



三端晶体管的人工突触器件: 材料、结构与系统

刘毅^{1,2}, 刘甲奇^{1,2}, 陈家欣^{1,2}, 徐文涛^{1,2*}

1. 光电子薄膜器件与技术研究所, 天津市光电子薄膜器件与技术重点实验室, 南开大学电子信息与光学工程学院, 教育部薄膜光电子技术工程研究中心, 智能传感交叉科学中心, 天津 300350

2. 南开大学深圳研究院, 深圳 518000

*通讯作者, E-mail: wentao@nankai.edu.cn

收稿日期: 2024-02-26; 接受日期: 2024-03-19; 网络版发表日期: 2024-04-02

国家杰出青年科学基金(编号: T2125005)、国家重点研发计划政府间国际科技创新合作项目(编号: 2022YFE0198200)、天津市杰出青年科学基金(编号: 19JCQJC61000)、深圳市科技计划(编号: JCYJ20210324121002008)和国家重点研发计划(编号: 2022YFA1204500, 2022YFA1204504)资助项目

摘要 神经形态工程学旨在从硬件层面上构建人工仿生神经系统, 模拟人脑独特高效的运行机制, 进而实现神经形态感知和类脑计算功能. 生物突触是人脑学习和记忆的基本结构与功能单元. 因此, 构建类生物突触结构、功能的电子器件是实现神经形态感知与计算的关键. 相较于两端的阻变器件, 三端突触晶体管在实现多态调控和降低能量消耗上都具有优势. 此外, 三端突触晶体管还可以将压力、温度等外界物理刺激转化为电信号, 在采集视觉、听觉、嗅觉等信号来工作的人造感知神经系统方面有广阔的应用前景. 本文综述了三端突触晶体管的材料选择、器件结构以及功能应用, 并重点介绍了基于三端突触晶体管的人造视觉、听觉和嗅觉三种感知系统的最新进展. 最后, 总结了三端突触晶体管及其构建的人造感知系统面临的挑战, 并对其未来发展进行了展望.

关键词 三端晶体管, 生物突触, 突触可塑性, 人工突触器件, 人造感知系统

1 引言

随着信息技术和人工智能的快速发展, 当今社会的信息量呈爆炸式增长, 海量数据流需要性能优异的计算机来处理^[1], 大量的数据传输和存储仍然依赖于传统的冯·诺伊曼(von-Neumann)架构计算系统, 而摩尔定律终结和冯·诺伊曼瓶颈导致计算机面临着并行计算有限、能耗高的问题^[2-6]. 此外, 基于互补金属氧化物半导体(CMOS)技术的传统冯·诺依曼计算机在集成度上也逐渐趋近理论极限, 摩尔定律难以继续适用

于当前半导体行业的发展. 为解决上述问题, 研究者开始发展和设计新的计算架构和体系^[7].

与传统电脑相比, 人脑在信息处理和运行计算上表现出强大的能力^[8-10]. 人类大脑是由 10^{11} 个神经元通过 10^{15} 个突触连接而成(图1), 被认为是一个大型并行、高效、低能耗的生物超级计算机, 其能耗低至 10 W ^[11]. 当受到外界刺激时, 突触的连接强度(突触权重)会发生改变, 突触连接强度变化的现象被称为突触可塑性^[12]. 突触可塑性主要分为两种类型: 短程可塑性(STP)和长程可塑性(LTP). STP持续时间极短, 主要

引用格式: Liu Y, Liu J, Chen J, Xu W. Three-terminal artificial synaptic devices based on transistors: materials, structures and systems. *Sci Sin Chim*, 2024, 54: 468–484, doi: 10.1360/SSC-2024-0031

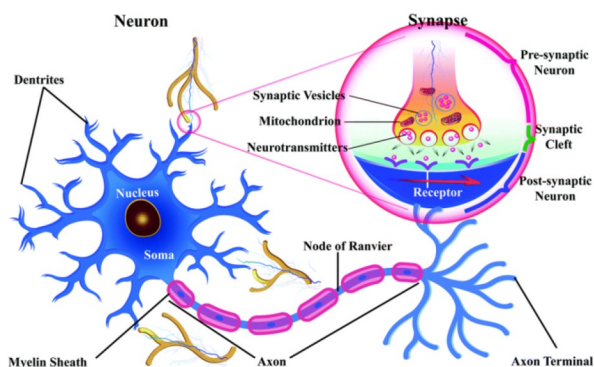


图 1 神经元和突触的结构示意图^[20] (网络版彩图)
Figure 1 Structure diagram of neuron and synapse ^[20] (color online).

表现包括兴奋性突触后电流(EPSC)、抑制性突触后电流(IPSC)和双脉冲易化(PPF)等, 它对于信息在神经系统中的准确传递发挥着重要的作用. LTP能够维持几个小时甚至更长时间, 它主要与生物的长时间记忆和神经系统的发育有关. 神经元的种类、刺激的频率及时间顺序等因素会对突触的长时程可塑性产生影响, 其中脉冲速率依赖特性(SRDP)和脉冲时序依赖特性(STDP)遵循赫布规则(Hebb's rule). 总而言之, 突触可塑性是人体学习、计算和认知等众多行为的生理基础, 在神经活动中起着至关重要的作用^[13,14]. 因此, 模仿生物突触的构架和工作机制, 构建类生物突触结构、功能的电子器件是实现神经形态感知与计算的关键^[15~19].

人工突触器件对存储记忆的时间尺度要求灵活, 且非常注重突触可塑性的多样化调节, 在结构上通常可分为两端忆阻器型和三端晶体管型. 两端忆阻器型器件不能同时执行信号传输和学习功能, 造成其对突触功能的模拟能力有限. 此外, 由于导电丝形成的不稳定, 造成两端忆阻器型器件的电流具有一定的随机性. 近年来, 基于三端晶体管的突触器件逐渐被广泛用于神经信号传输和生物学习功能的模拟, 它可以在栅极电压的辅助下实现器件的精准调控, 避免相邻单元的串扰问题^[21,22]. 三端突触晶体管有两个突出的优势, 即三端突触晶体管可以同时接收和读取刺激以及其可以通过沟道层传递信号并通过栅极独立调节突触权重, 因此电流比两端器件更稳定. 得益于三端晶体管的设计灵活性, 多栅极突触晶体管得到了很好的发展, 其能够同时接收多个栅极发出的信号并进行加成处

理, 使单个晶体管成功实现综合性的功能, 如滤波、树突整合、神经形态计算、时空动态逻辑、光电复用以及柔性化等. 与此同时, 多栅极晶体管还可以放大电流, 因此可以实现超低的能耗. 此外, 人工突触器件能够将数字信号转化为与生物体更兼容的模拟信号, 这使得它在人造感知神经体系中有广泛的应用^[23~25]. 人体通过视觉、听觉、味觉、嗅觉和触觉来感知外界的刺激, 刺激信号经神经传导后由中枢神经系统产生感觉; 类似的, 人工突触器件可以通过类似生物神经工作模式的处理机制, 实现信息整合和处理. 大量研究证明, 可以将人工突触器件与人工感受器进行集成, 从而构建出具有仿生功能的人造感知系统, 在人造假肢、新型人机交互系统和仿生机器人等领域有广泛的应用前景(图2)^[26~31].

因此, 本文总结了基于三端突触晶体管的人工突触器件与类人感知系统的最新研究进展. 列举了三端突触晶体管的器件结构(浮栅晶体管、双电层晶体管、铁电场效应晶体管、电化学晶体管)和材料选择(金属氧化物、低维材料和有机材料), 归纳了基于三端突触晶体管的人造视觉、听觉和嗅觉感知系统的应用, 分析了三端突触晶体管及其构建的人造感知系统面临的挑战, 并展望了其未来的发展.

2 三端突触晶体管的器件结构

类比为生物突触, 基于三端晶体管的突触器件的栅电极通常作为突触前膜, 半导体沟道和源漏电极作为突触后膜, 通过施加栅极脉冲电压调节沟道电导率, 从而模拟了突触可塑性. 基于三端晶体管的突触器件根据其工作原理的不同, 主要分为以下四种类型: 浮栅晶体管(FGT)、双电层晶体管(EDLT)、铁电场效应晶体管(FeFET)和电化学晶体管(ECT), 图3展示了三端突触晶体管的原理图^[32].

2.1 浮栅晶体管

图3a展示了浮栅晶体管的示意图, 其器件结构类似于传统场效应管, 不同的是浮栅晶体管当中的控制栅极通常嵌入在介电层内用以捕获电荷^[33]. 当施加栅极电压时, 电荷可通过热激发或量子隧穿效应被注入到浮栅. 在撤去栅压后, 由于浮栅通过介质层与沟道和控制栅极分开, 而隧道层的电荷阻塞得以存储在浮

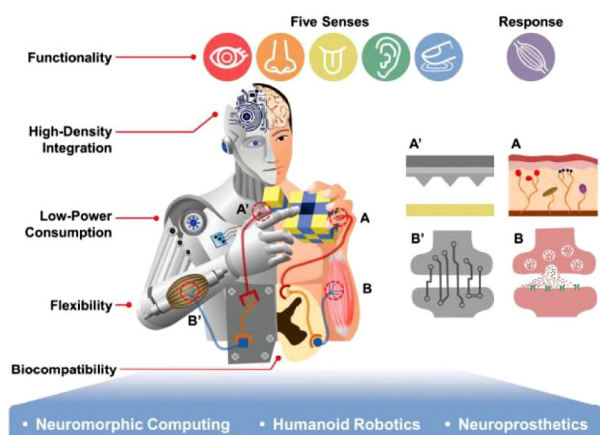


图2 用于神经形态计算、类人机器人和仿生假肢的神经形态电子^[23] (网络版彩图)

Figure 2 Neuromorphic electrons for neuromorphic computing, humanoid robots, and bionic prosthetics [23] (color online).

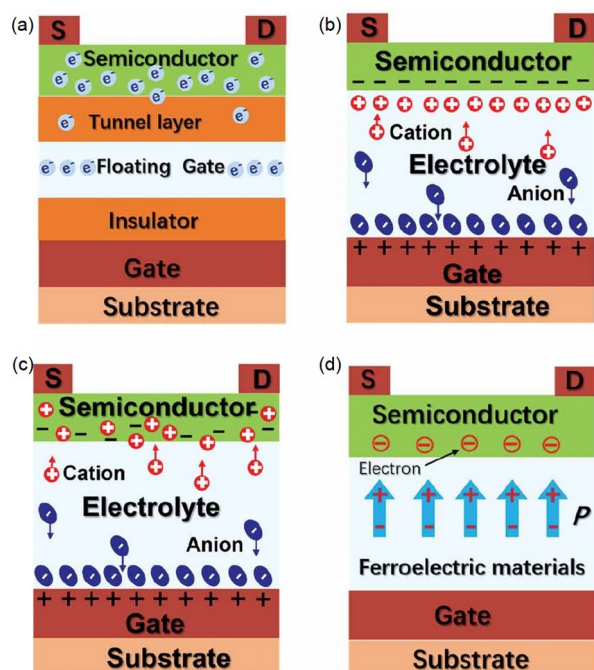


图3 基于三端晶体管的突触器件的原理图: (a) 浮栅晶体管, (b) 双电层晶体管, (c) 电化学晶体管和(d) 铁电场效应晶体管^[32] (网络版彩图)

Figure 3 Schematic diagram of the working principle of three-terminal artificial synaptic devices based on transistors: (a) floating-gate transistor, (b) electric-double-layer transistor, (c) electrochemical transistor and (d) ferroelectric field effect transistor [32] (color online).

栅中。栅极电极和沟道层之间的垂直电场可屏蔽捕获的电荷, 导致阈值电压变化, 从而调节沟道电导。此外, 浮栅中捕获电荷的数量可通过栅极电压脉冲有效调

控^[34]。类似于大脑中信息的处理和传递依赖于突触权重的调节, 浮栅晶体管可通过调节通道电导记录突触权重, 为模拟人工突触器件提供了有前景的平台。

2.2 双电层晶体管

图3b展示了双电层晶体管的示意图, 作为一种电解质门控晶体管(EGT), 它是神经形态器件应用很有前途的器件之一^[35~37]。离子导电材料具有对电子绝缘但对离子导电的特性, 因此可将其用作EGT的栅极介质。双电层晶体管的工作原理如下: 外加电场作用下离子在电解液/电极界面积累, 可形成 $1.0 \mu\text{F}/\text{cm}^2$ 以上的双电层电容。由于强静电调制作用, 双电层晶体管可在低电压(通常低于3 V)下工作。因此, 基于不同类型电解质的双电层晶体管表现出离子/电子耦合行为、高载流子浓度和低功耗的特点^[38,39]。得益于静电调制和离子弛豫, 双电层晶体管可以产生通道电导的易失性变化, 即通道电导的变化是可逆的, 这些特性适合于STP仿真。此外, 随着工作电压升高, 双电层晶体管会发生界面离子电化学反应, 即静电模式会转变为电化学反应模式, 导致通道电导发生非易失性变化, 适合LTP的模拟。

2.3 电化学晶体管

图3c展示了电化学晶体管的示意图, 它是一种能够有效利用电解质层中的离子来调节通道电导的电解质门控晶体管器件, 由于其具有优异的电学稳定性、低廉的成本和良好的生物兼容性等特点, 被认为是一种极具前途的神经形态器件结构。在低栅极电压下, 双电层在栅极和电解液或电解液和沟道界面处形成。然而, 当栅极电压超过一定值时, 电解质中的离子会越过界面迁移, 并与沟道材料发生电化学反应, 改变沟道的电导率, 这个过程被称为电化学掺杂, 同样电化学脱掺杂也可在反向电压下发生。电化学晶体管本质上依赖于将离子大量注入氧化还原活性沟道材料中的电化学反应掺杂/脱掺杂过程。沟道电导在相对较长的时间范围内保持, 使得电化学晶体管适合模拟LTP。此外, 电解质门控晶体管, 包括双电层晶体管和电化学晶体管在内, 具有一个突出优点, 即低功耗。由于强离子在界面处通过电子耦合, 电化学晶体管可以实现低于 $10 \text{ fJ}/\text{spike}$ 的低功耗, 与生物突触的功耗相近^[39]。总之, 电化学晶体管以一种非易失性的方式调节通道电导, 因此

在电子突触器件中有很大的价值.

2.4 铁电场效应晶体管

图3d展示了铁电场效应晶体管的原理图, 该晶体管采用具有自发极化态的铁电材料作为栅介质层, 属于三端突触晶体管. 基于铁电场效应晶体管的三端突触器件在模拟生物突触方面的优点主要包括无损读取、开关比大、功耗低、稳定性高和运行速度快等. 通过栅电压改变所含铁电材料的极化状态, 可以精准地调制铁电场效应晶体管的载流子浓度^[40]. 铁电介质层是铁电场效应晶体管实现突触功能的关键. 铁电材料具有自发极化的能力, 栅极电压可使其向自发极化方向反转. 同时, 通过控制栅极铁电介质偏置的振幅和时间, 可以精确获得极化反转, 从而调控沟道载流子浓度, 显示出非易失性特性^[41]. 利用铁电绝缘子在两种剩余极化状态之间的切换, 可以实现存储器的高低电阻状态记忆功能^[42]. 基于这种非易失性调控, 铁电场效应晶体管可以用来模拟生物突触的可塑性^[43].

3 三端突触晶体管的材料选择

三端突触晶体管凭借其较高的可塑性、并行计算、集成存储和系统信息处理等优点, 已经成功应用于模拟人脑的生物突触, 并且可用于模拟高级神经形态功能. 目前对于器件性能的提升, 除了探索三端突触晶体管的工作原理外, 对于三端突触晶体管中活性材料的选择始终是领域内的研究重点, 本文主要基于金属氧化物、低维材料和有机材料三大类进行了划分讨论.

3.1 金属氧化物

金属氧化物凭借其固有的化学、物理、电学、光学和光电性质而被认为是一类重要的材料, 同时由于其具有独特的层状结构、简单的制备工艺、良好的化学稳定性以及能够进行大面积的制备, 在三端突触晶体管中具有很大的应用潜力. 用于三端突触晶体管的金属氧化物主要包括氧化铟锌(IZO)^[21]、氧化铟镓锌(IGZO)^[41]、氧化钼(MoO₃)^[44]、氧化锌(ZnO)^[45]、氧化镓(Ga₂O₃)^[46]、氧化锌锡(ZTO)^[47]和氧化铝(Al₂O₃)^[48]等, 均可以实现生物突触基本性质的模拟.

Kim等^[41]制备了一个由铝纳米粒(Al NPs)和IGZO

组成的三端突触管器件(图4), Al NPs能够调节嵌入到当中的IGZO的电导. 通过合理调控刺激参数, 这种三端突触管器件成功模拟了EPSC、PPF、短时记忆(STM)和长时记忆(LTM)等基本突触行为. 此外, 该器件具有极低的功耗, 在栅压为-1 V下单个事件的功耗仅为1.67 nJ. Yang等^[44]报道了一个基于二维 α 相氧化钼(α -MoO₃)的三端突触器件, 选用离子液体(IL)作为器件的栅极增强了对半导体中载流子的调控能力. 该器件成功模拟了生物突触的STP和LTP, 并且具有超过50 s的长程保留效果. John等^[45]展示了一种构建在刚性和柔性基板上的离子-电子混合ZnO基晶体管人工突触. 该柔性晶体管具有约 $9 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 规则, 如成对脉冲促进、兴奋/抑制性突触后电流、尖峰时间依赖可塑性和动态逻辑等, 描述了具有时空相关性的并发处理和记忆功能.

研究者除了制备以金属氧化物为半导体层的电学三端突触器件, 还制备了光电结合的三端突触器件. Zhu等^[46]构建了基于Ga₂O₃的光电神经突触器件. 此突触器件不仅实现了基本的突触可塑性, 还具有噪声抑制能力. 触发LTP突触事件的总能量消耗仅为136 fJ, 接近生物中完成每次突触事件所消耗的能量. 最近, Qu等^[47]使用数字对准的ZTO纤维作为人造突触的沟道, 探究出了调控长、短程突触可塑性的新方法, 设计并概念验证了一种具有感觉的人造智能角膜. 通过分别以传感器振荡电路、ZTO纤维基人造突触和电致变色器件作为感受器、处理核心和效应器, 实现了对外界机械和光刺激的编码、信息处理以及透射光的调节

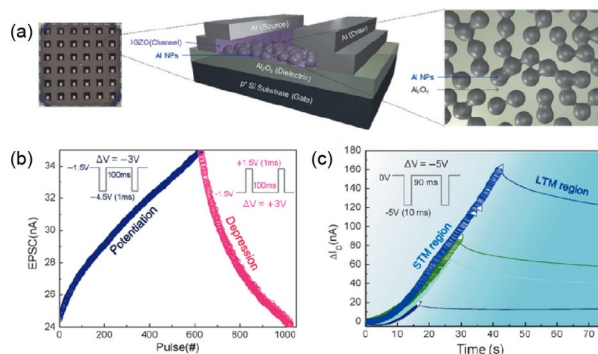


图4 (a) IGZO:Al NPs突触器件结构; (b) 增强和抑制; (c) STM和LTM^[41] (网络版彩图)

Figure 4 (a) Structure diagram of the of IGZO:Al NPs synaptic device. (b) Enhancement and suppression. (c) STM and LTM^[41] (color online).

(图5). Li等^[48]研究了基于氧化铟(In_2O_3)/ Al_2O_3 /非富勒烯受体(Y6)光电晶体管的双向光响应光电突触, 通过双光门实现了全光配置突触权值更新. 在近红外光和紫外光下, Al_2O_3 中捕获的光生电子和 In_2O_3 中电离的氧空位分别提供了抑制和兴奋的光响应. 该双向光电晶体管具有优异的光电突触特性、低非线性和不对称性, 在预处理和后处理任务(如降噪、对比度增强和模式识别)中都表现出高效率. 所提出的双光栅光电突触为构建高效的神经形态视觉传感器和传感器内计算系统提供了有效的策略.

总的来说, 基于金属氧化物的三端突触器件在不同结构, 不同刺激信号、阵列集成化以及生物功能的模拟方面取得了一定的进展. 传统的三端晶体管结构的人工突触器件多使用氧化锌、氧化铝、氧化铟锌等氧化物作为绝缘栅, 此类器件的工作电压高, 且制备绝缘层时对温度及真空度有较高的需求, 制造工艺复杂.

其次, 在突触可塑性的实现方面, 对于单一金属氧化物人工突触器件的长程可塑性的调控仍存在一定困难. 同时对于受到不同刺激(如电、光刺激等)时, 人工突触器件实现突触可塑性时的工作原理仍需探究.

3.2 低维材料

目前, 以一维材料(碳纳米管(CNTs)^[49]、一维纳米线^[50,51])和二维材料(黑磷^[52]、二硫化钼(MoS_2)^[53]、石墨烯^[54]、硒化钼(MoSSe)^[55])等为代表的低维材料凭借具有表面效应、尺寸效应和量子隧穿效应表现出优异的电学、光学、磁学、热学和力学性质, 在制备三端突触器件和系统方面发挥着巨大的潜能.

Zhang等^[49]利用碳纳米管为沟道层、聚乙烯醇(PVA)为电解质层, 实现了一种电导调制器件(图6a~c). 该器件在小电压下易失、大电压下非易失, 能够实现PPF和尖峰数量依赖可塑性(SNDP)等多种突触功能的

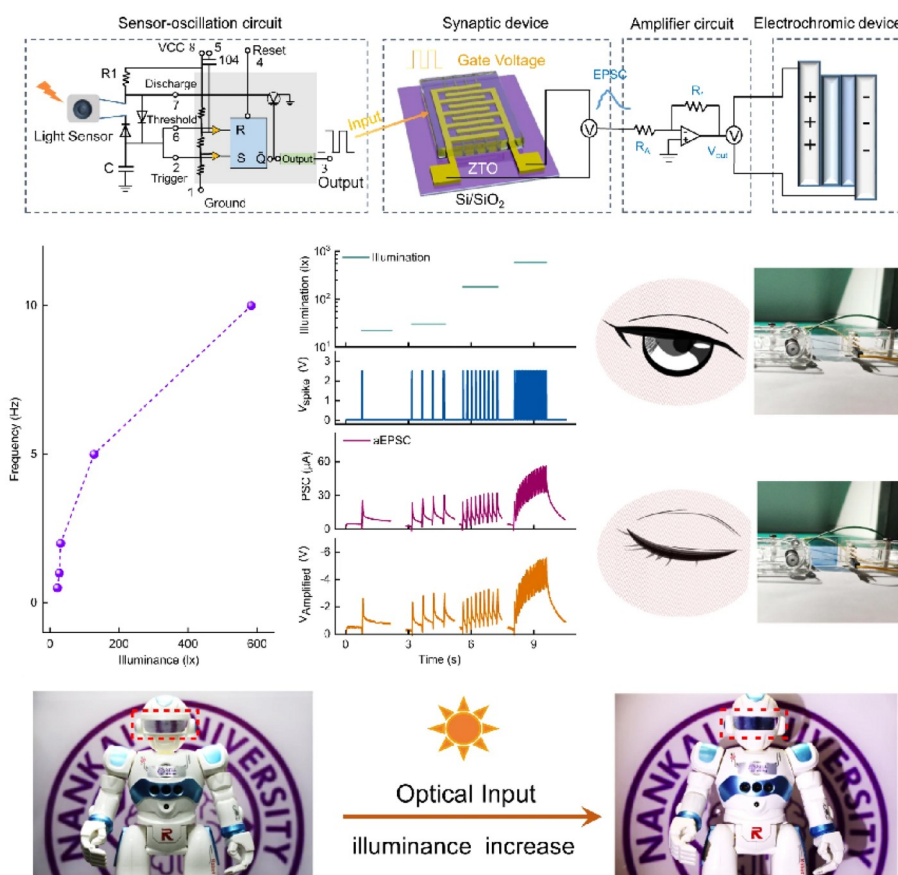


图5 人工智能角膜的感官扩展与交互功能^[47] (网络版彩图)

Figure 5 Sensory expansion and interactive functions of the artificially intelligent cornea ^[47] (color online).

模拟. 此外, 由于机械性能良好, 器件在1000次弯曲循环后保持了良好的突触功能. 一维纳米线由于较大的比表面积以及有利的电荷传输, 能够提高突触晶体管的功能和特性. 2016年, Gou等^[50]以单根二氧化锡(SnO_2)纳米线作为沟道, 制备了一种平面结构的多栅极突触晶体管(图6d). 通过壳聚糖栅介质中质子导电性质引起的双电层耦合效应和突触的多端输入, 实现了EPSC、PPF、动态逻辑运算、适应和滤波等突触功能的模拟. 2022年, Chang等^[51]通过静电纺丝技术和纳米线转移工艺, 制备了基于铟锌氧化物(InZnO)纳米线和高氯酸锂(LiClO_4)电解质的三端突触晶体管, 成功模拟了EPSC、PPF、LTP、长时程抑制(LTD)等突触特性. 通过测量得到的LTP/LTD特性, 模拟了一种用于手写数字识别的人工神经网络, 识别精准度高达93.1%.

2016年, Tian等^[52]展示了黑磷突触装置, 其突触特性呈现内在各向异性, 这是由其低晶体对称性直接引起的. 研究者模拟了生物突触的关键特征, 如具有异质性的长期可塑性、长期增强/抑制和峰值时间依赖性可塑性. 这项工作成功地将内在异质性引入人工神经形态系统, 在该领域迈出了重要的一步. 层状二维材料由于在电子器件领域的应用潜力, 引起了研究者的极大关注. 2017年, Jiang等^[53]制备了一种基于PVA多栅调控的二维 MoS_2 突触晶体管(图7a, b), 成功模拟了EPSC、PPF和动态滤波器等突触行为. 研究者通过调节多个突触前输入端, 实现了在二维 MoS_2 突触晶体管中的时空耦合. 此外, 还成功证明了乘法神经编码和神经元增益调制. 石墨烯凭借其优异的热稳定性、超薄层和良好的机械性能成为集成和柔性电子应用的理想材料. 2018年, Sharbati等^[54]提出了一种电化学石墨烯突触(图7c, d), 突触器件的电导率变化通过石墨烯层间的锂离子浓度实现可逆地调控. 这种电化学石墨烯突触具有较低的功耗、优异的模拟可调性, 能够实现长时程增强/抑制和脉冲时序依赖可塑性等基本的突触功能. 因此, 这种电化学石墨烯突触器件作为硬件在神经形态计算中具有极大的应用潜力. 除了利用电信号来促进离子迁移, 从而模拟突触行为, 光信号的成功引入进一步极大丰富了三端突触晶体管在神经形态器件领域的应用. 2022年, Meng等^[55]受生物眼睛的启发, 制备了一种基于 MoSSe 的突触晶体管来模拟人体视网膜. 通过在 Al_2O_3 /电解质界面形成EDL, 这种器件可实现PPF、STP、LTP/LTD、SNDP等多种突触功

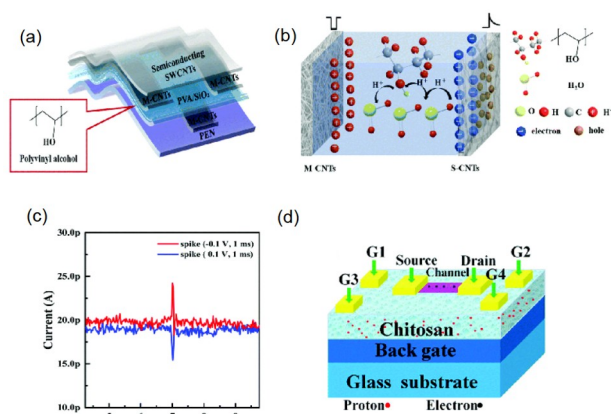


图6 (a) 碳基离子栅突触晶体管示意图; (b) 工作原理; (c) EPSC和IPSC响应^[49]; (d) 壳聚糖膜门控的 SnO_2 纳米线神经元晶体管示意图^[50] (网络版彩图)

Figure 6 (a) Schematic diagram of carbon-based ion gate synaptic transistor; (b) working principle; (c) EPSC and IPSC responses^[49]. (d) Schematic of the SnO_2 nanowire-based neuron transistor gated by chitosan film^[50] (color online).

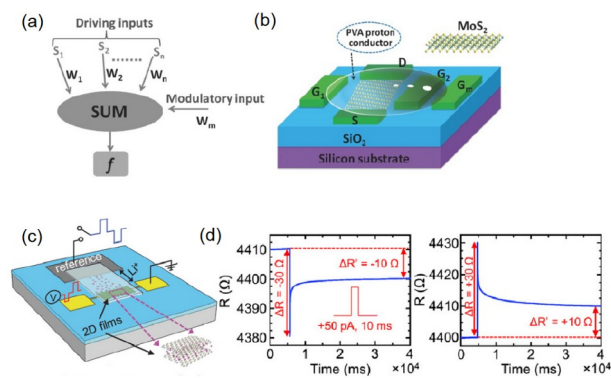


图7 (a) 具有分支树突的人工神经元; (b) 多栅极 MoS_2 神经形态晶体管示意图^[53]; (c) 石墨烯突触示意图; (d) 增强和抑制行为^[54] (网络版彩图)

Figure 7 (a) Artificial neurons with branching dendrites. (b) Schematic diagram of a multi-gate MoS_2 neuromorphic transistor^[53]. (c) Schematic diagram of the graphene synapse. (d) Enhance and inhibit behavior^[54] (color online).

能. 光刺激的引入使得器件将传感、存储和神经形态计算功能集于一体, 实现了类眼的光适应、手写数字的预处理和识别等功能.

低维材料不仅具有独特的物理、化学、光学以及机械性能, 且带隙范围广泛, 可以为不同性能要求的器件提供多种选择. 但是考虑到器件制造的尺寸限制以及器件之间的交互可变性, 对制备的基于二维材料的三端突触器件进行高密度的大规模集成电子电路的开发仍然存在一些局限性.

3.3 有机材料

在三端突触晶体管结构中, 聚合物的电阻转换通常是通过可逆掺杂实现, 其中有机半导体的氧化态通过缺陷位置上的电荷俘获、氧化还原反应或离子嵌入进行调节. 相较于无机半导体, 有机半导体具有诸多优势: 结构上, 有机半导体化学结构可以很容易地被调控, 即具有可设计加工性; 工艺上, 有机半导体材料可通过溶液法等实现低成本制备, 制备工艺简单; 机械性能上, 其与柔性衬底具有较好的兼容性, 可大面积制备柔性器件; 电学性能上有机半导体的自由体积大, 有利于离子迁移, 使其具有较大的开关比及迁移率. 这些特点使其在三端突触晶体管中得到广泛使用, 引起了研究者的极大兴趣. 基于典型材料并五苯(pentacene)^[56,57]、聚噻吩共轭高分子(P3HT)^[58,59]、聚苯乙烯磺酸盐掺杂的聚(3,4-乙炔二氧噻吩) (PEDOT:PSS)^[60,61], 以及聚四呋喃掺杂的聚(3,4-乙炔二氧噻吩) (PEDOT:PTHF)^[62]等的优秀研究成果层见迭出.

2010年, Alibart等^[57]报道了一种基于纳米颗粒的有机场效应晶体管(NOMFET), 这种NOMFET是由金属纳米颗粒掺杂并五苯制成. 研究者利用纳米颗粒的电荷存储能力和NOMFET的放大系数, 改变了金属纳米颗粒的大小、器件的沟道尺寸, 在时域和频域内对器件进行动态调控, 模拟了STP. 2015年, Gkoupidenis

等^[62]报道了基于PEDOT:PSS的有机电化学晶体管(OECT) (图8a~c). 当在栅电极上施加正脉冲电压时, 电解质溶液中的阳离子会被注入到PEDOT:PSS层中, 从而调节流经通道的空穴电流. 在撤去脉冲电压后, 先前注入的离子扩散回到电解质中, PEDOT:PSS层恢复到初始状态. 基于PEDOT:PSS的电化学突触晶体管实现了多种突触神经形态的功能, 包括双脉冲抑制(PPD)和动态过滤特性等典型突触行为. 2016年, Qian等^[59]将基于P3HT涂在SiO₂/Si衬底上作为沟道层, 成功制备了一种基于离子凝胶门控的OECT (图8d~f). 研究团队利用施加在栅电极上的脉冲电压作为输入刺激, 沟道电导变化作为突触权重, 成功模拟了EPSC、脉冲逻辑和OR逻辑操作等多种突触行为. 此外, 他们还深入探究了基于P3HT材料和离子凝胶栅介质的突触晶体管中电解质离子的界面效应和掺杂过程.

除此之外, 有机-无机杂化钙钛矿材料具有ABX₃型的特殊结构, 其载流子迁移率高、载流子寿命和扩散长度较长、光吸收范围可调和光电转换效率高, 在三端光电突触器件构建方面具有显著优势. 例如, 刘云圻院士团队^[63]通过掺入 π 共轭苊氧乙基铵(POE)配体合成了二维钙钛矿(POE)₂SnI₄, 并进行了系统研究以获得增强的性能和可靠的钙钛矿场效应晶体管(PeFET). 优化后的PeFET显示出超过0.3 cm² V⁻¹ s⁻¹的空穴迁移率、高重复性和工作稳定性. 同时, 光存储器

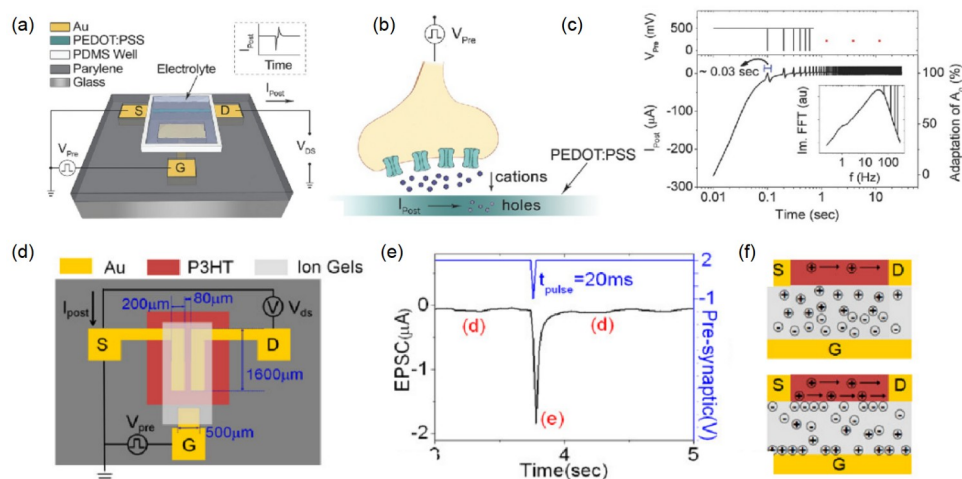


图8 (a) OECT结构示意图; (b) 模拟生物突触; (c) 突触后电流和突触塑化过程^[62]; (d) 基于P3HT的OECT平面结构示意图; (e) 突触后信号; (f) 不同工作模式下的离子分布示意图^[59] (网络版彩图)

Figure 8 (a) Structure diagram of OECT. (b) Biological synaptic simulation. (c) Time-normalized I_{Post} and adaptation percentage of I_{Post} amplitude, A_0 [62]. (d) Plane structure diagram of OECT based on P3HT. (e) EPSC. (f) Diagram of ion distribution under different operating modes [59] (color online).

件表现出优异的光响应特性、高的可见光响应度、稳定的存储擦除循环以及具有竞争力的存储保持性能. Zhu等^[64]展示了高性能和无滞后的p沟道钙钛矿薄膜晶体管(TFT). 研究者以3D MASnI₃为基础的沟道层, 通过合理的卤化物阴离子工程, 少量溴化物和氯化物共同取代碘化物提高了薄膜质量和空位钝化, 使TFT具有优异的电学特性, 实现了高空穴迁移率, 具有高的操作稳定性和再现性.

与其他材料相比, 有机材料的弹性可以为器件提供高机械柔韧性, 除此之外, 聚合物的电导也可以通过多种方法进行控制, 这为不同要求的器件的制备提供了多种选择. 然而, 基于有机聚合物的器件在量产以及性能稳定性上仍具有较大问题, 由于聚合物结构的不均匀性, 当器件的尺寸到达纳米级别时, 其性能的稳定性将被显著降低.

4 基于三端突触晶体管的人造感知系统构建

随着对生物器官和神经系统的深入研究, 受生物启发的人造感知系统优势日益凸显. 人体感知系统连接了感觉器官(或感受器), 对来自外部环境的多种刺激进行检测, 并将感测到的刺激信号传输至大脑(或中枢神经). 将三端突触晶体管与相应的传感单元和后端控制模块连接, 可以在硬件环境下构建人造输入-输出感知系统, 实现更复杂的功能, 如图像识别和运动感知. 未来的神经形态电子学将会在生物和人造感知系统之间精确匹配信号, 确保感觉和运动部件之间的信号传输达到交互作用. 下面将重点介绍基于三端突触晶体管的人造视觉、听觉和嗅觉感知系统.

4.1 人造视觉感知系统

视觉是人类接收和处理外部环境信息的主要感觉方式, 对于学习和记忆的信息感知至关重要^[65,66]. 视觉感知系统作为人类获取信息的主要来源, 是仿生神经形态电子中的主要研究方向. 人类视觉感知系统的原理如下: 视网膜通过突触连接神经元层, 当接收到视觉信息时, 将视觉信息转换为神经冲动, 并通过视觉神经将神经冲动传输给大脑最终形成视觉. 因此, 开发集视网膜感知、信息处理和存储于一体的人造视觉感知系统至关重要. 迄今为止, 利用三端突触管集成的

人造视觉感知系统的研究愈来愈多, 对未来视觉修复和人工智能具有重要意义.

为了模拟人造视觉系统, 研究者开发了由光信号调制的柔性光子三端突触装置. Shi等^[67]报道了一种具有PTCDI-C₈/C₈-BTBT/PTCDI-C₈三明治结构的有机异质结双极性晶体管. 在相同的光照条件下, 研究者通过调节栅极电压, 实现了双向光响应的可控调节, 并利用该阵列的双向光响应效应完成了对人类视觉适应的模拟, 为神经形态视觉模拟提供了一种新的思路. Chai等^[68]研究了计算事件驱动的视觉传感器, 每个视觉传感器由两个极性相反的平行光电二极管组成, 时间分辨率为5 μs. 为了响应光强度的变化, 传感器通过对其各自的光响应性进行电编程, 产生具有不同振幅和极性的尖峰信号. 视觉传感器的非易失性和多级光致发光性可以模拟突触权重, 并可用于创建传感器内尖峰神经网络. 近年来, 研究者通过构建多端神经形态晶体管成功模拟了立体视觉中的三维物体识别. Fan等^[69]利用质子传导机制和电荷俘获技术, 提出了聚环氧乙烷(PEO)和PEO:LiClO₄侧液门控In₂O₃、并戊烯TFTs和2D-MoS₂ FETs. 研究者基于In₂O₃/氧化铪(Er₂O₃)突触晶体管的3D物体识别原理, 实现了一种人造立体视觉系统(图9a), 利用迟滞效应实现了多种STP和LTP, 包括IPSC、STDP、PPD和动态滤波等. 这项工作对构建具有强大脑激发动态时空处理的尖峰神经网络具有重要意义. 最近, Jin等^[70]也通过利用侧栅晶体管实现了自适应环境亮度的人造视觉感知系统. 研究者采用侧栅结构和丝网印刷离子凝胶作为栅介质层, 设计了一种具有负光导行为的光电In₂O₃晶体管阵列. 该晶体管器件阵列在不同光强水平下表现出自适应行为, 从而证明了对外部环境具有可调阈值范围的视觉适应性.

另一方面, 研究人员巧妙地将光敏元件与三端突触晶体管结合, 设计了一系列的光子人造视觉感知系统. Kwon等^[71]提出了一种模拟光适应生物视觉功能的人造光电神经形态器件阵列(图9b). 这种人造视觉感知电路包括一个光伏分压器(CdSe光电传感器和a-IGZO负载晶体管)和一个金属氧化物离子电子突触晶体管(a-IGZO TFT), 其中光伏分压器充当人工视网膜, 离子电子突触晶体管则作为视觉神经. 该光电神经形态装置实现了多种视觉突触功能, 包括光触发STP、LTP和神经易化作用. 此外, 他们还在不同光照

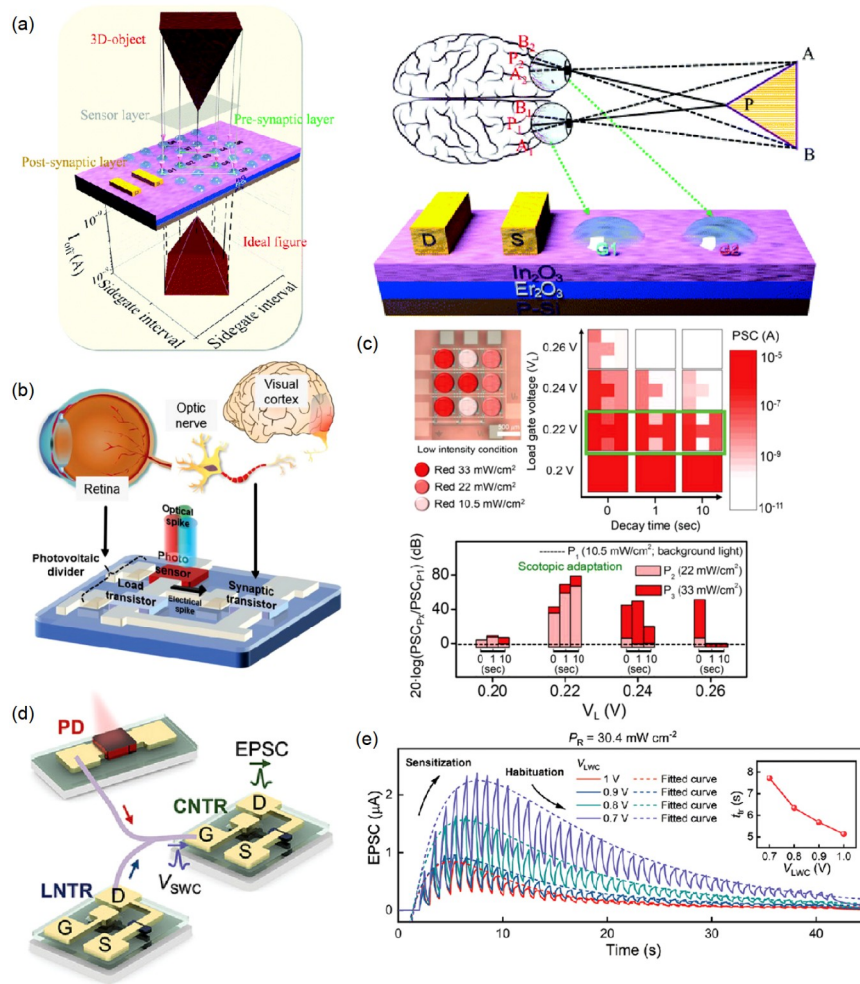


图 9 (a) 三维立方锥体识别机理和双目视觉示意图^[69]; (b) 模拟光适应生物视觉功能的人工光电神经形态装置示意图; (c) 不同光照水平下的环境适应性感知行为^[71]; (d) 集成的DAVAN设备; (e) DAVAN装置在不同VLWC幅值下的动态EPSC响应^[72] (网络版彩图)

Figure 9 (a) Schematic diagram of the mechanism of the recognition of a 3D cubic cone and binocular vision ^[69]. (b) Schematic illustration of artificial optoelectronic neuromorphic device to emulate light-adaptable biological vision. (c) Environment-adaptable perception behaviors under different light illumination levels ^[71]. (d) An integrated DAVAN device. (e) Dynamic EPSC responses of a DAVAN device at different VLWC amplitudes ^[72] (color online).

水平下模拟了这项装置的环境适应性感知行为(图9c)。Lee等^[72]提出了一种基于钙钛矿光电探测器(PDs)和离子掺杂电解质神经晶体管的动态人造视觉适应神经(DAVAN)装置(图9d)。他们采用溶液法制备了基于钙钛矿的光电探测器(MAPbI₃ PDs)和锂离子交联聚(4-乙烯基酚)(PVPPh-Li)固体电解质基氧化铜神经晶体管(Li-NTR)。其中, Li-NTR与MAPbI₃ PD共用漏极, 组合成负载神经晶体管(LNTR)。人工光感受器是集成LNTR和MAPbI₃ PD的器件, 接收其传递到栅极的电信号的器件被称为皮质神经晶体管(CNTR)。MAP-

bI₃ PD作为视网膜内感光器的光接收元件, 将外部视觉刺激转化为电信号, 然后信号被传输到CNTR以暂时改变其通道电流。根据光强控制LNTR的电刺激, 可以改变其自适应特性。因此, 阵列级的DAVAN器件能够实现视觉适应过程(图9e), 为下一代脉冲神经网络的实现提供了技术基础。虽然基于光电突触晶体管的人造视觉系统具有优异的光电性能和仿生突触功能, 但在神经形态计算和复杂的人造感知系统中仍面临各种挑战。一方面, 大多数光电晶体管只能在单器件水平运作, 因此仅能模拟基本的生物突触功能, 集成高密度

光电晶体管阵列以实现更复杂的神经形态功能是未来一个重要的研究方向. 另一方面, 现有的光电突触晶体管体积较大, 不利于光电突触器件的集成. 因此, 采用纳米加工技术减小器件尺寸的同时降低光电突触器件的能耗, 获得高度一致性和稳定性的光电突触器件也至关重要.

4.2 人造听觉感知系统

声音在人听觉系统中的传播是一个复杂的过程: 声波以特定的频率和振幅振动鼓膜, 这些机械振动通过听小骨传递到耳蜗毛细胞, 并转化为电信号. 听觉系统是人类最重要的感知系统之一, 具有检测、处理和存储声信号的能力, 使人类的信息交流更加高效和直接^[73]. 研究人员一直在努力开发低成本、低功耗、方便、稳定的人造听觉感知系统, 旨在帮助听觉障碍患者恢复或提高听觉感知能力^[74,75]. 此外, 灵活稳定的人造听觉感知系统将为下一代智能机器人注入新的生命力, 使其具备定位和追踪声音的能力.

目前, 研究者利用三端突触晶体管模拟了人类听觉感知系统的某些功能. Wang等^[76]提出了一种利用电阻开关突触进行类脑时空计算的神经形态方法(图10a). 不同神经元间尖峰的时间差提供了高稀疏度和高信息容量的时空编码, 他们通过网络将时间编码的尖峰重构为指数衰减信号. 在经过一定的监督训练后, 这种具有电阻开关突触的多神经网络能够实现对脉冲序列的识别. 结果表明, 时空神经网络由于对尖峰时间的高灵敏度, 成功模拟了人耳的声音方位判别功能. 随即, He等^[77]利用多端电解门控突触晶体管构建了简易的容性耦合双输入/输出人工神经网络, 成功实现了人耳对声音方位角的判别.

2019年, Seo等^[24]通过结合离子凝胶门控有机突触晶体管(IGOST)和摩擦电声传感器, 开发了人造听觉感觉系统(图10b). 在不同的退火温度下, 可以通过控制聚合物薄膜的形态特性来调节单个IGOST的衰变时间. 在人造听觉感知系统中, 扬声器产生5 Hz的方形声波, 通过声传感器转换成电压信号, 然后将整流输出电压脉冲施加到不同退火温度的IGOST栅极上, 实现了声波诱导EPSC、STP和LTP的功能. 接着, Bolat等^[78]将基于微机电系统(MEMS)的声传感器连接到氧化铝(AlO_x)突触晶体管上, 证明了其在全音频范围内处理声学信号的能力. 该系统能够对20 Hz~20 kHz范

围内的所有音频产生响应, 体现了其在神经声学应用中的巨大潜力. 近来, Liu等^[79]提出了一种用于神经形态声音检测的自供电人造听觉通路(图11a), 其中声学受体由柔性摩擦纳米发电机(TENG)模拟. 研究者利用纳米发电机为系统供电以实现系统自供电, 将电解门控晶体管用于模拟突触信息处理, 并将这两个部分连接起来形成了人造听觉通路. 通过构建神经网络, 该系统能够利用耳间时差对声源进行定位(图11b). 当声角在0~180°范围内变化时, 突触后反应明显增强(图11c, d), 表明该人造听觉系统具有声音定位功能.

虽然为模拟人类的听觉能力开发出了一系列三端突触晶体管及对应的听觉感知系统, 然而, 这些系统只实现了一些声学突触信息处理功能. 声音传感器并不是与突触器件直接相连的, 声音信号没有实现通过尖峰脉冲编码后经整流桥输入到突触的栅极. 目前, 人工听觉系统的研究仍处于起步阶段, 关于基于三端突触晶体管的人造听觉感知系统的研究报道也相对较少. 基于三端突触晶体管的人造听觉感知系统通常局限于在单个器件层面构建简单的神经网络, 实现类脑声音定位功能, 而且仅限于感知环境声信号, 在整合、分析和存储海量声音信息方面存在很大不足. 因此, 未来一个重要的研究方向是开发集感知、记忆和分析功能于一体的人造听觉感知系统. 此外, 相较于人类听觉系统, 开发具有智能适应性和低功耗的人造听觉感知系统也是必不可少的.

4.3 人造嗅觉感知系统

嗅觉系统是人类最基本的感知系统之一, 通过嗅觉感受器、大脑功能区和肌肉的相互协调作用, 使人体能够对危险复杂的环境做出快速反应^[80]. 最近, 研究人员提出了仿生嗅觉受体, 用于检测各种气味, 晶体管型气体传感器因其小巧、易集成、多功能等优点, 被认为是当前最有发展潜力的气体传感器之一. 这些传感器已在生物医学工程、环境监测、食品安全和反恐等领域得到广泛应用^[81]. 研究人员将气体传感器与突触装置集成, 构建了传感、存储和计算平台, 开发了人造嗅觉感知系统, 实现了先进的嗅觉神经形态功能. 这些研究对未来构建神经形态计算系统和智能机器人具有重要意义.

在日常生活和工业环境中, 神经性毒气的检测对安全至关重要. Yoo等^[82]报道了一种基于人类嗅觉受

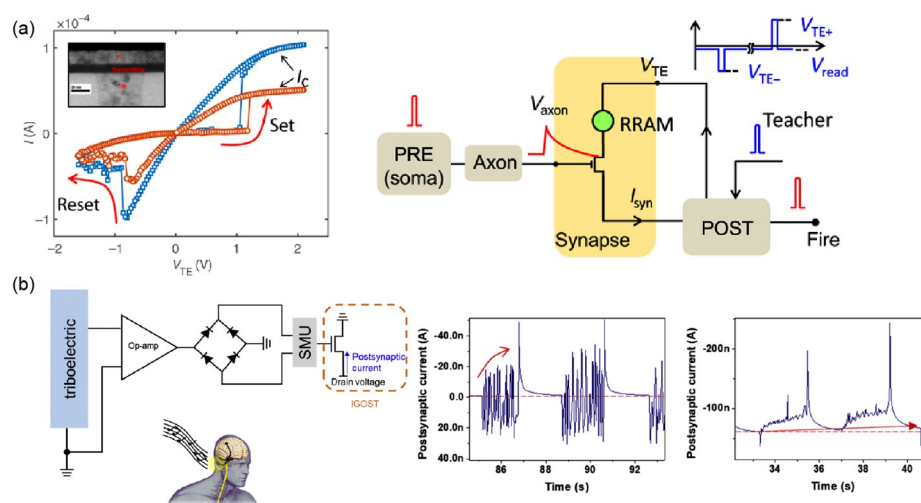


图 10 (a) 硬件神经网络的说明方案^[76]; (b) 听觉神经系统的电路图和人类听觉神经系统的示意图^[24] (网络版彩图)

Figure 10 (a) Illustrative scheme of hardware neural network [76]. (b) A circuit diagram of an auditory nerve system and schematics of human auditory nerve system [24] (color online).

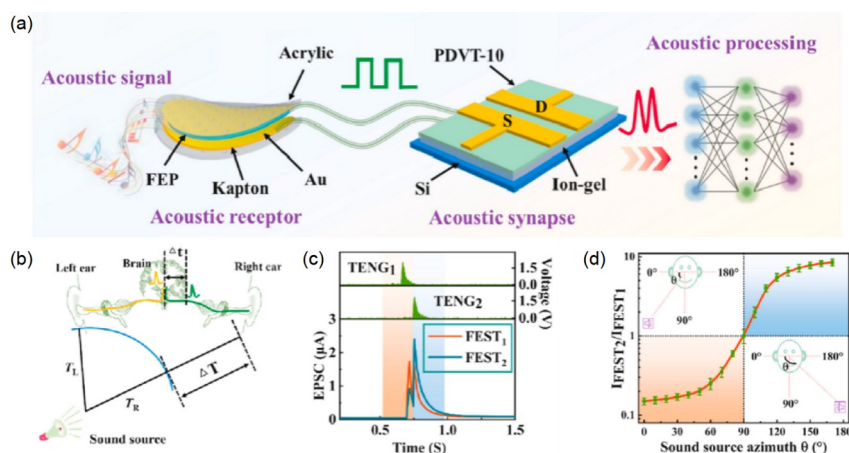


图 11 (a) 自供电人工听觉系统示意图; (b) 声音在人脑中的位置的说明性描述; (c) 两个突触晶体管对来自正确方向的声音的突触后电流响应; (d) 两个突触晶体管的电流幅度比随声源方位角的变化^[79] (网络版彩图)

Figure 11 (a) A diagram of a self-powered artificial auditory system. (b) An illustrative depiction of sound location in the human brain. (c) Postsynaptic current responses of the two synaptic transistors in response to a sound originating from the right direction. (d) Variation of the current amplitude ratio of the two synaptic transistors with respect to the azimuthal angle of the sound source [79] (color online).

体(hORs)的单壁碳纳米管场效应晶体管(SWCNTS-FET), 用于检测甲基膦酸二甲酯(DMMP) (图12a, b). 他们通过利用hORs对特定靶分子的高度特异性, 筛选出了对DMMP具有高选择性的hOR2T7, 从而制备了hOR2T7共轭生物电子鼻(hOR2T7 B-nose). HOR2T7 B-nose能够选择性地检测浓度为10 fM的DMMP, 这表明共轭生物电子鼻可以作为DMMP的超灵敏检测工具, 可用于生化战争中的毒气检测. 现有的基于晶体管的气体传感器大多采用单极晶体管, 通常对气体检测

只有单一响应, 不能检测多种气体, 而双极性晶体管因具有两种类型的电荷载流子, 从而提供了高选择性传感的可能性. Zhou等^[83]展示了一种由2,5-双(4-联苯基)双噻吩(BP2T)和十六氟酞铜($F_{16}CuPc$)双极性有机场效应晶体管(OFET)制成的高性能气体传感器(图12c). 与单极晶体管相比, 双极晶体管具有参数多、输出信号高和稳定性好等优点. 该系统对多种气体(包括 NO_2 、 NH_3 、 H_2S 和 SO_2)的电流信号表现出清晰的双重响应, 具有高度的选择性和灵敏度.

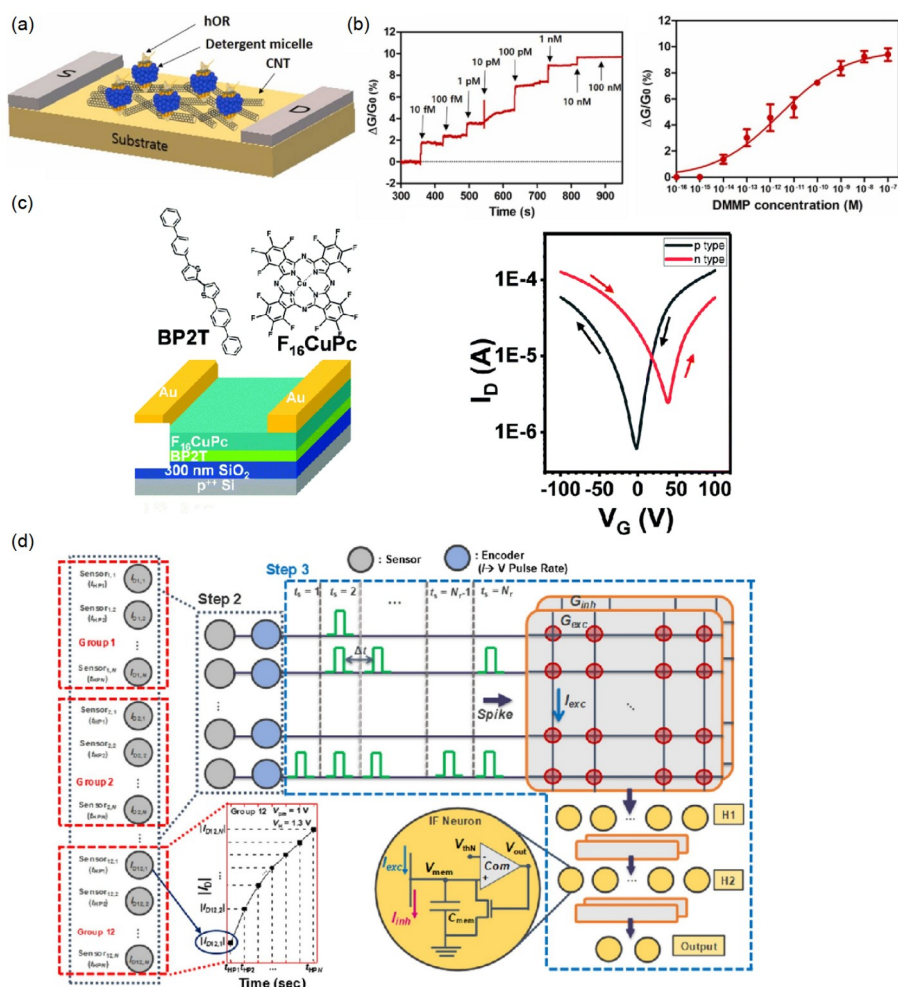


图 12 (a) 基于hOR的CNT-FET传感器示意图; (b) 使用hOR2T7 B型鼻检测DMMP^[82]; (c) BP2T和F₁₆CuPc的分子结构及双极性OFET的器件配置及典型转移特性曲线^[83]; (d) 用于人工嗅觉系统的SNN和FET型传感器阵列示意图^[85] (网络版彩图)

Figure 12 (a) Schematic diagram of hOR-based CNT-FET sensor. (b) Detection of DMMP using a hOR2T7 B-nose^[82]. (c) Molecular structures of BP2T and F₁₆CuPc, device configuration of the ambipolar OFET and typical transfer characteristic curve^[83]. (d) Schematic diagram of the SNN and FET-type sensor array for the artificial olfactory system^[85] (color online).

目前, 基于三端晶体管的高性能气体传感器阵列被广泛应用于复杂气体环境的评估。Yuan等^[84]提出了一种由多个硅基化学敏感场效应晶体管(CSFET)组成的集成阵列, 可用于食品安全和质量检测。这种阵列集成了钌(Ru)、Ag和SiO_x三种传感材料, 能够分别对NH₃、H₂S和湿度实现稳定的室温响应。此外, 这种阵列不仅在痕量气体传感方面表现出高性能, 还可以用传统的硅工艺实现低成本大量制造。总而言之, CSFET传感器阵列具有便携性和耐用性, 在健康、安全、空气质量监测等方面具有广阔的应用前景。Kwon等^[85]提出了一种基于峰值神经网络(SNN)和场效应晶体管(FET)型气体传感器的新型人造嗅觉感知系统(图

12d)。研究者通过FET型气体传感器的微加热器偏置和预偏置, 获取了NO₂和H₂S气体浓度的传感器电流数据。利用该数据集训练由生物神经元和电突触装置组成的SNN, 从而预测气体类型及其浓度, 最终通过SNN对NO₂和H₂S气体的检测精度来评价其性能。

类神经传感检测与信息存储在电子器件中的集成对智能机器人和医疗健康具有重要意义。Song等^[86]提出了一种有效便捷的记忆系统, 用于模拟暴露于有害气体(NO₂)下造成的记忆损伤。由于有机半导体在室温下具有良好的气敏性, 这种人工记忆系统仅基于OFET就能够实现传感检测和信息存储的一体化(图13a)。该装置展示了良好的气体控制的PPF行为, 还能积累有

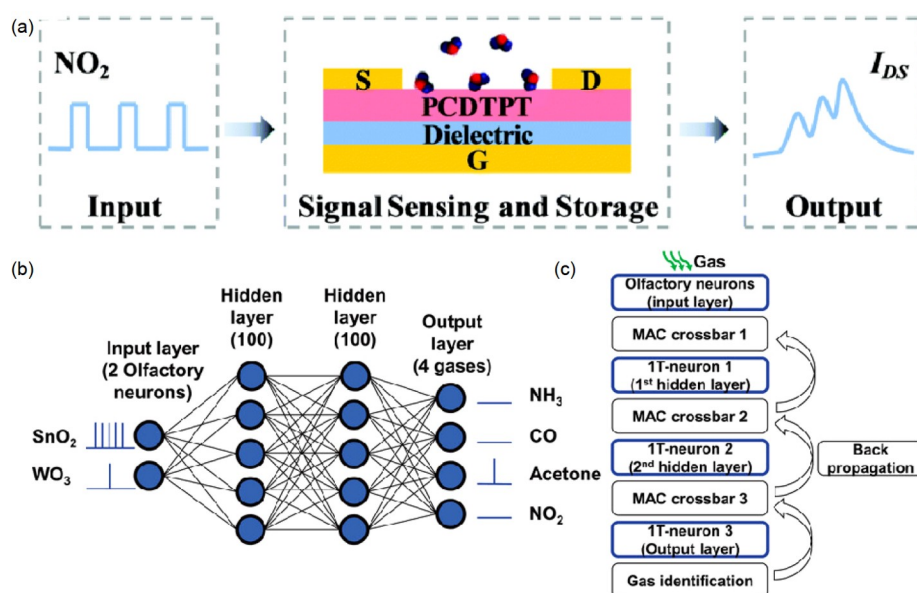


图 13 (a) 基于单个PCDTPT OFET的人工器官损伤记忆系统工作模型示意图^[86]; (b) 构建用于气体分类的多层尖峰神经网络(SNN)示意图; (c) 气体分级模拟流程图^[87] (网络版彩图)

Figure 13 (a) Schematic of the operational model of the artificial organ-damage memory system based on a single PCDTPT OFET ^[86]. (b) Schematic of multi-layer spiking neural network (SNN) constructed for gas classification. (c) Flow chart of the simulation for the gas classification ^[87] (color online).

有害气体泄漏的传感信号, 从而模拟了人体在有害气体污染下的吸入、代谢和器官累积损伤. 基于上述特点, 该装置具有模拟有害气体对人体器官损伤的仿生能力. Han等^[87]通过将由半导体金属氧化物(SMO)制成的化学电阻气体传感器与由金属氧化物半导体场效应晶体管(MOSFET)制成的单晶体管神经元结合, 提出了一种用于神经形态电子鼻应用的人造嗅觉神经元模块. 这种电子鼻通过模仿生物嗅觉神经元, 能够成功检测到气体并为传感器内的神经形态功能编码脉冲信号. 该方法本质上是利用尖峰神经网络(SNN)对复杂的混合信号进行分析, 从而识别出气味源(图13b, c).

在目前的研究中, 各种各样的材料包括石墨烯、碳纳米管、氧化铟薄膜和二硫化钼等, 已被用于制备高性能的基于晶体管的气体传感器. 此外, 构建人造嗅觉感知系统的机制有多种, 包括气味模式识别的人工网络算法、整合突触记忆的人工电子鼻和神经形态晶体管的气体检测功能^[85,88]. 目前, 大多数基于晶体管的气体传感器仅将气体浓度转换为电信号, 缺乏嗅觉电子鼻的感知检测和信息存储功能. 因此, 未来的研究重点之一是将神经形态晶体管与其他电子元件耦合, 构建高性能的人造嗅觉感知系统.

5 总结与展望

随着摩尔定律的困境和冯·诺伊曼瓶颈的出现, 构建类生物突触结构、功能的电子器件显得至关重要. 相较于两端的阻变器件, 三端晶体管不仅能够同时接收和读取刺激, 还可以通过沟道层传递信号以及栅极独立调节突触权重. 此外, 基于三端晶体管的人工突触器件在采集视觉、听觉、嗅觉等信号来工作的人造感知系统方面有广阔的应用前景. 本文综述了三端突触晶体管在器件结构、材料选择方面的研究进展及其在人造感知系统中的应用, 重点对基于三端晶体管的人造视觉、听觉和嗅觉感知系统进行了分类和总结. 大量研究表明, 三端突触晶体管将应用于下一代可穿戴电子设备领域. 随着三端突触晶体管的不断进步和发展, 其应用领域也会越来越广泛. 在智能感知的应用方面, 三端突触晶体管可应用于生物机器人. 在人造神经形态系统的创建方面, 基于三端突触晶体管的人造感觉系统相比传统传感器可以更有效地将外部信息传递到大脑. 三端突触晶体管还将影响仿生假肢的未来, 其可以更好地促进人机融合. 三端突触晶体管在生物电子学和神经形态应用方面会继续吸引更多

多关注.

尽管三端突触晶体管的发展仍处于早期阶段, 但我们应该明确通用的性能指标, 图14展示了理想的突触装置应具有的特点^[89]. 迄今为止, 在突触晶体管领域报道的大部分工作都侧重于实现基本的突触性能, 而忽视了对这些性能指标的考虑. 因此, 未来的研究应该利用这些指标来评估设备性能. 除了上述基于三端晶体管的人工突触的缺点外, 神经形态器件领域还面临一些主要问题和挑战: (1) 必须模仿完整的突触功能, 但迄今为止我们只能模仿生物突触行为的一小部分, 开发大规模集成的柔性阵列或者芯片仍面临严峻的挑战; (2) 神经形态晶体管的稳定性、耐久性和兼容性需要进一步提高; (3) 由于生物神经元排列在三维空间中, 突触连接的数量为 $\approx 10^{15}$ 个, 神经形态装置的互连是一个巨大的挑战; (4) 现阶段人造感知系统的构建主要依赖于神经形态器件与其他电子元件之间的耦合. 因此, 开发兼容性强、灵敏度高、电导可调的神经形态器件是十分必要的; (5) 基于三端晶体管的人造感知系统通常是在单个器件层面构建的, 因此在系统级实现低功耗、大规模并行处理和内存处理仍然面临困难; (6) 目前对大脑功能和机制的认识仍然有限, 这也是实现类脑计算的一大挑战, 因此利用硬件实现类脑计算还有很长的路要走; (7) 深入了解生物神经系统是实现仿生神经系统与生物神经系统之间信号准确匹配的必要条件; (8) 多模态人造感觉系统的应用和综

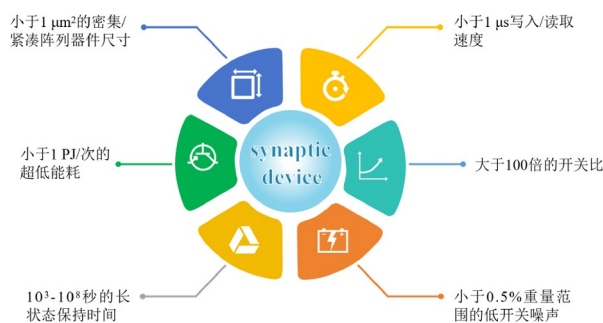


图 14 理想突触装置的特点^[89] (网络版彩图)

Figure 14 Characteristics of an ideal synaptic device ^[89] (color online).

合策略仍然有限. 例如, 很少有装置可以整合三种或更多类型的感官信息来执行诸如通过协调触觉、本体感觉和视觉来抓取物体的任务; (9) 在某些硬件平台上实现高级神经形态算法具有很大的潜力. 将人工神经网络或峰值神经网络结合起来, 实现模式识别和感知学习等智能功能.

三端突触晶体管凭借读写分离的工作方式、丰富的动态特性、良好的通道调节能力和低功耗等特性, 为实现神经形态计算提供了更多的可能性. 总的来说, 基于三端突触晶体管的人造感知系统研究已经发展成为神经形态工程的一个新分支. 相信不久的将来, 构建多模态人造感知系统将成为人工智能和神经形态工程发展的不可或缺的一部分, 为这一领域注入新的活力.

参考文献

- Gordo B. *City Community*, 2017, 16: 16–19
- Fuller EJ, Keene ST, Melianas A, Wang Z, Agarwal S, Li Y, Tuchman Y, James CD, Marinella MJ, Yang JJ, Salleo A, Talin AA. *Science*, 2019, 364: 570–574
- Li E, Wu X, Chen Q, Wu S, He L, Yu R, Hu Y, Chen H, Guo T. *Nano Energy*, 2021, 85: 106010
- Deng S, Yu H, Park TJ, Islam ANMN, Manna S, Pofelski A, Wang Q, Zhu Y, Sankaranarayanan SKRS, Sengupta A, Ramanathan S. *Sci Adv*, 2023, 9: eade4838
- Liu J, Gong J, Wei H, Li Y, Wu H, Jiang C, Li Y, Xu W. *Nat Commun*, 2022, 13: 7427
- Xu Z, Ni Y, Han H, Wei H, Liu L, Zhang S, Huang H, Xu W. *Chin Chem Lett*, 2023, 34: 107292
- Luo Y, Abidian MR, Ahn JH, Akinwande D, Andrews AM, Antonietti M, Bao Z, Berggren M, Berkey CA, Bettinger CJ, Chen J, Chen P, Cheng W, Cheng X, Choi SJ, Chortos A, Dagdeviren C, Dauskardt RH, Di C, Dickey MD, Duan X, Facchetti A, Fan Z, Fang Y, Feng J, Feng X, Gao H, Gao W, Gong X, Guo CF, Guo X, Hartel MC, He Z, Ho JS, Hu Y, Huang Q, Huang Y, Huo F, Hussain MM, Javey A, Jeong U, Jiang C, Jiang X, Kang J, Karnaushenko D, Khademhosseini A, Kim DH, Kim ID, Kireev D, Kong L, Lee C, Lee NE, Lee PS, Lee TW, Li F, Li J, Liang C, Lim CT, Lin Y, Lipomi DJ, Liu J, Liu K, Liu N, Liu R, Liu Y, Liu Y, Liu Z, Liu Z, Loh XJ, Lu N, Lv Z, Magdassi S, Malliaras GG, Matsuhsu N, Nathan A, Niu S, Pan J, Pang C, Pei Q, Peng H, Qi D, Ren H, Rogers JA, Rowe A, Schmidt OG, Sekitani T, Seo DG, Shen G, Sheng X, Shi Q,

- Someya T, Song Y, Stavrinidou E, Su M, Sun X, Takei K, Tao XM, Tee BCK, Thean AVY, Trung TQ, Wan C, Wang H, Wang J, Wang M, Wang S, Wang T, Wang ZL, Weiss PS, Wen H, Xu S, Xu T, Yan H, Yan X, Yang H, Yang L, Yang S, Yin L, Yu C, Yu G, Yu J, Yu SH, Yu X, Zamburg E, Zhang H, Zhang X, Zhang X, Zhang X, Zhang Y, Zhang Y, Zhao S, Zhao X, Zheng Y, Zheng YQ, Zheng Z, Zhou T, Zhu B, Zhu M, Zhu R, Zhu Y, Zhu Y, Zou G, Chen X. *ACS Nano*, 2023, 17: 5211–5295
- 8 Liu H, Li B, Xi P, Liu Y, Li F, Lang Y, Tang R, Ma N, He J. *Cyborg Bionic Syst*, 2023, 4: 0017
- 9 Wang L, Ma L, Yang J, Wu J. *Cyborg Bionic Syst*, 2021, 2021: 2021/9843259
- 10 Dong Y, Wang S, Huang Q, Berg RW, Li G, He J. *Cyborg Bionic Syst*, 2023, 4: 0044
- 11 Boybat I, Le Gallo M, Nandakumar SR, Moraitis T, Parnell T, Tuma T, Rajendran B, Leblebici Y, Sebastian A, Eleftheriou E. *Nat Commun*, 2018, 9: 2514
- 12 Sung SH, Jeong Y, Oh JW, Shin HJ, Lee JH, Lee KJ. *Mater Today*, 2023, 62: 251–270
- 13 Tian H, Mi W, Wang XF, Zhao H, Xie QY, Li C, Li YX, Yang Y, Ren TL. *Nano Lett*, 2015, 15: 8013–8019
- 14 Wu C, Kim TW, Choi HY, Strukov DB, Yang JJ. *Nat Commun*, 2017, 8: 752
- 15 Tian H, Wang C, Chen Y, Zheng L, Jing H, Xu L, Wang X, Liu Y, Hao J. *Sci Adv*, 2023, 9: eadd6950
- 16 Zhang S, Guo J, Liu L, Ruan H, Kong C, Yuan X, Zhang B, Gu G, Cui P, Cheng G, Du Z. *Nano Energy*, 2022, 91: 106660
- 17 Shi J, Jie J, Deng W, Luo G, Fang X, Xiao Y, Zhang Y, Zhang X, Zhang X. *Adv Mater*, 2022, 34: 2200380
- 18 Yang L, Wang Z, Zhang S, Li Y, Jiang C, Sun L, Xu W. *Nano Lett*, 2023, 23: 8–16
- 19 Ni Y, Liu L, Liu J, Xu W. *ACS Nano*, 2022, 16: 20294–20304
- 20 Yu H, Gong J, Wei H, Huang W, Xu W. *Mater Chem Front*, 2019, 3: 941–947
- 21 Zhu LQ, Wan CJ, Guo LQ, Shi Y, Wan Q. *Nat Commun*, 2014, 5: 3158
- 22 Feng P, Xu W, Yang Y, Wan X, Shi Y, Wan Q, Zhao J, Cui Z. *Adv Funct Mater*, 2017, 27: 1604447
- 23 Park HL, Lee Y, Kim N, Seo DG, Go GT, Lee TW. *Adv Mater*, 2020, 32: 1903558
- 24 Seo DG, Lee Y, Go GT, Pei M, Jung S, Jeong YH, Lee W, Park HL, Kim SW, Yang H, Yang C, Lee TW. *Nano Energy*, 2019, 65: 104035
- 25 Choudhry HH, Lee DH, Bag A, Lee NE. *Nat Commun*, 2023, 14: 821
- 26 Lee Y, Liu Y, Seo DG, Oh JY, Kim Y, Li J, Kang J, Kim J, Mun J, Foudeh AM, Bao Z, Lee TW. *Nat Biomed Eng*, 2023, 7: 511–519
- 27 Jiang Z, Chen N, Yi Z, Zhong J, Zhang F, Ji S, Liao R, Wang Y, Li H, Liu Z, Wang Y, Yokota T, Liu X, Fukuda K, Chen X, Someya T. *Nat Electron*, 2022, 5: 784–793
- 28 Wang C, Wang H, Wang B, Miyata H, Wang Y, Nayeem MOG, Kim JJ, Lee S, Yokota T, Onodera H, Someya T. *Sci Adv*, 2022, 8: eabo1396
- 29 Wang Y, Su J, Ouyang G, Geng S, Ren M, Pan W, Bian J, Cao M. *Adv Funct Mater*, 2024, 2316397
- 30 Deng Y, Liu S, Ma X, Guo S, Zhai B, Zhang Z, Li M, Yu Y, Hu W, Yang H, Kapitonov Y, Han J, Wu J, Li Y, Zhai T. *Adv Mater*, 2024, 2309940
- 31 Yang W, Kan H, Shen G, Li Y. *Adv Funct Mater*, 2024, 2312885
- 32 Wang WS, Zhu LQ. *Sci Tech Adv Mater*, 2022, 24: 2152290
- 33 Van Tho L, Baeg KJ, Noh YY. *Nano Convergence*, 2016, 3: 10
- 34 Ren Y, Yang J, Zhou L, Mao J, Zhang S, Zhou Y, Han S. *Adv Funct Mater*, 2018, 28: 1805599
- 35 He Y, Yang Y, Nie S, Liu R, Wan Q. *J Mater Chem C*, 2018, 6: 5336–5352
- 36 Guo J, Liu Y, Zhou F, Li F, Li Y, Huang F. *Adv Funct Mater*, 2021, 31: 2102015
- 37 Guo LQ, Han H, Zhu LQ, Guo YB, Yu F, Ren ZY, Xiao H, Ge ZY, Ding JN. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2019, 11: 28352–28358
- 38 Yu F, Zhu LQ, Xiao H, Gao WT, Guo YB. *Adv Funct Mater*, 2018, 28: 1804025
- 39 Wan C, Chen G, Fu Y, Wang M, Matsuhisa N, Pan S, Pan L, Yang H, Wan Q, Zhu L, Chen X. *Adv Mater*, 2018, 30: 1801291
- 40 Nishitani Y, Kaneko Y, Ueda M, Fujii E, Tsujimura A. *Jpn J Appl Phys*, 2013, 52: 04CE06
- 41 Kim D, Jeon YR, Ku B, Chung C, Kim TH, Yang S, Won U, Jeong T, Choi C. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2021, 13: 52743–52753
- 42 Hoffman J, Pan X, Reiner JW, Walker FJ, Han JP, Ahn CH, Ma TP. *Adv Mater*, 2010, 22: 2957–2961
- 43 Tang B, Hussain S, Xu R, Cheng Z, Liao J, Chen Q. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2020, 12: 24920–24928
- 44 Yang CS, Shang DS, Liu N, Shi G, Shen X, Yu RC, Li YQ, Sun Y. *Adv Mater*, 2017, 29: 1700906
- 45 John RA, Ko J, Kulkarni MR, Tiwari N, Chien NA, Ing NG, Leong WL, Mathews N. *Small*, 2017, 13: 1701193
- 46 Zhu R, Liang H, Hu S, Wang Y, Mei Z. *Adv Elect Mater*, 2022, 8: 2100741
- 47 Qu S, Sun L, Zhang S, Liu J, Li Y, Liu J, Xu W. *Nat Commun*, 2023, 14: 7181

- 48 Li D, Ren H, Chen Y, Tang Y, Liang K, Wang Y, Li F, Liu G, Meng L, Zhu B. *Adv Funct Mater*, 2023, 33: 2303198
- 49 Wang Y, Huang W, Zhang Z, Fan L, Huang Q, Wang J, Zhang Y, Zhang M. *Nanoscale*, 2021, 13: 11360–11369
- 50 Gou G, Sun J, Qian C, He Y, Kong L, Fu Y, Dai G, Yang J, Gao Y. *J Mater Chem C*, 2016, 4: 11110–11117
- 51 Chang Y, Cong H, Zhou R, Zhang W, Qin Y, Liu X, Wang F. *ACS Appl Electron Mater*, 2022, 4: 2570–2579
- 52 Tian H, Guo Q, Xie Y, Zhao H, Li C, Cha JJ, Xia F, Wang H. *Adv Mater*, 2016, 28: 4991–4997
- 53 Jiang J, Guo J, Wan X, Yang Y, Xie H, Niu D, Yang J, He J, Gao Y, Wan Q. *Small*, 2017, 13: 1700933
- 54 Sharbati MT, Du Y, Torres J, Ardolino ND, Yun M, Xiong F. *Adv Mater*, 2018, 30: 1802353
- 55 Meng J, Wang T, Zhu H, Ji L, Bao W, Zhou P, Chen L, Sun QQ, Zhang DW. *Nano Lett*, 2022, 22: 81–89
- 56 Bichler O, Zhao W, Alibart F, Pleutin S, Vuillaume D, Gamrat C. *IEEE Trans Electron Devices*, 2010, 57: 3115–3122
- 57 Alibart F, Pleutin S, Guérin D, Novembre C, Lenfant S, Lmimouni K, Gamrat C, Vuillaume D. *Adv Funct Mater*, 2010, 20: 330–337
- 58 Qian C, Kong L, Yang J, Gao Y, Sun J. *Appl Phys Lett*, 2017, 110: 083302
- 59 Qian C, Sun J, Kong L, Gou G, Yang J, He J, Gao Y, Wan Q. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2016, 8: 26169–26175
- 60 Gkoupidenis P, Koutsouras DA, Lonjaret T, Fairfield JA, Malliaras GG. *Sci Rep*, 2016, 6: 27007
- 61 Kim CH, Sung S, Yoon MH. *Sci Rep*, 2016, 6: 33355
- 62 Gkoupidenis P, Schaefer N, Garlan B, Malliaras GG. *Adv Mater*, 2015, 27: 7176–7180
- 63 Zhang F, Shao M, Wang C, Wen W, Shi W, Qin M, Huang H, Wei X, Guo Y, Liu Y. *Adv Mater*, 2024, 36: 2307326
- 64 Zhu H, Liu A, Shim KI, Jung H, Zou T, Reo Y, Kim H, Han JW, Chen Y, Chu HY, Lim JH, Kim HJ, Bai S, Noh YY. *Nat Commun*, 2022, 13: 1741
- 65 Wang Y, Yin L, Huang W, Li Y, Huang S, Zhu Y, Yang D, Pi X. *Adv Intel Syst*, 2021, 3: 2000099
- 66 Ni Y, Yang L, Feng J, Liu J, Sun L, Xu W. *SmartMat*, 2023, 4: e1154
- 67 Shi X, Xu Y, Liu W, Jin C, Wang S, Sun J, Yang J. *Adv Funct Mater*, 2024, 2401534
- 68 Zhou Y, Fu J, Chen Z, Zhuge F, Wang Y, Yan J, Ma S, Xu L, Yuan H, Chan M, Miao X, He Y, Chai Y. *Nat Electron*, 2023, 6: 870–878
- 69 Fan S, Xu T, Wu E, Cao M, Liu T, Su J. *J Mater Chem C*, 2021, 9: 16655–16663
- 70 Jin C, Liu W, Xu Y, Huang Y, Nie Y, Shi X, Zhang G, He P, Zhang J, Cao H, Sun J, Yang J. *Nano Lett*, 2022, 22: 3372–3379
- 71 Kwon SM, Cho SW, Kim M, Heo JS, Kim YH, Park SK. *Adv Mater*, 2019, 31: 1906433
- 72 Lee TJ, Yun KR, Kim SK, Kim JH, Jin J, Sim KB, Lee DH, Hwang GW, Seong TY. *Adv Mater*, 2021, 33: 2105485
- 73 Hudspeth AJ. *Nat Rev Neurosci*, 2014, 15: 600–614
- 74 Yu A, Chen X, Wang R, Liu J, Luo J, Chen L, Zhang Y, Wu W, Liu C, Yuan H, Peng M, Hu W, Zhai J, Wang ZL. *ACS Nano*, 2016, 10: 3944–3950
- 75 Bach-y-Rita P, Kercel SW. *Trends Cogn Sci*, 2003, 7: 541–546
- 76 Wang W, Pedretti G, Milo V, Carboni R, Calderoni A, Ramaswamy N, Spinelli AS, Ielmini D. *Sci Adv*, 2018, 4: eaat4752
- 77 He Y, Nie S, Liu R, Jiang S, Shi Y, Wan Q. *Adv Mater*, 2019, 31: 1900903
- 78 Bolat S, Torres Sevilla G, Mancinelli A, Gilshtein E, Sastre J, Cabas Vidani A, Bachmann D, Shorubalko I, Briand D, Tiwari AN, Romanyuk YE. *Sci Rep*, 2020, 10: 16664
- 79 Liu Y, Li E, Wang X, Chen Q, Zhou Y, Hu Y, Chen G, Chen H, Guo T. *Nano Energy*, 2020, 78: 105403
- 80 Huerta R, Nowotny T. *Front Neuroeng*, 2012, 5: 24
- 81 Gao Z, Chen S, Li R, Lou Z, Han W, Jiang K, Qu F, Shen G. *Nano Energy*, 2021, 86: 106078
- 82 Yoo J, Kim D, Yang H, Lee M, Kim S, Ko HJ, Hong S, Park TH. *Sens Actuat B-Chem*, 2022, 354: 131188
- 83 Zhou X, Wang Z, Song R, Zhang Y, Zhu L, Xue D, Huang L, Chi L. *J Mater Chem C*, 2021, 9: 1584–1592
- 84 Yuan Z, Bariya M, Fahad HM, Wu J, Han R, Gupta N, Javey A. *Adv Mater*, 2020, 32: 1908385
- 85 Kwon D, Jung G, Shin W, Jeong Y, Hong S, Oh S, Kim J, Bae JH, Park BG, Lee JH. *Sens Actuat B-Chem*, 2021, 345: 130419
- 86 Song Z, Tong Y, Zhao X, Ren H, Tang Q, Liu Y. *Mater Horiz*, 2019, 6: 717–726
- 87 Han J, Kang M, Jeong J, Cho I, Yu J, Yoon K, Park I, Choi Y. *Adv Sci*, 2022, 9: 2106017
- 88 Vijjapu MT, Surya SG, Yuvaraja S, Zhang X, Alshareef HN, Salama KN. *ACS Sens*, 2020, 5: 984–993
- 89 van de Burgt Y, Melianas A, Keene ST, Malliaras G, Salleo A. *Nat Electron*, 2018, 1: 386–397

Three-terminal artificial synaptic devices based on transistors: materials, structures and systems

Yi Liu^{1,2}, Jiaqi Liu^{1,2}, Jiaxin Chen^{1,2}, Wentao Xu^{1,2*}

¹ Institute of Photoelectronic Thin Film Devices and Technology, Key Laboratory of Photoelectronic Thin Film Devices and Technology of Tianjin, College of Electronic Information and Optical Engineering, Engineering Research Center of Thin Film Photoelectronic Technology of Ministry of Education, Smart Sensing Interdisciplinary Science Center, Nankai University, Tianjin 300350, China

² Shenzhen Research Institute of Nankai University, Shenzhen 518000, China

*Corresponding author (email: wentao@nankai.edu.cn)

Abstract: Neuromorphic engineering aims to build artificial bionic nervous systems on hardware to emulate the unique and efficient operating mechanism of the brain, implementing neuromorphic perception and brain-inspired computing. Synapses are the basic structure and functional units of learning and memory. Therefore, the construction of synapses-like electronic devices is the key to achieving neuromorphic perception and computing. Three-terminal transistor devices have advantages in realizing multi-state regulation and reducing energy consumption. In addition, the three-terminal transistor can also convert external physical stimuli such as pressure and temperature into electrical signals. It has a broad application prospect in the artificial sensory nervous system, which collects visual, auditory and olfactory signals to work. In this paper, material selection and the device structure of three-terminal synaptic transistors are reviewed, and the recent progress in artificial vision, hearing and smell perception systems based on the three-terminal synaptic transistor is introduced. Finally, we summarize the challenges faced by the three-terminal synaptic transistor and its associated artificial sensing system while also providing a glimpse into the prospects for its future development.

Keywords: three-terminal transistor, biological synapse, synaptic plasticity, artificial synaptic device, artificial sensing system

doi: [10.1360/SSC-2024-0031](https://doi.org/10.1360/SSC-2024-0031)