光电神经突触器件研究进展

李雅瑶, 王越, 杨德仁, 皮孝东*

浙江大学硅材料国家重点实验室和材料科学与工程学院, 杭州 310027

* 通信作者. E-mail: xdpi@zju.edu.cn

收稿日期: 2019-11-18; 接受日期: 2019-12-19; 网络出版日期: 2020-05-25

国家重点研发计划 (批准号: 2017YFA0205704, 2018YFB2200101)、国家自然科学基金委员会重大研究计划培育项目 (批准号: 91964107)、国家自然科学基金委员会面上项目 (批准号: 61774133) 和国家自然科学基金委员会创新研究群体项目 (批准号: 61721005) 资助

摘要 神经形态计算 (类脑计算) 以其自适应学习、高并行计算和低功耗等优点, 被认为是最有希望解决冯·诺依曼 (von Neumann) 瓶颈的方法之一. 实现神经形态计算的重要前提是开发能模拟生物突触行为的神经突触器件. 电学神经突触器件是首先发展起来的神经突触器件, 但是它们在统筹考虑带宽、连接、密度等因素下的整体优化面临着很大的挑战. 近年来, 把光引入神经突触器件, 研制光电神经突触器件, 为神经突触器件的发展带来了新机遇. 对神经突触器件而言, 光不仅具备电难以实现的高带宽、低串扰、低功率和无延迟等特性, 还可以直接模拟视觉等至关重要的神经行为. 光电神经突触器件作为基于光电集成的人工神经网络的基础, 有望有力促进高性能和低功耗的神经形态计算的发展. 本文主要介绍了光电神经突触器件的基本性能和类别, 展示了已经实现的光电神经突触器件的模拟应用, 并展望了今后光电神经突触器件的发展.

关键词 光电神经突触器件, 突触可塑性, 能耗, 氧空位离化与去离化, 载流子俘获与释放

1 引言

依托冯·诺依曼 (von Neumann) 架构的现代数字计算机系统, 在处理复杂的结构性数学问题方面具有无可比拟的优势^[1,2], 已经度过了近半个世纪的黄金发展期. 然而, 随着现代社会信息化程度的日益加深, 传统的冯·诺依曼计算系统由于内存模块和处理器的物理分离将面临一系列问题, 如数据处理的能耗、计算速度的提升、非结构化实时化信息处理等^[3~5]. 未来的信息社会势必需要高能效、智能化的硬件架构作为支撑.

大脑作为自然界中最强大的信息处理器, 其高度并行、高效、容错、可重构的神经网络系统使超低功耗的高效率信息处理成为可能^[6~8]. 此外, 大脑还能处理大量复杂的非结构化、概率性信息, 如认

引用格式: 李雅瑶, 王越, 杨德仁, 等. 光电神经突触器件研究进展. 中国科学: 信息科学, 2020, 50: 892–912, doi: 10.1360/SSI-2019-0248
Li Y Y, Wang Y, Yang D R, et al. Recent progress on optoelectronic synaptic devices (in Chinese). Sci Sin Inform, 2020, 50: 892–912, doi: 10.1360/SSI-2019-0248

知学习、图像识别、语言理解等等^[9,10]. 因此, 模拟人脑的数据处理方式, 构建具有自主学习功能的神经形态计算, 是解决“冯·诺依曼瓶颈”, 发展下一代计算机的最佳选择之一^[11~14].

人脑由 $\sim 10^{11}$ 个神经元和 $\sim 10^{15}$ 个突触组成^[7]. 神经元是人脑功能的基本单元, 而突触是神经元进行信号传递和信息交换的重要结构. 依托传统冯·诺依曼计算机的软件模拟方法^[15], 或者构建专用的互补金属氧化物半导体 (complementary metal oxide semiconductor, CMOS) 集成电路的硬件方法^[16] 模拟突触功能, 是人们首先想到的神经形态计算的实现途径. 但这两种方法由于占据空间大、能耗高, 具有很大的局限性. 因此, 制备可以在低能耗下模拟突触功能的神经突触器件, 在神经突触器件中再现突触的可塑性, 进而实现神经形态计算, 具有更加诱人的发展前景.

考虑到生物神经系统会通过神经元传递的电信号 (动作电位) 进行信息传递, 研究人员早期主要研制电刺激的神经突触器件, 如三端晶体管^[17~20]、两端忆阻器^[21~24] 和原子开关^[25~27] 等都被用作了电刺激的神经突触器件. 这种基于微纳电子技术的突触器件充分利用了现有的器件制备技术, 易于大规模集成. 然而, 带宽-连接-密度的权衡使电刺激神经网络的运行速度受到限制, 可能出现严重的延迟和功率损失等互联问题^[28].

近年来, 引入光构建光电神经突触器件, 逐渐成为神经突触器件研究领域的一个研究热点^[29]. 到目前为止, 光在神经突触器件中主要扮演 3 种角色: (1) 作为刺激输入信号, (2) 作为电刺激的辅助调控手段^[30,31], (3) 作为响应输出信号^[32,33]. 需要指出的是, 在报道的绝大多数光电神经突触器件中, 光被用作了刺激输入信号. 一方面, 非接触性的光输入具有电输入无法比拟的高带宽、低串扰、低功耗和无电阻电容 (resistance-capacitance, RC) 延迟优势. 另一方面, 光可以对覆盖范围内的突触实现全局 (global) 调控^[34], 也具有光遗传学揭示的对特定突触器件实现局部 (local) 调控的潜力^[35]. 最重要的是, 对光刺激的反应在生物的感知系统中起着至关重要的作用, 人类 70% 以上的信息来源于视觉^[36,37], 因而光刺激的光电神经突触器件能为重要的人类视觉的模拟奠定基础. 鉴于此, 本文主要关注目前报道的具有代表性的光刺激光电神经突触器件, 对其特征性能进行介绍, 按照其作用机制进行分类, 展示其模拟应用, 最后展望其今后的发展.

2 光电神经突触器件的基本性能

2.1 突触后兴奋/抑制

在生物神经系统中, 突触是不同神经元之间传递信息的重要结构. 突触由突触前 (一个神经元的轴突末梢)、突触后 (另一个神经元的树突或胞体) 以及它们之间的突触间隙组成, 如图 1(a)^[38] 所示. 当适当的动作电位作用于突触前时, 电压门控钙离子通道开放, 大量 Ca^{2+} 涌入膜内触发囊泡向突触间隙释放神经递质: 神经递质与突触后受体蛋白结合, 引起递质门控离子通道打开. 如果通透的离子 (如 Na^+ 或 K^+) 使突触后细胞瞬间去极化, 即引起突触后兴奋; 反之, 如果通透的离子 (如 Cl^-) 引起突触后细胞膜瞬间超极化, 则被称为突触后抑制^[39,40]. 兴奋性突触和抑制性突触之间的微妙平衡构成了正常的神经网络功能^[41].

光电神经突触器件的基本结构和生物突触十分类似: 对于三端 (两端) 器件, 源/漏 (上/下) 电极对应着突触前/后膜, 光脉冲可看作作用于突触前的动作电位, 而两电极间的活性材料中参与导电的粒子则相当于神经递质, 如图 1(b) 所示. 类似地, 光刺激会引起活性材料电导的增强和降低, 从而产生兴奋性突触后电流 (excitatory postsynaptic current, EPSC) 或抑制性突触后电流 (inhibitory postsynaptic current, IPSC).

图 1 (网络版彩图) (a) 生物突触示意图 [38]; (b) 两端/三端突触器件示意图

Figure 1 (Color online) (a) Schematics of a biological synapse [38] @Copyright 2016 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; (b) Schematics of artificial synaptic devices with 2 terminals or 3 terminals

生物系统中, 神经元的连接程度称为突触权重 (synaptic strength/weight). 突触后电流 (post-synaptic current, PSC) 的大小由突触权重决定. 通常认为突触器件的 PSC 与载流子的俘获和释放相关, 可以用拉伸指数模型来解释; PSC 随时间的衰减可以用 Kohlrausch 拉伸指数函数 (stretched-exponential function) 进行拟合 [22, 42]:

$$I = I_0 \exp \left[- \left(\frac{t}{\tau} \right)^\beta \right] + I_\infty, \quad (1)$$

其中 I_0 是指前因子, τ 是特征弛豫时间, β 是拉伸指数 (取值范围 0~1), I_∞ 是最终稳定时的电流水平. 生物突触的 PSC 随刺激持续时间的不同而不同 [43], 引起有效刺激的特征脉冲宽度约为数十毫秒 [39]. 光电神经突触器件的 PSC 也可以通过光照时间、光照强度等来进行调控. 对于晶体管型的光电神经突触, 其 PSC 还可能受到栅极电压、漏极电压的影响. 图 2 [44~48] 给出了影响光电神经突触器件的突触后电流的常见因素. 一般情况下, 由于光吸收饱和, PSC 的增加最终会趋于饱和 [49].

2.2 突触可塑性

突触权重依赖于历史刺激, 可以根据突触前、后神经元的活动进行精确调整, 这被称为突触的可塑性 [50, 51]. 突触可塑性是生物神经突触的一项重要特征, 也是人脑学习记忆的生物学基础, 丰富多样的突触可塑性使得神经突触在进行信息处理时表现出各种不同的功能 [52].

按照持续时间的差别, 突触可塑性通常可分为短程可塑性 (short-term plasticity, STP) 和长程可塑性 (long-term plasticity, LTP) [53, 54]. 对生物系统而言, 短程可塑性涉及已有蛋白质的共价修饰, 突触权重只是发生短暂的变化; 而长程可塑性则依赖于基因表达的激活和蛋白质的重新合成, 突触权重会发生长时间甚至永久变化 [55, 56]. 光电突触器件最基本要求就是利用光脉冲作为输入信号实现突触可塑性的模拟. 下面将介绍几种典型的突触可塑性, 以及与记忆相关的突触学习规则 (learning rule).

2.2.1 短程可塑性

双脉冲易化 (paired-pulse facilitation, PPF) 是短程可塑性的一种重要表现, 存在于生物兴奋性突触和抑制性突触, 是指连续两次突触刺激引起的突触后反应增强的一种现象 [19, 57~60]. 在生物神经系统中, PPF 在识别和解码时间分辨信息 (如视觉和听觉信号) 中发挥着重要作用 [17, 19, 51, 59, 61]. 图 3(a) 给出了生物突触易化增益百分比对时间间隔的依赖性: 刺激间隔越小, PSC 的增强程度越明显. 另外, 脉冲持续时间增加也会引起这种增强程度的增加 [51]. PPF 指数 (A_2/A_1) 就是衡量 PSC 增益的参数, 它对时间间隔的依赖性遵循双指数函数:

图 2 (网络版彩图) (a) 一种基于石墨烯混合光电晶体管的突触器件的 Δ PSC 幅度对栅压的依赖性; (b) 该石墨烯混合光电晶体管的 Δ IPSC 和 Δ EPSC 对脉冲持续时间的依赖性^[44]; (c) 基于 pn 结修饰的氧化物薄膜晶体管的光电突触器件的 EPSC 对漏极电压的依赖性^[45]; (d) 一种全氧化物基高透明光突触的 EPSC 对光脉冲强度的依赖性^[46]; (e) 一种 MoO_x 光电阻式随机存储器的 EPSC 和弛豫时间对不同光照强度下脉冲宽度的依赖性^[47]; (f) Si-NC/ WSe_2 突触器件的 EPSC 对不同波长光的脉冲持续时间的依赖性^[48]

Figure 2 (Color online) (a) Dependence of the Δ PSC amplitudes on gate voltage for a synaptic device based on graphene hybrid phototransistor; (b) dependence of Δ IPSC and Δ EPSC on spike duration for the graphene hybrid phototransistor^[44] @copyright 2017 IOP Publishing Ltd.; (c) dependence of the EPSC on drain voltage for a optoelectronic neuromorphic device based on pn-junction-decorated oxide thin-film transistor^[45] @Copyright 2019 Elsevier Ltd.; (d) dependence of the EPSC on photonic pulse intensity for an all-oxide-based highly transparent photonic synapse^[46] @Copyright 2018 American Chemical Society; (e) dependence of EPSC and relaxation time on pulse width at different light intensities for a MoO_x optoelectronic resistive random access memory^[47] @Copyright 2019 Springer Nature; (f) dependence of the EPSC on the duration time of the laser spikes with different wavelengths for the Si-NC/ WSe_2 synaptic device^[48] @Copyright 2018 IEEE

$$\text{PPF Index} = C_1 \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_1}\right) + C_2 \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_2}\right), \quad (2)$$

其中 C_1 (C_2) 和 τ_1 (τ_2) 分别表示初始易化程度和快 (慢) 过程的特征弛豫时间^[51, 59, 60]. 对于生物神经突触, τ_2 比 τ_1 约大一个数量级^[51]. 光电神经突触器件的 PPF 行为与生物突触类似, 无论是兴奋性神经突触器件 (图 3(b)) 还是抑制性神经突触器件 (图 3(c)) 都具有 PPF 行为. 此外, PPF 对时间间隔的依赖性还会受到栅压、光照强度、刺激波长等因素的影响, 如图 3(d)~(f)^[62~66] 所示.

2.2.2 突触可塑性转变

生物突触的短程可塑性和长程可塑性分别对应着 Atkinson 和 Shiffrin 在 1968 年提出的心理记忆模型中的短期记忆 (short-term memory, STM) 和长期记忆 (long-term memory, LTM)^[67]. STM 储存在海马体中, 与突触权重暂时性微弱增强有关, 只持续几秒到几分钟便会完全消失; 而经过“巩固 (consolidation)”, 即反复演练, 突触权重会持续增强, 这样 STM 可以转移到大脑皮层形成 LTM, 可以持续几个小时, 几年, 甚至一辈子^[56, 67~69] (如图 4^[70] 所示).

图 3 (网络版彩图) (a) 颗粒细胞和浦肯野细胞之间突触的双脉冲易化行为^[62]; (b) 一种基于石墨烯的杂化光电晶体管的 PPF 行为^[63]; (c) 一种基于 InAs 纳米线的光电晶体管的 PPF 行为^[64]; (d) 不同栅压下 PPF 指数对脉冲时间间隔的依赖性^[65]; (e) 不同光照强度下 PPF 指数对脉冲时间间隔的依赖性; (f) PPF 指数对不同波长脉冲的时间间隔依赖性^[66]

Figure 3 (Color online) (a) Paired-pulse facilitation at the granule cell to Purkinje cell synapse [62] @Copyright 1996 Society for Neuroscience; (b) the PPF behavior of a graphene hybrid phototransistor [63] @Copyright 2016 Optical Society of America; (c) PPF behaviors of an InAs nanowire phototransistor [64] @Copyright 2018 IOP Publishing Ltd.; (d) dependence of the PPF index on pulse intervals for the laser spikes with different gate biases [65] @Copyright 2018 IEEE; (e) dependence of the PPF index on pulse intervals for the laser spikes with different light pulse intensities; (f) dependence of the PPF index on pulse intervals for the laser spikes with different wavelengths [66] @Copyright 2018 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

图 4 一种典型的心理记忆模型的示意图^[70]

Figure 4 Schematic illustration of a typical memory model in psychology [70] @Copyright 2017 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

人脑的记忆水平与学习的强度有关^[71,72], 而光电神经突触器件也可以通过调节光刺激的强度即功率密度、脉冲宽度、次数和频率等, 使得突触权重逐渐由弱 (STP) 变强 (LTP), 发生短程可塑性向长程可塑性 (STP-to-LTP) 转变^[22,73~75] (如图 5^[76] 所示); 同时, PSC 的衰减时间 (τ) 和衰减后的稳态电流也随 STP 向 LTP 转变而增加^[74,77,78].

图 5 (网络版彩图) 在 STP-to-LTP 转变中沟道电导随 (a) 突触前光脉冲数量, (b) 突触前光脉冲强度和 (c) 突触前光脉冲宽度的变化情况 [76]

Figure 5 (Color online) Channel conductance change (ΔG) as a function of (a) presynaptic light pulse number, (b) presynaptic light pulse intensity, and (c) presynaptic light pulse width [76] ©Copyright 2019 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

2.2.3 长程可塑性学习规则

尖峰时序可塑性 (spike-timing-dependent plasticity, STDP) 是人脑信息处理过程中的一种重要的突触学习规则, 是 Hebbian 学习规则的补充和完善 [79, 80]. 由于具有形式上的简洁和理论上的合理性, 成功模拟 STDP 已经成为检验脉冲神经网络 (SNNs) 硬件系统的重要标准之一 [81, 82].

STDP 是指突触前和突触后神经活动的时序和间隔的变化 ($\pm \Delta t$, $\Delta t = t_{\text{pre}} - t_{\text{post}}$) 会引起突触权重的变化 (ΔW) [83]. 当突触前脉冲比突触后脉冲先到达时, 会引起突触权重增大, 出现长程增强 (long-term potentiation, LTP); 反之, 当突触后脉冲比突触前脉冲先到达时, 会引起突触权重减小, 出现长程抑制 (long-term depression, LTD) [84~88]. 突触前后脉冲信号的时间间隔 (Δt) 决定这种反馈的程度 (ΔW), 间隔越小, 反馈越强. 图 6(a) [39] 是海马体谷氨酸能神经突触的 STDP 行为. 生物神经系统中, ΔW 的时间间隔依赖性有图 6(b) [89] 所示的 4 种情况 [90, 91], 根据对称性不同, 分别满足下面两种函数关系 [92]:

$$\Delta W = A \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau}\right) + W_0 \quad (\text{非对称}), \quad (3)$$

$$\Delta W = A \exp\left(-\frac{\Delta t^2}{2\tau^2}\right) + W_0 \quad (\text{对称}), \quad (4)$$

其中 τ 是突触函数的拟合时间常数, A 和 W_0 都是时间常数.

电学神经突触器件可以通过设计突触前和突触后电脉冲的形状, 将时序的不同转变成电压幅值的不同, 从而实现 4 种不同形式的 STDP [38]. 而光电神经突触器件中光的引入使得事情更为复杂. Wang 等 [93] 报道了在一种依靠深紫外光激发突触功能的 InZnO 晶体管型神经突触器件中, 可以利用光 (pre) 电 (post) 混合刺激信号来实现 STDP, 如图 7 [93] 所示.

另一种重要的突触学习规则是尖峰频率依赖可塑性 (spike-rating-dependent plasticity, SRDP). 按照此规则, 突触的长程可塑性具有频率依赖性: 刺激频率很高时, 表现为长程增强 LTP; 当刺激频率较低时, 就会表现出 LTD [94, 95]. 图 8(a)~(c) [96, 97] 分别给出了生物视觉系统的 SRDP 和光电突触器件模拟的 SRDP. 另外, Yang 等 [65] 制备了一种基于 IGZO 的双电层光电晶体管还可通过栅压调控器件的 LTP/LTD 行为, 如图 8(d) [65] 所示.

图 6 (网络版彩图) (a) 海马体谷氨酸能神经突触中的时间依赖可塑性特性测试结果图 [39]; (b) STDP 的几种不同形式 [89]

Figure 6 (Color online) (a) STDP measurements in hippocampal glutamatergic synapses [39] @Copyright 1998 Society for Neuroscience; (b) four forms of STDP [89] @Copyright 2010 Shouval, Wang and Wittenberg

图 7 (网络版彩图) 一种深紫外光激发突触功能的 InZnO 晶体管所模拟的 STDP 学习行为 [93]

Figure 7 (Color online) STDP learning behaviors mimicked on a deep-ultraviolet-triggered InZnO phototransistors [93] @Copyright 2018 AIP Publishing. (a) and (b) The asymmetric Hebbian learning rule; (c) and (d) the symmetric Hebbian learning rule and the waveform of optical/electrical spike for achieving them

2.3 能耗

理想的神经突触器件至少应该满足两个条件: 一是能模拟重要的生物突触功能, 二是实现单次突触事件的超低能量消耗. 传统的 CMOS 电路模拟单次突触事件需要耗能 ~ 900 pJ [98], 而人脑进行大规模高效并行的信息处理时, 单次突触事件的能耗仅为 $1\sim 100$ fJ [20], 发展神经形态计算的一个重要意义就在于计算的低能耗. 低能耗是神经突触器件研究中的最具挑战性的性能指标之一.

目前关于光电神经突触器件的工作往往倾向于关注突触可塑性等功能的模拟, 而对能耗问题谈之甚少. 图 9 给出了文献中报道的光电神经突触器件的单个突触事件能耗计算方法的示意图和相应的公式. 其中, P 为光刺激的功率密度, S 为器件有效面积, t_0 (t_1) 为光刺激的开始 (结束) 时间 ($\Delta t = t_1 - t_0$), I 为器件电流, I_0 为器件在暗态时的电流, V 为施加在器件上的电压. 方法 1 只考虑光刺激的能量 (图 9(a)) [48, 99, 100], 方法 2 只考虑器件在光刺激下的电响应能耗 (图 9(b)) [46, 66], 方法 3

图 8 (网络版彩图) (a) 视皮层中依赖于生物经验的可塑性^[96]; (b) 不同频率的脉冲序列引起的 EPSCs; (c) ΔS 是突触前脉冲频率的函数^[97]; (d) 经过 50 个光脉冲后的 ΔS 是栅压的函数^[65]

Figure 8 (Color online) (a) Biological experience-dependent plasticity in the visual cortex^[96] ©Copyright 1996 Springer Nature; (b) EPSCs recorded in response to the stimulus train with different frequencies; (c) ΔS plotted as a function of presynaptic spike frequency^[97] ©Copyright 2019 The Royal Society of Chemistry; (d) ΔS after 50 light pulses plotted as a function of gate voltage^[65] ©Copyright 2018 IEEE

图 9 (网络版彩图) 光电突触器件单个突触事件能耗的计算方法示意图

Figure 9 (Color online) Schematic of calculation methods for energy consumption of single synaptic event in optoelectronic synaptic devices. (a) The 1st method; (b) the 2nd method; (c) the 3rd method

则考虑了光刺激的能量与暗态时电能耗的总和 (图 9(c))^[101]. 究竟哪种计算方法更合理, 目前大家还没有达成一致. 方法 1 告诉我们光刺激的能量越小则器件的能耗越低. 方法 2 说明对于给定的器件电压, 光电流越小则器件的能耗越低. 从方法 3 可知, 低的光刺激能量和低的暗态时的器件能耗有利于低器件能耗的实现. 为了可靠地比较光电神经突触器件的能耗, 有必要统一单个突触事件的能耗的计算方法. 笔者倾向于采用方法 2 来计算器件的能耗, 把光刺激的能量用于衡量器件对光刺激的敏感程度. 必须注意的是, 对于光电流衰减时间相当长的情况, 确定 Δt 时要把时间延长至光电流完全衰减完对器件的能耗计算具有重要影响.

然而, 不管采用哪种计算方法, 目前大多数器件的能耗仍比生物突触的高几个数量级, 把神经突触器件的能耗降至飞焦量级仍是挑战. 人们已经在采用缩短脉冲时间^[46, 66]、缩小器件尺寸^[20, 48]等措施来降低器件工作的能耗. 另外, 从器件集成的角度来看, 减少人工神经网络中其他部分 (如神经元和互连) 的功耗和降低单个神经突触器件的能耗同样重要^[12].

3 光电神经突触器件的类型

目前光电神经突触器件的研究处于起步阶段. 已经报道的光电神经突触器件无论是从功能材料和

器件结构还是从功能应用等方面看, 都呈现出多样性. 但是, 绝大多数的光电神经突触器件的工作机理依赖于半导体结构中的缺陷和载流子陷阱/势阱. 下面, 我们分别予以介绍.

3.1 氧空位的离化和去离化

氧化物半导体是制备光电神经突触器件的重要选择之一, 这类器件的突触特性主要来源于氧化物半导体中普遍存在的持续光电导 (persistent photoconductivity, PPC) 及其相关弛豫现象^[45, 93, 102, 103]. 尽管目前关于氧化物半导体中光生载流子的产生及复合机制没有统一的认识, 但是主流的看法是由氧空位 (V_O) 在光刺激下离化而带正电, 光刺激结束后发生缓慢的去离化过程所致^[104, 105]. 2016 年, Lee 等^[70] 制备了基于无定形 IGZO 的紫外光电神经突触器件, 通过对比实验发现氧化物半导体的 V_O 形成能越高, 光刺激后电流恢复到稳态的时间越长, 如图 10(a) 和 (b)^[70] 所示. 他们提出的工作机理是, V_O 在光刺激时会发生电离, 转变成 V_O^+/V_O^{2+} , 所释放的电子使得沟道电导增加. 但由于 V_O^+/V_O^{2+} 转变回 V_O 的能垒的存在, V_O^+/V_O^{2+} 需要很长时间才能被电子中和 (即电导降低). 2018 年, Wu 等^[106] 发现 IGZO 薄膜的成分会影响氧空位的含量 (如图 10(d) 和 (e)^[106] 所示), 进而影响光电流的大小和后续衰减时间, 这样进一步验证了氧空位在氧化物半导体 PPC 效应中的重要作用. Yu 等^[45] 认为式 (5) 和 (6) 表示的氧空位的离化/去离化过程是氧化物半导体 IGZO 的 PPC 效应的来源 (如图 10(e) 和 (f) 所示).

基于此, 他们在 IGZO 晶体管中引入 SnO_x 和 PEDOT:PSS (PP) 改变 IGZO 层中的氧空位缺陷态密度, 进而调节光生载流子弛豫过程和器件的突触行为, 如图 10(g)^[45] 所示.

除了上述三端晶体管结构的光电神经突触器件, Gao 等^[107] 在基于 ITO/Nb:SrTiO₃ 肖特基势垒的两端突触器件中也发现了类似现象. 器件最开始处于高阻态, 光刺激诱导 ITO/Nb:SrTiO₃ 界面的氧空位释放俘获的电子成为离化氧空位并产生附加电势, 于是势垒宽度降低, 电子隧穿几率增加, 器件转变为低阻态, 如图 11(a) 所示. 光刺激撤除后, 这些未被占据的亚稳态空位又会俘获电子去离化, 从而引起光电流的缓慢衰减. 他们利用 9 个 ITO/Nb:SrTiO₃ 异质结进一步模拟了人类视觉记忆及兴趣对视觉记忆的影响, 如图 11(b)^[107] 所示.

3.2 缺陷陷阱捕获和释放载流子

纳米材料如纳米颗粒、纳米线等也是制备神经突触器件的常用材料之一, 这类器件的光电突触特性一般来源于其表面对光生载流子的俘获和随后的缓慢释放所引起的光电流迟滞效应. 2016 年, Pilarczyk 等^[75] 利用 CdS/多壁碳纳米管 (MWCNTs) 杂化结构模拟了光刺激下的神经突触行为. 通过等效电路的模拟分析, 他们证明了 MWCNTs 对光生电子的俘获和释放是器件表现出突触行为的根本原因, 其工作原理如图 12(a)^[75] 所示. 之后, Shao 等^[108] 研究了基于单壁碳纳米管 (SWCNTs) 的晶体管型光电神经突触器件 (图 12(b)), 并成功模拟了非易失存储特性和低通滤波特性 (图 12(c)^[108]). 2019 年, Li 等^[64] 发现 InAs 纳米线表面有一层很薄的 InO_x , 光刺激下产生的光生电子会被该氧化层所俘获, 从而表现出 PPC 效应, 具体能带分析如图 12(d)^[64] 所示. 据此, 他们成功制备了基于 InAs 纳米线的光电神经突触器件.

2018 年, Tan 等^[99] 报道了基于硅纳米晶体 (Si NCs) 的两端光电突触器件 (图 11(e)). 由于掺硼 Si NCs 优异的光吸收特性, 该器件可以实现紫外 - 可见 - 近红外宽光谱光响应. 通过对 Si NCs 表

图 10 (网络版彩图) (a) 基于 IGZO 光电神经突触器件的在暗态和光照下的能带示意图; (b) 不同氧化物半导体离化氧空位的 E_a 和弛豫时间常数之间的关系 [70]; (c) 基于 IGZO 的晶体管在光刺激下的示意图; (d) 不同组分的 IGZO 薄膜对应的原子结构: N_R , In_H , Ga_H [106]; (e) 形成 VO^{2+} 和 VO^{2+}/O_i 的能带示意图; (f) α 型和 β 型构型中 (0) 和 (2+) 两种电荷状态的能量 - 晶格弛豫曲线 (带箭头的虚线和实线分别表示离化和去离化过程); (g) 光刺激后 IGZO, $SnO_x/IGZO$ 和 $PP/SnO_x/IGZO$ 的 EPSC 行为 [45]

Figure 10 (Color online) (a) Energy-band diagrams of an IGZO-based photonic neuromorphic device in dark conditions and under illumination; (b) the relationship between the activation energies (E_a) and the relaxation time constant for various AOSs [70] @Copyright 2017 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; (c) the photonic operation concept of an IGZO-based TFT device; (d) illustration of atomic structures for N_R , In_H , and Ga_H IGZO films [106] @Copyright 2018 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; (e) schematic energy-band diagrams for the formation of VO^{2+} and VO^{2+}/O_i ; (f) schematic energy vs. lattice relaxation curves of the (0) and (2+) charge state in α - and β -type configurations (the dashed and solid arrowline denotes the ionization and recovery process, respectively); (g) the EPSC of IGZO, $SnO_x/IGZO$ and $PP/SnO_x/IGZO$ devices after light stimulation [45] @Copyright 2019 Elsevier Ltd.

面缺陷态的分析, 他们认为器件的可塑性来源于 Si NCs 表面的固有缺陷 (如悬挂键等) 对光生载流子的动态俘获和释放过程, 如图 12(f) 和 (g) [99] 所示. 接着, Ni 和 Wang 等 [48] 将这种吸光良好、缺陷丰富的零维材料 Si NCs 和电荷传输特性优异的二维材料 WSe_2 结合, 制备出了超低能耗 (~ 75 fJ) 的杂化光电神经突触器件, 其结构如图 12(h) [48] 所示. 2019 年, Yin 等 [101] 制备了基于掺硼 Si NCs 的晶体管型器件, 该器件同时具备光和电的突触响应, 可以模拟光电耦合刺激下的 STDP 行为. 但由于制备工艺的不同, 该器件为光抑制型突触特性, 这主要归因于 Si NCs 在光辅助下的氧解吸附过程. 图 13 [101] 的研究表明该器件可以模拟厌恶学习过程, 并具有构成神经网络完成数字识别的潜力.

基于材料接触界面的缺陷对载流子的俘获和释放作用, 也是制备光电神经突触器件的重要策略之一. 2016 年, Li 等 [109] 以 Al_2O_3 作为介电层制备了基于氧化物半导体 IGZO 的紫外光刺激神经突触晶体管, 并利用 IGZO- Al_2O_3 界面或 Al_2O_3 层内部丰富的缺陷态对光生空穴的俘获作用, 模拟了生物突触的 PPF 和 STP-to-LTP 转变等神经突触可塑性, 如图 14(a) [109] 所示. 2018 年, He 等 [73] 发现

图 11 (网络版彩图) (a) 基于 ITO/Nb:SrTiO₃ 异质结的人工光电神经突触的工作机理; (b) 人类视觉的模拟 [107]

Figure 11 (Color online) (a) Schematic operation mechanism of an artificial optoelectronic synapse based on ITO/Nb:SrTiO₃ heterojunction; (b) mimicry of human visual memory [107] @Copyright 2019 American Chemical Society

图 12 (网络版彩图) (a) CdS/MWCNTs 器件突触行为的产生机制 [75]; (b) 在不同光波长照射下的印刷 SWCNT 光电晶体管器件的示意图; (c) 印刷 SWCNT 晶体管的低通滤波特性 [108]; (d) InAs 纳米线光电晶体管中激发、热离化、复合和俘获过程的能带示意图 [64]; (e) 基于 Si NCs 的神经突触阵列示意图; (f) 在 77 K 下 Si-NC 膜的 STS 曲线发生偏移, 费米能为 0 V; (g) Si NCs 的电子结构和载流子行为示意模型 [99]; (h) 基于 Si-NC/WSe₂ 突触器件的结构示意图 [48]

Figure 12 (Color online) (a) The mechanism responsible for the synaptic behavior of the CdS/MWCNT-based device [75] @Copyright 2016 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA; (b) schematic of a printed SWCNT phototransistor device under illumination of different light wavelengths; (c) low-pass filtering characteristics of the printed SWCNT transistors device [108] @Copyright 2019 American Chemical Society; (d) energy band diagram of excitation, thermalization, recombination, and trapping processes in the InAs nanowire phototransistor [64] @Copyright 2018 IOP Publishing Ltd.; (e) schematic of an array of Si-NC-based synaptic devices; (f) the STS curve, resulting for the Si-NC film measured at 77 K, has been shifted so that the Fermi level is at 0 V; (g) schematic model for the electronic structure and carrier behavior of Si NCs [99] @Copyright 2018 Elsevier Ltd.; (h) schematic of the Si-NC/WSe₂ synaptic device structure [48] @Copyright 2018 IEEE

n-MoS₂/p-Si 异质结光电忆阻的突触性能来源于硅衬底上 SiO₂ 自然氧化层中缺陷对电子的俘获作用. Hu 等 [110] 则证明了基于 ITO/ZnO_{1-x}/AlO_y/Al 结构的光电突触器件中, 无法避免的 AlO_y 过渡层中的缺陷可以提供空穴的俘获位置, 从而引起 PPC 和阻变效应, 如图 14(b) [110] 所示. 更重要的是, 以上

图 13 (网络版彩图) 用基于 Si NCs 的光电突触晶体管实现味觉厌恶学习疗法和图像识别计算仿真. (a) 治疗酒精中毒的味觉厌恶学习过程的示意图; (b) 用该器件实现味觉厌恶学习; (c) 用像素阈值 50 二值化后的 MNIST 数据库中的示例图像; (d) 脉冲神经网络的体系结构; (e) 用 L/E^+ STDP 模型训练的网络中所有输出神经元的感受野; (f) 用 E^-/E^+ STDP 模型训练的网络中所有输出神经元的感受野^[101]

Figure 13 (Color online) Neuromorphic computing simulation for image recognition. (a) Schematic of a taste aversion learning process for the treatment of alcoholism; (b) implementation of taste aversion learning with a synaptic Si-NC phototransistor; (c) example images in the MNIST database after the binarization with a pixel threshold of 50; (d) the architecture of the spiking neural network; (e) receptive fields of all output neurons in the network trained with the L/E^+ STDP model; (f) receptive fields of all output neurons in the network trained with the E^-/E^+ STDP model [101] ©Copyright 2019 Elsevier Ltd.

图 14 (网络版彩图) (a) 基于 IGZO 的光电突触晶体管在紫外光刺激下的工作机制^[109]; (b) ZnO_{1-x}/AlO_y 异质结在光照和暗态的能带示意图^[110]; (c) 光刺激 C8-BTBT 有机突触晶体管阵列示意图; (d) T 形晶体管阵列的制造工艺; (e) T 形突触晶体管阵列的动态学习和遗忘过程^[111]

Figure 14 (Color online) (a) Mechanism of IGZO-based synaptic transistor under UV-light stimulation [109] ©Copyright 2016 AIP Publishing; (b) schematic illustrations of the band diagram of the ZnO_{1-x}/AlO_y heterojunction [110] ©Copyright 2018 American Chemical Society; (c) schematic diagram of a light-stimulated C8-BTBT synaptic transistors array; (d) fabrication process of the T-shape transistors array; (e) dynamic learning and forgetting process of the T-shape synaptic transistors array [111] ©Copyright 2018 American Chemical Society

图 15 (网络版彩图) (a) 基于 IGZO 的 EDL 晶体管的工作机制^[65]; (b) 基于 MoS₂ 的 EDL 晶体管的工作机制; (c) MoS₂ 光突触的高通和低通滤波功能示意图; (d) 时空关联效应; (e) 突触权重的变化 (ΔW) 随 $\Delta t_{\text{pre-post}}$ 的变化^[97]

Figure 15 (Color online) (a) Mechanism of the IGZO-based EDL transistors^[65] @Copyright 2018 IEEE; (b) mechanism of the MoS₂-based EDL transistors; (c) schematic of the photonic MoS₂ synapse to function as both high-pass and low-pass photonic filters; (d) the spatiotemporal correlation effect; (e) the changes in synaptic weight (ΔW) as function of $\Delta t_{\text{pre-post}}$ ^[97] @Copyright 2019 The Royal Society of Chemistry

基于界面俘获机制的两端突触器件不仅具有光刺激下的突触特性, 还可以实现光、电协同作用的神经拟态 (neuromorphic) 功能。

通过材料选择、结构设计等有意引入缺陷态, 是目前制备光电神经突触器件的一种重要思路. 2018 年, Dai 等^[111] 在 C8-BTBT 有机晶体管中引入的 PAN 介电层, 其表面大量聚合物极性基团提供了光生载流子俘获的界面缺陷. 基于此, 除了单个器件突触可塑性的模拟, 晶体管阵列也被制备出来模拟动态学习和遗忘过程, 如图 14(c) 和 (d) 所示。

在晶体管型结构中, 用离子液体、chitosan 等电解质材料来替换传统的氧化物介电层可以增强栅极对沟道的调节作用, 降低能耗, 提高器件性能. 近年来, 人们发现电解质中的质子无法对快速变化的电场作出反应, 从而引起电流迟滞效应, 赋予器件电学突触性质. 随着人工神经突触研究逐渐深入, 人们发现电解质的双电层 (electric-double layer, EDL) 效应也会影响沟道中光生载流子的复合速度, 从而使器件成为兼具光刺激和电刺激突触响应的光电神经突触器件^[102, 112~114]. 2018 年, Yang 等^[65] 以 chitosan 为栅介质, IGZO 为沟道材料制备了晶体管型光电神经突触器件. 他们认为该器件的光学突触特性有两个来源: 一方面 IGZO 的 PPC 效应会减缓光生载流子的复合速度, 另一方面可能由于界面缺陷的作用, EDL 效应也会使得光生电子在 IGZO/chitosan 界面附近长时间停留, 基本原理如图 15(a) 所示. John 等^[115] 同样依据将 PPC 和 EDL 结合的思路制备了一种多栅极 (multi-gate) 神经突触器件, 该器件可以用电子、电离和光敏 3 种模式来模拟生物突触的信号传递过程. 图 16 为该器件利用光电耦合刺激模拟的经典条件反射实验: 初始状态时, 电刺激为条件刺激可以引发有效的电流响应, 而光刺激为非条件刺激; 将光刺激和电刺激同时成对刺激, 经过长时间的重复训练后, 光刺激

图 16 (网络版彩图) MoS₂ 神经忆阻器模拟的经典条件反射实验^[115]

Figure 16 (Color online) Classical conditioning Pavlov's dog experiment emulated by MoS₂ neuristors [115] @Copyright 2018 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

可以单独实现有效的电流响应. 2019 年, Jiang 等^[97] 制备了二维 MoS₂/海藻酸钠 (sodium alginate) 晶体管型光电杂化突触器件, 其工作原理如图 15(b) 所示. 由于对光脉冲具有频率依赖性, 该器件可以同时实现高通滤波和低通滤波功能; 另外, 还可以通过光电杂化来模拟光电时空四维神经拟态集成和 STDP 可塑性, 如图 15(c) 和 (e) 所示.

3.3 异质结引起的势阱捕获和释放载流子

II 型异质结有可能在界面处形成载流子的势阱. 它一旦形成, 能够对经过异质结分离的光生载流子产生限域作用, 类似于前面所述的缺陷陷阱对载流子的捕获. 光刺激结束后, 界面势垒使载流子无法很快复合, 导致器件电流需要一段时间才能恢复到初始状态 (通过电过程可以实现快速恢复). 这就可以用于模拟突触的行为.

Qin 等^[44] 报道了一种基于石墨烯 (graphene) / 单壁碳纳米管 (SWCNTs) 杂化结构的光电晶体管, SWCNTs 产生的光生载流子在界面的迁移被认为是该杂化结构 STP 行为的产生原因, 但其 LTP 仍被认为来源于界面缺陷的俘获作用. 据此, 他们模拟了 NOR 逻辑功能, 如图 17(a) 所示. 后来, Kumar 等^[46] 报道了一种基于全氧化物的高度透明的光突触, 由于 ZnO/In₂O₃ 之间的 II 型异质结, ZnO 产生的光生载流子在界面分离并被势阱所俘获 (图 17(b) 和 (c)), 这样器件可以模拟 STP, LTP 等基本神经可塑性. 几乎同一时间, Wang 和 Lv 等^[66] 报道了一种基于浮栅存储器的光电神经突触器件,

图 17 (网络版彩图) (a) graphene/SWCNTs 杂化光电晶体管模拟的 NOR 逻辑操作随着时间的变化情况^[44]; (b) 基于 ZnO/In₂O₃ 异质结的两端透明器件示意图; (c) 此光突触工作机制示意图^[46]; (d) 基于无机钙钛矿量子点的光电突触的光编程状态和电擦除状态的循环特性; (e) 基于无机钙钛矿量子点的光学神经突触器件分别在光照写入操作和暗态电擦除操作的能带图^[66]

Figure 17 (Color online) (a) The time response of an NOR logic operation emulated by the graphene/SWCNTs hybrid phototransistor [44] ©Copyright 2017 IOP Publishing Ltd.; (b) schematics of a two-terminal visible light transparent device based on ZnO/In₂O₃; (c) schematic illustrations of the working mechanism of the photonic synapse [46] ©Copyright 2018 American Chemical Society; (d) endurance property of the light-programmed state and electric erased state of the photonic synapses based on inorganic perovskite quantum dots; (e) energy diagram of photonic synapses based on inorganic perovskite quantum dots during light programming operation and during electrical erasing operation under dark condition [66] ©Copyright 2018 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA

其工作原理如图 17(d) 和 (e) 所示: 光生空穴与电子分离, 并在 II 型异质结的作用下从 CsPbBr₂ 转移到并五苯引起光电流的增大. 光照结束后, 俘获的电子仍能被势阱长时间保留, 这样电流也将缓慢恢复到基准水平. 此外, PTCDA/MoS₂^[100] 杂化结构的光电突触器件也是依据类似原理.

4 展望

光电神经突触器件的发展为神经形态计算提供了重要的硬件支撑, 具有诱人的应用前景. 但是不可否认的是, 现阶段光电神经突触器件的研究还处于起步阶段, 在今后的研究中至少需要关注以下几个方面.

(1) 在生物突触行为的模拟方面, 目前的研究大多停留在用单个器件来模拟最简单最基础的突触可塑性行为. 少部分工作模拟了人类视觉记忆行为, 但是从未来应用的角度来讲还远远不够. 制备光电神经突触阵列, 构建人造神经网络, 从而模拟更为复杂的学习记忆功能应该是今后重要的研究工作.

(2) 突触器件低能耗的优势还没有充分发挥出来. 统一评估单个突触器件的能耗, 从各个方面着手降低器件能耗值得重点研究. 目前可以确认的能耗降低的有效办法是缩小器件尺寸和缩短光脉冲宽度. 前者依赖于器件制备工艺的发展, 后者对突触性能测试提出了更高的要求.

(3) 光电突触器件的稳定性和一致性也是目前未深入研究的重要性能指标. 光电神经突触器件的应用需要它们能够稳定工作. 然而生物突触之间普遍存在差异, 并且具有一定的容错性. 因此光电神经突触器件在这方面是否可以照搬值得深入探讨.

(4) 两端神经突触器件结构简单, 非常便于集成, 但邻近器件之间存在串扰隐患; 三端神经突触器件可以引入多栅极调控, 实现更复杂的功能, 但是器件密度相对较小. 在光电神经突触器件的研究中, 如何发挥两类器件各自的长处, 针对不同的应用场景优化性能需要在今后的工作中重点考虑.

(5) 在已经报道的光电神经突触器件中, 不少器件既能在光刺激下工作, 也能在电刺激下工作. 这为神经突触器件的光电耦合提供了更多的自由度, 有利于基于光电集成的人工神经网络的发展. 加强对光电神经突触器件的光电耦合机制及其调控的研究是今后工作的一个重要方向.

(6) 构建完整的基于光电集成的人工神经网络依赖于高性能的电刺激-光输出和光刺激-电输出的神经突触器件. 目前, 电刺激-光输出型神经突触器件的发展明显滞后. 考虑到硅基光电集成将是未来大规模应用的光电集成的首选, 把神经形态计算建立在硅基光电集成上是一条诱人的技术路线. 然而, 适宜硅基光电集成的电刺激-光输出的神经突触器件是一个很大的挑战, 在今后的研究中需要寻求应对之策.

总之, 光电神经突触器件已经展示了良好的发展前景, 还有诸多潜能等待发掘, 深入研究开发多功能、高性能、低能耗的光电神经突触, 实现基于光电集成的人工神经网络和神经形态计算是一项令人兴奋的工作.

参考文献

- 1 von Neumann J. The principles of large-scale computing machines. *IEEE Ann Hist Comput*, 1988, 10: 243–256
- 2 Waldrop M M. The semiconductor industry will soon abandon its pursuit of Moore's law. *Nature*, 2016, 530: 144–147
- 3 Merolla P A, Arthur J V, Alvarez-Icaza R, et al. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface. *Science*, 2014, 345: 668–673
- 4 Zidan M A, Strachan J P, Lu W D. The future of electronics based on memristive systems. *Nat Electron*, 2018, 1: 22–29
- 5 Upadhyay N K, Joshi S, Yang J J. Synaptic electronics and neuromorphic computing. *Sci China Inf Sci*, 2016, 59: 061404
- 6 Attwell D, Laughlin S B. An energy budget for signaling in the grey matter of the brain. *J Cereb Blood Flow Metab*, 2001, 21: 1133–1145
- 7 Drachman D A. Do we have brain to spare. *Neurology*, 2005, 64: 2004–2005
- 8 Indiveri G, Liu S C. Memory and information processing in neuromorphic systems. *Proc IEEE*, 2015, 103: 1379–1397
- 9 Markram H. The blue brain project. *Nat Rev Neurosci*, 2006, 7: 153–160
- 10 Machens C K. Building the human brain. *Science*, 2012, 338: 1156–1157
- 11 Prezioso M, Merrih-Bayat F, Hoskins B D, et al. Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors. *Nature*, 2015, 521: 61–64
- 12 Kuzum D, Yu S, Wong H-S P. Synaptic electronics: materials, devices and applications. *Nanotechnology*, 2013, 24: 382001
- 13 Esser S K, Merolla P A, Arthur J V, et al. Convolutional networks for fast, energy-efficient neuromorphic computing. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2016, 113: 11441–11446
- 14 Cheng Z G, Ríos C, Pernice W H P, et al. On-chip photonic synapse. *Sci Adv*, 2017, 3: e1700160
- 15 Ananthanarayanan R, Esser S K, Simon H D, et al. The cat is out of the bag: cortical simulations with 10^9 neurons,

- 10¹³ synapses. In: Proceedings of the IEEE Conference on High Performance Computing Networking, Storage and Analysis, Portland, 2009. 1–12
- 16 Yang R, Terabe K, Yao Y, et al. Synaptic plasticity and memory functions achieved in a WO_{3-x}-based nanoionics device by using the principle of atomic switch operation. *Nanotechnology*, 2013, 24: 384003
- 17 Kim K, Chen C L, Truong Q, et al. A carbon nanotube synapse with dynamic logic and learning. *Adv Mater*, 2013, 25: 1693–1698
- 18 Shi J, Ha S D, Zhou Y, et al. A correlated nickelate synaptic transistor. *Nat Commun*, 2013, 4: 2676
- 19 Zhu L Q, Wan C J, Guo L Q, et al. Artificial synapse network on inorganic proton conductor for neuromorphic systems. *Nat Commun*, 2014, 5: 3158–3165
- 20 van de Burgt Y, Lubberman E, Fuller E J, et al. A non-volatile organic electrochemical device as a low-voltage artificial synapse for neuromorphic computing. *Nat Mater*, 2017, 16: 414–418
- 21 Jo S H, Chang T, Ebong I, et al. Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems. *Nano Lett*, 2010, 10: 1297–1301
- 22 Chang T, Jo S H, Lu W. Short-term memory to long-term memory transition in a nanoscale memristor. *ACS Nano*, 2011, 5: 7669–7676
- 23 Pickett M D, Medeiros-Ribeiro G, Williams R S. A scalable neuristor built with Mott memristors. *Nat Mater*, 2013, 12: 114–117
- 24 Yang R, Terabe K, Liu G, et al. On-demand nanodevice with electrical and neuromorphic multifunction realized by local ion migration. *ACS Nano*, 2012, 6: 9515–9521
- 25 Ohno T, Hasegawa T, Tsuruoka T, et al. Short-term plasticity and long-term potentiation mimicked in single inorganic synapses. *Nat Mater*, 2011, 10: 591–595
- 26 Pan F, Gao S, Chen C, et al. Recent progress in resistive random access memories: materials, switching mechanisms, and performance. *Mater Sci Eng R*, 2014, 83: 1–59
- 27 Wang Z, Joshi S, Savel'ev S E, et al. Memristors with diffusive dynamics as synaptic emulators for neuromorphic computing. *Nat Mater*, 2017, 16: 101–108
- 28 Benner A F, Ignatowski M, Kash J A, et al. Exploitation of optical interconnects in future server architectures. *IBM J Res Dev*, 2005, 49: 755–775
- 29 Zhuge X, Wang J, Zhuge F. Photonic synapses for ultrahigh-speed neuromorphic computing. *Phys Status Solidi RRL*, 2019, 13: 1900082
- 30 Zhu X, Lu W D. Optogenetics-inspired tunable synaptic functions in memristors. *ACS Nano*, 2018, 12: 1242–1249
- 31 Ham S, Choi S, Cho H, et al. Photonic organolead halide perovskite artificial synapse capable of accelerated learning at low power inspired by dopamine-facilitated synaptic activity. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1806646
- 32 Zhao S, Ni Z, Tan H, et al. Electroluminescent synaptic devices with logic functions. *Nano Energy*, 2018, 54: 383–389
- 33 Zhao S, Wang Y, Huang W, et al. Developing near-infrared quantum-dot light-emitting diodes to mimic synaptic plasticity. *Sci China Mater*, 2019, 62: 1470–1478
- 34 Gkoupidenis P, Koutsouras D A, Malliaras G G. Neuromorphic device architectures with global connectivity through electrolyte gating. *Nat Commun*, 2017, 8: 15448
- 35 Deisseroth K. Optogenetics. *Nat Methods*, 2011, 8: 26–29
- 36 Treichler D G. Are you missing the boat in training aids. *Film Audio-Visual Commun*, 1967, 1: 14–16
- 37 Wang G, Wang R, Kong W, et al. Simulation of retinal ganglion cell response using fast independent component analysis. *Cogn Neurodyn*, 2018, 12: 615–624
- 38 Xiao Z, Huang J. Energy-efficient hybrid perovskite memristors and synaptic devices. *Adv Electron Mater*, 2016, 2: 1600100
- 39 Bi G Q, Poo M M. Synaptic modifications in cultured hippocampal neurons: dependence on spike timing, synaptic strength, and postsynaptic cell type. *J Neurosci*, 1998, 18: 10464–10472
- 40 Kandel E R, Squire L R. Neuroscience: breaking down scientific barriers to the study of brain and mind. *Science*, 2000, 290: 1113–1120
- 41 Chih B, Engelman H, Scheiffele P. Control of excitatory and inhibitory synapse formation by neuroligins. *Science*, 2005, 307: 1324–1328
- 42 Sturman B, Podivilov E, Gorkunov M. Origin of stretched exponential relaxation for hopping-transport models. *Phys*

- Rev Lett, 2003, 91: 176602
- 43 Yang Y, Lisberger S G. Purkinje-cell plasticity and cerebellar motor learning are graded by complex-spike duration. *Nature*, 2014, 510: 529–532
 - 44 Qin S, Wang F, Liu Y, et al. A light-stimulated synaptic device based on graphene hybrid phototransistor. *2D Mater*, 2017, 4: 035022
 - 45 Yu J J, Liang L Y, Hu L X, et al. Optoelectronic neuromorphic thin-film transistors capable of selective attention and with ultra-low power dissipation. *Nano Energy*, 2019, 62: 772–780
 - 46 Kumar M, Abbas S, Kim J. All-oxide-based highly transparent photonic synapse for neuromorphic computing. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, 10: 34370–34376
 - 47 Zhou F, Zhou Z, Chen J, et al. Optoelectronic resistive random access memory for neuromorphic vision sensors. *Nat Nanotechnol*, 2019, 14: 776–782
 - 48 Ni Z, Wang Y, Liu L, et al. Hybrid structure of silicon nanocrystals and 2D WSe₂ for broadband optoelectronic synaptic devices. In: *Proceedings of the 64th Annual IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM)*, San Francisco, 2018. 887–890
 - 49 Mueller T, Xia F, Avouris P. Graphene photodetectors for high-speed optical communications. *Nat Photon*, 2010, 4: 297–301
 - 50 Destexhe A, Marder E. Plasticity in single neuron and circuit computations. *Nature*, 2004, 431: 789–795
 - 51 Zucker R S, Regehr W G. Short-term synaptic plasticity. *Annu Rev Physiol*, 2002, 64: 355–405
 - 52 Abbott L F, Regehr W G. Synaptic computation. *Nature*, 2004, 431: 796–803
 - 53 Hebb D O. Organization of behavior. *J Physiol*, 1949, 911: 335
 - 54 Bliss T V P, Collingridge G L. A synaptic model of memory: long-term potentiation in the hippocampus. *Nature*, 1993, 361: 31–39
 - 55 Kandel E R. The molecular biology of memory storage: a dialogue between genes and synapses. *Science*, 2001, 294: 1030–1038
 - 56 Lamprecht R, LeDoux J. Structural plasticity and memory. *Nat Rev Neurosci*, 2004, 5: 45–54
 - 57 Wan C J, Zhu L Q, Zhou J M, et al. Inorganic proton conducting electrolyte coupled oxide-based dendritic transistors for synaptic electronics. *Nanoscale*, 2014, 6: 4491–4497
 - 58 Debanne D, Guérineau N C, Gähwiler B H, et al. Paired-pulse facilitation and depression at unitary synapses in rat hippocampus: quantal fluctuation affects subsequent release. *J Physiol*, 1996, 491: 163–176
 - 59 Hu S G, Liu Y, Chen T P, et al. Emulating the paired-pulse facilitation of a biological synapse with a NiO_x-based memristor. *Appl Phys Lett*, 2013, 102: 183510
 - 60 Liu Y H, Zhu L Q, Feng P, et al. Freestanding artificial synapses based on laterally proton-coupled transistors on chitosan membranes. *Adv Mater*, 2015, 27: 5599–5604
 - 61 Liu G, Wang C, Zhang W, et al. Organic biomimicking memristor for information storage and processing applications. *Adv Electron Mater*, 2016, 2: 1500298
 - 62 Atluri P P, Regehr W G. Determinants of the time course of facilitation at the granule cell to purkinje cell synapse. *J Neurosci*, 1996, 16: 5661–5671
 - 63 Qin S, Liu Y, Wang X, et al. Light-activated artificial synapse based on graphene hybrid phototransistors. In: *Proceedings of Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO)*, San Jose, 2016. 4
 - 64 Li B, Wei W, Yan X, et al. Mimicking synaptic functionality with an InAs nanowire phototransistor. *Nanotechnology*, 2018, 29: 464004
 - 65 Yang Y, He Y, Nie S, et al. Light stimulated IGZO-based electric-double-layer transistors for photoelectric neuromorphic devices. *IEEE Electron Device Lett*, 2018, 39: 897–900
 - 66 Wang Y, Lv Z, Chen J, et al. Photonic synapses based on inorganic perovskite quantum dots for neuromorphic computing. *Adv Mater*, 2018, 30: 1802883
 - 67 Atkinson R C, Shiffrin R M. Human memory: a proposed system and its control processes. In: *The Psychology of Learning and Motivation: Advances in Research and Theory*. New York: Academic Press, Inc., 1968. 89–195
 - 68 McGaugh J L. Memory—a century of consolidation. *Science*, 2000, 287: 248–251
 - 69 Izquierdo I, McGaugh J L. Behavioural pharmacology and its contribution to the molecular basis of memory consolidation. *Behav Pharmacol*, 2000, 11: 517–534

- 70 Lee M, Lee W, Choi S, et al. Brain-inspired photonic neuromorphic devices using photodynamic amorphous oxide semiconductors and their persistent photoconductivity. *Adv Mater*, 2017, 29: 1700951
- 71 Dan Y, Poo M M. Spike timing-dependent plasticity: from synapse to perception. *Physiol Rev*, 2006, 86: 1033–1048
- 72 Mandal S, Long B, Jha R. Study of synaptic behavior in doped transition metal oxide-based reconfigurable devices. *IEEE Trans Electron Devices*, 2013, 60: 4219–4225
- 73 He H K, Yang R, Zhou W, et al. Photonic potentiation and electric habituation in ultrathin memristive synapses based on monolayer MoS₂. *Small*, 2018, 14: 1800079
- 74 Yang C S, Shang D S, Chai Y S, et al. Electrochemical-reaction-induced synaptic plasticity in MoO_x-based solid state electrochemical cells. *Phys Chem Chem Phys*, 2017, 19: 4190–4198
- 75 Pilarczyk K, Podborska A, Lis M, et al. Synaptic behavior in an optoelectronic device based on semiconductor-nanotube hybrid. *Adv Electron Mater*, 2016, 2: 1500471
- 76 Wang K, Dai S, Zhao Y, et al. Light-stimulated synaptic transistors fabricated by a facile solution process based on inorganic perovskite quantum dots and organic semiconductors. *Small*, 2019, 15: e1900010
- 77 Wang Z Q, Xu H Y, Li X H, et al. Synaptic learning and memory functions achieved using oxygen ion migration/diffusion in an amorphous InGaZnO memristor. *Adv Funct Mater*, 2012, 22: 2759–2765
- 78 Li S, Zeng F, Chen C, et al. Synaptic plasticity and learning behaviours mimicked through Ag interface movement in an Ag/conducting polymer/Ta memristive system. *J Mater Chem C*, 2013, 1: 5292–5298
- 79 Wang L G, Zhang W, Chen Y, et al. Synaptic plasticity and learning behaviors mimicked in single inorganic synapses of Pt/HfO_x/ZnO_x/TiN memristive system. *Nanoscale Res Lett*, 2017, 12: 65
- 80 Froemke R C, Dan Y. Spike-timing-dependent synaptic modification induced by natural spike trains. *Nature*, 2002, 416: 433–438
- 81 Kim H, Hwang S, Park J, et al. Silicon synaptic transistor for hardware-based spiking neural network and neuromorphic system. *Nanotechnology*, 2017, 28: 405202
- 82 Covi E, Brivio S, Serb A, et al. Analog memristive synapse in spiking networks implementing unsupervised learning. *Front Neurosci*, 2016, 10: 482
- 83 D'amour J A, Froemke R C. Inhibitory and excitatory spike-timing-dependent plasticity in the auditory cortex. *Neuron*, 2015, 86: 514–528
- 84 Chen Y, Wei Q, Yin J, et al. Silicon-based hybrid optoelectronic devices with synaptic plasticity and stateful photoresponse. *Adv Electron Mater*, 2018, 4: 1800242
- 85 Alibart F, Pleutin S, Bichler O, et al. A memristive nanoparticle/organic hybrid synapstor for neuroinspired computing. *Adv Funct Mater*, 2012, 22: 609–616
- 86 Lengyel M, Kwag J, Paulsen O, et al. Matching storage and recall: hippocampal spike timing-dependent plasticity and phase response curves. *Nat Neurosci*, 2005, 8: 1677–1683
- 87 Dudman J T, Tsay D, Siegelbaum S A. A role for synaptic inputs at distal dendrites: instructive signals for hippocampal long-term plasticity. *Neuron*, 2007, 56: 866–879
- 88 Guyonneau R, VanRullen R, Thorpe S J. Neurons tune to the earliest spikes through STDP. *Neural Computat*, 2005, 17: 859–879
- 89 Shouval H Z, Wang S S, Wittenberg G M. Spike timing dependent plasticity: a consequence of more fundamental learning rules. *Front Comput Neurosci*, 2010, 4: 19
- 90 Abbott L F, Nelson S B. Synaptic plasticity: taming the beast. *Nat Neurosci*, 2000, 3: 1178–1183
- 91 Li Y, Zhong Y, Zhang J, et al. Activity-dependent synaptic plasticity of a chalcogenide electronic synapse for neuromorphic systems. *Sci Rep*, 2014, 4: 4906
- 92 Li Y, Zhong Y, Xu L, et al. Ultrafast synaptic events in a chalcogenide memristor. *Sci Rep*, 2013, 3: 1619
- 93 Wang J, Chen Y, Kong L A, et al. Deep-ultraviolet-triggered neuromorphic functions in In-Zn-O phototransistors. *Appl Phys Lett*, 2018, 113: 151101
- 94 Martin S J, Grimwood P D, Morris R G M. Synaptic plasticity and memory: an evaluation of the hypothesis. *Annu Rev Neurosci*, 2000, 23: 649–711
- 95 Rachmuth G, Shouval H Z, Bear M F, et al. PNAS plus: a biophysically-based neuromorphic model of spike rate- and timing-dependent plasticity. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2011, 108: 1266–1274
- 96 Kirkwood A, Rioult M G, Bear M F. Experience-dependent modification of synaptic plasticity in visual cortex.

- Nature, 1996, 381: 526–528
- 97 Jiang J, Hu W, Xie D, et al. 2D electric-double-layer phototransistor for photoelectronic and spatiotemporal hybrid neuromorphic integration. *Nanoscale*, 2019, 11: 1360–1369
- 98 Indiveri G, Chicca E, Douglas R. A VLSI array of low-power spiking neurons and bistable synapses with spike-timing dependent plasticity. *IEEE Trans Neural Netw*, 2006, 17: 211–221
- 99 Tan H, Ni Z, Peng W, et al. Broadband optoelectronic synaptic devices based on silicon nanocrystals for neuromorphic computing. *Nano Energy*, 2018, 52: 422–430
- 100 Wang S, Chen C, Yu Z, et al. A MoS₂/PTCDA hybrid heterojunction synapse with efficient photoelectric dual modulation and versatility. *Adv Mater*, 2019, 31: 1806227
- 101 Yin L, Han C, Zhang Q, et al. Synaptic silicon-nanocrystal phototransistors for neuromorphic computing. *Nano Energy*, 2019, 63: 103859
- 102 Alquraishi W, Fu Y, Qiu W, et al. Hybrid optoelectronic synaptic functionality realized with ion gel-modulated In₂O₃ phototransistors. *Org Electron*, 2019, 71: 72–78
- 103 Cheng W, Liang R, Tian H, et al. Proton conductor gated synaptic transistor based on transparent IGZO for realizing electrical and UV light stimulus. *IEEE J Electron Devices Soc*, 2019, 7: 38–45
- 104 Jeon S, Song I, Lee S, et al. Origin of high photoconductive gain in fully transparent heterojunction nanocrystalline oxide image sensors and interconnects. *Adv Mater*, 2014, 26: 7102–7109
- 105 Ahn S E, Song I, Jeon S, et al. Metal oxide thin film phototransistor for remote touch interactive displays. *Adv Mater*, 2012, 24: 2631–2636
- 106 Wu Q, Wang J, Cao J, et al. Photoelectric plasticity in oxide thin film transistors with tunable synaptic functions. *Adv Electron Mater*, 2018, 4: 1800556
- 107 Gao S, Liu G, Yang H, et al. An oxide schottky junction artificial optoelectronic synapse. *ACS Nano*, 2019, 13: 2634–2642
- 108 Shao L, Wang H, Yang Y, et al. Optoelectronic properties of printed photogating carbon nanotube thin film transistors and their application for light-stimulated neuromorphic devices. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11: 12161–12169
- 109 Li H K, Chen T P, Liu P, et al. A light-stimulated synaptic transistor with synaptic plasticity and memory functions based on InGaZnO_x-Al₂O₃ thin film structure. *J Appl Phys*, 2016, 119: 244505
- 110 Hu D C, Yang R, Jiang L, et al. Light-stimulated synaptic devices utilizing interfacial effect of organic field-effect transistors. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, 10: 6463–6470
- 111 Dai S, Wu X, Liu D, et al. Light-stimulated synaptic devices utilizing interfacial effect of organic field-effect transistors. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, 10: 21472–21480
- 112 Gou G, Sun J, Qian C, et al. Artificial synapses based on biopolymer electrolyte-coupled SnO₂ nanowire transistors. *J Mater Chem C*, 2016, 4: 11110–11117
- 113 Liu Y, Huang W, Wang X, et al. A hybrid phototransistor neuromorphic synapse. *IEEE J Electron Devices Soc*, 2019, 7: 13–17
- 114 Guo Y B, Zhu L Q, Gao W T, et al. Low-voltage protonic/photonic synergic coupled oxide phototransistor. *Org Electron*, 2019, 71: 31–35
- 115 John R A, Liu F, Chien N A, et al. Synergistic gating of electro-iono-photoactive 2D chalcogenide neuristors: coexistence of hebbian and homeostatic synaptic metaplasticity. *Adv Mater*, 2018, 30: 1800220

Recent progress on optoelectronic synaptic devices

Yayao LI, Yue WANG, Deren YANG & Xiaodong PI*

State Key Laboratory of Silicon Materials, School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China

* Corresponding author. E-mail: xdpi@zju.edu.cn

Abstract Neuromorphic (brain-like) computing has great potential to solve the von Neumann bottleneck due to its self-adaptive learning, high-parallel computing capability, and low-power consumption. Realization of neuromorphic computing depends on the development of synaptic devices that mimic biological synapses. Initially, synaptic devices were electronic, and such devices face significant challenges relative to optimization of bandwidth, connectivity, and density. It has been recently shown that the incorporation of light to make optoelectronic synaptic devices brings new opportunities for the development of synaptic devices. On one hand, light enables high bandwidth, low crosstalk, low energy consumption, and no delay. On the other hand, optoelectronic devices can be used to simulate special neurobehavioral functions, such as vision. As the basis of optoelectronic integrated neural networks, optoelectronic synaptic devices are expected to greatly contribute to the development of high-performance and low-power neuromorphic computing. In this review we introduce the basic properties of optoelectronic synaptic devices. Different types and applications that have been reported for optoelectronic devices are discussed. In addition, future prospects for the development of optoelectronic synaptic devices is outlined.

Keywords optoelectronic synaptic devices, synaptic plasticity, energy consumption, oxygen vacancy, carrier traps

Yayao LI received her B.S. degree from the Department of Materials Science and Engineering at Northeastern University in 2017. She is currently an M.S. student at the State Key Laboratory of Silicon Materials at Zhejiang University. She is investigating optoelectronic synaptic devices based on silicon nanocrystals and organic materials.

Yue WANG obtained her B.S. degree from the School of Printing and Packaging at Wuhan University in 2017. She is now a Ph.D. student at the State Key Laboratory of Silicon Materials at Zhejiang University. Her primary research interests are optoelectronic synaptic devices based on silicon nanostructures and other low-dimensional materials.

Deren YANG is a member of Chinese Academy of Science, director of the State Key Laboratory of Silicon Materials, and director of the Institute for Semiconductor Materials at Zhejiang University. He received his Ph.D. degree from the State Key Laboratory of Silicon Materials at Zhejiang University. He has been engaged in research on silicon materials for microelectronic devices, solar cells, and nanodevices.

Xiaodong PI received his Ph.D. degree from the Department of Physics at University of Bath in 2004. He then carried out research at McMaster University and the University of Minnesota, Twin Cities. He is now a professor in the State Key Laboratory of Silicon Materials and the School of Materials Science and Engineering at Zhejiang University. His current research primarily focuses on silicon-based optoelectronic materials and devices.