精确可控的平台。其中,共价有机框架(COFs)完全由轻质有机单元通过强共价键连接,避免了金属节点的引入,其结构规整性更接近有机材料的本征特性。基于高质量二维COF(TP-TD)薄膜忆阻器,利用其一维纳米通道和亚胺键与导电丝的配位效应,实现了高开关比和长保持时间,并在波形数据识别任务中达到92.17%的准确率^[67]。在D-A型COF忆阻器中,通过嵌入给体-受体片段构建的二维亚胺连接COF分别在1.3 V和1.6 V的操作电压下实现了阻变性能,展示了化学结构调控对忆阻行为的直接影响^[68]。在光电多模态调控方面,基于ODAE-COF的大面积光电双模忆阻器,利用二芳基乙烯单元的可逆关环/开环异构化实现了光电协同调制,器件可呈现64个分立电导态,并集成边缘计算系统用于晶圆表面质量评价,在空洞缺陷检测和表面粗糙度分类任务中平均准确率超过90%,而基于苯并噻吩修饰COF的光电忆阻器,实现了50个电导态的光电协同调制,在低光、浓雾和高频运动等复杂条件下显著提升了图像识别精度^[69,70]。在仿生与稳定性方面,基于乙烯基连接的离子COF忆阻器利用铜三核簇的协同氧化还原活性和离子电荷补偿机制实现了32个稳定电导态,在严苛酸碱环境下电流变化低于5.2%,均匀性高达99.92%,成功模拟了生物突触的"学习-遗忘"行为,集成于卷积神经网络中实现了90%的图像识别准确率^[71]。此外,二乙炔功能化COF忆阻器在350℃热处理下可发生层间固态拓扑聚合,将双极性非易失性存储行为转换为一次写入多次读取模式,展现了COF材料在热响应型忆阻器中的独特潜力^[72]。

有机材料体系在多模态忆阻器领域展现出以下核心优势:聚合物及有机小分子材料具备优异的溶液可加工性、本征柔韧性以及分子结构的高度可调性,适用于柔性、可穿戴及低成本大面积电子器件。生物与天然有机材料则基于其良好的生物相容性、可降解性与可再生性,在植入式医疗电子设备及环保型器件中具有独特价值。COFs凭借原子级精度的孔道结构及可设计的电活性位

点,为离子运输的选择性与多模态响应的定制化提供了前所未有的平台。然而,有机材料体系普遍存在热稳定性较差、载流子迁移率相对较低、长期工作可靠性不足等挑战。在实际应用中,有机材料更适用于对柔性、生物相容性及低成本有较高要求且环境条件温和的场景,而对于高温、高湿或强辐照等极端环境,则需通过复合或封装策略对其进行性能强化。

2.3 有机-无机杂化材料

有机-无机杂化钙钛矿是杂化忆阻材料中研究最集中的体系,其结构通式为 ABX_3 或 Ruddlesden-Popper 相, A 位为有机铵阳离子, B 位为二价金属, X 位为卤素。有机阳离子通过氢键与无机八面体耦合,赋予材料优越的光-电协同响应。图 5(a) 所示为 $EGaIn/MAPI_3/PEDOT:PSS/ITO$ 忆阻器的 $I-V$ 特性曲线,表现出典型的双极性阻变。图 5(b) 给出了在 5×10^4 秒内不同频率下的保持测试结果和图 5(c) 中的不同声压级下的保持测试结果,在不同的条件设定下,都展现了有明显区分

的稳定的电导保持特性^[73]。从中可以知道,在压-电多模态调控方面, $MAPI_3$ 基忆阻器利用极性 MA^+ 分子提供的压电效应,首次实现了声信号驱动的阻态切换,器件展现出低 SET/RESET 电压、稳定的耐久性和超高的电/声开关比,数据保留时间达 5×10^4 s,为通过声音信号实现忆阻器的非接触远程调控开辟了新途径。在光-电协同方面,基于 $MAPI_3$ 的全光子人工突触通过水分子介导的钙钛矿相变,实现了纯光学存储机制,无需施加电偏压即可完成突触权重的光写入与擦除。该系统成功再现了 PPF、短时程记忆 (Short-Term Memory, STM) 到长时程记忆 (Long-Term Memory, LTM) 的转换以及湿度依赖的可塑性等神经功能。在递归神经网络中对多维光学刺激的分类准确率达到 100%^[74]。2D-3D 杂化钙钛矿忆阻器利用二维 Ruddlesden-Popper 相 $(PEA)_2PbI_4$ 对离子迁移的各向异性约束,获得了扫描速率依赖的电流开关特性和超低能耗,其可切换的 p-i-n 结构使人工突触的功耗降至极低水平,可真实模拟生物突触中

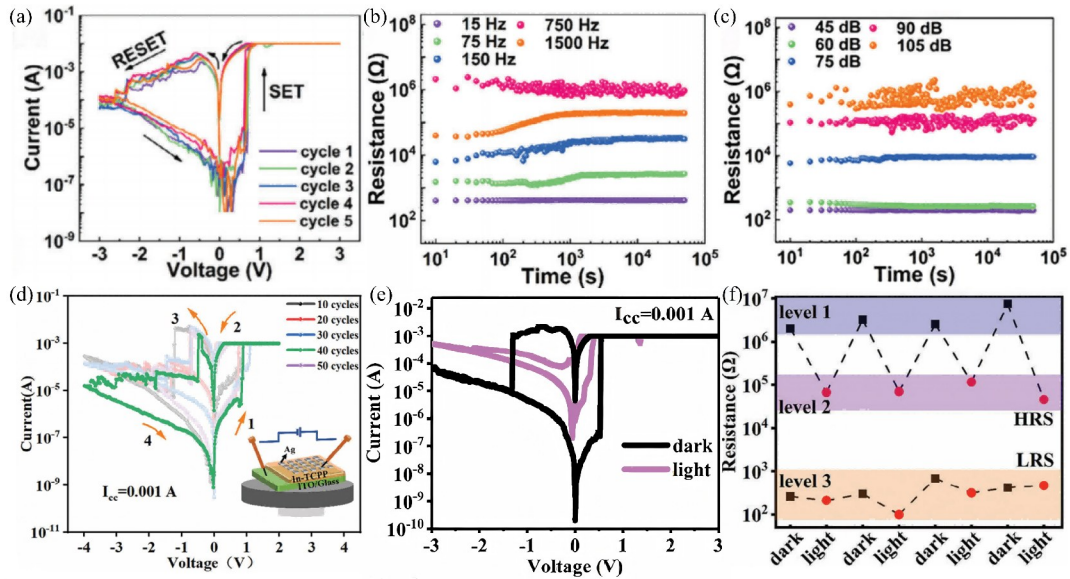


图 5 有机-无机杂化忆阻器在声、光、电调控下的阻变特性与多模态感知保持能力。(a) $EGaIn/MAPI_3/PEDOT:PSS/ITO$ 忆阻器的 $I-V$ 特性曲线;(b) 在 5×10^4 秒内不同频率下的保持测试结果;(c) 在 5×10^4 秒内不同声压级 (Sound Pressure Level, SPL) 下的保持测试结果^[73];(d) $Ag/In-TCPP/ITO$ 忆阻器在不同生长周期下的典型 $I-V$ 曲线 (插图: 测试示意图);(e) 在黑暗和光照条件下,读取电压为 0.1 V ($\lambda = 405$ nm) 时器件的电阻切换循环次数;(f) 不同波长光照下的光学 SET 行为^[76]

Fig. 5 Resistive switching and multimodal sensory retention in organic-inorganic hybrid memristors under acousto-opto-electrical modulation. (a) $I-V$ behaviors of the device $EGaIn/MAPI_3/PEDOT:PSS/ITO$ memristor. (b) Retention test result at different frequencies during 5×10^4 s. (c) Retention test results at different SPL during 5×10^4 s^[73]. (d) Typical $I-V$ curves of $Ag/In-TCPP/ITO$ memristor with different growth cycles (inset: schematic diagram of test). (e) Repeated cycles of resistive switching cycles for devices working in the dark and in the light at 0.1 V reading voltage ($\lambda = 405$ nm). (f) Optical SET behavior under light of different wavelengths^[76]

Ca^{2+} 的流入与挤出过程^[75]。当前无铅化是该体系的重要发展方向,全无机 $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ 和双钙钛矿 $\text{Cs}_2\text{AgBiBr}_6$ 等体系在环境稳定性与阻变性能之间取得了良好平衡。

金属有机框架(MOF)材料由金属离子/金属簇与有机配体通过配位键自组装而成,兼具有机组分的可设计性和无机组分的氧化还原活性,是杂化忆阻材料中结构精确性最高的一类,其规整孔道对离子输运的选择性也为多模态调控提供了独特活性层材料。通过调节不同配体和金属离子种类,一系列具有可调能带结构的 MOF 薄膜忆阻器实现了优异的均匀性、可重复性和长保持特性。Ag/PVA-MOF/FTO 和 Al/ZIF-67/ITO 忆阻器都实现了高开关比,长保持时间和稳定的循环特性,拥有稳定的双极性阻变特性^[77, 78]。在柔性多模态集成方面,基于玻璃态 MOF 薄膜的可拉伸忆阻器,在反复拉伸和弯折条件下仍保持了高开关比和稳定的开关特性,为 MOF 材料在柔性可穿戴电子系统中的应用奠定了器件基础^[79]。图 5(d)所示为 Ag/In-TCPP/ITO 忆阻器在不同生长周期下的典型 $I-V$ 曲线,图 5(e)展示了在黑暗和光照条件下($\lambda = 405 \text{ nm}$)器件的电阻切换循环次数。基于卟啉 MOF 纳米片的光调控忆阻器可借助卟啉配体的光敏性实现光-电双模态电阻态调制,且在图 5(f)中展示了不同波长光照射下的光学 SET 行为(黑暗时间 15 秒,光强 3 W/cm^2),展示了 MOF 材料在光电协同忆阻器领域的应用潜力^[76]。金属节点和有机配体可独立选择的设计自由度,使得 MOF 材料的阻变行为可在原子级精度上进行预设,为性能定制化的多模态忆阻器开发提供了可靠的活性层材料。基于氢键有机框架(HOFs)中嵌入 Au 纳米颗粒的杂化阻变材料同样值得关注^[80]。HOFs@Au 忆阻器在连续扫描或脉冲电压下呈现梯度电导,可模拟生物神经元的突触行为,且器件在无封装条件下暴露于环境空气中长达 6 个月后仍维持极其稳定的突触功能,展现了卓越的空气稳定性和实际应用前景。其三为有机插层层状无机物与杂化凝胶。基于 Ni-Al 层状双氢氧化物(LDHs)与明胶的异质结忆阻器已被成功用于构建仿生触觉伤害感受器系统^[81],利用明胶的生物相容性和 LDHs 的层状结构协同实现了触觉感知与记忆功能的融合,展示了有机-无机杂化体系在仿生电子皮肤领域的应用潜力。

有机-无机杂化材料通过有机组分与无机组分的协同作用,结合前者的柔性与后者的稳定性及功能性,在多模态忆阻器中彰显出独特优势。杂化钙钛矿表现出优异的光-电-声多物理场耦合能力与自供电潜能。MOF 凭借其原子级精度的孔道结构和可设计的活性位点,实现了离子传输的精确调控。然而,杂化钙钛矿对水氧环境极为敏感,长期稳定性不佳。MOF 薄膜的大面积均匀制备及其与微电子工艺的兼容性仍需突破。在应用场景方面,杂化钙钛矿适用于自供电视觉系统、光遗传接口等光电密集型应用。MOF 更适合需要离子选择性与多模态可编程性的逻辑存储融合器件。

综合比较三类材料体系可以发现:无机材料(金属氧化物、二维材料、卤化物钙钛矿等)在多模态忆阻器中普遍具有较高的开关比和优异的循环耐久性,但在多物理场响应种类上相对局限,金属氧化物以温-电、磁-电见长,二维材料擅长光-电及磁-电耦合,钙钛矿则在光-电-声多场协同上表现突出。有机材料(聚合物、小分子、生物材料等)的突出优势在于本征柔性和可溶液加工性,开关比跨度极大,但热稳定性和长期工作可靠性普遍低于无机体系,适用于温和环境下的柔性可穿戴应用。有机-无机杂化材料(杂化钙钛矿, MOF 材料等)兼顾了两者的部分优点,尤其在多场耦合种类上最为丰富,但水氧稳定性和大面积均匀制备仍是瓶颈。从应用导向看,高温极端环境首选金属氧化物,柔性电子皮肤优选有机或二维材料,自供电视觉计算则钙钛矿更具潜力。

3 忆阻器的工作机理

忆阻器的开关机制分为导电细丝机制、界面效应机制、相变机制以及电荷俘获/释放机制。导电细丝机制是指在电场激励下,器件内部形成纳米尺度的导电通道,从而实现电阻状态的转变;界面效应机制则侧重于电极与介质界面处的离子迁移或化学反应所引起的电阻变化;相变机制利用材料在晶态与非晶态之间的可逆相变来调节导电性;而电荷俘获/释放机制依赖于介质中电荷载流子在陷阱能级的捕获与释放过程,进而调制整体电阻。由于忆阻器可由多种材料体系制备,如金属氧化物、二维材料、有机材料等,不同材料的物理化学性质会显著影响主导开关机制的类型与行为,因此工作机制呈现出丰富的多样性,并随着材

料选择与结构设计的不同而演变。

3.1 导电细丝机制

导电细丝机制是忆阻器领域研究最为深入、物理图像最为明确的一类阻变机理,其核心特征体现于在外加电场驱动下,活性层内部形成纳米尺度的局域化导电通道,从而实现高阻态(High Resistance State, HRS)与低阻态(Low Resistance State, LRS)之间的可逆切换。依据导电细丝的化学组成及其形成路径,该机制可明确划分为电化学金属化(Electrochemical Metallization, ECM)机制与价态变化(Valence Change Mechanism, VCM)机制两类本质不同的物理过程。电化学金属化机制依赖于活性金属电极的电化学氧化还原反应。其物理过程可描述为:在正偏压作用下,活性电极发生电化学氧化,生成金属阳离子;这些阳离子在电场驱动下迁移穿过活性介质层,并在对电极处被还原沉积,逐渐形成纳米金属导电细丝,从而使器件从HRS转变为LRS。在施加反向偏压时,已形成的金属细丝发生电化学溶解,金属原子重新氧化为离子并向源电极回迁,导致细丝断裂,器件复位至HRS。典型的ECM机制忆阻器包括Ag/SiO₂/Pt、Cu/Ta₂O₅/ITO以及Ag/HfO₂/Pt等。ECM机制的忆阻器,其*I-V*特征曲线通常表现为数字型开关行为通常表现出突变型开关行为:SET过程在特定阈值电压附近呈现电流的急剧跳变,而RESET过程则多表现为细丝的渐进溶解或瞬时断裂。该类器件的开关比通常可达10³-10⁶,但由于金属成核与细丝生长的随机性,其循环一致性往往较差。VCM机制则不依赖于外部金属离子的注入,其阻变源于活性层内部本征缺陷在电场作用下的迁移与重组。在正偏压下,活性层中的氧空位等带正电荷的缺陷在电场驱动下向阴极区域聚集并形成由空位链构成的导电通道,器件随之转变为LRS;施加反向偏压时,这些缺陷从通道区域向阳极扩散,导致导电通道瓦解,器件恢复至HRS。典型的VCM材料体系包括HfO₂、TaO_x、TiO₂、ZnO等二元金属氧化物以及MoS₂等层状硫族化合物。在*I-V*特性方面,VCM机制器件的开关过程通常呈现较为平滑的渐变特征,其置位与复位电压分布相对集中,开关比一般在10-10⁴之间。尽管其开关比相对于ECM器件偏低,但VCM器件通常表现出更优异的循环耐久性。图6(a)所示为堆叠式电阻开关器件的横截面(Scanning

Electron Microscopy, SEM)图像,多孔SiO_x薄膜夹在Ag电极与Si电极之间。图6(b)所示为多孔SiO_x的表面形貌。金属导电细丝依赖于活性金属电极的电化学氧化还原与金属阳离子在活性层中的迁移,典型体系包括Ag/SiO₂/Pt、Cu/Ta₂O₅/ITO和Ag/ZrO₂/Pt等。其中Ag/HfO₂/Pt忆阻器呈现出亚纳秒级的开关速度,开关比超过10⁶,且可在低于0.3 V的超低电压下稳定工作。如图6(c)Ag⁺导电细丝的形成断裂示意图所示,描述了其形成与断裂的内部过程^[82]。图6(d)所示为H_t纳米细丝的高分辨率透射电子显微镜(Transmission Electron Microscopy, TEM)图像并且在图6(e)展示了Pt/HfO₂/BFO/HfO₂/Ti忆阻器置位与复位过程的RS机制示意图^[83]。展示了空位导电细丝依赖于氧空位、硫空位等本征缺陷的迁移与聚集,广泛见于HfO₂、TaO_x、TiO₂、ZnO等二元金属氧化物以及层状硫族化合物中。基于TaO_x的忆阻器通过精确调控氧空位浓度梯度可将细丝形成位置限定在特定区域,从而将器件的循环间变异系数降低至3%以下,耐久性超过10¹²次开关,并成功实现了超过128级的多级存储^[84]。在二维材料体系中,基于单层MoS₂的垂直忆阻器利用硫空位构成的导电细丝,将工作电压压低至0.1-0.3 V范围,单次开关能耗降至亚飞焦量级^[85]。

导电细丝的形成与断裂涉及离子迁移与局域氧化还原反应,因而对外部能量输入(如光、热、磁等)表现出高度敏感性。光场通过在本征或外加电场下注入光生载流子,能够改变活性层中的局域电场分布以及金属离子的还原与氧化速率,进而调控导电细丝的成核位置、生长方向及残余形貌;热场(包括焦耳热或外部加热)通过调节离子迁移的活化能与反应速率常数,从而控制导电细丝的尺寸、密度及热稳定性;磁场则通过磁电耦合效应或对带电缺陷及离子的洛伦兹力作用,影响离子迁移路径与导电细丝的空间取向。因此,导电细丝机制为光-电、温-电、磁-电等多模态协同调控奠定了坚实的物理基础。然而,该机制中导电细丝的随机成核行为导致多模态激励下电阻态的均匀性与可控性仍面临显著挑战,亟需通过缺陷工程与界面设计予以抑制。

3.2 界面效应机制

界面效应机制不依赖于导电细丝形成与断裂,其电阻转变源于电极/活性层界面处的势垒或

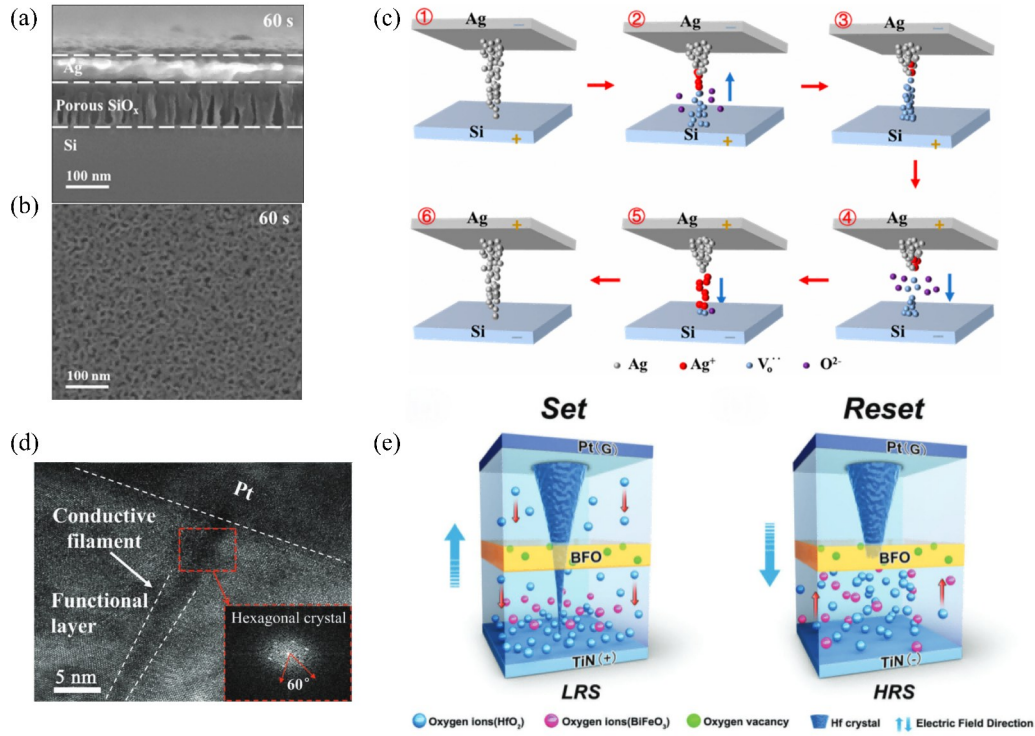


图6 导电细丝机制。(a)堆叠式电阻开关器件的横截面SEM图像,其中多孔SiO_x薄膜夹在顶部Ag电极与底部Si电极之间;(b)多孔SiO_x表面;(c)ECM机制中Ag⁺导电细丝模型示意图^[82];(d)Hf纳米细丝的TEM图像;(e)Pt/HfO₂/BFO/HfO₂/Ti忆阻器的SET和RESET过程的VCM机制示意图^[83]

Fig. 6 Schematic illustration of the conductive filament mechanism. (a) Cross-sectional SEM image of the stacked resistive switching device in which the porous SiO_x thin film is sandwiched between the top Ag electrode and bottom Si electrode. (b) Surface of porous SiO_x. (c) Schematic illustrations of the Ag⁺ conductive filament model based on the ECM mechanism^[82]. (d) High-resolution Transmission Electron Microscope (TEM) image of a Hf nano filament. (e) The VCM mechanism governing the SET and RESET processes in the Pt/HfO₂/BFO/HfO₂/TiN memristor^[83]

电荷分布状态的改变。该机制下,活性层内部的离子缺陷在外电场驱动下发生短程迁移,在界面处积累或耗尽,从而连续调制肖特基势垒高度或隧穿势垒宽度。与导电细丝机制的突变式开关不同,界面型阻变的电导可在宽范围内被连续、可逆地调节,这使得其特别适用于模拟生物突触的渐进式权重更新。图7(a)、(d)、(g)所示分别为BFO0、BFO1和BFO2的PFM相图,其中图7(a)的插图分别为分别施加-8 V和+8 V时形成的盒内盒畴结构(比例尺1 μm),表明存在向下的自发极化状态。图7(b)、(e)、(h)所示分别为相应的局部相变循环以及矫顽电压与偏置电压的统计分布,进一步确定了首选的向下极化。图7(c)、(f)、(i)给出了(Bi,Sm)FeO₃/SRO界面附近的HAADF-STEM图像,插图中显示了Fe³⁺的位移,确定了铁电极化方向。应用的典型材料体系包括钙钛矿型氧化物及其异质结,如SrTiO₃、BaTiO₃、BiFeO₃等。图7(j)给出了提出的界面势垒效应示意图,其中 E_{bi} 为本

征电场, E_f 为费米能级。基于Pr_{0.7}Ca_{0.3}MnO₃的忆阻器利用氧空位在界面处的电化学迁移实现了10³以上的开关比和超过10⁵次的可逆电导调制,成功模拟了包括PPF,STDP,LTM等多种突触可塑性行为^[87]。基于Nb:SrTiO₃/Au肖特基结的忆阻器中,界面势垒可在±4 V脉冲驱动下被连续调节,电导动态范围超过两个数量级,且在10⁴次脉冲激励后仍维持高度线性和对称的电导更新特性,同时对MNIST手写数字识别准确率达94.72%^[88]。La_{0.7}Sr_{0.3}MnO₃/BaTiO₃铁电隧穿结则利用铁电极化翻转引起的界面势垒突变,实现了亚纳秒开关速度和低于1 fJ的单次操作能耗^[89]。图7(k)展示了自极化工程机制,黑色实线表示本征电场,蓝色虚线表示去极化场,利用界面势垒产生的向下电场推动自极化过程。

界面型阻变现象的核心机制在于肖特基势垒或隧穿势垒受界面电荷状态调制而发生的连续演变,且势垒的高度与宽度对界面处的电荷分布表

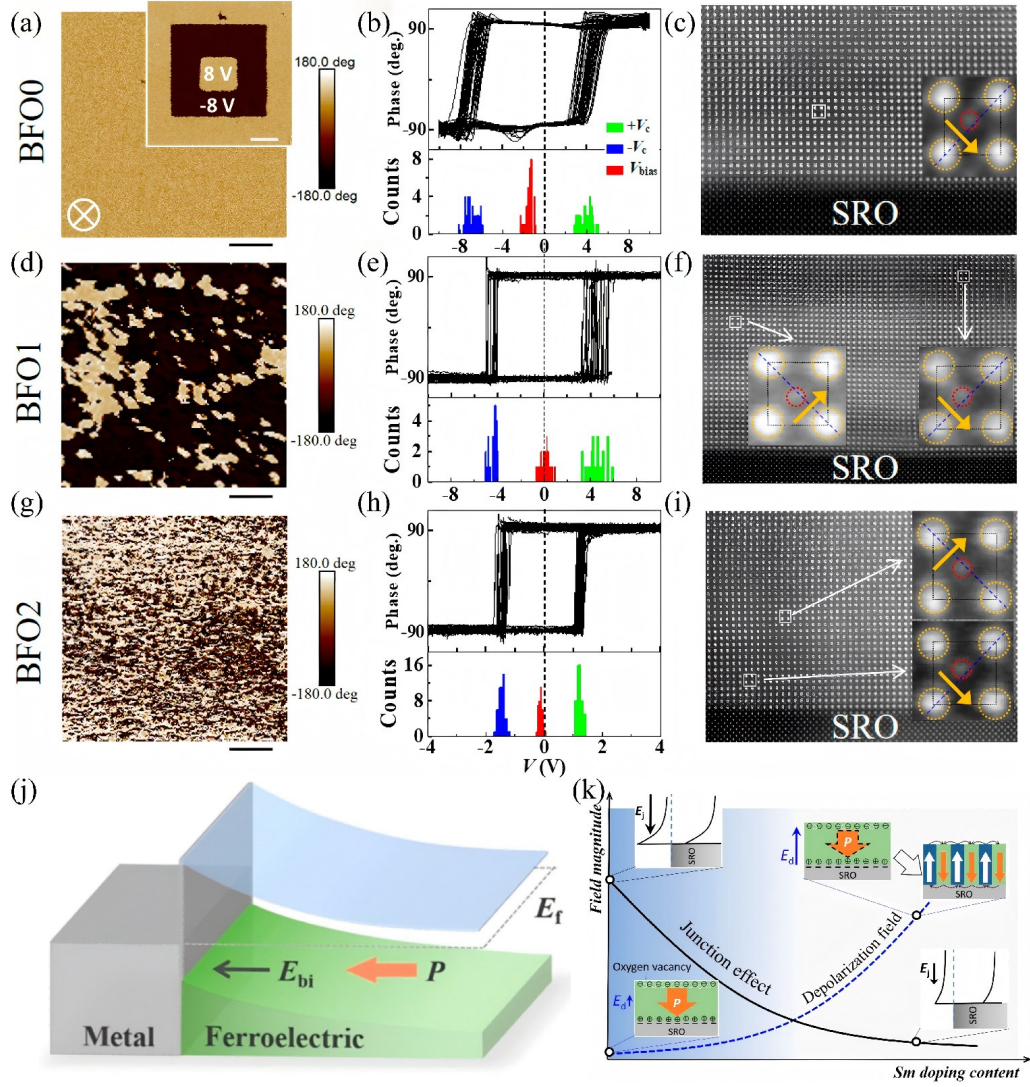


图7 界面效应机制驱动的铁电自极化。(Bi,Sm)FeO₃薄膜在SRO/STO(001)衬底上的自极化表征。(a)、(d)和(g)展示了BFO0、BFO1和BFO2的压电力显微镜(PFM)相,其中(a)的插图分别为施加-8 V和+8 V相反电压时形成的盒内盒畴结构。比例尺为1 μm ; (b)、(e)和(h)分别显示了相应的局部相变循环以及矫顽电压与偏置电压的统计分布; (c)、(f)和(i)部分展示了(Bi,Sm)FeO₃/SRO界面附近的高角环形暗场扫描透射电子显微镜(HAADF-STEM)图像;插图显示了Fe⁺的位移(Bi用黄色圆圈表示; Fe用红色圆圈表示)。虚线为视觉引导; (j)提出的界面势垒效应: E_{bi} 为金属/铁电体界面附近的本征电场, E_f 表示铁电体的费米能级; (k)(Bi,Sm)FeO₃薄膜自极化工程机制:黑色实线表示结处本征电场强度(E_j),蓝色虚线表示去极化场强度(E_d);“ $\oplus$ ”和“ $\ominus$ ”表示正(负)束缚电荷;“ $\circ$ ”和“-”分别代表氧空位和电子。^[86]

Fig. 7 Ironelectric self-polarization driven by the interface effect mechanism. Self-polarization characterization of (Bi,Sm)FeO₃ films grown on SRO/STO(001) substrates. (a), (d) and (g) show the PFM phases for BFO0, BFO1 and BFO2 and the inset of (a) is the box-in-box domains written by opposite voltages of -8 and +8 V, respectively. The scale bar is 1 μm . (b), (e) and (h) represent the corresponding local phase-switching loops and the statistical distribution of coercive voltages and bias voltages. Finally, parts (c), (f) and (i) show HAADF-STEM images near the (Bi,Sm)FeO₃/SRO interface. Insets show displacements of Fe ions (Bi, yellow circle; Fe, red circle). The dashed lines are guides for the eyes. (j) The proposed interfacial barrier effect. E_{bi} is the built-in electric field near the metal/ferroelectric interface, and E_f indicates the Fermi level of ferroelectrics. Mechanism for the self-polarization engineering of (Bi,Sm)FeO₃ thin films. (k) The black solid curve indicates the magnitude of the junction's built-in electric field (E_j), the blue dashed curve indicates the magnitude of the depolarization field (E_d). “ $\oplus$ ” and “ $\ominus$ ” denote the positive (negative) bound charge, “ $\circ$ ” and “-” represent oxygen vacancies and electrons.^[86]

现出极高的敏感性。光场通过光伏效应或光导效应产生非平衡载流子,能够有效填充或耗尽界面态,从而动态调控势垒特性。热场则通过改变载流子的本征激发浓度与迁移率,进而影响界面势垒的静态分布。在磁性/铁电多铁异质结中,磁场借助磁电耦合效应可诱导铁电极化状态的翻转或变化,从而间接调控界面势垒。特别值得注意的是,铁电材料自身的极化状态可通过光、力、热、电等多物理场耦合进行调控,这赋予铁电隧道结或铁电二极管以丰富的多模态响应能力。界面型阻变机制因其电导连续可调、能耗较低等优点,在模拟型突触应用中展现出显著优势。然而,其开关比通常低于导电细丝型器件,且在高频操作下的界面稳定性仍有待进一步优化。

3.3 相变机制

相变机制依赖于材料在电场或热作用下发生的结构相变,通过不同相之间的电阻率差异实现阻态切换。与导电细丝机制不同,相变通常涉及材料中较大体积范围内的协同原子重排,而非局域纳米通道的形成。其中 $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$ (GST)^[90] 已成为相变存储器的工业标准介质。基于 GST 的相变忆阻器可在非晶态(高阻)与晶态(低阻)之间实现可逆相变,非晶化过程由纳秒级电脉冲产生的快速淬火完成,而晶化过程依赖焦耳热辅助的原子有序化重排;两类相的电导率差异可达 3-4 个数量级,保证了高开关比。基于掺杂 GST 的忆阻器实现了 700 ps 的超快晶化,开关速度优于 1 ns,循环耐久超过 10^{15} 次,器件在高达 250°C 环境下仍能维持稳定操作,展现了在高温极端环境电子系统中的潜力。部分过渡金属氧化物同样呈现相变忆阻行为。 VO_2 在约 340 K 发生绝缘体-金属转变,电阻变化幅度可达 5 个数量级,该转变可由电场、光辐照或热激励单独触发,为多模态调控提供了物理基础。在二维材料中, MoTe_2 ^[91] 在电场驱动或 Li^+ 插层下可发生 2H 半导体相到 1T' 半金属相的转变,电阻变化幅度达 10^5 以上,且相变可被反向偏压或退插层过程逆转。相变机制的另一个显著特征在于相变常伴随光学常数(折射率、消光系数)的同步变化,可用于构建光-电协同调控的非易失性光子存储与计算器件。

相变忆阻器基于材料在晶态与非晶态之间可逆结构转变的原理,其转变受温度及能量输入方式的制约。光场通过光热转换效应可实现相变材

料的高效热激发,甚至在特定体系中诱发非热相变路径。电场经由焦耳热效应同样能够驱动相变,其热局域化特性有助于实现低功耗编程。应力场则通过调制原子间相互作用势能,可有效调节相变能垒,从而改变相变温度与速率。尤为重要的是,相变过程伴随着材料光学常数的显著变化,使得同一器件能够同时实现电学状态的非易失性存储与光学信息的实时读取与调制,从而为光电多模态协同计算提供了一个天然平台。然而,相变机制通常需要较高的驱动电流以产生足够的焦耳热,导致功耗较高。同时,在多场耦合作用下,相变动力学的微观机制尚需通过更深入的原位表征与多尺度模拟予以阐明。

3.4 电荷俘获/释放机制

电荷俘获/释放机制不依赖离子迁移或结构相变。其物理本质是活性层内部的深能级缺陷、界面态或嵌入的纳米结构作为电荷俘获中心,在外电场作用下对电子或空穴进行俘获或释放,从而改变材料内部的空间电荷分布和电场分布,进而调制器件的宏观电阻。图 8(a)所示为人脑中的生物突触与基于 $\text{Au/PMMA/CSQDs/CsPbBr}_3\text{QDs/ITO}$ 人工突触之间的类比,图 8(b)则展示了该忆阻器的横截面 SEM 图像。图 8(c)中, CsPbBr_3 量子点在约 520 nm 处呈现强绿色发射峰,而 CSQDs 的发射峰位于红光区域(约 640 nm),两者的光谱分离特性为光辅助电荷俘获过程提供了可能性。图 8(d)和(e)的 TEM 图像进一步验证了两种量子点的晶体结构:CSQDs 的层间距对应其(111)晶面, CsPbBr_3 量子点的层间距则与(001)晶面匹配,规则的晶体结构为电荷俘获中心的稳定存在提供了结构基础。图 8(f)清晰展示了不同电压下的电子捕获/释放过程:当施加正向偏压时,电子从 ITO 电极注入,被 CSQDs 或 $\text{CsPbBr}_3\text{QDs}$ 中的深能级缺陷俘获,导致活性层导电通道受阻,器件电阻升高(HRS);而施加反向偏压时,被俘获的电子被释放,导电通道重新形成,电阻降低(LRS)^[92]。基于该机制的忆阻器具有优异的突触模拟能力,例如通过调节脉冲电压的幅度和频率,可实现长时程增强(Long-Term Potentiation, LTP)和长时程抑制(Long-Term Depression, LTD)等突触可塑性行为,为构建低功耗神经形态计算系统提供了关键支撑。

此外,电荷俘获/释放过程不涉及离子迁移,

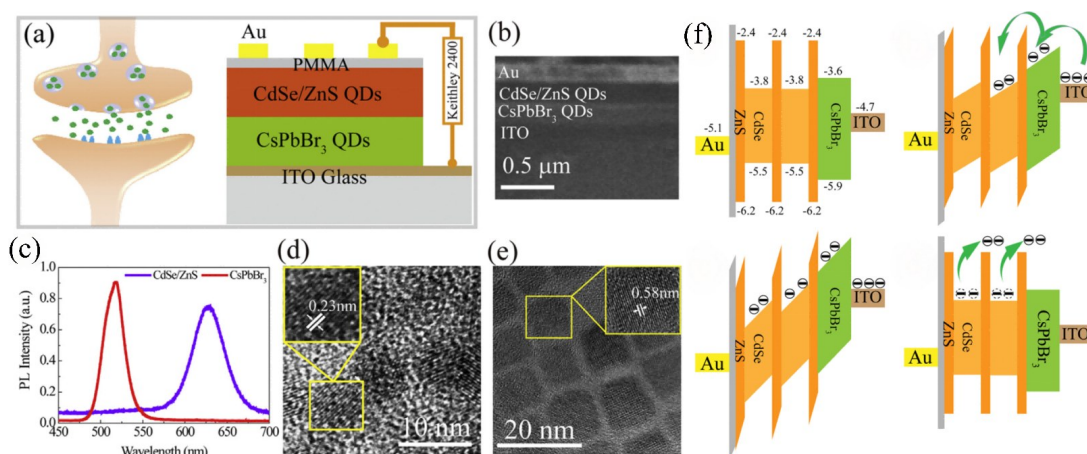


图8 电荷俘获/释放机制。(a)人脑中的生物突触与基于 Au/PMMA/CSQDs/CsPbBr₃QDs/ITO 忆阻器的人工突触之间的类比;(b)忆阻器的横截面扫描 SEM 图像;(c)CsPbBr₃量子点与 CSQDs 的光致发光(PL)光谱;(d)CSQDs 的 TEM 图像,层间距为 0.23 nm;(e)CsPbBr₃量子点的 TEM 图像,层间距为 0.58 nm;(f)不同电压条件下电子捕获/释放机制的示意图^[92]

Fig. 8 Electron capture/release mechanism. (a) Analogy between a bio-synapse in the human brain and the artificial synapse based on the Au/PMMA/CSQDs/CsPbBr₃QDs/ITO memristor. (b) Cross sectional SEM image of the memristor. (c) The PL spectra of the CsPbBr₃QDs and CSQDs. (d) A TEM image of the CSQDs; the interplanar spacing was 0.23 nm. (e) A TEM image of the CsPbBr₃QDs, the interplanar spacing was 0.58 nm. (f) Schematic diagram of the electron capture/release mechanism under different voltage conditions^[92]

因此器件的开关速度快且循环稳定性高,在高密度存储和实时计算领域展现出广阔应用前景。典型材料体系包括金属纳米颗粒嵌入氧化物介质的复合薄膜、聚合物-纳米颗粒混体系以及二维材料/氧化物异质结构。基于 Pt 纳米颗粒嵌入 Al₂O₃ 介质的忆阻器在 ± 2 V 电压窗口内展现出一系列分立的量子化电导平台,实现多级存储,高低阻态比超过 10^2 ,保持时间超过 10^5 s^[93]。基于 ZnO 纳米颗粒与聚甲基丙烯酸甲酯的复合忆阻器通过调控纳米颗粒的粒径和负载率,可在单器件中实现超过 4 个数量级的连续电导调制和 8 个稳定阻态的非易失性存储^[94]。二维材料体系方面,Gr/MoS₂/Gr 范德华异质结忆阻器通过栅极电场精确控制界面态中的电荷俘获与释放,实现了无离子参与的纯电子阻变,开关比超过 10^4 ,且因无原子迁移过程,器件在超过 10^6 次循环后几乎没有性能衰退^[95]。黑磷量子点嵌入 h-BN 隧穿层的忆阻器利用量子点的离散能级作为电荷俘获中心,在低于 1 V 的操作电压下获得了分立的阻态台阶^[96]。电荷俘获/释放机制的核心优势在于其极快的响应速度,电荷俘获过程本质上受制于载流子输运时间,可达到皮秒量级,且避免了离子迁移引起的疲劳和随机性问题,尤其适用于需要极高循环耐久性和超快开关的应用场景。由于不涉及原子迁移,该

机制具备极快的响应速度以及极高的循环耐久性,因此在高频、高可靠性多模态存储与计算应用中展现出显著优势。然而,陷阱能级的密度、能级位置及其空间分布对材料制备工艺高度敏感,器件间的均匀性与良率控制成为该机制实现规模集成的关键瓶颈。

四种阻变机制在多模态调控中的表现各有侧重。导电细丝机制是实现多模态调控最广泛的平台,其对外场的高度敏感性使得器件可通过多种激励方式控制细丝成形与生长,开关比高,但细丝的随机性导致循环间一致性较差,且线性度偏低。界面效应机制的电导更新线性度最高、对称性好、能耗低,但开关比相对较小,且对界面质量要求苛刻。相变机制具有超快开关速度和极高的耐久性,但相变过程需要较大的焦耳热驱动,功耗偏高,且多场调控主要依赖光热转换路径。电荷俘获/释放机制纯电子过程响应最快、循环稳定性极佳,但陷阱能级对制备工艺敏感,器件间一致性差。综合来看,模拟型突触应用更倾向于界面效应和电荷俘获机制,数字型存储和逻辑则更适合导电细丝和相变机制,而多模态感知融合往往依赖于导电细丝或界面效应机制,更需要对外场的耦合响应。

4 多模态忆阻器的应用

忆阻器通过内部物理机制的协同作用,能模拟生物神经系统的关键特性,实现脉冲时序依赖性可塑性、储层计算和跨模态融合。这些神经形态功能推动了模拟人脑计算的发展,对边缘人工智能和脑机接口应用至关重要。与传统忆阻器相比,多模态忆阻器展现出三大核心优势:首先,感存算一体化能力显著增强,能在同一器件中完成感知、存储和计算,消除数据搬运瓶颈,降低延迟和能耗;其次,信息融合效率高,通过硬件层面多模态融合,提升处理准确率并减少冗余;最后,调控维度丰富,引入光、热、磁等多物理场实现复杂

突触可塑性和环境自适应学习。

4.1 突触神经元

多模态忆阻器在突触与神经元功能模拟领域的研究,正沿着“感存算一体”的架构理念快速推进。图9(a)所示为视网膜的工作机制示意图。基于多模态忆阻器构建的人工视网膜器件,可模拟视网膜中光感受器细胞的光电转换功能与神经节细胞的信号整合作用。图9(b)所示为神经元中生物突触神经信号传递的示意图,基于多模态忆阻器的人工突触可通过阻态的连续或离散调节实现突触权重的动态调制,例如模拟生物突触的STDP。传统视觉系统在传感器、存储单元与处理单元之间存在固有的数据搬运瓶颈,而多模态忆

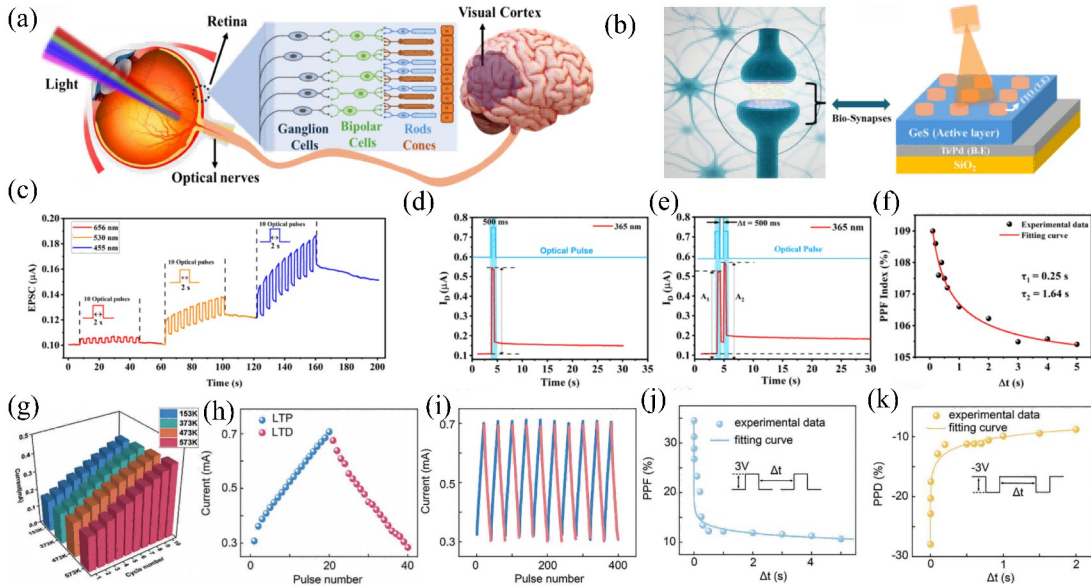


图9 多模态忆阻器的突触可塑性模拟。(a)视网膜的工作机制;(b)神经元中生物突触神经信号传递的示意图;(c)GeS忆阻器对656、530和455 nm波长光脉冲(5.53 mW/cm^2 ,持续2 s)的PSC响应;(d)由突触前光脉冲(365 nm, 5.530 mW/cm^2 ,持续500 ms)触发的EPSC;(e)由间隔500 ms的一对光脉冲(365 nm, 5.530 mW/cm^2 ,持续500 ms)触发的EPSC;(f)在固定光强度为 5.53 mW/cm^2 条件下,PPF指数随光脉冲间隔(Δt)的变化关系^[97];(g)基于PTBZ-DPP的忆阻器在不同温度(153 K、373 K、473 K和573 K)下,由连续电压脉冲诱导产生的峰值电流直方图;(h)当忆阻器接受输入脉冲(3.0 V,持续时间-4.2 V,5 ms)控制时,表现出20种离散电导状态的LTP与LTD;(i)通过包含20个正脉冲和20个负脉冲交替的400脉冲方案诱导突触权重更新;实验验证了基于PTBZ-DPP的忆阻器中存在(j)PPF和(k)PPD现象^[98]

Fig. 9 Simulation of synaptic plasticity in multimodal memristors. (a) Working mechanism of the retina. (b) Schematic illustration of the neural signal transmission of biological synapses in neurons. (c) PSC response of GeS memristor to optical pulses (5.53 mW/cm^2 , 2 s) at 656, 530 and 455 nm wavelengths. (d) EPSC triggered by a presynaptic optical pulse (365 nm, 5.530 mW/cm^2 , 500 ms). (e) EPSC triggered by a pair of optical pulses (365 nm, 5.530 mW/cm^2 , 500 ms) at an interval time of 500 ms. (f) Variation in the pair-pulse facilitation (PPF) index as a function of the optical pulse interval (Δt) with a fixed light intensity of 5.53 mW/cm^2 ^[97]. (g) Histogram of the peak currents of PTBZ-DPP-based memristor induced by successive voltage pulses, at different temperatures (153 K, 373 K, 473 K and 573 K). (h) Long-term potentiation (LTP) and depression (LTD) displaying 20 discrete conductance states when the memristor is controlled with input pulses (3.0 V, -4.2 V duration, 5 ms). (i) Synaptic weight updates were induced by a 400 pulse protocol consisting of alternating 20 positive and 20 negative pulses. Experimental demonstration of (j) paired-pulse facilitation (PPF) and (k) paired-pulse depression (PPD) in the PTBZ-DPP-based memristor^[98]

阻器通过将光电感知、非易失性存储与突触学习融合于单一器件,在硬件层面实现了感知与认知的融合。这一路径的关键在于:光信号不仅作为信息载体被感知和存储,更作为调控自由度参与电导权重的更新与神经元发放的编码,从而赋予神经形态硬件以视觉自适应、多感官融合与超低功耗处理的能力。

多模态忆阻器的突触可塑性研究首先聚焦于光脉冲与电脉冲协同或独立驱动电导权重变化的能力。图 9(c)给出了 GeS 忆阻器对 656、530 和 455 nm 波长光脉冲的突触后电流(Post-Synaptic Current, PSC)响应,对不同波长的响应有明显差异。随着光波长从 656 nm 缩短至 455 nm, PSC 幅值逐渐增大,这归因于短波长光子具有更高的能量,能更有效地激发 GeS 中的载流子跃迁,增强器件的电导响应。进一步地,图 9(d)显示单个 365 nm 紫外光脉冲可触发显著的兴奋性突触后电流(Excitatory Post-Synaptic Current, EPSC),表明光信号能直接驱动突触权重的瞬时更新;而图 9(e)中双脉冲激发的 EPSC 幅值高于单脉冲,且图 9(f)中 PPF 指数随脉冲间隔 Δt 的增大而降低,符合生物突触的短期可塑性特征,说明该忆阻器可模拟突触的时间依赖性增强效应^[97]。对于有机材料基多模态忆阻器,PTBZ-DPP 忆阻器的温度依赖性实验如图 9(g)所示,在 153 K 至 573 K 的温度范围内,连续电压脉冲诱导的峰值电流分布虽随温度升高略有增强,但核心电导调制规律保持稳定,表明该忆阻器具备优异的环境适应性,可应对极端环境下的神经形态应用需求。图 9(h)中,PTBZ-DPP 忆阻器通过 3.0 V 正脉冲与 -4.2 V 负脉冲的交替输入,实现了 20 种离散且可重复的电导状态,对应 LTP 与 LTD 的精细分级调节,为构建高分辨率神经网络提供了硬件基础。每个电导状态可编码不同强度的突触连接,支持复杂信息的精准存储与计算。进一步地,图 9(i)的 400 脉冲交替方案验证了该忆阻器突触权重更新的连续性与稳定性:正负脉冲交替作用下,电导值呈现平滑渐变趋势,无明显饱和或突变,确保了长期学习过程中的权重可调性。而图 9(j)与(k)展示的 PPF 和双脉冲抑制(Paired-Pulse Depression, PPD)共存现象,则模拟了生物突触的双向时序可塑性,使得人工突触能够根据输入信号的时序差异动态调整响应强度^[98]。例如,短间隔脉冲触发 PPF 以增强短

期记忆,长间隔或反向时序脉冲诱导 PPD 以实现信息抑制,这一特性对于处理语音、视频等时序依赖型数据至关重要。

多模态忆阻器的突触功能模拟推动神经形态硬件向“感知-存储-计算”深度融合。多种光电忆阻器实现了感知、存储与学习能力,为边缘 AI 提供低功耗计算单元。通过优化材料与结构,可提升突触可塑性和环境耐受性,加速在脑机接口等领域的應用。基于二维 MoTe_2 和 Ba_2TiO_4 的光电忆阻器模拟生物突触功能,在模式识别和图像任务中取得高准确率^[99]。Pt 纳米颗粒修饰的 MoS_2 忆阻器展现可重构神经形态特性,实现低能耗响应^[100]。Au 纳米颗粒嵌入的氧化物忆阻器利用等离子体增强效应,实现了光调控突触可塑性,模拟视觉感知。柔性全光突触实现无电学偏压的双向权重更新,为可穿戴视觉计算系统提供新范式^[101]。钙钛矿体系在多模态突触方面优势显著。基于 p-i-n 结构的钙钛矿光电忆阻器在 520 nm 光照下产生约 0.8 V 光生电压,实现自供电光突触行为,并集成光学感知、可重构逻辑运算与 RC 等功能。基于 Cs_2CoCl_4 单晶的双端光电突触器件兼具负光电导响应和阻变存储特性,通过电脉冲增强与光脉冲抑制的协同,为视觉神经模拟和光电逻辑电路提供了新路径^[102]。

光信号直接编码为脉冲序列是构建光电脉冲神经网络的核心,多模态忆阻器在此发挥关键作用。ITO/ZnO/ITO 忆阻器在 405 nm 光的高光强下呈现 STM 和 PPF 等突触行为,模拟伤害感受器,构建人工视觉伤害感受器^[103]。在低光强下通过受限玻尔兹曼机进行 RC,对 MNIST 手写数字分类准确率达 97.35%。在垂直集成方面,基于 IGZO 光电忆阻器与硅神经元晶体管垂直堆叠的人工视网膜神经元,将光感知与脉冲编码整合于同一像素单元,实现 ON 型和 OFF 型细胞的双向脉冲频率编码^[100]。

多模态忆阻器在触觉、听觉和跨模态感知领域进展显著。触觉方面,基于压电或摩擦电效应的忆阻器将机械形变转化为电导变化,模拟触觉记忆和疼痛响应,用于电子皮肤和智能假肢,如 P3HT 弹性薄膜忆阻器和 Ni-Al LDH/明胶忆阻器。听觉方面, MAPbI_3 压电忆阻器将声波转为电场,实现声音操控与存储,声开关比高且稳定。跨模态感知中,碲烯光电忆阻器同时响应红外光和电

信号,在视觉-触觉融合和心电图分类任务中的识别准确率大幅提升。这些研究表明,多模态忆阻器通过多源信息融合突破单一感知局限,为类脑智能系统奠定了硬件基础。

4.2 神经网络计算

多模态忆阻器用于神经网络计算时,器件的非理想特性影响系统精度、收敛速度和稳定性。关键指标是电导更新的线性度、动态范围、对称性和一致性。线性度衡量权重随脉冲变化的均匀性,非线性会阻碍训练收敛。动态范围由 $G_{\max}/G_{\min}$ 决定,范围越大,权重分辨率越高,推理精度越高。对称性指 LTP 与 LTD 电导变化的匹配程度,不对称会导致权重漂移和准确率下降。一致性包括器件间和循环间差异,随机性引起映射失真,需通过材料和算法优化。这些指标相互耦合,共同决定硬件性能。

多模态忆阻器推动神经网络硬件架构从存算分离向感存算一体化转型。在人工神经网络(Artificial Neural Network, ANN)、脉冲神经网络(Spiking Neural Network, SNN)、卷积神经网络(Convolutional Neural Network, CNN)等模型中,光调控使忆阻器成为多模态计算基元,兼具感知、非线性映射与信息编码功能。光电忆阻器在传感端完成预处理和特征提取,缓解数据搬运瓶颈,为类脑视觉计算提供物理基础。其电导态响应光强、波长与偏压,支持在线学习与实时模式识别。在 SNN 中,光脉冲提升时序编码效率并降低能耗;在 CNN 中,光电原位重构使特征提取具有自适应性和泛化性。图 10(a)所示为 TiO_2/NiO OEM 交叉阵列的器件示意图,用于模拟生物突触。该阵列可直接对图 10(b)所示的 28×28 像素输入图像进行特征提取与权值更新,通过蓝光(图 10(c))与紫外光(图 10(d))的动态调制,器件电导呈现出稳定的变化趋势,为权重的精确调控提供了物理基础。实验结果如图 10(e)所示,随着训练轮次的增加,系统对目标图像的识别比率逐步提升并趋于稳定,验证了该交叉阵列在神经网络计算中的有效性^[104]。进一步地,图 10(f)通过两种不同的紫外光脉冲训练序列模拟了学习行为的差异,表明光脉冲的时序与强度组合可调控突触可塑性的动态过程。此外,基于 $n\text{-SnS}_2$ 忆阻器的情绪依赖字母识别实验,图 10(g)展示了多波长光信号(455 nm、530 nm、656 nm)对 EPSC 响应的调制作用,不

同波长下的 EPSC 响应差异为实现具有环境适应性的类脑学习与记忆功能提供了新的思路^[105]。基于 Ruddlesden-Popper 相 Ba_2TiO_4 的光电忆阻器,利用光脉冲与外电场协同实现了正负光电导的可控切换,兼具兴奋性与抑制性突触行为,将其应用于 CNN 对 MNIST 手写数字数据集的图像识别任务取得了 92.52% 的准确率^[99, 106]。在视觉图像的噪声抑制与增强方面,基于 TeO_x 忆阻器构建的光电神经形态系统展现了更综合的性能优势。该器件通过不同波长光/电刺激实现突触可塑性和 OR、AND 逻辑门功能,成功模拟视觉神经网络对噪声图像的识别记忆过程,结合 CNN 实现了高达 94.84% 的高精度图像分类,为人工视觉系统的硬件实现提供了创新方案^[107]。

RC 作为一种处理时序信号时计算代价小、训练效率高的特殊循环神经网络架构,在光电忆阻器的部署下拓展至动态视觉任务领域。光电忆阻器丰富的非线性动力学响应和高维状态映射能力,使其天然适用于物理储备池层。这些结果共同证明,多模态忆阻器在神经网络计算中不仅能实现权值的高效存储与更新,还能通过光调控赋予系统更丰富的计算维度,推动感存算一体化架构向更贴近生物系统的方向发展。图 11(a)展示了 RC 系统的流程示意图,包含输入层、储备层、读出层和输出层。输入层负责将外部时序信号编码为适合储备层处理的形式;储备层由多个光电忆阻器单元组成,利用其非线性动力学特性对输入信号进行高维空间映射,实现特征的自动提取与转换;读出层则通过线性权重矩阵将储备层的状态映射到目标输出,完成特定任务的推理或分类。这种架构充分发挥了忆阻器的感存算一体化优势,简化了传统神经网络的训练流程,尤其适用于实时动态信号处理场景。图 11(b)中展示了 DNH-F 结构的忆阻器使用紫外脉冲(波长 365 nm,宽度 0.5 s)和图 11(c)中展示的 CH-P 结构的忆阻器使用蓝光脉冲(波长 450 nm,宽度 1 s)的刺激下,展现出显著的响应差异,为光调控的选择性激活提供了实验依据。图 11(d)呈现了 CH-P 集成忆阻器对 16 种不同脉冲序列的光电化学响应曲线,不同序列对应的电流变化轨迹具有独特的波形特征,表明器件能够准确区分复杂的光脉冲组合,为多值信息编码奠定了基础。图 11(e)显示基于光可编程 RC 系统的神经网络推理精度可

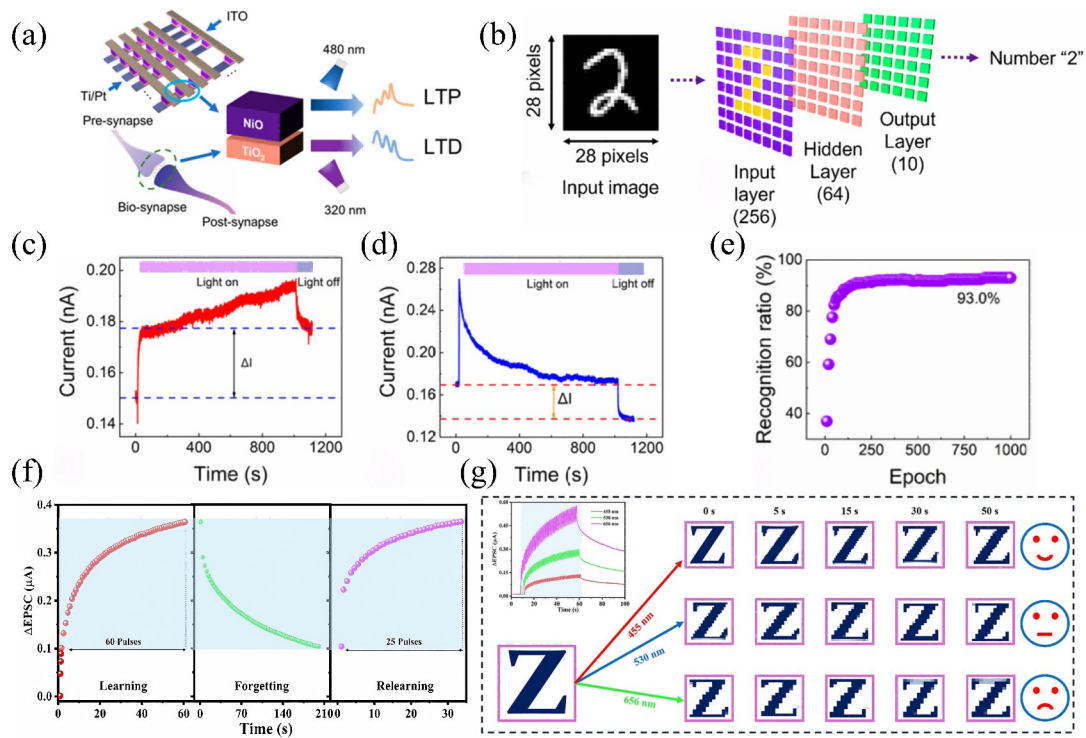


图 10 光调制忆阻阵列模拟学习认知与情绪记忆。(a) TiO_2/NiO OEM 交叉阵列的忆阻器示意图, 该阵列用于模拟生物突触; (b) 尺寸为 28×28 像素的输入图像; (c) 忆阻器在蓝光 1000 秒调制下的典型电流变化曲线; (d) 装置在紫外光 1000 秒调制下的典型电流变化曲线; (e) 认知比率随训练轮次的变化关系^[104]; (f) 两种光脉冲训练序列下的学习行为模拟 (光脉冲: $\lambda = 365 \text{ nm}$; 光强度: 5.530 mW/cm^2 ; 脉冲持续时间: 500 ms ; 脉冲间隔: 500 ms); (g) 基于情绪变化的忆阻器字母识别学习与记忆行为模拟, 插图: $n\text{-SnS}_2$ 忆阻器在 $\lambda = 455 \text{ nm}$, 530 nm 和 656 nm 波长下经 50 次光脉冲触发后的 EPSC 响应, 光脉冲参数: 光强度 5.530 mW/cm^2 ; 脉冲持续时间 500 ms ; 脉冲间隔 500 ms ^[105]

Fig 10 Light-modulated memristive arrays simulate learning cognition and emotional memory. (a) Memristor schematic of the TiO_2/NiO OEM crossbar array, which was utilized to mimic the biosynapse. (b) The input image with a size of 28×28 pixels. (c) Typical current evolution curves of the memristor under 1000 s modulation of blue light. (d) Typical current evolution curves of the device under 1000 s modulation of UV light. (e) The dependence of recognition ratio on training epoch^[104]. (f) Simulation of the learning experience behavior under two optical pulse training sequences (optical pulse: $\lambda = 365 \text{ nm}$; light intensity: 5.530 mW/cm^2 ; pulse duration: 500 ms ; pulse interval: 500 ms). (g) Emotion-dependent simulation of the learning and memory behavior of the memristor for letter recognition. The EPSC response of the $n\text{-SnS}_2$ memristor triggered by 50 optical pulses at $\lambda = 455, 530$ and 656 nm is presented in the inset. Optical pulse: light intensity of 5.530 mW/cm^2 ; pulse duration: 500 ms ; pulse interval: 500 ms ^[105]

达较高水平, 进一步验证了该架构在处理动态任务时的有效性。图 11(f) 和图 11(g) 对比了 CIFAR-10 数据集上双向与单向权重更新的图像识别率, 结果表明双向更新策略能更充分利用忆阻器的多模态特性, 提升识别性能^[108]。图 11(h) 以二进制编码形式展示了 4 位输入信号对应的光脉冲编码方式, 通过控制脉冲宽度与间隔实现了信息的高效转换。图 11(i) 中三种代表性输入的 $I-t$ 光电响应特性及特征提取策略, 清晰呈现了器件对不同输入模式的响应规律, 为后续信号处理提供了关键参考。图 11(j) 和图 11(k) 则通过 SMP1 算法的参数分析及双特征策略的统计结果, 证明

了该系统在重复循环中的稳定性与鲁棒性, 为实际应用中的可靠性提供了数据支撑^[109]。AlphaRC 模仿生物神经元的感受机制, 采用编码器将输入信息编码为脉冲序列。在 UTD-MHAD、MSR Action3D、Florence 3D 等四个标准人类动作数据集上均取得了超过 90% 的识别准确率, 其中 UTD-MHAD 数据集高达 93.58%, 跌倒行为识别准确率达 96.67%。系统处理每个动作仅约 $45.78 \mu\text{J}$, 比 CMOS 基处理器低至少两个数量级。基于波分复用光电反馈回路的多层 RC 结构, 突破了单层储备池在处理大规模时序数据时的性能限制^[110]。SNN 通过稀疏脉冲序列进行信息编码与传输, 在

能效和生物合理性方面较传统 ANN 具有天然优势,但也对硬件平台的驱动编码能力、时序精度和突触可塑性提出了更高要求。光电忆阻器在 SNN

硬件化中的关键贡献在于,其可利用光信号实现非接触式脉冲编码与调控,从而在物理层面上实现模拟信号向脉冲序列的直接转换。

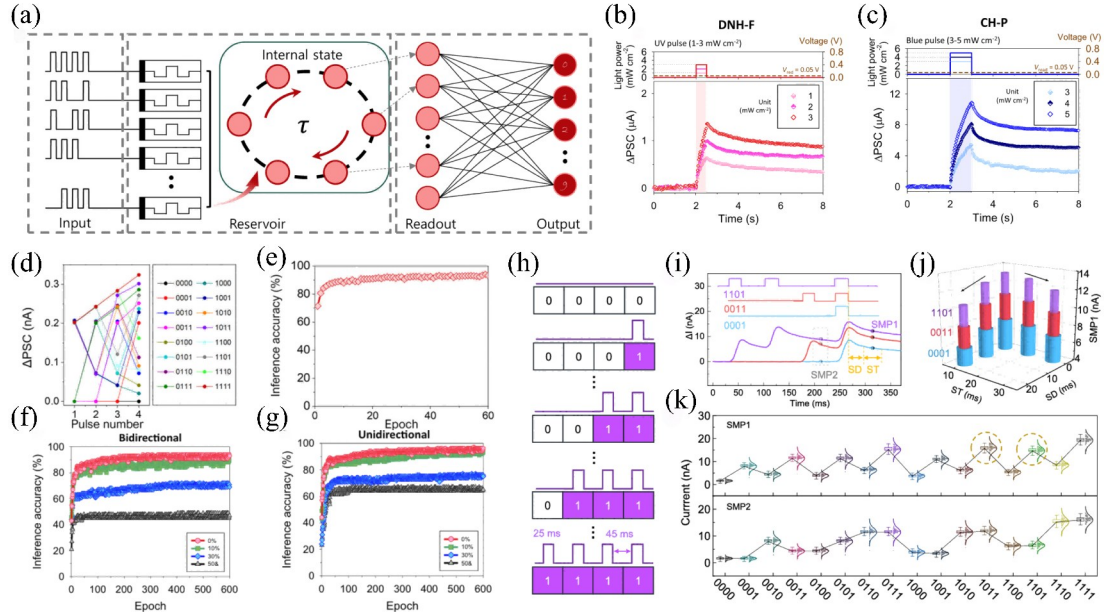


图 11 可编程光电忆阻器 RC 与图像识别。(a) RC 系统的流程示意图,包含输入层、储备层、读出层和输出层;(b)对采用 DNH-F 结构的忆阻器使用紫外脉冲(波长 365 nm,宽度 0.5 s);(c)对采用 CH-P 结构的忆阻器使用蓝光脉冲(波长 450 nm,宽度 1 s);(d)CH-P 集成忆阻器对 16 种不同脉冲序列的光电化学响应曲线;(e)基于光可编程 RC 系统的神经网络推理精度;(f)CIFAR -10 数据集的双向图像识别率;(g) CIFAR -10 数据集的单向权重更新图像识别率^[108];(h)以二值化数字形式表示的 4 位输入信号,对应“0000”至“1111”的光脉冲;脉冲宽度为 25 ms,脉冲间隔为 45 ms;(i)三种代表性输入“0001”,“0011”,and“1101”的 $I-t$ 光电响应特性及输入输出特征提取策略;(j)SMP1 算法在三种代表性输入信号的 SD 和 ST 参数递增情况下的表现;(k) 16 种输入信号在 100 次重复循环中双特征策略(SMP1 与 SMP2)的统计结果,以箱线图误差图和正态分布形式呈现^[109]

Fig. 11 Programmable photoresistor RC and image recognition. (a) Schematic of the process flow in reservoir computing system, composed of input, reservoir, readout, and output layer. (b) UV pulse (365 nm and 0.5 s width) are used for the memristor with DNH-F. (c) Blue-light pulse (450 nm and 1 s width) are used for the memristor with CH-P. (d) PSC responses of CH-P-integrated memristor to 16 different cases of pulse stream. (e) Inference accuracy of the neural network with the light programmable reservoir calculation system. (f) Bidirectional image recognition rate of the CIFAR-10 dataset. (g) Unidirectional weight update image recognition rate of the CIFAR-10 dataset^[108]. (h) 4 bit inputs in the form of a binarized number and equivalent light pulses from “0000” to “1111”. The pulse width is 25ms and pulse interval is 45 ms. (i) $I-t$ photo response characteristics and input-output feature extraction strategy of three representative inputs of “0001”, “0011” and “1101”. (j) SMP1 versus increasing SD and ST of the three representative inputs. (k) The statistical results of the dual-feature strategy (SMP1 and SMP2) in 100 repetitive cycles for the 16 inputs, depicted by a box error diagram and normal distribution^[109]

在垂直集成架构方面,基于 IGZO 光电忆阻器与硅神经元晶体管垂直堆叠的人工视网膜神经元,受生物视网膜视觉感受启发,将光感知与脉冲编码整合于同一像素单元^[111]。该硬件系统包含兴奋性 ON 型和抑制性 OFF 型两种细胞配置,光照下 ON 型细胞的硅 FET 发放频率增加,OFF 型细胞则降低发放频率。双类型配置在指纹模式分类中实现了 99.8% 的准确率,显著优于仅依赖 ON

型单类型配置的 56.1%。这一结果清晰说明了光调控的双向脉冲编码能力对于提升 SNN 特征提取效率的关键作用。在系统实现层面,基于范德华光电忆阻器突触的时序依赖脉冲神经网络 (Time-Dependent Spiking Neural Network, TD-SNN) 完成了多通道实验验证^[112]。该工作利用电学突触前脉冲与光学突触后脉冲之间的精确时序依赖关系模拟 STDP,通过光电忆阻器掺杂实现突

触权重的双向可逆调制,并展示了Hebbian、anti-Hebbian等多种STDP学习规则。SNN仿真中,当长时程增强/抑制面积比(Potential / Depression Ratio, PDR) ≥ 1.25 时,对MNIST手写数字分类准确率达90.9%。在器件层面,基于Pd/ZnO/Gr/SiO₂/Si结构的光电可重构忆阻器,在统一工作参数下通过光电耦合实现易失性与非易失性模式的动态切换,完成了Morse码解码、Poisson编码图像识别和智能交通信号识别等任务^[113]。在全光子SNN研究方面,基于耦合硅微环谐振器的光子SNN通过光脉冲的干涉与非线性效应实现脉冲信息的片上处理^[114]。基于空间光调制器和CMOS相机的光子SNN已可实现40000个神经元的规模,为光子SNN的概念验证提供了可扩展的平台方案。SEPhIA架构则利用微环谐振器调制器和多波长光源,实现了每脉冲神经元低于1激光的有效效率。这些全光子方案与基于固态材料的光电忆阻器形成互补路径,共同推动SNN从理论仿真走向实际硬件部署。通过柔性忆阻器基脉冲神经元,可在柔性衬底上优化忆阻器的制备工艺与性能,分析了脉冲编码机制在构建SNN中的关键作用,强调了器件柔性化与神经元发放行为的协同设计对于实现可穿戴神经形态计算的意义^[115]。

高度集成的感存算一体阵列,已尝试将光感知、多模态信息融合与多种网络计算模式统一在同一硬件平台之上,代表了多模态忆阻器在神经网络计算中的更高层次应用。莫特氧化物忆阻器将其与具备蓝光增强和红光抑制特性的光晶体管集成,构建了“多光晶体管-忆阻器”可重构视觉感存算一体化阵列与硬件系统。该集成阵列具备模拟编码和脉冲编码能力,可支持静态图像识别、时序脉冲图像编码处理和目标识别等多元神经网络算法与图像计算任务,解决了现有视觉神经形态硬件在算法兼容性和复杂信息处理能力上的不足。

在感内计算阵列层面,基于NbOX₂铁电忆阻器阵列的柔性仿生视觉计算系统模拟人类视觉皮层,实现了多级感内视觉处理功能。基于IGZO/PCBM^[116]复合光电忆阻器的感内神经形态视觉系统同样模拟了双脉冲易化和长时程增强等突触功能。全集成多模态光电忆阻器阵列在感内计算中展示了一项视觉处理任务,其中非易失性光电忆阻器模式将图像识别准确率从原始信号的85.7%

提升至预处理后的96.1%^[117]。在跨模态信息融合方面,基于二维碲烯纳米片的光电忆阻器能够同时响应1022 nm红外光信号和电信号,通过SPP诱导缺陷的迁移和电荷捕获/释放双重机制实现时空动态特性^[118]。其构建的多模态RC系统在视觉-触觉融合的数字识别任务中,将单触觉模式75.6%和单视觉模式72.4%的准确率提升至融合模式的97.8%;在心电图五分类任务中,从单模态最高86.3%提升至95.7%。利用模拟型忆阻器的连续可调电导特性,在交叉阵列中实现高效的存内矩阵,以支撑模式识别等智能任务,而数字型忆阻器则用于逻辑运算,最终整体发展方向指向通过多模态感存算一体化架构来突破冯·诺依曼计算瓶颈^[119]。

多模态忆阻器在神经形态计算领域的研究,已从初始的器件物理探索,逐步扩展至材料筛选、电路设计、架构优化及系统集成的全面协同演进。柔性脉冲神经元、多模态信息融合、异质集成与有机材料工程等研究方向,共同推动了感存算一体化架构的发展。未来,在器件层面实现更高线性度与对称性的权重更新、在阵列层面解决串扰与功耗问题、以及在系统层面达成算法与硬件的深度协同,仍将是该领域持续突破的核心关键。

4.3 三模态忆阻器的感存算一体化

多感官信息整合是人类感知系统的一项基础功能。人类大脑能够融合来自视觉、听觉、触觉、嗅觉等多种感官系统的输入,从而在单模态感知信息不足的复杂环境中实现更迅速、更准确的决策响应。由于信号本身固有的随机性与噪声干扰,人工感知系统若仅依赖单一感官信息进行决策,往往会导致不可避免的不确定性。借鉴人类多模态感知的协同机制,人工感知系统可通过将多个单模态信号进行协同耦合,以实现更为先进与智能的认知功能。为构建高度智能化的机器人,人工感知系统需具备高阶的认知感知能力及多模态环境信息处理能力。为此,研究人员正致力于开发能够处理多感官耦合信号的多功能感知-存储-计算一体化系统,而多模态调控的忆阻器则为该系统的实现提供了一种潜在可行的技术途径。

如图12(a)所示,基于ITO/MXene-ZnO/Al的可多模式调控双极型非易失性忆阻器^[120],其性能

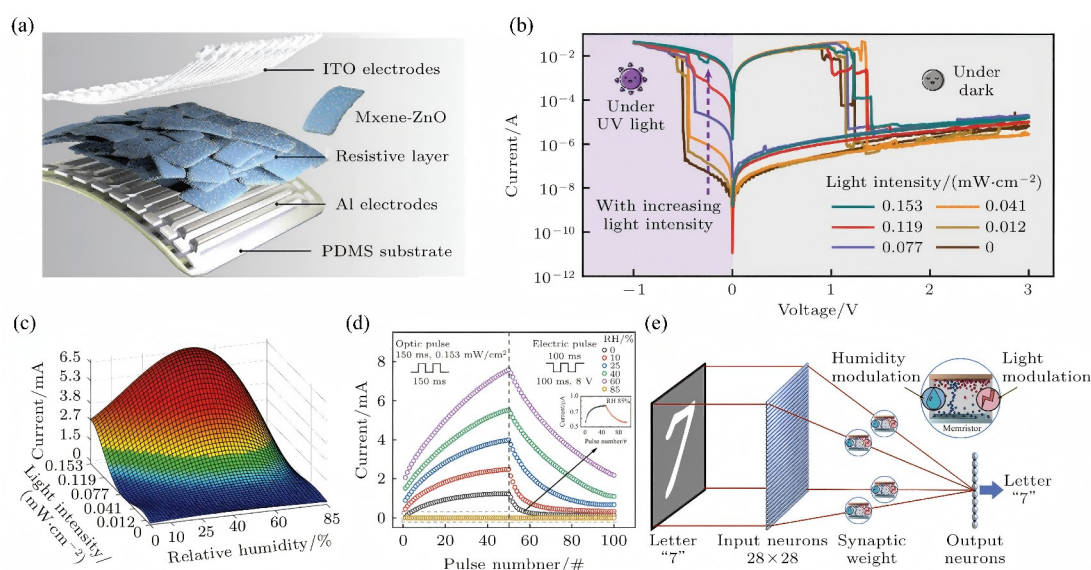


图 12 基于柔性 MXene-ZnO 忆阻器的神经网络。(a) 柔性 MXene-ZnO 忆阻器示意图; (b) 器件在不同紫外光照强度下的 I-V 曲线; (c) MXene-ZnO 忆阻器受光和湿度调控的电流分布图; (d) 应用光和电脉冲实现突触 LTP 和 LTD 行为的模拟; (e) 基于光和湿度调控的忆阻器突触搭建的神经网络示意图^[120]

Fig. 12 Neural Network Based on Flexible MXene-ZnO Memristors. (a) Schematic structure of the flexible MXene-ZnO-based memristive device. (b) I-V curves of device under UV irradiance with different intensities. (c) current profile of MXene-ZnO memristor regulated by light and humidity. (d) simulation of synaptic LTP and LTD behaviors by UV light and electrical pulses. (e) schematic of neural network based on MXene-ZnO-based memristive synapses^[120]

可同时受到紫外光和环境湿度两种外场刺激的调控。随着入射光强度的增加,器件的开启电压逐渐减小;高强度紫外光照射甚至能够诱导器件从 HRS 切换至 LRS。这一现象归因于 MXene 材料具备长时程捕获光生电子的能力,其光敏效应促进了氧空位导电细丝的形成(图 12(b))。自组装的 ZnO 纳米颗粒增大了异质结在两端电极间的总接触面积,这不仅影响了电导率、态密度等物理性质,同时也改善了离子吸附与扩散行为。在高湿度环境中,水分子通过双氢键吸附于 MXene-ZnO 异质结表面。表面官能团的水解作用提高了质子浓度,而质子与氧空位之间的静电吸引作用会抑制氧空位导电细丝的生长,从而破坏其稳定状态。光辅助的氧空位导电细丝形成与湿度诱导的氧空位导电细丝断裂之间存在竞争关系,共同调控器件的响应电流及电导状态(图 12(c)和图 12(d))。该忆阻器阵列被应用于图像感知与预处理,以模拟视网膜功能。在相对湿度为 0%-20% 和 40%-60% 的条件下,网络对图像的识别准确率分别为 75.44% 和 82.96%,表明基于此忆阻器阵列的人工神经网络具备环境自适应的图像预处理能力。此外,该研究进一步探讨了以 MXene-ZnO 忆阻器作为突触实现感存算一体高级处理系统的权重更

新行为,其中突触权重受光、电及湿度多重调控。经过 60000 次训练后,神经网络系统表现出较高的识别准确率(图 12(e))。基于多模态忆阻器的感存算一体系统展现出降低传统视觉系统电路复杂性的潜力。

忆阻器的光-电-热多场协同调控已形成多条并行路径。基于 WO_x 和 CoPc 的忆阻器利用温-电耦合特性,可在特定温度范围内保持突触可塑性,且 CoPc 忆阻器在高温异常监测中达到 96.54% 的识别准确率。基于 ZnO-UCNPs 复合薄膜的忆阻器利用光热与光电两种耦合方式,实现了双向响应并用于生物运动检测^[121]。SnSe_{1.05} 忆阻器融合光、热、电三场感知,在血压诊断和高烧预警中准确率达 97.30%,兼具高耐久性与低能耗特性^[122]; V_2O_5 忆阻器利用光热耦合方式调整电导值进而灵活调控振荡神经元,可应用于 RC 与脉冲神经网络^[123]。纳米纤维忆阻器实现视觉-温度动态混合感知,准确率 98.8%^[124];a-C:Te 光电忆阻器系统完成了触觉-视觉融合识别,准确率 98.7%,拓展了边缘智能应用^[125]。多场协同还拓展至光-电-磁领域,BiFeO₃ 实现电场写入与磁场读取,为四维存储和磁电逻辑奠定基础;在光-电-力协同领域中,MAPbI₃ 忆阻器可利用压电效应实

现声音操控与存储;在磁-电-热领域中, HfO_2 忆阻器可以在高温下稳定响应磁场。湿度-电、声-电等双场耦合正被集成到多场系统中,用于热感知和视听双模态情绪分类,这些多场组合调制特性拓宽了忆阻器在智能感知与神经形态计算中的应用边界。

应用于神经形态计算研究中的多模态忆阻器,其不同器件在突触模拟、神经网络计算和感知融合任务中的表现存在显著差异。在突触可塑性模拟方面,界面型器件(如 $\text{Nb:SrTiO}_3/\text{Au}$)因其高线性度和对称性,可精确复现STDP、PPF等复杂规则,但开关比小限制了多级存储能力。导电细丝型器件(如 $\text{Ag/HfO}_2/\text{Pt}$)开关比大,但非线性随机性导致突触权重更新不精确,通常需要额外电路补偿。在神经网络计算方面,基于CNN的图像分类任务中,高线性度和对称性的器件(如双面钝化钙钛矿)可获得92%以上的准确率,而非线性明显的器件即使开关比再高,直接用于ANN也往往准确率低于85%。而SNN中,由于脉冲编码本身对模拟精度的容忍度稍高,导电细丝型器件的能耗更大。在多模态感知融合方面,跨模态(如视-触、视-听)系统的识别准确率显著高于单一模态,这是多模态忆阻器相对于传统单模态或分离式传感器系统的核心优势。

5 总结与展望

本综述主要从多模态忆阻器的材料体系、阻变机理以及神经形态功能与应用三个方面,系统回顾了近年来多模态忆阻器领域的重要进展。多模态忆阻器能够通过电场、光场、磁场及热场等多种物理信号协同调控其电阻状态,兼具结构简单、可集成密度高、运行功耗低等优势,为突破冯·诺依曼瓶颈、实现感存算一体化提供了理想的器件平台。无机材料(如金属氧化物、二维材料等)、有机材料(有机小分子、天然生物材料等)及有机-无机杂化材料(如杂化钙钛矿、金属有机框架等)各具特色,其中杂化材料通过原子级结构精确设计,在多模态协同响应方面展现出独特潜力。数字型忆阻器因其开关比高、阻态稳定、运行速度快等优势,在非易失性存储、逻辑运算及硬件信息安全等领域展示出良好的应用前景。模拟型忆阻器(尤其是光电、温-电等多模态调控型)具有电导连续可调、能耗低、(感)存算一体结合等优点,成为构筑神经形态(感)存算计算系统与多感官融合智能

节点的理想器件。尽管近期多模态忆阻器取得了诸多重要进展,但目前仍然面临着一些严峻的挑战。

(1)材料体系的多模态协同与匹配问题。多模态忆阻器的核心在于不同物理场(光、电、磁、热)在单一器件内的协同与解耦。现有活性层材料往往在某一外场响应上表现优异,但难以同时兼顾多种刺激的高灵敏度和低串扰。例如,氧化物材料光响应波段有限,有机材料热稳定性不足,杂化钙钛矿对水氧敏感。可以通过材料复合、能带结构设计、异质界面工程及缺陷工程等方法进一步优化。对于多物理场耦合的内在机制(如光-电协同下的离子迁移与电荷俘获竞争)仍研究不够深入,需要结合原位表征与多尺度理论模拟进行系统探索。

(2)忆阻器多模态调控的非理想特性问题。借助界面层设计、掺杂工程、电极选择和沉积参数优化等手段,多模态忆阻器的性能已取得显著提升,如通过紫外光或磁场调控实现了多态存储与突触可塑性。然而,当前忆阻器在多模态激励下的电导更新线性度、对称性和循环稳定性仍不理想,尤其是在光、热等非电激励与电脉冲协同作用时,易出现响应饱和、弛豫漂移等现象。如何实现快速、低功耗、高线性且环境鲁棒的多模态权重调制,仍是器件优化的重要方向。

(3)大规模集成与系统级可靠性问题。目前多模态忆阻器多基于实验室级薄膜制备技术(如磁控溅射、脉冲激光沉积、旋涂等),大面积均匀成膜及与CMOS后道工艺的兼容性仍面临挑战。此外,在交叉阵列架构中,多物理场引入的额外串扰(如光串扰、热串扰)以及潜行电流问题,进一步加剧了外围读写电路的设计复杂度。尽管部分工作已展示小规模阵列(如 4×4 、 10×10)的功能验证,但面向千级以上集成度的感存算一体芯片,仍需解决单元间一致性、功耗管理及热效应等系统级问题。

多模态忆阻器在类脑计算、边缘智能、生物电子接口及极端环境感知等领域正吸引着越来越多研究者的关注。未来,多模态忆阻器的发展仍需多领域交叉合作,包括材料科学、凝聚态物理、微电子工艺、集成电路设计、神经科学及人工智能算法等。基于多模态忆阻器的类脑计算芯片,有望通过材料基因组高通量筛选、三维异构集成、算

法-硬件协同设计及生物混合系统构建等路径,实现对生物感官融合与高效信息处理能力的硬件模拟,最终满足人类社会对海量异构数据实时处理与认知智能化的迫切需求。

参 考 文 献:

- [1] LvY, ChenH P, WangQ, *et al.* Post-silicon nano-electronic device and its application in brain-inspired chips[J]. *Front. Neurobot.* , 2022, 16: 948386.
- [2] ZhangY J, ZhengQ, ZhuX R, *et al.* Spintronic devices for neuromorphic computing[J]. *Sci. China: Phys. Mech. Astron.* , 2020, 63(7): 277531.
- [3] SakemiY, OkamotoY, MorieT, *et al.* Harnessing Nonidealities in Analog In-Memory Computing Circuits: A Physical Modeling Approach for Neuromorphic Systems[J]. *Adv. Intell. Syst.* , 2026, 8(1): 2500351.
- [4] ShenZ J, ShenJ D, ShengH R, *et al.* Heterogeneous Integration Strategies of Beyond-von Neumann Neuromorphic Electronics for Sensory in-Memory Computing[J]. *Adv. Funct. Mater.* , 2026, 36(39): e31922.
- [5] JinB Y, WangZ L, WangT Y, *et al.* Memristor-Based Artificial Neural Networks for Hardware Neuromorphic Computing [J]. *Research* , 2025, 8: 0758.
- [6] ZhangG C, ZengZ L, YanY J, *et al.* Ultraviolet-Regulated Synaptic-Neuronal Function Reconfigurable Transparent Memristor for Neuromorphic Computing Hardware[J]. *Adv. Funct. Mater.* , 2026, 36(34): e31113.
- [7] EslamiM R, BiswasD, TakhtardeshirS, *et al.* Efficient Memristor Neural Networks for Edge AI: On-Chip Learning, Noise Robustness, Device-Variation Tolerance, and Sublinear Energy and Time Scaling[J]. *IEEE Trans. Comput.* , 2026, 75(5): 1723-1736.
- [8] JiaoD, WangZ Y, WangJ R, *et al.* Memristive Physical Reservoir Computing[J]. *Adv. Sci.* , 2026: e75476.
- [9] FossiJ T, DeliV, EdimaH C, *et al.* Phase synchronization between two thermo-photoelectric neurons coupled through a Josephson Junction[J]. *Eur. Phys. J. B* , 2022, 95(4): 66.
- [10] WangL, ZuoZ. Reconfigurable Logic-In-Memory Implementation of Boolean Logic Functions Using Complementary Resistive-Switching Memristor Crossbar Arrays[J]. *J. Phys. Chem. Lett.* , 2026, 7(20): 5700-5708.
- [11] NamM, ChoH Y, LeeS E, *et al.* Memtransistor for bio-inspired neuromorphic computing: A perspective from device physics to neural and sensory systems[J]. *Appl. Phys. Lett. Mater.* , 2026, 14(2): 020901.
- [12] KhanR, IqbalS, HuiK N, *et al.* High-stability resistive switching memristor with high-retention memory window response for brain-inspired computing[J]. *Sens. Actuators A Phys.* , 2025, 385: 116316.
- [13] ChenS C, YangZ, HartmannH, *et al.* Electrochemical ohmic memristors for continual learning[J]. *Nat. Commun.* , 2025, 16(1): 2348.
- [14] XiaZ P, SunX, WangZ L, *et al.* Low-Power Memristor for Neuromorphic Computing: From Materials to Applications[J]. *Nano-Micro Lett.* , 2025, 17(1): 217.
- [15] LiaoK H, LeiP X, TuM L, *et al.* Memristor Based on Inorganic and Organic Two-Dimensional Materials: Mechanisms, Performance, and Synaptic Applications[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces* , 2021, 13(28): 32606-32623.
- [16] GoswamiS, DebD, TempezA, *et al.* Nanometer-Scale Uniform Conductance Switching in Molecular Memristors[J]. *Adv. Mater.* , 2020, 32(42): 2004370.
- [17] ZhouK, QiB Y, LiuZ W, *et al.* Advanced Organic-Inorganic Hybrid Materials for Optoelectronic Applications[J]. *Adv. Funct. Mater.* , 2024, 34(52): 211671.
- [18] TianQ L, ShanX Y, BianJ Y, *et al.* Metal oxide-based resistive switching memristors for neuromorphic computing[J]. *J. Mater. Chem. C* , 2025, 13(24): 12046-12065.
- [19] JangM, SongH C, KimH J, *et al.* Multielement Filament Memristor Enabling Multifunctional Neuromorphic Device[J]. *Adv. Funct. Mater.* , 2025, 35(24): 2423273.
- [20] KavianiM, RiccaC, AschauerU. Ferrimagnetism induced by thermal vibrations in oxygen-deficient manganite heterostructures[J]. *Phys. Rev. B* , 2025, 112(9): 094113.
- [21] JiY Y, HuS L, LiuJ H, *et al.* High-temperature ferromagnetic LaCoO₃ triggered by interfacial electron transfer and exchange coupling[J]. *Phys. Rev. B* , 2024, 109(17): 174423.
- [22] CuiD S, PeiM J, LinZ H, *et al.* Versatile optoelectronic memristor based on wide-bandgap Ga₂O₃ for artificial synapses

- and neuromorphic computing[J]. *Light Sci. Appl.*, 2025, 14(1): 161.
- [23] ZhengZ Y, QiaoB S, HanZ P, *et al.* Multi-defect-engineering in ZnO/GO heterostructures for optoelectronic synaptic devices with ultra-high dynamic range and low energy consumption[J]. *Infomat*, 2026, 8(1): e70089.
- [24] IsmailM, RasheedM, ParkY, *et al.* Enhanced analog switching and neuromorphic performance of ZnO-based memristors with indium tin oxide electrodes for high-accuracy pattern recognition[J]. *J. Chem. Phys.*, 2024, 161(13): 134702.
- [25] DongC L, KangK J, WangY H, *et al.* Optoelectronic memristive sensor with reconfigurable logic operation capability in ZnO/Nb:SrTiO₃ heterojunction[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2025, 127(2): 023504.
- [26] ZhengJ H, DuY M, DongY J, *et al.* Fully light-modulated memristor based on ZnO/MoO_x heterojunction for neuromorphic computing[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124(13): 133502.
- [27] YangW H, KanH, ShenG Z, *et al.* A Network Intrusion Detection System with Broadband WO_{3-x}/WO_{3-x}-Ag/WO_{3-x} Optoelectronic Memristor[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(23): 2312885.
- [28] GaoH, LiaoJ H, ChenY T, *et al.* Photothermal Engineering in Ta₂O₅ Memristors: Blue-Laser-Driven Filament Reorientation for On/Off Ratio Enhancement[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2025, 17(46): 63532-63539.
- [29] KimT Y, SchimpfJ, PaulA, *et al.* Strong intrinsic multiferroism and magnetoelectric coupling in (1-x)BiFeO₃-(x)BaTiO₃ films[J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2026, 123(18): e2603475123.
- [30] QuintanaA, MagenC, FarahaniM G, *et al.* Electronically Driven Magnetoelectric Coupling in Co/La:Hf_{0.5}Zr_{0.5}O₂ Heterostructures for Energy-Efficient Neuromorphic Computing[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2026, 18(9): 13970-13979.
- [31] TaniyamaT, GohdaY, HamayaK, *et al.* Artificial multiferroic heterostructures-electric field effects and their perspectives [J]. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2024, 25(1): 2412970.
- [32] JenaA K, SahooA K, MohantyJ. Effects of magnetic field on resistive switching in multiferroic based Ag/BiFeO₃/FTO RRAM device[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2020, 116(9): 092901.
- [33] AthenaF F, NnajiM, VacaD, *et al.* MAX Phase Ti₂AlN for HfO₂ Memristors with Ultra-Low Reset Current Density and Large On/Off Ratio[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(29): 2316290.
- [34] ZhaoJ, JorgensenC S, MahalingamK, *et al.* High-temperature memristors enabled by interfacial engineering[J]. *Science*, 2026, 392(6799): 771-779.
- [35] ZhouZ C, YangF Y, WangS, *et al.* Emerging of two-dimensional materials in novel memristor[J]. *Front. Phys.*, 2022, 17(2): 23204.
- [36] TangK, WangY, GongC H, *et al.* Electronic and Photoelectronic Memristors Based on 2D Materials[J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2022, 8(4): 2101099.
- [37] NibhanupudiS S T, RoyA, VekslerD, *et al.* Ultra-fast switching memristors based on two-dimensional materials[J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 2334.
- [38] LinY H, WangW X, LiR L, *et al.* Multifunctional optoelectronic memristor based on CeO₂/MoS₂ heterojunction for advanced artificial synapses and bionic visual system with nociceptive sensing[J]. *Nano Energy*, 2024, 121: 109267.
- [39] DebnathS, MiaA K, MeyyappanM, *et al.* Superior performance of printed optoelectronic synapses based on defect-controlled monolayer MoS₂ with ultralow power consumption for neuromorphic computing[J]. *Nanoscale*, 2026, 18(1): 242-259.
- [40] PanagopoulouC, BousoulasP, PapouliG I, *et al.* Reconfigurable optoelectronic neuromorphic properties of MoS₂-based memristors decorated with Pt nanoparticles for low power spiking neural network applications[J]. *Neuromorphic Comput. Eng.*, 2025, 5(2): 024010.
- [41] HeH K, YangR, XiaJ, *et al.* High-uniformity Memristor Arrays Based on Two-dimensional MoTe₂ for Neuromorphic Computing[J]. *J. Inorg. Mater.*, 2022, 37(7): 795-801.
- [42] XieS H, DeyA, YanW J, *et al.* Ferroelectric semiconductor junctions based on graphene/In₂Se₃/graphene van der Waals heterostructures[J]. *2D Mater.*, 2021, 8(4): 045020.
- [43] LowM X, TawfikS A, RussoS P, *et al.* Strain Modulation of Optoelectronic Properties in Nanolayered Black Phosphorus: Implications for Strain-Engineered 2D Material Systems[J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2022, 5(9): 12189-12195.
- [44] ShiK Q, HanJ Q, LinY, *et al.* Polarization-sensitive optoelectronic synapse with all-optical modulation enabling static image processing and microscopic biological motion detection[J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 526: 170924.
- [45] AhmedT, TahirM, LowM X, *et al.* Fully Light-Controlled Memory and Neuromorphic Computation in Layered Black

- Phosphorus[J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(10): 2004207.
- [46] KumarD, LiH R, DasU K, *et al.* Flexible Solution-Processable Black-Phosphorus-Based Optoelectronic Memristive Synapses for Neuromorphic Computing and Artificial Visual Perception Applications[J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(28): 2300446.
- [47] LiX, YangC, XiaY, *et al.* Nonvolatile Electrical Valley Manipulation in WS₂ by Ferroelectric Gating[J]. *ACS Nano*, 2022, 16(12): 20598-20606.
- [48] JiangC Y, LiuF C, CuadraJ, *et al.* Zeeman splitting via spin-valley-layer coupling in bilayer MoTe₂[J]. *Nat. Commun.*, 2017, 8: 802.
- [49] SahaS, RoyB, DeyT, *et al.* Tunable Resistive Switching in CsPbBr₃ Nanocrystal-Based Memristors for Artificial Synapse and Neuromorphic Applications[J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2025, 10(19): e00720.
- [50] WuF C, SuZ M, HsuY C, *et al.* Microstructure-modulated conductive filaments in Ruddlesden-Popper perovskite-based memristors and their application in artificial synapses[J]. *Mater. Today Phys.*, 2025, 53: 101708.
- [51] LeeJ W, CaiL, NamJ, *et al.* Bifacially Engineered Perovskite-Based Synaptic Memristors Achieve High Linearity and Symmetricity for Accurate and Robust Neuromorphic Computing[J]. *Adv. Sci.*, 2025, 12(42): e11489.
- [52] CuiD S, GuoP S, XuY M, *et al.* Self-Powered Halide Perovskite Optoelectronic Synaptic Memristors for Reconfigurable Logic and Reservoir Computing Applications[J]. *Nano Lett.*, 2025, 25(43): 15705-15713.
- [53] XiongL Q, ChenY, YuJ, *et al.* Stretchable ferroelectric field-effect-transistor with multi-level storage capacity and photo-modulated resistance[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2019, 115(15): 153107.
- [54] QianY Z, LiJ Y, ShenJ H, *et al.* In-Depth Physical Mechanism Analysis of Polymer Artificial Optoelectronic Synapse with High Endurance and Applications of Visual System and Operant Conditioning[J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2023, 9(10): 2300135.
- [55] PatilH, KimH, RehmanS, *et al.* Stable and Multilevel Data Storage Resistive Switching of Organic Bulk Heterojunction [J]. *Nanomaterials*, 2021, 11(2): 359.
- [56] YangD L, YangH Y, GuoX Y, *et al.* Robust Polyethylenimine Electrolyte for High Performance and Thermally-Stable Atomic Switch Memristors[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(50): 2004514.
- [57] ZhangX S, WuC, LvY J, *et al.* High-Performance Flexible Polymer Memristor Based on Stable Filamentary Switching [J]. *Nano Lett.*, 2022, 22(17): 7246-7253.
- [58] LiZ S, WangJ Q, XuL X, *et al.* Achieving Reliable and Ultrafast Memristors via Artificial Filaments in Silk Fibroin[J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(4): 2308843.
- [59] PanditN, MandalR, PalA, *et al.* Two terminal artificial synaptic devices from self-assembled, crystalline thin film of an organic small molecule for neuromorphic applications[J]. *Org. Electron.*, 2026, 149: 107364.
- [60] CaiZ H, FangY X, DuW J, *et al.* Broadband All-Optical Memtransistor Based on Organic Cocrystals for Noise-Robust Motion Recognition[J]. *Adv. Sci.*, 2026, 13(8): e15087.
- [61] FengT Y, LiQ X, HuX M, *et al.* TIPS-pentacene organic field-effect transistor for optoelectronic neuromorphic simulation [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2024, 63(3): 031008.
- [62] LiaoC R, LiuD, LiuZ, *et al.* Coexistence of the Negative Photoconductance Effect and Analogue Switching Memory in the CuPc Organic Memristor for Neuromorphic Vision Computing[J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2024, 15(23): 6230-6236.
- [63] XuZ, ChenS J, PanY L, *et al.* Preparation of organic N-fused perylene diimide-MXene hybrid material for robust versatile memristive device[J]. *Int. J. Extrem. Manuf.*, 2025, 7(2): 025507.
- [64] YiH M, YuG, LvZ L, *et al.* Simultaneously elevating the resistive switching performance and thermal/irradiative stabilities of biomemristor based on twisted carboxylated multi-walled carbon nanotube-chitosan composites [J]. *J. Alloys Compd.*, 2023, 952: 169934.
- [65] ChoiJ, LeeS H, KimT, *et al.* Enhanced Resistive Switching and Conduction Mechanisms in Silk Fibroin-Based Memristors with Ag Nanoparticles for Bio-Neuromorphic Applications[J]. *Nanomaterials*, 2025, 15(7): 517.
- [66] DuS, XuB D, ChenJ K, *et al.* Biomimetic integrated mesoscopic hybrid silk sericin biomemristor with low power and multilevel resistant state for image reconstruction[J]. *Colloids Surf. A*, 2026, 729: 138933.
- [67] HuoD, GuZ, SongB, *et al.* High-Performance Memristors Based on Ordered Imine-Linked Two-Dimensional Covalent Organic Frameworks for Neuromorphic Computing[J]. *Interdiscip. Mater.*, 2025, 4(3): 515-523.

- [68] LiC, LiD, ZhangW, *et al.* Towards High-Performance Resistive Switching Behavior through Embedding a D-A System into 2D Imine-Linked Covalent Organic Frameworks[J]. *Angew Chem Int Ed Engl*, 2021, 60(52): 27135-27143.
- [69] LiJ, ZhangB, ZhouB, *et al.* Covalent organic framework-based photoelectric dual-modulated memristors for wafer surface quality evaluation[J]. *Matter*, 2025, 8(10): 102197.
- [70] ZhangQ, CheQ, XuanF, *et al.* Donor-redox covalent organic framework-based memristors for visual neuromorphic system[J]. *Infomat*, 2025, 7(9): e70035.
- [71] WangH, ZhaoJ, HuangT, *et al.* Hydrothermal Synthesis of Vinylidene-Linked Ionic Covalent Organic Frameworks for Robust Biomimetic Memristors[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2025, 17(33): 47337-47346.
- [72] ZhouP-K, HuangY, YuZ, *et al.* Thermally triggered topological polymerization in diacetylene-functionalized covalent organic framework toward enhanced memristive properties[J]. *Sci. China Chem.*, 2025, 68(7): 3230-3237.
- [73] LiuZ H, ChengP P, KangR Y, *et al.* Piezo-Acoustic Resistive Switching Behaviors in High-Performance Organic-Inorganic Hybrid Perovskite Memristors[J]. *Adv. Sci.*, 2024, 11(10): 2308383.
- [74] ZiJ, SunJ, YangB, *et al.* Multidimensional and reconfigurable optical neuromorphic computing using perovskite-based all-photonics synapses[J]. *Commun. Mater.*, 2026, 7(1): 92.
- [75] SunK X, WangQ R, ZhouL, *et al.* 2D-3D perovskite memristor with low energy consumption and high stability for neural morphology calculation[J]. *Sci. China Mater.*, 2023, 66(5): 2013-2022.
- [76] YangX, HuangJ, LiJ J, *et al.* Optically Mediated Nonvolatile Resistive Memory Device Based on Metal-Organic Frameworks[J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(35): 2313608.
- [77] TranT N H, LeT H, TaH K T, *et al.* C-AFM study on multi-resistive switching modes observed in metal-organic frameworks thin films[J]. *Org. Electron.*, 2021, 93: 106136.
- [78] KaushikD, SharmaH, SainiN, *et al.* Zeolitic-imidazolate framework (ZIF-67) based bipolar memristor for nonvolatile ReRAM application[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124(23): 233506.
- [79] ZhaoY Q, LiX Y, HuangY B, *et al.* Intrinsically Stretchable Resistive Memory Devices Utilizing Wavy Structured Strategy Integrated with Metal-Organic Framework Glasses[J]. *Small Methods*, 2025, 9(8): 2500229.
- [80] LiH L, XuF C, WangJ L, *et al.* Self-healing fluorinated poly(urethane urea) for mechanically and environmentally stable, high performance, and versatile fully self-healing triboelectric nanogenerators [J]. *Nano Energy*, 2023, 108: 108243.
- [81] SunY M, DongY, LiZ Y, *et al.* A biomimetic nociceptor system with tactile perception based on Ni-Al layered double hydroxides/gelatin heterojunction memristor[J]. *Chem. Eng. J.*, 2024, 482: 148945.
- [82] LiH Z, GaoQ, GaoJ, *et al.* Controllability of the Conductive Filament in Porous SiO_x Memristors by Humidity-Mediated Silver Ion Migration[J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(39): 46449-46459.
- [83] PengZ H, WuF C, JiangL, *et al.* HfO₂-Based Memristor as an Artificial Synapse for Neuromorphic Computing with Tri-Layer HfO₂/BiFeO₃/HfO₂ Design[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(48): 2107131.
- [84] LeeM J, LeeC B, LeeD, *et al.* A fast, high-endurance and scalable non-volatile memory device made from asymmetric Ta₂O_{5-x}/TaO_{2-x} bilayer structures[J]. *Nat. Mater.*, 2011, 10(8): 625-630.
- [85] HusS M, GeR J, ChenP A, *et al.* Observation of single-defect memristor in an MoS₂ atomic sheet[J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2021, 16(1): 58-62.
- [86] HuangB H, ZhaoX F, LiX Q, *et al.* Schottky Barrier Control of Self-Polarization for a Colossal Ferroelectric Resistive Switching[J]. *Acs Nano*, 2023, 17(13): 12347-12357.
- [87] JiangF, JiangX X, ZhengW H, *et al.* Broadband emission in all-inorganic metal halide perovskites with intrinsic vacancies[J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(40): 13976-13981.
- [88] KunwarS, JerniganZ, HughesZ, *et al.* An Interface-Type Memristive Device for Artificial Synapse and Neuromorphic Computing[J]. *Adv. Intell. Syst.*, 2023, 5(8): 2300035.
- [89] MaC, LuoZ, HuangW C, *et al.* Sub-nanosecond memristor based on ferroelectric tunnel junction[J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 1439.
- [90] RaoF, DingK Y, ZhouY X, *et al.* Reducing the stochasticity of crystal nucleation to enable subnanosecond memory writing[J]. *Science*, 2017, 358(6369): 1423-1426.
- [91] HeH K, JiangY B, YuJ, *et al.* Ultrafast and stable phase transition realized in MoTe₂-based memristive devices[J]. *Ma-*

- ter. *Horiz.*, 2022, 9(3): 1036-1044.
- [92] ChenZ L, YuY, JinL F, *et al.* Artificial synapses with photoelectric plasticity and memory behaviors based on charge trapping memristive system[J]. *Mater. Des.*, 2020, 188: 108415.
 - [93] LeeY, ParkJ, ChungD, *et al.* Multi-level Cells and Quantized Conductance Characteristics of Al₂O₃-Based RRAM Device for Neuromorphic System[J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2022, 17(1): 84.
 - [94] JaafarA H, KempN T. Light-Mediated Multilevel Neuromorphic Switching in a Hybrid Organic-Inorganic Memristor[J]. *Acs Omega*, 2024, 9(52): 51641-51651.
 - [95] TripathiR, MisraA. A novel approach towards molecular memory device in gate tunable structure of MoS₂-graphene[J]. *Nano Res.*, 2021, 14(1): 177-184.
 - [96] KumariP, KoJ, RaoV R, *et al.* Non-Volatile Organic Transistor Memory Based on Black Phosphorus Quantum Dots as Charge Trapping Layer[J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2020, 41(6): 852-855.
 - [97] RiazM, AbbasZ, LiJ Y, *et al.* Monochalcogenide-based retina-inspired photosynapses for energy-efficient neuromorphic computing and artificial visual system application[J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 521: 167022.
 - [98] LvZ Y, JiangM H, LiuH Y, *et al.* Temperature-Resilient Polymeric Memristors for Effective Deblurring in Static and Dynamic Imaging[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(23): 2424382.
 - [99] LiD L, ZhangJ Y, LiJ, *et al.* Photoelectric memristor with reconfigurable photoconductivity for neuromorphic computing [J]. *Adv. Compos. Hybrid Mater.*, 2025, 8(6): 443.
 - [100] CuiH Y, XiaoY, YangY, *et al.* A bioinspired in-materia analog photoelectronic reservoir computing for human action processing[J]. *Nat. Commun.*, 2025, 16(1): 2263.
 - [101] AnconinaI, LeirikhT, ShekhterP, *et al.* Fluorinated interphases by LiF-PIL composite coating via electrophoretic deposition: Enhanced interfacial stability of high-voltage nickel-rich cathode[J]. *Nano Energy*, 2025, 143: 111334.
 - [102] NathS K. A light-driven device for neuromorphic computing[J]. *Light Sci. Appl.*, 2025, 14(1): 37.
 - [103] JangH, KimS, JuS, *et al.* Multifunctional ZnO-based optical memristors for synapse-neuron integration and neuromorphic vision systems[J]. *Nanoscale*, 2025, 17(42): 24566-24577.
 - [104] LuC, MengJ L, SongJ R, *et al.* Self-Rectifying All-Optical Modulated Optoelectronic Multistates Memristor Crossbar Array for Neuromorphic Computing[J]. *Nano Lett.*, 2024, 24(5): 1667-1672.
 - [105] AbbasZ, RiazM, JafferyS H A, *et al.* Chalcogenide-Based Brain-Inspired Photo-Synapses for Neuromorphic Vision Sensor: An Experimental and Theoretical Study[J]. *Small*, 2025, 21(42): e04294.
 - [106] LiD L, TangX G, SunQ J, *et al.* Neurosynaptic-like behavior of ferroelectric memristors with photoelectric dual-mode modulation[J]. *Appl. Surf. Sci.*, 2025, 688: 162371.
 - [107] GaoX X, CuiD S, GuoP S, *et al.* Artificial Synapses and Logic Gates Based on Tellurium Oxide Memristors for Artificial Vision Applications[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2026, 36(13): e15165.
 - [108] LeeJ, JeongB H, KamarajE, *et al.* Light-enhanced molecular polarity enabling multispectral color-cognitive memristor for neuromorphic visual system[J]. *Nat Commun*, 2023, 14(1): 5775.
 - [109] ZhangZ F, ZhaoX L, ZhangX M, *et al.* In-sensor reservoir computing system for latent fingerprint recognition with deep ultraviolet photo-synapses and memristor array[J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 6590.
 - [110] CaiS Y, HanM Y, GaoP F, *et al.* Multi-layer reservoir computer based on wavelength division multiplexing optoelectronic feedback loops[J]. *Opt. Fiber Technol.*, 2025, 94: 104344.
 - [111] KimH W, KimJ H, ShinD H, *et al.* Neuromorphic Visual Receptive Field Hardware with Vertically Integrated Indium-Gallium-Zinc-Oxide Optoelectronic Memristors over Silicon Neuron Transistors[J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(3): e13907.
 - [112] KimS, ChoJ I, LeeS, *et al.* Timing-Dependent Spiking Neural Network: Board-Level Hardware Implementation with Photoelectroactive Van der Waals Synapses[J]. *Adv. Mater.*, 2026, 38(23): e73052.
 - [113] ZhouZ Y, WangL L, LiuG J, *et al.* A facile photonics reconfigurable memristor with dynamically allocated neurons and synapses functions[J]. *Light Sci. Appl.*, 2025, 14(1): 269.
 - [114] Owen-NewnsD, RobertsonJ, DonatiG, *et al.* Neuromorphic Photonic Processing and Memory With Spiking Resonant Tunneling Diode Neurons and Neural Networks[J]. *Adv. Intell. Syst.*, 2026, 8(4): e202500800.
 - [115] 朱佳雪,张续猛,王睿,等. 面向神经形态感知和计算的柔性忆阻器基脉冲神经元[J]. 物理学报, 2022, 71

- (14): 338-349.
- ZHU JX, ZHANG XM, WANG R, *et al.* Flexible memristive spiking neuron for neuromorphic sensing and computing [J]. *Acta Phys. Sin.*, 2022, 71(14): 338-349. (in Chinese)
- [116] DuanH X, WuZ X, XiongT, *et al.* An in-sensor neuromorphic visual system based on IGZO/PCBM photoresponsive memristors[J]. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2026, 59(2): 025107.
- [117] HuangH, LiangX, WangY, *et al.* Fully integrated multi-mode optoelectronic memristor array for diversified in-sensor computing[J]. *Nat Nanotechnol.*, 2025, 20(1): 93-103.
- [118] BianJ Y, LiZ Z, LiangS, *et al.* 2D Tellurene-Based Optoelectronic Memristor with Temporal Dynamics for Multimodal Reservoir Computing System[J]. *Adv. Sci.*, 2025, 12(43): e13647.
- [119] 史佳娟, 单旋宇, 王中强, 等. 氧化锌基忆阻器件研究进展[J]. *发光学报*, 2025, 46(05): 753-769.
- SHI JJ, SHAN XY, WANG ZQ, *et al.* Recent Progress in ZnO-based Memristive Devices[J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(05): 753-769. (in Chinese)
- [120] WangY, GongY, YangL, *et al.* MXene-ZnO Memristors: MXene-ZnO Memristor for Multimodal In-Sensor Computing[J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(21): 2100144.
- [121] HanJ, MaoH, LinY, *et al.* Near-Infrared Optoelectronic Memristor with All-Optical Modulation for Microscopic Biological Motion Recognition[J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(45): e10185.
- [122] WangH, LiuH, FangZ, *et al.* Real-time monitoring and early warning neuromorphic system based on high-endurance three-mode sensing memristors[J]. *Chem. Eng. J.*, 2025, 516: 163914.
- [123] AddaC, LeeM-H, KalcheimY, *et al.* Direct observation of the electrically triggered insulator-metal transition in V_3O_5 far below the transition temperature[J]. *Phys. Rev. X*, 2022, 12(1): 011025.
- [124] WenS, LiuY, LiY, *et al.* Dynamic hybrid visual-thermal multimodal perception neuromorphic devices based on defect modulation of electrospun nanofibers[J]. *Int. J. Extrem. Manuf.*, 2024, 7(2): 025506.
- [125] TianQ, XunK, LiZ, *et al.* Optoelectronic memristor based on aC: Te film for multi-mode reservoir computing[J]. *J. Semicond.*, 2025, 46(2): 022407.



苗印晖(2001-),男,江苏连云港人,硕士研究生,2023年于南京邮电大学获得学士学位,主要从事有机半导体忆阻器及其在神经网络计算中的应用研究。
Email: myh0120@njtech.edu.cn



周嘉(1994-),女,安徽滁州人,博士,讲师,2025年于南京邮电大学获得博士学位,主要从事有机半导体忆阻器及其在边缘计算中的应用研究。
Email: iamjzhou@njupt.edu.cn



石伟(1980-),女,黑龙江齐齐哈尔人,博士,副教授,2011年于东北林业大学获得博士学位,主要从事生物活性基质忆阻器及有机半导体忆阻器的研究。
Email: iamwshi@njtech.edu.cn



李雯(1991-),女,江苏徐州人,博士,副教授,2017年于南京邮电大学获得博士学位,主要从事有机半导体存储器及忆阻器的研究。
Email: iamwli@njupt.edu.cn