



光电神经形态器件及其应用

沈柳枫 胡令祥 康逢文 叶羽敏 诸葛飞

Optoelectronic neuromorphic devices and their applications

Shen Liu-Feng Hu Ling-Xiang Kang Feng-Wen Ye Yu-Min Zhuge Fei

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 148505 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220111

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220111>

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>

氧化物基忆阻型神经突触器件

Oxide-based memristive neuromorphic synaptic devices

物理学报. 2019, 68(16): 168504 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191262>

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>

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>

混合时钟驱动的自旋神经元器件激活特性和计算性能

Activation function and computing performance of spin neuron driven by magnetic field and strain

物理学报. 2021, 70(20): 207502 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210611>

专题: 面向类脑计算的物理电子学

光电神经形态器件及其应用*

沈柳枫¹⁾²⁾ 胡令祥²⁾ 康逢文²⁾ 叶羽敏¹⁾ 诸葛飞^{2)3)†}

1) (宁波大学材料科学与化学工程学院, 宁波 315211)

2) (中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 宁波 315201)

3) (中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心, 上海 200031)

(2022年1月16日收到; 2022年2月22日收到修改稿)

传统冯·诺依曼计算机在并行性计算和自适应学习方面效率较低, 无法满足当前飞速发展的信息技术对高效、高速计算的迫切需求. 受脑启发的神经形态计算具有高度并行性、超低功耗等优势, 被认为是打破传统计算机局限性, 实现新一代人工智能的理想途径. 神经形态器件是实施神经形态计算的硬件载体, 是构建神经形态芯片的关键. 与此同时, 人类视觉系统与光遗传学的发展为神经形态器件的研究提供了新的思路. 新兴的光电神经形态器件结合了光子学与电子学各自的优势, 在神经形态计算领域展露出巨大潜力, 受到了国内外研究人员广泛关注. 本文对光电神经形态器件及其应用的最新研究进行了总结. 首先综述了人工光电突触与人工光电神经元, 内容包括器件结构、工作机制以及神经形态功能模拟等方面. 然后, 对光电神经形态器件在人工视觉系统、人工感知系统、神经形态计算等领域中的潜在应用作了阐述. 最后, 总结了当前光电神经形态器件所面临的挑战, 并对其未来的发展方向进行了展望.

关键词: 光电神经形态器件, 光电突触, 光电神经元, 神经形态计算**PACS:** 85.60.-q, 72.40.+w, 85.35.-p, 87.18.Sn**DOI:** 10.7498/aps.71.20220111

1 引言

自从1936年图灵提出图灵机计算模型概念以来^[1], 计算机经历了突飞猛进的发展. 然而, 现有计算机主要是基于传统冯·诺依曼架构, 受制于处理单元与内存单元的物理分离, 存在有限的数据传输效率、高能耗等问题, 无法满足智能化时代迫切的高算力需求^[2,3]. 相比之下, 人脑是一个具有超低功耗且高效的生物计算系统. 凭借事件驱动的运行模式和高度的并行性计算, 人脑在执行认知、学习与决策等复杂任务方面远远优于现代计算机^[4-6]. 因此, 受人脑启发的神经形态(类脑)计算被认为是实现高效人工智能最有效的途径之一, 受到越来越

广泛的关注^[7,8]. 相比传统架构计算系统, 神经形态系统从物理层面模仿人脑神经结构与运行模式, 具有高度的并行性与高效的计算能力, 无需额外的内存单元用于存储和检索数据, 以实现存算一体化.

神经形态系统主要是由人工突触与人工神经元组成. 自从20世纪80年代加州理工学院Mead^[9]提出“神经形态”概念以来, 神经形态硬件系统在过去几十年得到了深入研究. 其中, 基于互补金属氧化物半导体(complementary metal oxide semiconductor, CMOS)技术构造的人工神经元与人工突触电路取得了重要进展, 诸多性能优异的神经形态芯片相继被报道. 例如, IBM在2014年推出的TrueNorth芯片内置了100万个人工神经元与2.56亿个人工突触, 使用了54亿个晶体管, 能够以较低

* 国家自然科学基金(批准号: U20A20209, 61874125)、中国科学院战略性先导专项(批准号: XDB32050204)、浙江省自然科学基金(批准号: LD19E020001, LQ22F040003)和宁波市自然科学基金(批准号: 2021J139)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhugefei@nimte.ac.cn

功耗实现高速运算^[10]. 2015年浙江大学推出了由30万个晶体管构成的达尔文芯片,其可以模拟2048个神经元与400万个神经突触^[11].然而,作为神经形态计算的关键,芯片中单个神经元与突触功能的实现往往依赖于由电容及多个晶体管器件组成的电路模块,导致电路结构复杂化,增大了系统能耗,极大限制了芯片的集成规模与密度.因此,基于传统CMOS电路开发的神经形态芯片并不是未来实现类脑计算最有效的方案.

近年来,随着新型存储技术的深入研究,多种新型存储器件被相继开发,包括忆阻器、Flash晶体管、相变存储器、磁存储器、铁电存储器等.这些具备记忆存储功能器件的发展使得利用单个器件实现神经元与突触功能成为可能(注:上述能够模拟神经元或突触功能的器件被称为神经形态器件^[12]).目前,神经形态器件大多采用电信号驱动^[12-14].相比电信号,光具有超高速、宽带宽和低串扰等优势.光遗传学的研究表明利用光可以有效调控大脑行为^[15],也为构建光电神经形态系统奠定了生物学基础.因此,光电神经形态器件在实现超低功耗、超高速神经形态计算方面具有独特的优势,逐渐成为该领域的研究热点.例如,光电神经形态器件能耗可以低至飞焦量级^[16],显著低于传统电子学器件.维也纳工业大学Mueller团队^[17]报道了一种基于二维材料的神经形态器件,实现了超快的机器视觉技术,构建的人工神经网络能够以每秒2000万个二进制文件的处理速度对图像进行分类与编码.

人脑中有大约 10^{11} 个神经元和 10^{15} 个突触,神经元之间依靠突触进行连接和信号传递,以此形成复杂庞大的神经网络^[4-6].其中,神经元是神经系统传递信息的基本结构与功能单元,可以接收来自前神经元释放的信号并在胞体中进行整合.当整合的信号强度超过一定阈值,神经元的轴突末梢会释放神经递质,向后神经元发送电化学信号,以实现信息的处理与传递过程^[18].类似地,光电神经形态器件接收编码的光脉冲,进行光电转换,并对转换后的电信号进行整合,当累积的电信号超过器件转变阈值时,则会向下一个神经元发射信号,以此完成信号传递.光电神经形态器件通常需要同时具备光信号探测与神经元累积-发射功能.丰桥技术科学大学Yonezu等^[19]早在1989年报道了一种权重可调的光电神经元电路,实现了神经元间的光学互

联.此后,诸多研究工作相继报道了各种光电耦合的神经元电路^[20-22],推动了光电神经元的发展.不同于传统的光电神经元电路,光电神经形态器件能够在单个器件中实现光电转换与神经元的功能,显著降低了功耗与信号传输中延时的问题.例如,韩国科学技术院Choi团队^[23]报道了一种基于单个晶体管的光电神经元.另一方面,突触是实现神经元间或神经元与效应器间信号传递的基础.生物突触可以通过电化学的相互作用引起突触强度(权重)的改变,称为突触可塑性.突触可塑性是大脑实现信息编码、学习与记忆的基础^[24].因此,开发人工突触器件,实现突触可塑性模拟对构建神经形态芯片至关重要.目前人工突触器件主要是依靠纯电信号驱动,而光电突触器件主要是依赖于光信号或光电组合信号实施突触功能模拟^[25].突触的权重可以由器件电导或电阻来表示.Agnus等^[26]在2010年开发了一种基于碳纳米管的光电晶体管,模拟了生物突触功能,为人工光电突触器件的研究奠定了重要基础.此后,基于忆阻器^[27-30]、薄膜晶体管^[31-34]、相变存储器^[5,35]和铁电存储器^[36,37]等不同结构的器件相继被用于光电突触的模拟.

值得一提的是,人类从外界获取的信息超过70%来自视觉系统^[38],感光功能在生物感知系统中具有举足轻重的地位.光电神经形态器件兼具感光和信号处理功能,对于构建人工视觉系统具有广阔的应用前景.因此,光电神经形态器件在过去几年中受到了国内外研究人员越来越多的关注,并取得了系列重要的研究进展.

本文对光电神经形态器件的研究进展进行了梳理与总结.主要内容如图1所示,包括:1)生物神经元与生物突触的工作机制;2)光电突触器件研究进展;3)光电神经形态器件研究进展;4)光电神经形态器件在人工视觉系统、人工感知系统和神经形态计算三方面的应用.基于这些内容,最后本文总结了当前光电神经形态器件所面临的挑战,并展望了其未来的前景和发展方向.

2 生物神经元与突触

如图2(a)所示,生物神经元通常由树突、胞体、轴突和轴突末梢组成.其中,树突是生长于胞体上的树状突起,负责接收其他神经元的刺激信号并传递至胞体;胞体是神经元细胞的代谢中心,同

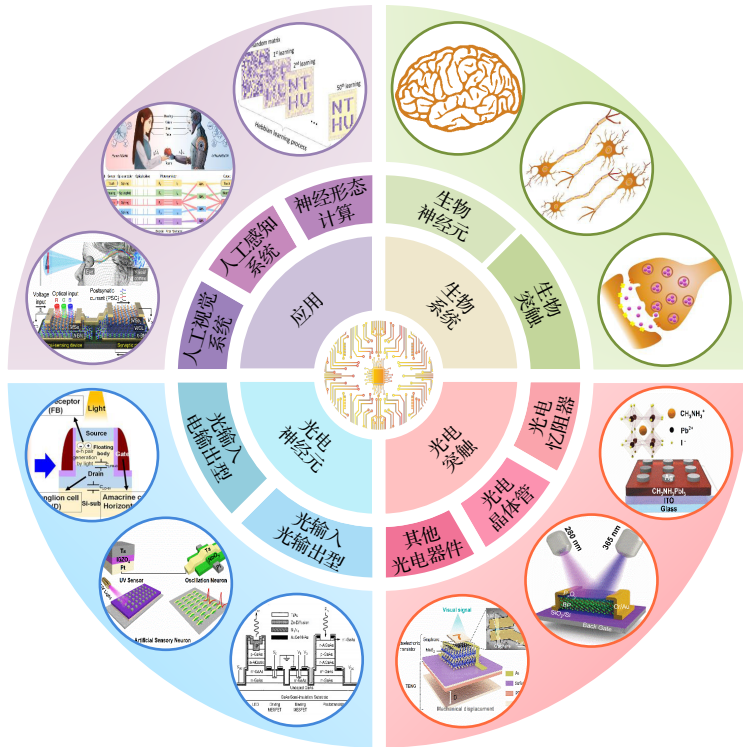


图 1 光电神经形态器件的研究进展概述 [16,23,29,33,39–43]

Fig. 1. Overview of advances in optoelectronic neuromorphic devices [16,23,29,33,39–43].

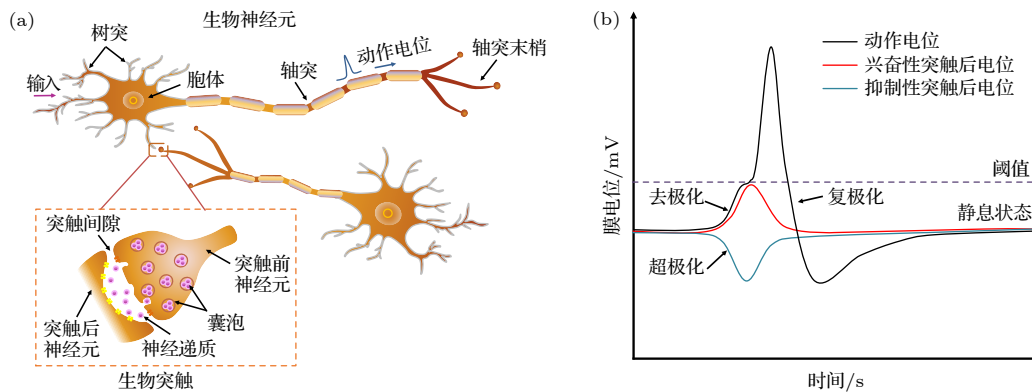


图 2 (a) 生物神经元和突触结构示意图; (b) 生物神经元随不同神经递质信号产生的膜电位变化, 其中, 黑线、红线和蓝线分别表示神经元动作电位、兴奋性突触后电位和抑制性突触后电位 [47]

Fig. 2. (a) Schematic illustration of the structure of biological neurons and synapses; (b) membrane potential of biological neurons with different neurotransmitter signals, where the black, red and blue curves denote the neuronal action potential, excitatory post-synaptic potential, and inhibitory post-synaptic potential respectively [47].

时可对传递来的刺激信号进行时空整合; 而轴突与轴突末梢是胞体中延展出来的管状纤维组织, 负责神经元信号的输出 [18]. 神经元先是通过树突接收前神经元释放的信号, 然后引起膜电位改变; 当累积的局部膜电位超过阈值时, 神经元细胞先会产生动作电位 (脉冲), 随后通过轴突将脉冲传递至下一个神经元, 最终完成神经元与神经元之间的信号传递 [44]. 突触是不同神经元之间彼此连接的关键

部位, 其结构如图 2(a) 中插图所示. 当突触前神经元的动作电位到达轴突末梢时, 位于突触前膜上由电位控制的钙离子 (Ca^{2+}) 通道则会打开, 从而诱导 Ca^{2+} 内流并导致前膜内 Ca^{2+} 浓度急剧增高, 进而使得含有神经递质的囊泡从轴突末梢脱离, 最终将神经递质释放至突触间隙 [45]. 根据所释放的神经递质作用机制不同, 突触可分为兴奋性突触和抑制性突触. 对于前者, 神经递质与突触后膜受体相

结合时, 位于后膜上特定的离子通道打开, 带正电的钠离子 (Na^+) 内流透过性显著提高, 由此降低突触后膜的膜电位, 进而产生局部的去极化, 最终引起兴奋性突触后电位. 与上述情形不同的是, 抑制性突触释放的神经递质可显著提高钾离子 (K^+) 的外流及氯离子 (Cl^-) 的内流, 由此提升突触后膜的膜电位, 从而产生超极化并引起抑制性突触后电位^[45,46]. 图 2(b) 所示的是生物神经元随不同神经递质信号产生的膜电位变化^[47]. 细胞膜在去极化后, K^+ 外流速率逐渐超过 Na^+ 的内流速率, 导致膜电位复极化, 恢复至静息状态^[18].

突触可塑性是人脑学习与记忆的基础, 对实现生物神经系统的高级功能具有重要作用^[24]. 突触可塑性可分为短时程可塑性 (short-term plasticity, STP) 与长时程可塑性 (long-term plasticity, LTP)^[14,48]. 其中, 短时程可塑性表现为在受到刺激后突触权重仅能保持数秒至数分钟的范围内, 随后会逐渐恢复至初始状态, 这是生物神经系统处理相关时空信息的关键功能^[49]. 突触权重变化包括暂时性增强与抑制, 称为短时程增强 (short-term potentiation, STP) 与短时程抑制 (short-term depression, STD)^[50]. 兴奋性突触后电流 (excitatory post-synaptic current, EPSC)、双脉冲易化 (paired-pulse facilitation, PPF) 与双脉冲抑制 (paired-pulse depression, PPD) 是反映突触短时程可塑性的重要功能. PPF 指的是对于 2 个连续的脉冲刺激, 突触对第 2 个刺激比对第 1 个刺激的反应增强的现象. PPD 则与之相反^[48]. 长时程可塑性表现为在受到刺激后突触权重能够保持数小时至数天不等, 其与生物学习与记忆功能密切相关. 长时程可塑性通常分为长时程增强 (long-term potentiation, LTP) 与长时程抑制 (long-term depression, LTD)^[51]. 基于长时程可塑性的脉冲时间依赖可塑性 (spike-timing-dependent plasticity, STDP) 规则与脉冲频率依赖可塑性 (spike-rate-dependent plasticity, SRDP) 规则在突触进行学习行为时起着重要作用^[46,52].

3 光电突触器件

模拟突触可塑性功能是实现神经形态计算的关键, 其中基于长时程可塑性 (LTP/LTD) 的突触权重可逆调控对构建人工神经网络至关重要^[53,54]. 然而目前报道的突触器件主要是利用电信号驱动,

面临功耗高、稳定性差等问题, 严重制约了神经形态计算的发展. 基于光信号驱动的光电突触器件在功耗、速度与稳定性方面具有很大的优势, 有望解决上述挑战. 近年来, 研究人员基于不同材料、器件结构以及调控模式研发出各种新型光电突触. 本部分将以光电突触器件的结构进行划分, 重点阐述器件各自优缺点, 并对其工作机制进行归纳总结.

3.1 光电忆阻器

忆阻器是除了电容、电感和电阻之外的第 4 种基本电路元件, 由加利福尼亚大学 Chua 教授^[55]于 1971 年首次提出. 忆阻器电阻状态可以通过流经介质层的电荷量来调控, 并具有独特的非线性电阻转变特性, 被广泛用于生物突触功能模拟. 目前报道的忆阻器通常是利用电信号调控器件电阻, 相比于经过几十年的发展并且已取得了巨大进步的电控忆阻器, 光电忆阻器的研究仍处于起步阶段. 基于器件电导调控模式的不同, 光电忆阻器可进一步划分为光电协同型和全光型.

3.1.1 光电协同型

3.1.1.1 光增强-电抑制

光电协同型忆阻器是指器件电导调控需通过光信号与电信号的共同作用才能实现. 华中科技大学 Guo 团队^[27]在 2018 年成功获得一种基于氧化物异质结的光电忆阻型突触器件. 研究人员利用溅射沉积的方法在 Al 衬底上生长 ZnO 薄膜, 由于 Al 会夺取 ZnO 中的氧, 两者界面处形成一层 AlO_y , 进而获得了 $\text{ZnO}_{1-x}/\text{AlO}_y$ 异质结, 如图 3(a) 所示. 该器件表现出缓变忆阻开关特性和持续光电导 (persistent photoconductivity, PPC) 特性, 并在光信号作用下模拟了多种突触的可塑性功能. PPC 现象是指器件在光信号移除之后出现的光电导长时间保持的现象. 通过进一步研究和分析, 该团队发现器件在 310 nm 紫外光照射下所产生的 PPC 效应源于光载流子在 $\text{ZnO}_{1-x}/\text{AlO}_y$ 界面处内建电场作用下的累积和捕获. 当紫外光照射时, 光生电子被激发至导带, 器件电导增加, 光生空穴在内建电场的作用下在 $\text{ZnO}_{1-x}/\text{AlO}_y$ 界面处不断累积并被 AlO_y 层所捕获. 当光照移除后, 被捕获的光生空穴难以在短时间内释放, 进而阻碍了与光生电子的复合, 使得器件电导可以长时间保持, 从而产生 PPC 效应. 上述过程非常类似于生物突触

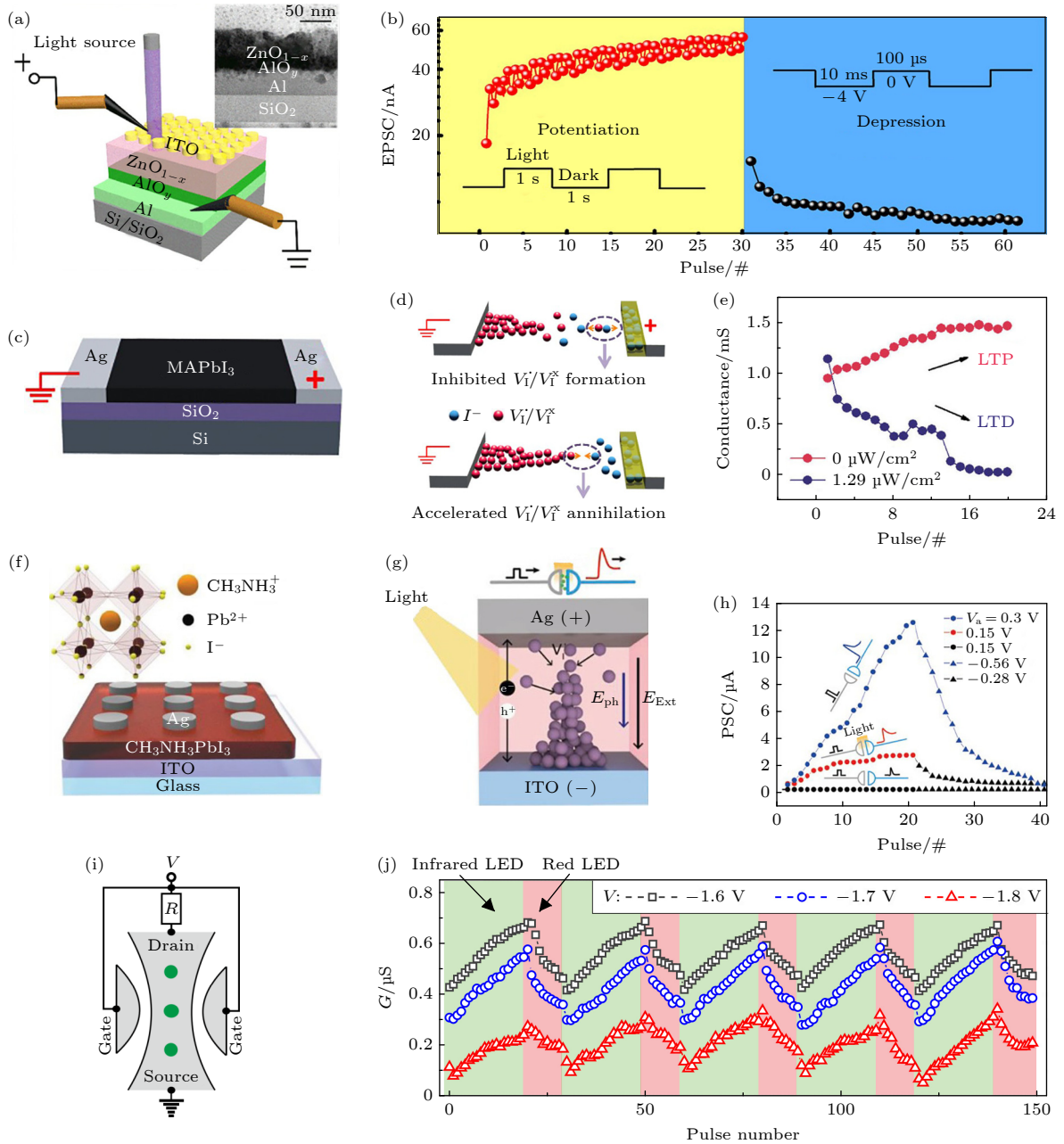


图 3 基于忆阻器实现的光电协同型突触器件 (a) 基于 ITO/ $\text{ZnO}_{1-x}/\text{AlO}_y/\text{Al}$ 的忆阻器件结构示意图, 插图为器件横截面的透射电子显微镜 (TEM) 图像^[27]; (b) EPSC 随刺激脉冲发生的光增强与电抑制过程^[27]; (c) 基于 MAPbI_3 的平面型忆阻器结构示意图; (d) 光照抑制碘空位形成和加速碘空位湮灭的过程^[28]; (e) 基于 MAPbI_3 的平面型忆阻器在黑暗与光照条件 (可见光, $1.29 \mu\text{W}/\text{cm}^2$) 下的 LTP 与 LTD 行为^[28]; (f) 基于 MAPbI_3 的垂直型忆阻器结构示意图^[29]; (g) 基于 MAPbI_3 的垂直型忆阻器在光照下内部工作机制示意图^[29]; (h) 基于 MAPbI_3 的垂直型忆阻器在光照与黑暗条件下的电增强与电抑制过程^[29]; (i) 基于 InAs 量子点的光电忆阻器结构示意图^[63]; (j) 基于 InAs 量子点的光电忆阻器电导在电压辅助下的光增强与光抑制过程^[63]

Fig. 3. Optoelectronic cooperative synaptic devices based on memristor: (a) Structural illustration of memristive device based on ITO/ $\text{ZnO}_{1-x}/\text{AlO}_y/\text{Al}$, and the corresponding transmission electron microscope (TEM) image^[27]; (b) photonic potentiation and electrical depression of stimulated pulses-dependent EPSC^[27]; (c) structural illustration of planar memristor based on MAPbI_3 ^[28]; (d) schematic illustration for illustrating how the light inhibits the formation (upper) and accelerates the annihilation (down) of iodine-related vacancies^[28]; (e) LTP and LTD behaviors of planar memristor based on MAPbI_3 under dark condition and upon illumination with a visible light at a power output of $1.29 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, respectively^[28]; (f) structural illustration of MAPbI_3 -based vertical memristor^[29]; (g) schematic illustration of the working mechanism of MAPbI_3 -based vertical memristor under light illumination^[29]; (h) dependence of electrical potentiation and depression of MAPbI_3 -based vertical memristor on electrical pulses under dark and light illumination conditions^[29]; (i) structural illustration of InAs quantum dots (QDs)-based optoelectronic memristor^[63]; (j) photonic potentiation and depression of the conductance of InAs QDs-based optoelectronic memristor with the assistance of voltage^[63].

的长时程可塑性, 因此常被用于该功能模拟. 图 3(b) 所示的是突触的光增强和电抑制过程. 在紫外光脉冲的照射下, 器件电导随时间持续增强, 对应突触 LTP 行为; 在施加电脉冲情况下, 器件电导随时间持续减小, 对应突触 LTD 行为. 除此之外, 在 $\text{In}_2\text{O}_3/\text{ZnO}$ ^[56], ZnO/WS_2 ^[57], $\text{TiN}_x\text{O}_{2-x}/\text{MoS}_2$ ^[58] 与 MAPbI_3 ^[59] 忆阻器中, 研究人员也相继利用器件的 PPC 效应模拟了突触长时程可塑性功能.

3.1.1.2 电增强-光抑制

密歇根大学 Lu 团队^[28] 在 2018 年基于 MAPbI_3 材料制备了一种横向结构的光电忆阻器, 并通过光照实现了器件电导降低 (即光抑制), 器件结构如图 3(c) 所示. 该团队认为, 通过增加 MAPbI_3 中碘空位 (V_I/V_I^x , 即带正电或中性的空位) 的形成能, 光照可抑制电场诱导碘空位的产生, 并促进碘空位的自发湮灭, 如图 3(d) 所示. 因此, 在光照作用下, 器件可以实现光抑制过程, 模拟 LTD 行为, 而 LTP 行为的模拟可通过电脉冲实现, 如图 3(e) 所示. 除此之外, 研究人员在基于 $\text{MoSe}_2/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 异质结^[60] 和 HfO_2 ^[61] 的光电忆阻器中也发现了类似的“电增强-光抑制”协同调控器件电导的特性, 并将其用于突触可塑性模拟.

3.1.1.3 光辅助-电调控

同样用 MAPbI_3 材料, 高丽大学 Wang 团队^[29] 在 2019 年制备了垂直结构光电忆阻器, 如图 3(f) 所示. 在该器件中, 光照对内部离子迁移的影响与图 3(c) 中平面结构忆阻器相反. 这是因为在对顶电极施加正偏压时, 光照所产生的光生电场 (E_{ph}) 与外部电场 (E_{Ext}) 具有相同的方向. 如图 3(g) 所示, 光生电场可以加速碘空位迁移. 图 3(h) 表明该器件在光照下施加 0.15 V 电压脉冲时, 器件电导连续增加. 然而, 在无光照下施加 -0.28 V 电压脉冲时, 器件电导则会逐渐降低. 由此可见, 与无光条件下电导增加和降低的过程相比, 施加光照可起到辅助降低器件编程电压的作用, 进而减少运行功耗. 另外, 基于黑磷纳米片制备的透明光电忆阻器可在光照下降低器件操作电压, 有利于实现器件的低功耗操作. 同时光照还可以降低器件电导态, 进而增大器件开关比. 由此可见, 光照是改善忆阻器性能的有效调控手段^[62].

3.1.1.4 电辅助-光调控

维尔茨堡大学 Hartmann 团队^[63] 在 2016 年报道了一种具有“电辅助-光调控”的光电忆阻器, 如

图 3(i) 所示. 该器件主要是基于 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 异质结和 InAs 量子点 (QDs) 制备, 其中 InAs 量子点生长在 $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 异质结固定位置的孔洞内. 该器件具有 4 个端口, 与传统两端忆阻器具有较大差异. 器件两侧增加了栅极, 并将栅极与器件漏极相连栅极和漏极用于施加电压, 源极接地. InAs 量子点的引入, 改变了异质结界面的能带结构. $\text{GaAs}/\text{AlGaAs}$ 异质结在光照下会产生电子-空穴对, 实现量子点在不用偏压作用下充电或放电, 从而器件在光照下表现出独特的光响应特性. 例如, 在 -1.8 V 的偏置电压辅助下, 器件可以在红外 LED 的光脉冲下实现电导的增加, 而在红光 LED 的光脉冲下实现电导的减小, 如图 3(j) 所示.

3.1.2 全光型

对于理想的光电忆阻器, 器件电导应该是全光可逆调控, 即电导的增加和降低均通过光信号实现. 然而, 光电协同型忆阻器在光信号作用下只能实现突触权重的单向调控, 要实现权值的可逆调控必须依赖额外的电信号刺激, 导致操作复杂, 功耗升高. 此外, 电信号刺激会引起器件微结构改变和焦耳热产生, 进而引起器件稳定性恶化. 然而, 受限于半导体材料自身所固有的光电效应, 通常情况下光信号只能增大器件的电导, 想要实现器件电导的全光可逆调控是国内外公认的挑战.

针对上述挑战, 中国科学院宁波材料技术与工程研究所 Zhuge 团队^[30] 在 2020 年采用制备工艺较为成熟的四元氧化物半导体材料铟镓锌氧 (InGaZnO , IGZO), 在国际上率先研发出全光控忆阻器, 并成功应用于突触功能模拟. 该忆阻器仅仅通过改变入射光信号的波长, 就可实现电导态的可逆调控, 并且调节后的电导态具有非易失性. 通过深入研究表明, 全光控忆阻器电导可逆调控机制源于光诱导双层氧化物界面势垒宽度的可逆变化. 当施加短波光时, 氧空位的电离作用占主导, 导致界面处电离氧空位浓度增大, 界面势垒变窄, 隧穿电流增大, 进而器件电导增大; 此后施加长波光, 氧空位的中和作用大于电离, 电离氧空位浓度减少, 界面势垒变宽, 隧穿电流减小, 进而器件电导降低. 该全光控忆阻器的工作模式如图 4(a) 所示, 在蓝光和近红外光脉冲下实现低电导态到高电导态 (光 SET 过程) 和高电导态到低电导态的可逆转变 (光 RESET 过程). 图 4(b) 中顶部图所示的是器件

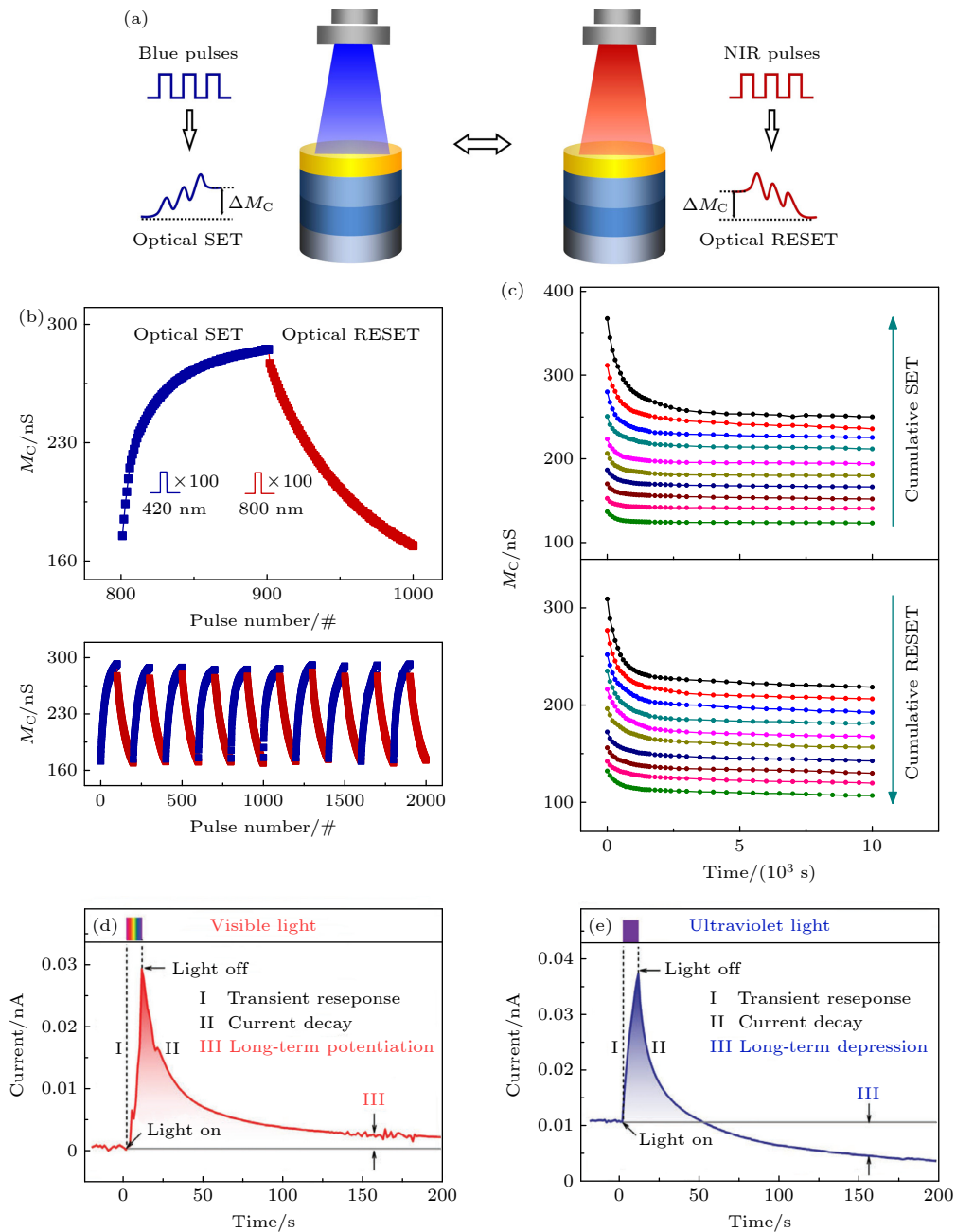


图 4 基于忆阻器实现的全光型突触器件 (a) 基于 IGZO 全光控忆阻器的工作模式^[30]; (b) 基于 IGZO 全光控忆阻器电导可逆调控特性及循环稳定性^[30]; (c) 基于 IGZO 全光控忆阻器的电导态保持特性, 分别通过光 SET 和光 RESET 获得^[30]; (d) 基于 Ag-TiO₂ 纳米复合材料的忆阻器在可见光刺激下产生的 LTP 行为^[64]; (e) 基于 Ag-TiO₂ 纳米复合材料的忆阻器在紫外光刺激下产生的 LTD 行为^[64]

Fig. 4. All-optical synaptic devices based on memristor: (a) Working mode of all-optimally controlled memristor based on IGZO^[30]; (b) reversible regulation characteristics of conductance (upper) and cycle stability (down)^[30]; (c) retention characteristics of mem-conductance states after optical SET (upper) and optical RESET (down) operations^[30]; visible light-induced LTP (d) and UV light-induced LTD (e) of the Ag-TiO₂ nanocomposite-based memristor^[64].

电导在全光信号调控下的可逆转变过程, 在波长 420 nm 的光脉冲刺激下实现电导增加, 在波长 800 nm 的光脉冲刺激下实现电导减小. 得益于纯电子的忆阻转变机制, 该器件表现出非常优越的稳定性, 如图 4(b) 中底部图所示. 此外, 为了验证该器件电导全光可逆调节的非易失性, 分别测试了 SET

和 RESET 操作后电导状态的保持特性, 如图 4(c) 所示. 器件电导表现出先缓慢衰减然后相对稳定, 且在 10⁴ s 后各电导状态之间仍可清楚区分, 表明器件具有良好的非易失性. 该全光控忆阻器工作所需光信号的功率密度非常低 (~20 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$), 工作机制不涉及微结构改变和焦耳热的产生, 为解决忆

阻器的稳定性难题提供了一条全新的途径. 此外, 该器件采用的 IGZO 材料, 具有优异的热化学稳定性, 而且为非晶结构, 在制备过程中能够保证优越的均一性, 有利于器件后续的大规模集成应用. 值得注意的是, 大数据时代传统人工视觉系统由于视觉信息的探测、处理和存储分离, 使其在实时处理视觉信息方面面临着体积大、速度慢以及功耗高等挑战, 而全光控忆阻器具有独特的光电响应, 有望利用同一器件实现视觉信息的感/存/算一体化, 可用于构建新一代人工视觉系统.

东北师范大学 Liu 团队^[64]在 2021 年基于 Ag-TiO₂ 纳米复合材料设计了一种基于表面等离子激元效应的光电忆阻器. 该器件在可见光和紫外光照射下可实现全光信号调制的突触可塑性模拟. 如图 4(d) 和图 4(e) 所示, 器件在可见光照射下电流增大, 光照撤除后, 电流开始快速衰减直至趋于稳定, 稳定后的电流值大于初始电流值, 器件表现出一定的 LTP 特性; 器件在紫外光照射下电流同样先增大, 然而当光撤除后, 电流会快速衰减到小于初始电流的值, 器件表现出一定的 LTD 特性. 该器件的工作机制主要是源于可见光诱导的 Ag 纳米颗粒表面等离子激元效应与紫外光诱导的 TiO₂ 光电导效应, 两种效应的共同作用会导致 Ag 纳米颗粒发生氧化/还原, 从而引起突触权重的变化. 此外, 基于 ZnO/PbS QDs 异质结的光电忆阻器, 可在紫外光照射下模拟突触 LTP 行为, 在红外光照射下模拟突触的 STP 特性^[65].

3.2 光电晶体管

晶体管的研究最早可追溯到 20 世纪 40 年代. 美国贝尔实验室发明了第一个实用的晶体管, 为微电子领域的发展奠定了基石. 1996 年, Mead 教授^[66]首次演示了晶体管在神经形态计算方面的应用. 神经形态晶体管在模拟生物突触功能时表现出许多优势, 例如: 可同步进行信息读取与学习, 突触权重可进行高精度调控结构上具有更高的灵活性. 此外, 多栅极的突触晶体管在结构上与生物树突更为相近, 有望实现生物突触的高级功能^[67]. 光电突触晶体管在传统电控突触晶体管的基础上引入了光信号, 拓宽了器件的应用领域. 根据器件电导调控模式的不同, 光电突触晶体管可分为光电协

同型突触晶体管和全光型突触晶体管.

3.2.1 光电协同型

深圳大学 Han 团队^[31]在 2019 年报道了一种基于硒化物纳米片的光电晶体管, 其结构如图 5(a) 所示. MoSe₂/Bi₂Se₃/PMMA 复合膜用作光活性电荷俘获层, p 型并五苯作为晶体管沟道材料. 器件可以在波长 790 nm 的近红外光照射下表现出明显的光电流响应. 通过 KPFM 与原位 EFM 的测试, 验证了光诱导电子俘获机制. 器件在近红外光照射下可以提高 MoSe₂/Bi₂Se₃/PMMA 俘获层的电子俘获能力, 因而表现出优异的电导保持特性. 图 5(b) 所示的是器件在不同的近红外光强度照射下所表现出的长/短时程可塑性功能. 其中, 在波长 790 nm 的近红外光脉冲下, 该器件表现出 LTP 行为, 而在 V_{gs} 施加电脉冲时, 其能够实现 LTD 行为, 如图 5(c) 所示. 此外, 该团队在基于硫化钼的浮栅晶体管中也观察到近红外光调控的突触可塑性行为^[68].

除栅极电压外, 漏源极电压 (V_{ds}) 也可用于调控晶体管电导. 中佛罗里达大学 Thomas 团队^[32]在 2020 年报道了基于石墨烯 (Gr) 和钙钛矿量子点 (PQDs) 的光电晶体管, 利用光照和漏源电压实现了器件电导的可逆调控. 图 5(d) 是该器件在蓝光照射和黑暗条件下的输出特性曲线, 器件在光照下的电流明显高于黑暗环境. 图 5(e) 为器件能带示意图, Gr 与 PQDs 存在界面势垒, 产生由 PQD 指向 Gr 的内建电场. PQDs 在光照下吸收光子能量产生电子-空穴对, 电子-空穴对在内建电场作用下分离. 其中, 光生空穴被转移到 Gr 中, 电子被输运至 PQDs 内部. 随着电子在 PQDs 不断累积, 引起光栅效应, 使 Gr 中产生更多空穴, 导致器件电流增加. 此光电晶体管表现出了优异的电导传输性能、高光响应度, 以及良好的电导保持特性. 图 5(f) 展示了器件电导在光脉冲刺激下的连续增加, 模拟突触 LTP 行为, 在源极电脉冲作用下, 电导逐渐降低, 模拟突触 LTD 行为.

除此之外, 研究人员基于酞菁铜/对六苯基^[69]、氧化石墨烯^[70]、硼掺杂的硅纳米晶体^[71]、铜锌氧化物^[72]等材料设计了具有不同光电特性的光电晶体管, 并且通过光照与电压协同作用成功实现了器件电导的可逆调控.

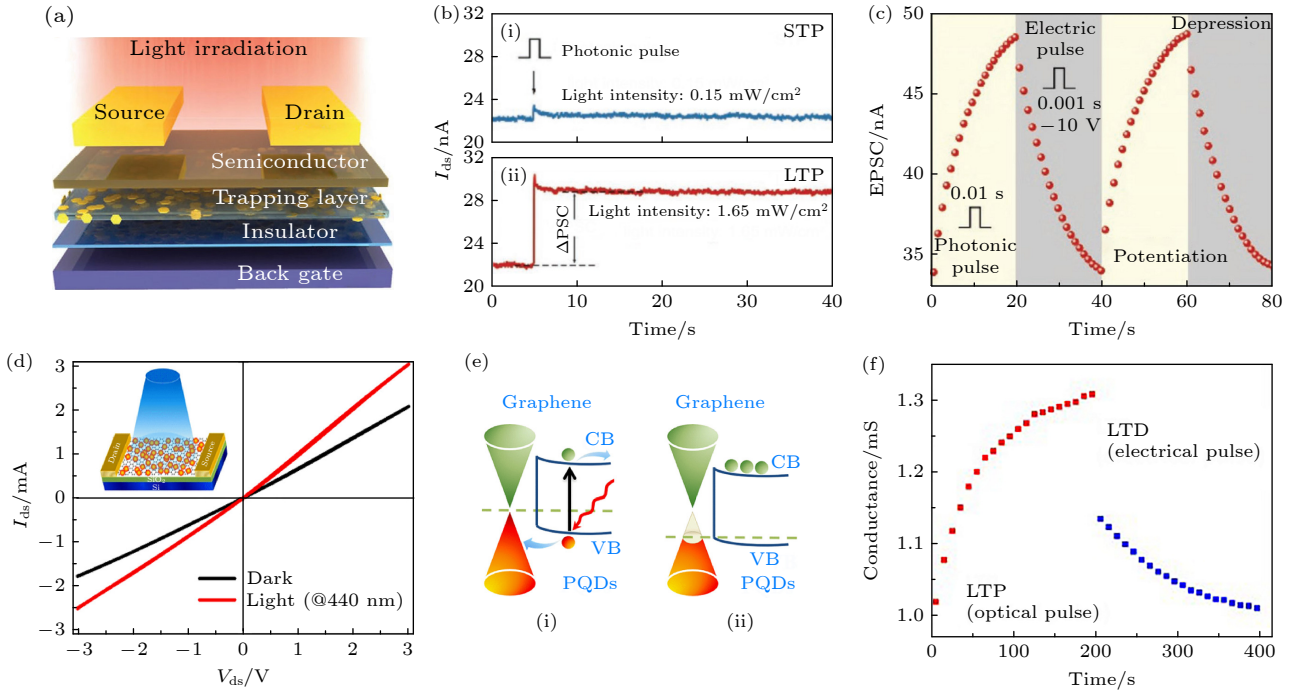


图 5 光电协同型突触晶体管 (a) 基于 $\text{MoSe}_2/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 光电晶体管的器件结构^[31]; (b) 在 $0.15 \text{ mW}/\text{cm}^2$ (i) 和 $1.65 \text{ mW}/\text{cm}^2$ (ii) 功率密度的光脉冲刺激下突触后电流的变化^[31]; (c) 基于 $\text{MoSe}_2/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ 光电晶体管电导的光增强与电抑制过程^[31]; (d) 基于 Gr-PQDs 的光电晶体管在黑暗与光照 (440 nm) 条件下的输出特性曲线, 插图为光电晶体管的示意图^[32]; (e) 基于 Gr-PQDs 光电晶体管在光激发 (i) 与光栅效应 (ii) 下的能级图, 其中 VB 和 CB 分别表示价带与导带^[32]; (f) 基于 Gr-PQDs 光电晶体管在光电协同作用下的 LTP 与 LTD 行为^[32]

Fig. 5. Optoelectronic cooperative synaptic transistors: (a) Schematic illustration of the structure of $\text{MoSe}_2/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ -based phototransistor^[31]; (b) dependence of the change of post-synaptic current on the time after continuously stimulating with the photonic pulses at the light intensity of $0.15 \text{ mW}/\text{cm}^2$ (i) and $1.65 \text{ mW}/\text{cm}^2$ (ii)^[31]; (c) photonic potentiation and electrical depression of the conductance of $\text{MoSe}_2/\text{Bi}_2\text{Se}_3$ -based phototransistor^[31]; (d) output characteristic curve of the Gr-PQDs-based phototransistor under dark condition and 440 nm light illustration, where the phototransistor structure, as seen in the inset, is also given here^[32]; (e) schematic illustration of the energy band diagram for Gr-PQDs-based phototransistor under consideration of photoexcitation (i) and photogating effect (ii), where the VB and CB denote valence band and conduction band, respectively^[32]; (f) LTP and LTD behaviors of Gr-PQDs-based phototransistor under optoelectronic cooperation^[32].

3.2.2 全光型

墨尔本皇家理工大学 Walia 团队^[33]在 2021 年报道了一种基于黑磷 (BP) 的光电晶体管, 实现了全光信号控制下的突触可塑性功能, 器件结构如图 6(a) 所示. 该器件可在波长 280 nm 深紫外光照射下实现电导的增大, 在波长 365 nm 的紫外光照射下实现电导的减小, 如图 6(b) 和图 6(c) 所示. BP 在机械剥离过程中, 不可避免会吸附空气中的氧气和水蒸气, 导致 BP 表面部分氧化, 形成光电子的捕获中心, 导致器件在紫外光照射下电导降低; 然而, 由于波长 280 nm 深紫外光具有更高能量, 器件在该波段照射下产生大量光生载流子, 对光电流的影响占据主导作用, 从而使器件电导增加. 基于上述特性, Walia 及其合作者^[33]利用波长 280 nm 和 365 nm 的紫外光脉冲模拟了突触的 LTP 和 LTD 行为, 如图 6(d) 所示. 此外, 研究人员基于该器件实

现了视觉记忆、图像处理和机器学习等功能. 同年, 天津工业大学 Zhang 团队^[34]报道了一种基于苈基石墨炔/石墨烯/硫化铅量子点 (Pyr-GDY/Gr/PbS-QD) 的光电突触器件, 可以在可见光和近红外作用下实现器件电导的可逆调节, 如图 6(e) 所示. 器件中 Pyr-GDY 和 PbS-QD 分别作为吸光层和电荷捕获层, 单层 Gr 作为沟道层. 由于 Gr 与 Pyr-GDY, 以及 PbS-QDs 与 Gr 间的功函数不同, 3 种材料界面处能带发生弯曲. 器件在蓝光照射下, 大部分入射光被顶层的 Pyr-GDY 吸收, 产生大量电子-空穴对, 光生电子在内建电场驱动下转移到 Gr, 空穴被 Pyr-GDY 捕获. 虽然部分入射光会被底层的 PbS-QDs 吸收, 并向 Gr 沟道中注入空穴, 同时留下的电子被 PbS-QDs 捕获, 然而 Pyr-GDY 捕获的空穴数量远远大于 PbS-QDs 捕获的电子数量. 因此, Pyr-GDY 引起的正光栅效应

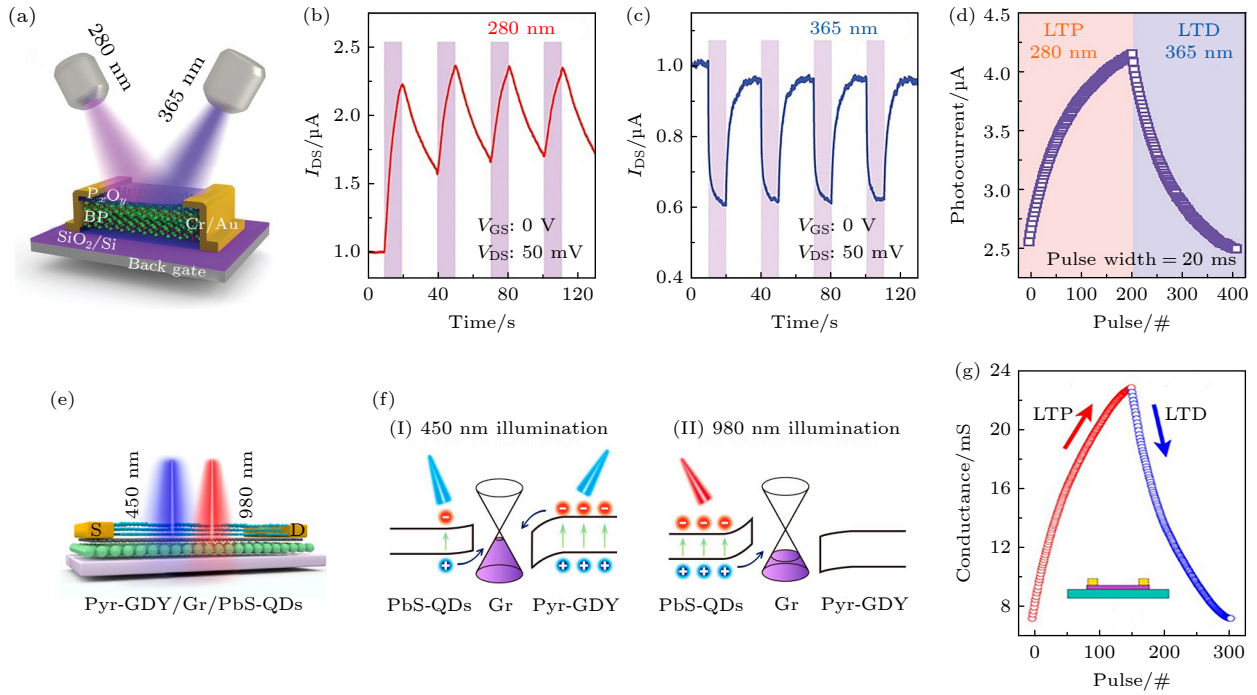


图 6 全光型突触晶体管 (a) BP 基光电晶体管结构示意图^[33]; (b), (c) BP 基光电晶体管在 280 nm 与 365 nm 波长光脉冲刺激下的光电响应^[33]; (d) BP 基光电晶体管 LTP 与 LTD 突触行为模拟^[33]; (e) Pyr-GDY/Gr/PbS-QD 基光电晶体管结构示意图^[34]; (f) Pyr-GDY/Gr/PbS-QD 基光电晶体管在 450 nm 与 980 nm 波长光照射下的能带图^[34]; (g) Pyr-GDY/Gr/PbS-QD 基光电晶体管 LTP 与 LTD 突触行为模拟^[34]

Fig. 6. All-optically controlled synaptic transistors: (a) Schematic illustration of the structure of fully light-controlled optoelectronic transistor based on BP^[33]; (b), (c) optoelectronic response of BP-based optoelectronic transistor upon stimulation with 280 nm (b) and 365 nm (c) light pulses^[33]; (d) LTP and LTD behaviors of BP-based optoelectronic transistor upon stimulation with 280 nm and 365 nm light pulses^[33]; (e) schematic illustration of the structure of Pyr-GDY/Gr/PbS-QDs-based optoelectronic transistor^[34]; (f) mechanistic illustration for the bandgap change of Pyr-GDY/Gr/PbS-QD-based optoelectronic transistor upon illumination with the light wavelengths of 450 nm (left) and 980 nm (right) ^[34]; (g) LTP and LTD behaviors of the Pyr-GDY/Gr/PbS-QD-based optoelectronic transistor^[34].

比 PbS-QDs 引起的负光栅效应强得多, 导致器件电导降低. 相反, 器件在近红外光照射下, 底层的 PbS-QDs 吸收率更高, 大量的光生空穴注入到 Gr 沟道, 从而使电导增大. 在此基础上, 该器件可在近红外光脉冲照射下模拟突触 LTP 行为, 在可见光脉冲照射下, 模拟突触 LTD 行为, 如图 6(g) 所示.

3.3 其他光电器件

长庚大学 Lai 团队^[73]在 2020 年报道了一种基于二维 Bi₂O₂Se/和 Gr 的全光调节突触器件. 该器件是由能够产生正向光电导的 Bi₂O₂Se 基两端器件与能够产生负向光电导的 Gr 基两端器件串联而成, 如图 7(a) 所示. 器件在 635 nm 波长的红光照射下, Bi₂O₂Se 的正向光电导效应占主导地位, 费米能级升高, 电导增大. 器件在 365 nm 波长的紫外光照射下发生两种效应, 即热辐射效应和等离子体激元效应. 一方面, 费米能级会因热辐射效应

而降低, 导致热载流子从 Bi₂O₂Se 注入到 Gr 中, 产生正向光电导效应; 另一方面, Gr 表面吸附的氧离子因等离子体激元效应形成氧气 ($O^{2-} \rightarrow e^- + O_2$), 导致空穴浓度降低, 造成 Gr 的电导降低, 器件产生负向光电导效应. 该器件可基于正负光电导效应分别模拟生物突触的 EPSC 与抑制性突触后电流 (inhibitory post-synaptic current, IPSC), 如图 7(c) 所示. 此外, 该器件在 635 nm 和 365 nm 波长的光脉冲刺激下也可实现突触 LTP 与 LTD 行为模拟 (图 7(d)).

中国科学院北京纳米能源与系统研究所 Wang 团队^[39]在 2021 年报道了一种机械力与光电协同作用的人工突触器件, 如图 7(e) 所示. 该器件是基于 Gr/MoS₂ 异质结的光电晶体管与摩擦纳米发电机 (triboelectric nanogenerator, TENG) 集成得到, 通过两种器件之间的协同合作, 实现了突触行为的模拟. 将 TENG 连接到晶体管的栅极, TENG 移动

产生摩擦电势可作用于突触晶体管, 如图 7(f) 所示. 当摩擦层分离时, Gr 费米能级 (E_F) 降低, MoS₂ 在光

照下产生的光生电子会注入到 Gr 中, Gr 电阻升高, 导致器件电导降低. 当摩擦层靠近时, 会抑制 MoS₂

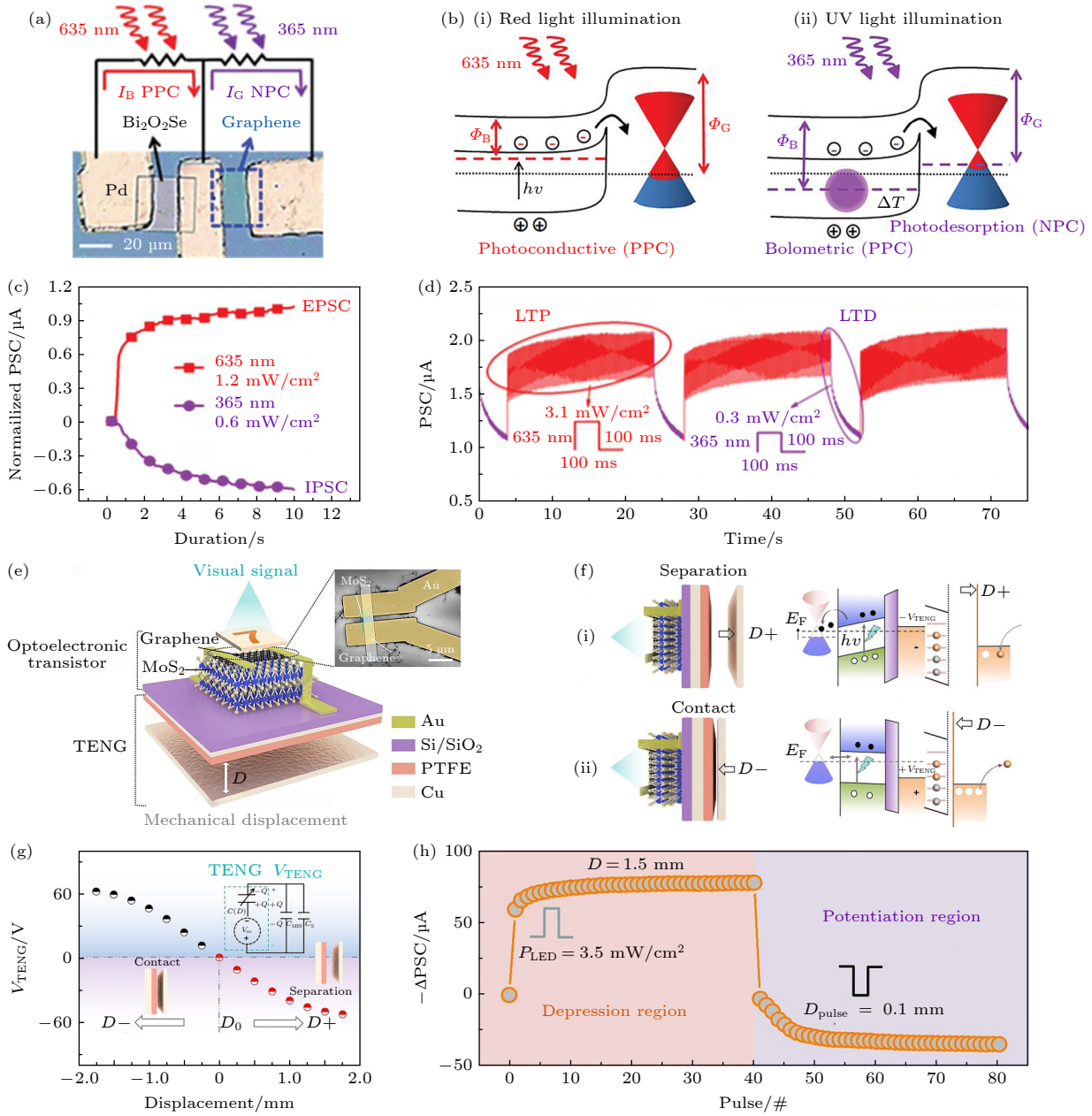


图 7 (a) Bi₂O₂Se/Gr 基突触结构图^[72]; (b) Bi₂O₂Se/Gr 基突触在红光 (i) 和紫外光 (ii) 照射下的能带图^[72]; (c) Bi₂O₂Se/Gr 基突触在红光和紫外光照射下的突触后电流^[72]; (d) Bi₂O₂Se/Gr 基突触在同样的红光和紫光光脉冲下实现突触 LTP 与 LTD 行为模拟^[72]; (e) Gr/MoS₂ 基突触结构图, 其中插图为光电晶体管的扫描电子显微镜 (SEM) 图像^[39]; (f) Gr/MoS₂ 基突触与 TENG 分离状态 (i) 与接触状态 (ii) 的工作原理及相应的能带图^[39]; (g) V_{TENG} 随位移变化曲线, 其中插图为 V_{TENG} 输出的等效电路图^[39]; (h) Gr/MoS₂ 基的突触在光脉冲与 TENG 位移脉冲共同作用下实现的电流增加与降低过程^[39]

Fig. 7. (a) Structural illustration of synaptic device based on Bi₂O₂Se/Gr heterojunction^[72]; (b) mechanism illustration for the bandgap change of this Bi₂O₂Se/Gr-based synaptic device upon illumination with red (i) and UV light (ii), along with the corresponding post-synaptic current (c) as well as LTP and LTD behaviors (d) stimulated by the same red and UV light^[72]; (e) schematic illustration of the structure of artificial synapse based on Gr/MoS₂ heterostructure and the scanning electron microscope (SEM) image of a phototransistor (inset)^[39]; (f) working mechanistic principle and the corresponding bandgap illustration for this artificial synapse based on Gr/MoS₂ heterostructure at (i) separation state and (ii) contact state with TENG^[39]; (g) dependence of the variation of V_{TENG} value on the displacement, together with the equivalent circuit illustration for V_{TENG} output (inset)^[39]; (h) current depression and potentiation of the artificial synapse based on Gr/MoS₂ heterojunction^[39].

中光生电子注入 Gr, 从而有效地控制 Gr 与 MoS₂ 层之间的电荷转移与交换, 实现光电突触行为的调控. 图 7(g) 给出了 TENG 的输出电压 (V_{TENG}) 与摩擦层位移 (D) 关系, 以及 V_{TENG} 输出的等效电路图 (见插图). TENG 每移动 -0.1 mm 约相当于 5 V 的 V_{TENG} 输出, 器件能够产生的等效栅压范围在 -52 V 至 60 V 间. 当摩擦层距离固在 1.5 mm 时, 器件电导在光脉冲刺激下逐渐减小, 模拟了突触 LTD 行为; 在光脉冲移除后, 通过控制 TENG 移动, 器件电导会随着位移的连续增加而增加, 模拟了突触 LTP 行为.

深圳大学 Han 团队 [74] 在 2020 年报道了一种基于光伏器件和忆阻器组成的自供电人工视觉感知系统. 光伏器件用于感受外界光信号, 将光信号转变为电信号, 然后电信号作用于传统电控忆阻器, 引起器件内部导电细丝的形成和断裂, 以此调控突触权重变化. 这种自供电系统避免了外部驱动电源, 减少了额外的能耗. 通过将光电突触器件与多种不同功能的器件集成而获得的新型系统显著拓展了人工突触器件的应用领域与发展方向.

4 光电神经元

神经形态芯片的构建, 除了需要突触器件以外, 人工神经元器件也非常重要. 近年来, 研究人员在神经元器件研究方面取得了不少成绩, 提出了多种神经元模型 [75,76]. 通常情况下, 传统计算机模拟神经元行为需求解大量微分方程, 会占用大量的处理与内存单元, 而且耗时耗能. 相比之下, 基于

硬件实现人工神经元能大幅提升运算效率. 大规模电控神经形态系统在计算过程中面临巨量的信号传输, 面临传输带宽、散热、功耗等问题. 光信号具有速度快、超高带宽以及低串扰等优点, 并拥有更多的自由度 (含频率、偏振、模式指数、强度、统计、相干性等) [77]. 因此, 光电神经元在神经网络信号的传输与处理方面具有巨大的潜力, 有望在高效、低功耗的神经形态系统中发挥重要作用. 相比光电突触器件, 光电神经元的研究相对较少, 我们根据神经元间信息传输的信号, 将神经元分为两类: 1) 光输入-光输出型神经元; 2) 光输入-电输出型神经元, 并对这两种类型的神经元的器件结构、工作机制以及功能模拟进行阐述.

4.1 光输入-光输出型

加州理工学院 Psaltis 团队 [40] 在 1991 年提出了基于砷化镓 (GaAs) 材料制备的光电神经元电路, 其结构如图 8 所示. 每个神经元单元由发光二极管 (LED)、驱动 LED 的场效应晶体管、负载晶体管以及光电晶体管组成. 用于驱动 LED 的场效应晶体管是由光电晶体管与负载晶体管所组成的开关电路控制. 当光电晶体管检测到一定强度的输入光时, 施加在驱动晶体管上的栅极电压会相应增大, 从而促使晶体管开启并驱动 LED 产生输出光. 输出光功率随输入光功率的增加呈现非线性增加. 该神经元电路具有优异的光探测灵敏度, 不仅能够在此弱的输入光作用下产生高增益的光输出, 而且可以通过调节负载晶体管的栅极电压对光输出进行调控. 这种非线性输出特性与神经网络算法中非

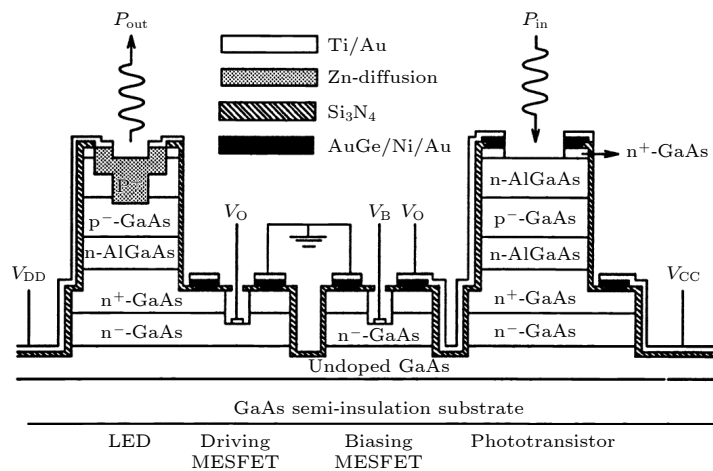


图 8 基于砷化镓的光电神经元结构图 [40]

Fig. 8. Schematic illustration of the structure of photoelectric neuron based on GaAs [40].

线性函数极为相似. 该团队在上述研究的基础上, 通过优化神经元电路的结构, 实现了更为复杂的神经元非线性输出函数.

美国国家标准与技术研究所 Shainline 等^[22]也提出了一种由半导体发光二极管与超导纳米线单光子探测器结合的光电神经元电路. 该硬件系统能够通过输入光的调控, 实现非线性光的输出, 有望在人工神经网络和大规模神经形态计算中起到重要作用.

4.2 光输入-电输出型

韩国科学技术院 Choi 团队^[23]在 2020 年报道了基于单个硅基晶体管的光电神经元, 该硅基晶体管是由浮体、漏源极和栅极组成的垂直柱状结构, 如图 9(a) 所示. 神经元工作原理是基于单晶体管锁存效应, 如图 9(b) 所示. 由于漏极寄生电容的存在, 当输入电流 (I_{in}) 施加到漏极时, 正电荷会不断地聚集在电容器中, 导致输出电压 (V_{out}) 随电荷增加而增加, 呈现出线性累积过程. 然而, 一旦 V_{out} 超过锁存电压 (V_{latch}), 原本存储于电容器中的电荷就会突然从漏极逸出并注入到浮体中, 实现神经元发射过程, 最终恢复到初始静息状态. 与此同时, 光照产生的电子-空穴对在这个过程中会在浮体中不断积累, 进而降低 V_{latch} , 使神经元脉冲幅值与频率发生改变. 图 9(c) 所示的是神经元在不同光功率下所输出脉冲随时间的变化关系. 虽然该神经元的输出脉冲可以被不同波长的红绿蓝光调控, 但其不能被光子能量小于硅带隙的红外光调控. 此外, 在光源固定的情况下, 栅压也可用于调控神经元的输出. 基于这种光调控的神经元输出特性, 研究人员构建了一个单层感知器, 演示了其在图像模式识别上的应用.

在生物感知神经系统中, 伤害感受器是必不可少的关键组成部分, 它能够在感测到伤害刺激时向中枢神经系统发出快速警示. 在模拟生物感觉神经系统方面的研究中, 仁川国立大学 Kim 团队^[78]在 2019 年报道了一种全氧化物基的透明光子伤害感受器. 该器件在紫外光脉冲作用前期不会出现明显的光电流响应, 然而随着紫外光脉冲刺激累积到一定时间, 器件光电流急剧变大并最终达到饱和. 这种光电流阈值的转变特性与人眼的感觉神经元功能非常相似.

西安电子科技大学 Wang 团队与中国科学院

微电子研究所 Li 团队^[41]在 2020 年合作设计了一种由 IGZO₄ 紫外传感器和 NbO_x 振荡神经元串联而成的人工视觉神经元, 器件结构如图 9(d) 所示. 该器件不仅可以感知紫外光信息而且可将这些光信息编码为电脉冲. 由于 NbO_x 器件具有易失性的阈值转变特性, 基于其所设计的 Pearson-Anson 电路可进行模拟人工神经元的振荡行为. IGZO₄ 器件具有良好的紫外光响应, 电阻值随着紫外光波长的减小而减小. 图 9(e) 所示的是人工视觉神经元的电路结构. 该器件在不同波长的紫外光刺激下会显示出 4 种稳定的尖峰频率, 如图 9(f) 所示. 基于该人工神经元, 研究人员构建了一种脉冲神经网络, 根据振荡频率的不同, 可对复杂背景图像进行分割, 并演示了人工视觉系统信息编码功能.

5 光电神经形态器件的应用

5.1 人工视觉系统

光电神经形态器件可以直接感受外界光信号, 并在光电转换过程中完成信息处理. 这种集信息感知与处理一体化的工作模式与人类视觉系统极为相似. 因此, 目前有关光电神经形态器件应用的主要集中于人工视觉系统, 用于视觉信息的感知与存储、预处理以及后处理等功能.

中国科学院半导体研究所 Shen 团队^[79]在 2018 年实现了一种视觉信息探测与存储一体的人工视觉系统. 该系统由基于氧化铜的图像传感阵列和基于氧化铝的忆阻器组成, 如图 10(a) 所示. 其中, 图像传感器负责视觉信息探测, 忆阻器负责图像记忆. 中央大学 Park 团队^[80]在 2019 年实现了一种基于 IGZO 突触晶体管和光电传感器的光控突触电路. 该突触电路可根据环境中光强度的变化调整负载栅极电压, 模拟人眼视网膜明适应与暗适应功能, 如图 10(b) 所示. 此外, 研究人员利用基于卤化物钙钛矿材料的光电器件也实现了明暗适应功能的模拟^[81,82]. 人眼除了能够感知外界光信号, 还可对不同颜色的光进行识别. 成均馆大学 Park 团队^[16]在 2018 年设计了一种基于 h-BN/WSe₂ 异质结的人工光电突触器件, 利用该器件在不同波长光照射下的光电响应差异, 模拟了人眼的颜色识别功能, 如图 10(c) 所示. 除上述功能外, 神经形态器件还可用于图像预处理功能. 传统图像传感器在探测外界信息时会产生大量冗余数据, 影响图像处理效

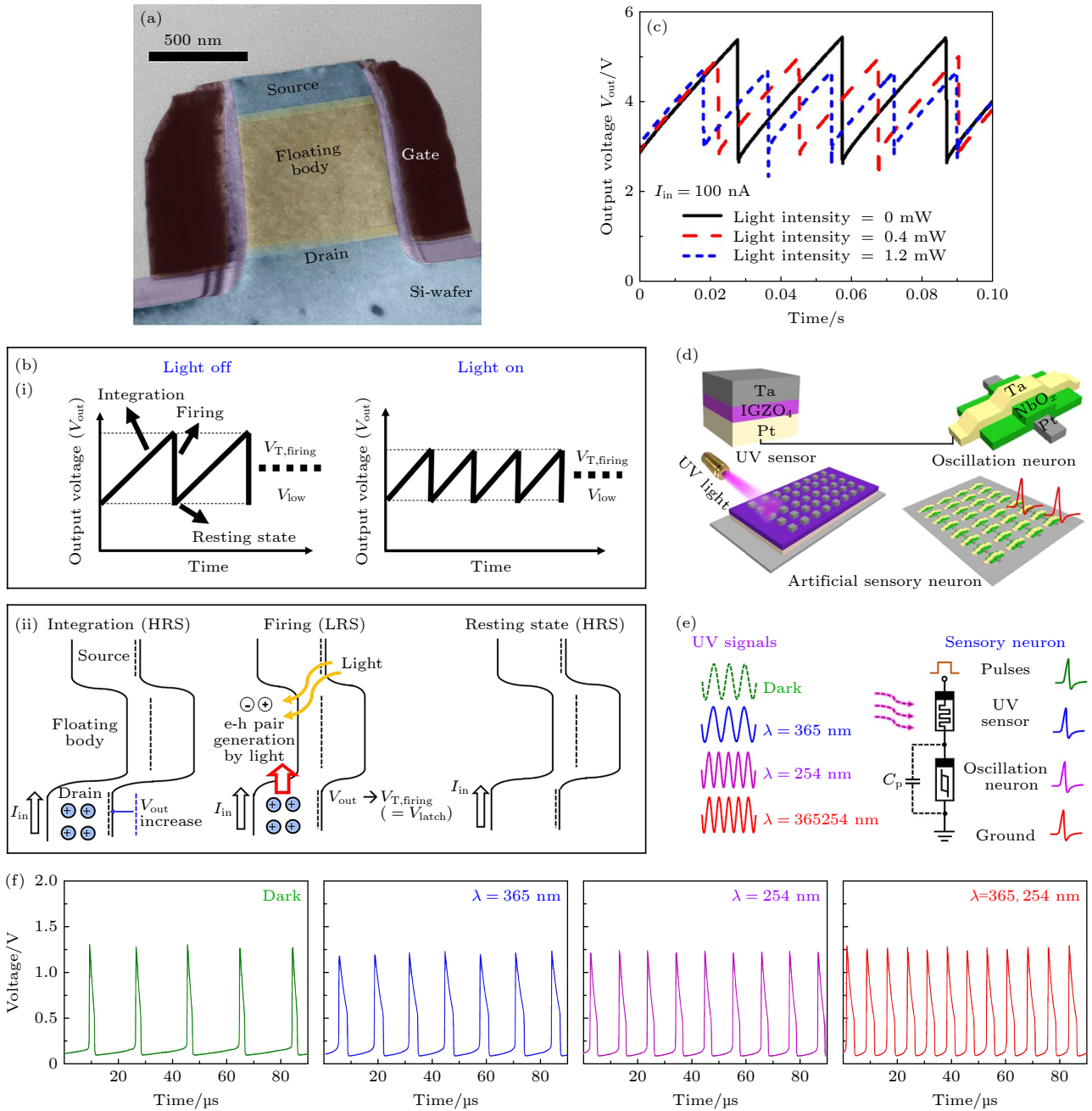


图9 光电神经元器件 (a) 硅基光电神经元的 TEM 图^[23]; (b) 神经元器件在加光与撤光条件下的光电响应^[23]; (c) 神经元器件在不同功率光照下的光电响应^[23]; (d) 基于 IGZO₄ 紫外传感器和 NbO_x 振荡器的人工视觉神经元结构示意图^[41]; (e) 人工视觉神经元在不同光照下的工作模式示意图^[41]; (f) 人工视觉神经元在黑暗和不同波长紫外光照射下的 4 种发射行为^[41]

Fig. 9. Optoelectronic neuron devices: (a) TEM image of silicon-based optoelectronic neuron^[23]; (b) optoelectronic response of neuron under light ON and light OFF^[23]; (c) optoelectronic response of neuron upon stimulation with different light intensity^[23]; (d) structural illustration for artificial visual neuron composed of IGZO₄-based UV sensor and NbO_x-based oscillator^[41]; (e) working mode of artificial visual neuron under different light illumination^[41]; (f) four different firing behaviors of artificial visual neuron in dark and upon stimulation with different wavelength UV light^[41].

率. 图像预处理技术可以实现原始图像的初级处理, 包括图像去噪、背景扣除、特征提取及边缘增强等. 相比于未处理的原始图像, 预处理技术能减少冗余数据, 提高图像在人工神经网络中的识别精度和迭代收敛速度. 香港理工大学 Chai 团队^[83]

在 2019 年报道了一种基于 Pd/MoO_x/ITO 的光电阻变存储器 (optoelectronic resistive random access memory, ORRAM), 如图 10(d) 所示. 器件电导在强光照射下可表现出良好保持性, 在弱光照射下, 器件电导保持性较差. 基于上述原理, 研究

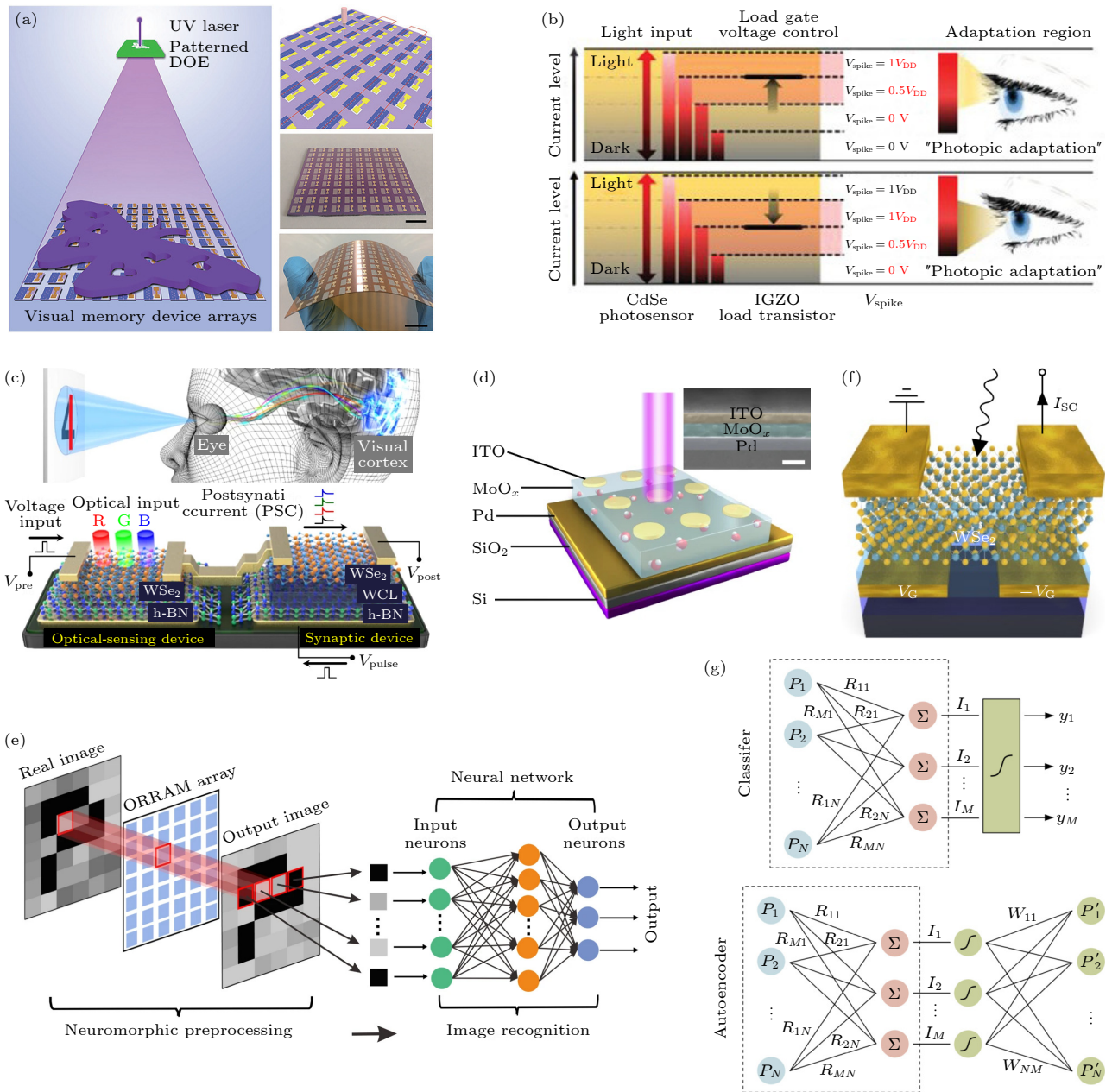


图 10 光电神经形态器件在人工视觉系统中的应用 (a) 由 In_2O_3 基图像传感器与 Al_2O_3 基阻变存储器构建的人工视觉系统^[79]; (b) 具有明适应与暗适应功能的人工视觉系统^[80]; (c) 具有颜色识别功能的 $\text{h-BN}/\text{WSe}_2$ 基光电突触器件^[16]; (d) MoO_x 基 ORRAM 结构示意图, 其中插图为器件横截面的 SEM 图^[83]; (e) 基于 ORRAM 阵列构建的人工视觉系统^[83]; (f) 基于二维 WSe_2 的光电二极管结构示意图^[17]; (g) 基于 WSe_2 光电二极管实现的分类器与自编码器应用^[17]

Fig. 10. Optoelectronic neuromorphic devices for artificial vision system: (a) Artificial vision system integrated by image sensor based on In_2O_3 and resistive random access memory based on Al_2O_3 ^[79]; (b) artificial visual system having the functions of light and dark adaptation^[80]; (c) $\text{h-BN}/\text{WSe}_2$ heterojunction-based optoelectronic synaptic device with the function of color recognition^[16]; (d) schematic illustration for ORRAM structure based on $\text{Pd}/\text{MoO}_x/\text{ITO}$, in which the inset shows the SEM image of the cross section of the device^[83]; (e) artificial vision system constructed by ORRAM array^[83]; (f) schematic illustration of photodiode based on two-dimensional (2D) WSe_2 materials^[17]; (g) applications of 2D WSe_2 -based photodiode for classifier and autoencoder^[17].

人员利用 ORRAM 阵列实现了图像的去噪和增强对比度等预处理功能, 并通过人工神经网络验证了图像预处理效果. 图 10(e) 展示了基于 ORRAM 阵列的图像预处理过程和用于图像识别的人工神经网络结构图. 此外, 研究人员在基于钙钛矿的光电

忆阻器与基于 IGZO 的光电晶体管中也实现了图像对比度增强与去噪等预处理功能^[74,84]. Wu 等^[85] 基于二阶电导转变特性的忆阻器与光敏元件集成制备了一个光学预处理单元, 实现了昏暗环境下带噪点二维码图像的预处理. Wang 等^[86] 基于二维材

料范德瓦耳斯异质结制备了具有光响应度可调特性的突触器件, 基于卷积操作实现了图像预处理.

图像预处理后的图像还需经过后处理过程, 以实现图像的分类、识别等高级功能. 目前图像后处理主要是基于深度学习算法的人工神经网络实现. 光电神经形态器件的一个重要应用方向便是基于硬件构建人工神经网络, 以提高图像后处理效率. 光电突触器件是构建人工神经网络的基本单元, 在本文第 3 节中我们对光电突触器件进行了总结. 目前报道的光电突触器件主要是利用电导可逆调控实现人工神经网络中权重的更新, 以实现学习功能. 例如, Pradhan 等^[32]利用光电协同型突触晶体管构建了脉冲神经网络, 并基于无监督式机器学习实现了人脸识别功能. 此外, 哈佛大学 Ham 团队^[87]在 2020 年报道了一种基于二维 MoS₂ 的大规模光电晶体管阵列, 可用于图像预处理与后处理. 基于此阵列构建的卷积神经网络, 实现了对 MNIST 手写体数字库识别, 准确率达 94%. 同年, 维也纳工业大学 Mueller 团队^[47]在 2020 年制备了基于二维 WSe₂ 的光电二极管阵列, 如图 10(f) 所示. 该光电二极管通过控制栅压的极性和大小可获得连续可调的光响应灵敏度, 并以此作为突触权重, 构建人工神经网络, 实现了视觉信息的实时探测与识别, 获得了超快的信息处理速度. 图 10(g) 展示了基于该光电晶体管阵列的两种人工神经网络, 即分类器与自编码器. 基于该硬件人工神经网络在识别精度方面与基于软件的网络处理效果接近.

5.2 人工感知系统

除视觉系统外, 人体还存在诸如触觉、听觉以及嗅觉等感知系统. 近年来光电神经形态器件在其他人工感知系统方面也受到广泛关注. 阿尔托大学 Dijken 团队^[88]在 2020 年设计了一种由压力传感器、模数转换器 (analog-to-digital converter, ADC)、发光二极管 (light emitting diode, LED) 与光电突触器件构成的人工触觉系统, 如图 11(a) 所示. 其中, 压力传感器可根据压力的变化产生不同幅值的电压信号, 电压信号通过模数转换器 (analog-to-digital converter, ADC) 后作用于发光二极管, 以此将压力信号转换为光信号. 光信号作用于光电突触器件, 用于调控突触权重. 基于此人工触觉系统, 可以实现手写字母识别. 在此基础上, 该团队还报道了一种多模态集成的人工感知系统.

该系统将多种传感器与光电突触集成, 实现了视觉、触觉、听觉、嗅觉和味觉信号的多模态信息处理应用^[42].

除上述之外, 延世大学 Cho 团队^[89]在 2021 年设计了一种由光电二极管、双电层突触晶体管、人工神经元电路和机器手臂所组成的人工感知系统, 如图 11(b) 所示. 该系统可以根据外界光信号的改变自发控制机械手臂, 完成指令动作. 当该系统接收到外界光刺激时, 光电二极管会将光信号转变为电信号, 并作用于突触晶体管, 完成信号处理与输出, 当人工神经元接收到此电信号就会进行决策, 并对机械臂发出指令, 完成相应动作. 此外, Karbalaee Akbari 等^[90]通过将光电突触器件与驱动器相结合, 模拟光刺激诱导的动作行为. Zhu 等^[91]设计了一种发光忆阻器, 通过压力传感器发出的刺激信号使忆阻器人工突触发出光信号, 并作用在后端机械臂, 诱发产生动作行为. Wan 等^[92]将光电探测器与压力传感器两者的信号作为刺激源, 并作用于突触晶体管, 模拟了生物中的多模态刺激行为.

5.3 神经形态计算

5.3.1 非联想学习

生物体可以通过不断调整个体行为来适应外界变化的环境, 这种凭借经验的调节行为被认为是一种高级学习功能. 经验式调节行为可分为两种形式, 即非联想学习与联想学习. 其中非联想学习是生物中不可或缺的自我学习与适应性行为之一, 不需要在外界刺激与机体反应之间形成特定关联^[93]. 对于某种重复性刺激, 非联想学习会表现出两种不同的反应——习惯化和敏化. 习惯化指生物体对反复施加的无害刺激反应逐渐减弱的行为^[94]. 相反, 敏化指生物体对反复施加的有害刺激反应增强的行为^[93]. 华中科技大学 Guo 团队^[95]在 2018 年基于 MoS₂ 制备的光电忆阻器实现了非联想学习中的习惯化与敏化行为模拟. 如图 12(a) 所示, 器件在 -8 V 电脉冲刺激下电流不断减小, 模拟生物体在无害刺激下的习惯化行为; 在紫外光照射下, 器件电流逐渐增大, 模拟生物体敏化行为. 生物体中的伤害感受器可在受到强烈的有害刺激时, 进入敏化状态, 以此来避免环境中的伤害. 仁川国立大学 Kumar 等^[78]在 2019 年开发了一种基于 ZnO 薄膜的光电器件. 该器件可在有害光信号刺激下发生敏化行为. 当再次

受到伤害后, 器件可对有害光信号刺激具有更高的敏感性, 呈现出超敏 (allodynia) 和过敏 (hyperalgesia) 行为, 见图 12(b). 此外, 有研究人员在基于

ZnO 纳米线^[96]、CeO_{2-x}^[97]、TiO₂/Ga₂O₃^[98]、Azo-Au 纳米颗粒^[99]等材料制备的光电器件中发现了类似的习惯化或敏化等非联想学习行为。

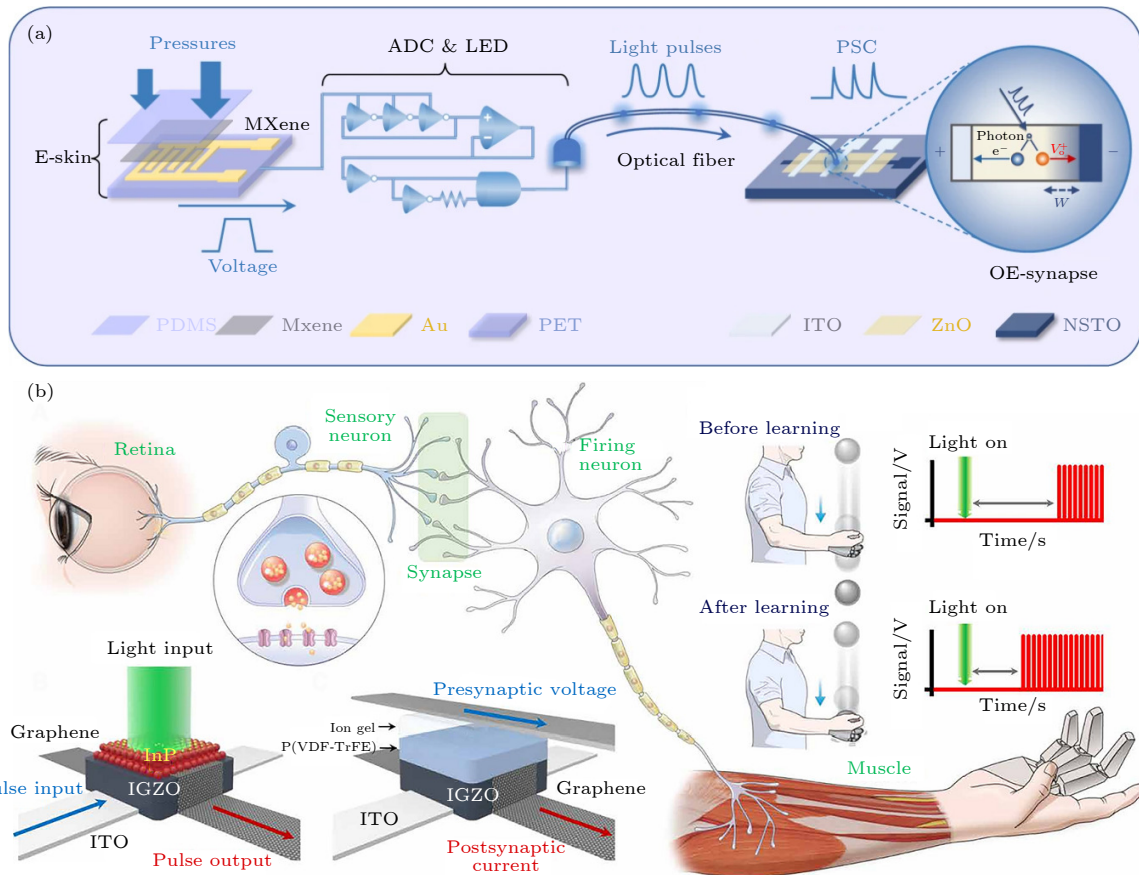


图 11 光电神经形态器件在人工感知系统中的应用 (a) 由压力传感器与光电突触组成的人工神经网络^[88]; (b) 由光电二极管、突触晶体管以及机械臂组成的控制系统^[89]

Fig. 11. Optoelectronic neuromorphic devices for artificial sensing system: (a) Artificial system composed of pressure sensors and optoelectronic synapses^[88]; (b) control system composed of photodiodes, synaptic transistors and robotic arms^[89].

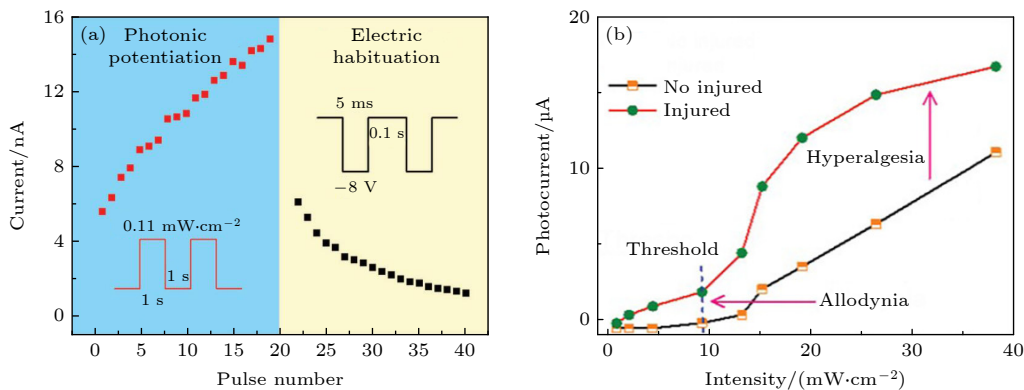


图 12 光电神经形态器件在非联想学习中的应用 (a) MoS₂ 基光电忆阻器模拟习惯化与敏化行为^[95]; (b) ZnO 基光电器件模拟敏化行为^[78]

Fig. 12. Nonassociative learning based on optoelectronic neuromorphic devices: (a) Simulation of habituation and sensitization behaviors using the MoS₂-based optoelectronic memristor^[95]; (b) simulation of sensitization behavior using the ZnO-based optoelectronic device^[78].

5.3.2 联想学习

联想学习属于大脑中的一个高阶学习行为, 大脑通过学习 2 个或 2 个以上事件, 建立它们之间的关系, 并产生与之相对应的反应. 巴普洛夫条件反射是一种典型的联想学习行为^[100]. 近年来, 研究人员发现光电神经形态器件可以很好地模拟这种经典联想学习行为. 中国科学院深圳先进技术研究所 Wang 团队^[101]在 2021 年报道了一种基于二维过渡金属硫化物的光电电阻器, 利用光调控阻变特性成功模拟了巴普洛夫实验. 如图 13(a) 所示, 使用脉宽为 50 ms 和间隔为 450 ms 的电脉冲刺激作为条件反射信号 (摇铃), 波长为 400 nm 的持续光刺激作为非条件发射信号 (喂食). 单独的电脉冲刺激产生的电流在刚开始阶段无法达到阈值, 对应小狗不会产生分泌唾液的行为; 同时施加电脉冲和

光照一段时间后, 发现单独施加电脉冲刺激可产生超过阈值的电流, 对应小狗因发生条件反射而分泌唾液; 经过一段时间的无条件刺激之后, 电脉冲无法产生超过阈值的电流, 对应小狗对铃声不会产生条件反射, 恢复至初始状态. 除此之外, Ahmed 等^[102]基于 BP 的光电突触器件在全光信号控制下模拟了巴普洛夫实验, 如图 13(b) 所示. 研究人员分别使用波长为 280 nm 和 660 nm 的光脉冲作为非条件刺激和条件刺激. 单独施加 660 nm 的光脉冲信号作为摇铃刺激时, 产生的光电流无法超过阈值, 对应小狗不会产生流涎反应; 单独施加 280 nm 的光脉冲信号作为食物刺激时, 产生的光电流超过阈值, 对应小狗会产生流涎反应; 同时施加摇铃刺激与食物刺激, 经过一段时间训练后, 小狗对单独的摇铃刺激也会产生条件反射.

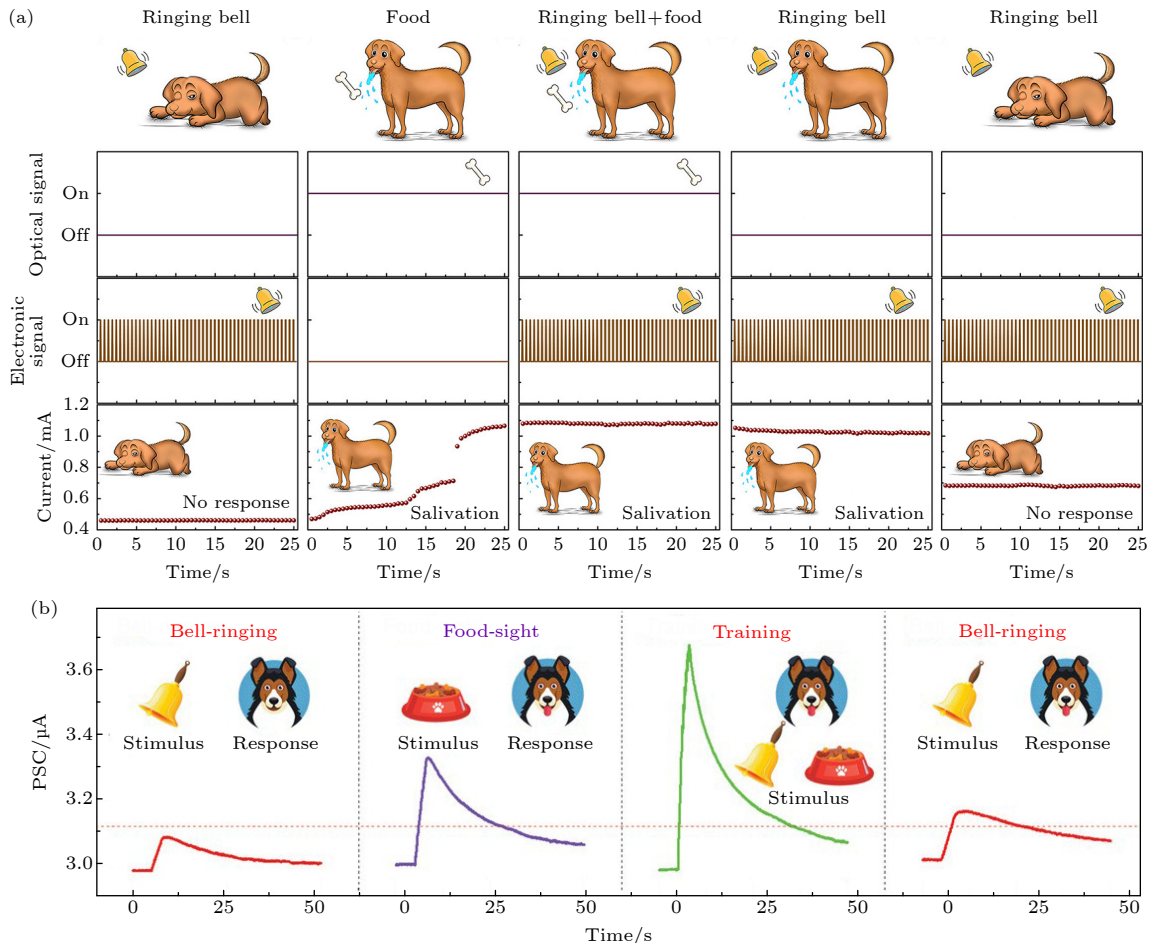


图 13 光电神经形态器件在联想学习模拟中的应用 (a) 光电协同刺激实现的巴普洛夫实验^[101]; (b) 全光刺激实现的巴普洛夫实验^[102]

Fig. 13. Associative learning based on optoelectronic neuromorphic devices. Pavlov's experiment realized by optoelectronic co-stimulation^[101] (a) and by all-optical stimulation^[102] (b).

5.3.3 STDP

STDP 作为赫布学习规则的一种, 表示的是突触连接强度变化 ($\Delta\omega$) 与前后神经元发射脉冲时间间隔 (Δt) 的关系^[103]. 大量的生物学实验证明了 STDP 与人脑学习规则相似^[104,105]. STDP 学习规则的函数表达式为^[106]

$$\Delta\omega = \begin{cases} A_+ e^{-|\Delta t|\tau_+}, & \Delta t > 0, \\ A_- e^{-|\Delta t|\tau_-}, & \Delta t < 0, \end{cases}$$

式中 A_{\pm} 与 τ_{\pm} 分别代表的是函数缩放因子与时间常数. 根据 STDP 学习规则, 如果前神经元脉冲出现在后神经元脉冲的峰值之前, Δt 为正, $\Delta\omega$ 的极性为正, 突触权重表示为增强效果; 如果前神经元脉冲出现在后神经元脉冲的峰值之后, Δt 为负, $\Delta\omega$ 的极性为负, 突触权重表示为抑制效果.

光电神经形态器件可用于 STDP 学习规则模拟, 并可以通过改变光脉冲信号的宽度、个数及光功率密度实现 STDP 学习规则的有效调控. 中兴大学 Lin 团队^[43] 在 2021 年设计了基于 $\text{ReSe}_2/\text{h-BN}/\text{Gr}$ 异质结的光电晶体管, 通过光信号与电信号的协同控制模拟了 STDP 学习规则 (见图 14(a)). 此外, 中国科学院宁波材料所 Zhuge 团队^[30] 制备了基于 IGZO 的全光控忆阻器, 仅通过调控光信号波长和脉冲个数, 即可实现 STDP 学习规则的模

拟, 如图 14(b) 中图 (i) 所示. 该忆阻器实现 STDP 模拟的操作机制如图 14(b) 中图 (ii), (iii) 所示, 其中蓝光脉冲作为突触前刺激, 近红外光脉冲作为突触后刺激. 图 (ii) 在蓝光脉冲刺激后施加近红外光脉冲的刺激, 即 $\Delta t > 0$, 相应的突触权重表现出增强效果; 图 (iii) 在施加近红外光脉冲刺激后施加蓝光脉冲刺激, 即 $\Delta t < 0$, 突触权重表现出抑制效果.

6 总结与展望

人工突触与神经元器件是构建神经形态芯片的基本单元, 为实现低功耗、高效的神经形态计算提供了新的思路. 然而, 现有神经形态器件的研究主要集中于纯电控突触和神经元, 在功耗及功能应用方面还同人类具有很大差距, 限制了神经形态芯片的发展. 新兴的光电神经形态器件可以兼具光子学、电子学及生物学的研究特色, 在降低器件功耗、拓宽应用领域方面具有独特的优势, 成为近年来研究的热点. 本文综述了近年来光电突触器件与光电神经元器件取得的系列研究进展, 从器件结构、材料体系、工作模式、机理解释等方面进行了重点阐述, 并详细介绍了其在人工视觉系统、人工感知系统与神经形态计算等领域的应用. 光电神经形态器件经过近几年的发展取得了诸多重要进展,

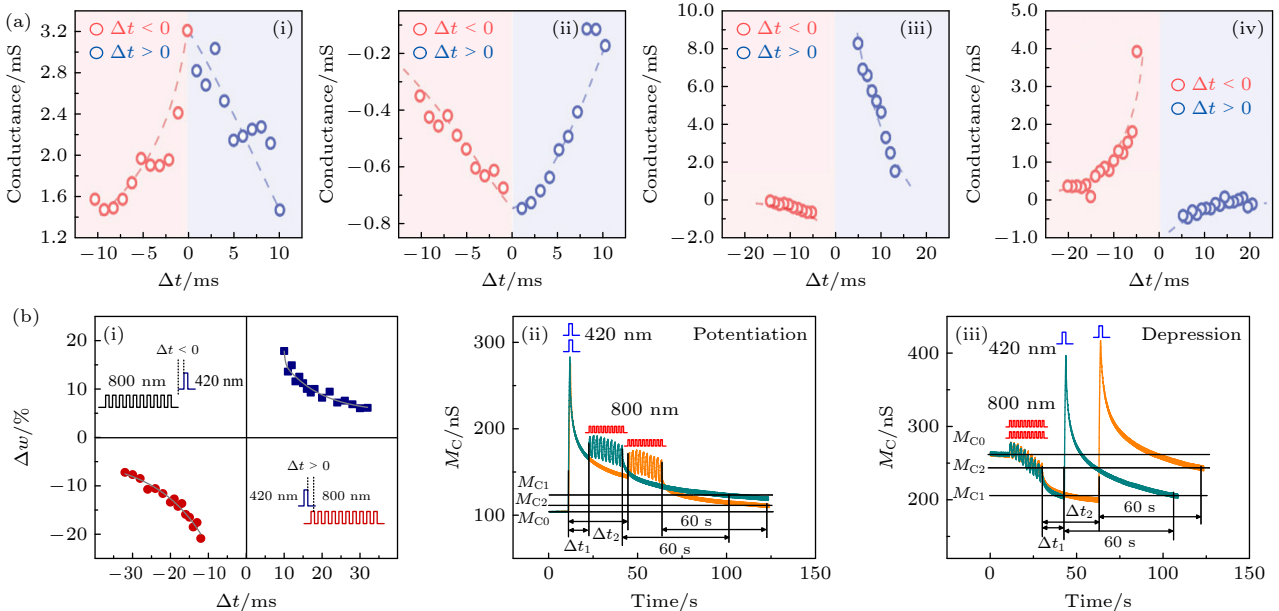


图 14 光电神经形态器件在 STDP 学习规则模拟中的应用 (a) 基于 $\text{ReSe}_2/\text{h-BN}/\text{Gr}$ 光电晶体管实现的四种 STDP 学习规则^[43]; (b) 基于全光控忆阻器实现的 STDP 学习规则^[30]

Fig. 14. STDP learning rules based on optoelectronic neuromorphic devices: (a) Four STDP learning rules based on $\text{ReSe}_2/\text{h-BN}/\text{Gr}$ phototransistors^[43]; (b) STDP learning rules based on all-optically controlled memristor^[30].

然而仍处于研究的初期阶段,在光敏材料合成、器件/阵列构筑以及功能应用等方面面临诸多关键科学问题和技术挑战。

首先在材料制备方面.目前用于光电神经形态器件的光敏材料主要分为氧化物半导体材料、钙钛矿材料及新型二维材料.其中氧化物半导体材料具有优异的热化学稳定性、良好的光电特性及较为成熟的制备工艺,有利于器件的大规模集成.因此,基于氧化物半导体材料的光电神经形态器件研究最为广泛,取得了系列重要研究进展.然而,因受其带隙限制,氧化物半导体往往只对紫外光具有高效响应,而在可见及红外波段响应较差或者不响应,限制了器件的应用场景.因此,开发具有宽光谱高效响应的氧化物半导体材料,是未来该领域发展的重要方向之一.除了传统氧化物半导体材料,以钙钛矿和低维材料为代表的新型光敏材料因其具有优异的光电特性,在光电神经形态器件上也得到广泛关注.虽然新型光敏材料在一定程度上提高了器件光响应度、拓宽了响应波长范围,然而由于其制备工艺不成熟,难以保证器件的稳定性和重复性,给未来器件大规模集成应用带来很大挑战。

然后是器件/阵列构筑方面.光电神经形态器件经过近几年的发展,虽然在突触与神经元功能模拟上取得了许多重要成果,然而绝大部分研究还停留在单一器件的改性以及简单类脑功能的模拟上,很少涉及包含多个器件的硬件网络,这些工作离构建最简单的神经形态芯片还有很远的距离.限制器件集成应用的因素主要有以下几个方面.1) 器件稳定性.光电神经形态器件的大规模集成应用,需要器件与器件之间以及单个器件不同循环之间具有优异的均一性和稳定性.然而目前光电神经形态器件的研究还处于初级阶段,器件工作机制不明确、制备工艺不成熟,使得器件性能还无法满足大规模集成的要求.2) 器件能耗.人类大脑功能强大,功耗只有 20 W 左右,单个突触行为的能耗更是仅约为 10 fJ,然而目前开发的光电神经形态器件能耗普遍在微焦量级,远远大于生物突触和神经元,高能耗问题严重制约了器件的集成密度.3) 全光调控.对于理想的光电神经形态器件应该是可全光调控的,即可以直接利用外界光信号驱动实施功能模拟,以此简化操作方式、降低能耗.然而目前报道的光电神经形态器件往往需要光信号和电信号的共同作用,不仅增加了操作复杂性、带来了高能耗,

而且会产生大量焦耳热,影响器件稳定性.虽然近期报道了有关全光控忆阻器、晶体管的研究工作,但全光控技术依然存在诸多挑战,需进一步深入研究.4) 光信号引入方案.光电神经形态器件在工作过程中往往需要实现各个器件的独立光信号控制,例如基于光电突触器件的人工神经网络学习过程中,需要根据目标不断利用光信号调控每个突触器件的权值.然而目前报道的实施方案,主要是利用 LED、氙灯、激光器等光源非集成式地照射器件,只能用于对单个器件以及多个器件组成的简单阵列的控制,而无法用于大规模阵列.因此,如何实现大规模阵列中每个器件的独立光信号控制具有很大的挑战.值得庆幸的是,各种新型显示技术以及光波导技术的快速发展,给这一问题提供了新的思路.实现光波导或 LED 与光电神经形态器件的无缝集成是解决光信号引入的有效方案,值得进一步研究。

最后是功能应用方面.光电神经形态器件虽然在视觉模拟、人工感知系统以及神经形态计算等方面得到初步应用,然而在应用功能上还很简单,主要是基于突触和神经元的部分功能实现简单图像的探测、预处理与记忆等,要实现较为复杂功能(例如,图像识别)必须借助软件算法和传统电路.器件稳定性以及器件之间的性能差异等所带来的诸多非理想因素会影响了器件功能模拟的精度,也成为限制器件复杂应用的重要原因.此外,对于理想的光电神经形态器件不仅可以完成光信息的探测,而且实时处理探测到的信号,并将处理后的结果原位存储,这一特性对构建感/存/算一体化的新型人工视觉系统具有重要意义.然而目前报道的光电神经形态器件只能实现一些初级的感/存/算一体化,有待进一步探索。

总之,在人类社会智能化技术飞速发展的今天,光电神经形态器件的研究即面临重大发展机遇,又存在严峻挑战.构建性能优异、功能多样以及超低能耗的光电神经形态器件,实现器件在神经形态芯片中的大规模集成应用需要国内外研究者的共同努力.希望在不久的将来,这一目标可以实现。

参考文献

- [1] Turing A M 1937 *Proc. London Math. Soc.* **42** 230
- [2] Von Neuman J 1993 *IEEE Ann. Hist. Comput.* **15** 27
- [3] Zidan M A, Strachan J P, Lu W D 2018 *Nat. Electron.* **1** 22

- [4] Attwell D, Laughlin S B 2001 *Cereb. Blood Flow Metab.* **21** 1133
- [5] Chen Z, Ríos C, Pernice W H P, Wrigh C D, Bhaskara H 2017 *Sci. Adv.* **3** e1700160
- [6] Drachman D A 2005 *Neurology* **64** 2004
- [7] Indiveri G, Linares-Barranco B, Legenstein R, Deligeorgis G, Prodromakis T 2013 *Nanotechnology* **24** 384010
- [8] Indiveri G, Liu S C 2015 *Proc. IEEE* **103** 1379
- [9] Mead C 1990 *Proc. IEEE* **78** 1629
- [10] Merolla P A, Arthur J V, Alvarez-Icaza R, et al. 2014 *Science* **345** 668
- [11] Shen J C, Ma D, Gu Z H, Zhang M, Zhu X L, Xu X Q, Xu Q, Shen Y J, Pan G 2016 *Sci. China Inf. Sci.* **59** 023401
- [12] Jo S H, Chang T, Ebong I, Bhadviya B B, Mazumder P, Lu W 2010 *Nano Lett.* **10** 1297
- [13] Prezioso M, Merrikkh-Bayat F, Hoskins B D, Adam G C, Likharev K K, Strukov D B 2015 *Nature* **521** 61
- [14] Ohno T, Hasegawa T, Tsuruoka T, Terabe K, Gimzewski J K, Aono M 2011 *Nat. Mater.* **10** 591
- [15] Han W, Tellez L A, Rangel M Jr, Motta S C, Zhang X, Perez I O, Canteras N S, Shammah-Lagnado S J, van den Pol A N, de Araujo I E 2017 *Cell* **168** 311
- [16] 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
- [17] Mennel L, Symonowicz J, Wachter S, Polyushkin D K, Molina-Mendoza A J, Mueller T 2020 *Nature* **579** 62
- [18] Han J S 2009 *Neuroscience* (Beijing: Peking University Medical Press) pp139–145 (in Chinese) [韩济生 2009 神经科学 (北京大学医学出版社) 第139—145页]
- [19] Yonezu H, Miho A, Himeno T, Pak K, Takano Y 1989 *Electron. Lett.* **25** 670
- [20] Krishnamoorthy A V, Yayla G, Esener S C 1992 *IEEE T. Neural Networ.* **3** 404
- [21] Wen Z, Frahat N H, Lin S Y 1994 *Opt. Lett.* **19** 1394
- [22] Shainline J M, Buckley S M, McCaughan A N, Chiles J, Jafari-Salim A, Mirin R P, Nam S W 2018 *J. Appl. Phys.* **124** 152130
- [23] Han J K, Geum D M, Lee M W, Yu J M, Kim S K, Kim S, Choi Y K 2020 *Nano Lett.* **20** 8781
- [24] Bliss T V P, Collingridge G L 1993 *Nature* **361** 31
- [25] Zhuge X, Wang J R, Zhuge F 2019 *Phys. Status Solidi-R* **13** 1900082
- [26] Agnus G, Zhao W, Derycke V, Filoramo A, Lhuillier Y, Lenfant S, Vuillaume D, Gamrat C, Bourgoin J P 2010 *Adv. Mater.* **22** 702
- [27] Hu D C, Yang R, Jiang L, Guo X 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 6463
- [28] Zhu X, Lu W D 2018 *ACS Nano* **12** 1242
- [29] Ham S, Choi S, Cho H, Na S I, Wang G 2019 *Adv. Funct. Mater.* **29** 1806646
- [30] Hu L X, Yang J, Wang J R, Cheng P H, Chua L O, Zhuge F 2020 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2005582
- [31] Wang Y, Yang J, Ye W B, She D H, Chen J R, Lv Z Y, Roy V A L, Li H L, Zhou K, Yang Q, Zhou Y, Han S T 2019 *Adv. Electron. Mater.* **6** 1900765
- [32] Pradhan B, Das S, Li J, Chowdhury F, Cherusseri J, Pandey D, Dev D, Krishnaprasad A, Barrios E, Towers A, Gesquiere A, Tetard L, Roy T, Thomas J 2020 *Sci. Adv.* **6** eaay5225
- [33] Ahmed T, Tahir M, Low M X, Ren Y, Tawfik S A, Mayes E L H, Kuriakose S, Nawaz S, Spencer M J S, Chen H, Bhaskaran M, Sriram S, Walia S 2021 *Adv. Mater.* **33** e2004207
- [34] Hou Y X, Li Y, Zhang Z C, Li J Q, Qi D H, Chen X D, Wang J J, Yao B W, Yu M X, Lu T B, Zhang J 2021 *ACS Nano* **15** 1497
- [35] Feldmann J, Youngblood N, Wright C D, Bhaskaran H, Pernice W H P 2019 *Nature* **569** 208
- [36] Luo Z D, Xia X, Yang M M, Wilson N R, Gruverman A, Alexe M 2020 *ACS Nano* **14** 746
- [37] Guo F, Song M L, Wong M C, Ding R, Io W F, Pang S Y, Jie W J, Hao J H 2021 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2108014
- [38] Wang G Z, Wang R B, Kong W Z, Zhang J H 2018 *Cogn. Neurodyn.* **12** 615
- [39] Yu J R, Yang X X, Gao G Y, Xiong Y, Wang Y F, Han J, Chen Y H, Zhang H, Sun Q J, Wang Z L 2021 *Sci. Adv.* **7** eabd9117
- [40] Psaltis D, Lin S 1991 *Proc. SPIE* **1562** 204
- [41] Wu Q T, Dang B J, Lu C Y, Xu G W, Yang G H, Wang J W, Chuai X C, Lu N D, Geng D, Wang H, Li L 2020 *Nano Lett.* **20** 8015
- [42] Tan H W, Zhou Y F, Tao Q Z, Rosen J, van Dijken S 2021 *Nat. Commun.* **12** 1120
- [43] Tsai M Y, Lee K C, Lin C Y, Chang Y M, Watanabe K, Taniguchi T, Ho C H, Lien C H, Chiu P W, Lin Y F 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2105345
- [44] Nicholls J G, Martin A R, Fuchs P A, Brown D A, Diamond M E, Weisblat D A (translated by Yang X L) 2014 *From Neuron to Brain, Fifth Edition* (Beijing: Science Press) p10 (in Chinese) [尼克尔斯 J G, 马丁 A R, 福克斯 P A, 布朗 D A, 戴蒙特 M E, 韦斯勃拉脱 D A 著 (杨雄里 译) 2014 从神经元到脑: 第5版 (北京: 科学出版社) 第10页]
- [45] Kandel E R, Squire L R 2000 *Science* **290** 1113
- [46] Bi G, Poo M 1998 *J. Neurosci.* **18** 10464
- [47] Lee G, Baek J H, Ren F, Pearton S J, Lee G H, Kim J 2021 *Small* **17** e2100640
- [48] Fioravante D, Regehr W G 2011 *Curr. Opin. Neurobiol.* **21** 269
- [49] Abbott L F, Regehr W G 2004 *Nature* **431** 796
- [50] Hennig M H 2013 *Front Comput. Neurosci.* **7** 154
- [51] Montgomery J M, Madison D V 2004 *Trends Neurosci.* **27** 744
- [52] Rachmuth G, Shouval H Z, Bear M F, Poon C S 2011 *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* **108** E1266
- [53] Zhao Y H, Liu B, Yang J L, He J, Jiang J 2020 *Chin. Phys. Lett.* **37** 088501
- [54] Ren K, Zhang K J, Qin X Z, Ren H X, Zhu S H, Yang F, Sun B, Zhao Y, Zhang Y 2021 *Acta Phys. Sin.* **70** 078701 (in Chinese) [任宽, 张珂嘉, 秦溪子, 任焕鑫, 朱守辉, 杨峰, 孙柏, 赵勇, 张勇 2021 物理学报 **70** 078701]
- [55] Chua L 1971 *IEEE Trans. Circuit Theory* **18** 507
- [56] Kumar M, Abbas S, Kim J 2018 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **10** 34370
- [57] Kumar M, Ban D K, Kim S M, Kim J, Wong C P 2019 *Adv. Electron. Mater.* **5** 1900467
- [58] Wang W X, Gao S, Li Y, Yue W J, Kan H, Zhang C W, Lou Z, Wang L L, Shen G Z 2021 *Adv. Funct. Mater.* **31** 2101201
- [59] Zhao X N, Wang Z Q, Li W T, Sun S W, Xu H Y, Zhou P, Xu J Q, Lin Y, Liu Y C 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 1910151
- [60] Wang Y, Yang J, Wang Z P, Chen J R, Yang Q, Lv Z Y, Zhou Y, Zhai Y B, Li Z X, Han S T 2019 *Small* **15** e1805431
- [61] Zhou Y, Yew K S, Ang D S, Kawashima T, Bera M K, Zhang H Z, Bersuker G 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 072107
- [62] Zhou Y, Liu D N, Wang J H, Cheng Z Q, Liu L, Yang N,

- Liu Y X, Xia T, Liu X Y, Zhang X, Ye C, Xu Z, Xiong W, Chu P K, Yu X F 2020 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **12** 25108
- [63] Maier P, Hartmann F, Rebello Sousa Dias M, Emmerling M, Schneider C, Castelano L K, Kamp M, Marques G E, Lopez-Richard V, Worschech L, Höfling S 2016 *Appl. Phys. Lett.* **109** 023501
- [64] Shan X Y, Zhao C Y, Wang X N, Wang Z Q, Fu S C, Lin Y, Zeng T, Zhao X N, Xu H Y, Zhang X T, Liu Y C 2021 *Adv. Sci.* **9** 2104632
- [65] Li H L, Jiang X T, Ye W B, Zhang H, Zhou L, Zhang F, She D H, Zhou Y, Han S T 2019 *Nano Energy* **65** 104000
- [66] Diorio C, Hasler P, Minch A, Mead C A 1996 *IEEE Trans. Electron Devices* **43** 1972
- [67] Zhu L Q, Xiao H, Liu Y H, Wan C J, Shi Y, Wan Q 2015 *Appl. Phys. Lett.* **107** 143502
- [68] Zhai Y B, Zhou Y, Yang X Q, Wang F, Ye W B, Zhu X J, She D H, Lu W D, Han S T 2020 *Nano Energy* **67** 104262
- [69] Qian C, Oh S, Choi Y, Kim J H, Sun J, Huang H, Yang J, Gao Y, Park J H, Cho J H 2019 *Nano Energy* **66** 104095
- [70] Sun J, Oh S, Choi Y, Seo S, Oh M J, Lee M, Lee W B, Yoo P J, Cho J H, Park J H 2018 *Adv. Funct. Mater.* **28** 1804397
- [71] Yin L, Han C, Zhang Q T, Ni Z Y, Zhao S Y, Wang K, Li D S, Xu M S, Wu H Q, Pi X D, Yang D R 2019 *Nano Energy* **63** 103859
- [72] Wang J X, Chen Y, Kong L A, Fu Y, Gao Y L, Sun J 2018 *Appl. Phys. Lett.* **113** 151101
- [73] Yang C M, Chen T C, Verma D, Li L J, Liu B, Chang W H, Lai C S 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 2001598
- [74] Yang X Y, Xiong Z Y, Chen Y J, Ren Y, Zhou L, Li H L, Zhou Y, Pan F, Han S T 2020 *Nano Energy* **78** 105246
- [75] McCulloch W S, Pitts W 1990 *Bull. Math. Biol.* **52** 99
- [76] Hodgkin A L, Huxley A F 1990 *Bull. Math. Biol.* **52** 25
- [77] Shainline J M, Buckley S M, Mirin R P, Nam S W 2017 *Phys. Rev. Applied* **7** 034013
- [78] Kumar M, Kim H S, Kim J 2019 *Adv. Mater.* **31** e1900021
- [79] Chen S, Lou Z, Chen D, Shen G Z 2018 *Adv. Mater.* **30** 1705400
- [80] Kwon S M, Cho S W, Kim M, Heo J S, Kim Y H, Park S K 2019 *Adv. Mater.* **31** e1906433
- [81] Chen Q L, Zhang Y, Liu S Z, Han T T, Chen X H, Xu Y Q, Meng Z Q, Zhang G L, Zheng X J, Zhao J J, Cao G Z, Liu G 2020 *Adv. Intell. Syst.* **2** 2000122
- [82] Hong S, Choi S H, Park J, Yoo H, Oh J Y, Hwang E, Yoon D H, Kim S 2020 *ACS Nano* **14** 9796
- [83] Zhou F C, Zhou Z, Chen J W, Choy T H, Wang J L, Zhang N, Lin Z Y, Yu S M, Kang J F, Wong H P, Chai Y 2019 *Nat. Nanotechnol.* **14** 776
- [84] Qiu W J, Huang Y L, Kong L A, Chen Y, Liu W R, Wang Z, Sun J, Wan Q, Cho J H, Yang J L, Gao Y L 2020 *Adv. Funct. Mater.* **30** 2002325
- [85] Wu L D, Wang Z W, Wang B W, Chen Q Y, Bao L, Yu Z, Yang Y F, Ling Y T, Qin Y B, Tang K C, Cai Y M, Huang R 2021 *Nanoscale* **13** 3483
- [86] Wang C Y, Liang S J, Wang S, Wang P F, Li Z A, Wang Z R, Gao A Y, Pan C, Liu C, Liu J, Yang H F, Liu X W, Song W H, Wang C, Cheng B, Wang X M, Chen K J, Wang Z L, Watanabe K, Taniguchi T, Yang J J, Miao F 2020 *Sci. Adv.* **6** eaba6173
- [87] Jang H, Liu C Y, Hinton H, Lee M H, Kim H, Seol M, Shin H J, Park S, Ham D 2020 *Adv. Mater.* **32** e2002431
- [88] Tan H W, Tao Q Z, Pande I, Majumdar S, Liu F, Zhou Y F, Persson P O A, Rosen J, van Dijken S 2020 *Nat. Commun.* **11** 1369
- [89] Kim S, Roe D G, Choi Y Y, Woo H, Park J, Lee J I, Choi Y, Jo S B, Kang M S, Song Y J, Jeong S, Cho J H 2021 *Sci. Adv.* **7** eabe3996
- [90] Karbalaee Akbari M, Zhuiykov S 2019 *Nat. Commun.* **10** 3873
- [91] Zhu Y B, Wu C X, Xu Z W, Liu Y, Hu H L, Guo T L, Kim T W, Chai Y, Li F S 2021 *Nano Lett.* **21** 6087
- [92] Wan C J, Cai P Q, Guo X T, Wang M, Matsuhisa N, Yang L, Lv Z S, Luo Y F, Loh X J, Chen X D 2020 *Nat. Commun.* **11** 4602
- [93] Yang X, Fang Y C, Yu Z Z, Wang Z W, Zhang T, Yin M H, Lin M, Yang Y C, Cai Y M, Huang R 2016 *Nanoscale* **8** 18897
- [94] Rankin C H, Abrams T, Barry R J, Bhatnagar S, Clayton D F, Colombo J, Coppola G, Geyer M A, Glanzman D L, Marsland S, McSweeney F K, Wilson D A, Wu C F, Thompson R F 2009 *Neurobiol. Learn. Mem.* **92** 135
- [95] He H K, Yang R, Zhou W, Huang H M, Xiong J, Gan L, Zhai T Y, Guo X 2018 *Small* **15** 1800079
- [96] Zhao B, Xiao M, Shen D Z, Zhou Y N 2020 *Nanotechnology* **31** 125201
- [97] Gong G D, Gao S, Xie Z L, Ye X Y, Lu Y, Yang H L, Zhu X J, Li R W 2021 *Nanoscale* **13** 1029
- [98] Akbari M K, Hu J, Verpoort F, Lu H L, Zhuiykov S 2020 *Nano-Micro Lett.* **12** 83
- [99] Zhou L, Zhang S R, Yang J Q, Miao J Y, Ren Y, Shan H Q, Xu Z X, Zhou Y, Han S T 2020 *Nanoscale* **12** 1484
- [100] Hawkins R D, Byrne J H 2015 *Cold Spring Harb. Perspect. Biol.* **7** a021709
- [101] 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
- [102] Ahmed T, Kuriakose S, Mayes E L H, Ramanathan R, Bansal V, Bhaskaran M, Sriram S, Walia S 2019 *Small* **15** e1900966
- [103] Feldman D E 2012 *Neuron* **75** 556
- [104] Abbott L F, Nelson S B 2000 *Nat. Neurosci.* **3** 1178
- [105] Caporale N, Dan Y 2008 *Annu. Rev. Neurosci.* **31** 25
- [106] Li Y, Zhong Y P, Zhang J J, Xu L, Wang Q, Sun H J, Tong H, Cheng X M, Miao X S 2014 *Sci. Rep.* **4** 4906

SPECIAL TOPIC—Physical electronics for brain-inspired computing

Optoelectronic neuromorphic devices and their applications*Shen Liu-Feng¹⁾²⁾ Hu Ling-Xiang²⁾ Kang Feng-Wen²⁾Ye Yu-Min¹⁾ Zhuge Fei^{2)3)†}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) (*Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China*)

(Received 16 January 2022; revised manuscript received 22 February 2022)

Abstract

Conventional computers based on the von Neumann architecture are inefficient in parallel computing and self-adaptive learning, and therefore cannot meet the rapid development of information technology that needs efficient and high-speed computing. Owing to the unique advantages such as high parallelism and ultralow power consumption, bioinspired neuromorphic computing can have the capability of breaking through the bottlenecks of conventional computers and is now considered as an ideal option to realize the next-generation artificial intelligence. As the hardware carriers that allow the implementing of neuromorphic computing, neuromorphic devices are very critical in building neuromorphic chips. Meanwhile, the development of human visual systems and optogenetics also provides a new insight into how to study neuromorphic devices. The emerging optoelectronic neuromorphic devices feature the unique advantages of photonics and electronics, showing great potential in the neuromorphic computing field and attracting more and more attention of the scientists. In view of these, the main purpose of this review is to disclose the recent research advances in optoelectronic neuromorphic devices and the prospects of their practical applications. We first review the artificial optoelectronic synapses and neurons, including device structural features, working mechanisms, and neuromorphic simulation functions. Then, we introduce the applications of optoelectronic neuromorphic devices particularly suitable for the fields including artificial vision systems, artificial perception systems, and neuromorphic computing. Finally, we summarize the challenges to the optoelectronic neuromorphic devices, which we are facing now, and present some perspectives about their development directions in the future.

Keywords: optoelectronic neuromorphic devices, optoelectronic synapse, optoelectronic neuron, neuromorphic computing

PACS: 85.60.-q, 72.40.+w, 85.35.-p, 87.18.Sn

DOI: [10.7498/aps.71.20220111](https://doi.org/10.7498/aps.71.20220111)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. U20A20209, 61874125), the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (Grant No. XDB32050204), the Natural Science Foundation of Zhejiang Province, China (Grant Nos. LD19E020001, LQ22F040003), and the Ningbo Natural Science Foundation, China (Grant No. 2021J139).

† Corresponding author. E-mail: zhugefei@nimte.ac.cn