

## 面向感存算一体化的光电忆阻器件研究进展

单旋宇 王中强 谢君 郑嘉慧 徐海阳 刘益春

### Recent progress in optoelectronic memristive devices for in-sensor computing

Shan Xuan-Yu Wang Zhong-Qiang Xie Jun Zheng Jia-Hui Xu Hai-Yang Liu Yi-Chun

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 148701 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220350

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220350>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 基于忆容器件的神经形态计算研究进展

Research progress of neuromorphic computation based on memcapacitors

物理学报. 2021, 70(7): 078701 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201632>

#### N型局部有源忆阻器的神经形态行为

Neuromorphic behaviors of N-type locally-active memristor

物理学报. 2022, 71(5): 050502 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212017>

#### 新型忆阻器神经形态电路的设计及其在条件反射行为中的应用

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

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

专题: 面向类脑计算的物理电子学

## 面向感存算一体化的光电忆阻器件研究进展\*

单旋宇<sup>1)</sup> 王中强<sup>1)2)†</sup> 谢君<sup>1)</sup> 郑嘉慧<sup>1)</sup> 徐海阳<sup>1)2)</sup> 刘益春<sup>1)2)</sup><sup>1)</sup> (东北师范大学, 紫外光发射材料与技术教育部重点实验室, 长春 130024)<sup>2)</sup> (物理学国家级实验教学示范中心(东北师范大学), 长春 130024)

(2022 年 2 月 28 日收到; 2022 年 3 月 28 日收到修改稿)

脑启发神经形态计算系统有望从根本上突破传统冯·诺依曼计算机系统架构瓶颈, 极大程度地提升数据处理速度和能效. 新型神经形态器件是构建高效神经形态计算的重要硬件基础. 光电忆阻器作为新兴的纳米智能器件, 因具备整合光学感知、信息存储和逻辑计算等功能特性, 被认为是发展类脑视觉系统的重要备选. 本文将综述面向感存算功能一体化的光电忆阻器研究进展, 包括光电忆阻材料与机制、光电忆阻器件与特性、感存算一体化功能及应用等. 具体将根据机制分类介绍光子-离子耦合型和光子-电子耦合型光电忆阻材料, 根据光电忆阻特性调节方式介绍光电调制型和全光调制型光电忆阻器件, 根据感存算一体化功能介绍其在认知功能模拟、光电逻辑运算、神经形态视觉功能、动态探测与识别等方面的应用. 最后总结光电忆阻器的主要优势以及所面临的挑战, 并展望光电忆阻器的未来发展.

**关键词:** 感存算一体化, 光电忆阻器, 神经形态计算**PACS:** 87.18.Sn, 73.40.Rw, 85.25.Hv, 85.60.-q**DOI:** 10.7498/aps.71.20220350

## 1 引言

随着现代信息技术的持续高速发展, 计算机系统开始进入“云计算”和“大数据”时代, 海量的信息存储与数据处理要求计算机软硬件具有高速度、低功耗及智能化等特点. 然而, 传统的冯·诺依曼计算架构由于存储单元与运算单元结构分立, 而且两者沿着各自的目标发展, 导致不同硬件之间存在较大性能差距与集成方式问题, 难以高效完成非结构化数据的深度处理<sup>[1,2]</sup>. 相比之下, 生物大脑具有高效率、低功耗、并行运算、自主认知等优点. 脑启发的神经形态计算成为突破冯·诺依曼瓶颈的重要方向, 是发展智能计算机的前沿交叉领域<sup>[3-5]</sup>. 因此, 开发类脑神经形态器件单元是发展类脑智能系统的核心, 也是构筑类脑智能计算机的必要途径<sup>[6]</sup>.

忆阻器(memristor)是除电阻、电容、电感之

外的第 4 种基本电子元件, 其具有电阻连续调节的记忆特性, 与大脑认知的突触可塑性功能高度相似<sup>[7]</sup>. 相较于传统电子元件, 忆阻器具有自主学习能力, 被视为发展类脑神经形态硬件单元的理想选择<sup>[8,9]</sup>. 同时, 忆阻器具有运行功耗低、读写速度快、集成密度高等优势, 在信息存储、逻辑运算、类脑计算等领域展现了极大应用潜力<sup>[10,11]</sup>. 从广义上讲, 忆阻器根据其电阻转变机理可以划分为离子-电子耦合型忆阻器、铁电型忆阻器、相变型忆阻器、自旋型忆阻器、电荷填充型忆阻器等多种类型<sup>[12,13]</sup>. 本文将着重综述离子-电子耦合型忆阻器, 其工作机理是: 电场诱导忆阻材料中的离子发生迁移/扩散等过程, 导致缺陷态的数量变化或重新分布, 进而实现对电子输运性质的调制. 从可迁移离子类型看, 离子-电子耦合型忆阻材料主要分为阴离子化合价变化(valence change memory, VCM)和阳离子电化学金属化(electrochemical metallization me-

\* 科技部国际科技合作重点专项(批准号: 2018YFE0118300)和国家自然科学基金(批准号: 11974072, U19A2091)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: wangzq752@nenu.edu.cn

mory, ECM) 两种类型, 包括金属氧化物、硫化物、碳基材料<sup>[14–16]</sup>, 有机材料<sup>[17]</sup>, 有机-无机杂化钙钛矿<sup>[18]</sup>, 生物兼容材料、新型二维材料等多种材料体系<sup>[19]</sup>. 目前, 忆阻器在构筑人工神经突触和人工神经元等神经形态硬件方面得到了广泛发展<sup>[20,21]</sup>. 通过对忆阻器中离子动力学过程的调控, 研究者实现了对多种神经突触功能和神经元功能的仿生模拟, 包括长时/短时突触可塑性、脉冲时序依赖可塑性 (STDP)、脉冲频率依赖可塑性 (SRDP)、树突滤波/整合功能、神经元信号整合触发功能等等<sup>[9,21–23]</sup>.

基于忆阻器的数据信息存储以电阻值的形式呈现, 这一存储原理本质上可以通过基尔霍夫定律等物理原理实现对数据信息的处理, 从而其在发展存储计算一体化方面具有独特优势. 目前, 国际上多个研究组已经在忆阻器存算一体化研究方面取得了诸多进展, 包括美国惠普实验室、意大利米兰理工大学、华中科技大学等<sup>[13,24,25]</sup>. 进一步, 在忆阻器的存储与运算功能基础上, 引入感知功能, 研制兼具感知、存储、运算功能的感存算一体化将有助于发展更加智能化、高能效的计算系统, 有望开启人工智能的新时代<sup>[26]</sup>. 因此, 忆阻器感存算一体化成为当前该领域的研究前沿. 从感知功能角度, 多

种传感功能均可以与忆阻器相集成, 包括触觉传感功能、嗅觉传感功能、视觉传感功能等<sup>[27–29]</sup>. 其中, 视觉系统是大脑获取外界信息的主要途径<sup>[10]</sup>, 本文将主要综述面向人工视觉系统的忆阻器感存算一体化领域的研究进展. 将具有更多操作维度的光场引入忆阻器构成“光电忆阻器”, 有望突破传统 CMOS 图像处理技术的瓶颈, 集感、存、算功能于一体, 避免无效的数据传输同时解决计算效率低、功耗高等缺点, 从而提高系统效能<sup>[30]</sup>. 同时, 通过光子-电子-离子的多维、多源、多尺度耦合能够丰富离子调控手段, 有望推进光控离子传输、光电逻辑运算、人工视觉系统等领域的发展.

本文综述了基于感存算一体化的光电忆阻器件的最新进展, 首先介绍光子-离子耦合型和光子-电子耦合型两种光电忆阻材料和忆阻机制; 然后依据忆阻器的光电特性, 介绍光电调制型和全光调制型光电忆阻器件; 接着综述了感存算一体化光电忆阻器件在认知功能模拟、光电逻辑运算、神经形态视觉、动态探测与识别等方面的应用方向和研究进展 (见图 1). 最后在材料制备、器件工艺以及系统架构等方面总结光电忆阻器发展面临的主要挑战并展望其未来发展前景.

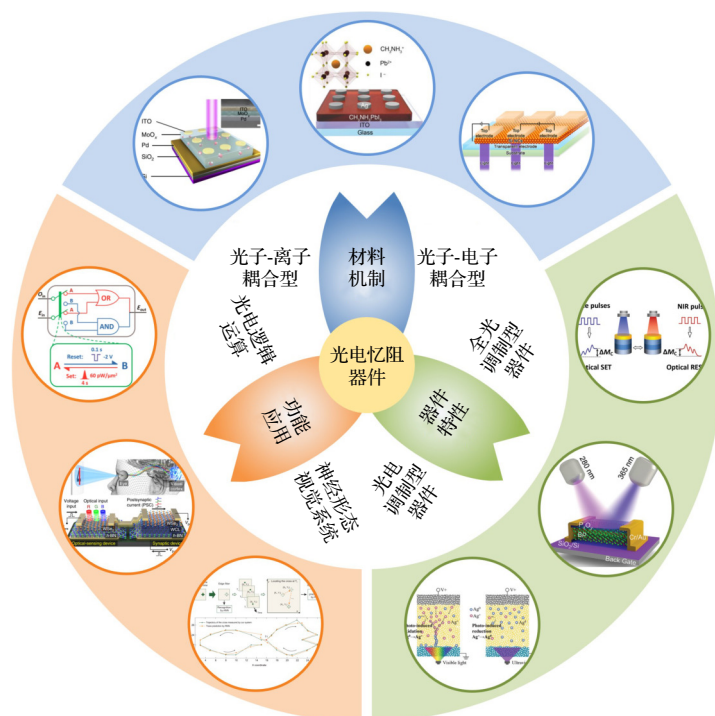


图 1 综述框架示意图, 主要包括光电忆阻材料与机制, 忆阻器件与特性、功能与应用三部分<sup>[14,19,30,41,44,64,72,95,96]</sup>

Fig. 1. Schematic illustration of optoelectronic memristor in terms of materials and mechanism, device and characteristics, functions and applications<sup>[14,19,30,41,44,64,72, 95,96]</sup>.

## 2 光电忆阻材料与机制

材料是器件的基础, 光电忆阻材料的优选在构筑高性能光电忆阻器方面十分重要. 光电忆阻器不仅要求电学信号能够调制器件阻态, 而且光学信号同样要有调制作用<sup>[31]</sup>. 在光电忆阻材料选择中, 如何引入光子作用实现光子-离子耦合、光子-电子耦合乃至三者协同作用是发展光电忆阻材料的根本问题. 一方面, 多数光电忆阻材料自身具有良好的光敏特性, 能够有效利用光学信号调制忆阻特性, 例如多种半导体材料<sup>[14,15]</sup>、光致变色材料<sup>[32]</sup>、有机-无机杂化钙钛矿材料<sup>[18]</sup>、新型二维材料<sup>[19]</sup>等. 另一方面, 一些光电忆阻材料则需要通过复合材料体系、器件结构设计等方案实现其光电忆阻特性<sup>[26,31]</sup>. 本节将围绕光电忆阻材料的优选与设计进行介绍, 包括光子-离子耦合型和光子-电子耦合型两个主要方面.

### 2.1 光子-离子耦合型光电忆阻材料

光子-离子耦合型光电忆阻器材料工作机理主要是利用光学信号调制离子动力学特性, 从而实现

光电忆阻器的阻态调节, 其中主要包括光调制离子化合价和光调制离子迁移型两种类型.

光致变色材料是一类通过光辐照诱导材料结构发生改变的材料体系. 其中, 无机光致变色材料的颜色改变通常伴随着氧化-还原反应以及离子化合价变化, 比如  $\text{MoO}_3$ ,  $\text{WO}_3$  等半导体材料<sup>[30,33]</sup>. 基于光致变色过程中的光子-离子耦合作用, 无机光致变色材料能够通过光学信号诱导离子价态发生变化, 从而调节材料微观结构和电子输运特性, 是光电忆阻材料的重要备选体系之一. 香港理工大学 Chai 研究组<sup>[30]</sup>基于  $\text{MoO}_x$  材料研制出了具有光调制功能的光电阻变式存储器 (ORRAM), 器件具有简单的  $\text{Pd}/\text{MoO}_x/\text{ITO}$  三明治结构 (图 2(a)). 在 365 nm 紫外光照射下,  $\text{MoO}_x$  基光电忆阻器件能够从初始高阻态转变为低阻态, 实现光信号对忆阻器的存储开启操作; 撤去光信号后仍然保持在低阻态, 展示出良好的信息保持特性. 反之, 器件在负向电压作用下可以由低阻态转变至高阻状态, 从而获得电学信号对器件的信息关闭操作 (图 2(b)). 如图 2(c) 所示,  $\text{MoO}_x$  基光电忆阻器的工作机理是: 在光照过程中, 光生空穴可以与薄膜吸附的水

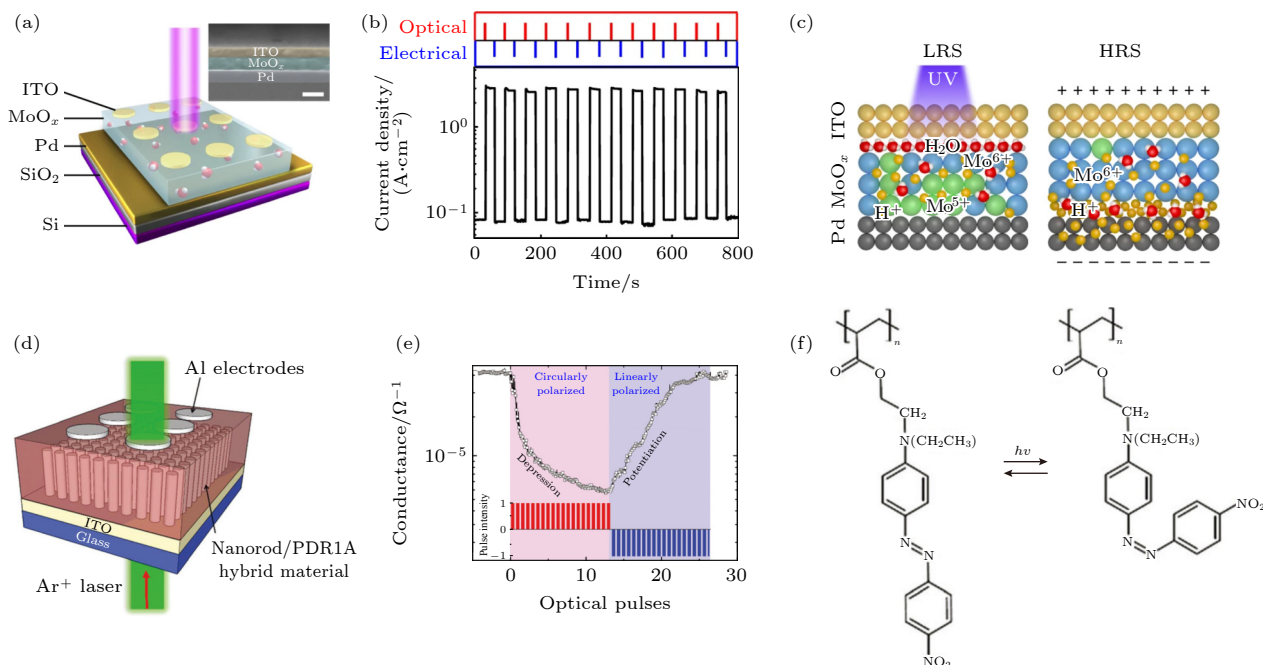


图 2 (a)  $\text{MoO}_x$  光电阻变式存储器的结构示意图; (b)  $\text{Pd}/\text{MoO}_x/\text{ITO}$  器件的脉冲开关特性; (c) 器件阻变机制示意图<sup>[30]</sup>; (d) 基于 PDR1A 材料光学忆阻器结构示意图; (e)  $\text{ITO}/\text{ZnO}/\text{PDR1A}/\text{Al}$  结构器件的可逆电阻调制过程; (f) PDR1A 分子化学结构的示意图<sup>[32]</sup>

Fig. 2. (a) Structural illustration of the  $\text{MoO}_x$  ORRAM; (b) pulse-switching characteristics of  $\text{Pd}/\text{MoO}_x/\text{ITO}$  device; (c) schematic of switching mechanism<sup>[30]</sup>; (d) schematic of PDR1A based optical memristor; (e) conductance modulation of  $\text{ITO}/\text{ZnO}/\text{PDR1A}/\text{Al}$  device; (f) schematic of the PDR1A molecules<sup>[32]</sup>.



分子反应产生质子 ( $H^+$ ). 随后质子和光生电子会导致钼离子价态从  $Mo^{6+}$  价转变为  $Mo^{5+}$  价, 形成  $H_yMoO_x$  [33–35]. 随着  $H_yMoO_x$  的不断生成, 薄膜颜色发生明显变化, 同时器件逐渐从高阻态转变为低阻态. 在器件关闭过程中, 电场驱动质子向 Pb 电极迁移, 钼离子的化学状态从  $Mo^{5+}$  价恢复到  $Mo^{6+}$  价, 器件从低阻态回到高阻态.

有机光致变色材料也是一类易于实现光电忆阻行为的材料体系, 其机理为光诱导有机分子结构发生变化, 如光诱导材料顺反式异构或开闭环调节 [17,32]. 英国赫尔大学 Kemp 研究团队 [17] 利用有机光致变色材料光活性偶氮苯聚合物 PDR1 A (分散红 1 丙烯酸酯) 与 ZnO 纳米棒相结合, 构建了可逆光开关忆阻器. 如图 2(d) 所示, 器件结构包括 Al 顶电极、忆阻层和 ITO 底电极. 实验结果表明, 圆偏振光和线偏振光多次交替照射器件, 聚合物 PDR1A 连续发生可逆顺反光化学异构化 [36]. 其中圆偏振光照射过程使得 PDR1A 材料膨胀, 薄膜整体厚度增大约 30%, 器件电阻升高; 相反当施加线偏振光时, 聚合物材料收缩, 薄膜厚度下降并恢复到初始状态, 整体表现为电阻降低; 由此实现对器件高阻态 (HRS) 和低阻态 (LRS) 的可逆光调制 (图 2(e)). 除此之外, 南京邮电大学 Huang 研究组 [32] 基于 BMThCE (二芳烯烷烃衍生物) 制备了忆阻器件, 紫外和可见光的照射下 BMThCE 可在开环状态 o-BMThCE 和闭环状态 c-BMThCE 之间发生可逆转换, 从而实现了光辐照对忆阻器在一次写入多次读取特性与双极性阻变特性之间的切换. 闭环状态 c-BMThCE 有着更高的 HOMO 能级, 更有利于空穴的注入和传输. 对于开环状态 o-BMThCE 器件, 施加正偏压时空穴从 ITO 电极注入并填充临近陷阱从而形成导电细丝. 施加反向偏压时, 注入的空穴仍然被困在深捕获位点中, 器件无法关闭到高阻态. 紫外光照射后, 闭环状态 c-BMThCE 和 ITO 之间的势垒降低, 捕获的空穴在反向电压作用下能够释放, 器件导电细丝断裂并恢复到高阻态从而实现双极性阻变行为. 尽管光信号并没有直接诱导器件电阻转变, 但光信号对忆阻器特性产生了影响, 也为光电忆阻材料选择提供了参考.

电场作用诱导离子迁移是通常忆阻器产生阻变的离子动力学机制. 利用光学信号影响离子迁移能力调制忆阻器电学特性, 从而实现光子-离子耦合型光电忆阻器也是一种常见的研究途径 [37,38]. 有

机-无机杂化钙钛矿材料是沿该研究途径构建光电忆阻器的典型代表, 包括  $CH_3NH_3PbI_3$  (MAPbI<sub>3</sub>),  $CH_3NH_3PbBr_3$  (MAPbBr<sub>3</sub>), 与  $CH[NH_2]_2PbI_3$  (FA PbI<sub>3</sub>) 等 [39–43]. 有机-无机杂化钙钛矿材料由于其独特的光电特性被广泛应用于多种光电器件, 例如发光二极管、光探测器、晶体管以及忆阻器 [44–48]. 以 MAPbI<sub>3</sub> 材料为例, MAPbI<sub>3</sub> 基忆阻器的阻变机制通常归因于电场诱导碘离子 ( $I^-$ ) 迁移, 产生大量碘空位并形成导电通道 [49]. 美国密歇根大学 Lu 研究组 [49] 利用 MAPbI<sub>3</sub> 材料设计了光遗传学启发的光电忆阻器件, 其工作机理归因于光学信号对碘离子迁移的抑制作用 (图 3(a)). 如图 3(b) 所示, 光辐照过程 (光强为  $1.29 \mu W/cm^2$ ) 可以增大 MAPbI<sub>3</sub> 材料中碘空位的形成能, 从而抑制电场引起的碘空位和碘离子形成并促进他们的自发湮灭 [50]. 由此实现光信号对电导的抑制操作. 另一方面, 东北师范大学 Liu 研究团队 [18] 发现在更高强度的光辐照条件下 ( $250 mW/cm^2$ ), 光信号能够诱导 MAPbI<sub>3</sub> 材料发生晶格膨胀, 降低碘离子的迁移势垒, 从而辅助电场驱动离子迁移. 据此, 他们提出了一种温和的光辅助电初始化方案, 极大地降低了忆阻器初始化电压, 提升了忆阻器性能. 该方案也为光电忆阻器的构建和性能优化提供了一种简单有效的方法. 与之类似, 韩国高丽大学 Wang 研究团队 [51] 研制了基于  $Ag/CH_3NH_3PbI_3$  (OHP)/ITO 垂直结构的光突触器件. 该器件通过光照能够降低突触可塑性开启阈值, 从而模拟了多巴胺对突触活性的增强作用. 如图 3(g) 所示, 单独的电学输入脉冲或光照刺激下, 器件仅表现出短时增强现象 (STP). 同时施加光电信号可以得到长时增强 (LTP) 行为. 相应的光电调节机制可以归结为: 施加光照时产生的光生电场与施加正偏压时的外界电场方向相同, 可以降低碘空位的激活能进而促进电场下的迁移过程, 其中增强光照强度可以引起 OHP 薄膜材料结构转变或键合强度减弱, 进一步降低激活能.

## 2.2 光子-电子耦合型光电忆阻材料

光子-电子耦合型光电忆阻材料工作机理主要是利用光学信号调制材料的电子传输特性, 并最终实现对光电忆阻器电导的调节. 光电导效应是半导体材料中常见的光子-电子耦合效应. 因此, 多种半导体材料都具备用于光电忆阻器的潜力, 包括氧化物半导体 [52,53]、Si 纳米晶材料 [54]、杂化钙钛矿材料 [55]、

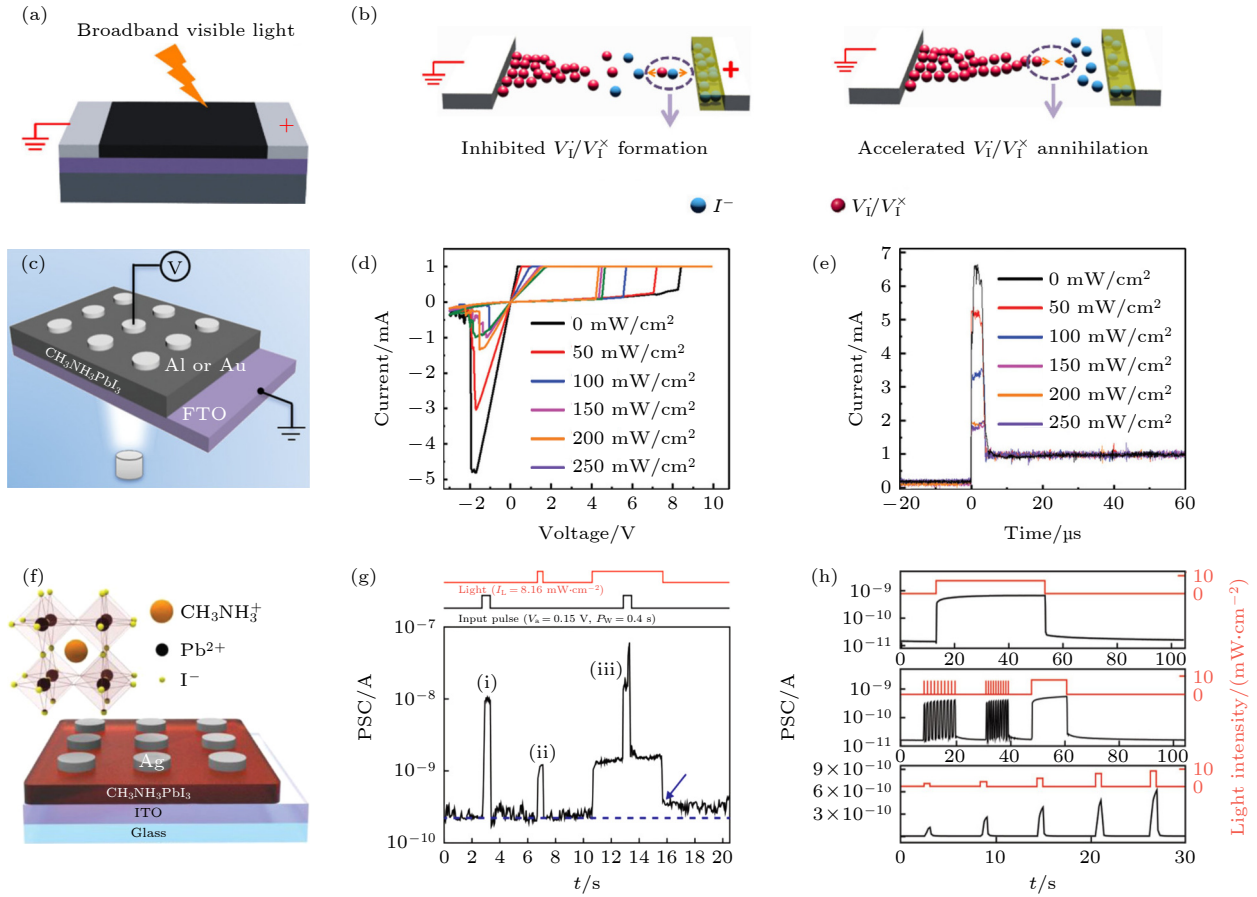


图 3 (a) 基于 MAPbI<sub>3</sub> 材料的平面结构器件示意图; (b) 光照抑制  $V_I/V_I^x$  形成加速  $V_I/V_I^x$  湮灭 [49]; (c) MAPbI<sub>3</sub> 忆阻器结构图; (d), (e) 光照强度对 MAPbI<sub>3</sub> 器件开启电压和过充电流的影响 [18]; (f) Ag/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> (OHP)/ITO 结构光突触器件示意图; (g) 器件在光电脉冲刺激下的响应; (h) 响应幅值随照射时间、频率和强度的变化 [51]

Fig. 3. (a) Schematic of MAPbI<sub>3</sub> based planar device; (b) light illumination inhibits the formation and accelerate the annihilation of  $V_I/V_I^x$  [49]; (c) structural illustration of MAPbI<sub>3</sub> based memristor; (d), (e) the variations of  $V_{\text{Forming}}$  and  $I_{\text{OV}}$  (overshoot current) with light intensity [18]; (f) structural illustration of Ag/CH<sub>3</sub>NH<sub>3</sub>PbI<sub>3</sub> (OHP)/ITO optoelectronic memristor; (g) current response under the stimulation of electrical and optical pulse; (h) current response depending on exposure time, frequency and intensity [51].

新型二维材料 [56] 等. 但不同于常见的光电导现象, 光电忆阻器中光引起的电导变化需要在一定时间内具有非易失性, 而这通常与光电忆阻材料的缺陷态紧密相关 [54]. 进一步, 一些光电忆阻器还需要通过构筑同质/异质结构来获得长时光电导特性 [31,56].

氧化物半导体材料是一类代表性的光子-电子耦合型光电忆阻器材料 [31]. 常见的氧化物光电忆阻器工作机理是: 借助光信号改变界面缺陷态捕获电子的数量, 从而调制材料费米能级或电极与介电层界面处的势垒, 进而改变光电忆阻器的阻值 [56–58]. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 Li 研究组 [14] 提出了基于 ITO/CeO<sub>2-x</sub>/AlO<sub>y</sub>/Al 结构的光电忆阻器件. 由于氧化铈和铝层表面费米能级差异, 界面处会形成肖特基势垒 [59,60]. 在 ITO 上施加正偏置电压时, 电子会在电场驱动下向 ITO 方向移动,

而带正电的氧空位 (Vo<sup>2+</sup>) 向 CeO<sub>2-x</sub>/AlO<sub>y</sub> 界面处迁移. 如图 4(b) 所示, 这些带正电的氧空位能够有效降低界面势垒宽度. 当施加光照时, 临近 AlO<sub>y</sub> 处 CeO<sub>2-x</sub> 层捕获的电子进一步被激发, 并在界面处留下更多带正电的氧空位, 使得肖特基势垒宽度变薄. 因此, 光照可以增强载流子输运过程, 从而提升 ITO/CeO<sub>2-x</sub>/AlO<sub>y</sub>/Al 结构器件 [14,61] 电导率. 与之类似, 研究者又设计出了多种氧化物异质结构用以研制光电忆阻器, 包括 ITO/Nb:SrTiO<sub>3</sub> 异质结 [15]、CeO<sub>x</sub>/ZnO 异质结 [31] 等. 同时, 光响应波长在一定程度上能够通过设计不同的氧化物异质结构进行调节.

硅纳米晶 (Si nanocrystals, Si NCs) 材料也具有良好的光电导特性, 且其表面具有丰富的缺陷态. 浙江大学 Yang 研究组 [54] 利用硼掺杂的 Si NCs

材料构建了 ITO/Si NCs/Al 结构的光电忆阻突触器件, 该器件的光响应波段涵盖紫外光至红外光范围. 由于硅纳米晶表面含有大量的悬挂键, 这些缺陷态能够捕获与释放光生电子, 从而实现光学信号对器件电导的调制过程 [62–64]. 如图 4(d) 所示, 光照条件下, Si NCs 的价带电子被激发至导带, 引起

器件电导增大; 撤去光信号后, 一部分光生电子立即与空穴复合, 而另一部分电子则被悬挂键等缺陷态所捕获. 被捕获的电子需要通过热波动释放到导带并最终与空穴复合, 整个过程需要相对较长时间. 结果表明该器件具有一定的长时记忆特性, 也为模拟突触可塑性功能提供了基础.

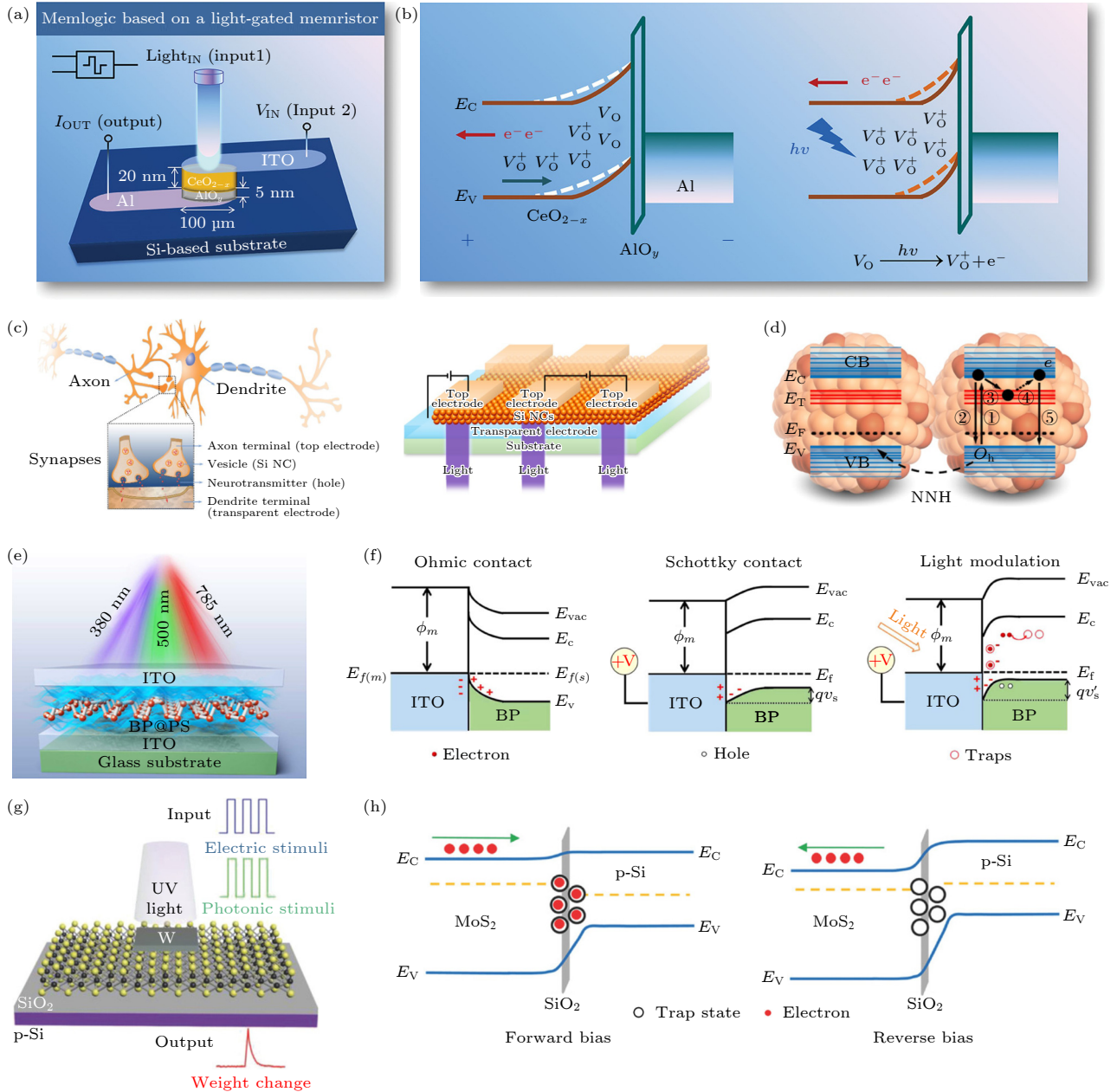


图 4 (a) ITO/ $\text{CeO}_{2-x}$ / $\text{AlO}_y$ /Al 结构光电突触示意图; (b) 器件阻变特性机制图 [14]; (c) 生物突触和硅纳米晶器件结构图; (d) 硅纳米晶能带结构和载流子输运示意图 [54]; (e) 光调制 BP@PS 忆阻器示意图; (f) BP@PS 器件阻变机制的能带模型 [66]; (g) 基于单层  $\text{MoS}_2$  的忆阻突触器件; (h)  $\text{MoS}_2$ /p-Si 结阻变示意图 [56]

Fig. 4. (a) Schematic diagram of optoelectronic synapse with ITO/ $\text{CeO}_{2-x}$ / $\text{AlO}_y$ /Al structure; (b) schematic energy band diagram demonstrating memristive characteristics [14]; (c) schematic of biological synapse and Si-NC-based device; (d) schematic illustration of the band structure and charge carrier transport of Si NCs [54]; (e) schematic of light modulation BP@PS memristor; (f) energy band diagram explaining RS mechanism [66]; (g) schematic of memristive synapse based on monolayer  $\text{MoS}_2$ ; (h) schematic illustration of the resistive switching [56].



二维材料具有强光-物质耦合作用, 因此在新型光电神经形态器件方面极具潜力<sup>[65]</sup>. 中国科学院深圳先进技术研究院 Wang 研究组<sup>[66]</sup> 基于黑磷和聚苯乙烯 (PB) 材料构建了多色光调节的透明忆阻器 (图 4(e)). 对器件分别施加近红外光 (785 nm), 绿光 (500 nm), 紫外光 (380 nm) 时, 器件的关闭电压逐渐降低, 开关比逐渐增大. 这种阻变性能的提升可以归因于捕获位点俘获光生电子后引起的肖特基势垒升高, 如图 4(f) 所示. 华中科技大学 Guo 研究团队<sup>[56]</sup> 基于单层  $n\text{-MoS}_2/\text{p-Si}$  异质结构搭建了超薄忆阻突触 (图 4(g)). 当施加连续光脉冲时 ( $0.11 \text{ mW}/\text{cm}^2$ , 1 s), 器件由于光生电子-空穴出现缓慢的电导上升. 反向的电压脉冲信号 ( $-8 \text{ V}$ , 5 ms) 可以逐渐降低器件电导, 从而实现光增强电抑制调节过程 (图 4(h)). 其中界面处自然形成的  $\text{SiO}_2$  层直接影响器件的阻变行为, 当施加负脉冲时  $\text{MoS}_2$  中的电子转移到界面处并被  $\text{SiO}_2$  层的捕获位点捕获, 器件电导下降. 通过改变光脉冲/电脉冲的频率, 可以实现短时和长时增强/抑制行为. 该超薄忆阻器件适用于发展光电协同调控的神经形态功能模拟. 除此之外, 多个研究组基于  $\text{WSe}_2$ <sup>[67]</sup>,  $\text{SnS}$ <sup>[10]</sup> 等二维材料研制出了性能优异的光电忆阻器件.

### 3 光电忆阻器件与特性

光电忆阻器件对比于传统电学忆阻器可以将光信号和电信号的优势相结合, 有着高能量效率、低电流串扰等特点<sup>[68–71]</sup>. 根据器件的调制信号类型, 可将光电忆阻器件分为光电调制型和全光调制型器件两类<sup>[61,63]</sup>. 对于光电调制型器件, 器件电导调控过程通常需要光信号和电信号的共同作用<sup>[49,51]</sup>. 而全光调制型器件可以在同一单元实现可逆的光调控过程, 有效降低操作的复杂程度, 为实现高集成度的神经形态计算系统提供硬件基础<sup>[3,72]</sup>.

#### 3.1 光电调制型忆阻器件

对于光电调制型忆阻器件, 光学信号和电学信号都可以对忆阻材料的电子输运特性产生影响. 其中光辐照过程可以直接作为刺激信号改变器件的电导状态. 福州大学 Li 团队和汉阳大学 Kim 团队<sup>[55]</sup> 合作研究了基于全无机钙钛矿纳米片材料的  $\text{Au}/\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3/\text{硫氰酸亚铜层}/\text{PEDOT:PSS}/\text{ITO}$

光电突触器件, 器件结构如图 5(a) 所示. 施加紫外光信号可以明显提升器件电流 (约  $6.9 \mu\text{A}$ ); 在撤去光信号后, 器件电路缓慢下降并可以长时间保持在中间状态 (图 5(b)). 光信号主要对器件电导起增强作用, 而电导可逆调控则需要光信号和电信号的协同作用. 如图 5(c) 所示, 在暗态下对器件施加 20 个负电压脉冲 ( $-1.5 \text{ V}$ , 100 ms) 时, 器件电流逐渐减小进而实现光开启电关闭过程. 紫外光照射时, 钙钛矿纳米片产生电子空穴对分离. PEDOT:PSS 和硫氰酸亚铜层界面可以捕获电子导致势垒变化, 从而实现器件阻值转变<sup>[55]</sup>. 其中光照强度直接决定电子空穴对分离效率, 进而影响 PEDOT:PSS 和硫氰酸亚铜层界面电荷捕获效率. 相同照射时间下, 光强越强器件电流上升越快. 光学信号不仅可以直接调制光电忆阻器件的电导还可以作为门控信号改变器件的忆阻特性. 东北师范大学 Liu 研究团队<sup>[16]</sup> 基于氧化石墨烯-氧化钛纳米复合材料体系构建新型光调控阻变存储器 (图 5(d)). 该器件可以通过调整紫外光照射时间和氧化钛浓度来精确控制薄膜中氧化石墨烯的光催化还原过程. 紫外光照射下, 氧化钛纳米颗粒附近的氧化石墨烯会发生光催化还原反应, 官能团数量减少进而生成还原氧化石墨烯. 相比较于传统的电初始化过程, 该方法有效抑制还原氧化石墨烯的过度生长, 降低器件随机性, 提升阻变存储性能. 如图 5(e) 所示, 经过紫外光照射 15 min 后, 器件不再需要电初始化过程, 有效抑制了过冲电流, 并且开启电压降低至  $0.52 \text{ V}$ , 器件稳定性明显提升. 碳基材料通常有着极佳的热稳定性和化学稳定性, 但器件阻变行为通常需要与其他材料相结合, 这无疑限制了全碳器件的发展. 东北师范大学 Liu 研究团队<sup>[73]</sup> 在原有工作基础上将氮掺杂的碳量子点和氧化石墨烯复合材料作为阻变层, 还原氧化石墨烯和石墨烯层作为顶电极和底电极, 构建了全碳忆阻突触器件 (图 5(g)). 在波长范围为 320–380 nm 紫外光照射下, 薄膜中的碳量子点产生电子空穴对. 其中的光生电子会与氧化石墨烯表面的含氧官能团反应, 引起局域还原. 在适宜的光照时间 (10 min) 和碳点浓度 (质量浓度 30%) 条件下, 器件可以由数字型阻变行为转变为模拟型阻变行为. 得益于碳基材料良好的热稳定性, 器件在 450 K 高温下仍然可以表现出稳定的忆阻行为.



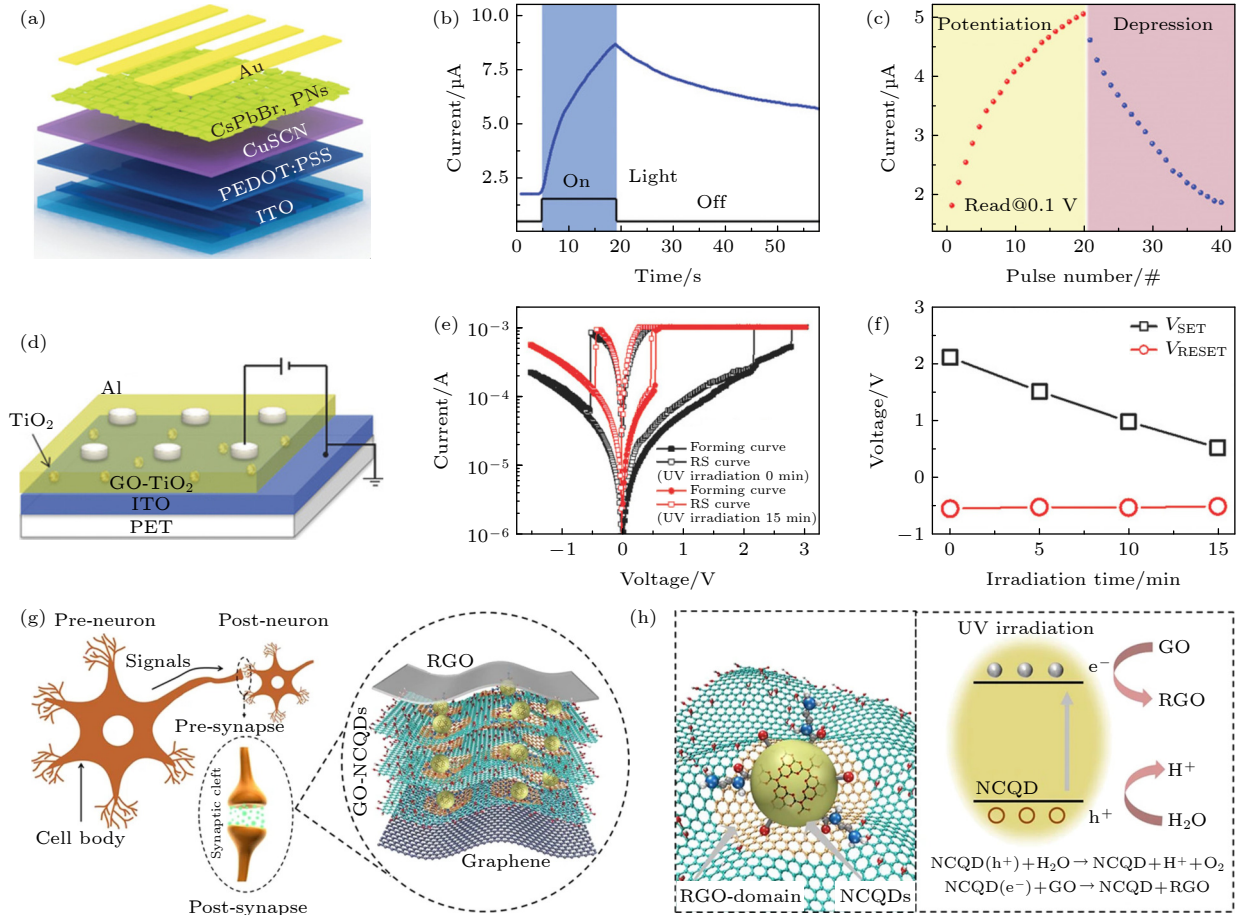


图 5 (a) 全无机钙钛矿基光电阻突触器件示意图; (b) 器件在紫外光下的光开关特性; (c) 器件在电学脉冲信号下的电导调制<sup>[55]</sup>; (d) Al/GO-TiO<sub>2</sub>/ITO 存储器件结构图; (e) 紫外光照射对器件电初始化和阻变的影响; (f) 紫外照射时间对开关电压的调节<sup>[16]</sup>; (g) 生物突触及 RGO/GO-NCQDs/石墨烯全碳器件示意图; (h) GO-NCQD 复合材料的光致还原过程<sup>[73]</sup>

Fig. 5. (a) Structural diagram of all-inorganic perovskite optoelectronic synapses; (b) optical switching characteristics under UV light; (c) potentiation and depression behaviors under electrical stimulation<sup>[55]</sup>; (d) schematic illustration of Al/GO-TiO<sub>2</sub>/ITO memory device; (e), (f) the effect of UV irradiation time on forming (e) and switching voltages<sup>[16]</sup> (f); (g) schematic illustration of biological synapse and RGO/GO-NCQDs/graphene memristor; (h) photo-reduction process of GO-NCQDs film<sup>[73]</sup>.

### 3.2 全光调制型忆阻器件

全光调制型器件通常需要复杂的器件结构以及繁琐的信号调制过程, 这无疑限制其进一步的发展. 如何通过材料优化选择及器件结构设计在单一器件实现全光可逆调制过程是领域内的研究热点. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 Zhuge 研究组<sup>[74]</sup>利用双层 InGaZnO 材料成功构建全光调制型忆阻器件. 如图 6(a) 所示, 其双层结构由缺氧的 O<sub>D</sub>-IGZO 层和含氧丰富的 O<sub>R</sub>-IGZO 层构成. 单纯的 O<sub>D</sub>-IGZO 材料器件在可见光的照射下无法观察到明显的光电流; 而 O<sub>R</sub>-IGZO 材料作为中间层在可见光下产生易失性光电流, 对红外光没有响应<sup>[74]</sup>. 对于蓝光照射后的双层器件, 绿光 (800 nm) 和红光 (900 nm) 照射过程使得器件电流增加; 而与暗态相比, 近红外光照射可以引起更明显的电流下降

(图 6(b)). 如图 6(c) 所示, 通过增加近红外光的强度能够提升器件关闭效率. 借助波长为 420 nm 和 800 nm 的光信号可以实现器件电导的可逆转变过程 (图 6(d)). 对于双层结构器件的光开启过程如图 6(e) 所示, 光可以诱导界面势垒处的中性氧空位 (V<sub>O</sub>) 变成离化氧空位 (V<sub>O</sub><sup>2+</sup>), 导致界面处势垒高度降低, 器件电导上升; 而在光关闭过程中, 红光照射能诱导界面势阱中的电子隧穿或越过势垒进入 O<sub>D</sub>-IGZO 层. 部分电子被离化的氧空位 (V<sub>O</sub><sup>2+</sup>) 捕获, 转变为 V<sub>O</sub>, 界面处势垒增大, 阻碍电子的流动, 器件电导下降.

此外, 墨尔本皇家理工大学 Ahmed 实验组<sup>[19]</sup>基于层状黑磷材料构建了具有全光调制存储能力的神经形态成像器件. 图 6(f) 为器件结构示意图, 层状黑磷材料位于 SiO<sub>2</sub>/Si 衬底上, 顶端为 Cr/Au

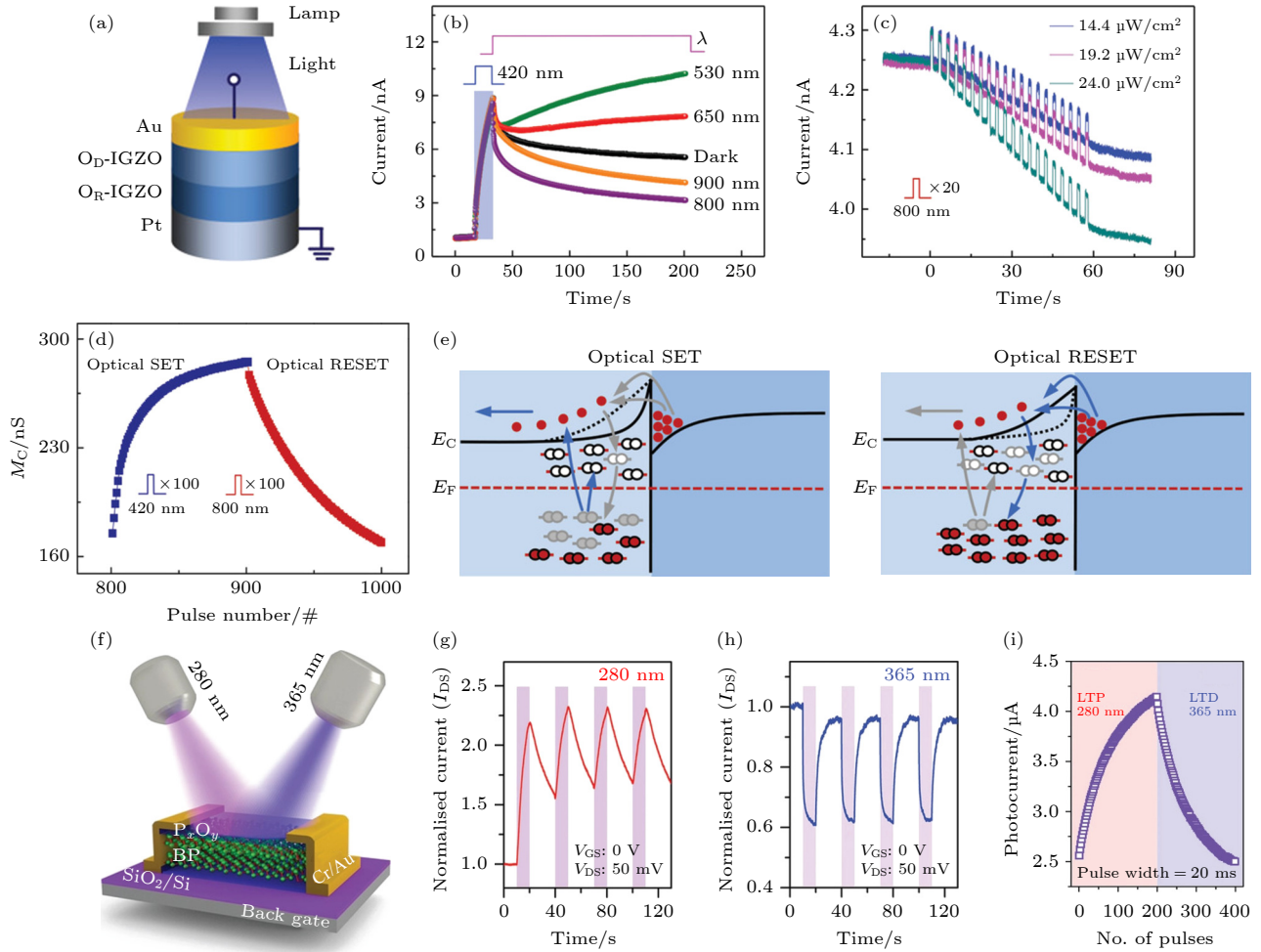


图 6 (a) Au/O<sub>D</sub>-IGZO/O<sub>R</sub>-IGZO/Pt 结构的全光调控忆阻器件; (b) 不同波长光照射下 IGZO 器件响应电流; (c) 光照强度对光关闭过程影响; (d) 光开启和光关闭特性; (e) 全光调制过程机制图<sup>[74]</sup>; (f) 基于 BP 材料的光电晶体管; (g), (h) 器件在 280 nm 和 365 nm 光脉冲下的响应电流; (i) 器件的长时增强和抑制特性<sup>[19]</sup>

Fig. 6. (a) Schematic diagram of the Au/O<sub>D</sub>-IGZO/O<sub>R</sub>-IGZO/Pt device structure; (b) current response depending on light of various wavelengths; (c) effect of power density on optical reset behavior; (d) reversible modulation of device conductance; (e) schematic illustrations of all-optically controlled device<sup>[74]</sup>; (f) schematic of BP based device; (g), (h) transient photocurrent under 280 nm and 365 nm illumination; (i) LTP and LTD behaviors under consecutive pulse<sup>[19]</sup>.

源漏电极. 器件的归一化瞬态光电流如图 6(g), (h) 所示, 在 280 nm 光脉冲刺激下源漏电流表现为上升趋势, 而在 365 nm 光作用下呈现出相反的光电流降低行为 (值得注意的是整个过程不需要栅极电压信号的调制). 图 6(i) 为器件在连续增强光脉冲和抑制光脉冲下的长时增强 (LTP) 和长时抑制 (LTD) 曲线. 其工作机制可以归因于黑磷材料自身的性质. 黑磷材料在自然环境中很容易吸附氧气从而形成氧化磷, 这种表面自发氧化形成的非晶层可以作为光生载流子的捕获位点<sup>[75–80]</sup>. 在相对低光子能量 (365 nm) 照射时, 光生载流子会被氧缺陷捕获, 器件电导下降产生负向的光电流. 相反高光子能量 (280 nm) 激发过程可以有效诱导环境中氢气和水分分子分裂进而钝化氧化层中的缺陷<sup>[81]</sup>,

增大载流子浓度实现正向光电导.

除了将光子与材料固有缺陷构建联系实现全光调制的方法外, 东北师范大学 Liu 研究团队<sup>[82]</sup>设计了一种新型等离子激元光电忆阻器件, 实现可逆的全光调制过程. 如图 7(a) 所示, 该工作将 Ag 纳米颗粒负载到氧化钛多孔薄膜中组成纳米复合材料作为阻变层, Au 和 ITO 分别作为顶电极和底电极. 器件的全光调制过程如图 7(b)–(f) 所示, 施加可见光器件表现出长时增强过程, 相反施加紫外光时, 器件呈现长时抑制过程. 增加照射过程的光强和时间可以提升电导的变化范围. 研究表明器件的全光可逆调控机制主要归因于 Ag 和 TiO<sub>2</sub> 材料微纳界面上的肖特基势垒. 在可见光的照射下, Ag 纳米颗粒由于自身的局域表面等离子体共振效应

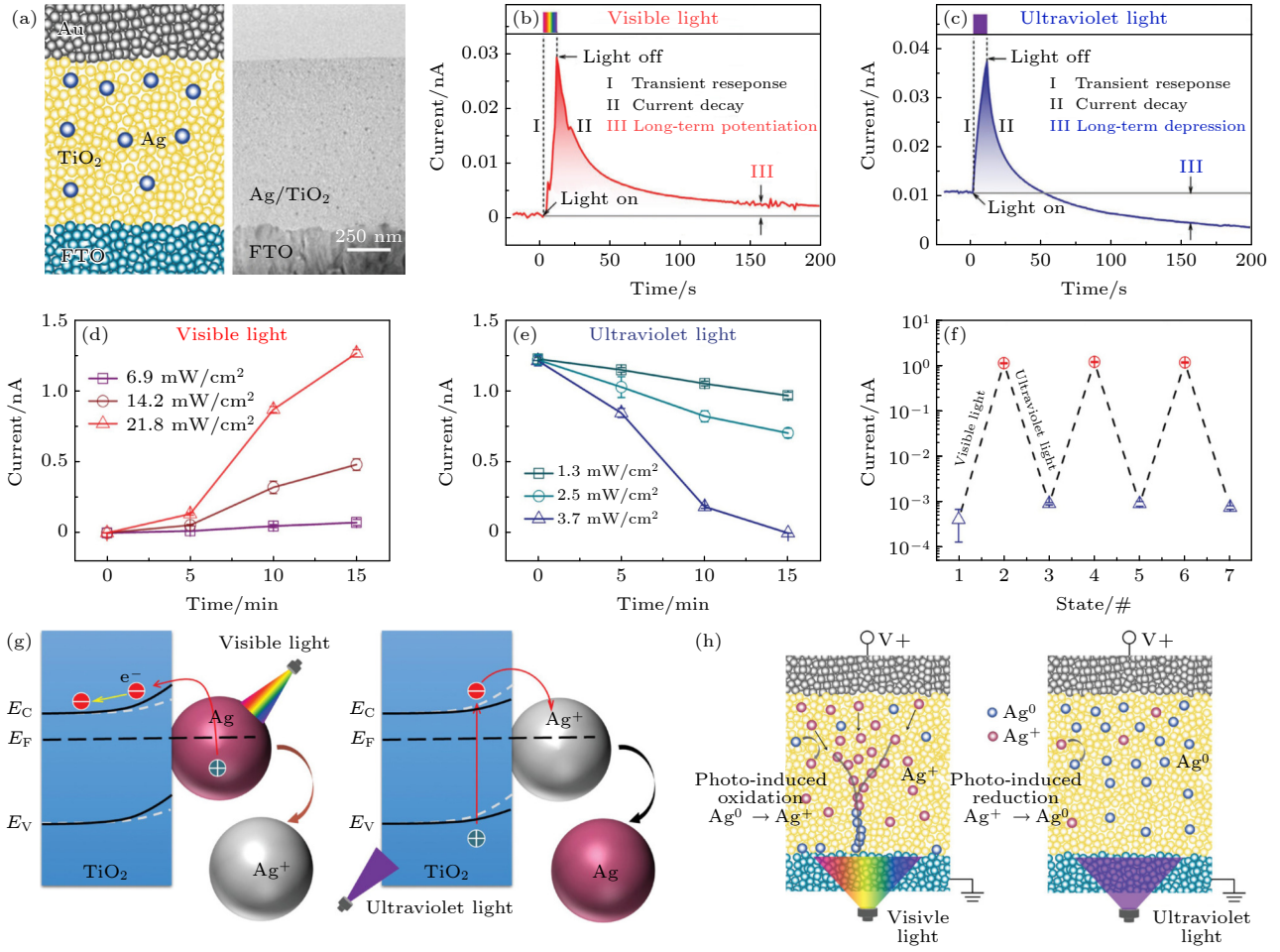


图 7 (a) 基于 Ag-TiO<sub>2</sub> 材料的全光调控忆阻器件; (b), (c) 可见光和紫外光脉冲刺激下器件的电流响应; (d), (e) 光照强度和时间内对器件电流的影响; (f) 全光可逆调制过程; (g), (h) 器件在光电信号刺激下的运行机制<sup>[82]</sup>

Fig. 7. (a) Fully light-modulated memristor based on Ag-TiO<sub>2</sub> nanocomposite; (b), (c) transient photocurrent under the illumination of visible and UV light; (d), (e) the response current depending on irradiation time and intensity; (f) fully light-modulated behaviors; (g), (h) operating mechanism of the Ag-TiO<sub>2</sub> based optoelectronic device<sup>[82]</sup>.

(LSPR) 可以激发出电子并转移到 TiO<sub>2</sub> 导带<sup>[83]</sup>。如图 7(g) 所示, 电子和银离子发生空间分离过程, 银纳米颗粒发生光致氧化 ( $\text{Ag}^0 \rightarrow \text{e}^- + \text{Ag}^+$ ), 并降低 Ag/TiO<sub>2</sub> 界面肖特基势垒提升器件电导。相反紫外光能够激发 TiO<sub>2</sub> 价带电子跃迁至导带并进一步与银离子结合, 实现光致还原过程 ( $\text{Ag}^+ + \text{e}^- \rightarrow \text{Ag}^0$ )。该过程中 Ag/TiO<sub>2</sub> 微纳界面处的肖特基势垒逐渐增大, 器件电导降低从而实现可逆的光增强和光抑制过程<sup>[72]</sup>。此外, 不同光照过程引起的银纳米颗粒化学状态变化直接影响后续电场下的迁移过程, 从而在单一器件上可以实现光电多功能集成。

## 4 感存算一体化功能及应用

光电忆阻器由于自身独特的光电结合调制方式在突触功能模拟方面有着难以比拟的优势。得益

于多维度的调节方式, 光电忆阻器在光遗传学启发的突触可塑性模拟, 光电/全光逻辑运算, 构建高效神经形态视觉系统等方面有良好的应用前景<sup>[10,84]</sup>。以下部分主要讨论器件在感存算一体化功能应用方面的最新进展。

### 4.1 光电逻辑运算及类脑功能模拟

突触可塑性是大脑学习和记忆功能的神经机制, 发展人工突触模拟生物突触行为是构建高效神经形态计算系统的基础<sup>[51,74,85]</sup>。中国科学院材料科学与光电工程研究中心 Shen 研究组<sup>[86]</sup>基于 TiN<sub>x</sub>O<sub>2-x</sub>/MoS<sub>2</sub> 异质结构构建人工光电突触实现神经形态计算和视觉系统。器件的结构如图 8(a) 所示, 从上至下依次为 Al 电极、TiN<sub>x</sub>O<sub>2-x</sub> 薄膜、MoS<sub>2</sub> 薄膜以及 ITO 电极。对器件施加 365 nm 的紫外光 (3.15 mW/cm<sup>2</sup>) 时, 器件电导出现明显的上升过程。光照结束后,



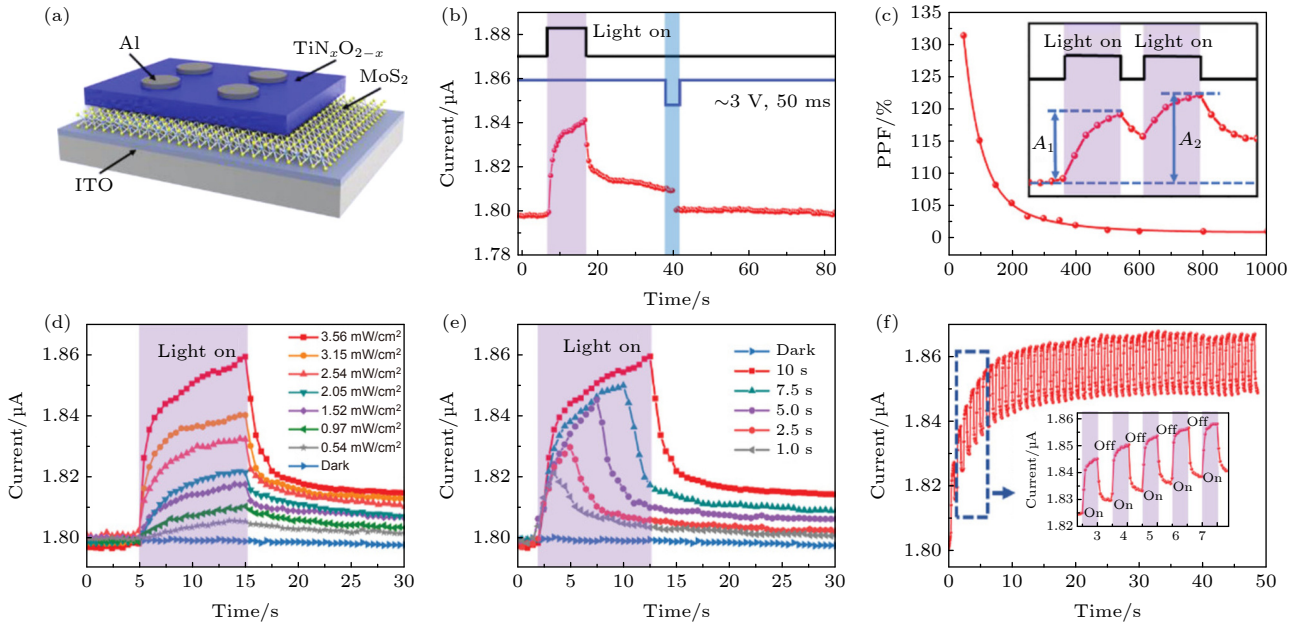


图 8 (a)  $\text{TiN}_x\text{O}_{2-x}/\text{MoS}_2$  异质结光电突触器件; (b) 单个光脉冲引起的增强过程; (c) 对脉冲促进 (PPF) 功能; (d), (e) 不同光照强度和时间内器件的电导响应; (f) 连续光脉冲引起的电导变化<sup>[86]</sup>

Fig. 8. (a) Structural illustration of  $\text{TiN}_x\text{O}_{2-x}/\text{MoS}_2$  heterostructure-based optoelectronic synapse; (b) optical potentiation process; (c) paired pulse facilitation function; (d), (e) conductance response depending on the illumination intensity and duration; (f) transient response under consecutive optical pulses<sup>[86]</sup>.

器件电导出现缓慢衰减而不是快速恢复到初始状态. 这就是典型的兴奋性突触后电流 (excitatory postsynaptic current, EPSC) 现象, 施加负电压脉冲可以消除这一衰减效果, 使器件电导快速下降到初始状态. 通过改变连续光脉冲的间隔可以实现对脉冲促进 (paired pulse facilitation, PPF) 功能. 如图 8(b) 所示, 延长脉冲对的间隔时间会降低相应的 PPF 指数. 此外器件在不同的光强级别下展现出强度依赖的电导响应特性. 更高光强信号不仅可以引起更大的电导响应, 还会使撤光后电导的衰减过程减缓. 调整光照时间同样可以改变电导响应幅值及暗态下的弛豫过程 (图 8(c), (d)). 这种光引起的电导响应是模拟高阶突触功能的基础<sup>[87]</sup>.

联合式学习是人脑的重要能力, 而巴普洛夫实验是该领域内的经典实验案例<sup>[88]</sup>. 如图 9(a) 所示, 中国科学院深圳先进技术研究所 Wang 研究组<sup>[89]</sup>利用二维  $\text{TiS}_3$  材料构建了两端光电人工突触器件. 器件的光响应范围涵盖可见光和红外光区域<sup>[90]</sup>. 不同波长光信号下器件的光增强电抑制行为如图 9(c) 所示. 基于以上光电调控特性模拟巴普洛夫狗实验, 其中 400 nm 光照信号作为食物刺激 (非条件刺激), 电信号作为铃声刺激 (条件刺激), 器件电流高于阈值视为分泌唾液 (图 9(d)). 单独

的电压脉冲序列下器件电流没有明显变化, 即没有分泌唾液. 对器件施加 400 nm 光照时, 器件电流超过阈值, 表明开始分泌唾液. 对器件同时施加光信号和电信号作为训练过程. 经过训练后, 单独的电刺激可以让器件电流高于阈值, 表明成功将非条件刺激和条件刺激建立联系. 最后器件电流略微降低, 与生物系统中联合式学习的遗忘过程一致.

光电忆阻器由于能直接对光信号进行存储和处理, 在光电逻辑运算方面也有良好的应用前景<sup>[91]</sup>. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 Li 研究组<sup>[14]</sup>利用  $\text{CeO}_x$  基光电忆阻器的阻变行为和持续光电导效应实现了可重构存储逻辑功能. 器件的操作原理示意图如图 10(a) 所示. 其中光信号和电信号作为逻辑运算的输入信号, 器件电流作为输出信号, 且输出电流高于阈值使结果为 1, 低于阈值为 0. 对于初始低电流状态器件, 单一的电信号或光信号都无法使器件电流高于阈值, 输出为 0. 只有同时输入光信号和电信号时, 器件输入为 1, 整体逻辑功能为“与”运算. 对器件施加光脉冲进行光开启过程, 器件转变为“或”门. 只有光信号和电信号都不输入时, 输出结果为 0, 否则输出为 1. 相关的实验结果如图 10(b), (c) 所示. 值得注意的是, 电关闭过程可以将“或”门重构, 恢复到“与”门<sup>[92]</sup>. 因此

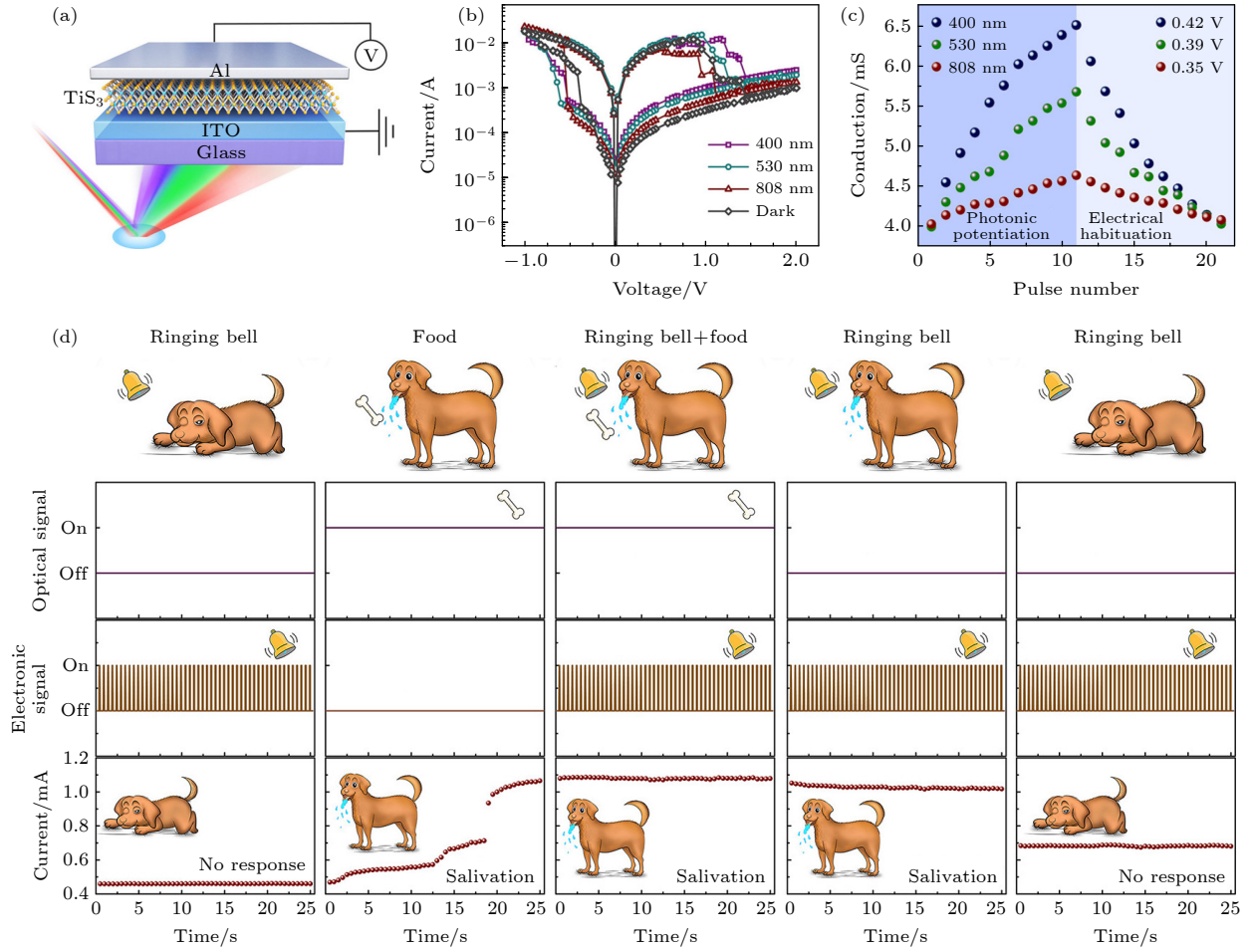


图 9 (a) Al/TiS<sub>3</sub>/ITO 器件结构示意图; (b) 不同波长光照下的电流-电压曲线; (c) 光电信号下的器件电导变化; (d) 巴普洛夫狗实验中经典条件反射模拟<sup>[89]</sup>

Fig. 9. (a) Sandwich-like structure of the Al/TiS<sub>3</sub>/ITO memristor; (b) RS behaviors modulated by different wavelengths; (c) conductance change under optical and electric signals; (d) simulation of classical conditioning in Pavlov's dog experiment<sup>[89]</sup>.

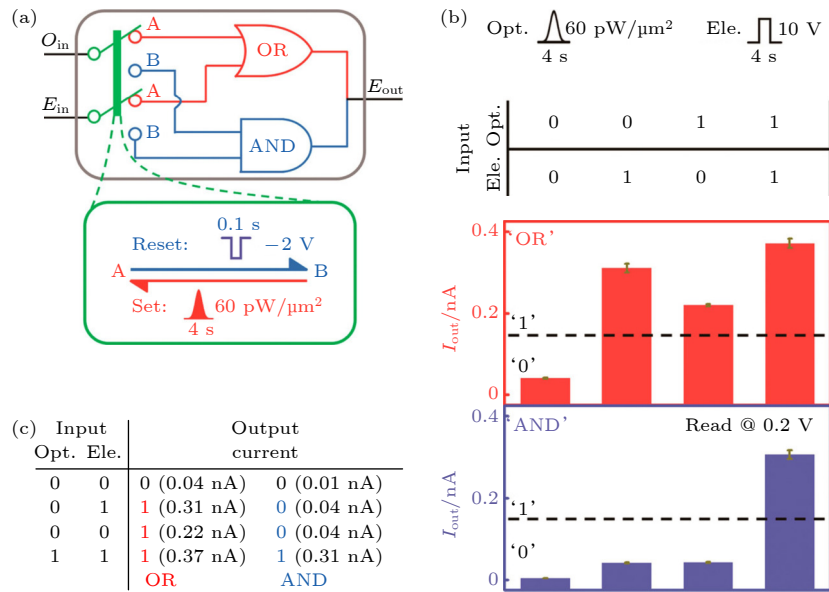


图 10 (a) 与门或门逻辑运算转换示意图; (b) 可重构与门、或门输出结果; (c) 真值表及输出电流值<sup>[14]</sup>

Fig. 10. (a) Logic operation switching of "AND" and "OR" gates; (b) reprogrammable outputs of memlogic "AND" and "OR"; (c) truth table and output current of "AND" and "OR" gate<sup>[14]</sup>.

器件借助自身的光开启电关闭过程可以实现可重构逻辑运算功能. 此外, 将负电压信号作为第 2 个电输入可以实现“非”逻辑运算. 当第 2 个电输入端为 0 时, 整体输出结果与上述的“与”及“或”门相同; 当引入第 2 个电信号后, 无论之前的逻辑输入信号如何改变, 器件都将被关闭回高阻状态, 即输出结果为 0. 此外, 基于不同光强和电流的对应关系, 利用两个独立的光信号可以实现加法器和数模转换功能. 此外墨尔本皇家理工大学 Ahmed 实验组<sup>[71]</sup>利用层状黑磷材料构建新型多功能光电器件, 借助不同波长的紫外光信号能够实现正/负光电流. 将不同激发波长的光信号作为输入, 可以实现或门、异或门逻辑运算; 韩国东国大学 Im 研究组<sup>[93]</sup>基于二维 Te/ReS<sub>2</sub> 范德瓦耳斯异质结构新型光电调控晶体管, 通过控制光电输入信号可以实现包括与门、或门在内的多种逻辑运算.

## 4.2 高效神经形态视觉系统

视觉系统是人类获取外界信息的重要途径, 如何构建能与人类视网膜相比拟的高效神经形态视觉系统一直是国内外的研究热点<sup>[94–98]</sup>. 传统的机器视觉通常由感知、存储、处理单元组成, 其分离的硬件结构严重影响整体效率<sup>[99,100]</sup>. 光电忆阻器凭借感存算一体化架构有效避免了硬件分离带来的高延迟和高功耗, 为构建高效神经形态视觉系统提供了理想硬件基础<sup>[101]</sup>. 本节主要介绍光电忆阻器在神经形态视觉系统方面的研究进展.

香港理工大学 Chai 研究组<sup>[30]</sup>利用 Pd/MoO<sub>x</sub>/ITO 忆阻阵列实现图像感知、存储和实时预处理功能. 其中的图像预处理功能可以有效提升传感数据质量, 大幅度提高处理效率和后续识别的准确性. 如图 11(a) 所示, Chai 研究组<sup>[30]</sup>通过构建 3×5 光电忆阻阵列来展示图像的预处理过程, 主要包括

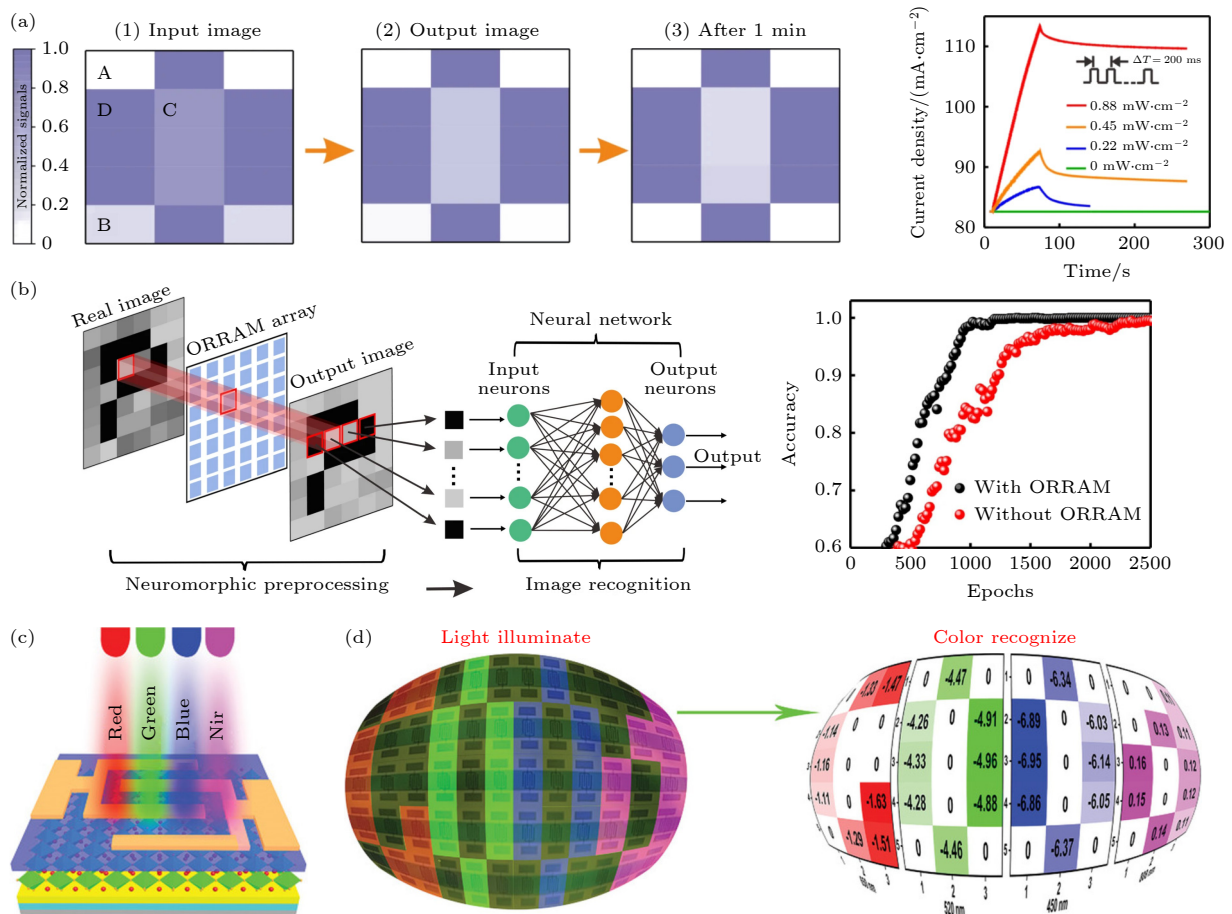


图 11 (a) 基于光电忆阻器的图像记忆及预处理功能; (b) 神经形态视觉系统图像识别模拟<sup>[30]</sup>; (c) 突触光电晶体管光照示意图; (d) 未知彩色光识别功能<sup>[104]</sup>

Fig. 11. (a) Image memorization and preprocessing functions based on optoelectronic memristor; (b) simulation of image recognition in artificial neural network<sup>[30]</sup>; (c) device structure of 2D perovskite/organic heterojunction synaptic phototransistor; (d) simulating the recognition of unknown light<sup>[104]</sup>.



对比增强和噪音降低功能. 对阵列不同部分施加 4 种不同强度的光信号, 不同光强引起的器件响应电流差异明显高于光信号自身变化, 也就是高光强可以引起更大的电流增长率, 起到图像的对比增强作用. 经过 1 min 后, 低光强照射的像素点电流弛豫更快, 高强度光信号引起的电流变化衰减相对较慢, 输出图像的对比度进一步增强. 作者进一步利用  $6 \times 7$  光电忆阻阵列与三层人工神经网络构建神经形态视觉系统, 模拟模式识别过程, 如图 11(b) 所示. 对比发现, 图像预处理过程可以明显提升整体的识别速率和精度. 借助光电忆阻阵列的预处理功能, 仅需 1000 次训练识别率就能达到 0.986<sup>[30]</sup>. 此外, 韩国基础科学研究所纳米颗粒研究中心 Kim 研究组<sup>[102]</sup>利用  $\text{MoS}_2/1, 3, 5$ -三乙基-1, 3, 5-三甲基环三硅氧烷异质结构构建曲面图像传感阵列, 实现高效图像学习识别过程.

人眼除了可以有效分辨光学信号强度外, 还能辨别物体颜色差异<sup>[103]</sup>. 中国科学院化学研究所

Liu 研究组<sup>[104]</sup>, 利用二维钙钛矿  $\text{PEA}_2\text{SnI}_4$ /有机材料 ( $\text{Y}_6$ ) 异质结构建光电突触晶体管实现红绿蓝及红外光识别, 如图 11(c) 所示. 其中  $\text{PEA}_2\text{SnI}_4$  材料的吸收范围覆盖整个可见光区域, 而有机物  $\text{Y}_6$  在红外区域具有良好的光响应<sup>[105]</sup>. 由于异质结构对不同波长光吸收效率以及光电转化效率的差异, 在可见光区域器件对蓝光响应幅值最大, 红光最小. 在正栅压调控下可见光范围信号使得器件电流逐渐减小, 也就是抑制突触后电流现象 (IPSC). 相反近红外光信号能引起兴奋性突触后电流 (EPSC). 对于一个未知的光信号, 器件能够将其转化为兴奋/抑制性突触后电流, 内部处理器根据响应类型和幅值实现色彩分辨功能. Liu 等<sup>[105]</sup>进一步制备  $12 \times 5$  柔性器件阵列并将其贴敷在人工眼球上, 成功分辨光信号颜色并展示 4 种颜色的 G, o, o, d 字母. 成均馆大学 Park 研究组<sup>[106]</sup>基于  $\text{h-BN}/\text{WSe}_2$  异质结构制备了具有光传感和突触功能的光学神经突触器件. 如图 12(a) 所示, 器件由突触器件和感

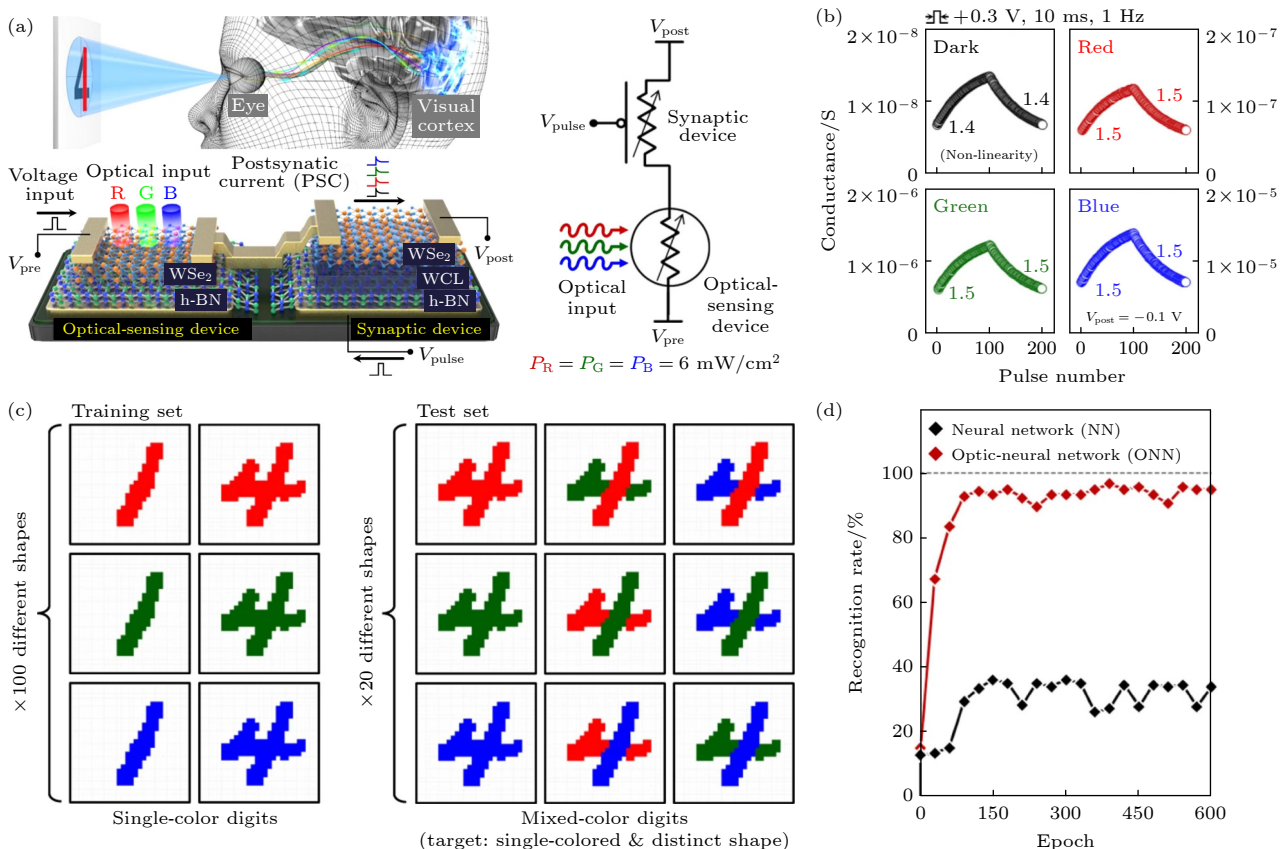


图 12 (a) 人类视觉神经系统及  $\text{h-BN}/\text{WSe}_2$  基突触器件示意图; (b) 不同光照条件下的长时增强和抑制行为; (c) 人工视觉神经网络训练测试实例; (d) 不同训练次数后的识别率<sup>[106]</sup>

Fig. 12. (a) Schematic illustration of the human optical nerve system; (b) schematic illustration of the human optical nerve system; (c) dataset consisted of colored and color-mixed number for training and testing; (d) dependence of recognition rate on training epochs<sup>[106]</sup>.

光器件构成, 由此构建的光学神经网络能够模拟人类视觉系统识别彩色和混色图案的能力. 对于感光器件, 短波长光信号能引起更大的电流增长幅值, 其中蓝光增强效果是红光的 1000 倍以上 (图 12(b) 所示). 借助感光器件调节异质结突触器件的电荷捕获过程实现光可调谐的突触可塑性. 利用器件的光电特性构建光神经网络进行彩色和混色模式识别. 其中阵列是由  $28 \times 28$  个人工锥形细胞群构成, 单个细胞群包含 3 个单元, 分别对红绿蓝色光进行探测. 图 12(c) 是用于训练的单体数字图像示例以及彩色测试图像. 实验结果显示, 传统的神经网络对于特定彩色测试图案的识别率仅为 40%, 而借助感光特性构建光神经网络后, 经过 50 次学习整体

识别率就超过 90% (图 12(d))<sup>[106]</sup>. 由此表明, 光学神经网络在识别颜色混合图案方面比传统神经网络更具优势, 也为构建进行复杂模式识别任务的神经网络提供基础.

### 4.3 动态探测与识别

近期, 南京大学 Miao 研究组<sup>[107]</sup> 利用  $\text{WSe}_2/\text{h-BN}/\text{Al}_2\text{O}_3$  范德瓦耳斯异质结构建视网膜拟态传感器, 实现图像感知和处理功能集成. 图 13(a) 是  $3 \times 3$  视网膜拟态传感器的光学图像. 通过调控栅极电压极性实现开启和关闭两种截然不同的光响应, 这与生物视网膜中双极细胞的响应相似 (图 13(b))<sup>[108,109]</sup>. 借助不同的开启关闭光响应器件可以在图像感知

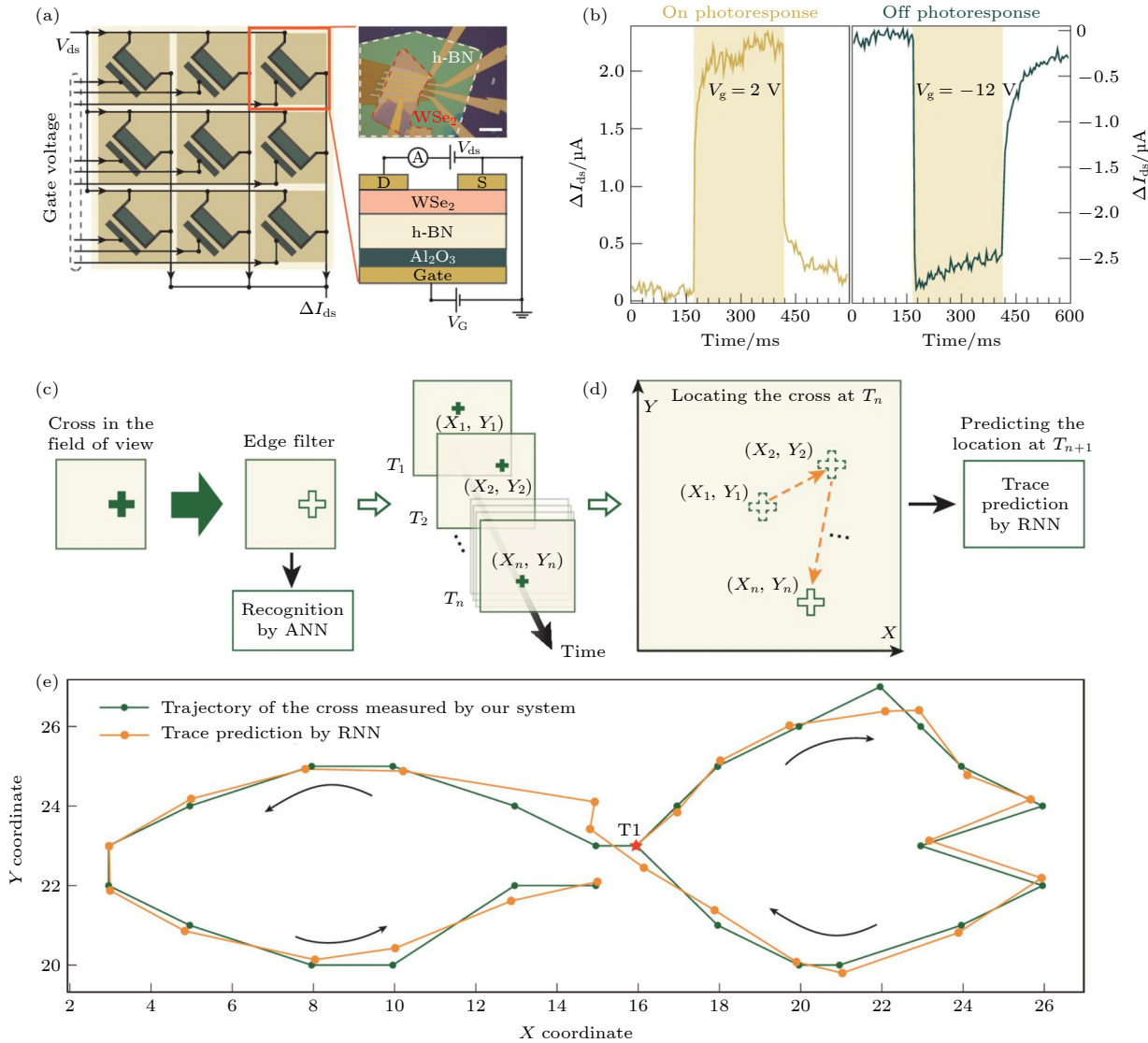


图 13 (a) 基于  $\text{WSe}_2/\text{h-BN}/\text{Al}_2\text{O}_3$  异质结的视网膜拟态传感器器件; (b) 异质结器件相应的开关光响应; (c)–(e) 基于神经形态视觉系统实现目标追踪<sup>[107]</sup>

Fig. 13. (a) Retinomorphic sensor based on  $\text{WSe}_2/\text{h-BN}/\text{Al}_2\text{O}_3$  heterostructure device; (b) the On and Off photo response of heterostructure device; (c)–(e) object tracking of neuromorphic vision system<sup>[107]</sup>.

的同时实现边缘增强等处理功能,进而大幅度地提升识别的效率和精确度.进一步将传感器与 Pt/Ta/HfO<sub>2</sub>/Ta 结构的 1T1R 忆阻阵列连接,成功实现脑启发的视觉感知应用.该系统中的视网膜拟态传感器在感知图像信息的同时进行预处理,去除冗余数据并保留了关键信息.随后信息传入忆阻神经网络用于感知,整个过程有效避免了繁琐的模拟-数字信号转化过程.鉴于以上优异性能,该神经形态视觉系统在物体追踪方面也有着良好的应用前景.物体的运动轨迹轮廓经由视网膜拟态传感器提取轮廓位置后作为时空特征传入循环神经网络实现物体追踪和预测<sup>[110–112]</sup>.

除了将视网膜拟态传感器和忆阻器阵列连接构建神经形态视觉系统的方案外,复旦大学 Zhou 研究组<sup>[113]</sup>通过构建二维异质结视网膜拟态器件完成感知记忆计算功能集成,并实现对运动物体的探测和识别.该视网膜拟态器件主要是基于 BP/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/WSe<sub>2</sub>/h-BN 异质结结构的浮栅晶体管.通过设计

光电信号能够实现非易失性的正向和负向光电流,可以模拟视网膜中双极细胞的可逆调节和存储功能,如图 14(c) 所示.进一步将物体的运动过程视为不同时刻的图片序列.将某一时刻的图像亮度分布与正向电导矩阵相乘,并将下一时刻的图像亮度分布与负向电导矩阵相乘,最终将所有结果整合并输出结果,从而实现运动物体识别.与传统动态探测技术相比,该方法可以极大程度地降低周围环境的影响,并减少冗余数据传输<sup>[113]</sup>.

## 5 总结与展望

本综述主要从光电忆阻材料与机制,器件与特性及感存算一体化应用 3 个方面回顾了近期光电忆阻器件领域内的重要进展.其中常见的光电忆阻材料主要包括氧化物、碳基材料、有机材料、有机-无机杂化钙钛矿、二维材料等.而相关的光电忆阻机制主要分为光子-离子耦合型和光子-电子耦合型

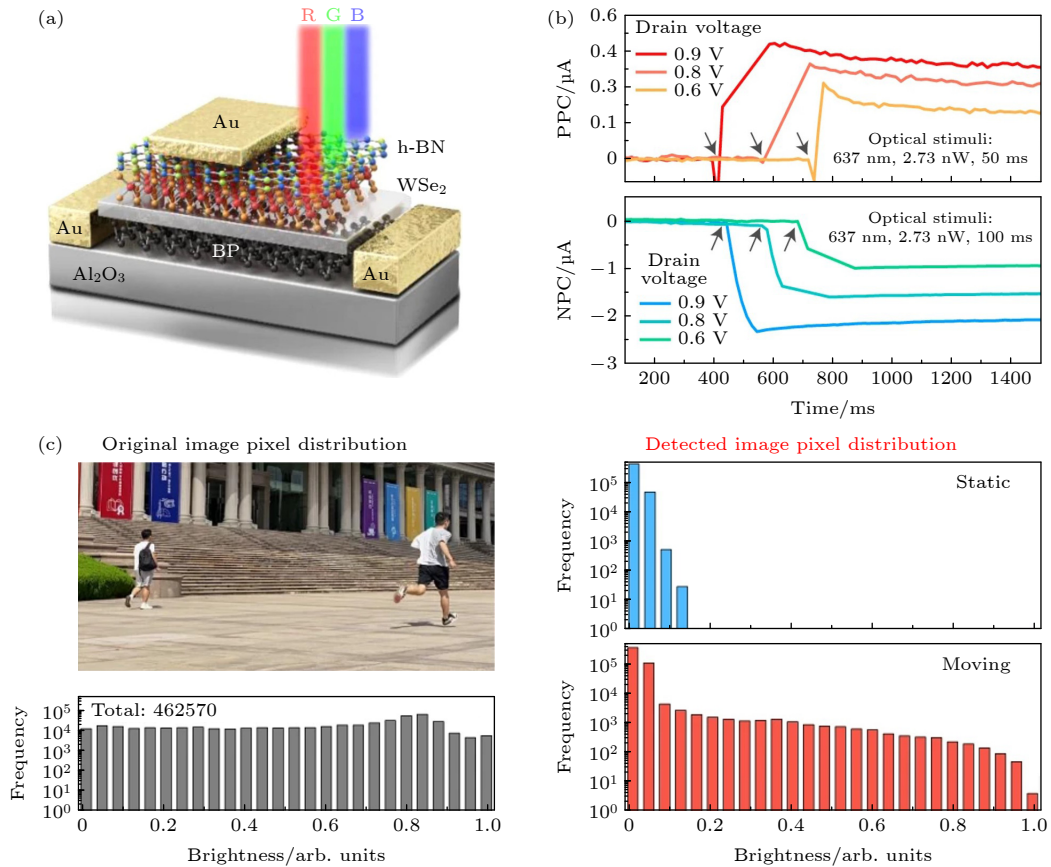


图 14 (a) 多功能视网膜形态器件结构示意图; (b) 不同电压信号调节下的电流响应; (c) 基于二维神经形态器件的动态探测示意图<sup>[113]</sup>

Fig. 14. (a) All-in-one retinomorphic device; (b) current response under various drain voltage modulation; (c) motion detection based on 2 D retinomorphic device<sup>[113]</sup>.



两个类别. 得益于数据传输速度快、低功耗高能效等优点, 光电忆阻器被认为是构建多功能神经形态计算系统的理想硬件选择. 其中光电多维度调制手段可以大幅度提升光电忆阻器在突触功能模拟方面的可控性, 并实现更高的时空分辨率. 此外基于光电忆阻器的感存算一体化架构可以显著提升整体算力, 从而构建更高效的计算系统.

尽管近期光电忆阻器取得了诸多重要进展, 但目前仍然面临着一些重要的挑战. 1) 材料层面. 常见的光电材料由于固有带隙限制, 通常只对特定波长范围的光信号有响应. 这也促使我们重新思考如何借助材料复合、能带结构设计等方法来实现全光谱响应, 构筑具有高量子效率的光电忆阻器. 目前通过对硅纳米晶材料进行硼元素掺杂, 可以将器件的响应范围拓展为紫外至近红外波段<sup>[54]</sup>; 将石墨烯和碳纳米管材料混合构建新型光刺激突触器件, 其对可见光和紫外光范围的信号都有较好响应<sup>[114]</sup>. 从材料设计角度出发可以从根本上优化器件性能, 提升响应速度的同时降低相关功耗. 此外现有的光电/全光调制型忆阻材料的运行机制仍然不是十分明确, 需要进一步探究. 2) 在器件制备和工艺方面. 目前光电忆阻材料的主要制备方法包括化学气相沉积, 物理气相沉积 (真空蒸镀, 溅射镀膜, 分子束外延等), 溶液法, 机械剥离法等. 加工大面积高质量光电忆阻材料薄膜是制备高集成度器件阵列的关键. 其中机制剥离转移方法可以有效解决异质结晶格失配问题, 但在材料大规模制备方面仍存在一些不足; 低温溶液法可以避免高温对器件性能的影响, 但材料缺陷难以控制. 现阶段许多光电忆阻研究只是基于小规模分立器件单元的简单串联, 没有发挥出集感存算于一体的光电集成优势. 针对集成工艺而言, 需要考虑材料生产、器件制备和阵列集成等各层级的工艺兼容性, 这给半导体集成电路工艺可靠性带来了挑战. 3) 光电集成系统架构方面. 针对不同的应用场景, 需要在光的强度、波长、相位和偏振态等参数的调制下, 实现集光电感知、计算和存储于一体的集成系统, 配合相关的算法程序完成更高阶的数据信息任务. 目前已有研究组基于  $\text{WSe}_2/\text{ReSe}_2$  异质结构建线偏振敏感的光电器件以及利用  $\text{ReS}_2$  材料构建偏振感知神经形态晶体管<sup>[115,116]</sup>. 此外, 利用现有的高速光、电通信技术将各功能单元进行智能互联, 基于多体协同配合可以构建更智能的光电集成系统.

目前感存算一体化架构的发展仍然处于发展初期, 有很多分支领域需要进一步探索. 尽管如此光电忆阻器作为感存算一体化系统的重要组成部分, 已经在逻辑运算、类脑功能模拟等多个方面展现出良好的应用前景. 相信随着工艺技术的不断进步, 相关问题会逐步得到解决, 届时光电忆阻器件必定会取得更大突破.

## 参考文献

- [1] Hasegawa T, Terabe K, Tsuruoka T, Aono M 2012 *Adv. Mater.* **24** 252
- [2] Lee J, Lu W D 2018 *Adv. Mater.* **30** 1702770
- [3] Cheng Z G, Rios C, Pernice W H P, Wright C D, Bhaskaran H 2017 *Sci. Adv.* **3** e1700160
- [4] Xu W T, Cho H, Kim Y H, Kim Y T, Wolf C, Park C G, Lee T W 2016 *Adv. Mater.* **28** 5916
- [5] Gholipour B, Bastock P, Craig C, Khan K, Hewak D, Soci C 2015 *Adv. Optical Mater.* **3** 635
- [6] Mao J Y, Zhou L, Zhu X, Zhou Y, Han S T 2019 *Adv. Optical Mater.* **7** 1900766
- [7] Chua L 1971 *IEEE Trans. Circuit Theory* **18** 507
- [8] Wang Z, Zeng T, Ren Y, Lin Y, Xu H, Zhao X, Liu Y, Ielmini D 2020 *Nat. Commun.* **11** 1510
- [9] Jo S, Chang T, Ebong I, Bhadviya B B, Mazumder P, Lu W 2010 *Nano Lett.* **10** 1297
- [10] Sun L F, Wang Z R, Jiang J, Kim Y, Joo B, Zheng S, Lee S, Yu W J, Kong B S, Yang H 2021 *Sci. Adv.* **7** eabg1455
- [11] Lin Y, Zhang X, Shan X, Zeng T, Zhao X, Wang Z, Kang Z, Xu H, Liu Y 2020 *J. Mater. Chem. C* **8** 14789
- [12] Kim S J, Kim S B, Jang H W 2021 *Iscience* **24** 101889
- [13] Milo V, Malavena G, Monzio Compagnoni C, Ielmini D 2020 *Material* **13** 166
- [14] Tan H, Liu G, Yang H, Yi X, Pan L, Shang J, Long S, Liu M, Wu Y, Li R 2017 *ACS Nano* **11** 11298
- [15] Gao S, Liu G, Yang H L, Hu C, Chen Q, Gong G, Xue W, Yi X, Shang J, Li R 2019 *ACS Nano* **13** 2634
- [16] Zhao X, Wang Z, Xie Y, Xu H, Zhu J, Zhang X, Liu W, Yang G, Ma J, Liu Y 2018 *Small* **14** 1801325
- [17] Jaafar A H, Gray R J, Verrelli E, O'Neill M, Kelly S M, Kemp N T 2017 *Nanoscale* **9** 17091
- [18] Zhao X, Wang Z, Li W, Sun S, Xu H, Zhou P, Xu J, Lin Y, Liu Y 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 1910151
- [19] Ahmed T, Tahir M, Low M X, Ren Y, Tawfik S, Mayes E, Kuriakose S, Nawaz S, Spencer S, Chen H, Bhaskaran M, Sriram S, Walia S 2021 *Adv. Mater.* **33** 2004207
- [20] Wang Z, Xu H, Li X, Yu H, Liu Y, Zhu X 2012 *Adv. Funct. Mater.* **22** 2759
- [21] Mu B, Guo L, Liao J, Xie P, Ding G, Lv Z, Zhou Y, Han S, Yan Y 2021 *Small* **17** 2103837
- [22] Ohno T, Hasegawa T, Tsuruoka T, Terabe K, Gimzewski J K, Aono M 2011 *Nat. Mater.* **10** 591
- [23] Wan C, Zhu L, Liu Y, Feng P, Liu Z, Cao H, Xiao P, Shi Y, Wan Q 2016 *Adv. Mater.* **28** 3557
- [24] Zidan M A, Strachan J P, Lu W D 2018 *Nat. Electron.* **1** 22
- [25] Hu D, Yang R, Jiang L, Guo X 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 6463
- [26] Chen S, Lou Z, Chen D, Shen G 2018 *Adv. Mater.* **30** 1705400

- [27] Sun F, Lu Q, Feng S, Zhang T 2021 *ACS Nano* **15** 3875
- [28] Ji X, Zhao X, Tan M C, Zhao R 2020 *Adv. Intell. Syst.* **2** 1900118
- [29] Carrara S 2021 *IEEE Sens. J* **21** 12370
- [30] Zhou F, Zhou Z, Chen J, Choy T, Wang J, Zhang N, Lin Z, Yu S, Kang J, Wong H, Chai Y 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 776
- [31] Zhou Z, Pei Y, Zhao J, Fu G, Yan X 2021 *Appl. Phys. Lett.* **118** 191103
- [32] Ling H, Tan K, Fang Q, Xu X, Chen H, Li W, Liu Y, Wang L, Yi M, Huang R, Qian Y, Xie L, Huang W 2017 *Adv. Electron. Mater.* **3** 1600416
- [33] Wang S, Fan W, Liu Z, Yu A, Jiang X 2018 *J. Mater. Chem. C* **6** 191
- [34] Tsuruoka T, Terabe K, Hasegawa T, Valov I, Waser R, Aono M 2012 *Adv. Funct. Mater.* **22** 70
- [35] Deb S, Chopoorian J 1966 *J. Appl. Phys.* **37** 4818
- [36] Natansohn A, Rochon P 2002 *Chem. Rev.* **102** 4139
- [37] Tsai H, Asadpour R, Blancon J, Stoumpos C, Durand O, Strzalka J, Chen B, Verduzco R, Ajayan P, Tretiak S, Even J, Alam M, Kanatzidis M, Nie W, Mohite A 2018 *Science* **360** 67
- [38] Liu Y, Ievlev A V, Collins L, Borodinov N, Belianinov A, Keum J K, Wang M, Ahmadi M, Jesse S, Xiao K, Sumpter B G, Hu B, Kalinin S V, Ovchinnikova O S 2019 *Adv. Opt. Mater.* **7** 1901451
- [39] Hossain A, Bandyopadhyay P, Karmakar A, Ullah A, Manavalan R, Sakthipandi K, Alhokbany K, Alshehri S, Ahmed J 2021 *Ceram. Int.* **48** 7325
- [40] Walsh A, Stranks S D 2018 *ACS Energy Lett.* **3** 1983
- [41] Guan X, Hu W, Haque Md A, Wei N, Liu Z, Chen A, Wu T 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1704665
- [42] Yang J M, Kim S G, Seo J Y, Cuhadar C, Son D Y, Lee D, Park N G 2018 *Adv. Electron. Mater.* **4** 1800190
- [43] Yang K, Li F, Veeramalai C P, Guo T 2017 *Appl. Phys. Lett.* **110** 083102
- [44] Zhao X, Xu H, Wang Z, Lin Y, Liu Y 2019 *InfoMat* **1** 183
- [45] Ahmadi M, Wu T, Hu B 2017 *Adv. Mater.* **29** 1605242
- [46] Hu J, Yan L, You W 2018 *Adv. Mater.* **30** 1802041
- [47] Choi J, Han J S, Hong K, Kim S Y, Jang H W 2018 *Adv. Mater.* **30** 1870317
- [48] Manjappa M, Srivastava Y K, Solanki A, Kumar A, Sum T C, Singh R 2017 *Adv. Mater.* **29** 1605881
- [49] Zhu X, Lu W D 2018 *ACS Nano* **12** 1242
- [50] Zhu X, Lee J, Lu W D 2017 *Adv. Mater.* **29** 1700527
- [51] Ham S, Choi S, Cho H, Na S, Wang G 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1806646
- [52] Skorodumova N, Simak S, Lundqvist B, Abrikosov I, Johansson B 2002 *Phys. Rev. Lett.* **89** 166601
- [53] Pan Z, Peng W, Li F, He Y 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1706897
- [54] Tan H, Ni Z, Peng W, Du S, Liu X, Zhao S, Li W, Ye Z, Xu M, Xu Y, Pi X, Yang D 2018 *Nano Energy* **52** 422
- [55] Ma F, Zhu Y, Xu Z, Liu Y, Zheng X, Ju S, Li Q, Ni Z, Hu H, Chai Y, Wu C, Kim T W, Li F 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 1908901
- [56] He H, Yang R, Zhou W, Huang H-M, Xiong J, Gan L, Zhai T, Guo X 2018 *Small* **14** 1800079
- [57] Yang J, Pickett M, Li X, Ohlberg D, Stewart D, Williams R 2008 *Nat. Nanotechnol.* **3** 429
- [58] You T, Du N, Slesazeck S, Mikolajick T, Li G, Burger D, Skorupa I, Stocker H, Abendroth B, Beyer A, Volz K, Schmidt O, Schmidt H 2014 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **6** 19758
- [59] Zhai Y, Yang X, Wang F, Li Z, Ding G, Qiu Z, Wang Y, Zhou Y, Han S T 2018 *Adv. Mater.* **30** 1803563
- [60] Yang R, Huang H, Hong Q, Yin X, Tan Z, Shi T, Zhou Y, Miao X, Wang X, Mi S 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1704455
- [61] Tan H, Liu G, Zhu X, Yang H, Chen B, Chen X, Shang J, Lu W D, Wu Y, Li R 2015 *Adv. Mater.* **27** 2797
- [62] Zhou S, Ni Z, Ding Y, Sugaya M, Pi X, Nozaki T 2016 *ACS Photonics* **3** 415
- [63] Ni Z, Ma L, Du S, Xu Y, Yuan M, Fang H, Wang Z, Xu M, Li D, Yang J, Hu W, Pi X, Yang D 2017 *ACS Nano* **11** 9854
- [64] Ni Z, Pi X, Zhou S, Nozaki T, Grandidier B, Yang D 2016 *Adv. Opt. Mater.* **4** 700
- [65] Ge R, Wu X, Kim M, Shi J, Sonde S, Tao L, Zhang Y, Lee J, Akinwande D 2018 *Nano Lett.* **18** 434
- [66] Zhou Y, Liu D, Wang J, Cheng Z, Liu L, Yang N, Liu Y, Xia T, Liu X, Zhang X, Ye C, Xu Z, Xiong W, Chu P, Yu X 2020 *ACS Appl. Mater. Interface* **12** 25108
- [67] Xiang D, Liu T, Xu J, Tan J, Hu Z, Lei B, Zheng Y, Wu J, Neto A, Liu L, Chen W 2018 *Nat. Commun.* **9** 2966
- [68] Tran M D, Kim H, Kim J S, Doan M H, Chau T K, Vu Q A, Kim J H, Lee Y H 2019 *Adv. Mater.* **31** 807075
- [69] Pei F, Yan L, Wu Z, Lu J, Zhao J, Chen J, Liu Q, Yan X 2021 *ACS Nano* **15** 17319
- [70] Wang Q S, Wen Y, Cai K M, Cheng R Q, Yin L, Zhang Y, Li J, Wang Z X, Wang F, Wang F M, Shifa T A, Jiang C, Yang H, He J 2018 *Sci. Adv.* **4** eaap7916
- [71] Lee J, Pak S, Lee Y W, Cho Y, Hong J, Giraud P, Shin H S, Morris S M, Sohn J I, Cha S, Kim J M 2017 *Nat. Commun.* **8** 14734
- [72] Miller D A B 2009 *Proc. IEEE* **97** 1166
- [73] Lin Y, Wang Z, Zhang X, Zeng T, Bai L, Kang Z, Wang C, Zhao X, Xu H, Liu Y. 2020 *NPG Asia Mater.* **12** 1
- [74] Hu L X, Yang J, Wang J R, Cheng P H, O. Chua L, Zhuge F 2020 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2005582
- [75] Ahmed T, Balendhran S, Karim M N, Mayes E L H, Field M R, Ramanathan R, Singh M, Bansal V, Sriram S, Bhaskaran M, Walia S 2017 *NPJ 2 D Mater. Appl.* **1** 18
- [76] Walia S, Sabri Y, Ahmed T, Field M R, Ramanathan R, Arash A, Bhargava S K, Sriram S, Bhaskaran M, Bansal V, Balendhran S 2017 *2 D Mater.* **4** 015025
- [77] Favron A, Gaufres E, Fossard F, Phaneuf-L'Heureux A L, Tang N Y W, Levesque P L, Loiseau A, Leonelli R, Francoeur S, Martel R 2015 *Nat. Mater.* **14** 826
- [78] Kuriakose S, Ahmed T, Balendhran S, Bansal V, Sriram S, Bhaskaran M, Walia S 2018 *2D Mater.* **5** 032001
- [79] Utt K L, Rivero P, Mehoudi M, Harriss E O, Borunda M F, SanJuan A A P, Barraza-Lopez S. 2015 *ACS Cent. Sci.* **1** 320
- [80] Wood J D, Wells S A, Jariwala D, Chen K S, Cho E, Sangwan V K, Liu X, Lauhon L J, Marks T. J, Hersam M C 2014 *Nano Lett.* **14** 6964
- [81] Ahmed T, Kuriakose S, Abbas S, Spencer M J S, Rahman M A, Tahir M, Lu Y R, Sonar P, Bansal V, Bhaskaran M, Sriram S, Walia S 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1901991
- [82] Shan X Y, Zhao C Y, Wang X N, Wang Z Q, Lin Y, Zeng T, Zhao X N, Xu H Y, Zhang X T, Liu Y C 2021 *Adv. Sci.* **8** 2104632
- [83] Colton R J, Guzman A M, Rabalais J W 1978 *ACC Chem. Res.* **11** 170
- [84] Zhu Y, Wu C, Xu Z, Liu Y, Hu H, Guo T, Kim T, Chai Y, Li F 2021 *Nano Lett.* **21** 14
- [85] Shan X, Wang Z, Lin Y, Zeng T, Zhao X, Xu H, Liu Y 2020

- Adv. Electron. Mater.* **6** 2000536
- [86] Wang W, Gao S, Li Y, Yue W, Kan H, Zhang C, Lou Z, Wang L, Shen G **2021** *Adv. Funct. Mater.* **31** 2101201
- [87] Yang L, Singh M, Shen S, Chih K, Liu S, Wu C, Chu C, Lin H **2020** *Adv. Funct. Mater.* **31** 2008259
- [88] Faselow M, Poulos A A **2005** *Rev. Psychol.* **56** 207
- [89] Liu L, Cheng Z Q, Jiang B, Liu Y X, Zhang Y L, Yang F, Wang J H, Yu X F, Chu P K, Ye C **2021** *ACS Appl. Mater. Interfaces* **13** 30797
- [90] Li Y, Long S, Liu Q, Lv H, Liu M **2017** *Small* **13** 1604306
- [91] Zhang K, Meng D, Bai F, Zhai J, Wang Z L **2020** *Adv. Funct. Mater.* **30** 2002945
- [92] Li Y, Zhong Y P, Deng Y F, Zhou Y X, Xu L, Miao X S **2013** *J. Appl. Phys.* **114** 234503
- [93] Nguyen D A, Jo Y, Tran T U, Jeong M S, Kim H, Im H **2021** *Small Methods* **5** 2101303
- [94] Shepherd R K, Shivdasani M N, Nayagam D A, Williams C E, Blamey P J **2013** *Trends Biotechnol.* **31** 562
- [95] Kolb H **2003** *Am. Sci.* **91** 28
- [96] Brady T F, Konkle T, Alvarez G A, Oliva A **2008** *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **105** 14325
- [97] Wang G, Wang R, Kong W and Zhang J **2018** *Analysis. Cogn. Neurodyn.* **12** 615
- [98] Zhou F, Chen J, Tao X, Wang, X and Chai Y **2019** *Research* **2019** 9490413
- [99] Radovic A, Williams M, Rousseau D, Kagan M, Bonacorsi D, Himmel A, Aurisano A, Terao K, Wongjirad T **2018** *Nature* **560** 41
- [100] Sze V, Then Y, Emer J, Suleiman A, Zhang Z **2017** *IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC)* **1**
- [101] Xiang D, Liu T, Xu J, Tan J, Hu Z, Lei B, Zheng Y, Wu J, Neto A, Liu L, Chen W **2018** *Nat. Commun.* **9** 1
- [102] Choi C, Leem J, Kim M S, Taqieddin A, Cho C, Cho K W, Lee G J, Seung H, Bae H J, Song Y M, Hyeon T, Aluru N R, Nam S W, Kim D H **2020** *Nat. Commun.* **11** 1
- [103] McCollough C **1965** *Science* **149** 1115
- [104] Huang X, Li Q Y, Shi W, Liu K, Zhang Y P, Liu Y W, Wei X F, Zhao Z Y, Guo Y L, Liu Y Q **2021** *Small* **17** 2102820
- [105] Yuan J, Zhang Y, Zhou L, Zhang G, Yip H L, Lau T K, Lu X, Zhu C, Peng H, Johnson P A, Leclerc M, Cao Y, Ulanski J, Li Y, Zou Y **2019** *Joule* **3** 1140
- [106] Seo S, Jo S H, Kim S, Shim J, Oh S, Kim J H, Heo K, Choi J W, Choi C, Oh S, Kuzum D, Wong H P, Park J H **2018** *Nat. Commun.* **9** 5106
- [107] Wang S, Wang C Y, Wang P F, Wang C, Li Z A, Pan C, Dai Y T, Gao A Y, Liu C, Liu J, Yang H F, Liu X W, Cheng B, Chen K J, Wang Z L, Watanabe K J, Taniguchi T, Liang S J, Miao F **2020** *Natl. Sci. Rev.* **7** 1
- [108] Euler T, Haverkamp S and Schubert T **2014** *Nat. Rev. Neurosci.* **15** 507
- [109] van Hateren J H, Lamb T D **2006** *Neuroscience* **7** 34
- [110] Wang Z, Li C, Lin P, Rao M Y, Nie Y Y, Song W H, Qiu Q R, Li Y N, Yan P, Strachan J P, Ge N, McDonald N, Wu Q, Hu M, Wu H Q, Williams R S, Xia Q F, Yang J J **2019** *Nat. Mach. Intell.* **1** 434
- [111] Moon J, Ma W, Shin J H, Cai F X, Du C, Lee S H, Lu W D **2019** *Nat. Electron.* **2** 480
- [112] Du C, Cai F, Zidan M A, Ma W, Lee S H, Lu W D **2017** *Nat. Commun.* **8** 2204
- [113] Zhang Z H, Wang S Y, Liu C S, Xie R Z, Hu W D, Zhou P **2021** *Nat. Nanotechnol.* **17** 27
- [114] Qin S, Wang F, Liu Y, Wan Q, Wang X, Xu Y, Shi Y, Wang X, Zhang R **2017** *2D Mater.* **4** 035022
- [115] Ahn J, Ko K, Kyhm J H, Ra H S, Bae H, Hong S, Kim D Y, Jang J S, Kim T W, Choi S, Kang J H, Kwon N, Park S, Ju B K, Poon T C, Park M C, Im S, Hwang D K **2021** *ACS nano* **15** 17917
- [116] Xie D D, Yin K, Yang Z J, Huang H, Li X H, Shu Z W, Duan H G, He J, Jiang J **2022** *Materials Horizons*, **9** 1448-1459



SPECIAL TOPIC—Physical electronics for brain-inspired computing

# Recent progress in optoelectronic memristive devices for in-sensor computing<sup>\*</sup>

Shan Xuan-Yu<sup>1)</sup> Wang Zhong-Qiang<sup>1)2)†</sup> Xie Jun<sup>1)</sup> Zheng Jia-Hui<sup>1)</sup>  
Xu Hai-Yang<sup>1)2)</sup> Liu Yi-Chun<sup>1)2)</sup>

<sup>1)</sup> (*Key Laboratory of UV-Emitting Materials and Technology of Ministry of Education, Northeast Normal University, Changchun 130024, China*)

<sup>2)</sup> (*National Demonstration Center for Experimental Physics Education, Northeast Normal University, Changchun 130024, China*)

( Received 28 February 2022; revised manuscript received 28 March 2022 )

## Abstract

Neuromorphic computing system, inspired by human brain, has the capability of breaking through the bottlenecks of conventional von Neumann architecture, which can improve the energy efficiency of data processing. Novel neuromorphic electronic components are the hardware foundation of efficient neuromorphic computation. Optoelectronic memristive device integrates the functions of sensing, memorizing and computing and is considered as a promising hardware candidate for neuromorphic vision. Herein, the recent research progress of optoelectronic memristive device for in-sensor computing are reviewed, including optoelectronic materials and mechanism, optoelectronic memristive device/characteristics as well as functionality and application of in-sensor computing. We first review the optoelectronic materials and corresponding memristive mechanism, including photon-ion coupling and photon-electron coupling type. Then optoelectronic and all-optical modulated memristive device are introduced according to the modulation mode. Moreover, we exhibit the applications of optoelectronic device in cognitive function simulation, optoelectronic logic operation, neuromorphic vision, object tracking, etc. Finally, we summarize the advantages/challenges of optoelectronic memristor and prospect the future development.

**Keywords:** in-sensor computing, optoelectronic memristor, neuromorphic computing

**PACS:** 87.18.Sn, 73.40.Rw, 85.25.Hv, 85.60.-q

**DOI:** 10.7498/aps.71.20220350

<sup>\*</sup> Project supported by the fund from the Ministry of Science and Technology of China (Grant No. 2018YFE0118300) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11974072, U19A2091).

<sup>†</sup> Corresponding author. E-mail: wangzq752@nenu.edu.cn