

MXene在柔性压力传感器中的应用研究进展

赵粉霞¹, 侯淑萍^{1*}, 王 岩¹, 苏晓勤¹, 赵晓倩²

¹天津商业大学信息工程学院, 天津

²天津市朗尼科技发展有限公司, 天津

收稿日期: 2026年6月3日; 录用日期: 2026年7月3日; 发布日期: 2026年7月15日

摘 要

柔性压力传感器是电子皮肤的核心组件, MXene凭借其独特的理化优势, 在高性能传感器构建中展现出巨大潜力。本文系统阐述了MXene基柔性压力传感器的传感机制, 重点归纳了通过微纳结构优化、界面工程及表面功能化提升传感器灵敏度与稳定性的策略。同时, 探讨了利用MXene优异的分散性与其他材料多元复合, 构建多功能集成传感器的进展; 并介绍了三维激光直写光刻技术在突破微纳结构加工瓶颈、实现传感器规模化制造方面的最新应用。最后, 本文剖析了MXene在无氟绿色合成及长效抗氧化方面面临的挑战, 旨在为其从实验室走向商业化应用提供参考。

关键词

MXene, 柔性压力传感器, 电子皮肤, 灵敏度, 规模化制造

Research Progress on the Application of MXene in Flexible Pressure Sensors

Fenxia Zhao¹, Shuping Hou^{1*}, Yan Wang¹, Xiaoqin Su¹, Xiaoqian Zhao²

¹School of Information Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin

²Tianjin Lonnie Technology Development Co., Ltd., Tianjin

Received: June 3, 2026; accepted: July 3, 2026; published: July 15, 2026

Abstract

Flexible pressure sensors are the core components of electronic skin, and MXene has shown tremendous potential in constructing high-performance sensors owing to its unique physicochemical advantages. This review systematically elaborates on the sensing mechanisms of MXene-based flexible pressure sensors, with a focus on summarizing strategies to enhance sensitivity and stability

*通讯作者。

文章引用: 赵粉霞, 侯淑萍, 王岩, 苏晓勤, 赵晓倩. MXene在柔性压力传感器中的应用研究进展[J]. 传感器技术与应用, 2026, 14(4): 678-687. DOI: 10.12677/jsta.2026.144066

through micro/nanostructure optimization, interface engineering, and surface functionalization. Additionally, it explores the progress in constructing multifunctional integrated sensors by leveraging the excellent dispersibility of MXene for multi-component hybridization with other materials, and introduces the latest application of three-dimensional direct laser writing lithography in overcoming micro/nanostructure fabrication bottlenecks and achieving scalable manufacturing. Finally, this paper analyzes the challenges facing MXene in fluorine-free green synthesis and long-term anti-oxidation, aiming to provide references for its transition from the laboratory to commercial applications.

Keywords

MXene, Flexible Pressure Sensor, Electronic Skin, Sensitivity, Scalable Manufacturing

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

皮肤作为人体感知系统的核心，密布数百万个神经末梢，能够精准感知触摸、压力、痛觉及温度，从而实现机体与外部环境的交互[1][2]。近年来，随着健康监测、人机交互及机器感知等领域的快速发展，模仿人类皮肤功能的“电子皮肤”应运而生[3]。“电子皮肤”集成了传感、信号处理与数据传输等前沿技术，可将温度、湿度、压力和振动等多维外界刺激转化为电信号，赋予设备实时的环境感知能力。在电子皮肤的众多组件中，柔性压力传感器凭借出色的柔韧性与高灵敏度，成为不可或缺的核心器件[4]，广泛应用于医疗、机器人及航空航天等领域[5]。

柔性压力传感器能够将外界压力转换为电信号，其工作机制主要分为压阻式、电容式、压电式和摩擦电式四种[6]。其中，压阻式与电容式传感器通过监测外力引起的阻值或电容值变化来实现压力测量，特别适用于静态力的精确检测[7]；而压电式与摩擦电式传感器则通过捕捉压力动态作用产生的电压信号进行测量，更适用于动态力的监测[8]。

在结构上，柔性压力传感器主要由柔性衬底、电极层和敏感层三部分组成[9]。其中，敏感层材料是决定传感器性能的关键。近年来，石墨烯、黑磷、二硫化钼等二维材料在敏感层中备受关注[10]，但它们在应用中均面临瓶颈：石墨烯水溶性差，黑磷化学性质活泼易降解，二硫化钼的制备工艺则难以满足大规模生产需求。相比之下，MXene 不仅克服了上述局限，兼具良好的水溶性与可加工性，更具备可调节的表面官能团、高导电性、优异的机械性能及可调层间距等综合优势[11]。这些特性使 MXene 在构建高性能柔性压力传感器方面表现出无可比拟的潜力与显著优势。

2. MXene 材料及工作机制

2011 年，美国德雷克塞尔大学 Yury Gogotsi 团队利用 HF 刻蚀 MAX 相中的 A 原子层，制备出具有手风琴状结构的新型二维材料——MXene [12]。这种独特的层状结构使 MXene 具备了良好的导电性和柔韧性。通过调整刻蚀工艺，可以有效引入不同的表面终止基团，进而对材料的微观结构和电学性能进行调控。基于这些结构特点，MXene 在柔性压力传感器领域引起了广泛关注。

在压力传感器中，MXene 主要通过压阻效应感知外力，即利用电阻变化反映压力大小。受压时，MXene 的微观形变主要从两方面引起电阻改变：一是层间距缩小和微结构形变改变了电子的传输路径；二是晶

格应变影响了载流子的迁移率,导致电阻率发生变化。此外, MXene 可加工成柔性薄膜并与基底集成,这种结构能够很好地贴合各类曲面,并将外力有效地传递到敏感层,保证信号的稳定输出。

MXene 依靠自身结构带来的导电优势以及与柔性器件的良好兼容性,通过压阻效应实现了高灵敏度的力电转换,在电子皮肤、医疗监测和工业自动化等场景中具有切实的应用价值。

3. 基于 MXene 的压力传感器

近年来,柔性压力传感器在力学柔顺性与可拉伸构型方面取得了长足进步,但其向实用化迈进的过程中仍面临诸多核心性能瓶颈。首要难题在于灵敏度与稳定性之间的固有制约:高灵敏度往往依赖微纳结构的极致化设计,但这易导致材料在持续循环载荷下发生结构疲劳或界面滑移,进而造成性能衰减;反之,注重机械稳定性的设计又常以牺牲检测下限与响应精度为代价。其次,多功能一体化集成仍具挑战,复杂工况不仅要求器件具备压力感知能力,还需同步实现温度、湿度及多轴应力等多模态信号的精准捕获,而当前多模态信号间的串扰与解耦难题尚未彻底解决。此外,现有高性能器件的制备多依赖复杂且高精度的微加工工艺,难以兼顾批次一致性与低成本量产,严重制约了其规模化应用。基于此,研究者们聚焦底层材料功能化修饰与顶层器件工艺创新,正开展系统性探索,力求从根本上突破上述技术壁垒。

3.1. 灵敏度和稳定性的提升

在压阻式柔性传感器中,提升 MXene 的灵敏度和稳定性主要依赖于结构工程、界面调控与表面功能化等策略,旨在打破高灵敏与长稳定之间的制约。结构工程通过构筑微纳多孔网络,将微小压力放大为显著的导电通路变化以提升灵敏度,同时利用骨架支撑缓冲应力防塌陷;界面调控侧重于构建物理互锁或化学键合,增强 MXene 与基底的结合力,防止受力滑移脱落;表面功能化则借助表面端基修饰优化应力传递并抑制氧化。三者协同,既增强了对微小压力的响应,又构筑了稳固的力电屏障,从而维持长效性能。

针对气凝胶在循环压力下因骨架刚度不足而易发生不可逆形变的问题,华中科技大学团队[13]提出了一种多物理网络构建策略。他们通过静电自组装、冷冻干燥与退火工艺,将 MXene/rGO 气凝胶原位填充至柔性的聚氨酯(PU)海绵中,研发出 MGP 压阻海绵(图 1)。在此结构中,PU 海绵的宏观弹性骨架作为限域支撑层,有效分担了循环应力并防止了内部气凝胶的坍塌;而 MXene/rGO 气凝胶则提供了丰富的微纳导电通路。这种“宏观包裹-微观导电”的协同机制,使器件在实现高灵敏度(224 kPa^{-1} ,可检测 21 mg 的米粒)的同时,确保了超过 15,000 次的循环稳定性与快速响应能力。

针对 MXene 与柔性衬底界面附着力弱、难以兼顾高灵敏与宽量程的痛点,西安工程大学团队[14]结合斑马竹芋模板二次压印与纳米纤维素诱导自组装技术,制备了具有微阵列与插层双重结构的 MBP 传感薄膜(图 2)。其中,表面微阵列结构有利于放大初始接触电阻的变化以提升灵敏度,而内部插层结构则通过分级形变拓宽了压力响应范围。更为关键的是, MXene 与细菌纤维素通过氢键形成的互锁界面,显著增强了层间结合力,有效抑制了受力时活性层的破损与滑移脱落,从而在保障高灵敏与宽量程的同时大幅提升了循环稳定性,实现了对人体全范围运动信号的无线实时监测。

在界面微结构设计方面,中科院上海硅酸盐研究所团队[15]受石版印刷启发,提出原位转印策略(LIPIT)(图 3)。该技术不仅将纸张的微观形貌精准复刻至薄膜表面,还通过控制油墨印刷图案和次数,制备出具有脊-谷表面微结构的 MXene/油墨薄膜,实现了表面形貌与导电网络的梯度调控。这种梯度结构使薄膜在受压时呈现逐级形变与接触,有效避免了常规结构的响应饱和,从而显著拓宽了传感器的线性范围与灵敏度。此外, LIPIT 技术具有快速、低成本、可扩展的优势,为定制化 MXene 薄膜提供了便捷平台。

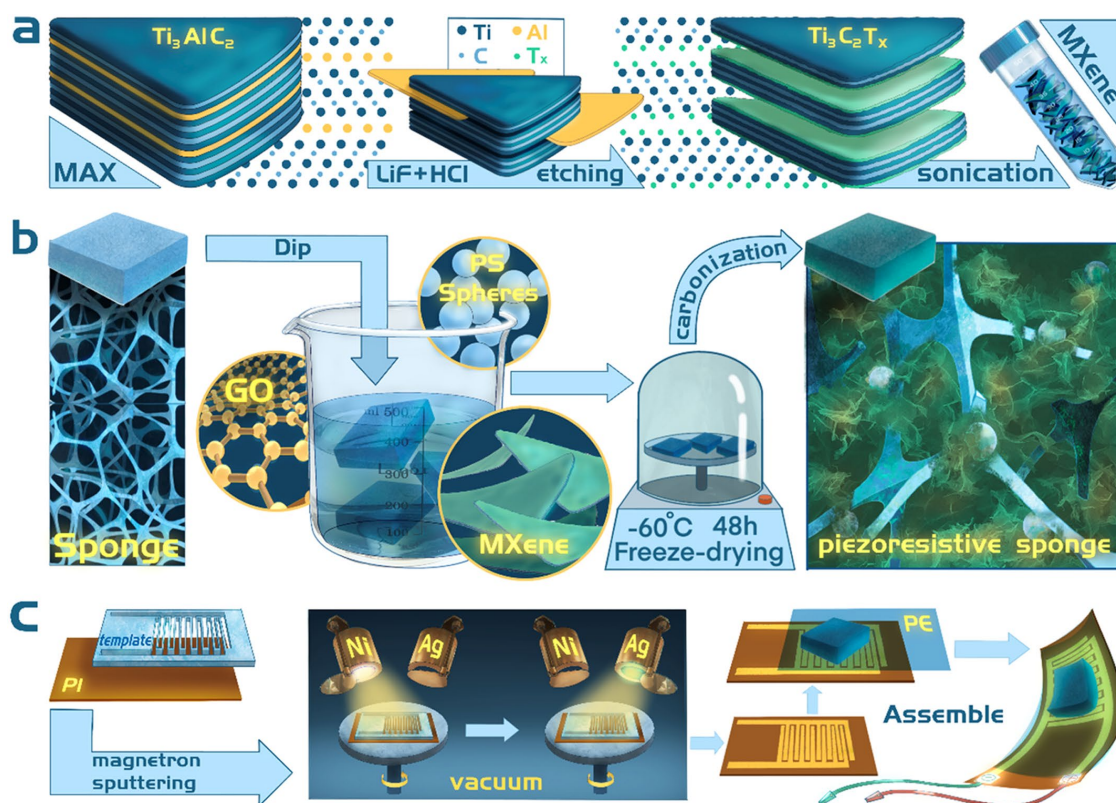


Figure 1. Illustrations of the preparation process of MGP-sponge sensor [13]

图 1. MGP 海绵传感器制备过程示意图[13]

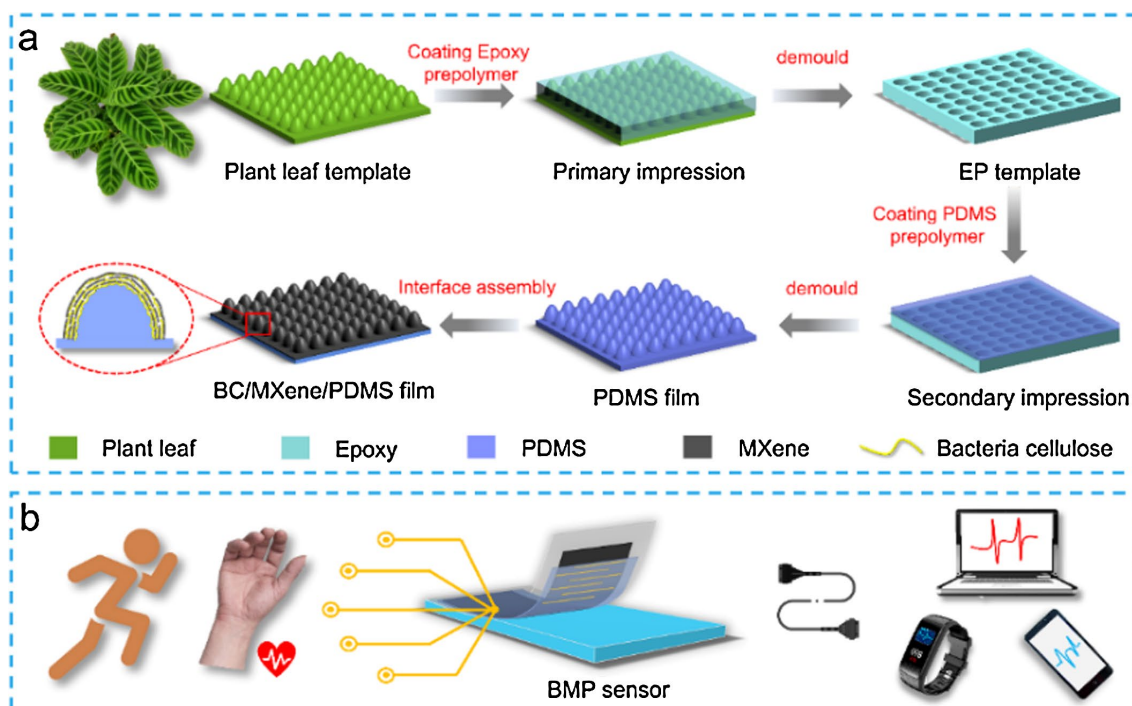


Figure 2. Fabrication procedure of the secondary surficial microstructure MBP film [14]

图 2. 表面二级微结构的 MBP 传感薄膜的制备过程示意图[14]

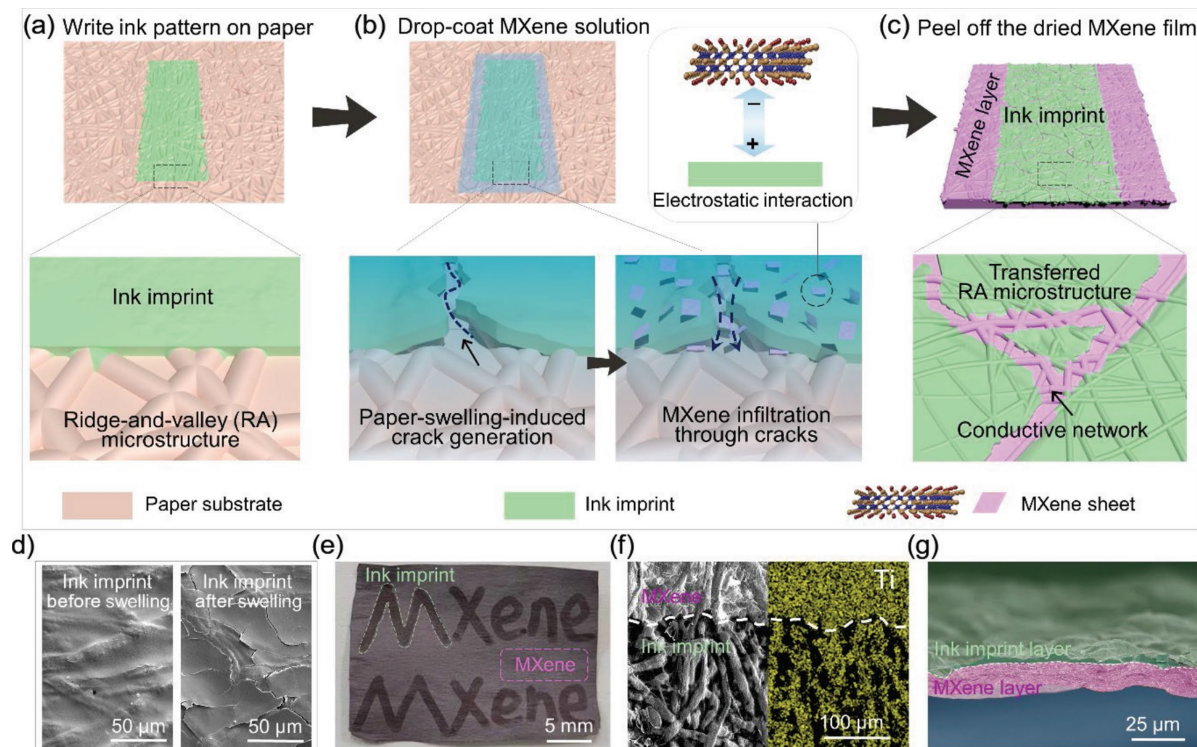


Figure 3. The LIPIT strategy for MIFs design [15]

图 3. MIFs 的 LIPIT 设计策略[15]

为实现宽量程与高灵敏的兼得,陕西科技大学团队[16]受人体皮肤与肌肉结构启发,研发了可辨识面内应变、法向压力及剪切力的多维传感器(图4)。该器件由两个压力不敏感的各向异性 AMSPP 应变子传感器与一个应变不敏感的 ZAGW 压力子传感器正交堆叠而成。这种正交解耦设计巧妙消除了多轴向机械信号间的相互干扰,确保了各子传感器仅对单一轴向的机械刺激产生独立响应,从而在保证单一维度高灵敏检测的同时拓宽了整体量程,实现了对复杂多向力的精确监测,在机械手、运动指导及假肢触觉感知领域极具应用价值。

综上,上述研究从多维度系统提出了破解灵敏度与稳定性制约的方案。宏观层面,引入柔性骨架限域包裹气凝胶,有效抑制了受压时的不可逆形变与结构坍塌;微观层面,借助氢键等作用构建界面互锁网络,避免了活性层在循环受力下的滑移与脱落;表面结构层面,构筑脊-谷梯度微结构,使接触电阻随压力呈连续分级变化,从而显著拓宽了传感线性范围;器件架构层面,采用正交堆叠解耦设计,确保各子单元仅对单一轴向应力响应,消除了多向力间的串扰。这些从微观界面到宏观架构的多尺度结构工程策略,不仅有效突破了高灵敏与高稳定难以兼得的技术瓶颈,亦为柔性传感器在复杂力学环境下的可靠应用奠定了坚实的结构基础。

3.2. 多功能一体化

得益于优异的分散性与丰富的表面端基, MXene 极易与其他功能材料(如气敏、热敏材料)实现均匀复合与界面融合。这种多组分协同不仅保留了 MXene 原有的压阻特性, 更跨尺度引入了新的物理响应机制, 从而打破单一传感限制, 打造出多功能一体化的压力传感器。

吉林大学团队[17]利用超声喷雾热解技术制备了三维多孔 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 褶皱球作为传感层, 结合 PVA 衬底与 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 电极, 开发出环保型瞬态全 MXene 传感器(图 5)。其中, 多孔褶皱球结构为气体吸附与压力

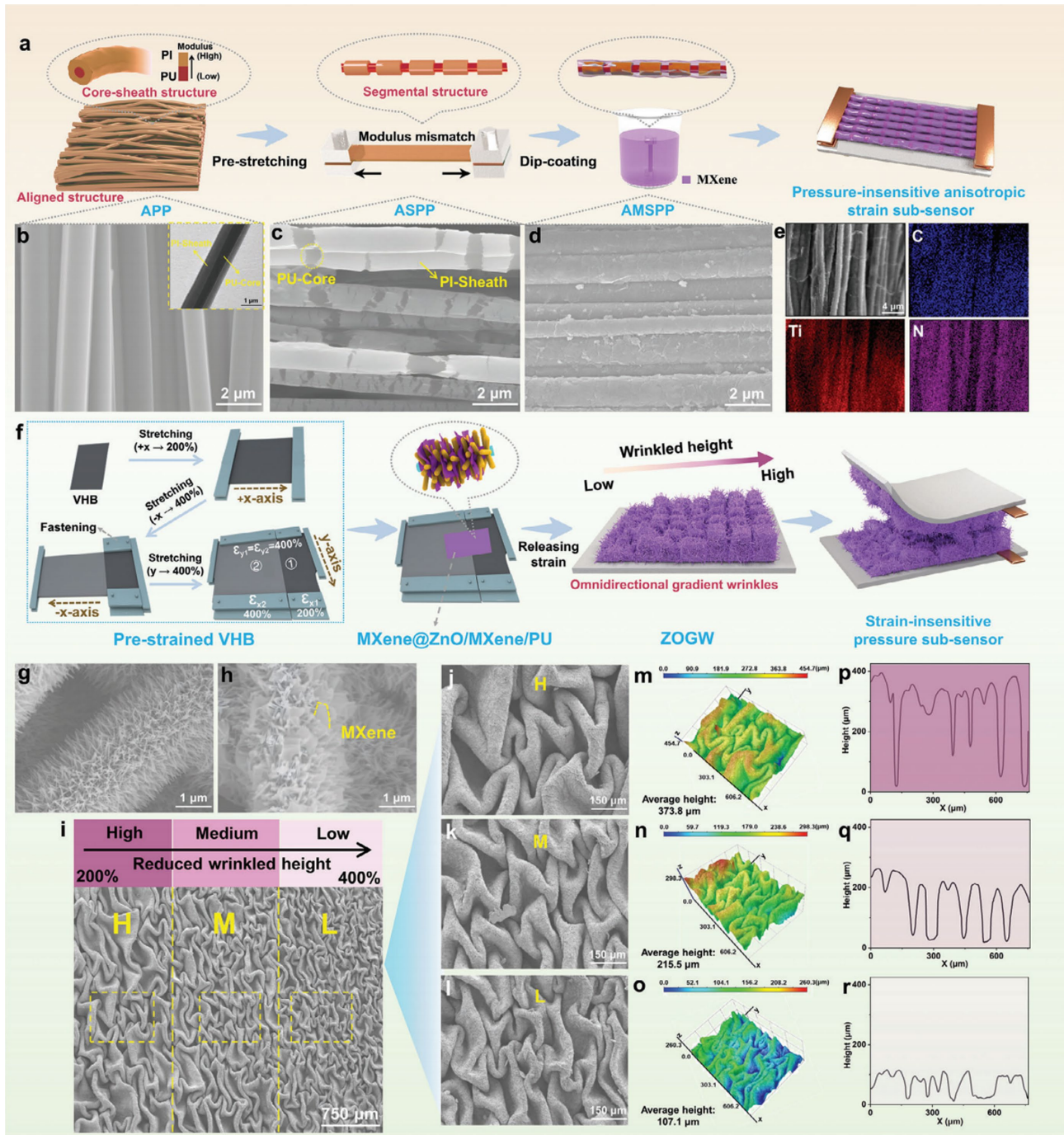


Figure 4. Fabrication and characterizations of the multidimensional sensor [16]

图 4. 多维传感器的制备与表征[16]

形变提供了丰富的活性位点与接触空间。该器件不仅能实现 ppb 级 NO_2 的高选择性气体检测，还具备 0.14~22.22 kPa 的宽线性压力传感范围及 34 ms 快速响应，成功实现了气敏与压阻的双模态协同感知。更重要的是，得益于全组分可降解特性，该传感器可在医用级 H_2O_2 中 6 小时内可控降解，为绿色可降解多功能电子器件提供了新思路。

针对柔性传感器难以区分弯曲、压力和拉伸等复杂机械信号的问题，中科院苏州纳米所团队[18]受手

指皮肤非对称 Janus 结构启发, 利用重力驱动自组装构建了 PU-TA@MXene 仿生 Janus 薄膜(图 6)。TA 改性 MXene 纳米片在 PU 网络中呈 2D 梯度分散, 这种非对称结构在不同形变下会产生差异化的电阻响应, 从而为解耦多模态信号提供了内在基础。同时, TA 的动态交联网络赋予材料 2056.67% 的超高断裂伸长率与高效的自修复性能。结合机器学习算法对多模态信号进行深度解析, 该传感器对力量作用的识别率高达 96.1%, 有效解决了高强度机械性能与多模态选择性传感之间的矛盾。

在温度与压力双模态解耦方面, 北京化工大学与都柏林三一学院联合团队[19]利用壳聚糖活化 PDMS

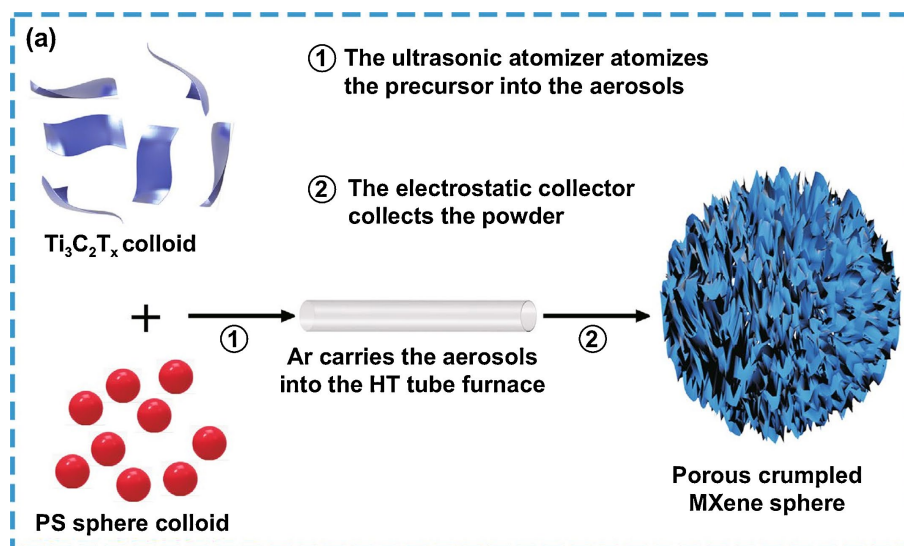


Figure 5. The synthesis scheme of three-dimensional porous crumpled MXene spheres [17]

图 5. 三维多孔 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 褶皱球合成示意图[17]

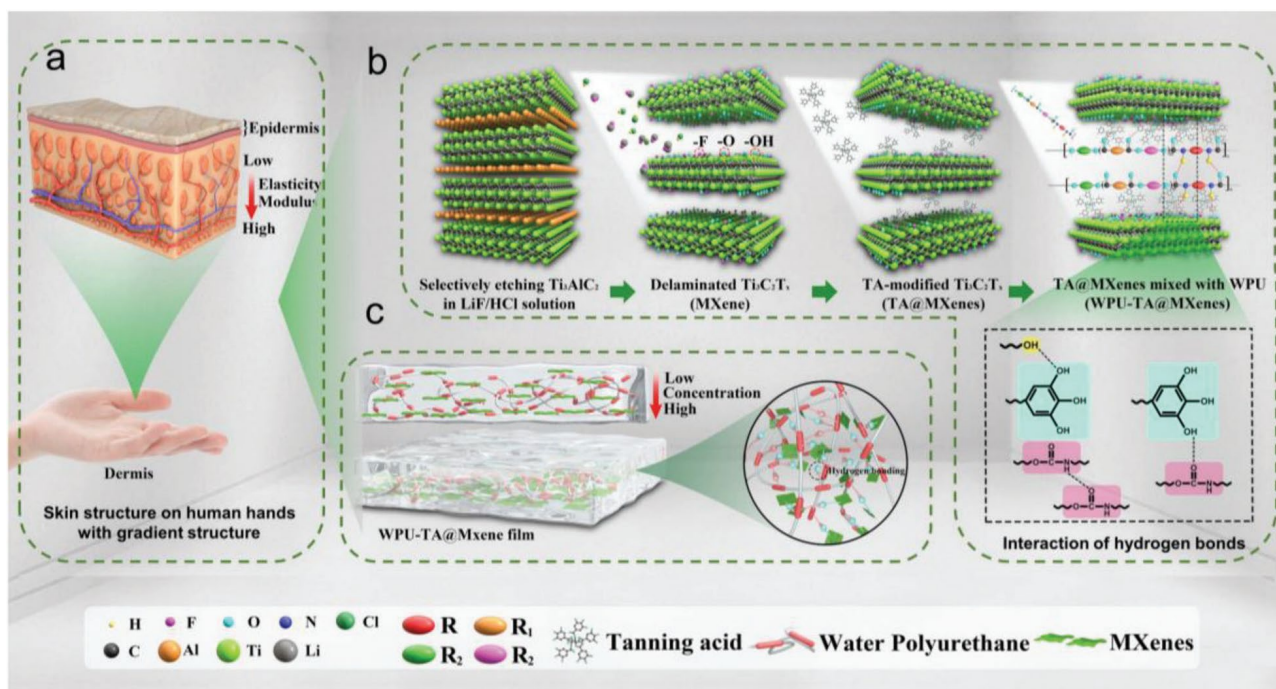


Figure 6. Schematic illustration of the gradient architecture and the corresponding preparation process of the PU-TA@MXene Janus film [18]

图 6. PU-TA@MXene Janus 薄膜的梯度结构和相应的制备过程示意图[18]

泡沫(CS@PDMS)吸附带负电的 MXene, 构建了兼具高弹性、导电性与低热导率($0.065 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)的三维 MCP 泡沫(图 7)。极低的热导率有效阻绝了环境温度波动与局部摩擦生热对压力信号的干扰, 而高弹多孔骨架则为压力形变提供了稳定空间。该结构巧妙结合了 MXene 的塞贝克效应与压阻效应, 将温度和压力分别转化为独立的电压和电阻信号, 从根本上消除了两种物理量间的串扰, 实现了双模态精确解耦。基于此开发的 4×4 传感阵列及机器学习算法, 对人机交互输入信息的识别精度达到 100%, 在智能电子皮肤领域潜力巨大。

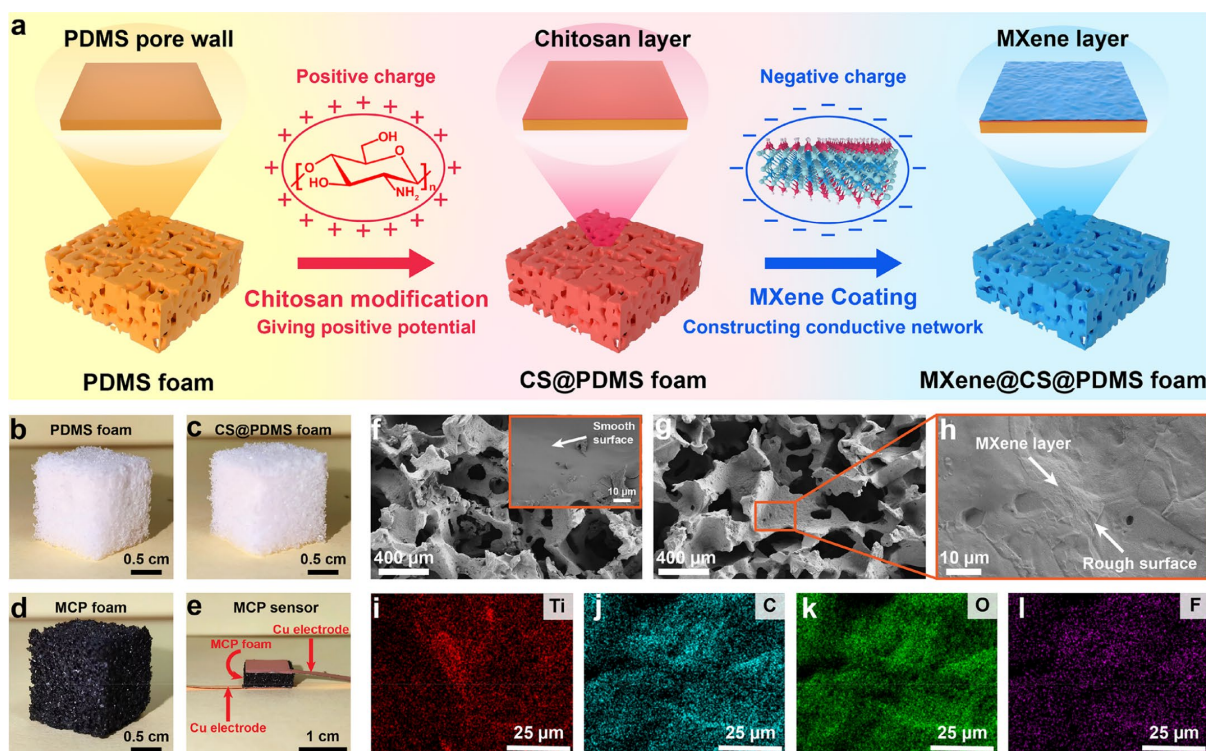


Figure 7. Schematic illustrating the fabrication of MCP foam [19]

图 7. MCP 泡沫的设计理念和制备过程[19]

由此可见, 从气敏/压敏双功能协同感知、弯曲/拉伸/压力等机械多模态智能解耦, 到温/压双模态独立精准感知, MXene 基传感器正依托多组分材料复合的协同优势与精妙的仿生结构设计, 跨越单一信号检测的局限, 快速向多功能集成化与高维度信息处理方向迈进。

3.3. 大规模制备

MXene 基传感器的微纳结构虽能大幅提升器件性能, 但传统制备手段往往依赖高门槛的复杂工艺与苛刻的精确结构控制, 导致加工周期长、良率受限, 严重阻碍了其批量生产与实际转化。针对这一痛点, 苏州大学刘艳花团队[20]创新性地引入三维激光直写光刻技术, 通过可变曝光剂量的精准空间调制, 将高精度 3D 数字模型直接转化为实体微纳结构, 彻底省去了传统光刻中掩模制备、对准曝光及热融合等繁琐步骤, 实现了从“设计”到“成型”的高效跨越。他们采用带有微透镜阵列的双层 PDMS 柔性衬底结合 MXene 薄膜(图 8), 利用微透镜对光束的聚焦与整形作用, 成功实现了复杂互锁微结构的快速、高精度及定制化成型。该策略不仅极大简化了制备流程、显著降低了时间与经济成本, 更打破了微纳结构难以可控重构的瓶颈, 为柔性传感器从实验室走向大规模商业化生产提供了极具潜力的全新解决方案。

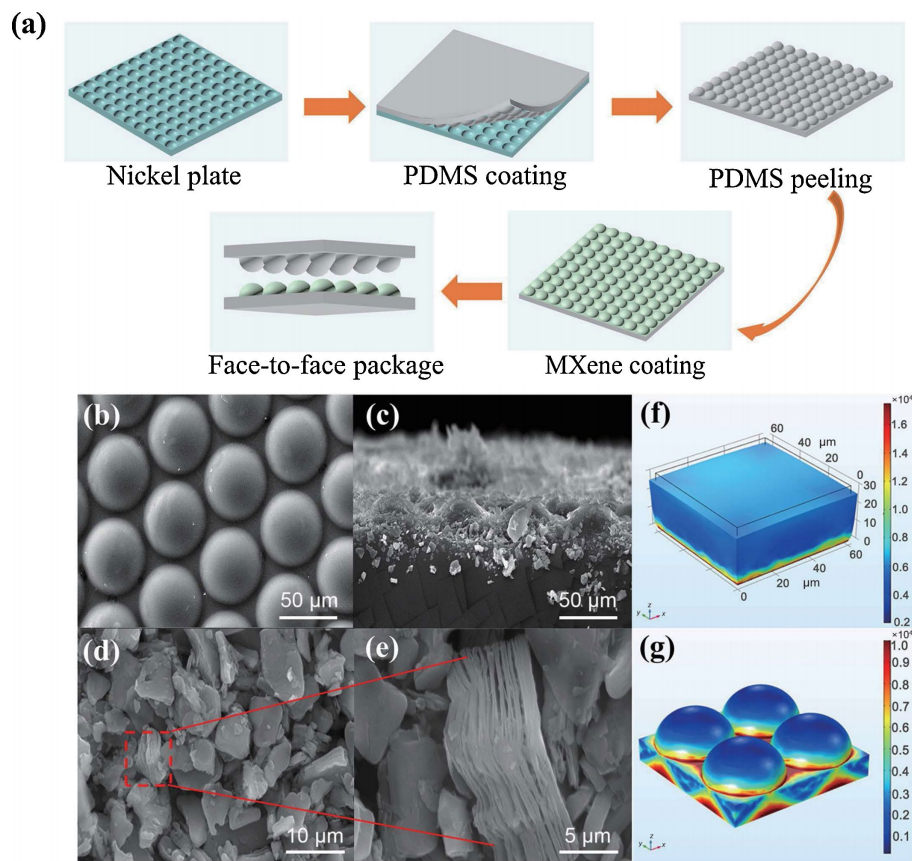


Figure 8. Fabrication process of a microlens array pressure sensor [20]

图 8. 微透镜阵列压力传感器的制备过程[20]

4. 结论与展望

MXene 凭借出色的导电性、柔韧性及表面可调性，在柔性压力传感器领域展现出巨大潜力。然而，从实验室走向实际应用，仍有几个关键瓶颈亟待突破：

一是绿色合成问题。目前 MXene 的制备高度依赖含氟刻蚀剂，不仅带来环境污染和安全隐患，残留基团也会影响材料本征性能。探索电化学刻蚀等无氟合成路线，是实现其可持续生产的前提。二是环境稳定性差。MXene 纳米片在湿热环境下极易氧化，导致导电性衰减。通过表面接枝或聚合物封装等手段提升其抗氧化能力，是延长器件寿命的关键。三是加工工艺的制约。传感器性能高度依赖微纳结构的精细程度，但现有加工手段很难同时兼顾微观形貌的精确控制与批量生产的一致性，亟需开发低成本、可扩展的微纳制造技术。

未来，柔性压力传感器将继续向小型化、智能化和集成化方向发展。在硬件层面，如何打破宽传感范围与高灵敏度之间的制约，实现两者兼得，仍是结构设计的难点；在系统层面，则需要柔性电路与机器学习算法相配合，共同解决非线性响应和多模态信号串扰问题，让器件具备更强的信息处理能力。总体而言，突破上述瓶颈需要材料、微电子和人工智能等多学科的协同攻关，才能真正推动 MXene 基压力传感器的产业化落地。

基金项目

天津市科技计划项目，项目编号：24YDTPJC00780。

参考文献

- [1] 杜文文. MXene 基高性能压力传感器的制备及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2022.
- [2] Song, D., Li, X., Jang, M., Lee, Y., Zhai, Y., Hu, W., *et al.* (2023) An Ultra-Thin MXene Film for Multimodal Sensing of Neuroelectrical Signals with Artifacts Removal. *Advanced Materials*, **35**, Article ID: 2304956. <https://doi.org/10.1002/adma.202304956>
- [3] He, Y., Xu, X., Xiao, S., Wu, J., Zhou, P., Chen, L., *et al.* (2024) Research Progress and Application of Multimodal Flexible Sensors for Electronic Skin. *ACS Sensors*, **9**, 2275-2293. <https://doi.org/10.1021/acssensors.4c00307>
- [4] Sun, X., Guo, X., Gao, J., Wu, J., Huang, F., Zhang, J., *et al.* (2024) E-Skin and Its Advanced Applications in Ubiquitous Health Monitoring. *Biomedicines*, **12**, Article No. 2307. <https://doi.org/10.3390/biomedicines12102307>
- [5] 王苏, 白元元, 王书琪, 等. 基于 MXene/多壁碳纳米管的柔性压力传感器[J]. 传感器与微系统, 2022, 41(7): 5-8.
- [6] 尚成硕. 基于 MXene 的柔性压力传感器的制备及其性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2022.
- [7] 高育育. 高灵敏多功能 MXene 压力传感器及其机理研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [8] 苏拓慧. 基于 MXene/纳米纤维素的可降解压力传感器及其应用研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2022.
- [9] 李晓迪. MXene 基可穿戴压力传感器的构筑及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京化工大学, 2021.
- [10] 周紫薇. 基于 MXene/石墨烯的柔性压力传感器的制备及性能研究[D]: [硕士学位论文]. 南京: 南京邮电大学, 2021.
- [11] Yang, W., Liu, F., Lin, Y., Wang, J., Zhang, C., Cheng, H., *et al.* (2025) MXene-Based Flexible Sensors for Wearable Applications. *Soft Science*, **5**, Article No. 33. <https://doi.org/10.20517/ss.2025.12>
- [12] Naguib, M., Kurtoglu, M., Presser, V., Lu, J., Niu, J., Heon, M., *et al.* (2011) Two-Dimensional Nanocrystals Produced by Exfoliation of Ti_3AlC_2 . *Advanced Materials*, **23**, 4248-4253. <https://doi.org/10.1002/adma.201102306>
- [13] Li, L., Cheng, Y., Cao, H., Liang, Z., Liu, Z., Yan, S., *et al.* (2022) MXene/rGO/PS Spheres Multiple Physical Networks as High-Performance Pressure Sensor. *Nano Energy*, **95**, Article ID: 106986. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2022.106986>
- [14] Yang, J., Liu, L., Zhang, D., Zhang, H., Ma, J., Zheng, J., *et al.* (2024) Dual-Stage Surficial Microstructure to Enhance the Sensitivity of MXene Pressure Sensors for Human Physiological Signal Acquisition. *ACS Applied Materials & Interfaces*, **16**, 1096-1106. <https://doi.org/10.1021/acsami.3c14780>
- [15] Yan, Q., Zhou, Y., Cheng, Y., Shi, L., Wang, R., Gao, L., *et al.* (2023) Lithographic Printing Inspired *In-Situ* Transfer of MXene-Based Films with Localized Topo-Electro Tunability for High-Performance Flexible Pressure Sensors. *Nano Research*, **16**, 12670-12679. <https://doi.org/10.1007/s12274-023-5974-6>
- [16] Lei, P., Bao, Y., Gao, L., Zhang, W., Zhu, X., Liu, C., *et al.* (2024) Bioinspired Integrated Multidimensional Sensor for Adaptive Grasping by Robotic Hands and Physical Movement Guidance. *Advanced Functional Materials*, **34**, Article ID: 2313787. <https://doi.org/10.1002/adfm.202313787>
- [17] Yang, Z., Lv, S., Zhang, Y., Wang, J., Jiang, L., Jia, X., *et al.* (2022) Self-Assembly 3D Porous Crumpled MXene Spheres as Efficient Gas and Pressure Sensing Material for Transient All-MXene Sensors. *Nano-Micro Letters*, **14**, Article No. 56. <https://doi.org/10.1007/s40820-022-00796-7>
- [18] Bai, J., Gu, W., Bai, Y., Li, Y., Yang, L., Fu, L., *et al.* (2023) Multifunctional Flexible Sensor Based on PU-TA@MXene Janus Architecture for Selective Direction Recognition. *Advanced Materials*, **35**, Article ID: 2302847. <https://doi.org/10.1002/adma.202302847>
- [19] Gao, F., Liu, J., Li, X., Ma, Q., Zhang, T., Yu, Z., *et al.* (2023) $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene-Based Multifunctional Tactile Sensors for Precisely Detecting and Distinguishing Temperature and Pressure Stimuli. *ACS Nano*, **17**, 16036-16047. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c04650>
- [20] Li, T., Xu, Z., Xu, B.B., Guo, Z., Jiang, Y., Zhang, X., *et al.* (2023) Advancing Pressure Sensors Performance through a Flexible MXene Embedded Interlocking Structure in a Microlens Array. *Nano Research*, **16**, 10493-10499. <https://doi.org/10.1007/s12274-023-5727-6>