

MXene 的红外特性及其应用研究展望

巴 坤¹, 王建禄^{1,2}, 韩美康²

(复旦大学 1. 芯片与系统前沿技术研究院; 2. 光电研究院和上海市智能光电与感知前沿科学研究基地, 上海 200433)

摘 要: MXene 是一大类二维过渡金属碳氮化合物, 其丰富的组分、二维原子层结构、金属电导和活性表面等特性使其与不同波段的电磁波(可见光、红外、太赫兹、微波波段等)产生独特的相互作用, 并衍生出了多种电磁功能应用。在红外波段, MXene 具有宽域的红外辐射特性, 活性表面使其具备可调的红外吸收。近年来, MXene 的上述性质引起了广泛研究兴趣。本文首先对不同 MXene 组分的本征红外辐射特性及调控策略进行了系统总结, 并简要介绍其代表性红外应用, 重点讨论 MXene 在这些应用中的贡献和作用机制, 包括红外识别/伪装、表面等离激元、光热转换、红外光电探测等。最后, 对 MXene 红外功能应用的未来发展方向进行了展望。

关 键 词: MXene; 红外辐射; 光热转换; 热管理; 红外识别; 专题评述

中图分类号: TB321 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2024)02-0162-09

Perspectives for Infrared Properties and Applications of MXene

BA Kun¹, WANG Jianlu^{1,2}, HAN Meikang²

(1. Frontier Institute of Chip and System, Fudan University, Shanghai 200433, China; 2. Institute of Optoelectronics and Shanghai Frontier Base of Intelligent Optoelectronics and Perception, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract: MXene is a large family of two-dimensional transition metal carbides, nitrides or carbonitrides. Its characteristics (various compositions, two-dimensional atomic layer structures, metallic electrical conduction, active surfaces, etc.) render MXene unique interactions with electromagnetic waves at different frequencies (visible light, infrared, terahertz, microwave, etc.), deriving a variety of electromagnetic functional applications. In the infrared range, MXene has a wide range of infrared radiation properties, and its active surface endows tunable infrared absorption. These features have attracted researchers' interest in exploring infrared properties of MXene and the corresponding applications in recent years. In this perspective, the intrinsic infrared characteristics and manipulation strategies of different MXenes are systematically summarized, and the research progress of representative infrared applications are briefly introduced, including infrared identification/camouflage, surface plasmon, photothermal conversion, and infrared photodetection. Particularly, the contribution and mechanism of MXene in these applications are discussed.

收稿日期: 2023-09-01; 收到修改稿日期: 2023-09-28; 网络出版日期: 2023-10-07

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFA1200700); 国家自然科学基金(52302360, 62025405, 61835012, 62305065); 上海市浦江人才计划(22PJ1400800); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB44000000); 上海市科学技术委员会资助项目(2151103500)

National Key R&D Program of China (2021YFA1200700); National Natural Science Foundation of China (52302360, 62025405, 61835012, 62305065); Shanghai Pujiang Program (22PJ1400800); Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDB44000000); Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (2151103500)

作者简介: 巴 坤(1989-), 男, 博士. E-mail: kun_ba@fudan.edu.cn

BA Kun (1989-), male, PhD. E-mail: kun_ba@fudan.edu.cn

通信作者: 韩美康, 青年研究员. E-mail: mkhan@fudan.edu.cn; 王建禄, 教授. E-mail: jianluwang@fudan.edu.cn

HAN Meikang, professor. E-mail: mkhan@fudan.edu.cn; WANG Jianlu, professor. E-mail: jianluwang@fudan.edu.cn

Finally, the outlook for infrared functional applications with MXenes is proposed.

Key words: MXene; infrared radiation; photothermal conversion; thermal regulation; infrared identification; perspective

MXene 是一大类二维过渡金属碳氮化物,其化学通式为 $M_{n+1}X_nT_x$, 其中 M 是前过渡族金属(如 Ti、Mo、V 等), X 是碳或氮, T_x 指表面官能团(如 -OH、-F、-Cl 等), $n=1\sim4$ ^[1-3]。MXene 通常通过化学刻蚀去除三元层状碳氮化物(MAX 相)中的 A 位原子而制备得到^[4-5]。2011 年,美国德雷塞尔大学的 Yury Gogotsi 等^[6]报道了首个 MXene 组分 $Ti_3C_2T_x$ 。十余年来,已有超过 50 种 MXene 组分被实验合成,并理论预测存在超过 100 种化学计量比的 MXene 组分^[7-8]。此外, $M_{n+1}X_nT_x$ 中的 M 位可以是两种或多种金属元素的固溶体, X 位也可以是碳氮固溶,加之丰富的表面官能团,因此理论上 MXene 存在无数种组分和结构^[9]。这为 MXene 的物理特性调控提供了巨大空间。

除了丰富的原子层结构和组分外, MXene 还具有金属电导、活性表面、可调功函数、优异的力学性质(其中单层 $Ti_3C_2T_x$ 的杨氏模量达 0.33 TPa)等特性^[10-12]。作为原子级厚度的二维层状材料,上述特性使其与电磁波产生了独特的相互作用,涉及紫外、可见光、红外、太赫兹、微波等波段,进而发展了一系列电磁功能应用。例如,在可见光-近红外范围, MXene 的等离子体行为和非线性光吸收使其可用于光热转换及相关光电子器件^[13-14];在太赫兹波段(0.5~10 THz), 10 nm 厚的 MXene 薄膜可吸收 50% 的电磁波,达到本征吸收极限^[15];在微波波段, MXene 展现出与传统金属相媲美的电磁屏蔽性能, 40 nm 厚薄膜即可屏蔽 >99% 的入射电磁波,并且利用 MXene 层间电化学驱动的离子脱嵌,可实现动态电磁屏蔽调控^[16-17]。而在中红外波段(3~25 μm),不同 MXene 展现出宽域的红外辐射特性,既有超低红外发射率的 $Ti_3C_2T_x$ (<0.1),也有高红外发射率的 Nb_2CT_x (>0.5)^[18]。宽域可调的红外特性使 MXene 在多种红外应用中展现出巨大的潜力,如热管理、红外识别、光热转换等。另外,多数红外功能应用涉及到薄膜和涂层的制备,而 MXene 的表面官能团使其表面易改性并适用于多种涂料、涂层及薄膜技术,包括丝网印刷、喷涂、喷墨打印、界面自组装等^[19-22],这有利于 MXene 红外应用的开发和工业推广。

和其它电磁波段相比, MXene 在红外波段的研究工作开展较晚,对其基本红外特性和作用机制的研究尤其少。自 2020 年以来,各种 MXene 红外功

能应用的报道显著增多,本文将概括近年来 MXene 在红外领域的研究进展,重点总结 MXene 本征的红外吸收和辐射特性,并就代表性的应用方向进行简要讨论。

1 MXene 的红外特性

任意频率的电磁波与 MXene 相互作用都涉及吸收、反射和透过等基本过程。而在红外波段,由于热辐射和红外特性密切相关,本文将同时提及 MXene 的红外吸收和红外发射率(图 1(a))。根据 Kirchhoff 定律,热平衡态下物体的定向红外发射率等于红外吸收率。目前 MXene 的红外研究以 $Ti_3C_2T_x$ 为主,如图 1(b)所示, 15 μm 厚 $Ti_3C_2T_x$ 薄膜在可见光范围(380~780 nm)的吸收率在 90% 左右,而在近红外区域(1~3 μm)快速下降,在中红外范围最低达到 ~10%^[23]。而 Gogotsi 等^[18]制备的 200 nm 厚 $Ti_3C_2T_x$ 薄膜即可实现红外吸收(发射率)小于 0.06,与同等厚度的光滑金涂层相当。不同于传统金属的是, $Ti_3C_2T_x$ 在可见光范围是强吸收材料,意味着它可以吸收太阳光能量,但热辐射很低。这种光学特性使 MXene 可应用于多种光热转换,如保温、热疗、致动器等,而这些功能以前多数需要通过超表面设计实现。

除了低红外发射的 $Ti_3C_2T_x$, MXene 的红外辐射特性还可以通过组分设计进行大范围调控。例如, Nb_2CT_x 薄膜在 3~25 μm 范围的红外发射率高,达到 ~0.6; $Mo_2Ti_2C_3T_x$ 薄膜的红外发射率则为 ~0.3;而在双金属连续固溶体系 $Ti_{2-y}Nb_yCT_x$ (0<y<2)中,通过改变双金属的原子比例可调控 MXene 的红外发射率(图 1(c))^[18]。理论计算表明,除了 MXene 的组分调控,通过表面官能团的设计可进一步调控 MXene 的红外吸收特性,尤其是对特定波长的选择性红外吸收。MXene 红外特性调控范围广,为精细化的红外辐射应用提供了巨大设计空间,包括环境自适应的红外伪装、红外识别、辐射致热/致冷等。Gogotsi 等^[18]证明 MXene 薄膜的红外发射率和电导率呈负相关关系,红外发射率随电导率增大而降低,这与传统金属的变化趋势相似(图 1(d))。在固溶体结构 MXene 中,通过组分和原子结构变化可以实现从低

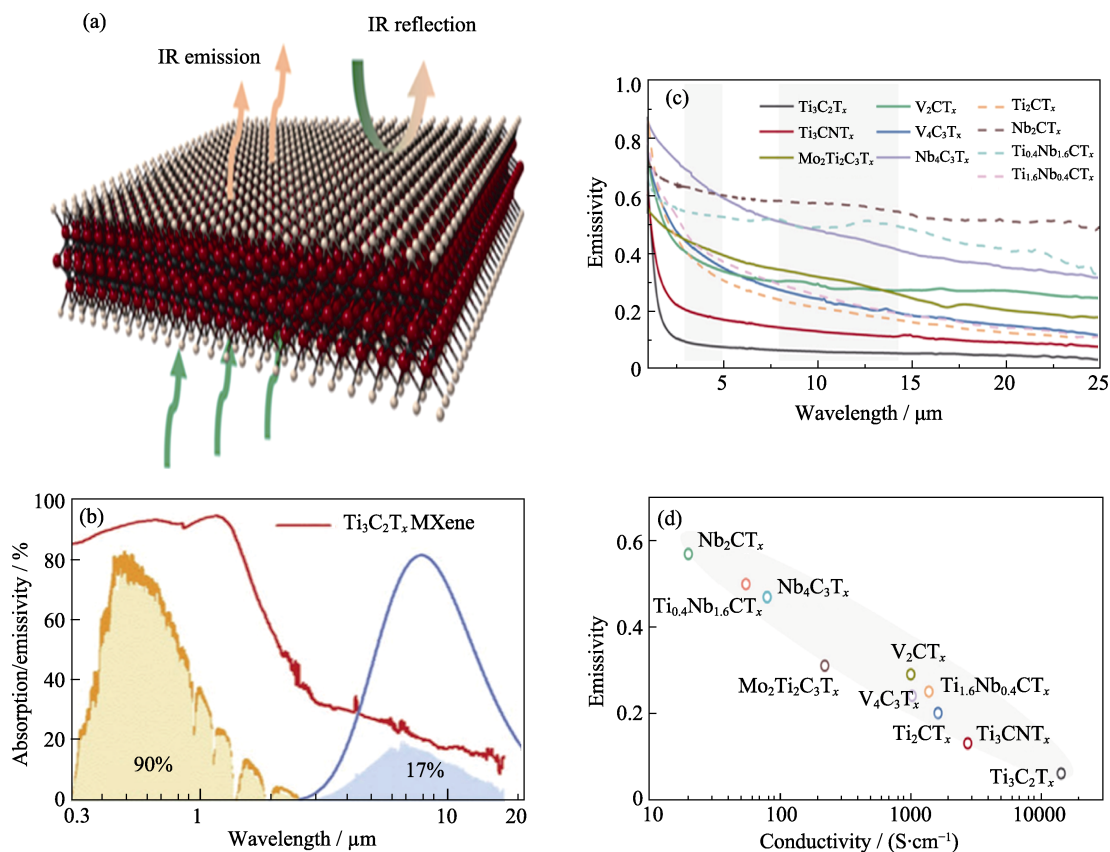


图 1 MXene 的红外辐射特性

Fig. 1 Infrared radiation properties of MXene

(a) Schematic of infrared reflection and emission with MXene^[18]; (b) Absorptance/emissivity spectra of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ film at visible and infrared ranges^[23]; (c) Room-temperature infrared emissivity spectra of different MXene coatings at wavelength range of 1–25 μm ^[18]; (d) Relationship between average infrared emissivity (8–14 μm) and electrical conductivity of MXene coatings^[18]

红外发射到高红外发射率的精准调控。另外, 利用 MXene 的电化学特性, 通过外加电场可以调控电化学驱动的红外发射率^[24]。值得注意的是, 红外发射率多是通过远场红外测试获得, 对单一 MXene 片层的近场红外辐射特性仍缺乏深入研究。

除了红外吸收性质外, 红外波段的介电常数是另一个重要的基本性质。高载流子浓度和金属电导特性使 MXene 具备了类金属的等离子体性质。Fafarman 等^[25]利用椭圆偏振测得了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 薄膜在 300~1500 nm 的介电常数, 发现介电常数实部在近红外(1130 nm)处变成了负值, 说明自由载流子发生振荡, 证明 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 是等离子体材料。 $\text{V}_{n+1}\text{C}_n\text{T}_x$ 的介电常数也展现出类似的性质^[26]。这说明 MXene 在红外波段的光通信、成像、热管理等领域有巨大的应用潜力, 并且 MXene 的表面等离激元可通过 MXene 组分、表面基团以及薄膜厚度等进行调控。利用 MXene 的这些性质进行超表面设计有望实现新的突破。然而, 目前不同类型 MXene 在红外波段的基础介电性质报道还较少, 亟需进一步探索。

2 MXene 的红外应用

2.1 红外识别/伪装

任何高于绝对零度的物体都会产生红外辐射。根据 Stefan-Boltzmann 定律, 通过温度和红外发射率可以控制辐射的能量。在物体或背景温度不能改变的情况下, 红外发射率是唯一变量。因此, 控制材料的红外发射率对红外识别和伪装应用至关重要。

$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的红外发射率可以低至 0.1, 与抛光的金属相近^[23]。Li 等^[27]将 MXene、石墨烯、氧化石墨烯、蒙脱石及不锈钢等薄膜材料放置在高温衬底(508 $^{\circ}\text{C}$)上, 测得辐射温度分别为 181、223、294、421 和 159 $^{\circ}\text{C}$, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 展现出优异的低红外辐射特性(图 2(a))。通过优化 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 合成质量和薄膜制备可进一步降低其红外发射率。除了红外伪装外, MXene 更特别的是其红外识别潜力。Deng 等^[28]结合多色印刷的理念, 将不同红外发射率的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 溶液印刷为复合防伪图案, 便可借助热成像仪识别

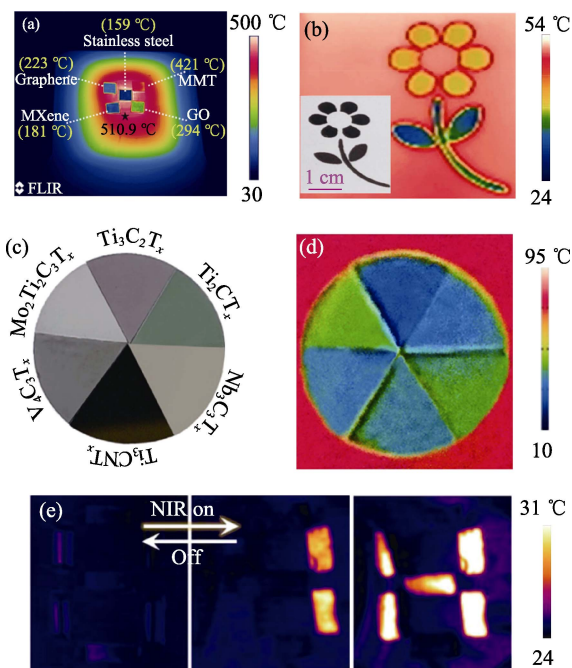


图2 MXene 的红外识别/伪装应用

Fig. 2 Infrared identification/camouflage with MXenes

(a) Infrared thermal image of MXene, graphene, stainless steel, graphene oxide, and montmorillonite films on an object at 508 °C^[27]; (b) Infrared thermal images of security flower^[28]; (c) Visible and (d) infrared images of different MXene coatings on a hot plate at 70 °C, showing the identification capability of MXenes due to their varying colors and infrared emissivity^[18]; (e) Infrared camera images of the patterned device before and after local near infrared (NIR) irradiation to demonstrate information encryption and display applications^[29]

和解密红外防伪图案(图 2(b))。除了调整 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 外, 还可以利用不同 MXene 组分的红外发射率差异实现红外识别/防伪。

不同于传统材料, MXene 具有宽域可调的红外辐射特性, 并且在可见光波段还具有丰富的光学特性。MXene 薄膜呈现不同的颜色, 如紫色($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$)、金色(Nb_2CT_x)、绿色(Ti_2CT_x)等(图 2(c))。因此, 除了单一的红外识别应用外, 结合 MXene 丰富的光学和红外特性可以实现更复杂精细的识别功能。例如, 不同的 MXene 组合在光学相机和红外相机中会展现完全不同的颜色, 有望用于复杂场景中的信息负载和防伪(图 2(d))^[18]。Cai 等^[29]基于 MXene 制备了不同的图案(如数字或者字母), 并借助近红外光或电对图案进行局部加热来实现信息传递。通过红外相机可以发现活性区与周围膜之间明显的温差(图 2(e))。

2.2 表面等离子激元

表面等离子激元是一种限域在金属和电介质的交界面处, 自由振荡的电子与光子相互作用产生且沿着导体表面向前传播的电磁场模式, 在集成光子

学、生物传感、精密测量等领域具有广泛的应用前景^[30-31]。MXene 的金属电导和非线性光学特性, 使其展现出不同于传统金属的等离激元性质^[13, 32]。

$\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 在能量低至 0.3 eV 下表现出强烈的表面等离激元效应, 且其在红外频率下的等离激元波段表现出与厚度相关的行为^[14]。El-Demellawi 等^[33]利用扫描透射电子显微镜结合超高分辨率电子能量损失谱分析了单层和多层 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 表面等离激元的空间和能量分布。其中, 在 1.7 eV 下是横向表面等离激元模式, 而在 3.5 eV 下则是带间跃迁。此外, 通过原位退火处理, $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 表面的 -F 基团显著减少, 实现了横向表面等离激元模式的可调谐响应。可调谐的表面等离激元可以在近红外到中红外范围内激发, 为拓展 MXene 在光通信、生物成像、化学传感和热管理等领域的应用奠定了基础(图 3(a, b))。

Chaudhuri 等^[34]首次设计和制备了基于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的超表面吸收体(图 3(c))。由 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 制成的纳米圆盘阵列在近红外频率下表现出强烈的局部表面等离激元共振。其中, 在 $\text{Au}/\text{Al}_2\text{O}_3$ 上设计的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 纳米圆盘阵列利用共振处的散射增强和 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 本征的光学损耗, 在宽波长范围内($\sim 1.55 \mu\text{m}$)实现了高效率吸收($\sim 90\%$)(图 3(d))。

2.3 光热转换

光热材料可将太阳辐射能转化为热能, 在热催化、海水淡化、杀菌及癌症治疗等领域发挥重要作用^[35-40]。MXene 在可见光和近红外范围独特的吸收特性使其能够有效吸收和利用太阳能产生热量^[41]。下面以热存储、致动器和热疗为例介绍 MXene 在光热转换领域的应用价值。

热存储应用 得益于 MXene 纳米片的局域表面等离激元共振效应, Fan 等^[42]将聚乙二醇(PEG)掺入 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的片层制备了具有光热存储能力的 PEG/MXene 复合材料。PEG/MXene 复合材料除了具有储热密度高和导热性强的特点外, 在可见光和近红外区域还具有两个增强的吸收带。因此, 它可以进行快速的日光收集和光热转换(图 4(a))。在功率密度为 $128.6 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的模拟日光照射下, PEG/MXene 复合材料的温度会急剧上升。当模拟光关闭时, 其温度又迅速下降(图 4(b))。

致动器应用 Yang 等^[43]利用 MXene 设计了由红外光驱动并能精确控制其形变的杂化有机晶体材料。在红外光辐射下, 杂化有机晶体表面温度随着红外光功率增加而升高, 在 744 mW 红外辐射下温差达 62.4 °C, 最终可通过红外光对有机晶体弯曲程度和弯曲位置进行调控(图 4(c, d))。

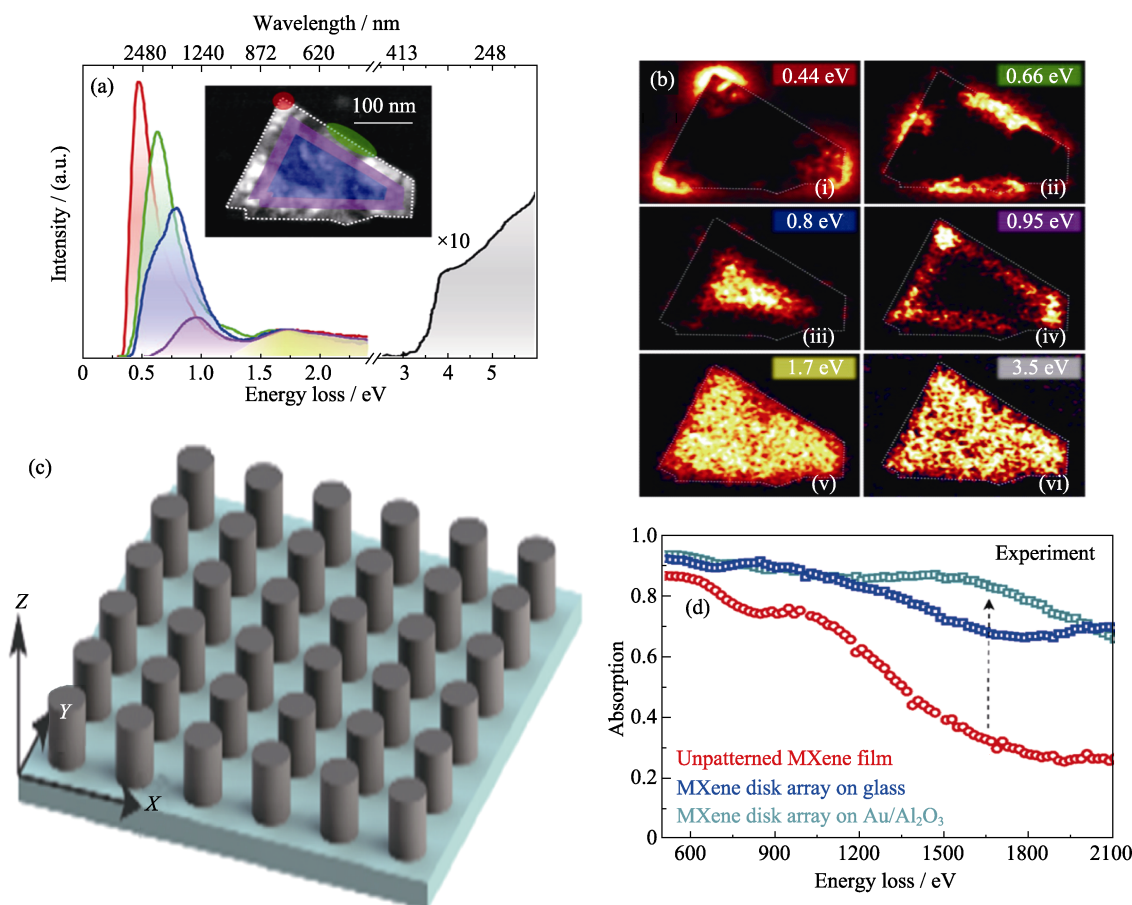


图 3 MXene 的表面等离激元应用

Fig. 3 Surface plasmon of MXene

(a) Electronenergy loss spectroscopy (EELS) analysis of a $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ flake^[33]; (b) EELS fitted intensity maps of the corresponding surface plasmon modes and inherent interband transition sustained by the flake at the energy losses^[33]; (c) Schematic of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ based nanodisks array^[34]; (d) Improvement of absorption spectra of patterned $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ film^[34]

热疗应用 光热疗法利用近红外光作为外部和远程刺激,可以对局部加热进行精确控制,并将副作用降到最低^[44-45]。Lin 等^[39]将 Nb_2CT_x 作为一种新型光治疗剂成功应用在 NIR-I 和 NIR-II 窗口对小鼠异种肿瘤进行体内光热消融,从而通过光热疗法验证了 $\text{Nb}_2\text{C-PVP}$ 纳米片具有高的近红外吸光度和光热转换效率。静脉注射 $\text{Nb}_2\text{C-PVP}$ 试剂后,小鼠肿瘤部位在 808 或 1064 nm 近红外激光下照射 10 min,发现温度分别从 $\sim 30^\circ\text{C}$ 迅速升高到 $\sim 61^\circ\text{C}$ 和 $\sim 65^\circ\text{C}$ (图 4(e))。特别是经 $\text{Nb}_2\text{C-PVP}$ 处理后,小鼠肿瘤在 NIR-I 和 NIR-II 激光作用下,体积几乎没有变化,达到了很好光热消融治疗作用(图 4(f))。

2.4 红外光电探测

红外光电探测是在吸收物体的红外辐射后,通过光电转换、电信号处理等手段将携带物体辐射特征的红外信号可视化,进而广泛应用于夜视、光通信、图像识别和人工智能等领域^[46-47]。目前, MXene 在红外波段尚未实现选择性吸收,无法利用其自身进行红外信号转换。然而,基于 MXene 的金属电导

和红外吸收特性的电极材料可以有效提升红外光电探测器件的光电性能。另外,表面端基修饰、离子插层等工艺有望调控 MXene 材料的红外感知特性,提升其在红外光电领域的应用^[48]。

Hu 等^[49]利用 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 与有机光敏材料形成氢键设计了范德华异质结,作为导电电极与 RAN 薄膜等有机光敏材料构建了 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -RAN 光电探测器件,从而显著提升探测器在近红外波段光电响应性能(图 5(a))。在 1064 nm 激光激发下,所制器件的开关比比使用金电极的光电探测器高 6.25 倍,为仿生视觉和柔性可穿戴精确图像传感开辟了新的途径(图 5(b))。值得注意的是, MXene 有效吸收光的能力因其表面等离激元在二维表面振荡而大大增强。到目前为止, MXene 已经在红外波段展示出显著的等离激元吸收性能^[13,51]。然而, MXene 的电阻率低,其作为光敏材料的光电探测器往往具有较高的暗电流,这限制了其实际应用^[52-54]。Liu 等^[50]利用能带结构匹配的三碘化铅甲基铵(MAPbI_3)钙钛矿和 Nb_2CT_x 异质结构制备了具有自供电功能的近红外光电二极管

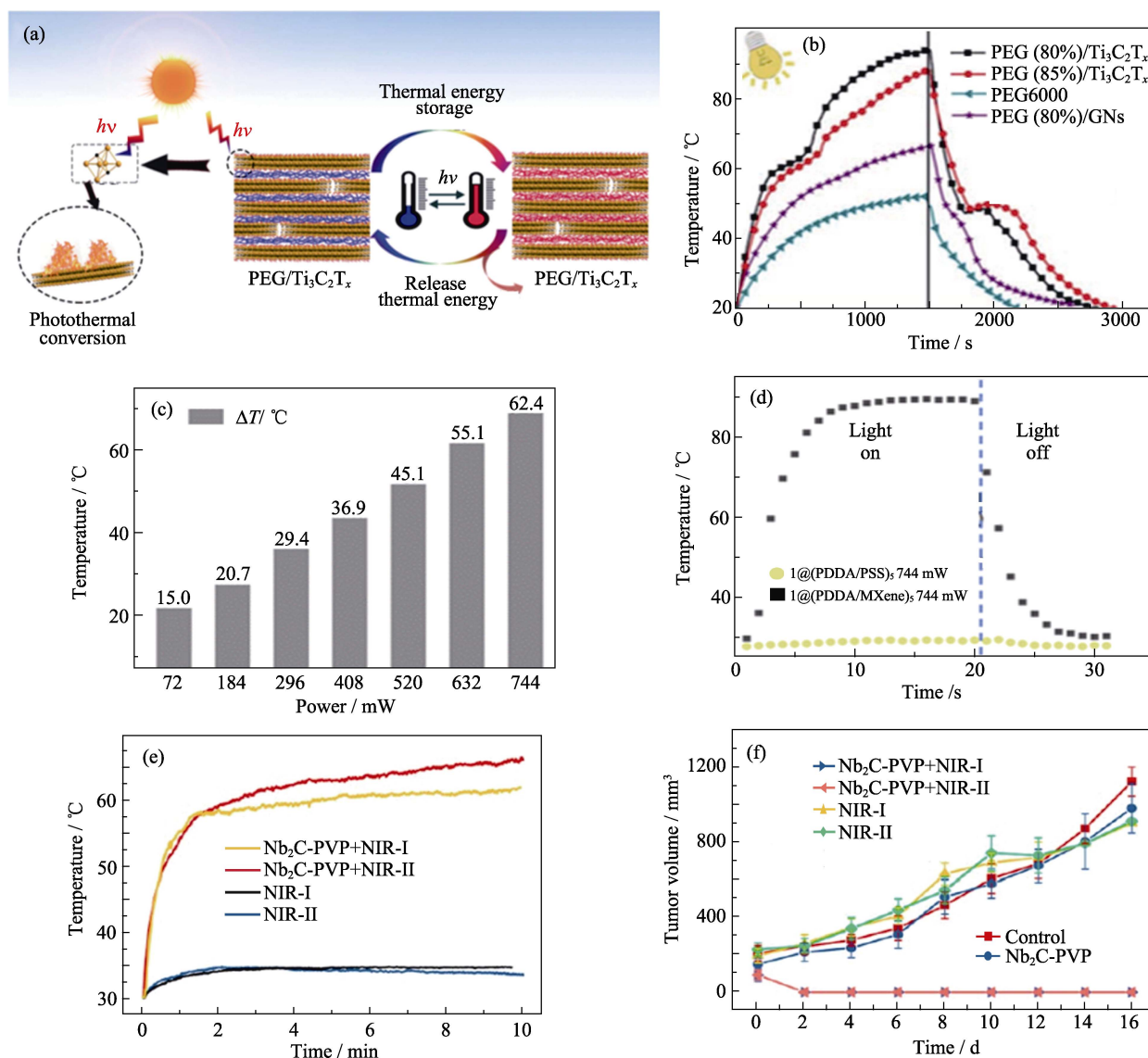


图4 MXene 的光热转换应用

Fig. 4 Photothermal conversion with MXene

(a) Schematic of photothermal energy conversion and storage of the PEG/Ti₃C₂T_x composites^[42]; (b) Temperature evolution curves of the composites under the simulated sunlight irradiation^[42]; (c) Temperature change of the coated crystal with the increasing power of infrared radiation^[43]; (d) Time-dependent temperature increase of the surface of the composites upon illumination with infrared light (744 mW) at 25 °C^[43]; (e) Temperature elevations at the tumor sites of 4T1-tumor-bearing mice under different treatments during laser irradiation^[39]; (f) Time-dependent tumor growth curves after different treatments^[39]

管。该能带结构匹配的垂直光电二极管成功抑制了 Nb₂CT_x 的暗电流, 展现出优异的光电探测性能和扩展的带宽(图 5(c))。器件的响应度和探测率分别达到 0.25 A·W⁻¹ 和 8×10¹¹ Jones(图 5(d))。

上述器件的优异性能充分展示了 MXene 在红外光电探测领域的应用潜力。目前, 这些应用多集中在近红外波段, 如何将探测波段扩展到更具应用价值的中波、长波等波段将是未来 MXene 的重要探索方向之一。另外, 借助 MXene 功能化和原子杂化开发其半导体特性, 同时与其它光敏材料构建异质结以开发高性能、多谱段的红外光电探测也是值得科研工作者重点关注的前沿领域。

3 展望

十余年来, 得益于 MXene 丰富的组分结构和独特的电磁响应行为, 多种基于 MXene 的电磁功能应用获得新突破, 尤其在微波波段的电磁防护。MXene 的红外应用吸引了多学科研究者的关注, 正成为 MXene 新的研究热点。不过, MXene 的基础红外特性研究才刚刚起步, 需要物理、化学、信息等多学科交叉研究, 开发更多的应用场景, 推动 MXene 红外功能应用的发展, 以下几个方面尤其值得关注:

(1) 随着 MXene 体系不断扩大, 需要系统研

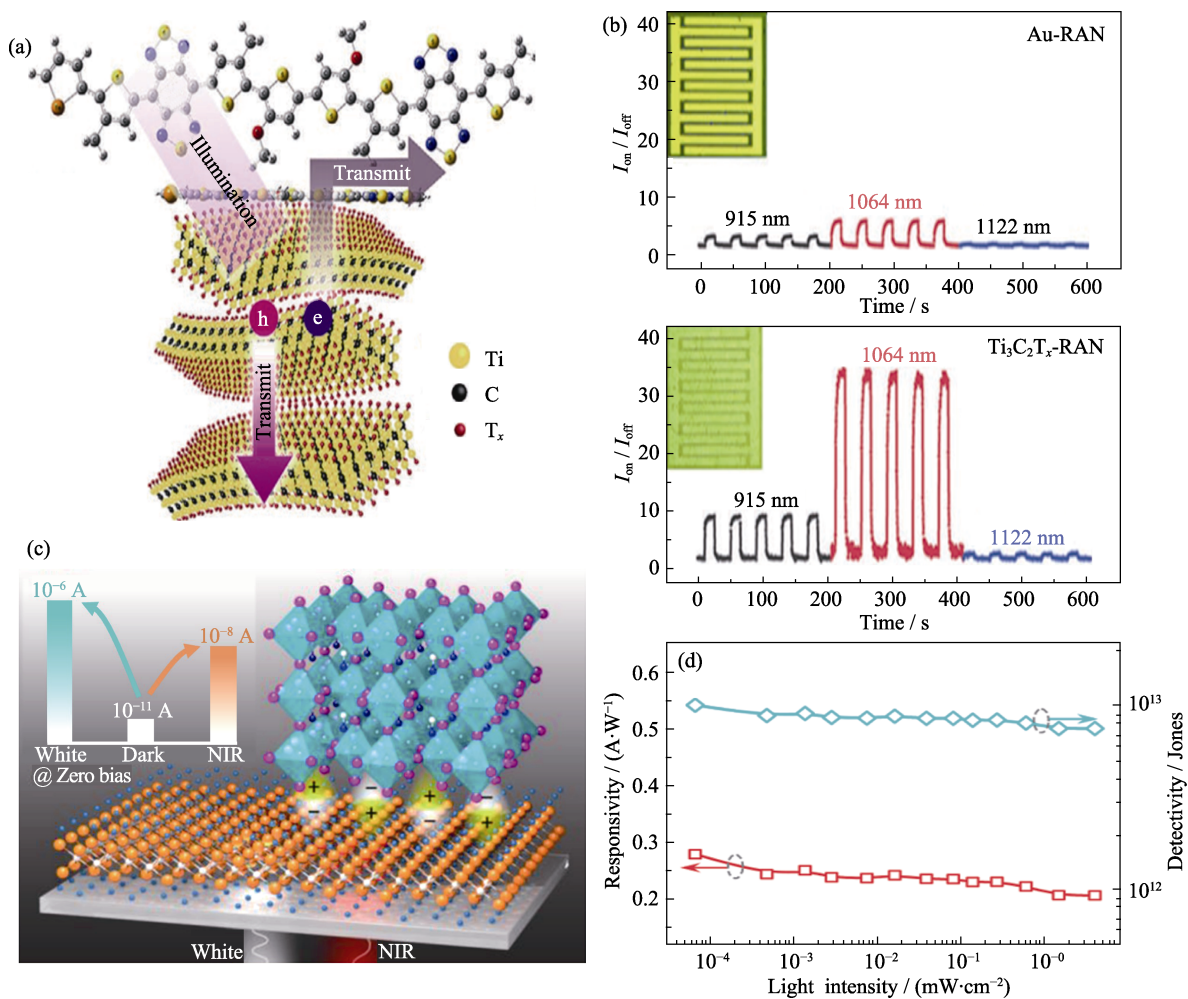


图 5 MXene 的红外光电探测应用

Fig. 5 Infrared photodetection with MXene

(a) Structural diagram of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -RAN photodetector^[49]; (b) Dynamic optical response curves of Au-RAN and $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -RAN photodetector with insets showing optical photos of the device^[49]; (c) Schematic of the $\text{MAPbI}_3/\text{Nb}_2\text{CT}_x$ photodiode^[50]; (d) Responsivity and detectivity of the $\text{MAPbI}_3/\text{Nb}_2\text{CT}_x$ photodiode under different white light intensities^[50]

究 MXene 组分、原子结构、表面基团对其红外特性的影响, 尤其需要深入理解单一 MXene 片层在不同条件下的近场本征红外响应。这将充分发挥 MXene 体系的优势, 有望发现新的物理现象, 为红外波长选择的精准调控和功能开发提供广阔的设计空间。

(2) MXene 的光学和红外特性相结合有望实现复杂精细的目标识别。同时, 结合 MXene 层间调控, 可实现动态可调的红外识别; 利用超表面设计可实现频率选择性的红外吸收。这些新方法的研究有望开发环境自适应的智能红外器件。

(3) MXene 的光热转换应用场景广泛, 特别是在成像、热疗、传感等新兴领域。在不同环境中的红外特性优化和调控值得探索, 比如生物环境中的降解、极端温度下的稳定性等。这些需求和 MXene 的合成技术和改性密切相关。

(4) 在光电探测应用中, 利用 MXene 有望实现跨越紫外、可见光及红外的多波段光电探测器件。

其中, 与其它功能材料(如量子点、二维纳米材料等)结合是发展多功能红外器件的有效策略, 比如构建原子级界面异质结。

综上, MXene 在红外物理的研究方兴未艾, 新的特性和应用还待探索。尽管在稳定合成、器件组装、本征测试等诸多方面仍面临挑战, 但是在多学科研究者的共同努力下, 随着新组分、新结构、新现象的不断发现, MXene 的红外功能将在信息、电子、生物等多个领域得到应用。

参考文献:

- [1] VAHIDMOHAMMADI A, ROSEN J, GOGOTSI, Y. The world of two-dimensional carbides and nitrides (MXenes). *Science*, 2021, **372**(6547): eabf1581.
- [2] DING H M, LI M, LI Y B, *et al.* Progress in structural tailoring and properties of ternary layered ceramics. *Journal of Inorganic Materials*, 2023, **38**(8): 845.
- [3] BA K, PU D, YANG X, *et al.* Billiard catalysis at Ti_3C_2 MXene/

- MAX heterostructure for efficient nitrogen fixation. *Applied Catalysis B: Environmental*, 2022, **317**: 121755.
- [4] ALHABEB M, MALESKI K, ANASORI B, *et al.* Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene). *Chemistry of Materials*, 2017, **29(18)**: 7633.
- [5] MATTHEWS K, ZHANG T, SHUCK C E, *et al.* Guidelines for synthesis and processing of chemically stable two-dimensional V_2CT_x MXene. *Chemistry of Materials*, 2021, **34(2)**: 499.
- [6] NAGUIB M, KURTOGLU M, PRESSER V, *et al.* Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 . *Advanced Materials*, 2011, **23(37)**: 4248.
- [7] SHEKHIREV M, SHUCK C E, SARYCHEVA A, *et al.* Characterization of MXenes at every step, from their precursors to single flakes and assembled films. *Progress in Materials Science*, 2021, **120**: 100757.
- [8] LI X, HUANG Z, SHUCK C E, *et al.* MXene chemistry, electrochemistry and energy storage applications. *Nature Review Chemistry*, 2022, **6(6)**: 389.
- [9] HAN M, MALESKI K, SHUCK C E, *et al.* Tailoring electronic and optical properties of MXenes through forming solid solutions. *Journal of the American Chemical Society*, 2020, **142(45)**: 19110.
- [10] LI M, HUANG Q. Recent progress and prospects of ternary layered carbides/nitrides MAX phases and their derived two-dimensional nanolaminates MXenes. *Journal of Inorganic Materials*, 2020, **35(1)**: 1.
- [11] XU X, GUO T, LANZA M, *et al.* Status and prospects of MXene-based nanoelectronic devices. *Matter*, 2023, **6(3)**: 800.
- [12] LIPATOV A, LU H, ALHABEB M, *et al.* Elastic properties of 2D $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene monolayers and bilayers. *Science Advances*, 2018, **4(6)**: eaat0491.
- [13] ZHANG D, SHAH D, BOLTASSEVA A, *et al.* MXenes for photonics. *ACS Photonics*, 2022, **9(4)**: 1108.
- [14] MAUCHAMP V, BUGNET M, BELLIDO E P, *et al.* Enhanced and tunable surface plasmons in two-dimensional Ti_3C_2 stacks: electronic structure versus boundary effects. *Physical Review B*, 2014, **89(23)**: 235428.
- [15] ZHAO T, XIE P, WAN H, *et al.* Ultrathin MXene assemblies approach the intrinsic absorption limit in the 0.5–10 THz band. *Nature Photonics*, 2023, **17(7)**: 622.
- [16] HAN M, ZHANG D, SHUCK C E, *et al.* Electrochemically modulated interaction of MXenes with microwaves. *Nature Nanotechnology*, 2023, **18 (4)**: 373.
- [17] HAN M, GOGOTSI Y. Perspectives for electromagnetic radiation protection with MXenes. *Carbon*, 2023, **204**: 17.
- [18] HAN M, ZHANG D, SINGH A, *et al.* Versatility of infrared properties of MXenes. *Materials Today*, 2023, **64**: 31.
- [19] YUN T, KIM H, IQBAL A, *et al.* Electromagnetic shielding of monolayer MXene assemblies. *Advanced Materials*, 2020, **32(9)**: 1906769.
- [20] UZUN S, HAN M, STROBEL C J, *et al.* Highly conductive and scalable $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -coated fabrics for efficient electromagnetic interference shielding. *Carbon*, 2021, **174**: 382.
- [21] ZHANG Y Z, WANG Y, JIANG Q, *et al.* MXene printing and patterned coating for device applications. *Advanced Materials*, 2020, **32(21)**: 1908486.
- [22] YUN T, LEE G S, CHOI J, *et al.* Multidimensional $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene architectures via interfacial electrochemical self-assembly. *ACS Nano*, 2021, **15 (6)**: 10058.
- [23] LI Y, XIONG C, HUANG H, *et al.* 2D $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXenes: visible black but infrared white materials. *Advanced Materials*, 2021, **33(41)**: 2103054.
- [24] LU F, SHI D, TAN P, *et al.* A novel infrared electrochromic device based on $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene. *Chemical Engineering Journal*, 2022, **450**: 138324.
- [25] DILLON A D, GHIDIU M J, KRICK A L, *et al.* Highly conductive optical quality solution-processed films of 2D titanium carbide. *Advanced Functional Materials*, 2016, **26(23)**: 4162.
- [26] HAN M, SHUCK C E, SINGH A, *et al.* Efficient microwave absorption with $\text{V}_{n+1}\text{C}_n\text{T}_x$ MXenes. *Cell Reports Physical Science*, 2022, **3(10)**: 101073.
- [27] LI L, SHI M, LIU X, *et al.* Ultrathin titanium carbide (MXene) films for high-temperature thermal camouflage. *Advanced Functional Materials*, 2021, **31(35)**: 2101381.
- [28] DENG Z, LI L, TANG P, *et al.* Controllable surface-grafted MXene inks for electromagnetic wave modulation and infrared anti-counterfeiting applications. *ACS Nano*, 2022, **16(10)**: 16976.
- [29] CAI G, CIOU J H, LIU Y, *et al.* Leaf-inspired multiresponsive MXene-based actuator for programmable smart devices. *Science Advances*, 2019, **5(7)**: eaaw7956.
- [30] CHEN Y H, LI J, REN M L, *et al.* Direct observation of amplified spontaneous emission of surface plasmon polaritons at metal/dielectric interfaces. *Applied Physics Letters*, 2011, **98(26)**: 261912.
- [31] BARNES W L, DEREUX A, EBBESEN T W. Surface plasmon subwavelength optics. *Nature*, 2003, **424**: 824.
- [32] COLIN-ULLOA E, FITZGERALD A, MONTAZERI K, *et al.* Ultrafast spectroscopy of plasmons and free carriers in 2D MXenes. *Advanced Materials*, 2023, **35(8)**: e2208659.
- [33] EL-DEMELLAWI J K, LOPATIN S, YIN J, *et al.* Tunable multipolar surface plasmons in 2D $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene flakes. *ACS Nano*, 2018, **12(8)**: 8485.
- [34] CHAUDHURI K, ALHABEB M, WANG Z, *et al.* Highly broadband absorber using plasmonic titanium carbide (MXene). *ACS Photonics*, 2018, **5(3)**: 1115.
- [35] GHOUSSEUB M, XIA M, DUCHESNE P N, *et al.* Principles of photothermal gas-phase heterogeneous CO_2 catalysis. *Energy & Environmental Science*, 2019, **12(4)**: 1122.
- [36] ZHAO F, GUO Y, ZHOU X, *et al.* Materials for solar-powered water evaporation. *Nature Reviews Materials*, 2020, **5(5)**: 388.
- [37] ZHANG B, GU Q, WANG C, *et al.* Self-assembled hydrophobic/hydrophilic porphyrin- $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene Janus membrane for dual-functional enabled photothermal desalination. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2021, **13(3)**: 3762.
- [38] ZHANG B, WONG P W, GUO J, *et al.* Transforming $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene's intrinsic hydrophilicity into superhydrophobicity for efficient photothermal membrane desalination. *Nature Communications*, 2022, **13**: 3315.
- [39] LIN H, GAO S, DAI C, *et al.* A two-dimensional biodegradable niobium carbide (MXene) for photothermal tumor eradication in NIR-I and NIR-II biowindows. *Journal of the American Chemical Society*, 2017, **139(45)**: 16235.
- [40] CHENG P, WANG D, SCHAAF P. A review on photothermal conversion of solar energy with nanomaterials and nanostructures: from fundamentals to applications. *Advanced Sustainable Systems*, 2022, **6(9)**: 2200115.
- [41] XU D, LI Z, LI L, *et al.* Insights into the photothermal conversion of 2D MXene nanomaterials: synthesis, mechanism, and applications. *Advanced Functional Materials*, 2020, **30(47)**: 2000712.
- [42] FAN X, LIU L, JIN X, *et al.* MXene $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ for phase change composite with superior photothermal storage capability. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, **7(23)**: 14319.
- [43] YANG X, LAN L, LI L, *et al.* Collective photothermal bending of flexible organic crystals modified with MXene-polymer multilayers as optical waveguide arrays. *Nature Communications*, 2023, **14**: 3627.
- [44] XI D, XIAO M, CAO J, *et al.* NIR light-driving barrier-free group rotation in nanoparticles with an 88.3% photothermal conversion

- efficiency for photothermal therapy. *Advanced Materials*, 2020, **32(11)**: 1907855.
- [45] ZHAO X, WANG L Y, TANG C Y, *et al.* Smart $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ MXene fabric with fast humidity response and Joule heating for healthcare and medical therapy applications. *ACS Nano*, 2020, **14(7)**: 8793.
- [46] BA K, WANG J. Advances in solution-processed quantum dots based hybrid structures for infrared photodetector. *Materials Today*, 2022, **58**: 119.
- [47] ROGALSKI A, ANTOSZEWSKI J, FARAONE L. Third-generation infrared photodetector arrays. *Journal of Applied Physics*, 2009, **105(9)**: 091101.
- [48] TANG J, WAN H, CHANG L, *et al.* Tunable infrared sensing properties of MXenes enabled by intercalants. *Advanced Optical Materials*, 2022, **10(17)**: 2200623.
- [49] HU C, CHEN H, LI L, *et al.* $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 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.
- [50] LIU Z, EL-DEMELLAWI J K, BAKR O M, *et al.* Plasmonic Nb_2CT_x MXene-MAPbI₃ heterostructure for self-powered visible-NIR photodiodes. *ACS Nano*, 2022, **16(5)**: 7904.
- [51] MALESKI K, SHUCK C E, FAFARMAN A T, *et al.* The broad chromatic range of two-dimensional transition metal carbides. *Advanced Optical Materials*, 2020, **9(4)**: 2001563.
- [52] HART J L, HANTANASIRISAKUL K, LANG A C, *et al.* Control of MXenes' electronic properties through termination and intercalation. *Nature Communications*, 2019, **10**: 522.
- [53] NGUYEN T T, MURALI G, PATEL M, *et al.* MXene-integrated metal oxide transparent photovoltaics and self-powered photodetectors. *ACS Applied Energy Materials*, 2022, **5(6)**: 7134.
- [54] XU H, REN A, WU J, *et al.* Recent advances in 2D MXenes for photodetection. *Advanced Functional Materials*, 2020, **30(24)**: 2000907.