

二维 MXenes 材料在柔性光电探测器中的应用展望

李 腊^{1,2}, 沈国震^{1,2}

(北京理工大学 1. 集成电路与电子学院, 北京 100081; 2. 柔性电子器件与智造研究所, 北京 102488)

摘 要: 二维过渡金属碳/氮化物(MXenes)自 2011 年被首次报道以来, 凭借其特殊的二维层状结构、优异的导电性和电化学性能在能源、催化、传感、电磁屏蔽和微波吸收等领域吸引了极大关注。近几年, 随着对该材料认识的不断加深, 其在光电领域的研究也不断深入。与其它领域不同, 光电器件聚焦于延伸 MXenes 材料半导体性质, 通过设计表面官能团、精准控制层数等来打开材料带隙, 从而使其从金属性质转变为半导体性质。本文主要围绕 MXenes 材料的光电性质, 介绍其在柔性光电子器件中的应用, 系统阐述 MXenes 材料在透明电子器件、光电探测器、图像传感器、光电晶体管、人工神经视觉网络系统的应用前沿现状与趋势, 并展望了 MXenes 基柔性光电器件面临的挑战以及未来发展前景。

关 键 词: MXene; 柔性电子; 透明电子; 光电探测器; 带隙调控; 专题评述

中图分类号: TB383 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2024)02-0186-09

2D MXenes Based Flexible Photodetectors: Progress and Prospects

LI La^{1,2}, SHEN Guozhen^{1,2}

(1. School of Integrated Circuits and Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China; 2. Institute of Flexible Electronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 102488, China)

Abstract: Two-dimensional (2D) transition metal carbides/nitrides (MXenes), since their discovery in 2011, have attracted great attention in the fields of energy storage, catalysis, sensors, electromagnetic interference shielding and microwave absorption and so on, owing to their special 2D layered structure, excellent electrical conductivity and electrochemical properties. In recent years, with the deep understanding of MXenes, the research on the realm related to optoelectronic properties has been widely concerned. Unlike other application fields, optoelectronic devices based on MXenes focus on extending semiconductor properties, including tunable band gap of the MXenes *via* design of the surface functional groups and layer control, *etc.*, so as to achieve their transformation from metal to semiconductor properties. This paper revolves around the photoelectric properties of MXenes, mainly introduce its application in flexible optoelectronic devices, and systematically describe their current status and trend in transparent electronic devices, photodetectors, image sensors, transistors, and artificial neural vision network systems. The challenges and future development prospects of MXenes-based flexible optoelectronic devices are also proposed.

收稿日期: 2023-07-19; 收到修改稿日期: 2023-09-12; 网络出版日期: 2023-09-12

基金项目: 国家自然科学基金(61888102); 北京市自然科学基金 (L223006)

National Natural Science Foundation of China (61888102); Beijing Natural Science Foundation (L223006)

作者简介: 李 腊(1991-), 女, 副教授. E-mail: lali@bit.edu.cn

LI La (1991-), female, associate professor. E-mail: lali@bit.edu.cn

通信作者: 沈国震, 教授. E-mail: gzshen@bit.edu.cn

SHEN Guozhen, professor. E-mail: gzshen@bit.edu.cn

Key words: MXene; flexible electronics; transparent electronics; photodetector; tunable band gap; perspective

柔性光电探测器相比于传统的刚性器件, 具有形变、对软表面的适应性、机械稳定性和高光响应性等特点, 在电信、遥感、医学诊断、光通信和仿生人类视觉等系统中发挥越来越重要的作用^[1-4]。一般而言, 柔性光电探测器由柔性衬底、导电电极、光敏材料三部分组成^[5-6]。其中柔性衬底决定了器件外在表现的可弯曲、可拉伸、可自愈等机械性能^[7], 导电电极会影响器件诸如透明、可降解等特性^[8-9], 光敏材料则是光电探测器性能的决定因素^[10], 因此发展高性能多功能的柔性光电探测器需要这三个组成部分的协同作用^[11-13]。在不影响性能的前提下, 如果柔性光电探测器的组成部件能合并成两个, 那么其组装工艺的复杂程度将会大大降低, 而且还可能赋予器件一些特异性能^[14]。因此, 既能表现出金属般导电性又具有可调节的半导体特性的材料受到越来越多光电领域研究者的关注^[15]。

二维过渡金属碳/氮化物(MXenes)是将三元层状碳/氮化物(MAX)相中的 A 位原子刻蚀掉后衍生而来的^[16-18]。2011 年, Gogotsi 等^[19]首次报道了 2D $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 材料。MXenes 材料的化学通式为 $\text{M}_{n+1}\text{X}_n\text{T}_x$, 其中 M 为过渡族金属元素, X 是碳或/和氮, $n=1\sim5$, T_x 代表表面端基, 如 $-\text{O}$ 、 $-\text{F}$ 、 $-\text{OH}$ ^[20-21]。MXenes 材料优异的导电性能为制备高导电性电极提供了可能^[22-24], 目前报道的 MXenes 材料的最高导电率达 20000 S/cm ^[25], 该工作通过在合成 MAX 相时加入过量的 A 原子, 刻蚀后得到 $\text{Al-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$, 不仅提高了材料的电导率, 而且提高了材料的稳定性, 材料在常温下可以保存超过 10 个月。此外, MXenes 材料独特的二维结构及其丰富的表面官能团也为合成异质结光敏材料或基于可调节半导体性能的光敏材料提供可能^[26]。Hart 等^[27]通过表面官能团与插层剂调控 MXenes 材料的电学性质, 实验结果表明 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 、 Ti_3CNT_x 、 $\text{Ti}_3\text{CNT}_x(\text{TBA}^+)$ 和 $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ 材料真空退火时导电性均会发生显著变化, 材料从金属性质转化为半导体性质。以上研究均证明 MXenes 材料是一种潜在的双功能光电探测器材料^[28-31]。

本文介绍基于 MXenes 材料的柔性光电子器件, 如图 1 所示。主要包括 MXenes 材料在光电探测器、图像传感器、光电晶体管、透明电子器件、人工神经网络视觉网络系统中的应用现状与趋势, 并讨论 MXenes 基柔性光电器件面临的挑战以及发展前景。

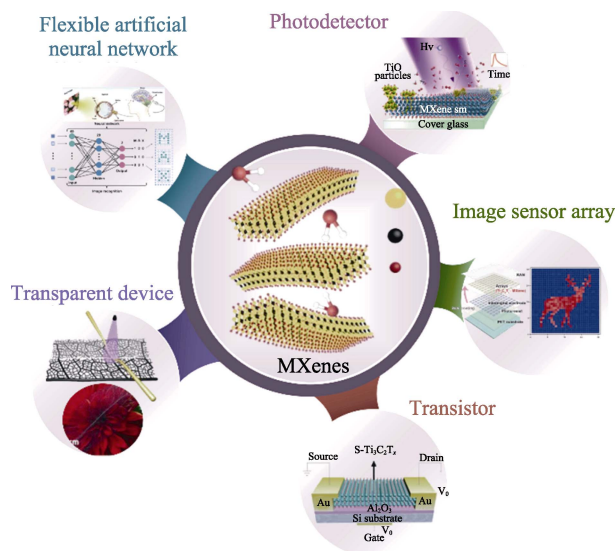


图 1 MXenes 材料在柔性光电领域的应用^[32-35]

Fig. 1 Application of MXenes in flexible optical electronic devices^[32-35]

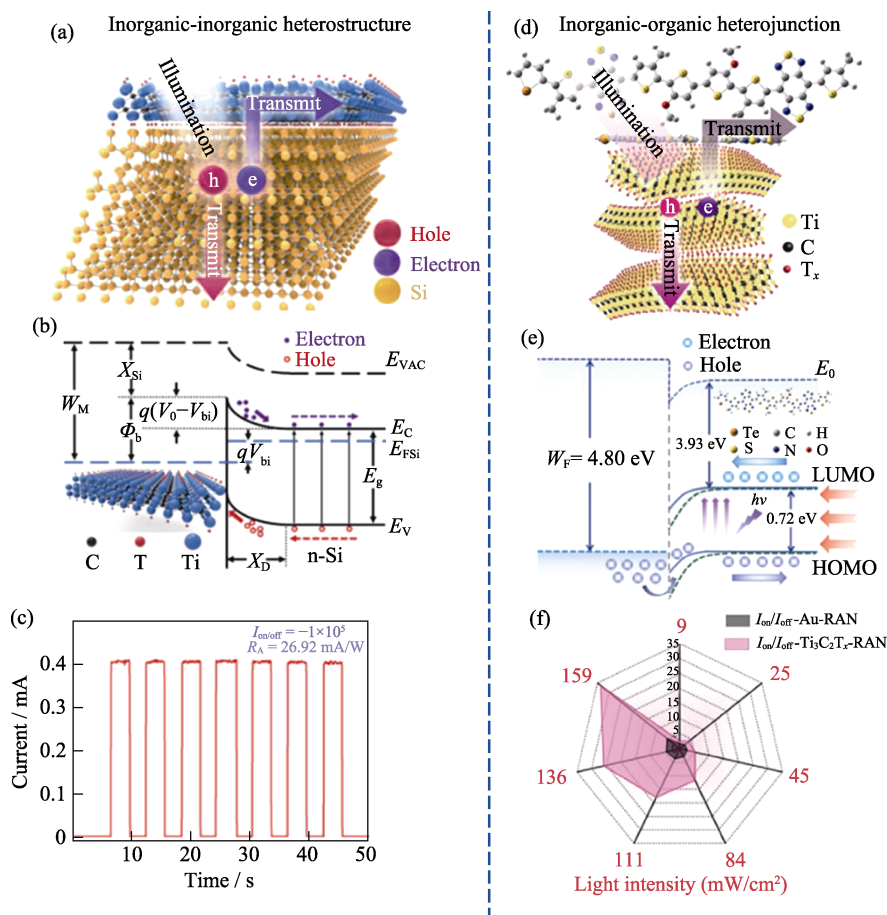
Including transparent device, photodetector, image sensor array, transistor, and artificial neural network

1 光电探测器

1.1 异质结型探测器

MXenes 材料具有与石墨烯类似的二维结构, 且单片尺寸大, 易与其他二维半导体材料形成范德华异质结, 从而提高光电探测器的性能^[36-38]。Kang 等^[39]在 n 型硅(n-Si)衬底上垂直制备了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜, 形成了 MXene/Si 范德华异质结构, 并研究了其光电性能, 如图 2(a)所示。在光照下 MXene/Si 异质结(图 2(b))空间电荷区内或附近被激发的电子与空穴被隔开, 空穴移动到 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$, 电子通过 n-Si 传递到金属电极, 该垂直结构有利于光生载流子的分离与迁移。测试表明 MXene/Si 范德华异质结构可以提供 0.34 V 的开路电压, 所组装的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{n-Si}$ 光电探测器开关比高达 10^5 (图 2(c))。近期, 本研究团队^[40]也报道了一种基于 MXene/Te 范德华异质结的近红外光电探测器, 在 1064 nm 的光照下实现了 9.51×10^7 的超高开关比。

同样地, MXenes 材料也可以与金属氧化物形成异质结^[41]。众所周知, 在含氧环境下, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 薄片可以自发氧化, 进而形成 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene/ TiO_2 复合材料。受自发氧化现象的启发, Chertopalov 等^[34]报道了一种基于部分氧化 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 薄膜的光电探测器。他们将刻蚀法制备的

图 2 MXene 基异质结型光电探测器^[32]Fig. 2 MXene based heterojunction materials for photodetector devices^[32]

(a-c) Inorganic-inorganic (MXene-Si) heterostructure; (d-f) Inorganic-organic (MXene-RNA) heterojunction

$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 单片沉积在玻璃基板上, 然后暴露在空气中部分氧化获得 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{TiO}_2$ 异质结构薄膜, 该薄膜对紫外光有很好的响应, 开关比为 1.5。最近, Yang 等^[42]提出了一种基于二维钙钛矿 $\text{CsPbBr}_3/\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 异质结构的柔性高性能可见光光电探测器, 该器件在 450 nm, 7.07 mW/mm^2 强度的光照下开关比高达 2.3×10^3 。

除了上述 MXene-无机半导体材料异质结以外, MXene 材料还可以与有机光敏材料形成无机-有机异质结^[43]。本课题组以 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 为导电电极, 有机 RAN 薄膜为活性材料, 设计了一种基于有机-无机范德华-氢键异质结构的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{RAN}$ 近红外光电探测器^[32], 如图 2(d)所示。RAN 内部存在电负性大的氮氧原子, 可以形成非共价键, 在与 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 电极相接触时, 由于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 表面的 $-\text{OH}$ 可与 RAN 形成额外的氢键来增加相互作用力, 使两部分的接触更加紧密, 从而加速电子与空穴分离, 优化和提高材料本身的性能。该有机-无机异质结的电子传输如图 2(e)所示, 当 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{RAN}$ 探测器暴露在近红外光下, 在外加电场的驱动下, RAN 产生的

光生载流子会被分离。电子将跃迁到 RAN 的 LUMO 形成激子, 而空穴将出现在 HOMO 中, 然后由探针连接的外部电路进行重组, 将光信号转换为电信号。从图 2(f)可以看出, 随着光功率密度提高, 开关比呈现上升趋势, 而且 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{RAN}$ 器件与 Au/RAN 相比, 开关比提高了 6.25 倍, 这是由于 RAN 在 2D $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 电极上呈现薄膜状, 增加了光敏材料的有效光照区域, 从而使 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x/\text{RAN}$ 的范德华异质结构具有更大的接触面积。形成的额外氢键增大了材料间作用力, 有利于电子输运, 从而减小了器件的暗电流。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene 薄膜电极与有机 RAN 薄膜材料之间接触良好, 所组装的探测器展示出良好的机械稳定性, 经 5000 次弯曲循环后光电流与暗电流均未发生明显变化。

1.2 MXene 基光电探测器

2D 材料, 如二硫化钼(MoS_2)通过控制厚度可以调控其半导体属性, 进而调控光电性能^[45-46]。一般来说, 块体 MoS_2 的间接带隙为 1.2 eV, 层内 Mo 原子夹在 S 原子之间, 与 S 原子形成共价键, 层间结合力则为较弱的范德瓦尔斯力。单层 MoS_2 为直接带隙,

带宽大于 1.8 eV, 表现出明显的半导体特性^[47]。与 MoS_2 材料类似, ReS_2 通过控制厚度也具有可调的带隙(1.55~1.28 eV), 使其广泛应用于晶体管和探测器^[48-49]。事实上, 大量研究表明许多半导体 2D 层状材料均可以通过控制层数来调控带隙, 从而拓宽在光电子领域的应用范围。MXene 材料也是一种 2D 层状材料, 本课题组^[44]研究了其带隙与表面官能团以及层数之间的关系, 如图 3 所示。图 3(a)是用十二烷基硅氧烷基团对 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 修饰的实验过程, 修饰后的材料记作 $\text{C-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 。测试不同层数材料的电导率, 结果表明随着厚度增加, 电导率逐渐增大, 这也符合厚薄膜 $\text{C-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 会呈现出金属导电性的特点。将不同厚度的 $\text{C-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 组装成柔性光电探测器(图 3(b)), 并测试其光电性能(图 3(c, d)), 结果显

示不同厚度的材料都具有相应的光响应, 尤其是对 1064 nm 的激光有着很好的响应, 响应度高达 $1.33 \times 10^4 \text{ A/W}$ 。DFT 模拟结果也表明, 随着层数增加, 材料的带隙逐渐减小, 从单层的 2.15 eV 逐步减小到 10 层的 0.49 eV。

1.3 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -RAN 图像传感器

有机薄膜材料具有厚度可控、柔韧性好、透光率高等优点, 为组装大面积柔性近红外光电探测器阵列提供了条件^[50]。同时, 有机薄膜可以对指定区域均匀覆盖, 也使得多像素图像传感成为可能。本研究团队利用 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -RAN 光电探测器, 在 $4 \text{ cm} \times 4 \text{ cm}$ 的透明 PET 衬底上制备了 1024 像素 (32×32) 的柔性图像传感器阵列^[34](图 4(a)), 该阵列器件在 $0^\circ \sim 150^\circ$ 的弯曲状态下均可稳定工作, 证明

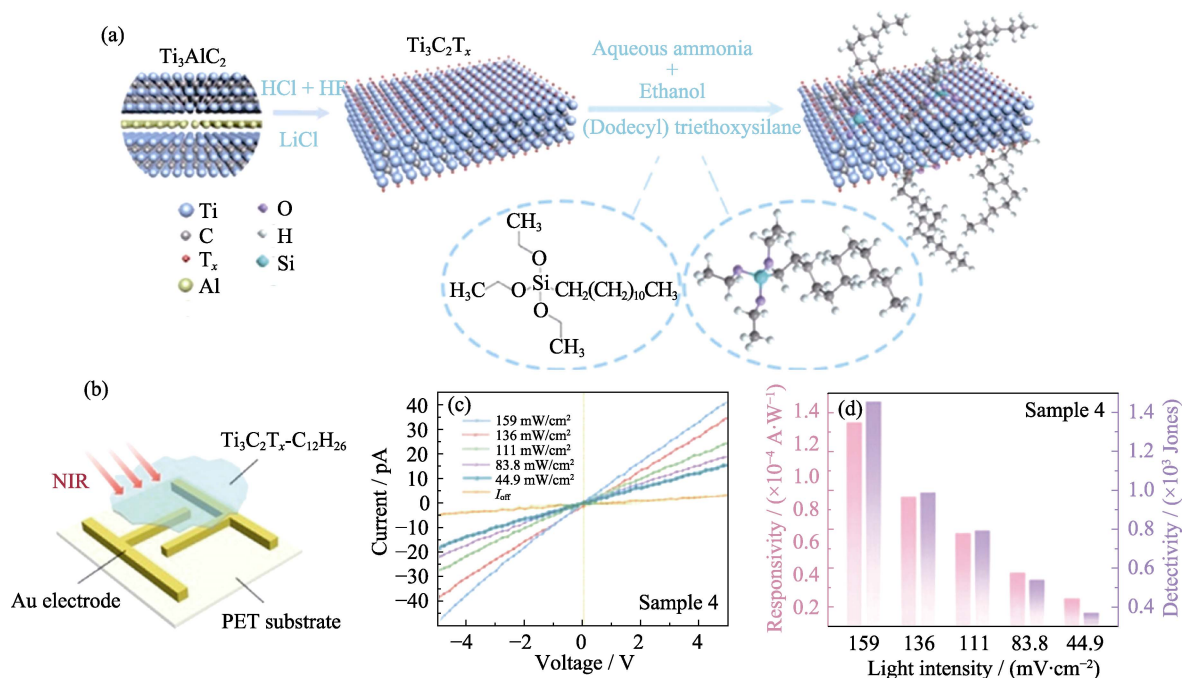


图 3 纯 MXene 基光电探测器^[44]

Fig. 3 Pure MXene based photodetector devices^[44]

- (a) Synthesis process of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$; (b) Schematic diagram of the $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x\text{-C}_{12}\text{H}_{26}$ based photodetector; (c) I - V curves of the fabricated devices; (d) Responsivity and specific detectivity of the photodetector

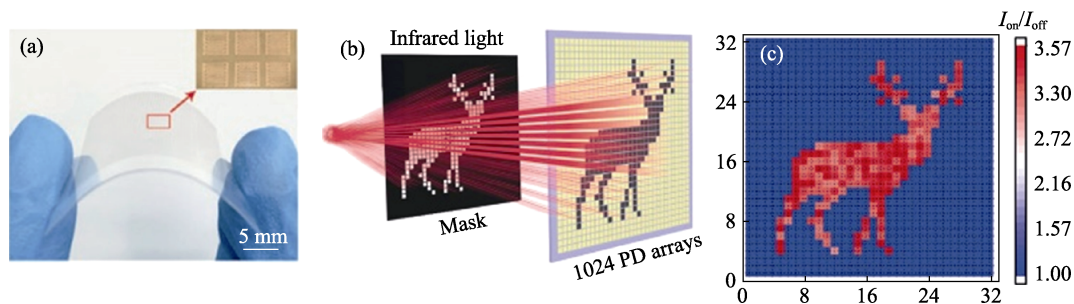


图 4 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -RAN 高像素图像传感器^[34]

Fig. 4 MXene based 1024-pixel image sensor^[34]

- (a) Optical photograph of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -RAN image sensor array; (b) Schematic diagram of multipixel image sensor imaging; (c) Deer pattern composed of 1024-pixel output by $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -RAN photodetectors

了其优异的机械稳定性。在测试过程中,将“鹿”形掩模版放置在器件阵列的一侧,入射光(1064 nm, 159 mW/cm²)从衬底背面照射。记录 0.1 V 下每个像素的光电流和暗电流,计算其开关比。除了掩模版覆盖的区域外,其余像素都对 1064 nm 的光有响应,随后用处理软件统计所得数据,包含 1024 个像素的“鹿”便呈现出来,如图 4(b, c)所示。高像素使“鹿”更加清晰,且 Ti₃C₂T_x-RAN 光电探测器优异的成像性能表明其在高像素图像传感领域具有很大的应用潜力。

2 多功能器件

2.1 MXene 基光电晶体管

近几年 2D MXenes 也在光电晶体管领域实现了应用,如图 5 所示。鉴于 Ti₃C₂ MXene 薄膜兼具单层石墨烯和金属电极的肖特基势垒调节机制, Li 等^[51]以 MXene 材料为源电极组装了垂直有机场效应光电晶体管,提升了器件的栅极调控能力,实现了 73 mV/dec 的亚阈值摆幅,接近室温下的理想值。该器件无需额外功能层,可以实现宽光谱快速响应的光探测功能,如图 5(b, c)所示。本研究团队利用苯磺酸基团改性后的 Ti₃C₂T_x(S-Ti₃C₂T_x)作为半导体层,通过在硅衬底上溅射 Al₂O₃ 作为氧化层,蒸镀制备了源、漏、栅电极(Au, 60 nm),获得了柔性 Ti₃C₂T_x 薄膜晶体管。通过对晶体管转移和传输特性曲线的分析发现,利用 S-Ti₃C₂T_x 半导体特性制备的晶体管具有一定的栅压调控功能。

2.2 透明电子器件

透明柔性电极是制备柔性光电子器件必不可少

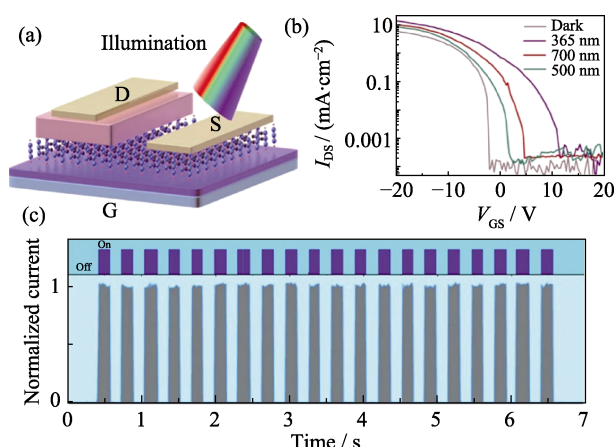


图 5 MXene 基光电晶体管^[51]

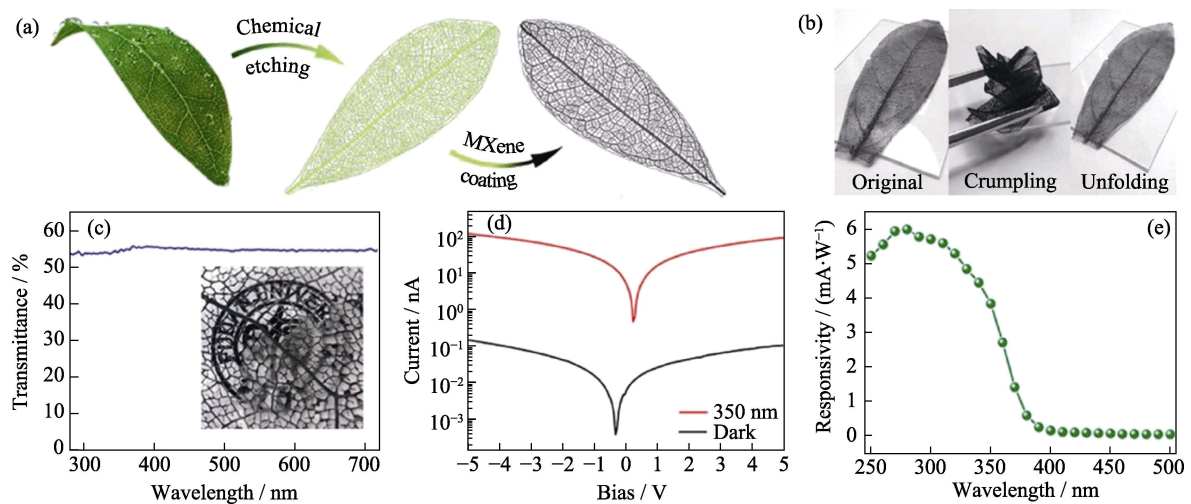
Fig. 5 MXene based photoelectric transistors^[51]

(a) Schematic process for MXene based photoelectric transistors; (b) Transfer curves of the MXene based photoelectric transistors under dark and different wavelength incident light; (c) UV response cycle test

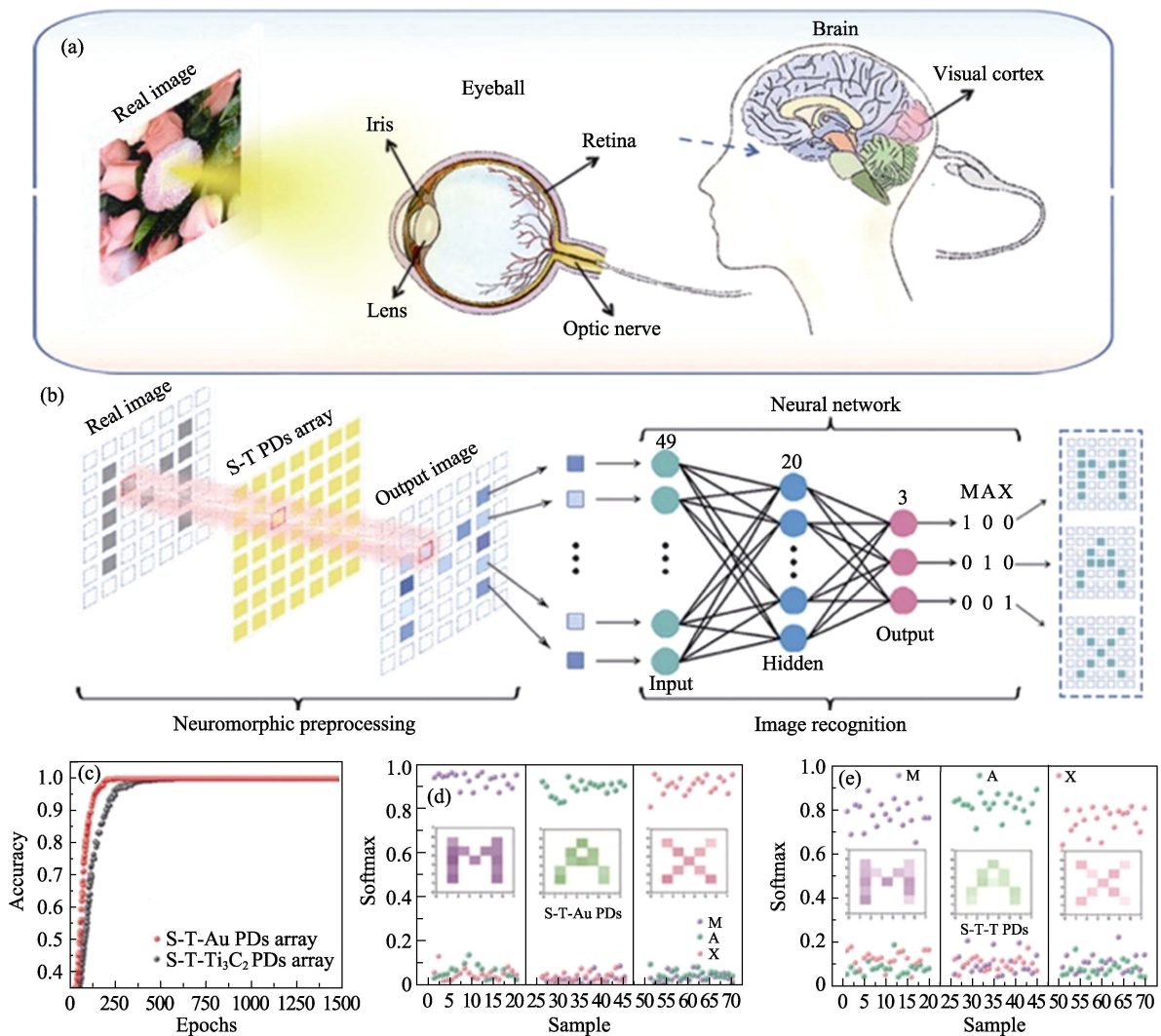
的组件之一,需要兼具高导电性来有效输送载流子以及高透光率^[52-53]。复旦大学方晓生团队^[35]提出了一种仿生透明 MXene 薄膜,将其应用于紫外光电探测器电极,透光率达 90%。图 6(a)是柔性透明 Ti₃C₂T_x 电极的制备流程图,具体地说,首先将叶肉在热碱溶液中蚀刻,然后烘干叶脉,最后在叶脉表面涂覆一层导电 Ti₃C₂T_x 浆料。制备的透明电极具有良好的机械稳定性,如图 6(b)所示。制备的透明导电电极随后用于组装柔性紫外光电探测器,在 MXene 溶剂蒸发前,把一层薄薄的电纺丝 TiO₂ 薄膜粘在两个 Ti₃C₂T_x 叶片电极上面,形成一个独立的柔性光电探测器。该器件即使 180°弯曲 1000 次后,光电流仍然保持在原始值的 90%以上。在光电测试中,两个探针分别放在两片叶电极上。制备的光电探测器透过率高达 60%(图 6(c)),组装的器件在 5 V 偏压下的开关比为 10³(图 6(d)),响应度为 6 mA/W(图 6(e))。这项工作证明了 MXene 导电电极在透明电子器件中应用的可行性,也为 MXene 在多功能电子器件的组装提供了可能。

2.3 人工神经视觉网络

近日,本研究团队通过重氮化-亲核反应,利用苯磺酸基团(-phSO₃H)对 Ti₃C₂T_x MXene 表面进行修饰,成功制备了具有半导体特性的 Ti₃C₂T_x MXene (S-Ti₃C₂T_x),打开了 Ti₃C₂T_x MXene 的带隙,并将其应用于光电探测器及人工神经视觉网络系统中^[33, 54-56],如图 7 所示。S-Ti₃C₂T_x 是通过一系列亲核反应生成的,首先磺酸在盐酸提供的酸性环境中质子化,生成的带正电荷的铵离子会吸附溶液中的亚硝酸根,得到的不稳定盐经过多次脱水形成氮烯化合物。高活性的氯化重氮盐容易脱落一个 N₂ 分子,与 C⁻ 离子形成苯磺酸的中间体。同时, Ti₃C₂T_x MXene 表面与 Ti 原子配位的每个 -OH 在酸性环境中质子化,失去一个水分子,导致 Ti₃C₂T_x MXene 产生暴露的带正电荷的 Ti 离子。而带正电荷的 Ti₃C₂T_x MXene 通过静电力吸附带负电荷的苯磺酸中间体,形成最终半导体产物 S-Ti₃C₂T_x。该工作在 S-Ti₃C₂T_x 基光电探测器的基础上设计了基于 S-Ti₃C₂T_x/Ti₃C₂T_x 和 S-Ti₃C₂T_x/Au 的柔性人工神经视觉网络,对图像实现了光电信号转换、图像学习、训练和识别功能(图 7(b))。用于图像识别的柔性视觉传感-神经形态系统的识别率大于 0.99(图 7(c)),在生物视觉模拟和仿生眼领域具有巨大的应用潜力^[57-59]。其中,以 S-Ti₃C₂T_x 为光敏材料、未修饰的 Ti₃C₂T_x 为导电电极制备的“全 Ti₃C₂T_x MXene”柔性图像传感器显示出与传统 S-Ti₃C₂T_x/Au 相当的模式识别能

图 6 MXene 基透明电子器件^[35]Fig. 6 MXene based transparent photodetector^[35]

(a) Schematic of synthesis process of leaf-based MXene electrodes; (b) Optical photograph of the leaf-based MXene electrodes under deformations; (c) Transmittance of the leaf-based MXene photodetector; (d) I - V curves and (e) responsivity of the MXene photodetector

图 7 MXene 基柔性人工神经视觉网络^[33]Fig. 7 Pure MXene based flexible artificial neural network^[33]

(a) Schematic diagram of human visual recognition system; (b) Schematic diagram of artificial neural network using image sensor array for image recognition; (c) Comparison of recognition rates of two kinds of artificial neural vision network; (d) Recognition probability maps of three letters; (e) The resulted recognition probability diagram

力(图 7(d, e)), 凸显高性能全 MXene 器件应用于下一代透明电子器件和柔性/可拉伸电子器件的可能性, 并显示出其在未来视觉设备的巨大应用潜力。

3 展望

目前, MXenes 材料已成为柔性光电子领域最受关注的热点材料之一, 其半导体性质在理论计算与器件性能方面都得到了初步验证。MXenes 基光电探测器件、光电晶体管器件、透明光电器件以及集成光电子器件均有报道, 并且在成像、仿生电子、人工视觉神经网络系统中实现了应用。但是相关研究工作还存在诸多挑战和需要改进的地方。

1) MXene 材料的金属/半导体性能调控方面。虽然, DFT 理论计算表明 Sc_2C , Ti_2C , Zr_2C , Hf_2C 等材料可以通过改变表面基团数量与种类来调控其半导体性质, 但是尚未组装成柔性光电探测器器件并通过实验测试直接证明其半导体性质。已经有相关的实验证明通过嫁接新的官能团, 可以获得不同种类、不同带隙宽度的改性 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene, 但是这些工作中敏感材料都是 MXene 薄膜, 如何制备大尺寸的单片 MXene 材料进而制备单片 MXene 柔性光电子器件, 并且通过实验直观证明单片 MXene 材料的半导体性质仍然具有挑战性。

2) MXene 基可形变光电子器件方面。除了可弯曲形变的柔性光电器件以外, 可拉伸光电探测器是未来光电子器件的发展趋势。如何通过 MXenes 材料微米尺度的可操作性与结构可设计性来实现拉伸状态下的高稳定性也是需要考虑的问题之一。另一方面, 开发适用于 MXenes 材料的改良模板法、预拉伸法等工艺或者新方法实现大尺度大规模可拉伸 MXenes 薄膜也是制备 MXenes 基可拉伸光电子器件的途径之一。

3) MXene 材料理论研究方面。目前理论研究 MXene 材料大多基于多层 MXene 材料或者薄膜 MXene 材料, 需要加强对 MXene 单片材料的理论研究, 并结合先进的 TEM 原位表征技术来解析 MXene 材料的半导体性质。除此之外, 多层 MXene 材料片层之间的简单堆垛, 或者可控有角度堆垛, 层数的数量是否会对材料的光电性能或半导体性能有影响尚不清楚, 通过理论来做出相应预测对实验研究的方向将具有重大指导意义;

4) 多元化 MXene 基光电探测器方面。目前柔性光电子器件领域研究的 MXene 材料主要是单一的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene, 其中绝大多数光电子器件只利用到 MXene 材料的高导电性, 其半导体性质的应用较

少。如何在柔性光电子器件的组装中发挥 MXene 材料的可控半导体性质对于发展 MXene 光电子器件学非常重要。此外, MXene 材料家族中材料种类繁多, 很多都被预测具有本征半导体性能。因此, 其他种类的 MXene 材料在光电子领域的应用可能性同样值得被挖掘。

综上所述, MXene 材料在柔性光电子领域的研究还处于前沿阶段, 随着 MXene 材料不同合成方法的出现以及器件加工工艺的不断完善, 以及对 MXene 材料电学性质与半导体性质的不断深入挖掘, MXene 材料在制备光电子器件中会发挥越来越重要的作用, 应用形式也会不断扩展, 进而发展成为特色 MXene 电子器件学。

参考文献:

- [1] DU J, XIE D, ZHANG Q, *et al.* A robust neuromorphic vision sensor with optical control of ferroelectric switching. *Nano Energy*, 2021, **89**: 106439.
- [2] DUAN Z, HU C, LIU W, *et al.* An all-MXene-based flexible, seamless system with integrated wireless charging coil, micro-supercapacitor, and photodetector. *Advanced Materials Technologies*, 2023, **8(15)**: 2300157.
- [3] GU L, PODDAR S, LIN Y, *et al.* A biomimetic eye with a hemispherical perovskite nanowire array retina. *Nature*, 2020, **581(7808)**: 278.
- [4] GU L, TAVAKOLI M M, ZHANG D, *et al.* 3D arrays of 1024-pixel image sensors based on lead halide perovskite nanowires. *Advanced Materials*, 2016, **28(44)**: 9713.
- [5] HOSSAIN M, KUMAR G S, PRABHAVA S N B, *et al.* Transparent, flexible silicon nanostructured wire networks with seamless junctions for high-performance photodetector applications. *ACS Nano*, 2018, **12(5)**: 4727.
- [6] LI L D, GU L L, LOU Z, *et al.* ZnO quantum dot decorated Zn_2SnO_4 nanowire heterojunction photodetectors with drastic performance enhancement and flexible ultraviolet image sensors. *ACS Nano*, 2017, **11(4)**: 4067.
- [7] LI L, YE S, QU J, *et al.* Recent advances in perovskite photodetectors for image sensing. *Small*, 2021, **17(18)**: e2005606.
- [8] LI Q, VAN DE GROEP J, WANG Y, *et al.* Transparent multispectral photodetectors mimicking the human visual system. *Nature Communications*, 2019, **10**: 4982.
- [9] LIEN M B, LIU C H, CHUN I Y, *et al.* Ranging and light field imaging with transparent photodetectors. *Nature Photonics*, 2020, **14(3)**: 143.
- [10] LI L, LOU Z, SHEN G. Flexible broadband image sensors with SnS quantum dots/ Zn_2SnO_4 nanowires hybrid nanostructures. *Advanced Functional Materials*, 2018, **28(6)**: 1705389.
- [11] LI H, DONG Z, ZHANG Y, *et al.* Recent progress and strategies in photodetectors based on 2D inorganic/organic heterostructures. *2D Materials*, 2020, **8(1)**: 012001.
- [12] LI L, HU C, SHEN G. Low-dimensional nanostructure based flexible photodetectors: device configuration, functional design, integration, and applications. *Accounts of Materials Research*, 2021, **2(10)**: 954.
- [13] LV L, DANG W, WU X X, *et al.* Flexible short-wave infrared

- image sensors enabled by high-performance polymeric photodetectors. *Macromolecules*, 2020, **53**(23): 10636.
- [14] LI L, CHEN D, SHEN G. All-Ti₃C₂T_x MXene based flexible on-chip microsupercapacitor array. *Chemical Research in Chinese Universities*, 2020, **36**(4): 694.
- [15] WANG P, LIU S, LUO W, *et al.* Arrayed van der Waals broadband detectors for dual-band detection. *Advanced Materials*, 2017, **29**(16): 1604439.
- [16] LI L, FU X, CHEN S, *et al.* Hydrophobic and stable MXene-polymer pressure sensors for wearable electronics. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2020, **12**(13): 15362.
- [17] SHI B, LI L, CHEN A, *et al.* Continuous fabrication of Ti₃C₂T_x MXene-based braided coaxial zinc-ion hybrid supercapacitors with improved performance. *Nanomicro Letter*, 2021, **14**(1): 34.
- [18] XU X, LI L, LIU W, *et al.* Thermally chargeable supercapacitor with 3D Ti₃C₂T_x MXene hollow sphere based freestanding electrodes. *Advanced Materials Interfaces*, 2022, **9**(24): 2201165.
- [19] QING H, CHENXU W, SHUANG Z, *et al.* Progress in structural tailoring and properties of ternary layered materials. *Journal of Inorganic Materials*, 2023, **38**(8): 845.
- [20] LI L, LIU W, JIANG K, *et al.* In-situ annealed Ti₃C₂T_x MXene based all-solid-state flexible Zn-ion hybrid micro supercapacitor array with enhanced stability. *Nanomicro Letter*, 2021, **13**(1): 100.
- [21] LIU W, LI L, SHEN G. A Ti₃C₂T_x MXene cathode and redox-active electrolyte based flexible Zn-ion microsupercapacitor for integrated pressure sensing application. *Nanoscale*, 2023, **15**(6): 2624.
- [22] DU Z, LIU W, LIU J, *et al.* A thermally chargeable supercapacitor based on the g-C₃N₄-Doped PAMPS/PAA hydrogel solid electrolyte and 2D MOF@Ti₃C₂T_x MXene heterostructure composite electrode. *Advanced Materials Interfaces*, 2023, <https://doi.org/10.1002/admi.202300266>.
- [23] LIU W, LI L, HU C, *et al.* Intercalation of small organic molecules into Ti₃C₂T_x mxene cathodes for flexible high-volume-capacitance Zn-ion microsupercapacitor. *Advanced Materials Technologies*, 2022, **7**(12): 2200158.
- [24] SHI B, CHEN L, JEN T C, *et al.* Vertical arrangement of Ti₂CT_x MXene nanosheets on carbon fibers for high-performance and flexible Zn-ion supercapacitors. *ACS Applied Nano Materials*, 2022, **6**(1): 315.
- [25] MATHIS T S, MALESKI K, GOAD A, *et al.* Modified MAX phase synthesis for environmentally stable and highly conductive Ti₃C₂ MXene. *ACS Nano*, 2021, **15**(4): 6420.
- [26] XU H, REN A, WU J, *et al.* Recent advances in 2D MXenes for photodetection. *Advanced Functional Materials*, 2020, **30**(24): 2000907.
- [27] HART J L, HANTANASIRISAKUL K, LANG A C, *et al.* Control of MXenes' electronic properties through termination and intercalation. *Nature Communications*, 2019, **10**: 522.
- [28] HANTANASIRISAKUL K, GOGOTSI Y. Electronic and optical properties of 2D transition metal carbides and nitrides (MXenes). *Advanced Materials*, 2018, **30**(52): e1804779.
- [29] JEON J, CHOI H, CHOI S, *et al.* Transition-metal-carbide (Mo₂C) multiperiod gratings for realization of high-sensitivity and broad-spectrum photodetection. *Advanced Functional Materials*, 2019, **29**(48): 1905384.
- [30] JIANG X, LIU S, LIANG W, *et al.* Broadband nonlinear photonics in few-layer MXene Ti₃C₂T_x (T = F, O, or OH). *Laser & Photonics Reviews*, 2018, **12**(2): 1700229.
- [31] VELUSAMY D B, EL-DEMELLAWI J K, EL-ZOHRY A M, *et al.* MXenes for plasmonic photodetection. *Advanced Materials*, 2019, **31**(32): e1807658.
- [32] HU C, CHEN H, LI L, *et al.* Ti₃C₂T_x MXene-RAN van der Waals heterostructure-based flexible transparent NIR photodetector array for 1024 pixel image sensing application. *Advanced Materials Technologies*, 2022, **7**(7): 2101639.
- [33] HU C, WEI Z, LI L, *et al.* Strategy toward semiconducting Ti₃C₂T_x-MXene: phenylsulfonic acid groups modified Ti₃C₂T_x as photosensitive material for flexible visual sensory-neuromorphic system. *Advanced Functional Materials*, 2023, <https://doi.org/10.1002/adfm.202302188>.
- [34] CHERTOPALOV S, MOCHALIN V N. Environment-sensitive photoresponse of spontaneously partially oxidized Ti₃C₂ MXene thin films. *ACS Nano*, 2018, **12**(6): 6109.
- [35] CHEN J, LI Z, NI F, *et al.* Bio-inspired transparent MXene electrodes for flexible UV photodetectors. *Materials Horizons*, 2020, **7**(7): 1828.
- [36] LIU Y Y, XIAO H, GODDARD W A. Schottky-barrier-free contacts with two-dimensional semiconductors by surface-engineered MXenes. *Journal of the American Chemical Society*, 2016, **138**(49): 15853.
- [37] MONTAZERI K, CURRIE M, VERGER L, *et al.* Beyond gold: spin-coated Ti₃C₂-based MXene photodetectors. *Advanced Materials*, 2019, **31**(43): e1903271.
- [38] SONG W, CHEN J, LI Z, *et al.* Self-powered MXene/GaN van der Waals heterojunction ultraviolet photodiodes with superhigh efficiency and stable current outputs. *Advanced Materials*, 2021, **33**(27): e2101059.
- [39] KANG Z, MA Y, TAN X, *et al.* MXene-silicon van der Waals heterostructures for high-speed self-driven photodetectors. *Advanced Electronic Materials*, 2017, **3**(9): 1700165.
- [40] HU C, LI L, SHEN G. Flexible Transparent near-infrared photodetector based on 2D Ti₃C₂ MXene-Te van der Waal heterostructures. *Chinese Journal of Chemistry*, 2021, **39**(8): 2141.
- [41] XU R X, MIN L L, QI Z M, *et al.* Perovskite transparent conducting oxide for the design of a transparent, flexible, and self-powered perovskite photodetector. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2020, **12**(14): 16462.
- [42] DENG W, HUANG H, JIN H, *et al.* All-sprayed-processable, large-area, and flexible perovskite/mxene-based photodetector arrays for photocommunication. *Advanced Optical Materials*, 2019, **7**(6): 1801521.
- [43] ABDEL-KHALEK H, EL-SAMAHI M I, EL SALAM M A, *et al.* Fabrication and performance evaluation of ultraviolet photodetector based on organic/inorganic heterojunction. *Current Applied Physics*, 2018, **18**(12): 1496.
- [44] HU C, DU Z, WEI Z, *et al.* Functionalized Ti₃C₂T_x MXene with layer-dependent band gap for flexible NIR photodetectors. *Applied Physics Reviews* 2023, **10**(2): 021402.
- [45] HUANG F, LI J, XU Z, *et al.* A bilayer 2D-WS₂/organic-based heterojunction for high-performance photodetectors. *Nanomaterials*, 2019, **9**(9): 1312.
- [46] PYO S, KIM W, JUNG H I, *et al.* Heterogeneous integration of carbon-nanotube-graphene for high-performance, flexible, and transparent photodetectors. *Small*, 2017, **13**(27): 1700918.
- [47] DUMCENCO D, OVCHINNIKOV D, MARINOV K, *et al.* Large-area epitaxial monolayer MoS₂. *ACS Nano*, 2015, **9**(4): 4611.
- [48] TAO J J, JIANG J, ZHAO S N, *et al.* Fabrication of 1D Te/2D ReS₂ mixed-dimensional van der Waals p-n heterojunction for high-performance phototransistor. *ACS Nano*, 2021, **15**(2): 3241.
- [49] THAKAR K, MUKHERJEE B, GROVER S, *et al.* Multilayer ReS₂ photodetectors with gate tunability for high responsivity and high-speed applications. *ACS Applied Materials Interfaces*, 2018,

- 10(42):** 36512.
- [50] NOH Y Y, KIM D Y, YASE K. Highly sensitive thin-film organic phototransistors: effect of wavelength of light source on device performance. *Journal of Applied Physics*, 2005, **98(7)**: 074505.
- [51] LI E, GAO C, YU R, *et al.* MXene based saturation organic vertical photoelectric transistors with low subthreshold swing. *Nature Communications*, 2022, **13**: 2898.
- [52] MARIANO M, MASHTALIR O, ANTONIO F Q, *et al.* Solution-processed titanium carbide MXene films examined as highly transparent conductors. *Nanoscale*, 2016, **8(36)**: 16371.
- [53] YOON J, BAE G Y, YOO S, *et al.* Deep-ultraviolet sensing characteristics of transparent and flexible IGZO thin film transistors. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, **817**: 152788.
- [54] KIM S H, BAEK G W, YOON J, *et al.* A bioinspired stretchable sensory-neuromorphic system. *Advanced Materials*, 2021, **33(44)**: e2104690.
- [55] RAN W, WANG L, ZHAO S, *et al.* An integrated flexible all-nano-wire infrared sensing system with record photosensitivity. *Advanced Materials*, 2020, **32(16)**: e1908419.
- [56] WANG S, CHEN X, HUANG X, *et al.* Neuromorphic engineering for hardware computational acceleration and biomimetic perception motion integration. *Advanced Intelligent Systems*, 2020, **2(11)**: 2000124.
- [57] HU Z Y, ZHANG Y L, PAN C, *et al.* Miniature optoelectronic compound eye camera. *Nature Communications*, 2022, **13**: 5634.
- [58] TANG J, YUAN F, SHEN X, *et al.* Bridging biological and artificial neural networks with emerging neuromorphic devices: fundamentals, progress, and challenges. *Advanced Materials*, 2019, **31(49)**: e1902761.
- [59] ZHU Q B, LI B, YANG D D, *et al.* A flexible ultrasensitive optoelectronic sensor array for neuromorphic vision systems. *Nature Communications*, 2021, **12**: 1798.