



有机神经形态机器视觉器件及系统

胡嘉慧^{1†}, 江明浩^{1†}, 周晔³, 文心洁¹, 翟永彪^{1*}, 吕子玉^{1*}, 韩素婷^{2*}

1. 深圳大学电子与信息工程学院, 深圳 518060

2. 香港理工大学应用生物及化学科技系, 香港 999077

3. 深圳大学高等研究院, 深圳 518060

†同等贡献

*通讯作者, E-mail: zhayyb@szu.edu.cn; lvziyu@szu.edu.cn; suting.han@polyu.edu.hk

收稿日期: 2023-12-30; 接受日期: 2024-02-05; 网络版发表日期: 2024-03-29

国家自然科学基金(编号: 62122055, 52373248, 62104154)、广东省自然科学基金(编号: 2021A1515012569, 2021A1515012588)和深圳市基础研究专项(编号: JCYJ20210324095207020, JCYJ20220531102214032, JCYJ20230808105900001)资助项目

摘要 随着有机半导体材料及其器件的快速发展, 有机电子学在可穿戴设备、人工智能等发面取得快速发展. 有机半导体材料具有成本低、生物相容性好、光谱响应可调、柔性度好等优势, 在光电器件等新兴智能感知领域显示出巨大的商业应用潜力, 同时也是制造柔性仿生视觉传感器不可或缺的组成部分. 本文从有机光电材料分类及用于视觉仿生感知的光电器件层面重点介绍了近年来人工神经形态视觉智能传感系统的研究进展, 包括应用较多的视觉触觉多感集成系统. 最后阐述了发展有机仿生视觉系统的重要意义与现存挑战以及展望, 为将来有机视觉感知应用及多感集成提供可行的研究方向.

关键词 有机材料, 光电突触, 仿生应用, 多感融合, 智能感知

1 引言

近年来, 随着大数据、人工智能(AI)、物联网(IoTs)的快速发展, 传感技术在材料、传感机制、功能等方面面临着新的挑战, 以应对日益复杂的传感任务并降低能耗^[1-4]. 受生物感觉系统独特的材料和高适应性的结构启发, 将有机功能材料与先进器件结构相结合, 将产生具有智能感知和处理功能的仿生传感器. 相比于传统的传感系统, 仿生智能感知系统主要由基于场效应晶体管的光电突触器件构成, 利用光电突触动态响应和预处理信息的能力, 可以实现输出信号对连续刺激的动态增加, 模拟了人体生物系统的突触特

性, 再通过阵列采用类似于人脑处理视觉信息的算法, 如使用深度学习技术(图1). 受益于模仿大脑的信号处理方式, 该系统可以高速地处理图像信息, 推动智能感知、人工机器视觉、边缘计算等领域进入一个新的发展时代^[5]. 由弱范德华力组装而成的共轭有机材料作为仿生传感器关键部分引起了广泛的研究关注. 与无机材料相比, 有机材料具有优异的物理和化学特性, 可以设计和制造具有优越传感性能、生物兼容性和可穿戴性的仿生传感器^[6-8]. 特别是有机材料可以采用低成本制备方法, 如旋转涂布、叶片涂层、卷对卷、喷墨打印等, 可直接在各种柔性的基材上制备, 适合柔性仿生器件的大规模制造^[9-13]. 有机半导体材料在电

引用格式: Hu J, Jiang M, Zhou Y, Wen X, Zhai Y, Lv Z, Han ST. Organic neuromorphic machine vision devices and systems. *Sci Sin Chim*, 2024, 54: 446-467, doi: 10.1360/SSC-2023-0257

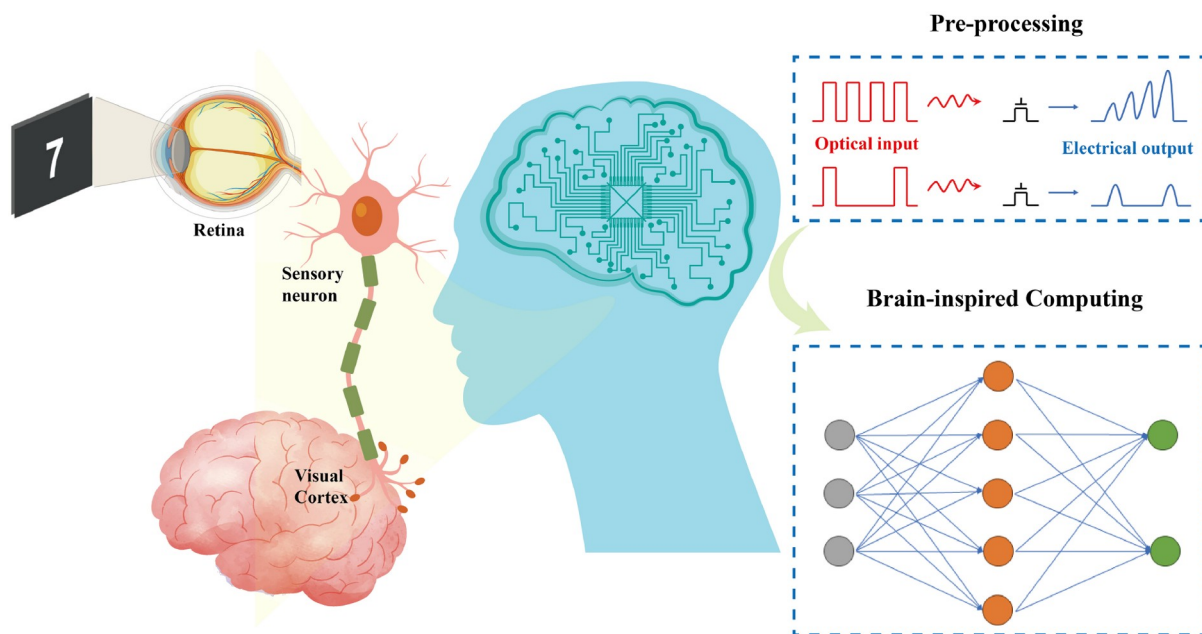


图1 受人体视觉系统启发的智能视觉感知系统工作原理示意图(该图素材摘自网站FreePik (<https://www.freepik.com>), 经修改后使用) (网络版彩图)

Figure 1 Schematic diagram of the working principle of intelligent visual perception system inspired by the human visual system. (Figure 2 was modified from FreePik (<https://www.freepik.com>)) (color online).

子学领域的关键优势在于它们可以作为高平衡和高迁移率的双极性活性层材料, 通过分子水平的修饰策略同时传输空穴和电子. 而且有机半导体因其具有低能耗、光电可调性、低弹性模量柔韧性、高生物相容性等优点而受到特别关注. 这些分子体系的最新研究进展为该领域描绘了一个光明的前景^[14].

在过去的20年中, 有机半导体已被广泛应用于许多高新技术, 如有机发光二极管(OLED)、有机太阳能电池、有机场效应晶体管(OFET)和有机生物传感器等. 由于独特的光电特性, 有机半导体能够在理想条件下模拟自然光感受器功能. 本文重点从当前研究最为广泛的三类有机材料展开讨论: 包括小分子、共轲聚合物(conjugated polymers, CPs)和有机无机杂化钙钛矿. 小分子材料具有结晶度好、易于提纯的优点, 它们的薄膜可通过真空蒸发法和溶液法制备^[15]. 利用其光吸收性能和电荷传输特性在有机发光二极管等光电转换器件中实现太阳能的高效转换和利用. 有机半导体基于共轲碳原子, 它们的 π 电子沿主干离域, 引起与光的强耦合^[16]. 由于其光学带隙在可见光范围内, 并且可以通过化学裁剪进行适当的设计, 因此CPs本质上对可见光敏感, 并且选择适当材料组合可以实现三

色感应. 特别是, CPs将塑料的杰出机械性能和简单的加工技术与半导体的光电特性相结合, 允许与液体生物环境构成更紧密的界面^[17]. 有机-无机杂化钙钛矿材料在发光和光伏应用方面带来巨大进步, 其太阳能电池的效率已经达到25%, 功率转换更是优于传统硅太阳能电池. 且电荷载流子输运、激子动力学和电子-声子耦合等光物理性质的改善大大提高了LEDs和太阳能电池的性能^[18].

在各类感知神经形态系统中, 眼睛是人类感知系统中最重要感觉器官, 因为80%的外界信息是由眼睛检测到的, 且人类大脑皮层1/3的面积与视觉有关^[19-21]. 人类通过视觉可以感知外界物体的大小、明暗、颜色、运动等, 从而获得对生命有益的各种生存信息^[22,23]. 人眼视网膜中的感光细胞和双极细胞是最重要的细胞^[24]. 光感受器细胞能将入射光转换成电信号, 经双极细胞对信号进行预处理后, 图像的详细特征得以保留. 与传统传感器器件中的瞬态光电响应不同, 它可以提供时间耦合光电响应, 帮助视网膜获得更清晰的图像^[25]. 值得注意的是, 具有弛豫行为的有机光电传感器器件适用于超越传统计算架构的类脑神经形态器件.

人眼能够有效地捕捉视觉场景, 并将其转化为神经电信号, 再经过视网膜和大脑皮层的进一步处理和识别^[5]。人类视觉系统的结构和功能为人工视觉传感器和神经形态处理装置提供了有吸引力的设计灵感, 这有利于开发下一代机器视觉系统。此外, 有机材料具有独特的光电性能、机械柔韧性和生物兼容性, 使其成为新兴视觉传感器的首选。在人眼视网膜上, 有视锥细胞和视杆细胞两种光感受器决定了人眼对光强和辨色的适应能力。视锥细胞能被强光激发, 而视杆细胞则对暗光敏感。它们相互补充, 根据环境的光强产生适当的输出信号电平, 使眼睛能够适应外部照明^[26,27]。模仿人眼的光适应性需要结合光电效应和有机材料的电荷捕获, 实现依赖于光强的瞬态响应和动态适应。此外, 人眼的视锥细胞可分为三种类型, 它们含有三种吸收红、绿、蓝光的视觉细胞, 他们可以分别感知不同波长入射光的颜色信息^[5]。具有不同波长选择性的有机材料在活性层中的组合使得生物人工视觉识别颜色成为可能。另外, 模拟人眼图像预处理的光电突触已被广泛研究。与生物学类似, 人工光电突触可以响应光刺激, 对成像信息进行实时预处理和短时记忆, 提高后续图像识别任务的效率和准确性。其中光电突触的图像预处理功能是通过光强依赖和光照时间依赖的可塑性来实现的, 包括图像降噪、对比度增强和锐化。

为了详细阐述有机材料在仿生智能视觉中的应用, 本文从有机材料、光电突触器件和仿生智能感知系统等方面综述了近年来有机光电材料用于智能感知的研究进展, 主要介绍了人工视觉智能传感系统的先进应用, 包括视觉自适应能力、颜色识别、图像预处理、运动检测和类脑计算, 还包括视触觉双模仿生感知器件(本文基本框架如图2所示)。最后, 对有机感知器件的潜在挑战和前景进行了深入探讨, 为未来面向智能应用的先进感知器件提供了充满希望的途径。

2 有机光电材料

有机光电材料是应用于光电技术领域, 可以实现光电转换功能, 并且具有光子和电子产生、转换和传输特性的有机材料。其自身良好的光电学特性, 对新型光电器件的持续发展具有优势, 促进了有机发光二极管、太阳能电池、光电探测器、光电晶体管等先进器件的发展。其中具有高度灵活性和生物相容性的有

机半导体的光电性能在有机光电器件中高效实现至关重要, 这类材料可以分为小分子有机半导体^[36~38]、高分子有机半导体^[39~41]、有机无机杂化钙钛矿^[42~44]。这三类具有特殊结构和性质的材料可以通过不同的制备方法合成, 其性能可以在有机光电器件中更高效地实现。其良好的柔韧性和优异的材料性能可应用于柔性电子器件中。本节重点介绍了小分子有机半导体、高分子有机半导体、有机无机杂化钙钛矿这三类材料的特殊性质、优势及应用于有机光电器件的特殊合成制备方法。

2.1 小分子有机半导体

小分子单元按一定方式排列而成, 其长程有序且具有规则的形状和极低的缺陷密度。共轭有机半导体具有廉价、可溶液加工、柔性等优点, 在有机场效应晶体管、有机太阳能电池等有机电子领域得到广泛研究。小分子有机半导体结构清晰, 有近乎完美的空间排列和极高的化学纯度, 在各种电子和光电器件中具有优于多晶半导体的物理性能。其在合成等操作中灵活度更高, 加工工艺简单, 可以通过拖涂、刮涂印刷、旋涂、滴铸等简单操作实现制备。并且, 其在视觉感知领域光电器件中可发挥电荷俘获、电荷传输等多种作用。图3总结了当前较为常见的小分子有机半导体材料的化学结构分子式。

Dif-TES-ADT是一种在可见光波段具有高灵敏响应、高迁移率和优异环境稳定性的p型有机小分子半导体材料, 其具有优异的电学性能和高结晶度^[45,47]。苏州大学揭建胜团队^[48]在2020年采用水面涂布(water-surface drag coating, WSDC)的方法制备了共轭小分子薄膜Dif-TES-ADT, 大大增强了电荷输运性能。该方法结合了晶体在水面上的连续横向生长和在纵向上的单轴拖动-涂层生长的优点, 在毫米尺度上产生具有单晶域的单轴定向薄膜。利用水面改变溶液的蒸发动力学来扩大晶粒尺寸, 并采用独特的拖涂工艺来实现有机晶体的单向生长。获得了具有毫米大小单晶畴和纯晶体取向的薄膜, 载流子迁移率显著提高, 薄膜中的晶粒尺寸显著增大, 同时分子排列顺序显著改善。且所得薄膜可以直接转移到任何所需的柔性衬底上。图4a描绘了基于WSDC方法制备的Dif-TES-ADT薄膜的典型OFET转移特性。在不同叶片涂层条件下制备的Dif-TES-ADT薄膜上所有OFETs器件性能都较差, 最大平

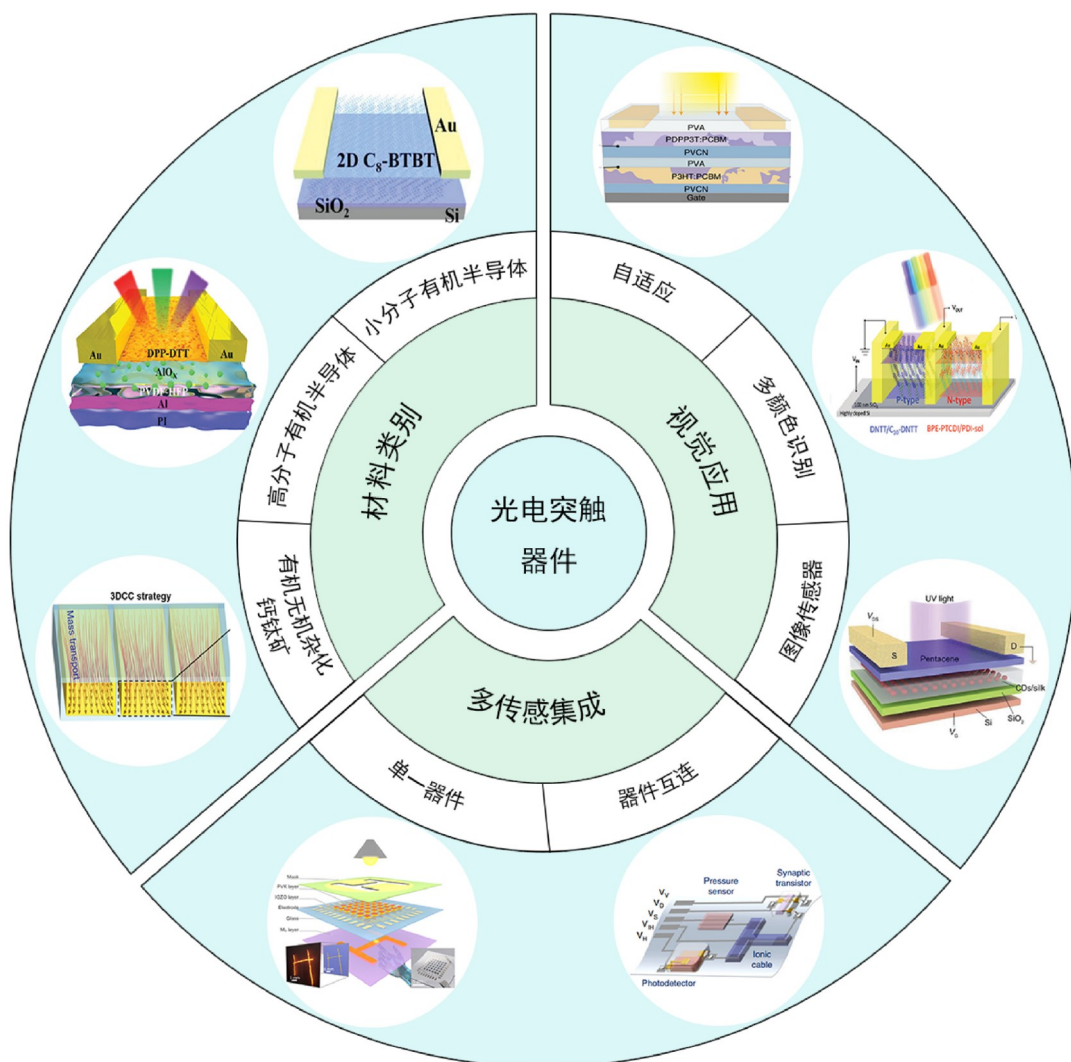


图 2 综述框架示意图. 包括光电突触器件材料类别^[28–30]、视觉应用^[31–33]、多传感集成^[34,35]三部分(网络版彩图)

Figure 2 Schematic illustration of photoelectric synaptic devices in terms of material category [28–30], visual application [31–33], and multi-sensing integration [34,35] (color online).

均迁移率为 $2.14 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ (图4b), 图4c显示了基于 Dif-TES-ADT 薄膜的柔性 OFETs, 与之前报道的 Dif-TES-ADT 材料的迁移率相比, 用 WSDC 方法制备的 Dif-TES-ADT 薄膜迁移率显著增强, 达到了 $16.1 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$, 是迄今为止 Dif-TES-ADT OFETs 的最佳结果之一(图4d).

苏州大学张晓宏和揭建胜团队^[1]在2022年合作开发了一种基于全印刷技术的低功耗有机场效应光电晶体管阵列, 光突触晶体管的半导体材料选用的是 Dif-TES-ADT. 图4e所示为其全印刷阵列工艺流程图. 用p

型溶液处理的 Dif-TES-ADT 带隙内存在许多电子陷阱, 其光生载流子的捕获和去捕获能够实现光突触功能. 为了获得优异的电荷输运特性, 采用刮涂印刷的方法来制备薄膜, 利用单向力来引导薄膜中晶粒的定向生长, 将打印的 Dif-TES-ADT 溶液在室温下干燥后, 得到图案良好的 Dif-TES-ADT 晶体膜.

并苯系列材料具有载流子迁移率高等优点, 是有机薄膜晶体管和有机场效应晶体管研究的主流半导体材料, 已被许多团队作为先进光电功能材料报道, 并对其进行了深入研究. 中国科学院化学研究所宋延林团

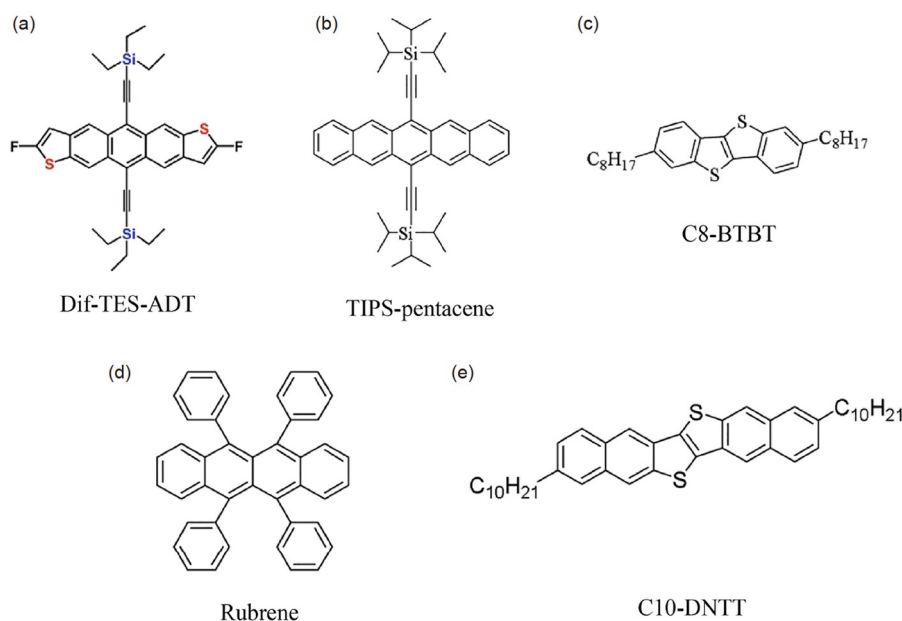


图3 光电器件采用的部分小分子有机半导体材料的化学结构分子式^[45,46] (网络版彩图)

Figure 3 Molecular formula of chemical structures of partial small molecule organic semiconductor materials used in optoelectronic devices [45,46] (color online).

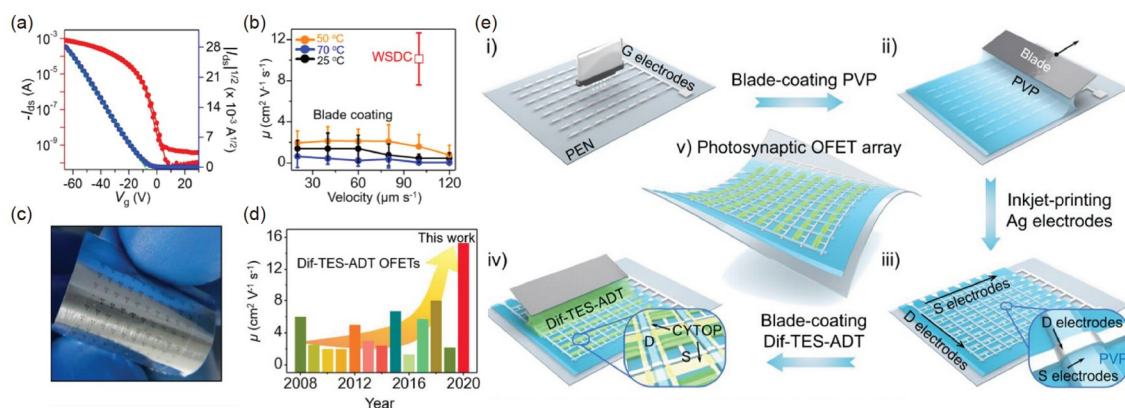


图4 (a) SiO₂/Si衬底上制备的Dif-TES-ADT薄膜OFET的代表性转移特性^[48]; (b) WSDC法制备的Dif-TES-ADT薄膜与叶片涂层的迁移率比较^[48]; (c) 基于WSDC方法制备的Dif-TES-ADT薄膜的柔性OFETs照片^[48]; (d) 比较本文与文献中Dif-TES-ADT材料的迁移率^[48]; (e) 全工艺打印流程图^[1] (网络版彩图)

Figure 4 (a) Representative transfer characteristics of OFET of Dif-TES-ADT films prepared on the SiO₂/Si substrate [48]. (b) Mobility of Dif-TES-ADT films prepared by the WSDC method compared with the blade coating [48]. (c) Flexible OFETs of Dif-TES-ADT films prepared based on the WSDC method [48]. (d) Mobility of the Dif-TES-ADT material in the literature [48]. (e) Flow chart of full process printing [1] (color online).

队^[49]提出用微观弯液面形变及沉积操控实现单一取向晶体薄膜可设计图案化阵列(图5a, b)的直写打印新方法, 制备了具有独特取向和高迁移率(图5c, d)的TIPS-pentacene小分子半导体晶体阵列。直写打印主要通过微管接触基底进行接触印刷。打印过程中微管接触异质浸润性基材, 形成一个弯液面连接微管与基底。

通过适当的速度移动微管可以在亲液区制备单一取向的晶体。该团队利用其本征微米尺度弯液面与晶核尺寸匹配, 实现了有机晶体成核与生长的精准调控。通过结合异质浸润性基材的图案化设计及墨水粘附力特性调控, 诱导微米弯液面流体三相线前端微区形变, 精准调控有机功能分子的成核位置与生长方向, 实现了

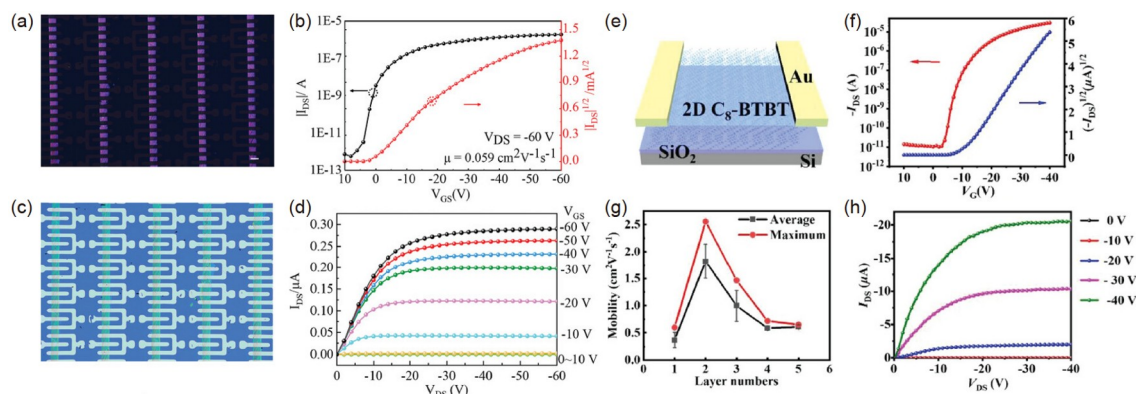


图 5 (a) 图像化TIPS-pentacene晶体OFET阵列的CPOM图像, 比例尺: $100\mu\text{m}$ ^[49]; (c) 图像化TIPS-pentacene OFET阵列的OM图像, 比例尺: $100\mu\text{m}$ ^[49]; (b, d) 独特的TIPS-pentacene晶体器件阵列OFET的典型转移和输出曲线^[49]; (e) 二维C8-BTBT晶体OFET原理图^[28]; (f, h) 2L晶体薄膜的典型转移和输出曲线^[28]; (g) 平均和最大迁移率随不同层数的变化曲线^[28] (网络版彩图)

Figure 5 (a) CPOM image of TIPS-pentacene crystal OFET array, scale: $100\mu\text{m}$ ^[49]. (c) OM image of TIPS-pentacene OFET array, scale: $100\mu\text{m}$ ^[49]. (b, d) Typical transfer and output curves of unique TIPS-pentacene crystal device array^[49]. (e) Schematic diagram of the two-dimensional C8-BTBT crystal OFET^[28]. (f, h) Typical transfer and output curves of 2L crystal film^[28]. (g) Change curves of average and maximum mobility with different layers^[28] (color online).

分子的区域选择与取向纯化沉积, 可以在不同基材上印刷制备可控取向有机半导体晶体阵列。

近年来, 在有机电子器件研究方面所取得的关键性突破, 大都与有机单晶材料的发展息息相关。尽管如此, 有机单晶器件的规模集成与应用仍面临诸多挑战, 其中最大的障碍之一在于如何实现大面积有机单晶薄膜的可控制备。有机单晶材料不仅是研究有机半导体材料本征光电性质的理想体系, 也对发展以场效应晶体管为代表的新一代高性能、低成本的有机半导体光电器件具有重要意义。

以C8-BTBT为例, 小分子有机半导体C8-BTBT具有高空穴载流子迁移率、易于加工、出色的溶解性等特性^[46,50-52]。苏州大学揭建胜团队^[53]在2022年提出了一种新的策略, 通过取向“漏斗”过滤的概念, 基于可扩展的溶液打印, 用排列良好的单取向晶体制造大面积C8-BTBT有机单晶薄膜。采用V型溶剂润湿区作为漏斗, 筛选出具有单一结晶取向的种子晶体, 然后采用另一个溶剂润湿三角形区进行种子晶体的进一步传播。之后, 这些均匀的种子晶体进入设计的生长控制区, 最终形成具有相同晶体取向的晶体阵列。基于该有机单晶薄膜制备的场效应晶体管阵列优异的迁移率均一性, 其迁移率变异系数仅为9.8%。该方法具有很好的普适性, 也可用于其他小分子有机半导体单晶薄膜的生长。

天津大学胡文平团队^[54]提出了使用聚酰胺酸作

为生长模板辅助C8-BTBT半导体结晶, 利用简单滴注的方法即可制备大面积超薄有机单晶阵列。进而基于高质量单晶阵列分子级薄、原子级平整且长程有序的结构特点结合聚合物的栅绝缘层实现了高性能可弯曲晶体管阵列的制备。中国科学院化学研究所宋延林团队^[28]在2023年提出了一种气氛诱导的弯液面调控策略, 获得定向稳定的马拉格尼流来控制非接触式弯液面的形成, 确保均匀质量传输和有序分子沉积结晶, 进而制备高质量超薄有机半导体单晶薄膜。基于优化的气氛-溶剂体系, 可控地制备了具有精确层数的C8-BTBT超薄二维有机半导体单晶薄膜, 弯液面前端液膜高度与其溶质浓度的差异是控制分子尺度厚度从单层到几层的决定性因素。该团队系统地研究了超薄膜的层数依赖性电子和光电子特性, 研究证明, 双层C8-BTBT二维单晶薄膜的有机场效应晶体管具有最高的电荷传输性能, 而光电响应性能随层数的增加而增加。实验光电流的二向色比高达2.26, 实现了高性能的偏振敏感日盲光电探测器, 相应的偏振图像传感器由于其高晶体质量而具有优越的日盲偏振成像能力。

基于不同层数的C8-BTBT晶体薄膜作为沟道构建了有机场效应晶体管(图5e), 研究了不同层数薄膜的电性能。含2L的C8-BTBT晶体膜的典型转移和输出曲线分别如图5f, h所示。为了进行比较, 图5g显示了最大和平均迁移率值作为层数的函数。2L薄膜的平均迁移率最高($1.70\text{ cm}^2\text{ V}^{-1}\text{ s}^{-1}$), 而1L薄膜的平均迁移率最

低($0.3 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$)。迁移率的差异主要由于封装方式的不同, 当层数超过2时, 随着分子层数的增加, 迁移率值逐渐降低。当半导体层与介质/半导体层界面不相邻时, 栅极电场调制效果较差, 这是导致栅极电场调制效果下降的主要原因。

北京航空航天大学孙艳明团队^[55]设计合成了一种有机小分子BBT-Cl, 并将其作为附加的新型固体添加剂, 与传统的溶剂添加剂结合形成双重添加剂。系统地表征了双添加剂对PM6和Y6作为供体-受体有源层器件的光学性能、形貌和光伏特性的协同效应。在有机太阳能电池(organic solar cells, OSCs)中, 新开发的Y6及其衍生物是最先进的小分子受体之一。Y6是一种有机分子, 具有良好的光电特性, 适用于太阳能电池等光电器件。而有机小分子BBT-Cl具有良好的热稳定性, 在 100°C 时不挥发也不分解。此外, BBT-Cl与PM6和Y6良好的互补吸收能够提高有机太阳能电池的光利用率。

2.2 高分子有机半导体

有机半导体, 特别是共轭聚合物, 有望成为无机半导体的低成本替代品, 同时提供无机材料无可比拟的机械性能, 如柔性和可拉伸性能。共轭聚合物的骨架通常是由一系列 sp^2 杂化碳和杂原子组成, 它的电性能由这些 sp^2 杂化碳和 p_z 波函数之间的电子耦合决定。共轭聚合物是一类新型聚合物, 其作为多种有机电子器件的有源层已经被研究了几十年, 它结合了金属和半导体的导电性和机械性能的优点。由于其(半)导电、电化学和光学特性而被设计并广泛用于光电子器件。共轭聚合物的物理特性, 如溶解度和结晶度, 以及光电特性, 如电荷传输和光吸收, 可以通过分子设计和结构修饰来调整。其具有更加出色的成膜能力, 且能够实现更高密度的堆叠结构, 利于光电器件集成制备^[56]。

P3HT是最具吸引力的空穴传输材料之一, 一方面不需任何掺杂剂, 不会对钙钛矿层产生影响; 另一方面本身水汽敏感度低, 稳定性更高。近年来, P3HT因其具有优异的光电性能、商业化成本低、可低温溶液加工等优点, 越来越多地被运用于钙钛矿太阳能电池的空穴传输层材料或聚合物界面材料, 且非常适合作为商业化生产的聚合物给体材料^[57,58]。复旦大学赵岩团队^[59]展示了一个混合调制的人工突触晶体管, 其中突触后信号可以被多种输入刺激调制, 包括电、光和触

觉信号。为了使器件具有对多种刺激的敏感性, 采用有机半导体(聚(3-己基噻吩-2,5-二基) (P3HT)混合[6,6-苯基- C_{71} -丁酸甲酯(PC₇₁BM))作为光敏通道, 将10 mg P3HT与10 mg PC₇₁BM混合, 溶解于1 mL氯仿中搅拌2 h, 制得P3HT/PC₇₁BM溶液(10 mg/mL), 采用金字塔形离子凝胶(双(三氟甲基磺酰基)亚胺([EMIM][TFSI]))作为压敏介电层, 并采用双栅极结构。图6显示了两种信号融合后突触后电流(PSC)的不同记忆行为, 通过两种信号融合模拟PSC的兴奋/抑制性能。如图6a, b所示, 光和电脉冲可以增强和写入/擦除存储器, 电、光等频刺激下兴奋性突触后电位(excitatory postsynaptic potential, EPSC)增加约15 μA , PSC随着光写入和电擦除而上升和下降。

中国科学院半导体研究所沈国震团队^[60]展示了一种基于高质量无铅 $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ 纳米晶体(nanocrystals, NCs)和高分子有机半导体的柔性光电突触晶体管, 该晶体管由 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ 纳米晶体-PMMA(聚甲基丙烯酸甲酯)/DPPDTT(聚[2,5(2-辛基十二烷基)-3,6-二酮吡罗吡罗-醛-5,5-(2,5-二(噻吩-2基)噻吩[3,2-b]噻吩)])层和Au源漏电极组成。制备的柔性突触阵列可以同时有效地进行学习和记忆, 并在弱光条件下成功识别不同颜色光(405、532和635 nm)的图像。最后, 通过基于人工神经网络算法的仿真, 成功实现了手写数字图像的识别应用。具有高空气稳定性和高电荷迁移率的有机高分子材料DPPDTT作为半导体通道被制备在 $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ NCs/PMMA复合薄膜的顶部。与底栅嵌套的Cr/Au电极作为源极和漏极沉积在DPPDTT上, 紫外可见吸收光谱和稳态光致发光光谱分别如图6c, d所示。DPPDTT薄膜在600 nm以上表现出较强的吸收。

西安交通大学鲁广昊团队^[29]成功构建了基于氧化铝(AlO_x)纳米颗粒和高分子有机半导体聚[2,5-(2-辛基十二烷基)-3,6二酮吡咯-吡咯-醛-5,5-(2,5-二(噻吩-2基)噻吩[2,3]噻吩)] (DPP-DTT)的具有多波长响应和多功能可塑性的柔性光刺激突触晶体管(light-stimulated synaptic transistors, LSSTs), 结构如图6e所示。该团队系统地研究了电突触诱导的兴奋和抑制特性、多波长反应特征以及光突触诱导的学习和记忆功能。将 AlO_x 纳米颗粒掺入DPP-DTT基质中, 可显著提高光生电荷的分离效率, 从而增强晶体管的光突触可塑性。成功构建了多波长光响应可塑性(红光: 625 nm, 绿光: 525 nm, 紫外光: 365 nm), 紫外光诱导的晒伤皮肤模

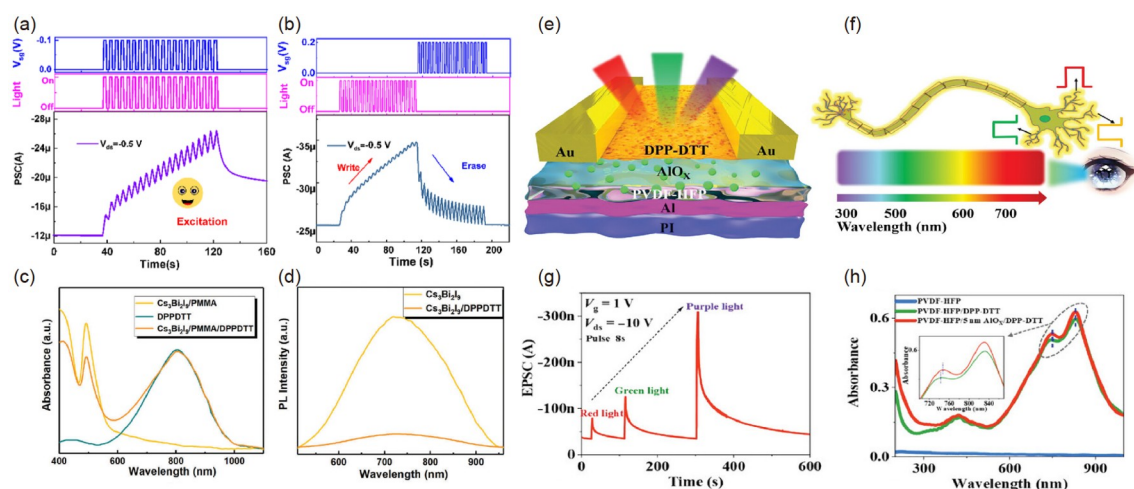


图 6 (a) 电、光等频刺激下EPSC增加约 $15\ \mu\text{A}$ ^[59]; (b) PSC随着光写入和电擦除(20个脉冲)而上升和下降^[59]; (c) $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ NCs/PMMA、DPPDTT和 $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ NCs/PMMA/DPPDTT薄膜的吸收光谱^[60]; (d) $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ NCs/PMMA和 $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ NCs/PMMA/DPPDTT薄膜的PL光谱^[60]; (e) 柔性突触晶体管器件的结构, 晶体管的通道长度(L)和宽度(W)分别为0.3和3 mm^[29]; (f) 人眼捕捉不同波长的光和人工多波长感光传入神经元示意图^[29]; (g) 不同波长光刺激下电流随时间的变化, 红光620 nm, 绿光525 nm, 紫外光365 nm ($0.97\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$)^[29]; (h) PVDF-HFP、PVDF-HFP + DPP-DTT、PVDF-HFP + 5 nm AlO_x + DPP-DTT的吸收光谱图, 该图是波长为700~870 nm的PVDF-HFP + 5 nm AlO_x + DPP-DTT的放大吸收光谱^[29] (网络版彩图)

Figure 6 (a) EPSC increase by about $15\ \mu\text{A}$ under electrical and optical frequency stimulation^[59]. (b) PSC rises and falls with optical writing and electrical erasure (20 pulses)^[59]. Figure (a), (b) reprinted (adapted) with permission from ref. [59], copyright 2023, American Chemical Society. (c) Absorption spectra of $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ NCs/PMMA, DPPDTT and $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ NCs/PMMA/DPPDTT films^[60]. (d) PL spectra of $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ NCs/PMMA and $\text{Cs}_3\text{Bi}_2\text{I}_9$ NCs/PMMA/DPPDTT films^[60]. (e) Structure of the flexible synaptic transistor devices, the channel length (L) and width (W) of the transistors are 0.3 and 3 mm, respectively^[29]. (f) Schematic diagram of light and artificial multiwavelength photoafferent neurons captured by the human eye^[29]. (g) Current over time under light stimulation at different wavelengths. Red light at 620 nm, Green light at 525 nm, Ultraviolet light is 365 nm ($0.97\ \mu\text{W}/\text{cm}^2$)^[29]. (h) Absorption spectra of PVDF-HFP, PVDF-HFP + DPP-DTT, PVDF-HFP + 5 nm AlO_x + DPP-DTT. The graph is the amplified absorption spectra of PVDF-HFP + 5 nm AlO_x + DPP-DTT with a wavelength of 700~870 nm^[29] (color online).

拟和光电协同脉冲调节的学习效率模型, 演示和模拟了更复杂的功能, 由紫外线脉冲调节的手写数字识别和图像学习、记忆功能等任务. 图6f展示了人眼捕捉不同波长光和视网膜内人工多波长光感应传入神经元的过程. 不同波长光作用下EPSC随时间的变化如图6g所示, 表明不连续的 AlO_x 纳米颗粒有助于激子的有效分离. 与PVDF-HFP + DPP-DTT相比, PVDF-HFP + 5 nm AlO_x + DPP-DTT吸收光谱图在740 nm峰位的微小红移(图6h)进一步证明了激子的有效分离.

2.3 有机无机杂化钙钛矿

有机-无机杂化钙钛矿(OIHPs)作为一类新型的非晶半导体材料, 具有优异的光学和电子性能, 如可调的带隙和载流子迁移率、高光致发光(photoluminescence, PL)量子产率和高光吸收系数, 表现出优异的应用前景^[61-64], 使其能够广泛应用于各种光电器件, 包括发光二极管^[65,66]、激光器^[67,68]和光电探测器^[69-71]. 同时具有有机材料和无机材料的优势: 应变能力强、

柔性度优异且兼具稳定的电学力学性能, 为人工神经网络视觉智能传感系统提供了新的方向. 其标准化学式为 ABX_3 , 其中A为一价有机或金属阳离子, B为二价金属阳离子, X为Cl、Br或I. 通过操纵OIHPs的A、B和X位的离子, 可以轻松调整晶体结构和性质, 为器件的开发提供了许多可能性^[72-74]. 对于光伏器件而言, 混合钙钛矿具有直接带隙、长载流子扩散长度、高载流子迁移率、低缺陷密度和带隙可调性等显著特性, 使其能够在广泛的光电器件中应用. 高质量的有机-无机杂化钙钛矿单晶具有低缺陷, 比其相应的多晶薄膜具有更优越的光电性能和稳定性^[75-77]. 迄今为止, 各种基于溶液的制备技术, 包括溶液降温法、反溶剂蒸汽辅助结晶、反温度结晶, 已被开发用于生长OIHPs单晶. 尽管这些方法成功制备了大尺寸OIHPs单晶, 但由于OIHPs晶体优先沿其厚度方向(即面外方向)生长, 这些方法耗时较长, 通常需要几天时间才能获得大的横向尺寸. 由于激子在钙钛矿晶体中的扩散长度通常小于几微米, 晶体的厚度过大也阻碍了它们在光电器

件中的应用^[30].

Sun等^[30]提出了一种新的三维受限结晶(3DCC)策略(图7a), 用于高质量OIHPs单晶阵列的可控厘米级生长. 该策略利用三维几何通道诱导定向毛细流动(图7b), 将溶质传输速度提高100倍以上, 并在剪切过程中限制晶体的面内和面外结晶, 从而实现单晶大面积生长, 提高了结晶度和精确的厚度控制. 通过这种方法, 制备的OIHPs晶体阵列具有与大块钙钛矿单晶相当的高晶体质量, 其厚度在5~500 μm 之间合理定制. 基于OIHPs单晶阵列的自驱动横向结构光电探测器具有73 dB的宽线性动态范围, 并且具有超过36天的长期工作稳定性. 这种3DCC策略广泛适用于各种衬底上大面积生长不同的OIHPs晶体阵列, 使各种光电器件的可扩展制造成为可能. 基于此, 该团队评估了 MAPbI_3 晶体的光电特性, 图7c描述了高度排列的 MAPbI_3 单晶的吸收和光致发光光谱. 紫外-可见吸收光谱在792 nm处有一个清晰的带边截止, 没有激子特征, 表明 MAPbI_3 单晶的缺陷密度很小. 高质量钙钛矿单晶阵列在吸收边缘附近的狭窄PL峰位置也表现出低陷阱密度. 如图7d所示, 器件在电流(I)-电压(V)曲线上有明显的转折. 当外加电压超过转折电压时, 电流呈现出快速的非线性上升, 表明注入的载流子完全填充了陷阱态. 利用瞬态稳态光谱仪监测PL衰减, 进一步研究了 MAPbI_3

单晶的电荷复合寿命. 如图7e所示, PL衰减轨迹很好地拟合到双指数模式, 并且观察到两个动态, 包括 $\tau_1 = 14.74 \text{ ns}$ 的快速分量和 $\tau_2 = 95.57 \text{ ns}$ 的较长寿命衰减. 值得注意的是, 复合寿命与先前报道的钙钛矿单晶相当($\tau_1 = 6 \text{ ns}$, $\tau_2 = 83 \text{ ns}$), 最终证明了3DCC策略对于制备高质量、大面积的钙钛矿晶体阵列非常有效.

室温磷光(room temperature phosphorescence, RTP)二维(2D)有机-无机杂化钙钛矿(OIHPs)具有优异的稳定性, 无机部分与有机阳离子之间高效的三重态能量传递, 使其被认为是光电子器件中很有前途的材料. Chen等^[78]研究了激子寿命对光电存储器性能的影响, 将两种2D OIHPs材料(2-苯基乙胺溴化铅($(\text{PEA})_2\text{PbBr}_4$)和4-联苯甲基溴化铅($(\text{BPMA})_2\text{PbBr}_4$))空间限制在聚苯乙烯块聚环氧乙烷($\text{PS-}b\text{-PEO}$)中作为光活性电荷捕获材料, p型半导体P3HT作为非易失性浮栅光电存储器中的电荷传输通道. 以4-联苯甲基铵为有机阳离子的 $(\text{BPMA})_2\text{PbBr}_4$ 已被证明具有RTP特性, 这是由于较长的共轭阳离子使得无机 $[\text{PbBr}_6]^{4-}$ 和有机4-联苯甲基铵之间的能量通过三重态-三重态能量转移^[79]. $(\text{PEA})_2\text{PbBr}_4$ 共轭长度较短, 相应的三重态激子能量较高, 抑制了能量转移; 因此, 只能观察到荧光发射. 通过延长有机阳离子的共轭长度触发无机部分与有机阳离子之间的能量传递, 实现了基于RTP二维OIHPs的超快

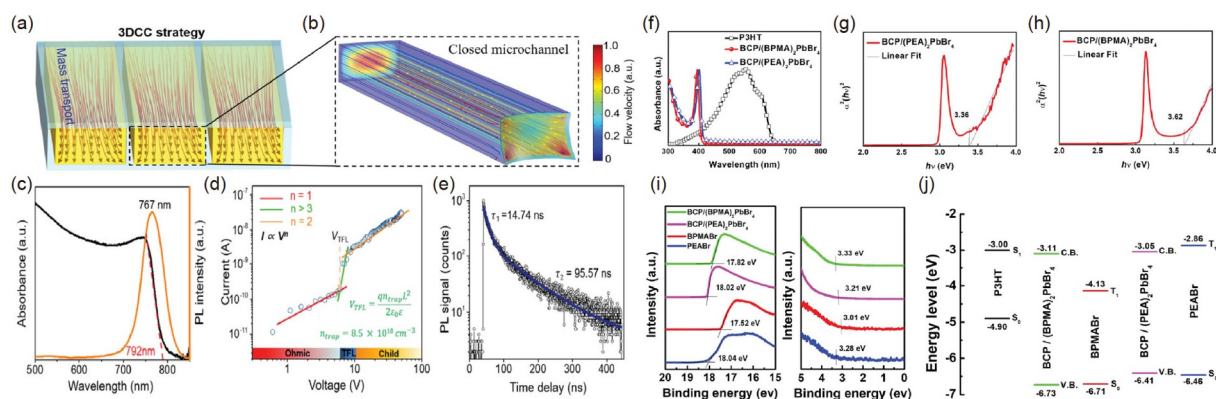


图 7 (a) 封闭的三维微通道内流体流动示意图^[30]; (b) 相应的流体流动模拟结果^[30]; (c) MAPbI_3 晶体阵列的吸收光谱和PL光谱^[30]; (d) MAPbI_3 晶体阵列的电流-电压图^[30]; (e) MAPbI_3 晶体阵列的时间分辨PL光谱^[30]; (f) BCP/2D-OIHP复合膜和P3HT膜的光吸收^[78]; (g) BCP/ $(\text{PEA})_2\text{PbBr}_4$ 的tau图^[78]; (h) BCP/ $(\text{BPMA})_2\text{PbBr}_4$ 的tau图^[78]; (i) BCP/ $(\text{PEA})_2\text{PbBr}_4$ 、BCP/ $(\text{BPMA})_2\text{PbBr}_4$ 、PEABr和BPMABr的UPS谱^[78]; (j) P3HT、BCP/ $(\text{PEA})_2\text{PbBr}_4$ 、BCP/ $(\text{BPMA})_2\text{PbBr}_4$ 、PEABr和BPMABr的能级图^[78] (网络版彩图)

Figure 7 (a) Schematic diagram of the fluid flow in the closed 3D microchannel^[30]. (b) Results of corresponding fluid flow simulation^[30]. (c) Absorption spectrum and the PL spectrum of the MAPbI_3 crystal array^[30]. (d) Current-Voltage diagram of the MAPbI_3 crystal array^[30]. (e) Time-resolved PL spectrum of the MAPbI_3 crystal array^[30]. (f) Light absorption of BCP/2D-OIHP membrane and P3HT membrane^[78]. (g) tau map of BCP/ $(\text{PEA})_2\text{PbBr}_4$ ^[78]. (h) tau map of BCP/ $(\text{BPMA})_2\text{PbBr}_4$ membrane^[78]. (i) UPS spectra of BCP/ $(\text{PEA})_2\text{PbBr}_4$, BCP/ $(\text{BPMA})_2\text{PbBr}_4$, PEA and BPMA^[78]. (j) Energy level diagram of P3HT, BCP/ $(\text{PEA})_2\text{PbBr}_4$, BCP/ $(\text{BPMA})_2\text{PbBr}_4$, PEA and BPMA^[78] (color online).

低能耗光存储器。

为了验证复合膜的光学性能, 进一步研究了复合膜的紫外-可见吸收光谱和稳态光致发光光谱。BCP/(PEA)₂PbBr₄、BCP/(BPMA)₂PbBr₄复合膜和P3HT膜的紫外可见吸收光谱如图7f所示。由于二维无机晶格内的量子约束, BCP/(PEA)₂PbBr₄和BCP/(BPMA)₂PbBr₄复合膜均观察到约402 nm的尖锐激子吸收峰, 证明复合膜中形成了二维OIHPs晶体。对于P3HT薄膜, 吸收光谱在300~800 nm范围内, 使得衍生的光记忆体能够在整个可见光光谱中记录光。从它们的光谱吸收(图7g, h)来看, BCP/(PEA)₂PbBr₄和BCP/(BPMA)₂PbBr₄的带隙分别为3.36和3.62 eV。根据紫外光电子能谱(UPS)结果(图7i), 其中BCP/(PEA)₂PbBr₄、BCP/(BPMA)₂PbBr₄、PEABr和BPMABr的价带最大值(VBM)分别为-6.41、-6.73、-6.46和-6.71 eV。结合这些值与相应的光学隙, 可以确定BCP/(PEA)₂PbBr₄和BCP/(BPMA)₂PbBr₄的导带最小值(CBM)分别为-3.05和-3.11 eV。二维OIHPs复合膜和P3HT膜的能级如图7j所示。BCP/2D OIHPs复合膜均具有比P3HT薄膜更低的VBM和CBM, 确保了P3HT与2D OIHPs之间的光致电荷转移。

3 仿生视觉感知应用

可以模仿人体视网膜的光电突触器件已经得到迅速发展, 由光电突触器件构建的神经形态图像传感器可以用于模拟人类视觉系统, 最终实现对光信号的感知、存储和计算(预处理)功能。在视觉信号中, 信息通过光传递, 而光实际上是较为复杂的信息, 包括波长、光强、方向、时间等。传统的数字图像传感系统在处理光信号时, 需要传感器搭配合适的外围电路来得到有用的信号, 同时需要后续存储器和特定的算法芯片来辅助处理信号, 因此传统的图像传感系统不仅需要复杂的芯片集成结构而且其功耗也较大。相比之下, 神经形态视觉传感器具有并行性和低功耗, 同时可以滤除大部分冗余信息^[80~82]。对于人体来说, 视网膜对视觉信号(光照)具有一定的视觉阈值范围, 允许在强光或弱光环境中实现自适应功能, 还可以对光照的强度进行自适应, 以实现自我保护功能, 同时可以识别光信号的波长(颜色), 并且具有复杂的彩色图像识别能力和对信号进行预处理实现降噪和对比度增强等。

此外, 含有时间信息的光信号使得视网膜能够对空间中的运动物体进行检测, 视觉信号还会在大脑中的视觉皮层得到进一步处理。本节总结了人工神经形态视觉智能传感系统的先进应用: 视觉自适应能力、颜色识别、图像预处理、运动检测和类脑计算, 展示了人工视觉系统的巨大潜力和发展前景^[83]。

3.1 人体视觉的自适应

在人类的视网膜中, 有两种光感受器: 锥状细胞和杆状细胞, 它们决定了人眼对光强和颜色辨别的适应能力。锥状细胞可以被强光激发, 而杆状细胞对暗光很敏感。它们相互补充, 根据环境的光强度产生适当的输出信号电平, 从而使眼睛能够适应外部照明^[84]。在生物系统中, 一个重要的功能是视觉适应, 即对刺激的自主反应为感觉系统提供了调整其行为以适应不同的光环境的能力^[26]。人工视觉系统的发展需要开发能够自主适应不同刺激的器件。然而, 模拟生物前馈视觉适应具有一定挑战性, 它需要在单个器件上实现光的激发和抑制的互补特性。

中国科学院化学研究所朱道本团队^[31]实现了具有可调节光适应性的有机晶体管(图8a右), 该含有两个体异质结的有机晶体管能够实现光强度依赖的主动光适应, 将体异质结中的光伏效应与介电层中的电子捕获耦合起来, 从而允许自适应调制晶体管的载流子浓度。由兴奋和抑制这两个互补过程产生的非相干前馈回路是人类视觉系统的关键机制。如图8a左所示, Na⁺和Ca²⁺的相关跨膜运输和相关的门控动力学的协同作用有助于实现生物活性适应, 当生物体眼睛受光信号刺激时, 随着亮度周期性地逐步增加, 响应遵循图8a下的锯齿曲线。随着亮度的逐次增加, 响应都会跳跃, 然后恢复到眼睛适应亮度刺激时产生的平衡状态。图8a右为模仿这一过程设计的具有两个体异质结的有机场效应晶体管的示意图。一层聚(PDPP3T):(PCBM)形成的异质结作为光响应活性层, 以确保显著的电荷传输和高效的光载流子生成, 在PDPP3T:PCBM层上引入了50 nm厚的聚乙烯醇(PVA)来捕获暗态载流子, 确保较低的关态电流。聚3-己基噻吩-2,5-二烷基(P3HT):PCBM (1:1)形成一个体异质结, 夹在聚肉桂酸乙烯(PVCN)和PVA之间作为浮栅。由于十八烷基三氯硅烷(OTS)改性的PVCN和PVA几乎没有陷阱和电荷捕获的特性, 在PVCN/P3HT:PCBM界面的载流子浓度

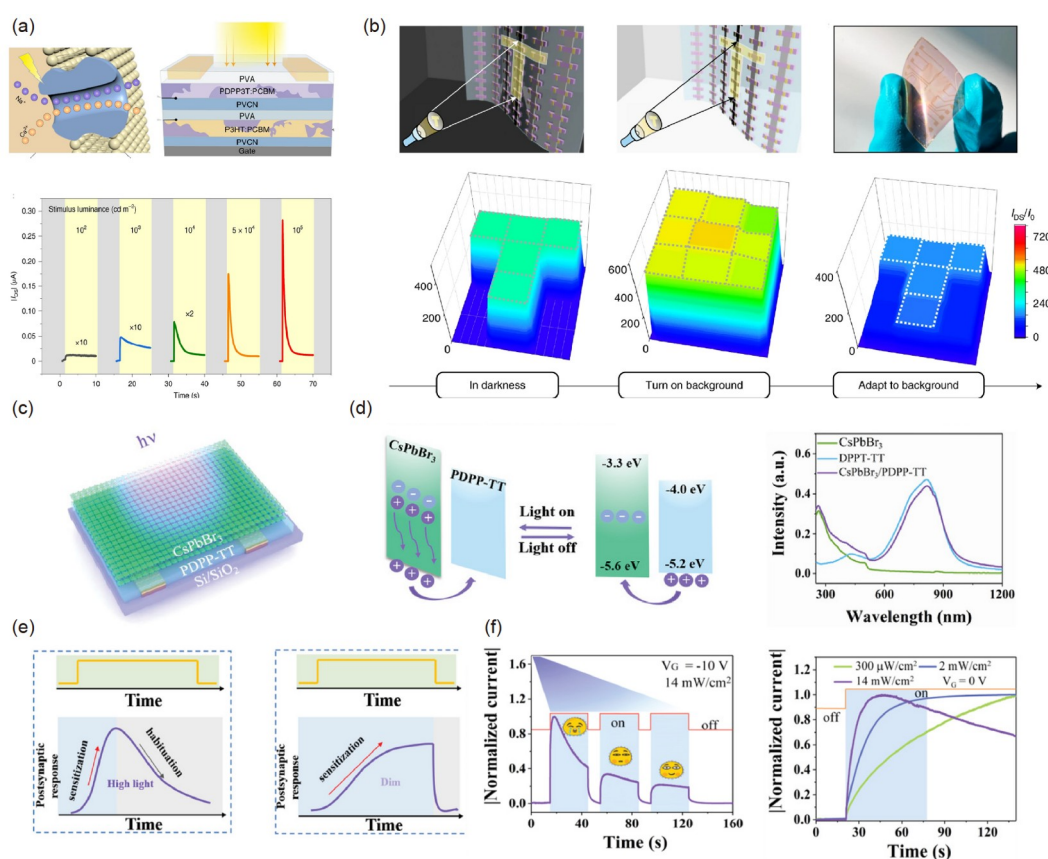


图 8 (a) 仿生光感受器的示意图和光响应特性^[31]; (b) 明暗背景下OAAT感光阵列的概念性设计, 以及不同条件下的光照电流映射^[31]; (c) 聚合物-钙钛矿层异质结光电晶体管的示意图^[87]; (d) 聚合物-钙钛矿层异质结器件的能带图, 以及所用材料的光谱吸收图^[87]; (e) 强光和弱光条件下的适应性行为示意图^[29]; (f) 器件模拟光强自适应自我保护机制的归一化电流响应图^[87] (网络版彩图)

Figure 8 (a) Schematic diagram and light response characteristics of a biomimetic photoreceptor [31]. (b) Conceptual design of OAAT photosensitive array under light and dark background, as well as photocurrent mapping under different conditions [31]. (c) Schematic diagram of polymer perovskite layer heterojunction phototransistor [87]. (d) Energy band diagram of polymer perovskite heterojunction devices and the spectral absorption diagram of the materials used [87]. (e) Schematic diagram of adaptive behavior under strong and weak light conditions [87]. (f) Normalized current response diagram of device simulation light intensity adaptive self-protection mechanism [87] (color online).

保持不变, 但在P3HT:PCBM/PVA界面会随时间动态下降。

图8b展示了可弯曲的 3×3 柔性晶体管阵列可以在明或暗背景下显示“T”图像, 并能在强背景下、2 s内产生自适应光强的低对比度图像。可弯曲的柔性 3×3 晶体管阵列受“T”型光刺激后在黑暗环境下可以显著地显示出“T”字图像。在恒定光照刺激下, T形图像对比度在强光背景下会下降, 并逐渐适应背景光照, 即图像对比度在2 s后会上升。器件自有的与亮度相关的自适应能力显著降低了仿生图像传感器阵列的功耗和操作时间, 为仿生视觉传感器的实现提供了可行的策略。

人工视觉神经系统可以模拟人脑的视觉感知和信息处理功能, 对于环境的即时可视化和避免潜在危害所需的意识是不可或缺的。然而, 在单一器件中集成识别学习和实时处理功能仍然是一个长期存在的挑战^[85]。

人眼对强光刺激的自适应性是视觉系统根据环境光强的变化来调整其响应行为。视觉系统可以通过前馈和反馈适应方式对弱光进行响应增强或对强光进行响应抑制^[86]。具体来说, 人眼对强光刺激的自适应行为是通过光敏细胞的调节来实现的。光敏细胞位于视网膜中, 包括锥状细胞和杆状细胞。视锥细胞主要负责对颜色的感知, 而视杆细胞主要负责对光线强度的

感知. 当环境中的光线强度增加时, 视杆细胞会受到刺激而减少其敏感性, 从而使眼睛对强光适应. 这种自适应行为可以减少强光对眼睛的刺激, 保护视觉系统免受损伤. 人眼对强光刺激的自适应行为是指人眼在面对强光照时, 可以通过调整自身的光感受器官和神经系统, 以适应光线的变化^[27,84].

中国科学院郭云龙团队^[87]开发了一种基于界面缺陷调谐策略的新型双功能光电晶体管(图8c). 受益于可调谐的有机聚合物-钙钛矿层的异质界面缺陷, 光生电荷捕获和去捕获能力显著提高, 从而促进了光生载流子的分离和注入. 制备的有机-无机混合材料光电晶体管可以完美地模拟人类视觉突触行为(<35 ms, 远低于人眼对入射光的响应速度(225 ms)). 更重要的是, 光晶体管对强的光刺激表现出明显的视觉适应, 并实现了独特的脱敏作用来模拟人类视觉的自适应行为.

在光强化训练过程中, 光电晶体管可以模拟人类视觉系统的适应行为. 由于细胞膜中离子通道门控的时间依赖性调节, 适应过程可以帮助生物体在不断变化的条件下(如变化的光强度)实现视觉信息的动态平衡^[88]. 具体来说, 当暴露于外部刺激时, 离子通道立即打开, 从而促进离子快速注入细胞; 然而, 在去除外部刺激后, 离子通道关闭, 停止接收有用信息. 因此, 随着刺激时间的延长, 离子通道可以调节离子的注入量, 从而高效适应不断变化的环境. 图8e展示了暴露于连续的较强光照时, 生物体对光照显示明显的敏化和适应化的过程. 突触前光刺激诱导的电流变化被定义为突触后电流(PSC). PSC在敏化过程中逐渐增加到电流峰值, 此后缓慢适应到新的准平衡状态, 这对应于生物的适应或习惯化过程. 对弱光条件的适应与突触学习过程相同, 表现出PSC随光照时间而逐渐增加. 为了实现对这一生物自适应过程的模拟, 有机聚合物半导体层(PDPP-TT)和钙钛矿量子点光敏层(CPB QD)间的界面缺陷是实现理想光电突触行为的关键, 如图8d所示, 在光照射下, 在CPB QD膜中产生光激子, 并且由于PDPP-TT和CPB QD膜的能带结构, 光激子在聚合物-钙钛矿界面中分离成电子和空穴. 界面缺陷作为微小的陷阱, 具有捕获一定光生电子的能力, 从而加速了电子在CPB QD膜中的积累, 抑制了电子和空穴的复合. 随后, 钙钛矿层和有机半导体层之间的能量势垒提高了有源层沟道中光生空穴的注入效率和浓度. 与传统的双层异质结构不同, 聚合物-钙钛矿界面缺陷

可以显著减少电子注入到半导体层中, 并在去除光照后防止电子-空穴复合, 从而增强光电晶体管的突触行为. 图8f展示了器件在不同光强条件下的自适应性行为, 在光强较低时($300 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $2 \text{ mW}/\text{cm}^2$)器件表现出敏化过程, 即归一化的光响应电流逐渐增加, 而在光强较高时($14 \text{ mW}/\text{cm}^2$)器件表现出适应化过程, 即归一化响应电流先急剧增加然后随着时间趋于平缓, 成功模仿类似人眼适应强光的自我保护行为.

人眼的自适应行为通过前馈和反馈适应方式实现. 前馈适应是指人眼通过信息预处理来主动适应动态变化的刺激, 而反馈适应则是通过响应行为来增强对弱光的响应或抑制对强光的响应^[60]. 这种自适应行为在生物体的视觉系统中非常重要, 同时也是生物适应环境进行自我保护的主要手段, 并且在人工智能系统中也是核心功能之一.

3.2 人体视觉的多颜色识别

除了对环境的自适应外, 人眼还能够识别不同的颜色: 人眼的视锥细胞可分为三种, 其中含有吸收红、绿、蓝光的三种视色素, 它们可以从不同波长的入射可见光中感知颜色信息^[89]. 相应地, 电子器件活性层中具有不同波长选择性的有机材料的组合使得通过仿生人工视觉识别颜色成为可能. 陈文章团队^[32]利用n型和p型有机晶体管组成的有机光学反相器(organic optical sensing inverter, OOSI)(图9b左)实现人体视网膜中对不同颜色的识别(红/绿/蓝)以及成功实现对人工视网膜的健康监测. 如图9b所示, 其中茈二酰亚胺(PDI)以及2,9-二癸基二萘并[2,3-b:2',3'-f]噻吩并[3,2-b]噻吩(C_{10} -DNTT)具有电荷捕获和电荷隧穿功能, 而n型双(2-苯乙基)-茈四甲酰二亚胺(BPE-PTCDI)和p型二萘并[2,3-b:2',3'-f]噻吩并[3,2-b]噻吩(DNTT)用作相应的电荷传输层. DNTT薄膜对较短的波长敏感, 而PDI薄膜具有更广泛的吸收, 因此, 该反相器可以在红/绿/蓝光下显示多级状态: 图9a展示了OOSI在 $V_{\text{INT}}=0$ V的情况下对光输入信号的实时响应 V - T 图, 测试条件为OOSI在几乎为零的输入电压下, 接受脉冲宽度为250 ms的随机光脉冲照射(蓝色、绿色和红色). 在光触发下, 根据650 nm(红)、520 nm(绿)、450 nm(蓝)的光照, 观察到输出的电信号(V_{OUT})相应地切换到多级状态(即数字“3”、“2”和“1”). 实时的光信号可以通过OOSI快速确定为红、绿和蓝颜色, 可以用于彩色图像分类.

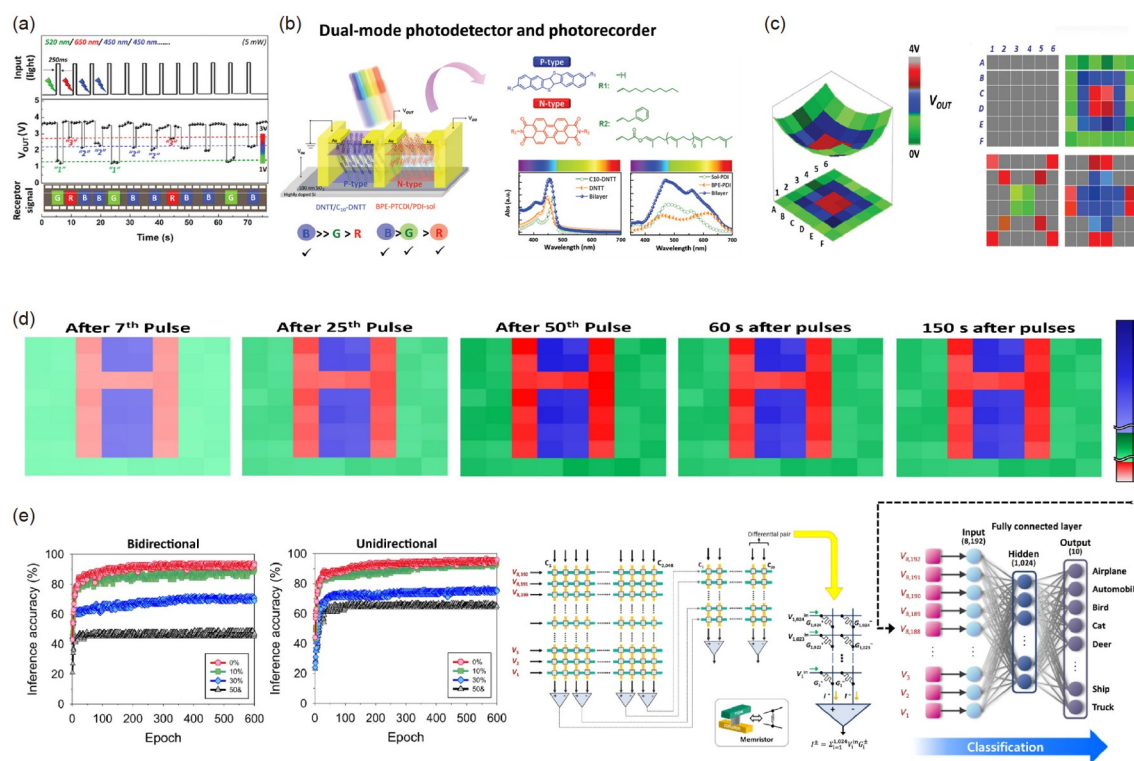


图 9 (a) OOSI在不同光照条件下电压随时间响应^[32]. (b) 左为OOSI的结构示意图, 其p型OFET的沟道材料由DNTT/C₁₀-DNTT组成, n型OFET的沟道由BPE-PTCDI/POD-sol组成; 右为文章中所用的有机半导体材料和紫外-可见光吸收光谱, 两种有机场效应晶体管(n通道和p通道)的吸收光谱明显不同, 基于PDI的薄膜具有更宽的吸收, 而基于DNTT的薄膜对更短的波长敏感^[32]. (c) 在6×6的柔性交叉阵列上实现对颜色识别的模拟^[32]. (d) 在8×8的光电突触阵列上实现彩色图像捕捉^[92]. (e) 光电突触用于卷积神经网络实现彩色图像识别任务^[92] (网络版彩图)

Figure 9 (a) Voltage response of OOSI over time under different lighting conditions ^[32]. (b) Left is a schematic diagram of the structure of OOSI. The channel material of the p-type OFET is composed of DNTT/C₁₀-DNTT, while the channel material of the n-type OFET is composed of BPE-PTCDI/POD-sol. (b) Right is the absorption spectrum of the organic semiconductor material and ultraviolet to visible light used in the article. The absorption spectra of the two types of OFETs (n-channel and p-channel) are significantly different, and the PDI based thin film has wider absorption, DNTT based films are sensitive to shorter wavelengths ^[32]. (c) Simulate color recognition on a 6×6 flexible cross array ^[32]. (d) Implementing color image capture on an 8×8 photoelectric synaptic array ^[92]. (e) Photoelectric synapses used in convolutional neural networks for color image recognition tasks ^[92] (color online).

此外, 该OOSI也可以制作在柔性透明基底上, 如图9c所示: 半球形器件阵列的输出电压在不同颜色(波长)的光照下再现了三种不同RGB颜色的图案, 证实了有机光学传感反相器阵列的彩色图像捕获能力。

具有多光谱颜色识别能力的光电突触是模拟人类视网膜实现神经形态视觉系统的必要前提。基于三端晶体管结构的研究表明了其可行性。然而, 实现两端结构的高集成密度视觉芯片阵列仍然是挑战^[90,91]。2023年, Lee等^[92]通过在电极和开关介质之间插入由具有高偶极矩的不对称分子组成的有机半导体薄膜, 引入的具有长期光促进偶极子的分子夹层赋予器件正光电导效应, 这意味着光可以作为输入信号来调节忆

阻器的电导。分子光谱吸收度的不同可以在没有任何滤光片和复杂外围电路的帮助下实现单个像素的颜色选择性。图9d展示了这种基于忆阻器的光电突触对彩色图像的识别能力。如图9e所示, 这种能够识别颜色的光电突触阵列, 通过视觉预处理可以将彩色图像特征有效分离, 大大提高了卷积神经网络对彩色图像识别任务的精度(单向权重调制下从67%提升至96%, 双向权重调制下从49%提升至94%)。

3.3 基于神经形态图像传感器实现的人工神经网络

在人类视觉系统中, 大量的视觉信息被人眼高效采集后, 首先通过视网膜进行处理, 然后通过视神经

传递到人脑的视觉皮层进行识别处理^[93]。受人类视觉系统的启发, 新兴的神经形态器件被开发用于高效的智能图像处理, 这极大地促进了自动驾驶、机器视觉、动态监测等应用的发展。我们结合神经形态计算网络原理介绍了基于有机光电突触的人工视网膜图像传感器。人眼视网膜的感觉层不仅能检测光刺激, 而且能对视觉信息进行预处理, 减少冗余信息, 增强感官体验^[94]。基于神经形态计算的图像识别传感器通过模拟人脑的信息处理方式, 有效地存储和计算信息量, 从而实现高精度的图像识别等计算任务。

人工神经网络(artificial neural network, ANN)模拟了生物神经网络的工作原理。它由多个人工神经元(也称为节点或单元)组成, 这些神经元之间通过连接权重进行信息传递和处理^[95]。人工神经网络通常分为三层: 输入层、隐藏层和输出层。输入层接收外部输入数据, 隐藏层负责对输入数据进行处理和转换, 输出层产生最终的结果。每个神经元接收来自前一层神经元的输入, 通过对输入和相应的权重进行加权求和, 并经过激活函数进行非线性变换, 生成输出。该输出又作为下一层神经元的输入^[96~98]。人工神经网络的训练

过程主要包括前向传播和反向传播两个阶段。前向传播是指从输入层到输出层的信息传递过程, 用于生成模型的预测结果。反向传播则指根据预测结果与真实结果之间的误差来调整连接权重来更新模型的参数, 以使误差最小化^[99]。人工神经网络在模式识别、分类、回归、聚类任务上具有广泛的应用^[99~101]。通过模拟生物突触的长时程增强和长时程抑制, 神经形态有机突触可以构建神经网络。突触的突触重量可以通过光或电脉冲的变化来动态调整。例如, 2019年深圳大学韩素婷团队^[33]用碳点/蚕丝蛋白复合物制成的有机光电活性突触晶体管(图10a)。通过调节输入光脉冲在电荷捕获层形成不稳定和稳定的电荷积累行为, 沟道电流表现出短期和长期的保留时间特性, 模拟了突触的STP和LTP特性。这样的突触行为是由被捕获的光生载流子在碳点/蚕丝蛋白复合物薄膜中产生的电场效应引起的。在此基础上, 结合模拟计算, 对单感知层的人工神经网络进行了仿真, 识别正确率为73%。

卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)是一种深度学习模型, 特别适用于图像和视频处理任务。它的设计灵感来自于生物学上视觉皮层的工作原

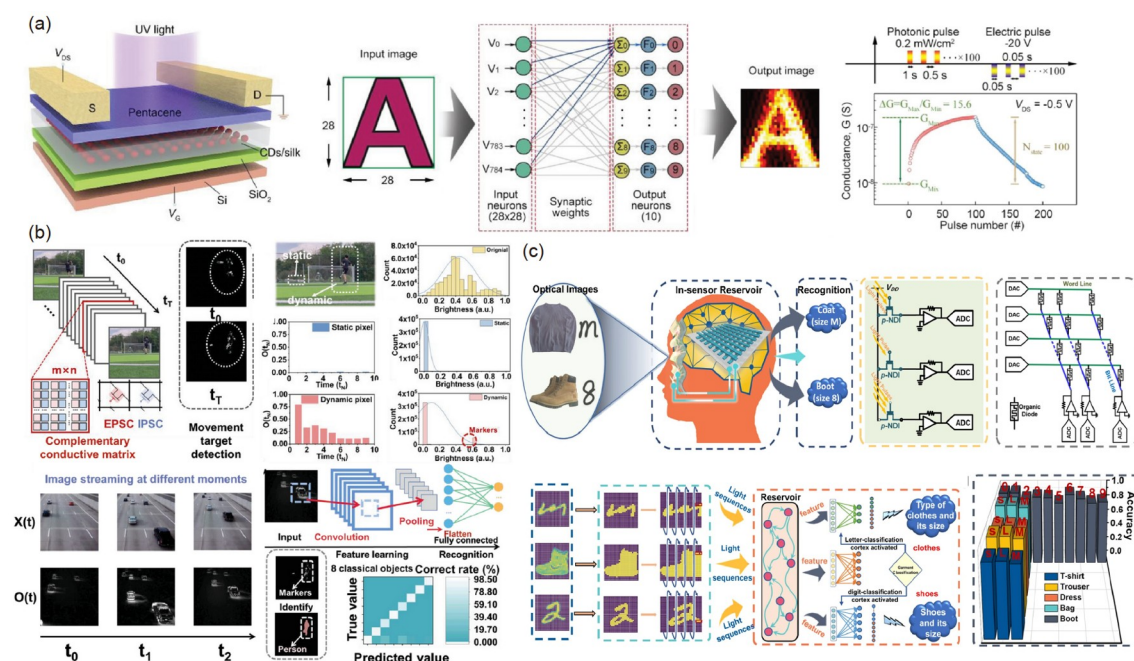


图 10 (a) 基于光电突触构建的人工神经网络ANN^[33], (b) 基于光电突触构建的卷积神经网络CNN^[102], (c) 基于光电突触构建的多任务储备池计算系统^[104] (网络版彩图)

Figure 10 (a) ANN constructed based on photoelectric synapses [33]. (b) CNN constructed based on photoelectric synapses [102]. (c) A multi task reservoir computing system based on optoelectronic synapses construction [104] (color online).

理. CNN的核心组件是卷积层, 它通过对输入数据进行卷积操作, 提取出不同特征的信息. 卷积操作可以理解为将一个滤波器(也称为卷积核)在输入数据上滑动, 计算每个位置的加权和. 这样可以保留图像或视频中的局部特征, 如边缘、纹理等. CNN在图像分类、目标检测、人脸识别等任务上有显著的优势. 例如, 福州大学陈惠鹏团队^[102]实现了一种基于二维分子晶体异质结的双极性光电突触, 由光刺激触发的非线性与时空关联的EPSC证明了该器件能够处理复杂时间信息的能力(图10b). 由于非线性的EPSC耦合, 不同的光刺激序列会触发不同的EPSC响应. 因此, 基于每个像素在不同时刻差异性的电流输出即可实现对图像中的运动信息检测. 基于上述原理, 构建了基于异质结双极性光电突触的CNN网络来进行运动目标提取的演示. 经过训练, 该网络可用于道路交通中车辆的运动检测, 准确率超过90%.

储备池计算(reservoir computing, RC)是一种基于动态存储器的类脑计算方法, 用于处理复杂的时间序列数据. 与传统的神经网络模型相比, RC具有较低的训练成本和计算复杂度. RC模型由输入层、动态存储器(也称为储备池)和输出层组成^[103]. 通过适当调整连接权重, RC可以学习到输入信号与期望输出之间的映射关系, 从而实现预测、分类、回归等任务. 储备池计算在处理时间序列数据、语音识别、运动控制、模式识别等领域具有广泛的应用. 例如, 香港大学王中锐团队和中国科学院福建物质结构研究所黄伟国团队合作^[104]提出了一种材料和算法的协同设计, 制备了一种具有高效激子解离和空间电荷传输特性的光响应半导体聚合物材料(p-NDI), 并制备了p-NDI半导体沟道的三端晶体管. 由于其出色的光响应行为和非线性衰落记忆特性, 该器件能够同时原位感知、记忆和预处理光学输入(即对比度增强和降噪). 此外, 激子解离/电荷复合动力学、光电效应和跨空间电荷传输特性之间的协同作用使基于晶体管的动态RC系统在不同任务中表现出良好的可分离性、易失性和回波状态特性(图10c). 基于上述特性, 构建了用于多任务模式分类的传感器内RC系统, 该RC系统可以识别手写字母和数字, 可用于服装分类, 包括服装风格和尺寸的多任务学习. 系统在总体精度为88.0%的情况下可以同时识别服装风格及其尺寸. 这项工作为具有多任务学习能力的可穿戴、经济、高效的光电神经形态系统提供

了很有前途的材料算法协同设计策略.

3.4 具有图像的处理能力的神经形态视网膜

在人类的视觉系统中, 大量的视觉信息在被人眼有效收集后, 先在第一阶段通过视网膜进行处理: 人类视网膜的感觉层不仅可以检测光刺激, 还可以对视觉信息进行预处理, 以减少冗余信息. 然后通过视觉神经传递到人脑的视觉皮层中进一步处理, 受人类视觉系统的启发, 用于图像预处理模拟人眼的光电突触器件已得到广泛的研究, 新兴的神经形态器件被用于高效的图像处理任务, 提高了智能感知系统的工作效率^[105]. 在这里, 我们介绍了基于有机光电突触阵列的图像预处理传感器. 与生物学类似, 人工光电突触可以对光学刺激做出反应, 并对成像信息进行实时预处理和短期记忆, 从而提高后续图像识别任务的效率和准确性. 光电突触的图像预处理功能是通过光强相关和光照时间相关的塑性来实现的, 包括图像降噪、对比度增强和锐化.

Choi等^[106]提出了基于二硫化钼光敏层和聚(1,3,5-三甲基-1,3,5-三乙烯基环三硅氧烷) (pV3D3)介电层的柔性神经形态光晶体管(图11a), 通过电输出的单一读出完成图像采集和预处理. 由于MoS₂-pV3D3异质结构具有较大的激子结合能, 以及光产生载流子在MoS₂-pV3D3界面的捕获, 该晶体管表现出光突触可塑性. 基于柔性神经形态器件的成像系统可以从大量的噪声光输入中收集预处理后的图像, 以达到降噪和增强对比度的效果, 而不需要重复的数据存储、处理、通信以及复杂的光学系统.

南京大学李昀团队^[107]利用光/电耦合调制晶体管中铁电层极化翻转(图11c), 实现了双极性光响应, 其作为模仿视网膜预处理和多级记忆识别能力, 其中重掺杂的n型硅晶片与30 nm厚的HfO₂膜分别被用作栅电极和介电层. 采用聚偏氟乙烯-三氟乙烯(P(VDF-TrFE))薄膜作为铁电层. 采用p型有机半导体二辛基苯并噻吩并噻吩(C8-BTBT)作为光敏沟道, 以聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)为界面捕获层. 其中P(VDF-TrFE)铁电材料具有可逆自发极化和快速极化转换的特性. 由于P(VDF-TrFE)的铁电极化特性可调, 可以增加导电态的数目. 此外, 光调制铁电极化翻转的实现带来了丰富的光电特性, 实现模拟视网膜双极细胞的生物功能和视皮层的突触连接. 通过改变施加在栅极的编程

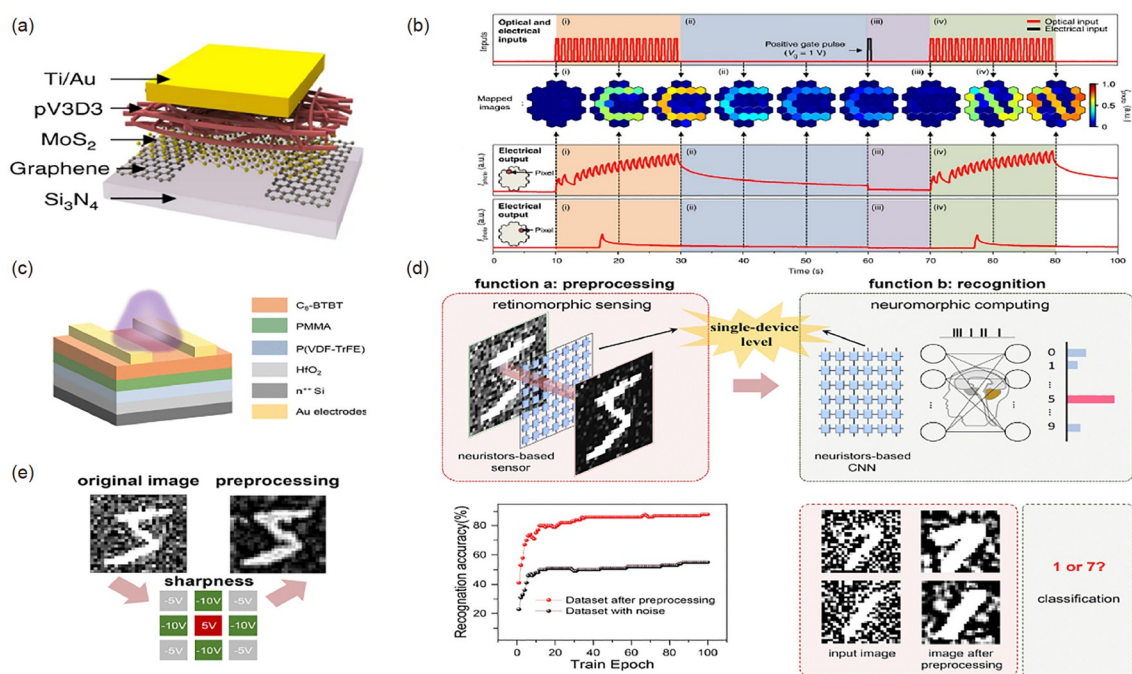


图 11 (a) 构建的单个光电突触器件示意图^[106]; (b) 基于图10(a)所示器件构建的可弯曲神经形态晶体管成像阵列及其图像预处理示意图^[106]; (c) 光电协同调谐的双极性光电突触示意图^[107]; (d) 可以进行图像感知和卷积运算识别的人工视网膜阵列^[107]; (e) 图像的边缘增强功能^[107] (网络版彩图)

Figure 11 (a) Schematic diagram of a single photoelectric synaptic device constructed [106]. (b) A flexible neural morphology transistor imaging array based on the device shown in Figure 10(a) and its image preprocessing schematic diagram [106]. (c) Schematic diagram of bipolar optoelectronic synapses for optoelectronic synergistic tuning [107]. (d) An artificial retina array capable of image perception and convolutional recognition [107]. (e) Edge enhancement function of images [107] (color online).

电压 V_G 可以使铁电材料的极性迅速变化得到双极性光响应, 成功模仿生物体中双极细胞对信号的预处理功能. 此外, 由于光电协同可调的铁电特性, 器件可以实现非易失性的多级电导态存储能力, 这对于模拟视觉皮层的突触连接和实现图像识别功能非常重要. 基于上述的器件性能, 使用 3×3 的器件阵列作为一个卷积核, 利用器件独特的可调双向光响应特性, 模拟了双极型细胞的图像预处理功能, 使得能够锐化手写数字“5”, 锐化功能增加了图像的对比度, 使图像更加清晰. 除了图像锐化功能外, 还实现了边缘增强功能(图11e). 边缘增强以及其他一些图像处理方法可以帮助提高图像处理效率. 此外, 使用相同的器件结构实现具有视网膜形态预处理功能的视觉传感器阵列和人工神经网络来实现图像的预处理和识别功能. 如图11d所示, 由于预处理突出了手写数字的轮廓特征并缓和了背景噪声信号, 使得识别准确率从68%提升至90%.

最近, Chen等^[108]报道了基于光调制电化学掺杂的

有机突触晶体管, 光可以操纵离子插入由供体-受体异质结界面组成的光活性层, 这使得在低工作电压 (<1 V) 下的高密度多层电导调制和高仿真地模拟离子驱动的生命系统突触活动. 此外, 栅极电压可根据不同的光照条件来调整光电响应和记忆效果. 该器件可以识别不同的光信号, 并模拟人类大脑的学习过程. 通过利用视觉信息的感知、处理和记忆的综合功能, 可以将单层突触阵列作为人工视网膜, 在不使用复杂的人工神经网络的情况下进行面部识别: 一个 64×64 的光学突触阵列作为人工视网膜, 以模拟人类面部识别的视觉系统. 该面部识别系统, 在识别其他女性和男性的面部图像时, 人工视网膜的激活率分别为66%和51%. 相比之下, 在识别目标女性的面部时, 人工视网膜显示出91%的激活率, 并且在加入信号噪声后的激活率也达到了88%. 这意味着该人工视网膜可以有效地学习关键视觉特征来识别目标图像并且在不使用复杂的人工神经网络的情况下进行面部识别.

4 基于视觉的多感集成

人体可以实时检测、感知和处理来自视觉、触觉等多个不同感官的信息, 并快速反应以应对复杂的环境. 利用功能电子器件实现多感知能力的模拟, 是人工智能领域的又一关键研究热点方向. 相比于单感知器件, 多功能感知将赋予智能机器人更好的环境适应性. 此外, 多功能感知传感器也可以提高感知的灵敏度和准确性. 感觉神经元将多个感觉输入整合成一个综合感知信号, 以监测复杂的环境^[109~111].

仅靠单一的感知无法准确地识别复杂的外部环境或物体, 在多个感官共同作用下, 可以帮助人体更好地对外界进行感知记忆等. 然而, 目前大多数的传感器件通常都只能感知一种类型的信号. 通过器件集成整合的方式, 可实现多信号感知功能. 在2020年, 陈晓东团队^[34]融合具有视觉和触觉的双模感知器件(光电探测器和压力传感器), 该双模感知器件收集外来信号, 将

导致突触晶体管中产生生物兴奋性突触后电流. 图12a为基于离子/电子混合神经形态电子学的双模人工感觉神经元(bimodal artificial sensory neuron, BASE). 该BASE由以下部分构成: 电阻性压力传感器、钙钛矿基光电探测器、水凝胶基离子电缆和突触晶体管(图12b). 其中光电探测器和压力传感器可以分别充当视网膜和皮肤中的受体, 将外部的视觉信号和触觉刺激转换为相应的电信号. 然后, 来自两个传感器的电信号可以通过离子电缆传输到突触晶体管并转换为瞬态电流, 类似于生物兴奋性突触后电流. 来自双模信息的电流以非线性和时间依赖性组合很好地模拟神经元工作方式, 该双模神经元可以同步融合视觉加触觉两个感觉, 从而能够快速且准确地操纵骨骼肌和机械手完成抓握的动作. 此外, 在模拟多透明字母模式识别任务的结果中显示双模感觉识别性能明显优于单模感觉模式, 验证了融合视觉和触觉的识别能力的增强. 该仿生神经元的设计赋予半机械手臂和神经形态系统的多

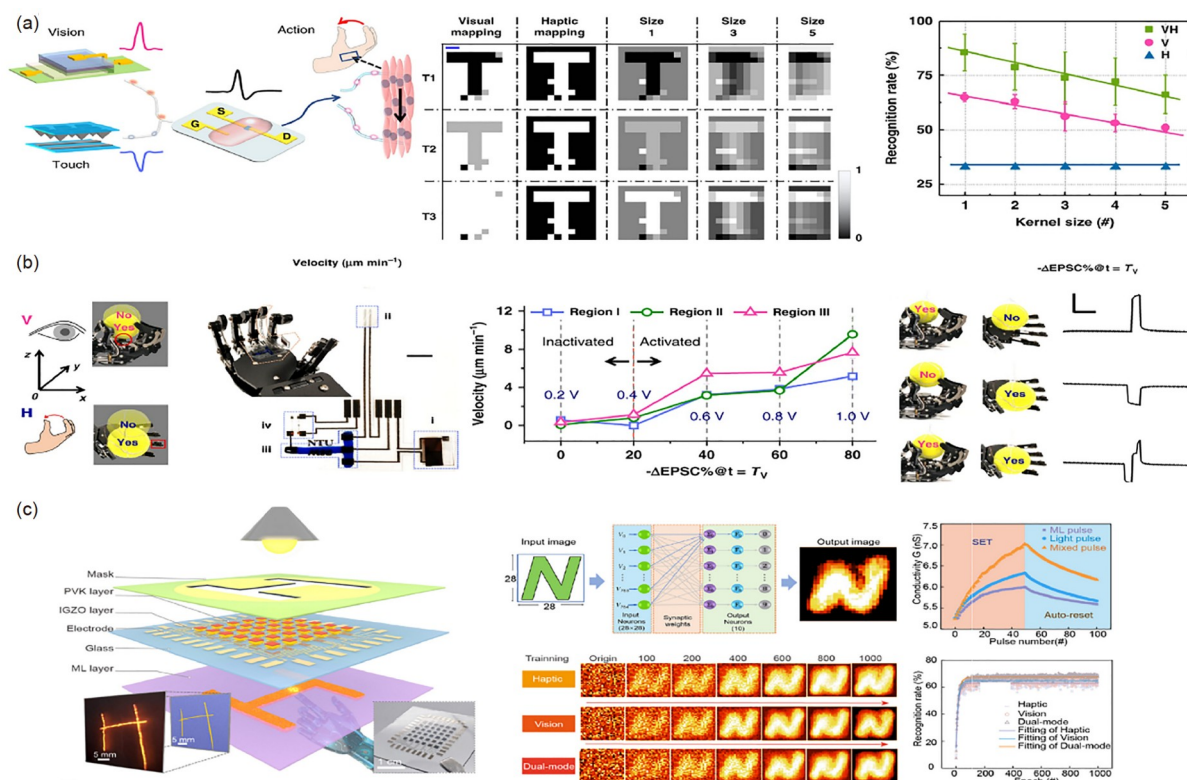


图 12 (a) BASE结构示意图^[34]; (b) 多感融合实现控制机械手抓握功能^[34]; (c) 单个器件上实现的视觉+触觉多感知识别应用^[35] (网络版彩图)

Figure 12 (a) Schematic diagram of BASE structure ^[34]. (b) Multi-sensory fusion realizes the control of robotic arm grasping function ^[34]. (c) Visual and tactile and multi-sensory recognition applications implemented on a single device ^[35] (color online).

模态感知能力,表现出在智能感知领域的巨大潜力。

陈惠鹏团队^[35]将力致发光材料(mechanoluminescence, ML)集成到光电突触中,在单个器件上实现视觉-触觉信息感知、处理、学习和记忆。其中视觉感知由光电突触实现,该光电突触是基于InGaZnO (IGZO)和有机无机杂化钙钛矿(MAPbI₃)异质结构形成的晶体管,而触觉信号则可以由ML材料(ZnS-CaZnOS:Mn)感知。ML材料可以将触觉刺激转换为光信号,进而可以影响光电突触的电导,由此可以实现视觉和触觉的协同感知。此外,视觉和触觉刺激都允许短期记忆、长期记忆、双脉冲易化等高效的突触行为。在6×6人工视觉-触觉双模感知阵列展示了视觉触觉共同调制下的对图像记忆效果的增强。此外,在ANN网络模拟图像识别时,在视觉和触觉共同作用下识别率为70%,高于单一的视觉感知(65%)和触觉感知(61%)的识别率。人工视觉-触觉感知阵列表现出响应光学和力学刺激的突触行为特性,即光照和机械应力的协同感知能力。

在非理想的环境下,靠单一的视觉传感无法清晰、准确地识别物体。例如,在黑暗或明亮的环境下,人类仅靠眼睛难以正确地识别物体,通常需要用上手部的感受即触觉来感知识别。陈惠鹏团队^[112]提出了一种人工多感觉整合神经系统,实现了触觉和视觉的双模感觉模式。将基于PDMS的柔性纳米摩擦发电机与浮栅型有机场效应晶体管光电突触相结合,其中TENG可以将外界机械信号转化为电信号,而晶体管中的Cs₂AgBiBr₆-QDs:PMMA/PDVT-10薄膜为电荷捕获层,其中无铅钙钛矿量子点为光响应材料,两种机制协同作用使得来自外部的触觉信号和光刺激信号都能够被有效地转换为电信号。在触觉信号和光信号刺激的共同调节下,该系统表现出优越的突触可塑性。基于该系统的多感知模式对图像的识别准确率从单一视觉感知的68.02%显著提高到80.55%。此外,在黑暗或明亮的背景下,只靠视觉传感的作用无法清晰准确地识别物体。但是在触觉传感的帮助下,图像对比度得到了显著改善。这种对环境适应性感知行为有力地证明了多感知系统的性能优越性。

最后,在智能应用方面,由于有机光电神经形态图像传感器实现图像识别等复杂功能仍需要传统电路和软件算法的帮助。因此,开发兼具信号感知、存储、处理一体化的智能感知系统极具挑战。

5 展望

受益于有机材料的特性,基于有机材料的智能光电突触器件具有低功耗、低成本和优异的生物相容性等优点,同时由于具有成功开发感知-记忆-计算一体的潜力,其可以实现基于全硬件的类脑系统。但该类类脑硬件单元商业化转化率低,可尝试从以下三方面优化。

材料方面,可以通过调整有机化合物电、化学和机械特性的能力,开发出具有长期稳定性、线性开关特性和低能量开关能力的理想材料,同时兼顾材料的可集成属性。尽管近年来取得了较大的进展,还需要研究更多的新的有效手段来克服目前的局限性。比如,有机材料受空气中的水分以及氧气的影响较大,这导致基于有机材料制备的电子器件稳定性偏差。对此可以研究更为先进的专用封装技术,有针对性的封装技术可以有效地提高器件的稳定性和使用寿命,并且合理封装也能够降低制造成本。

在制备工艺方面,基于有机材料器件大规模集成仍极具挑战,因为获得大面积、均一的有机薄膜工艺尚未成熟,器件的一致性难以得到保证,有机光电突触阵列规模仍被限制在较小的集成度。对此,可以将有机材料集成到成熟的CMOS工艺中,或者将有机神经形态器件和传统CMOS的数字单元结合。传统CMOS工艺经过数十年发展,短期内很难被替代,而有机材料因其生物相容性以及低功耗特性正是CMOS工艺追求的一个方向,推测有机-无机融合的神形态视觉系统将是未来的发展方向之一,但是将有机-无机集成一起,通常需要材料能够耐受300℃以上的高温(温度耐受性对于有机材料来说仍是挑战)。

算法方面,处理类似于人类视觉系统的视觉信息并实现低功耗高效并行计算是十分复杂的。因此,开发基于新材料和器件的算法也是一项紧迫的任务。未来,如何充分利用光电突触器件实现高集成度、宽视场、低功耗、低延迟的人工视觉系统将是重要的研究方向。

此外,与三端晶体管相比,忆阻器可以通过加入不同的介质层材料来引入电、热、光以及化学信号等实现多变量集于一体,同时可以模拟具有高阶复杂度视觉通路的仿生器件功能,且由于其两端的简单结构更适用于高密度集成。然而,双端忆阻器仍表现出低动态范围、高非线性/不对称性、高变异性、自由度有

限的非理想器件特征. 新兴的多端忆阻器, 如忆阻晶体管可以为仿生视觉器件引入更多的调控端, 显著提升器件的编程灵活性, 将是神经形态视觉硬件的又一理想构筑硬件单元.

参考文献

- Shi J, Jie J, Deng W, Luo G, Fang X, Xiao Y, Zhang Y, Zhang X, Zhang X. *Adv Mater*, 2022, 34: 2200380
- Chun S, Kim JS, Yoo Y, Choi Y, Jung SJ, Jang D, Lee G, Song KI, Nam KS, Youn I, Son D, Pang C, Jeong Y, Jung H, Kim YJ, Choi BD, Kim J, Kim SP, Park W, Park S. *Nat Electron*, 2021, 4: 429–438
- Chen Y, Gao G, Zhao J, Zhang H, Yu J, Yang X, Zhang Q, Zhang W, Xu S, Sun J, Meng Y, Sun Q. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1900959
- Mu B, Guo L, Liao J, Xie P, Ding G, Lv Z, Zhou Y, Han S, Yan Y. *Small*, 2021, 17: 2103837
- Lu K, Li L, Jiang S, Chen X, Chang Q, Shi Y, Li Y. *Adv Sens Res*, 2023, 2: 2200066
- Ohayon D, Inal S. *Adv Mater*, 2020, 32: 2001439
- Wang J, Jiang J, Zhang C, Sun M, Han S, Zhang R, Liang N, Sun D, Liu H. *Nano Energy*, 2020, 76: 105050
- Sekitani T, Zschieschang U, Klauk H, Someya T. *Nat Mater*, 2010, 9: 1015–1022
- Li W, Guo F, Ling H, Liu H, Yi M, Zhang P, Wang W, Xie L, Huang W. *Small*, 2018, 14: 1701437
- Wang T, Zhang Y, Liu Q, Cheng W, Wang X, Pan L, Xu B, Xu H. *Adv Funct Mater*, 2017, 28: 1705551
- Wang K, Dai S, Zhao Y, Wang Y, Liu C, Huang J. *Small*, 2019, 15: 1900010
- Zhang H, Guo X, Hui J, Hu S, Xu W, Zhu D. *Nano Lett*, 2011, 11: 4939–4946
- Niu H, Zhang H, Yue W, Gao S, Kan H, Zhang C, Zhang C, Pang J, Lou Z, Wang L, Li Y, Liu H, Shen G. *Small*, 2021, 17: 2100804
- Chen H, Cai Y, Han Y, Huang H. *Angew Chem Int Ed*, 2024, 63: e202313634
- Song X, Gasparini N, Nahid MM, Chen H, Macphree SM, Zhang W, Norman V, Zhu C, Bryant D, Ade H, McCulloch I, Baran D. *Adv Funct Mater*, 2018, 28: 1802895
- Martino N, Ghezzi D, Benfenati F, Lanzani G, Antognazza MR. *J Mater Chem B*, 2013, 1: 3768–3780
- Owens RM, Malliaras GG. *MRS Bull*, 2010, 35: 449–456
- Yan X, Zhao Y, Cao G, Li X, Gao C, Liu L, Ahmed S, Altaf F, Tan H, Ma X, Xie Z, Zhang H. *Adv Sci*, 2023, 10: 2203889
- Park HL, Kim H, Lim D, Zhou H, Kim YH, Lee Y, Park S, Lee TW. *Adv Mater*, 2020, 32: 1906899
- Gu L, Poddar S, Lin Y, Long Z, Zhang D, Zhang Q, Shu L, Qiu X, Kam M, Javey A, Fan Z. *Nature*, 2020, 581: 278–282
- Kumar M, Som T, Kim J. *Adv Mater*, 2019, 31: 1903095
- Kwon SM, Kwak JY, Song S, Kim J, Jo C, Cho SS, Nam SJ, Kim J, Park GS, Kim YH, Park SK. *Adv Mater*, 2021, 33: 2105017
- Jo C, Kim J, Kwak JY, Kwon SM, Park JB, Kim J, Park GS, Kim MG, Kim YH, Park SK. *Adv Mater*, 2022, 34: 2108979
- Zhang ZC, Li Y, Wang JJ, Qi DH, Yao BW, Yu MX, Chen XD, Lu TB. *Nano Res*, 2021, 14: 4591–4600
- Feng G, Zhang X, Tian B, Duan C. *InfoMat*, 2023, 5: e12473
- Webster MA. *Annu Rev Vis Sci*, 2015, 1: 547–567
- Mante V, Frazor RA, Bonin V, Geisler WS, Carandini M. *Nat Neurosci*, 2005, 8: 1690–1697
- Chen S, Liu Z, Long H, Yang J, Li Z, Cai Z, Qu Z, Shao L, Shi X, Jiang L, Xu W, Dong H, Wei Z, Qiao Y, Song Y. *Adv Funct Mater*, 2023, 33: 2212158
- Wang X, Yang S, Qin Z, Hu B, Bu L, Lu G. *Adv Mater*, 2023, 35: 2303699
- Sun Y, Liu X, Deng W, Zhang X, Lu Z, Chang Z, Fang X, Wu D, Jie J. *Adv Funct Mater*, 2022, 32: 2112758
- He Z, Shen H, Ye D, Xiang L, Zhao W, Ding J, Zhang F, Di C, Zhu D. *Nat Electron*, 2021, 4: 522–529
- Hung C, Chiang Y, Lin Y, Chiu Y, Chen W. *Adv Sci*, 2021, 8: 2100742
- Lv Z, Chen M, Qian F, Roy VAL, Ye W, She D, Wang Y, Xu Z, Zhou Y, Han S. *Adv Funct Mater*, 2019, 29: 1902374
- Wan C, Cai P, Guo X, Wang M, Matsuhisa N, Yang L, Lv Z, Luo Y, Loh XJ, Chen X. *Nat Commun*, 2020, 11: 4602
- He J, Wei R, Ge S, Wu W, Guo J, Tao J, Wang R, Wang C, Pan C. *InfoMat*, 2023, e12493
- Zhang D, Zhang X, Guo T, Zou J, Zhou Y, Jin J, Zhu Z, Cao Q, Zhang J, Tai Q. *Small*, 2023, 19: 2205604
- Luo N, Zhang G, Liu Z. *Org Chem Front*, 2021, 8: 4560–4581

- 38 Meng D, Zheng R, Zhao Y, Zhang E, Dou L, Yang Y. *Adv Mater*, 2022, 34: 2107330
- 39 Li Y, Liu M, Wu J, Li J, Yu X, Zhang Q. *Front Optoelectron*, 2022, 15: 38
- 40 Zhao G, Sun J, Zhang M, Guo S, Wang X, Li J, Tong Y, Zhao X, Tang Q, Liu Y. *Adv Sci*, 2023, 10: 2302974
- 41 Niu Q, Mi L, Chen W, Li Q, Zhong S, Yu Y, Li L. *Chin J Catal*, 2023, 50: 45–82
- 42 Sun Y, Yao Q, Xing W, Jiang H, Li Y, Xiong W, Zhu W, Zheng Y. *Adv Sci*, 2023, 10: 2205986
- 43 Han Y, Chang X, Cheng X, Lin Y, Cui BB. *Laser & Photonics Rev*, 2023, 17: 2300383
- 44 Zhu W, Wang S, Zhang X, Wang A, Wu C, Hao F. *Small*, 2022, 18: 2105783
- 45 Wu X, Jia R, Pan J, Wang J, Deng W, Xiao P, Zhang X, Jie J. *Adv Funct Mater*, 2021, 31: 2100202
- 46 Zhang X, Dong H, Hu W. *Adv Mater*, 2018, 30: 1801048
- 47 Wang C, Lu Z, Deng W, Zhao W, Lu B, Xiao J, Zhang X, Jie J, Zhang X. *J Mater Chem C*, 2021, 9: 5174–5181
- 48 Deng W, Xiao Y, Lu B, Zhang L, Xia Y, Zhu C, Zhang X, Guo J, Zhang X, Jie J. *Adv Mater*, 2020, 33: 2005915
- 49 Chen S, Ma X, Cai Z, Long H, Wang X, Li Z, Qu Z, Zhang F, Qiao Y, Song Y. *Adv Mater*, 2022, 34: 2200928
- 50 Dai S, Wu X, Liu D, Chu Y, Wang K, Yang B, Huang J. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2018, 10: 21472–21480
- 51 Shao LJ, Chen SN, Wang YM, Li Z, Shi XS, Long HR, Jiang L, Yang JH, Qiao YL, Song YL. *Chin J Polym Sci*, 2023, 41: 1638–1645
- 52 Kaya İC, Ozdemir R, Usta H, Sonmezoglu S. *J Mater Chem A*, 2022, 10: 12464–12472
- 53 Deng W, Lei H, Zhang X, Sheng F, Shi J, Zhang X, Liu X, Grigorian S, Zhang X, Jie J. *Adv Mater*, 2022, 34: 2109818
- 54 Fu B, Yang F, Sun L, Zhao Q, Ji D, Sun Y, Zhang X, Hu W. *Adv Mater*, 2022, 34: 2203330
- 55 Yang YN, Li XM, Wang SJ, Duan XP, Cai YH, Sun XB, Wei DH, Ma W, Sun YM. *Chin J Polym Sci*, 2022, 41: 194–201
- 56 Ding L, Yu ZD, Wang XY, Yao ZF, Lu Y, Yang CY, Wang JY, Pei J. *Chem Rev*, 2023, 123: 7421–7497
- 57 Xu D, Gong Z, Jiang Y, Feng Y, Wang Z, Gao X, Lu X, Zhou G, Liu JM, Gao J. *Nat Commun*, 2022, 13: 7020
- 58 Dang MT, Hirsch L, Wantz G. *Adv Mater*, 2011, 23: 3597–3602
- 59 Shao L, Xu X, Liu Y, Zhao Y. *ACS Appl Mater Interfaces*, 2023, 15: 35272–35279
- 60 Li Y, Wang J, Yang Q, Shen G. *Adv Sci*, 2022, 9: 2202123
- 61 Jeon NJ, Na H, Jung EH, Yang TY, Lee YG, Kim G, Shin HW, Il Seok S, Lee J, Seo J. *Nat Energy*, 2018, 3: 682–689
- 62 Guo S, Zhang X, Hao M, Duan T, Wang W, Li Z, Liu G, Cai S, Zhou Y. *Adv Opt Mater*, 2024, 12: 2301255
- 63 Zhang J, Song X, Wang L, Huang W. *Natl Sci Rev*, 2022, 9: nwab129
- 64 Han B, Liu B, Wang G, Qiu Q, Wang Z, Xi Y, Cui Y, Ma S, Xu B, Hsu H. *Adv Funct Mater*, 2023, 33: 2300570
- 65 Sun C, Jiang Y, Cui M, Qiao L, Wei J, Huang Y, Zhang L, He T, Li S, Hsu HY, Qin C, Long R, Yuan M. *Nat Commun*, 2021, 12: 2207
- 66 Mak CH, Huang X, Liu R, Tang Y, Han X, Ji L, Zou X, Zou G, Hsu HY. *Nano Energy*, 2020, 73: 104752
- 67 Liu A, Guan G, Chai X, Feng N, Lu M, Bai X, Zhang Y. *Laser Photon Rev*, 2022, 16: 2200189
- 68 Zhao F, Ren A, Li P, Li Y, Wu J, Wang ZM. *ACS Nano*, 2022, 16: 7116–7143
- 69 Li SX, Xu YS, Li CL, Guo Q, Wang G, Xia H, Fang HH, Shen L, Sun HB. *Adv Mater*, 2020, 32: 2001998
- 70 Gao H, Feng J, Pi Y, Zhou Z, Zhang B, Wu Y, Wang X, Jiang X, Jiang L. *Adv Funct Mater*, 2018, 28: 1804349
- 71 Zhang F, Yang B, Zheng K, Yang S, Li Y, Deng W, He R. *Nano-Micro Lett*, 2018, 10: 43
- 72 Stoumpos CC, Malliakas CD, Kanatzidis MG. *Inorg Chem*, 2013, 52: 9019–9038
- 73 Kumar MH, Dharani S, Leong WL, Boix PP, Prabhakar RR, Baikie T, Shi C, Ding H, Ramesh R, Asta M, Graetzel M, Mhaisalkar SG, Mathews N. *Adv Mater*, 2014, 26: 7122–7127
- 74 Pang S, Hu H, Zhang J, Lv S, Yu Y, Wei F, Qin T, Xu H, Liu Z, Cui G. *Chem Mater*, 2014, 26: 1485–1491
- 75 Ma L, Yan Z, Zhou X, Pi Y, Du Y, Huang J, Wang K, Wu K, Zhuang C, Han X. *Nat Commun*, 2021, 12: 2023
- 76 Lei Y, Chen Y, Zhang R, Li Y, Yan Q, Lee S, Yu Y, Tsai H, Choi W, Wang K, Luo Y, Gu Y, Zheng X, Wang C, Wang C, Hu H, Li Y, Qi B, Lin M, Zhang Z, Dayeh SA, Pharr M, Fenning DP, Lo YH, Luo J, Yang K, Yoo J, Nie W, Xu S. *Nature*, 2020, 583: 790–795
- 77 Alsalloum AY, Turedi B, Zheng X, Mitra S, Zhumekenov AA, Lee KJ, Maity P, Gereige I, AlSaggaf A, Roqan IS, Mohammed OF, Bakr OM. *ACS Energy Lett*, 2020, 5: 657–662
- 78 Chen J C, Lu Y D, Chen J Y. *Adv Sci*, 2023, 10: 2301028
- 79 Hu H, Zhao D, Gao Y, Qiao X, Salim T, Chen B, Chia EEM, Grimsdale AC, Lam YM. *Chem Mater*, 2019, 31: 2597–2602
- 80 Chou YH, Chang HC, Liu CL, Chen WC. *Polym Chem*, 2014, 6: 341–352

- 81 Liu C, Yan X, Song X, Ding S, Zhang DW, Zhou P. *Nat Nanotech*, 2018, 13: 404–410
- 82 Hu B, Wang C, Wang J, Gao J, Wang K, Wu J, Zhang G, Cheng W, Venkateswarlu B, Wang M, Lee PS, Zhang Q. *Chem Sci*, 2014, 5: 3404–3408
- 83 Patel M, Kim H, Kim J. *Adv Elect Mater*, 2015, 1: 1500232
- 84 Schnapf JL, Baylor DA. *Sci Am*, 1987, 256: 40–47
- 85 Park Y, Lee JS. *ACS Nano*, 2017, 11: 8962–8969
- 86 Artyukhin AB, Wu LF, Altschuler SJ. *Cell*, 2009, 138: 619–621
- 87 Kuang J, Liu K, Liu M, Shao M, Zhu M, Liu G, Wen W, Chen J, Qin M, Pan Z, Zhao Z, Liu Y, Guo Y. *Adv Funct Mater*, 2022, 33: 2209502
- 88 Shulaker MM, Hills G, Park RS, Howe RT, Saraswat K, Wong HSP, Mitra S. *Nature*, 2017, 547: 74–78
- 89 Bowmaker JK, Dartnall HJ. *J Physiol*, 1980, 298: 501–511
- 90 Wu C, Kim TW, Choi HY, Strukov DB, Yang JJ. *Nat Commun*, 2017, 8: 752
- 91 Wang Z, Joshi S, Savel'Ev SE, Jiang H, Midya R, Lin P, Hu M, Ge N, Strachan JP, Li Z, Wu Q, Barnell M, Li GL, Xin HL, Williams RS, Xia Q, Yang JJ. *Nat Mater*, 2016, 16: 101–108
- 92 Lee J, Jeong BH, Kamaraj E, Kim D, Kim H, Park S, Park HJ. *Nat Commun*, 2023, 14: 5775
- 93 Gollisch T, Meister M. *Neuron*, 2010, 65: 150–164
- 94 Wallisch P, Movshon JA. *Neuron*, 2008, 60: 195–197
- 95 LeCun Y, Bengio Y, Hinton G. *Nature*, 2015, 521: 436–444
- 96 Abbott LF, Regehr WG. *Nature*, 2004, 431: 796–803
- 97 Rumelhart DE, Hinton GE, Williams RJ. *Nature*, 1986, 323: 533–536
- 98 Cooper SJ. *Neurosci Biobehav Rev*, 2005, 28: 851–874
- 99 Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton GE. *Commun ACM*, 2017, 60: 84–90
- 100 Hinton GE, Salakhutdinov RR. *Science*, 2006, 313: 504–507
- 101 Lecun Y, Bottou L, Bengio Y, Haffner P. *Proc IEEE*, 1998, 86: 2278–2324
- 102 Zhu X, Gao C, Ren Y, Zhang X, Li E, Wang C, Yang F, Wu J, Hu W, Chen H. *Adv Mater*, 2023, 35: 2301468
- 103 Rani A, Velusamy DB, Marques Mota F, Jang YH, Kim RH, Park C, Kim DH. *Adv Funct Mater*, 2017, 27: 1604604
- 104 Wu X, Wang S, Huang W, Dong Y, Wang Z, Huang W. *Nat Commun*, 2023, 14: 468
- 105 Rani A, Velusamy DB, Kim RH, Chung K, Mota FM, Park C, Kim DH. *Small*, 2016, 12: 6167–6174
- 106 Choi C, Leem J, Kim MS, Taqieddin A, Cho C, Cho KW, Lee GJ, Seung H, Bae HJ, Song YM, Hyeon T, Aluru NR, Nam SW, Kim DH. *Nat Commun*, 2020, 11: 5934
- 107 Dai Q, Pei M, Guo J, Wang Q, Hao Z, Wang H, Li Y, Li L, Lu K, Yan Y, Shi Y, Li Y. *Mater Horiz*, 2023, 10: 3061–3071
- 108 Chen K, Hu H, Song I, Gobeze HB, Lee WJ, Abtahi A, Schanze KS, Mei J. *Nat Photon*, 2023, 17: 629–637
- 109 Lee J, Lu WD. *Adv Mater*, 2018, 30: 1702770
- 110 Yan X, Zhang L, Chen H, Li X, Wang J, Liu Q, Lu C, Chen J, Wu H, Zhou P. *Adv Funct Mater*, 2018, 28: 1803728
- 111 Song J, Xu L, Li J, Xue J, Dong Y, Li X, Zeng H. *Adv Mater*, 2016, 28: 4861–4869
- 112 Wu X, Li E, Liu Y, Lin W, Yu R, Chen G, Hu Y, Chen H, Guo T. *Nano Energy*, 2021, 85: 106000

Organic neuromorphic machine vision devices and systems

Jiahui Hu^{1†}, Minghao Jiang^{1†}, Ye Zhou³, Xinjie Wen¹, Yongbiao Zhai^{1*}, Ziyu Lv^{1*}, Su-Ting Han^{2*}

¹ College of Electronics and Information Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

² Department of Applied Biology and Chemical Technology, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China

³ Institute for Advanced Study, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China

†These authors contributed equally to this work.

*Corresponding authors (email: zhaiyb@szu.edu.cn; lvziyu@szu.edu.cn; suting.han@polyu.edu.hk)

Abstract: In recent years, organic electronics has surged forward, fueled by the rapid advancement of organic semiconductor materials and their devices. This progress holds immense promise for innovative applications in fields like wearable electronics and artificial intelligence. Organic semiconductors shine with several benefits: their low cost, excellent biocompatibility, tunable spectral response, and impressive flexibility. These attributes unlock significant commercial potential, particularly in emerging intelligent sensing fields like optoelectronic devices. In the realm of flexible biomimetic vision sensors, they are an indispensable building block. This paper delves into the research advancements shaping artificial neural form visual intelligent sensing systems. We explore the categories of organic photoelectric materials and photoelectric devices crucial for biomimicry in visual sensing, culminating in the discussion of integrated multi-sensory systems encompassing both vision and touch. Finally, we analyze the significance and current challenges of developing organic bionic vision systems, offering feasible research directions for harnessing the power of organic visual perception and multi-sensory integration in the future.

Keywords: organic materials, photoelectric synapses, bionic applications, multi-sensory fusion, intelligent perception

doi: [10.1360/SSC-2023-0257](https://doi.org/10.1360/SSC-2023-0257)