

文章编号: 1000-7032(2025)02-0245-15

氧化物全光控突触研究进展

单 海^{1,2}, 应宏微³, 程培红^{2,3}, 胡令祥², 王敬蕊³,
叶志镇^{4,5}, 诸葛飞^{2,5,6,7*}

1. 宁波大学 材料科学与化学工程学院, 浙江 宁波 315211;
2. 中国科学院 宁波材料技术与工程研究所, 浙江 宁波 315201;
3. 宁波工程学院 电子与信息工程学院, 浙江 宁波 315211;
4. 浙江大学 材料科学与工程学院, 硅及先进半导体材料全国重点实验室, 浙江 杭州 310027;
5. 浙江大学 温州研究院, 浙江 温州 325006;
6. 中国科学院 脑科学与智能技术卓越创新中心, 上海 200031;
7. 中国科学院大学 材料科学与光电技术学院, 北京 100029)

摘要: 类脑神经形态计算有望克服传统冯·诺依曼计算架构瓶颈, 实现低功耗、高效信息处理, 进而推动人工智能技术的发展。人工突触是构建神经形态系统的关键硬件, 其中光电突触结合了电子学和光学优势, 具有光学感知、信息计算和存储等多种功能。新兴的全光控光电突触, 其电导非易失性增大和降低均通过光信号实现, 可有效避免电信号对器件微结构的破坏, 改善工作稳定性, 并且赋予突触器件新的功能。氧化物易制备, 与 CMOS 工艺兼容性好, 是使用最广泛的人工突触材料。本文梳理了具有长程可塑性的氧化物全光控突触器件研究进展, 分别讨论了基于光波长和光功率调控的全光控突触, 主要聚焦器件结构、材料选择和光电响应机制, 最后分析了当前全光控突触发展面临的挑战。

关键词: 神经形态计算; 光电突触; 全光控突触; 长程可塑性; 氧化物

中图分类号: O472 文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20240251 CSTR: 32170.14.CJL.20240251

Advances in All-optically Controlled Oxide Synapses

SHAN Hai^{1,2}, YING Hongwei³, CHENG Peihong^{2,3}, HU Lingxiang², WANG Jingrui³,
YE Zhizhen^{4,5}, ZHUGE Fei^{2,5,6,7*}

1. School of Materials Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;
2. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;
3. School of Electronic and Information Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China;
4. State Key Laboratory of Silicon and Advanced Semiconductor Materials, School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;
5. Institute of Wenzhou, Zhejiang University, Wenzhou 325006, China;
6. Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200072, China;
7. School of Materials Science and Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhugefei@nimte.ac.cn

Abstract: Brain-like neuromorphic computing is expected to overcome the bottleneck of traditional von Neumann computing architecture, achieving low power consumption and highly efficient information processing, thereby advancing artificial intelligence technology. Artificial synapses are key hardware for building neuromorphic systems,

收稿日期: 2024-10-10; 修订日期: 2024-10-28

基金项目: 国家自然科学基金(U20A20209, 62304228); 中国科学院战略性先导专项(XDB32050204); 浙江省自然科学基金(LQ22F040003); 宁波市自然科学基金(2023J356)

Supported by National Natural Science Foundation of China (U20A20209, 62304228); Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDB32050204); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LQ22F040003); Ningbo Natural Science Foundation (2023J356)

among which photoelectric synapses combine the advantages of electronics and photonics, offering multiple functions such as optical perception, information computation and storage. Emerging all-optically controlled photoelectric synapses, which allow nonvolatile increase and decrease in conductance by optical signals, can effectively prevent damage to the device microstructure caused by electrical signals, improving working stability, and endow synaptic devices with new functions. Oxide is the most widely used artificial synaptic material because of its ease of preparation and good compatibility with CMOS technology. This paper reviews the research progress of all-optically controlled (AOC) oxide synapses with long-term plasticity. The AOC synapses are discussed in terms of conductance modulation methods, including light wavelength and light power density modulation, focusing on device structure, material selection, and photoelectric response mechanism. Finally, we analyze the current challenges faced by all-optically controlled synapses.

Key words: neuromorphic computing; photoelectric synapses; all-optically controlled synapses; long-term plasticity; oxides

1 引 言

随着现代社会信息化、智能化程度的提高,对计算机性能提出了越来越高的要求,包括更低功耗、更高能效比、更快速度,以及针对不同应用场景和需求进行实时、自适应调整的能力。传统冯·诺依曼架构计算机由于存在存储墙和自适应性差的短板,难以满足新的计算需求,限制了人工智能技术的进一步发展^[1-2]。人类大脑是一种高效生物计算系统,其功耗仅为 20 W,具有事件驱动、并行计算、存算融合、自适应等特点^[3]。它在执行复杂模糊的计算任务,如决策制定、模式识别等方面,远超现代数字计算机。神经形态计算是一种受人脑启发的新计算范式,通过模仿人脑的结构和功能来提高计算效率和速度,有望克服传统冯·诺依曼架构中的存储墙问题,因此是推动人工智能发展的重要潜在技术^[4-5]。

自上世纪 80 年代加州理工学院卡佛·米德^[6]提出“神经形态”概念以来,神经形态计算得到了深入研究和快速发展。人工突触是构成神经形态系统的基础硬件。与生物突触类似,人工突触可将输入信息以电信号的形式存储在功能层中,并通过权重更新对信息进行处理。早期的神经形态硬件使用互补金属氧化物半导体(CMOS)电路模拟突触功能。IBM 在 2014 年基于 CMOS 技术搭建了内置 100 万个人工神经元与 2.56 亿个人工突触的 True North 芯片^[7]。清华大学设计出“天机芯”芯片,包含约 40 000 个神经元和 4 000 万个突触^[8];然而,通过传统 CMOS 技术搭建的神经形态芯片面临诸多挑战。首先,一个基本突触事件需要巨大能耗,如形成兴奋性突触后电流(EPSC),

消耗的能量是生物突触的 100 万倍;其次,对于突触可塑性功能的模拟需要多个 CMOS 器件来实现,因此集成密度较低,制约了神经形态芯片规模的扩大;最后,CMOS 神经形态芯片对于突触功能模拟准确度低,制约了该技术进一步发展。忆阻器^[9]、浮栅晶体管^[10]、相变器件^[11]、磁阻器件^[12]、铁电器件^[13]等新型存储器件的出现为人工突触的发展带来了新曙光。与传统 CMOS 技术相比,这些器件可以更精确模拟突触功能,并且功耗低、速度快、集成度高。

突触器件的权重一般用电学或光学参数表示,其中电学参数以电导为主,本文仅讨论以电导作为突触权重的情况。突触器件电导一般利用电压或电流进行可逆调控,易诱发器件中离子迁移和焦耳热,因此面临功耗高、稳定差等问题^[14-15]。如果利用光替代电来调控突触电导,则可避免器件微结构变化,消除焦耳热,从而降低功耗、提高稳定性。此外,突触器件直接感光,有助实现感存算一体功能,可用于开发新一代人工视觉芯片。2010 年,Agnes 等^[16]基于持续光电导(PPC)效应首次实现了光电碳纳米管晶体管突触,随后,基于不同材料和结构的光电突触被相继报道^[17-18]。但是,由于半导体材料的本征光电效应,光只能增大器件电导,电导非易失降低需要借助电信号才能实现,因此电导可逆调控必须通过电信号和光信号的组合实现。然而,这一方面增加了操作复杂性,另一方面,电信号的引入影响器件稳定性能。对于理想的光电突触,其电导应该可全光可逆调控,即电导的增大和降低均通过光信号实现。2020 年,中国科学院宁波材料所^[19-20]基于双层 InGaZnO (IGZO)忆阻器,同时实现了器件电导的光致非易

失增大和降低,首次制备出具有长程可塑性的全光控突触器件。本文仅讨论电导增大和降低过程均表现出长程可塑的全光控突触,任一过程只能实现短程可塑性的器件都不属于本文的讨论范畴。

对于全光控突触,感光功能层材料的选择至关重要。目前,多种功能材料被报道具有优异的光响应能力,包括氧化物(如IGZO^[19-20]、ZnO^[21]、CeO_x^[22]、TaO_x^[23]、TiO₂^[24])、低维纳米材料(如石墨烯^[25]、硒化物^[26])、有机材料^[27]、钙钛矿材料^[28]等。其中,氧化物材料具有诸多应用优势。首先,氧化物可通过多种方法制备,如磁控溅射、化学气相沉积、原子层沉积等,这为全光控突触的制备提供了便利;其次,氧化物与现有CMOS工艺兼容,有助于实现高集成度突触阵列及芯片,这对于构建大规模神经形态计算系统至关重要;最后,氧化物具有良好的化学稳定性和热稳定性,有利于提高器件的长期稳定性,降低失效率。

本文综述了氧化物全光控突触器件的研究进展。简单介绍了生物突触的概念,概述了电子突触和光电突触的概念和类型,详细讨论了氧化物全光控突触的器件种类、调控手段、光电响应机制等,最后探讨了全光控突触器件面临的挑战。

2 生物突触

人类大脑中大约有860亿个神经元,由大约150万亿个突触连接起来,形成复杂的神经网络^[29]。其中,突触结构如图1所示,包括突触前神

经元的轴突末梢(突触前膜)、突触间隙和突触后神经元树突或细胞体的突触后细胞膜三部分^[30]。神经元间通过突触传递信息的具体过程如下:来自突触前神经元的动作电位首先到达轴突末梢,引起钙离子内流进入突触前膜,导致神经递质释放到突触间隙中;随后神经递质与突触后膜上的受体结合,导致突触后膜上特定离子通道的激活或抑制,产生相应的兴奋性突触和抑制性突触。

突触权重是神经科学中的重要概念,它指的是两个神经元之间连接的强度或振幅。在生物神经网络中,突触权重随时间变化进而改变神经元间信号传递效率的特性称之为突触可塑性^[31],是人脑实现学习、记忆以及其他生物高级功能的基础。突触可塑性包括长时程可塑性和短时程可塑性。短时程可塑性指在很短的时间内(通常是毫秒到几秒的范围内)突触权重的变化(增强或减弱)。这种变化可逆且不涉及长期结构改变,是神经系统中信息处理和临时记忆形成的重要机制。短时程可塑性中突触权重增强称之为短时程增强,突触权重减弱称之为短时程抑制。此外,短时程可塑性还包括双脉冲易化(PPF)以及双脉冲抑制(PPD)等重要功能。其中PPF是指当施加两个连续脉冲时,第二个脉冲的响应幅度会大于第一个,且响应幅度差值取决于两个脉冲的时间间隔,PPD则与之相反。长时程可塑性指在很长时间内突触权重的变化。这种变化可以保持,是长期记忆形成的重要机制。长时程可塑性分为长时程增强(LTP)与长时程抑制(LTD)。基于长时程可塑

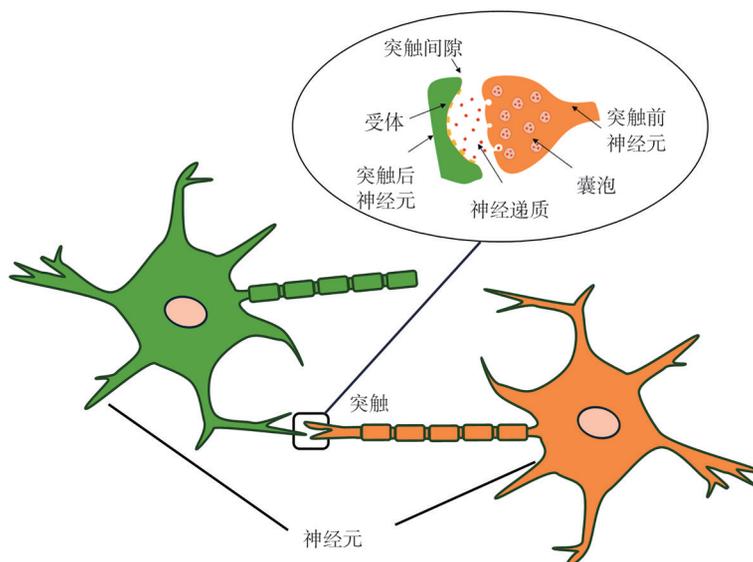


图1 生物突触结构示意图

Fig. 1 Schematic of the structure of biological synapses

性可实现脉冲时间依赖可塑性与脉冲频率依赖可塑性等重要突触功能。

3 人工突触

人工突触用于模拟生物神经系统的突触功能,它的研究对于构建高性能神经形态计算系统和推动人工智能的进一步发展具有重要意义。人工突触的权重一般用电学或光学参数表示,其中电学参数以电导为主,本文仅讨论以电导作为突触权重的情况。该类突触主要包括电控突触和光电突触,前者电导利用电信号进行可逆调控,易诱发器件中离子迁移和焦耳热,因此面临功耗高、稳定性差等问题;后者引入光信号更新权重,结合了光子学和电子学的优势,具有功耗低、稳定性好等

优点。根据权重更新方法,光电突触可以分为光电协同调控型以及全光调控型。目前,绝大部分光电突触采用光信号和电信号协同调控器件电导,具体包括光增强-电抑制^[22,32]、电增强-光抑制^[23,33]、光辅助-电调控^[34-35]、电辅助-光调控^[36-56]四种类型。以忆阻型光电突触为例,对于 CeO_x/ZnO 忆阻器,施加405 nm蓝光可实现光写入,施加负电压可实现电擦除(图2(a))^[22];而 $\text{TaO}_x/\text{Zn}_2\text{SnO}_4$ 忆阻器则可通过施加正偏压实现电写入,施加405 nm蓝光实现光擦除(图2(b))^[23];对于 KI-MAPbI_3 忆阻器,通过光辅助可实现正负电脉冲下的电导可逆调控(图2(c))^[35];而 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 忆阻器可通过施加两个栅极偏置电压,红外光增大器件电导,红光降低电导(图2(d))^[36]。

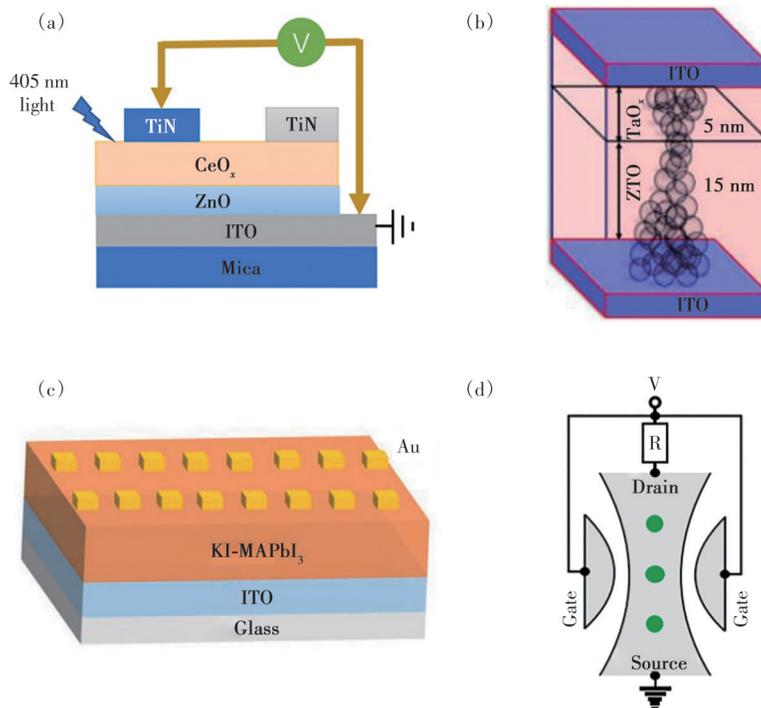


图2 光电协同调控忆阻型光电突触示意图。(a)光增强-电抑制^[22];(b)电增强-光抑制^[23];(c)光辅助-电调控^[35];(d)电辅助-光调控^[36]

Fig.2 Schematic diagrams of photoelectric cooperatively controlled memristive synapses. (a)Optical potentiation and electrical depression^[22]. (b) Electrical potentiation and optical depression^[23]. (c) Light-assisted electrical control^[35]. (d) Electricity-assisted optical control^[36]

光电协同调控突触仍然引入了电信号,无法避免器件中离子迁移和焦耳热。全光控突触完全使用光信号可逆调控电导,可避免器件微结构变化,消除焦耳热,从而降低功耗、提高稳定性。此外,突触器件直接感光,有助于实现感存算一体功能。全光控突触的上述特性使其在新一代感存算一体化智能系统中具有广阔的应用前景。考虑到

氧化物材料易制备、易集成、稳定性好等诸多优点,下文将详细介绍氧化物全光控突触的调控手段、器件种类和光电响应机制。

4 全光控突触

突触电导的可逆调控目前主要通过改变光波长来实现,例如短波光照增大电导,长波光照降低

电导。此外,在同一波长下,改变光功率密度也可以实现电导可逆调控。

4.1 光波长调控

4.1.1 忆阻器

忆阻器^[57]是继电阻、电容及电感之后的第四种基本电路元件,其电阻由通过其介质层的电荷量决定,因此具有记忆特性。1971年,加利福尼亚大学 Chua 教授^[57]首次提出忆阻器的概念。2008年,惠普实验室^[58]通过理论结合实验分析,首次将阻变存储器 and 忆阻器关联。忆阻器与生物突触具有高度相似性,因而被视为人工突触极具潜力的候选者之一^[59-62]。

在全光控忆阻器中,光波长调控较为常见,即通过改变照射光波长来实现器件电导的非易失可逆调控。2020年,中国科学院宁波材料所^[19-20]基于缺氧 $\text{InGaZnO}(\text{O}_\text{D}\text{-IGZO})$ /富氧 $\text{InGaZnO}(\text{O}_\text{R}\text{-IGZO})$ 同质结,首次在国际上实现全光控忆阻器。该器件工作模式如图 3(a) 所示,其电导可以通过使用蓝光和近红外光可逆调节,且电导态可保持,具有非易失特性。如图 3(b) 所示,施加 100 个 420 nm 连续蓝光脉冲,器件从低电导态转变为高电导态(光 SET 过程);施加 100 个 800 nm 连续近红外光脉冲,器件从低电导态转变为高电导态(光 RESET 过程)。器件的光诱导电导开关机制解释如下:短波光照射使得 $\text{O}_\text{D}\text{-IGZO}/\text{O}_\text{R}\text{-IGZO}$ 界面处中性氧空位电离,增大界面处电离氧空位浓度,减小了界面势垒宽度,导致隧穿电流增加从而增大器件电导;与之相反,长波光照射促使 $\text{O}_\text{D}\text{-IGZO}/\text{O}_\text{R}\text{-IGZO}$ 界面氧空位中和,减少界面处电离氧空位浓度,增大界面势垒宽度,导致隧穿电流减小从而降低器件电导。进一步,为解决传统视觉传感器的信息安全问题,基于 InGaZnO 全光控忆阻器搭建了集成图像感知、加密计算和后处理功能的感内加密架构^[63],如图 3(c) 所示。通过该架构,视觉图像可在传感器内存储、加密、解密、降噪和销毁。解密后的图像可以就地编码,然后通过记忆神经网络准确识别。通过该架构处理的图像能够经受住黑客攻击,实现视觉信息有效保护。

2021年,东北师范大学^[24]基于 Ag-TiO_2 纳米复合材料开发了一种等离子体全光控忆阻器。在可见光和紫外光刺激下,实现了全光诱导的突触可塑性,可用于视觉感知和低水平图像预处理(包括对比度增强和降噪)。器件操作模式如图 3(d)、(e) 所示,在可见光照射下,器件电导增大,移除光照后

器件电导水平高于初始状态并能稳定保持,表现出 LTP 性能;在紫外光照射下,器件电导下降,移除光照后器件电导水平低于初始状态并能稳定保持,表现出 LTD 性能。深入研究发现,器件全光控响应机制取决于 Ag-TiO_2 复合材料中光诱导产生的 TiO_2 光电导效应以及局域表面等离子体共振效应(LSPR)。不同光诱导促使 Ag 纳米颗粒氧化和还原,进而实现器件电导可逆调控。在可见光照射下,由于 LSPR 效应, Ag 纳米颗粒被氧化,降低 Ag/TiO_2 界面处的肖特基势垒,从而实现光诱导的 LTP 行为。相反,紫外光刺激了电子从价带到导带的跃迁,促进电子与 Ag 纳米颗粒的复合,增大 Ag/TiO_2 界面处肖特基势垒,从而实现 LTD 行为。

2024年,复旦大学^[64]报道了 NiO/TiO_2 全光控自整流忆阻器阵列,在光刺激下具有多级存储功能(图 3(f))。器件整流比 $>10^4$,有助于克服大规模阵列中电流串扰影响。在 480 nm 和 320 nm 光脉冲下分别实现电导增大和降低,进而模拟了突触 LTP 和 LTD 功能(图 3(g))。全光控机制归因于光诱导下功能层 Ni 原子的氧化与还原作用。480 nm 蓝光下 Ni 原子氧化,器件电导增大;320 nm 紫外光下 Ni 原子还原,器件电导减小。

ZnO 是一种重要的光电半导体材料,具有沉积温度低、热导率较高等优点,广泛应用于光电器件、传感器、太阳能电池等领域。2021年,中国科学院宁波材料所^[21,65]制备了基于纯氩气磁控溅射生长的单层 ZnO 全光控忆阻器。器件在 530 nm 和 650 nm 光脉冲下分别实现电导连续增大和下降(图 4(a)),移除光照后器件电导态能长时间保持,具有非易失特性。利用器件的全光调控特性实现了完整布尔逻辑运算。2023年,中国台湾阳明交通大学^[66]制备了基于 $\text{ZnO}/\text{Zn}_2\text{SnO}_4$ 异质结的全光控忆阻器,在紫光和红光脉冲下,分别表现出电导增强和抑制行为(图 4(b))。2024年,阳明交通大学^[67]报道了全氧化物忆阻器,其结构为 $\text{ITO}/\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{ZnO}/\text{ITO}$,器件电导可通过施加 405 nm 和 522 nm 波长的可见光进行可逆调节(图 4(c))。此外,中南大学^[68]研发了 $\text{p}^+\text{-Si}/\text{ZnO}$ 全光控忆阻器。器件在 400 nm 蓝光下电导增强,700 nm 近红外光照下电导下降。光电响应机制归因于 $\text{p}^+\text{-Si}/\text{ZnO}$ 界面势垒区的电子捕获和释放效应(图 4(d))。

2024年,东北师范大学^[69]报道了 ZnO/MoO_x 全光控忆阻器,可在 350 nm 和 570 nm 光照下分别实现 SET 和 RESET 过程,光诱导电导可逆调控机制

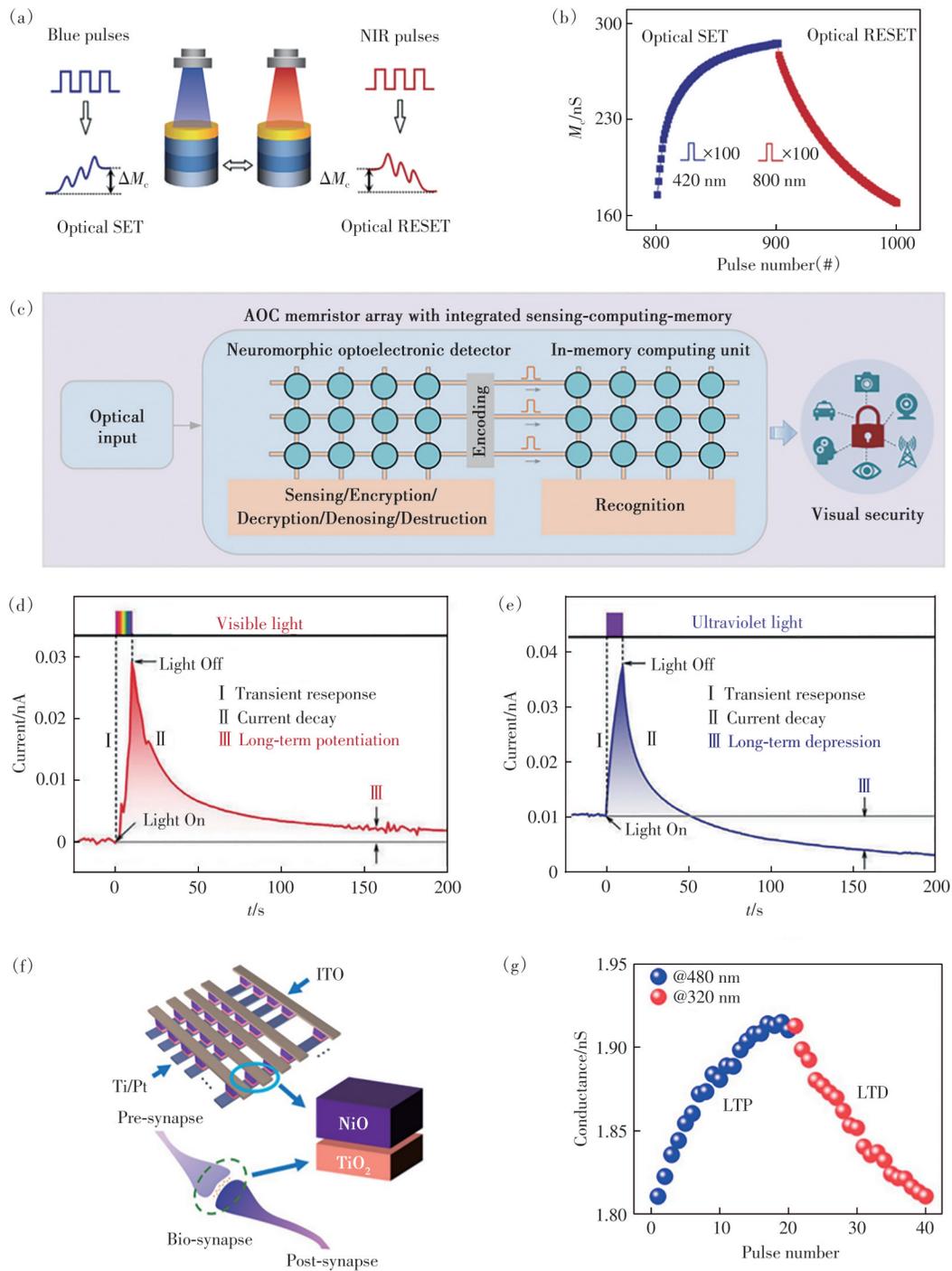


图3 波长调控型氧化物全光控忆阻器。(a)双层IGZO忆阻器全光控模式示意图^[19-20];(b)IGZO忆阻器在420 nm蓝光和800 nm近红外光脉冲下的电导可逆调控^[19-20];(c)IGZO忆阻器中的可原位加密神经形态视觉传感器^[63];(d)Ag-TiO₂忆阻器在可见光刺激下的LTP行为^[24];(e)Ag-TiO₂忆阻器在紫外光刺激下的LTD行为^[24];(f)NiO/TiO₂忆阻器阵列结构示意图^[64];(g)NiO/TiO₂忆阻器电导全光调控^[64]

Fig.3 All-optically controlled oxide memristors *via* light wavelength modulation. (a) Schematic of the all-optical control scheme of bilayer IGZO memristor^[19-20]. (b) Reversible conductance regulation of the IGZO memristor under 420 nm and 800 nm light pulses^[19-20]. (c) *In situ* cryptography of neuromorphic vision sensors based on IGZO memristors^[63]. (d) LTP behavior of Ag-TiO₂ memristors under visible light stimulation^[24]. (e) LTD behavior of Ag-TiO₂ memristors under ultraviolet light stimulation^[24]. (f) Schematic of NiO/TiO₂ memristor arrays^[64]. (g) All-optical control performance of the NiO/TiO₂ memristor^[64]

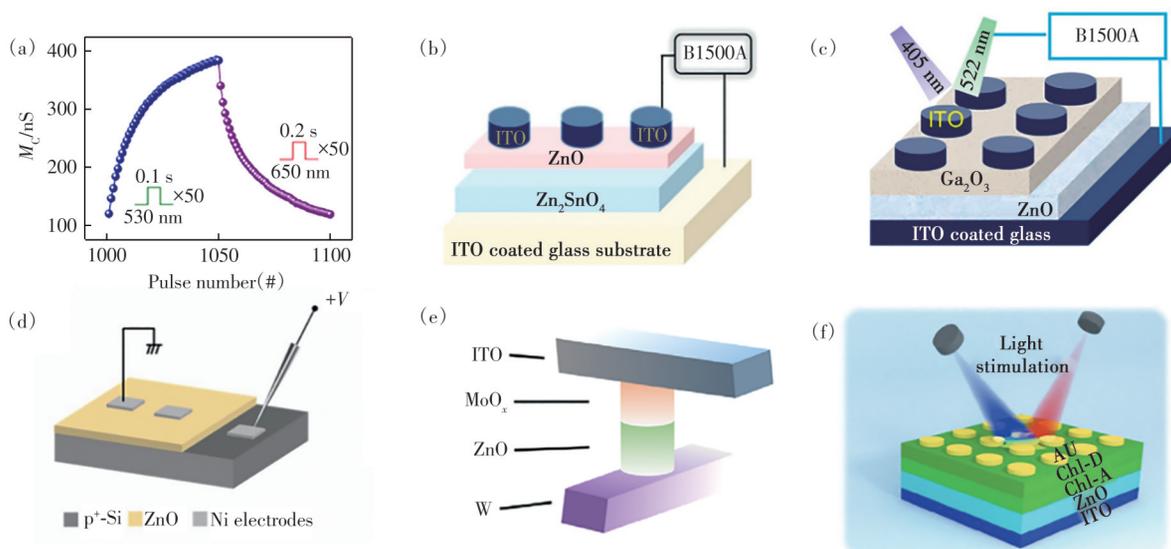


图4 波长调控型ZnO基全光控忆阻器。(a)单层ZnO忆阻器全光调控性能^[65];(b)ZnO/Zn₂SnO₄忆阻器结构示意图^[66];(c)Ga₂O₃/ZnO忆阻器结构示意图^[67];(d)p⁺-Si/ZnO忆阻器结构示意图^[68];(e)ZnO/MoO_x忆阻器结构示意图^[69];(f)叶绿素/ZnO异质结忆阻器结构示意图^[27]

Fig. 4 ZnO-based all-optically controlled memristors *via* light wavelength modulation. (a) All-optical control performance of single-layer ZnO memristor^[65]. (b) Schematic of the ZnO/Zn₂SnO₄ memristor^[66]. (c) Schematic of the Ga₂O₃/ZnO memristor^[67]. (d) Schematic of the p⁺-Si/ZnO memristor^[68]. (e) Schematic of the ZnO/MoO_x memristor^[69]. (f) Schematic of the chlorophyll/ZnO heterojunction memristor^[27]

归因于ZnO/MoO_x异质结界面处势垒变化(图4(e))。吉林大学^[27]设计了叶绿素/ZnO异质结忆阻器,在430 nm和730 nm光刺激下分别实现了电导增大和降低(图4(f))。

除了上述讨论的氧化物材料,Cu₂O/WO₃^[70]、NiO-苹果果胶^[71]、TiO₂/NbO_x/NiO^[72]等氧化物及其复合材料也被用于构建波长调控型全光控忆阻器。此外,基于MA_{0.4}FA_{0.6}PbI₃^[28]、Cs₂AgBiBr₆^[73]等非氧化物的器件也有报道。波长调控型器件可被用于实现多种神经形态计算功能,例如立体视觉等^[74-75]。

4.1.2 晶体管

2023年,中国台湾成功大学^[76]报道了IGZO/ZrO_x全光控晶体管(图5(a))。器件在可见光(405 nm和520 nm)和近红外光(750 nm、890 nm和980 nm)照射下,分别实现了光增强(图5(b))和光抑制行为(图5(c))。光电响应机制与IGZO中中性氧空位电离以及金属键缺陷密切相关。该器件可用于类脑计算机视觉中的流式传感数据处理。

天津大学^[25]基于石墨烯/TiO₂异质结实现了全光控晶体管,器件结构如图5(d)所示。在635 nm红光刺激下,器件电导增大(图5(e));在365 nm

紫外光照射下,电导降低(图5(f))。电导可逆调控可归因于石墨烯表面光诱导产生的氧吸附和脱附。红光照射时,氧吸附增加,导致石墨烯费米能级下降,进而器件电导增大;在紫外光刺激下,氧脱附增加,石墨烯费米能级上升,电导下降。

中南大学^[77]利用WSe₂/WO_x异质结制备了光电晶体管突触,器件具有独特的紫外光激活表面电子掺杂层(图5(g))。在648 nm红光刺激下,器件表现出长程增强(图5(h));375 nm紫外光照射下实现长程抑制(图5(i));增强和抑制幅值均与光照时间正相关。器件具有多达64个权重状态,权重更新表现出高动态范围和较好的线性度。器件全光控机制归因于光激发效应与光热效应的竞争。可见光照射,光激发效应占优,产生大量光生载流子,器件电导增大;紫外光照射,光热效应占优,促使电子从WO_x转移到WSe₂的导带,器件电导减小。该器件可作为感受器模仿驯鹿的警觉和觅食行为。此外,该器件具有传感器内处理能力,可用于智能碰撞检测解决方案。

此外,In₂O₃/Al₂O₃/Yb^[78]、PbS量子点(QD)/石墨烯/TiO₂^[79]等氧化物与其他材料的复合结构被用于制备波长调控型全光控晶体管。除了氧化物及其复合材料,茈基石墨炔/石墨烯/PbS QD^[80]、PdSe₂^[81]、

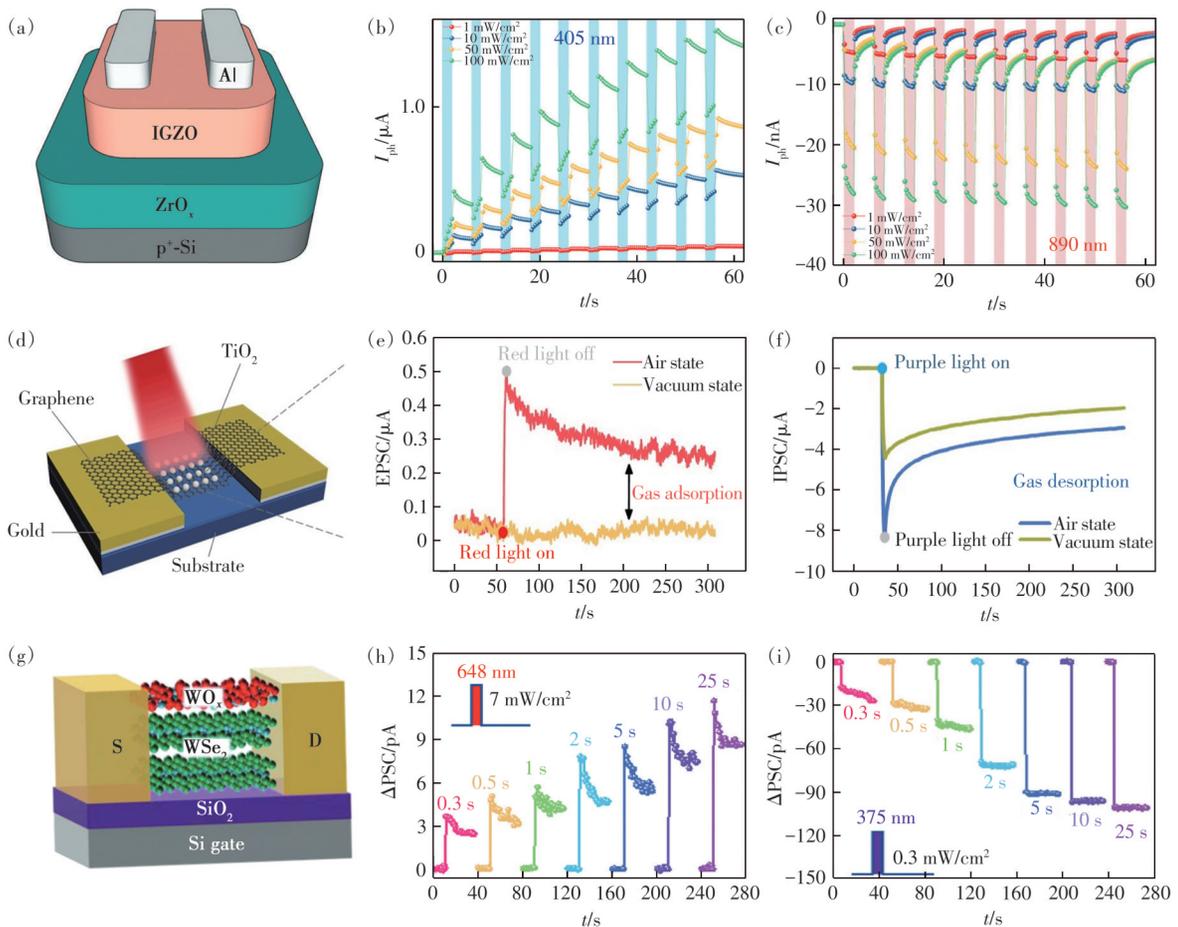


图5 波长调控型氧化物基全光控晶体管。(a)IGZO/ZrO_x晶体管结构示意图^[76];(b)405 nm蓝光脉冲下电流增大^[76];(c)890 nm近红外光脉冲下电流下降^[76];(d)石墨烯/TiO₂晶体管结构示意图^[25];(e)635 nm红光刺激下电流增大^[25];(f)365 nm紫外光刺激下电流下降^[25];(g)WSe₂/WO_x晶体管结构示意图^[77];(h)648 nm红光下电流增大^[77];(i)375 nm紫外光下电流下降^[77]

Fig. 5 All-optically controlled transistors via light wavelength modulation. (a)Schematic of the IGZO/ZrO_x transistor^[76]. (b)Current increase under 405 nm light pulses^[76]. (c)Current decrease under 890 nm light pulses^[76]. (d)Schematic of the graphene/TiO₂ transistor^[25]. (e)Current increase under 635 nm light stimulation^[25]. (f)Current decrease under the stimulation of 365 nm light^[25]. (g)Schematic of the WSe₂/WO_x transistor^[77]. (h)Current increase under 648 nm light irradiation^[77]. (i)Current decrease under 375 nm light irradiation^[77]

PtSe₂^[82]、MoS₂/Ge^[83]等非氧化物材料也可用于构建全光控晶体管。

4.1.3 其他两端或三端结构器件

除了忆阻器和晶体管,也有一些与忆阻器或晶体管结构类似的两端或三端器件表现出电导全光调控特性,其中以两端结构为主^[84-91]。

2022年,深圳大学^[84]制备了基于MAPbBr₃/ZnO异质结的人工突触,结构如图6(a)所示。365 nm紫外光和520 nm绿光照射可分别实现器件电导长时程增大和减小(图6(b)、(c)),并且具有优异的稳定性和可重复性。器件电导增大归因于紫外光照下ZnO表面氧离子的脱附,电导减小是由于绿光下更宽耗尽层的形成。该器件可执行包括“OR”、“AND”、“NOR”和“NAND”在内的一

系列逻辑运算。

2023年,浙江大学^[85]开发了一种p-n结型全光控突触,用于精确模拟兴奋性和抑制性突触行为(图6(d))。该器件基于ZnAlSnO/SnO异质结,可在635 nm和532 nm光照射下分别实现电导增强和抑制(图6(e)、(f))。全光调控行为源于非晶ZnAlSnO层丰富的氧空位缺陷。635 nm光照下,氧空位电离产生光生电子,器件电导增加;相反,532 nm光照下,ZnAlSnO导带中的电子吸收足够的能量,跨越界面势垒到达SnO层,导致器件电导减小。

2024年,浙江大学^[86]基于IGZO/SnO/SnS结构实现了可重构全光控突触,集传感、存储和处理功能于一体(图5(g))。依靠异质结堆栈结构和能

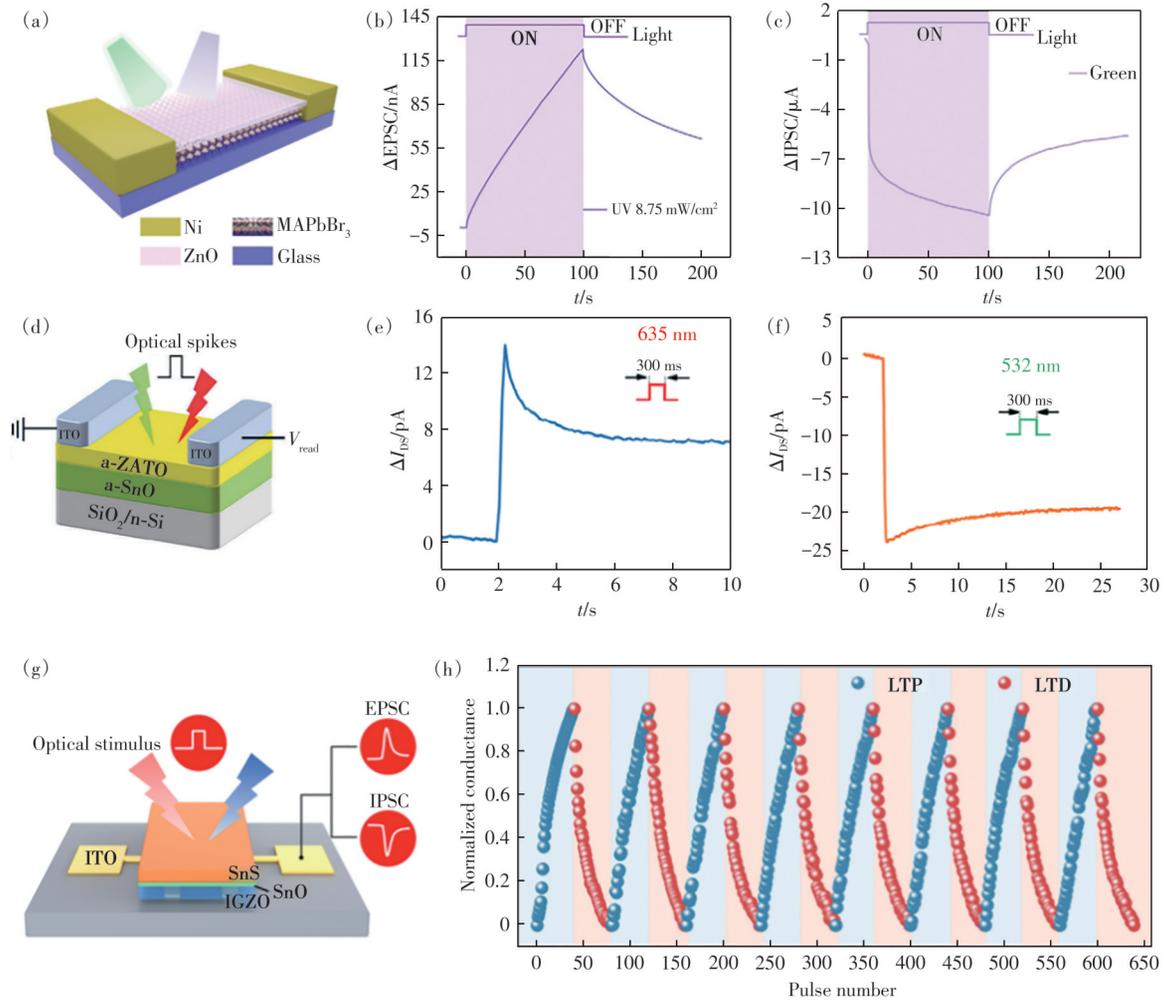


图 6 波长调控型氧化物异质结全光控突触。(a) MAPbBr₃/ZnO 器件结构示意图^[84];(b)365 nm 紫外光下电流增大^[84];(c)520 nm 绿光下电流下降^[84];(d)ZnAlSnO/SnO 器件结构示意图^[85];(e)635 nm 光照下电流升高^[85];(f)532 nm 光照下电流下降^[85];(g)IGZO/SnO/SnS 器件结构示意图^[86];(h)电导全光调控行为^[86]

Fig. 6 All-optically controlled synapses based on oxide heterojunctions *via* light wavelength modulation. (a) Schematic of the MAPbBr₃/ZnO synapse^[84]. (b) Current increase under 365 nm light pulses^[84]. (c) Current decrease under 520 nm light pulses^[84]. (d) Schematic of the ZnAlSnO/SnO synapse^[85]. (e) Current increase under 635 nm light stimulation^[85]. (f) Current decrease under the stimulation of 532 nm light^[85]. (g) Schematic of the IGZO/SnO/SnS synapse^[86]. (h) All-optical control performance^[86]

带工程,在紫外光和可见光刺激下,器件表现出突触兴奋和抑制特性。图 5(h)为交替施加 40 个 266 nm 和 658 nm 光脉冲时,器件的 LTP 和 LTD 行为。

4.2 光功率调控

4.2.1 忆阻器

目前,基于光功率调控的氧化物全光控忆阻器还未见报道,下面以其他材料忆阻器为例介绍此类器件^[92-93]。复旦大学^[92]开发了基于卤化物钙钛矿的全光控忆阻器,当红光功率密度为 11.8 mW/cm²时,电导增大;而红光功率密度降至 0.9 mW/cm²时,电导降低。器件光诱导电导可逆调节

机制归因于碘空位的电离和中和。高功率红光照射有利于中性碘空位电离,减小电极/钙钛矿界面势垒宽度,进而增大器件电导;低功率红光照射下,电离碘空位中和占主导,增大界面势垒,进而降低器件电导。西南大学^[92]报道了基于改性丝素蛋白的全光控忆阻器。对器件施加 405 nm 光脉冲,分别在 80 mW 和 40 mW 光强下实现了正向光电导存储和负向光电导存储效应。全光调控源于不同光强下丝素蛋白微结构的可逆变化。

4.2.2 晶体管

2023 年,法国斯特拉斯堡大学^[94]开发了铁电材料/石墨烯异质结晶体管,其中铁电层为

Pb[(Mg_{1/3}Nb_{2/3})_{0.70}Ti_{0.30}]O₃ 晶体(图 7(a))。器件可在 365 nm 紫外光脉冲下实现器件电导可逆调控。当光功率密度为 38 mW/cm²时,电导减小;而当光功率密度降至 74 μW/cm²时,器件电导增大(图 7(b))。通过改变紫外光功率密度,实现了突触增强和抑制行为(图 7(c))。器件的全光调控性能

来源于氧化物铁电层的极化和去极化。在较低光强下,铁电层内产生自由电荷导致去极化;在较高光强下,过量的光生载流子与之前存在的屏蔽电荷重新结合,导致极化恢复。利用去极化和极化这两个相互竞争的过程,可实现对石墨烯电导全光调控。

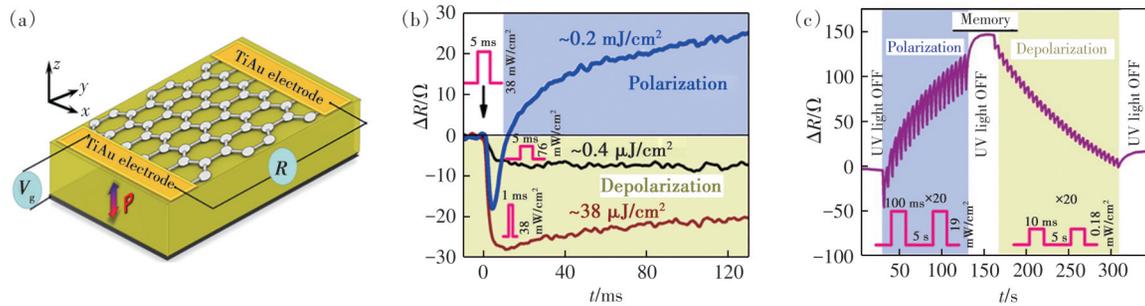


图 7 功率调控型氧化物铁电材料/石墨烯全光控晶体管。(a) 器件结构示意图^[94]; (b) 不同光功率下的光响应性能^[94]; (c) 不同光功率下的电导可逆调控^[94]

Fig. 7 All-optimally controlled oxide ferroelectric material/graphene transistor. (a) Schematic diagram of the device structure^[94]. (b) Optical response performance under different light power densities^[94]. (c) Reversible conductance regulation under different light power densities^[94]

4.3 氧化物全光控突触比较

人工突触是构建神经形态系统的关键器件,其中光电突触结合了电子学和光子学优势,具有光学感知、信息计算和存储等多种功能。新兴的全光控光电突触,其电导非易失增大和降低均通过光信号实现,可有效避免电信号对

器件微结构的破坏,改善工作稳定性,赋予突触器件新的功能,对于构建高性能神经形态系统和推动人工智能技术发展具有重要意义。表 1 总结了不同氧化物全光控突触器件的结构、功能层材料、调控手段、调控波长及全光调控机制。

表 1 氧化物全光控突触比较

Tab. 1 Comparison of all-optimally controlled oxide synapse

年份	器件结构	功能层	调控手段	调控波长/nm	全光调控机制	文献
2020	忆阻器	O _D -IGZO/O _R -IGZO	波长调控	420/800	缺陷电子捕获和释放	[19-20]
2021	忆阻器	Ag-TiO ₂	波长调控	365/532	光电效应与表面等离子体共振效应	[22]
2021	忆阻器	ZnO	波长调控	530/650	缺陷电子捕获和释放	[21, 65]
2022	其他器件	MAPbBr ₃ /ZnO	波长调控	365/520	表面氧吸附与解吸附	[84]
2023	忆阻器	NiO-苹果果胶	波长调控	500/450	缺陷电子捕获和释放	[71]
2023	晶体管	IGZO/ZrO _x	波长调控	405/520	缺陷电子捕获和释放	[76]
2023	晶体管	石墨烯/TiO ₂	波长调控	635/365	表面氧吸附与解吸附	[25]
2023	晶体管	WSe ₂ /WO ₃	波长调控	648/375	光激发效应和光热效应	[77]
2023	晶体管	In ₂ O ₃ /Al ₂ O ₃ /Y6	波长调控	365/808	缺陷电子捕获和释放	[78]
2023	晶体管	PbS QD/石墨烯/TiO ₂	波长调控	360/905	缺陷电子捕获和释放	[79]
2023	晶体管	Pb[(Mg _{1/3} Nb _{2/3}) _{0.70} Ti _{0.30}]O ₃	功率调控	365	铁电层极化和去极化	[94]
2023	其他器件	ZnAlSnO/SnO	波长调控	635/532	表面氧吸附与解吸附	[85]
2024	忆阻器	NiO/TiO ₂	波长调控	480/320	缺陷电子捕获和释放	[64]
2024	忆阻器	ZnO/Zn ₂ SnO ₄	波长调控	405/633	缺陷电子捕获和释放	[66]
2024	忆阻器	Ga ₂ O ₃ /ZnO	波长调控	405/522	缺陷电子捕获和释放	[67]
2024	忆阻器	p ⁺ -Si/ZnO	波长调控	400/700	缺陷电子捕获和释放	[68]
2024	忆阻器	ZnO/MoO _x	波长调控	350/570	缺陷电子捕获和释放	[69]
2024	忆阻器	叶绿素/ZnO	波长调控	430/730	缺陷电子捕获和释放	[27]
2024	忆阻器	Cu ₂ O/WO ₃	波长调控	633/405, 532	缺陷电子捕获和释放	[70]
2024	忆阻器	TiO ₂ /NbO _x /NiO	波长调控	390/290	缺陷电子捕获和释放	[72]
2024	其他器件	IGZO/SnO/SnS	波长调控	266/658	缺陷电子捕获和释放	[86]

5 总结与展望

尽管目前氧化物全光控突触的研究取得了一些进展,但该领域的发展仍处于初期阶段,在光敏材料、调控机理、器件性能、光信号施加、功能应用等方面面临诸多问题。

(1)光敏材料:大多数氧化物材料表现出宽的带隙(>3.0 eV),限制了光响应范围。尽管氧化物中氧空位的光致电离可以将光响应波长扩展到1 000 nm^[19-20],但是非本征光吸收严重限制了器件对长波光的光敏性。此外,全光控突触光响应机制通常源于光敏材料缺陷处电子的捕获和释放,但是目前还很难精确控制光敏材料中缺陷的类型、数量和分布。如何解决光敏材料的上述问题是未来该领域的重要研究方向之一。

(2)调控机理:目前,研究人员提出了多种机理模型,用于解释全光控现象,如光照下光敏材料缺陷处电子的捕获和释放、材料表面氧气吸附与解吸附、表面等离激元效应、光热效应、铁电材料极化与去极化效应、高分子材料结构变化,但几乎没有直接证据来支持这些机理解释。因此,全光调控机理探索仍然是后续重要的研究工作之一。

(3)器件性能:由于半导体内在光电效应,正向PPC(长程电导光增强)容易实现,而要实现负向PPC(长程电导光抑制)则要困难得多。这就需要设计特定器件结构,如氧化物同质结和异质结、金属/氧化物肖特基结等。理想全光控突触电导应随着外加光刺激线性变化,但实际器件光响应会随着持续光刺激逐渐饱和,导致器件电导非线性

变化。此外,要实现大规模集成应用,全光控突触需拥有优异的循环-循环和器件-器件均一性和稳定性。然而,目前全光控突触器件工作机制尚不够明确,制备工艺不够成熟,器件性能还无法满足大规模集成要求。

(4)光信号施加:目前全光控突触的光信号施加方案简单,多通过发光二极管、激光器、氙灯等直接照射器件,无法实现对大规模阵列中每个器件的精确调控。而在人工神经网络学习过程中,需根据目标不断利用光信号精确调控每个突触器件的权值,这对全光控突触而言仍然是一个挑战。

(5)功能应用:虽然全光控突触在视觉模拟、人工感知系统以及神经形态计算等方面得到了初步应用,但功能相对简单,需要进一步探索更复杂的功能。例如,目前还没有在硬件层面真正实现基于全光控突触的感存算一体功能。器件稳定性和均匀性欠佳等各种非理想因素是限制全光控突触进一步应用的主要障碍。

虽然目前氧化物全光控突触领域面临诸多挑战,但随着材料体系、器件制备、电路架构和人工智能算法的协同深入研究,预计在不久的将来,全光控突触有望应用于类脑视觉芯片等新一代神经形态计算系统,从而推进人类社会的信息化、智能化发展。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20240251>

参 考 文 献:

- [1] VON NEUMANN J. First draft of a report on the EDVAC [J]. *IEEE Ann. Hist. Comput.*, 1993, 15(4): 27-75.
- [2] 姚泽远, 卜原玲, 韩伟. 基于深度神经网络与Box-Behnken响应面法的灵芝总三萜提取工艺优化 [J]. *南京工业大学学报(自然科学版)*, 2023, 45(3): 347-354.
YAO Z Y, BU Y L, HAN W. Optimization of extraction technology of total triterpenes from *Ganoderma lucidum* by deep neural network and Box-Behnken response surface methodology [J]. *J. Nanjing Tech Univ. (Natl. Sci. Ed.)*, 2023, 45(3): 347-354. (in Chinese)
- [3] VAISHNAVI S N, VLASSENKO A G, RUNDLE M M, et al. Regional aerobic glycolysis in the human brain [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2010, 107(41): 17757-17762.
- [4] INDIVERI G, LINARES-BARRANCO B, LEGENSTEIN R, et al. Integration of nanoscale memristor synapses in neuromorphic computing architectures [J]. *Nanotechnology*, 2013, 24(38): 384010.
- [5] INDIVERI G, LIU S C. Memory and information processing in neuromorphic systems [J]. *Proc. IEEE*, 2015, 103(8): 1379-1397.
- [6] MEAD C. Neuromorphic electronic systems [J]. *Proc. IEEE*, 1990, 78(10): 1629-1636.

- [7] MEROLLA P A, ARTHUR J V, ALVAREZ-ICAZA R, *et al.* A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface [J]. *Science*, 2014, 345(6197): 668-673.
- [8] PEI J, DENG L, SONG S, *et al.* Towards artificial general intelligence with hybrid Tianjic chip architecture [J]. *Nature*, 2019, 572(7767): 106-111.
- [9] WANG J R, ZHUGE F. Memristive synapses for brain-inspired computing [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2019, 4(3): 1800544.
- [10] FULLER E J, KEENE S T, MELIANAS A, *et al.* Parallel programming of an ionic floating-gate memory array for scalable neuromorphic computing [J]. *Science*, 2019, 364(6440): 570-574.
- [11] DING K Y, WANG J J, ZHOU Y X, *et al.* Phase-change heterostructure enables ultralow noise and drift for memory operation [J]. *Science*, 2019, 366(6462): 210-215.
- [12] KRZYSTECZKO P, MÜNCHENBERGER J, SCHÄFERS M, *et al.* The memristive magnetic tunnel junction as a nanoscopic synapse-neuron system [J]. *Adv. Mater.*, 2012, 24(6): 762-766.
- [13] KIM D, JEON Y R, KU B, *et al.* Analog synaptic transistor with al-doped HfO₂ ferroelectric thin film [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(44): 52743-52753.
- [14] JO S H, CHANG T, EBONG I, *et al.* Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems [J]. *Nano Lett.*, 2010, 10(4): 1297-1301.
- [15] PREZIOSO M, MERRIKH-BAYAT F, HOSKINS B D, *et al.* Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors [J]. *Nature*, 2015, 521(7550): 61-64.
- [16] AGNUS G, ZHAO W S, DERYCKE V, *et al.* Two-terminal carbon nanotube programmable devices for adaptive architectures [J]. *Adv. Mater.*, 2010, 22(6): 702-706.
- [17] 李变, 曾诺兰, 周嘉, 等. 有机聚合物掺杂离子液体忆阻器用于低电压人工光电突触 [J]. *发光学报*, 2024, 45(9): 1547-1559.
LI W, ZENG N L, ZHOU J, *et al.* Ionic liquid-doped organic polymer memristors for low-voltage artificial optoelectronic synapses [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(9): 1547-1559. (in Chinese)
- [18] 刘凯, 张晴怡, 廖延安, 等. 光电器件中的负光电导效应及应用 [J]. *发光学报*, 2024, 45(2): 317-333.
LIU K, ZHANG Q Y, LIAO Y A, *et al.* Negative photoconductivity and its applications in optoelectronic devices [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(2): 317-333. (in Chinese)
- [19] HU L X, YANG J, WANG J R, *et al.* All-optically controlled memristor [J/OL]. 2024-10-28. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.08077>.
- [20] HU L X, YANG J, WANG J R, *et al.* All-optically controlled memristor for optoelectronic neuromorphic computing [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(4): 2005582.
- [21] 杨静, 卢焕明, 叶羽敏, 等. ZnO 全光控忆阻器及其类突触行为 [J]. *材料科学与工程学报*, 2021, 39(3): 393-397.
YANG J, LU H M, YE Y M, *et al.* All-optically controlled ZnO memristor and its synaptic behavior [J]. *J. Mater. Sci. Eng.*, 2021, 39(3): 393-397. (in Chinese)
- [22] ZHOU Z Y, PEI Y F, ZHAO J H, *et al.* Visible light responsive optoelectronic memristor device based on CeO_x/ZnO structure for artificial vision system [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2021, 118(19): 191103.
- [23] KUMAR D, SHRIVASTAVA S, SALEEM A, *et al.* Highly efficient invisible TaO_x/ZTO bilayer memristor for neuromorphic computing and image sensing [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2022, 4(5): 2180-2190.
- [24] SHAN X Y, ZHAO C Y, WANG X N, *et al.* Plasmonic optoelectronic memristor enabling fully light-modulated synaptic plasticity for neuromorphic vision [J]. *Adv. Sci.*, 2022, 9(6): 2104632.
- [25] LIANG J R, YU X, QIU J, *et al.* All-optically controlled artificial synapses based on light-induced adsorption and desorption for neuromorphic vision [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(7): 9584-9592.
- [26] LI Y M, SUN H, YUE L C, *et al.* Multicolor fully light-modulated artificial synapse based on P-MoSe₂/P_xO_y heterostructured memristor [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2024, 15(34): 8752-8758.
- [27] JIANG J, SHAN X Y, XU J Q, *et al.* Retina-like chlorophyll heterojunction-based optoelectronic memristor with all-optically modulated synaptic plasticity enabling neuromorphic edge detection [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(51): 2409677.

- [28] FU Y K, DAI H T, LI J, *et al.* All-photon bipolar reversible modulation artificial synapse for color perception and mitigation of glare phenomenon [J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(4): 1548-1556.
- [29] DRESBACH T, QUALMANN B, KESSELS M M, *et al.* The presynaptic cytomatrix of brain synapses [J]. *Cell. Mol. Life Sci.*, 2001, 58(1): 94-116.
- [30] LIU C N, MICHAELIS M, AMIR R, *et al.* Spinal nerve injury enhances subthreshold membrane potential oscillations in DRG neurons: relation to neuropathic pain [J]. *J. Neurophysiol.*, 2000, 84(1): 205-215.
- [31] BLISS T V P, COLLINGRIDGE G L. A synaptic model of memory: long-term potentiation in the hippocampus [J]. *Nature*, 1993, 361(6407): 31-39.
- [32] HU D C, YANG R, JIANG L, *et al.* Memristive synapses with photoelectric plasticity realized in $\text{ZnO}_{1-x}/\text{AlO}_y$ heterojunction [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018, 10(7): 6463-6470.
- [33] WANG Y, YANG J, WANG Z P, *et al.* Near-infrared annihilation of conductive filaments in quasiplane $\text{MoSe}_2/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ nanosheets for mimicking heterosynaptic plasticity [J]. *Small*, 2019, 15(7): 1805431.
- [34] WANG Y, CHEN S D, CHENG X H, *et al.* Neurotransmitter-mediated plasticity in 2D perovskite memristor for reinforcement learning [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(3): 2309807.
- [35] LAO J, XU W, JIANG C L, *et al.* Artificial synapse based on organic-inorganic hybrid perovskite with electric and optical modulation [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2021, 7(8): 2100291.
- [36] MAIER P, HARTMANN F, REBELLO SOUSA DIAS M, *et al.* Light sensitive memristor with bi-directional and wavelength-dependent conductance control [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2016, 109(2): 023501.
- [37] GU L J, LI Y R, XIE D D, *et al.* Fully optical-driving ionotronic InGaZnO_4 phototransistor for gate-tunable bidirectional photofiltering and visual perception [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2022, 69(8): 4382-4385.
- [38] CHEN Y T, ZHANG M, LI D W, *et al.* Bidirectional synaptic phototransistor based on two-dimensional ferroelectric semiconductor for mixed color pattern recognition [J]. *ACS Nano*, 2023, 17(13): 12499-12509.
- [39] LAI H J, ZHOU Y, ZHOU H B, *et al.* Photoinduced multi-bit nonvolatile memory based on a van der Waals heterostructure with a 2D-perovskite floating gate [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(19): 2110278.
- [40] MENNEL L, SYMONOWICZ J, WACHTER S, *et al.* Ultrafast machine vision with 2D material neural network image sensors [J]. *Nature*, 2020, 579(7797): 62-66.
- [41] NGUYEN D A, CHO S, PARK S, *et al.* Tunable negative photoconductivity in encapsulated ambipolar tellurene for functional optoelectronic device applications [J]. *Nano Energy*, 2023, 113: 108552.
- [42] PANG X C, WANG Y, ZHU Y Y, *et al.* Non-volatile rippled-assisted optoelectronic array for all-day motion detection and recognition [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 1613.
- [43] PI L J, WANG P F, LIANG S J, *et al.* Broadband convolutional processing using band-alignment-tunable heterostructures [J]. *Nat. Electron.*, 2022, 5(4): 248-254.
- [44] REHMAN S, KHAN M A, KIM H, *et al.* Optically reconfigurable complementary logic gates enabled by bipolar photoresponse in gallium selenide memtransistor [J]. *Adv. Sci.*, 2023, 10(17): 2205383.
- [45] TSAI M Y, HUANG C T, LIN C Y, *et al.* A reconfigurable transistor and memory based on a two-dimensional heterostructure and photoinduced trapping [J]. *Nat. Electron.*, 2023, 6(10): 755-764.
- [46] WANG C Y, LIANG S J, WANG S, *et al.* Gate-tunable van der Waals heterostructure for reconfigurable neural network vision sensor [J]. *Sci. Adv.*, 2020, 6(26): eaba6173.
- [47] WU G J, ZHANG X M, FENG G D, *et al.* Ferroelectric-defined reconfigurable homojunctions for in-memory sensing and computing [J]. *Nat. Mater.*, 2023, 22(12): 1499-1506.
- [48] YANG Y K, PAN C, LI Y X, *et al.* In-sensor dynamic computing for intelligent machine vision [J]. *Nat. Electron.*, 2024, 7(3): 225-233.
- [49] ZHANG G X, ZHANG Z C, CHEN X D, *et al.* Broadband sensory networks with locally stored responsivities for neuro-morphic machine vision [J]. *Sci. Adv.*, 2023, 9(37): eadi5104.
- [50] ZHANG Z H, WANG S Y, LIU C S, *et al.* All-in-one two-dimensional retinomorph hardware device for motion detection and recognition [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2022, 17(1): 27-32.
- [51] JANG H, HINTON H, JUNG W B, *et al.* In-sensor optoelectronic computing using electrostatically doped silicon [J]. *Nat. Electron.*, 2022, 5(8): 519-525.

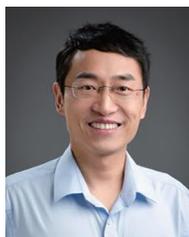
- [52] SHI X F, XU Y C, LIU W R, *et al.* Organic heterojunction phototransistors with bi-directional photoresponse for vision biomimetics [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(32): 2401534.
- [53] ZHU X T, GAO C S, REN Y W, *et al.* High-contrast bidirectional optoelectronic synapses based on 2D molecular crystal heterojunctions for motion detection [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(24): 2301468.
- [54] ZHU C H, GAO X, HUANG H T, *et al.* Organic photonic synaptic devices with UV-stimulated inhibition and adaptive short-term plasticity [J]. *Adv. Mater. Technol.*, 2023, 8(15): 2300187.
- [55] CUI B Y, FAN Z, LI W J, *et al.* Ferroelectric photosensor network: an advanced hardware solution to real-time machine vision [J]. *Nat. Commun.*, 2022, 13(1): 1707.
- [56] KUNDYS D, CASCALES A, MAKHORT A S, *et al.* Optically rewritable memory in a graphene-ferroelectric-photovoltaic heterostructure [J]. *Phys. Rev. Appl.*, 2020, 13(6): 064034.
- [57] CHUA L. Memristor-the missing circuit element [J]. *IEEE Trans. Circuit Theory*, 1971, 18(5): 507-519.
- [58] STRUKOV D B, SNIDER G S, STEWART D R, *et al.* The missing memristor found [J]. *Nature*, 2008, 453(7191): 80-83.
- [59] SERB A, BILL J, KHIAT A, *et al.* Unsupervised learning in probabilistic neural networks with multi-state metal-oxide memristive synapses [J]. *Nat. Commun.*, 2016, 7: 12611.
- [60] FU T D, LIU X M, GAO H Y, *et al.* Bioinspired bio-voltage memristors [J]. *Nat. Commun.*, 2020, 11(1): 1861.
- [61] LIU P S, HUI F, AGUIRRE F, *et al.* Nano-memristors with 4 mV switching voltage based on surface-modified copper nanoparticles [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(20): 2201197.
- [62] BOYBAT I, LE GALLO M, NANDAKUMAR S R, *et al.* Neuromorphic computing with multi-memristive synapses [J]. *Nat. Commun.*, 2018, 9(1): 2514.
- [63] HU L X, SHAO J L, WANG J R, *et al.* *In situ* cryptography in a neuromorphic vision sensor based on light-driven memristors [J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2024, 11(1): 011411.
- [64] LU C, MENG J L, SONG J R, *et al.* Self-rectifying all-optical modulated optoelectronic multistates memristor crossbar array for neuromorphic computing [J]. *Nano Lett.*, 2024, 24(5): 1667-1672.
- [65] YANG J, HU L X, SHEN L F, *et al.* Optically driven intelligent computing with ZnO memristor [J]. *Fundam. Res.*, 2024, 4(1): 158-166.
- [66] SHRIVASTAVA S, KEONG L B, PRATIK S, *et al.* Fully photon controlled synaptic memristor for neuro-inspired computing [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2023, 9(3): 2201093.
- [67] SHRIVASTAVA S, CHI H N, LIMANTORO S E, *et al.* Fully visible light controlled neuro-synaptic ReRAM device based on metal oxide heterojunction [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124(13): 133503.
- [68] LI X M, FANG Z J, GUO X, *et al.* Light-induced conductance potentiation and depression in an all-optically controlled memristor [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(21): 27866-27874.
- [69] ZHENG J H, DU Y M, DONG Y J, *et al.* Fully light-modulated memristor based on ZnO/MoO_x heterojunction for neuromorphic computing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124(13): 133502.
- [70] WU F C, TSENG T Y. All-optically regulated ITO/Cu₂O/WO₃/ITO memristor for optoelectronic neuromorphic computing [J]. *ACS Appl. Electron. Mater.*, 2024, 6(7): 5212-5221.
- [71] CHANG Y C, JIAN J C. Biomaterial-based nonvolatile photonic memory [J]. *Carbon*, 2023, 202: 167-172.
- [72] LU C, MENG J L, SONG J R, *et al.* Reconfigurable selector-free all-optical controlled neuromorphic memristor for in-memory sensing and reservoir computing [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(43): 29715-29723.
- [73] SUN Q H, GUO Z C, ZHU X J, *et al.* Optogenetics-inspired manipulation of synaptic memory using all-optically controlled memristors [J]. *Nanoscale*, 2023, 15(23): 10050-10056.
- [74] LU C, MENG J L, WANG T Y, *et al.* Fully light modulated self-powered optoelectronic memristor for neuromorphic computing [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2023, 44(10): 1784-1787.
- [75] SHAN X Y, WANG Z Q, XIE J, *et al.* Hemispherical retina emulated by plasmonic optoelectronic memristors with all-optical modulation for neuromorphic stereo vision [J]. *Adv. Sci.*, 2024, 11(36): 2405160.
- [76] MI Y C, YANG C H, SHIH L C, *et al.* All-optical-controlled excitatory and inhibitory synaptic signaling through bipolar photoresponse of an oxide-based phototransistor [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(14): 2300089.
- [77] WU R Q, LIU X C, YUAN Y H, *et al.* Biomimetic artificial tetrachromatic photoreceptors based on fully light-controlled

- 2D transistors [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(46): 2305677.
- [78] LI D W, REN H H, CHEN Y T, *et al.* Bidirectionally photoresponsive optoelectronic transistors with dual photogates for all-optical-configured neuromorphic vision [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(42): 2303198.
- [79] WEN Z, WANG S H, YI F Z, *et al.* Bidirectional invisible photoresponse implemented in a traps matrix-combination toward fully optical artificial synapses [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(48): 55916-55924.
- [80] HOU Y X, LI Y, ZHANG Z C, *et al.* Large-scale and flexible optical synapses for neuromorphic computing and integrated visible information sensing memory processing [J]. *ACS Nano*, 2021, 15(1): 1497-1508.
- [81] JIANG J Y, XU W T, SUN Z H, *et al.* Wavelength-controlled photoconductance polarity switching *via* harnessing defects in doped PdSe₂ for artificial synaptic features [J]. *Small*, 2024, 20(13): 2306068.
- [82] TAN Y L, HAO H, CHEN Y B, *et al.* A bioinspired retinomorph device for spontaneous chromatic adaptation [J]. *Adv. Mater.*, 2022, 34(51): 2206816.
- [83] ZHANG Y C, WANG B, HAN Z, *et al.* Bidirectional photoresponse in a mixed-dimensional MoS₂/Ge heterostructure and its optic-neural synaptic behavior for colored pattern recognition [J]. *ACS Photonics*, 2023, 10(5): 1575-1582.
- [84] GE S P, HUANG F C, HE J Q, *et al.* Bidirectional photoresponse in perovskite-ZnO heterostructure for fully optical-controlled artificial synapse [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2022, 10(11): 2200409.
- [85] YANG R Q, WANG Y, LI S Q, *et al.* All-optically controlled artificial synapse based on full oxides for low-power visible neural network computing [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(10): 2312444.
- [86] ZHANG T, FAN C, HU L X, *et al.* A reconfigurable all-optical-controlled synaptic device for neuromorphic computing applications [J]. *ACS Nano*, 2024, 18(25): 16236-16247.
- [87] JI R X, FENG G D, JIANG C L, *et al.* Fully light-modulated organic artificial synapse with the assistance of ferroelectric polarization [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2022, 8(7): 2101402.
- [88] NIKOLAEV I, KAZAKOV A, DROZDOV K, *et al.* Bipolar persistent photoconductivity in HgTe/CdHgTe double quantum well heterostructures and its application for reversible change in the conductivity type [J]. *J. Appl. Phys.*, 2022, 132(23): 234301.
- [89] SUN S Y, ZHANG T, JIN S Q, *et al.* Fully UV modulated artificial synapses with integrated sensing, storage and computation [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(36): 2401403.
- [90] YANG R Q, HU D N, CHEN Q J, *et al.* SnS-facilitated ZnAlSnO-based fully optically modulated artificial synaptic device for image processing [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, doi: 10.1002/adfm.202414210.
- [91] LI M C, LI C, YE K, *et al.* Self-powered photonic synapses with rapid optical erasing ability for neuromorphic visual perception [J]. *Research*, 2024, 7: 0526.
- [92] CAI B Q, HUANG Y, TANG L Z, *et al.* All-optically controlled retinomorph memristor for image processing and stabilization [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2023, 33(46): 2306272.
- [93] ZHOU G D, LI J, SONG Q L, *et al.* Full hardware implementation of neuromorphic visual system based on multimodal optoelectronic resistive memory arrays for versatile image processing [J]. *Nat. Commun.*, 2023, 14(1): 8489.
- [94] MAITY K, DAYEN J F, DOUDIN B, *et al.* Single wavelength operating neuromorphic device based on a graphene-ferroelectric transistor [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15(48): 55948-55956.



单海(1999-),男,湖南湘西人,硕士研究生,2022年于长沙理工大学获得学士学位,主要从事氧化物全光控忆阻器的研究。

E-mail: shanhai@nimte.ac.cn



诸葛飞(1975-),男,江苏常州人,博士,研究员,2005年于浙江大学获得博士学位,主要从事低维半导体材料与器件及其在类脑人工智能领域的应用研究。

E-mail: zhugefei@nimte.ac.cn