

# MXetronics—MXene 电子学

徐向明, Husam N ALSHAREEF

(阿卜杜拉国王科技大学, 图瓦 23955-6900, 沙特阿拉伯)

**摘 要:** 超薄的过渡金属碳氮化合物 MXenes, 作为一大类新兴二维(2D)材料, 是当前材料研究热点方向之一。自 2D 材料发现至今已有近 20 年, 以石墨烯、过渡金属硫族化合物、黑磷等为代表的 2D 材料在微纳电子领域经历了相对广泛且深入的研究, MXenes 自 2011 年诞生以来在微纳电子领域的研究也方兴未艾。MXenes 拥有丰富的元素结构组成和独特的物理化学特性(表面亲水性、功函可调、官能团可调、电和离子快速传输特性、表面离子激发、光热电、电磁吸收等), 使其在微纳电子领域具有潜在的应用前景。Alshareef 课题组近几年致力于将 MXene 引入到微纳电子领域, 并在 2019 年用 MXetronics 来定义 MXene 电子学这一新兴的学术领域。本文简要总结和评价了该领域的代表性进展, 梳理了包括微电子级的合成、加工、物性探索和器件应用等方面面临的挑战, 最后指出一些关键的研究方向和尚未探索的细分领域。

**关 键 词:** MXenes; 微纳电子; 薄膜; 微纳加工; 合成; 晶体管; 专题评述

中图分类号: O646 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2024)02-0171-08

## Perspective of MXetronics

XU Xiangming, Husam N ALSHAREEF

(King Abdullah University of Science & Technology, Thuwal 23955-6900, Saudi Arabia)

**Abstract:** Atomic-thin transition metal carbonitrides (MXenes), as an emerging class of two-dimensional (2D) materials, become a highly active research topic. Since the discovery of graphene nearly 20 years ago, many 2D materials (graphene, transition metal dichalcogenides, and black phosphorus) have been extensively studied in the field of micro-nano electronics. However, research on MXenes-based micro-nano electronics has just begun. MXenes exhibit rich elemental compositions and unique physicochemical properties, such as hydrophilicity, tunable work function, adjustable functional groups, fast ion and electron transport, superconductivity, surface plasmons, photo-thermo-electricity, and electromagnetic absorption, and some MXenes even possess high conductivity. These characteristics make MXenes hold great potential for device applications at the microscale or even nanoscale. In recent years, the Alshareef research group has been dedicated to bringing MXenes into the field of micro-nano electronics and has defined the emerging academic field of MXene electronics, known as MXetronics, in 2019. This perspective briefly summarizes and evaluates representative research progress in this field, including the challenges in synthesis, processing, property investigation, and device applications at the microelectronic level. Furthermore, we will propose several key research directions and unexplored subfields in this area.

**Key words:** MXenes; nano-electronics; thin film; nanofabrication; synthesis; transistor; perspective

收稿日期: 2023-07-17; 收到修改稿日期: 2023-08-13; 网络出版日期: 2023-08-31

作者简介: 徐向明(1989–), 男, 博士. E-mail: xiangming.xu@kaust.edu.sa

XU Xiangming (1989–), male, PhD. E-mail: xiangming.xu@kaust.edu.sa

通信作者: Husam N ALSHAREEF, professor. E-mail: husam.alshareef@kaust.edu.sa

材料科学和先进制造工艺是推动现代信息技术发展的基石。集成电路的制造涉及到大量不同种类材料,如金属材料、半导体材料和绝缘材料等。自 2004 年发现石墨烯以来<sup>[1]</sup>,人们普遍认为原子级超薄的二维材料将会全面革新微纳电子领域。MXenes-超薄过渡金属碳氮化合物,是一类新兴的二维材料,在微纳电子领域引起了广泛关注<sup>[2-3]</sup>。MXene 独特的物性,丰富的元素和结构组成,以及最近被验证的微纳加工兼容性,使其在设计新型器件方面具有潜在前景。本文将总结 MXetronics (MXene 电子学)最新研究进展并对该领域面临的挑战、研究重点和关键课题进行梳理,讨论内容涉及电子器件相关的 MXenes 材料合成、性质、加工以及代表性器件类型,如图 1 概括<sup>[2]</sup>。关于合成,将讨论常用的湿法化学刻蚀、熔融盐刻蚀、CVD 直接生长以及基于 MXene 的衍生物材料。关于性质,将讨论 MXene 功函数、快速导电子离子特性以及等离子体激元。关于加工,重点讨论 MXene 的常规印刷技术、薄膜制备和微纳加工方法。关于 MXene 电子应用涉及到宏观和微纳电子器件,限于篇幅,将重点讨论 MXene 基的微纳电子器件和集成。在合成、性质、加工和应用四个环节上,均会讨论 MXene 的发展现状、重点研究方向和面临的挑战。

## 1 MXenes 结构和物性

图 2(a)展示了代表性的 MXenes  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的晶格结构。它是一类具有范德华间距的层状材料,和其母相 MAX 层状结构的不同之处在于 MAX 并不具备层间范德华间距。MXene  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  范德华层内由三

层过渡金属原子面、两层碳原子面、两层表面官能团原子面组成,相互以共价键结合。其中,一层碳原子夹在两层金属原子之间,形成金属-碳(氮)共价键;而表面官能团原子层和金属也以共价键结合。与其他类型 MXenes 的区别在于不同的碳(氮)层数和金属层数或者金属元素。正是这样的结构赋予 MXenes 独特的快速导电子离子特性。碳(氮)-金属层具有良好的导电特性,目前报道的导电性最好的是 MXene  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ,其电导率在优化合成加工条件下可以高于  $20000 \text{ S/cm}$ ;而表面官能团使 MXene 表面具备良好的亲水性,进而使快速导通范德华空隙层离子成为可能。正是这种独特的结构使其和其他具有范德华层的二维材料(包括石墨烯、氮化硼和过渡金属硫族化合物)的物理化学性质有本质区别。Sinitski 组的研究发现,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene 具有比较高的电流承载能力,其击穿电流密度可达  $1.2 \times 10^8 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ <sup>[9]</sup>,他们还发现  $\text{Nb}_4\text{C}_3\text{T}_x$  也能承载同等量级的电流密度<sup>[10]</sup>。图 2(b)对比发现其性能优于大多数半导体和金属(包括现在芯片互联常用的铜金属),和石墨烯的击穿电流密度相匹敌,预示着其在高压电子和芯片互联领域的应用潜力<sup>[4]</sup>。MXenes 作为一大类材料体系,多数 MXenes 除了体现出金属性质以外,部分 MXenes(比如  $\text{Sc}_2\text{CT}_x$ )被预测通过调控表面官能团可以具有半导体性质(图 2(c)),且其半导体能带结构会随着表面基团的变化而变化<sup>[5]</sup>。北京理工大学沈国震课题组<sup>[11-12]</sup>最近尝试使用苯磺酸基( $-\text{pHSO}_3\text{H}$ )和十二烷基( $-\text{C}_{12}\text{H}_{26}$ )修饰打开 MXene  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  的带隙,并将其应用于光电探测器。然而,对于半导体性质的 MXene 还有很大探索空间,以实现其匹配甚至超过其他半导体二维材料的器件性能。调控表面官能团还可以赋予常规金属型  $\text{Nb}_2\text{CT}_x$  MXene 独特的超导性质,如图 2(d)所示,将表面基团从  $=\text{O}$  端基置换成  $=\text{S}$  或者  $=\text{Se}$ ,就可以测出其在  $10 \text{ K}$  以下低温环境中的零电阻转变现象<sup>[6]</sup>。然而 MXene 超导现象目前主要还是基于块状或者粉体样品的表征,而其他二维超导材料均已实现基于单个纳米片的本征物性表征。因此进一步研究 MXene 的超导特性需要制备基于单片 MXene 的微纳电子器件。表面官能团还能极大地影响 MXene 的功函数调控,如图 2(e)的理论计算结果,其功函数范围在  $2 \sim 8 \text{ eV}$ ,这覆盖了所有单质金属元素的功函数范围<sup>[7]</sup>,使 MXene 在制备涉及到肖特基或者欧姆结的电子器件中具备宽范围调控电子注入能垒的潜力。然而,近期多数的研究结果仅报道了一个电子伏特范围内的 MXene 功函数调控,进一步扩大 MXene 功函数调控范围需要更

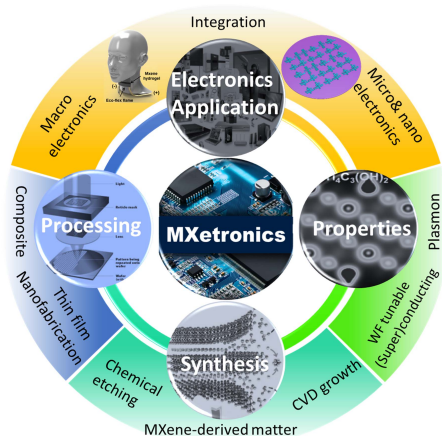


图 1 MXene 电子学(MXetronics)概图<sup>[2]</sup>

Fig. 1 Schematic diagram of MXetronics<sup>[2]</sup>

From properties, synthesis, and processing of MXenes to their applications in macro & micro & nano electronics

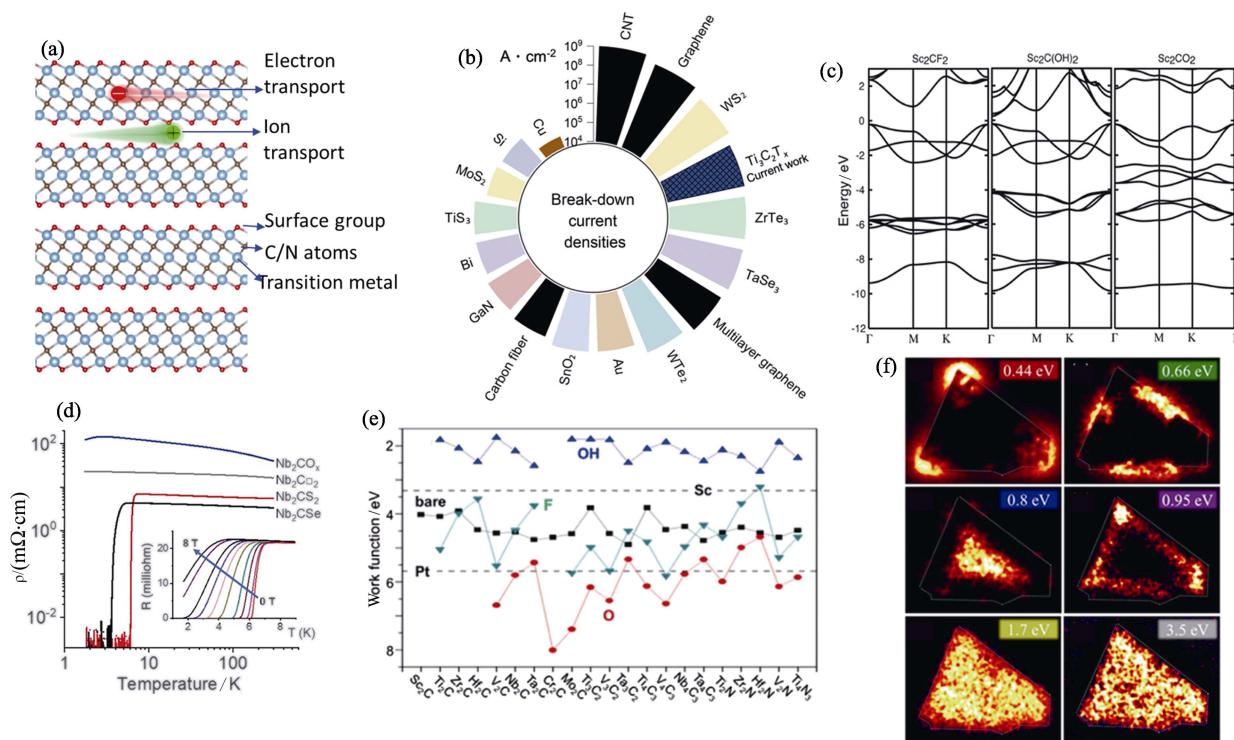


图2 MXenes 的结构和物性

Fig. 2 Structure and physical properties of MXenes

(a) Lattice structure of representative MXene  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  showing fast electron and ion transport; (b) Breakdown current of  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  compared with the other metals and semiconductors<sup>[4]</sup>; (c) Semiconductive MXene  $\text{Sc}_2\text{CT}_x$  with different surface groups ( $-\text{F}$ ,  $-\text{OH}$ ,  $=\text{O}$ )<sup>[5]</sup>; (d) Low-temperature properties of  $\text{Nb}_2\text{CT}_x$  MXene with different surface groups,  $\text{Nb}_2\text{CS}_2$  and  $\text{Nb}_2\text{CSe}_2$  showing the superconductive transition<sup>[6]</sup>; (e) Calculated work function of various MXenes with different surface groups<sup>[7]</sup>; (f) EELS mappings showing MXene with different light response phenomena, which is surface plasmonic effect, including inter-band transition mode, transversal and longitudinal surface plasmons modes<sup>[8]</sup>

多的实验探索。MXene 还显示出独特的等离子激元特性, Alshareef 组<sup>[8]</sup>使用超高分辨率的电子能量损失光谱(HREELS)研究了  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  纳米片的表面等离子基元的空间和能量分布, 如图 2(f)所示, 发现其横向纵向的等离子激元和价带内带间跃迁现象。MXene 等离子激元现象反映出其在光电器件领域的应用潜力。

## 2 MXenes 合成方式

MXene 的合成方式直接影响其物理化学性质相关的研究, 并从根本上决定了其后续薄膜制备和器件加工的工艺。MXene 合成主要有三种方法: 1) 含氟酸溶液刻蚀+插层(图 3(a))<sup>[3]</sup>; 2) 熔融盐刻蚀+插层(图 3(b))<sup>[13]</sup>; 3) 化学气相沉积(CVD)方式直接生长(图 3(c))<sup>[14]</sup>。

**方法 1)** 最早用于二维 MXene 纳米片的制备, 并成为目前最为主流的 MXene 合成方法, 且绝大多数的 MXene 电子器件是基于这一方法获得的。其大致流程如图 3(a)所示: 首先将 MAX 相放入含有氟离子的强酸溶液中, 打断  $\text{M}-\text{A}$  金属键, 刻蚀掉  $\text{Al}$

原子层, 形成新的金属-表面官能团( $\text{M}-\text{T}_x$ )化合键, 从而形成表面官能团结构, 而  $\text{M}-\text{X}$  化合键几乎不受影响。获得具有范德华层 MXene 结构后, 需要在 MXene 范德华层间插入  $\text{Li}^+$ (或者  $\text{TMA}^+$ ,  $\text{TBA}^+$ ), 然后通过超声等机械振动和多次清洗获得相互分离的单层或者少层 MXene 分散纳米片<sup>[3]</sup>。该方法的合成产率相对最高, 换言之, 可以最充分地将 MAX 相转变成分散的单层或少层 MXene 纳米片, 且其平均横向尺寸也最大, 因此适合用于制备各种薄膜或者单片电子器件。然而其表面官能团通常是多种元素(主要是  $=\text{O}$ ,  $-\text{F}$ ,  $-\text{OH}$ )随机分布, 调控幅度小, MXene 表面缺陷相对较多, 合成过程中如果涉及到的强腐蚀性的氢氟酸会比较危险。

**方法 2)** 将高温熔融的路易斯酸盐作为高温刻蚀剂刻蚀掉 MAX 相中的 A 原子层, 在产生 MXene 范德华间隙的同时引入表面官能团。其少层或者单层的分散二维纳米片也是通过类似方法 1)的插层或者机械晃动的方式实现剥离<sup>[13]</sup>。熔融盐刻蚀能相对较好地实现表面官能团单一性和均匀性, 目前可以实现的表面官能团有  $-\text{Cl}$ ,  $-\text{NH}$ ,  $-\text{Br}$ ,  $-\text{I}$ ,  $=\text{S}$ ,  $=\text{Se}$ ,  $=\text{O}$ 。也正是通过精确控制表面官能团成功实现了

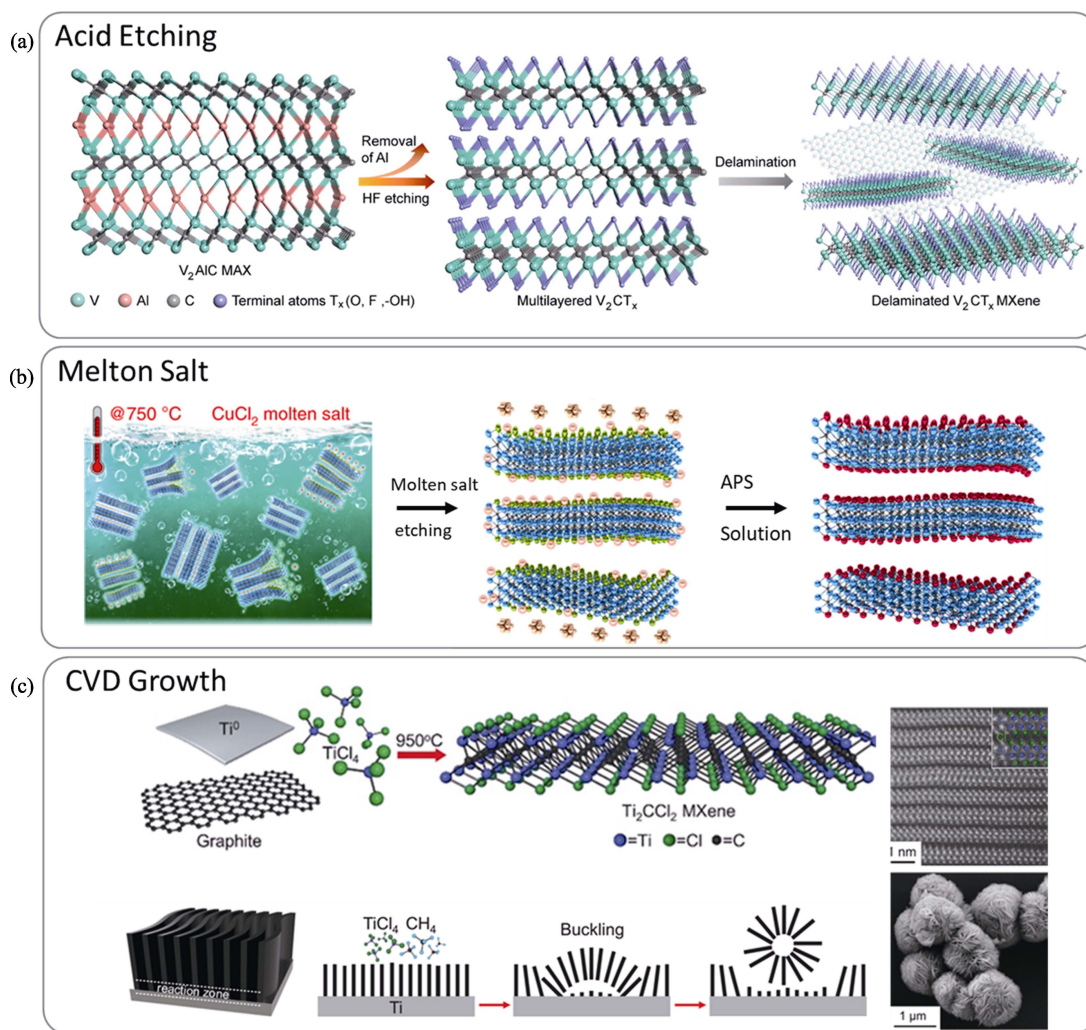


图 3 合成 MXene 的三种方法

Fig. 3 Three methods to synthesize MXenes

(a) Aqueous acid etching<sup>[15]</sup>, (b) Molten salt etching<sup>[13]</sup>, (c) Direct CVD growth<sup>[14]</sup>

MXene 低温超导特性<sup>[6]</sup>。这直接反映了表面官能团调控工程对 MXene 改性的重要意义。但是熔融盐获得 MXene 插层相对困难, 单层或少层纳米片的产率比较低, 横向尺寸也比较小, 目前很少使用基于熔融盐法合成的 MXene 制备微纳电子器件。

**方法 3)** 2023 年报道的直接通过化学气相沉积的方式生长出 MXene 结构, 采用该方法成功生长出  $Ti_2CCl_2$  和  $Ti_2NCl_2$  的 MXene 结构。Talpin 课题组<sup>[14]</sup>首先验证了直接合成 MXene 结构的可能性, 将钛粉和石墨粉按一定比例充分混合后, 在  $TiCl_4$  气氛下充分反应 20 min, 便直接获得具有范德华间隙层和均一表面官能团  $Ti_2CCl_2$  的 MXene 结构。进一步将 Ti 金属片置放于  $CH_4/TiCl_4/Ar(N_2/TiCl_4/Ar)$  的混合载气中生长出花状 MXene 结构。这项工作首次证明了直接 CVD 生长带有范德华晶格且具备表面官能团 MXene 的可能性。其他二维材料的 CVD 生长极大地促进了它们在光电器件物理领域的研究

进展, 即使目前尚未出现制备和研究 CVD-MXene 物理器件的工作, MXene CVD 的成功验证也将进一步提高 MXetronics 的研究热度。目前 CVD 直接生长的 MXene 主要呈粉末状, 尽管透射电子显微镜 (TEM) 观察到其具有范德华晶格堆叠的二维结构, 却未获得分立的二维纳米片形貌, 这是制备 CVD-MXene 基微纳电子器件的主要限制性因素。因此 CVD-MXene 的下一步研究重点在于生长高质量单晶纳米片, 为了实现这一目标需要更多课题组参与和大量试错实验, 一旦实现将有利于探索基于微纳器件平台的 MXenes 的物性。

### 3 MXenes 微纳加工

制备 MXene 电子器件的前提是 MXene 的微纳加工工艺可靠。由于目前绝大部分应用于微纳电子器件的 MXene 都是通过酸溶液刻蚀方式合成(图 3(a)),

因此这里讨论 MXene 加工也都是基于酸刻合成的 MXene 纳米片悬浮液。根据加工精度的区别, 将 MXene 加工分成两类讨论(如图 4 所示): 一类是常规的 MXene 打印技术(图 4(a))<sup>[16]</sup>; 另一类是基于薄膜的高精度微纳加工技术(图 4(b))<sup>[1]</sup>。常规的几类打印技术可以实现 MXene 百微米级的图案化精度, 尽管不同打印技术的精度存在一定差异。常见的打印技术分为喷墨打印、3D 打印、丝网印刷、转移印刷、光罩板和激光辅助的 MXene 薄膜图案化技术等。若想将一类材料引入到微纳电子器件和集成领域, 高质量超薄薄膜(通常 100 nm 以下)制备和高精度图案化工艺(通常亚微米至纳米级)是非常必要的。目前 MXene 微纳电子应用研究的发展得益于相关微纳加工技术的初步验证。

与微纳加工兼容的 MXene 薄膜工艺主要有: 旋涂、喷涂和浸涂, 其中最常用的喷涂在制膜效率、大尺寸基底以及厚度控制上具备较为明显的优势; 旋涂和浸涂在表面平整度上具备一定优势, 但受限于基底尺寸。另外, 三种制膜技术均要求对基底进行亲水性处理, 通常利用紫外臭氧或者氧等离子进行表面处理, 这限制了 MXene 在较为敏感的疏水半导体基底(硅和二硫化钼( $\text{MoS}_2$ ))等)上的高质量连续成膜。Alshareef 组<sup>[17]</sup>利用 MXene 的富电子特性对  $\text{MoS}_2$  基底进行表面极化, 实现了较强的 MXene- $\text{MoS}_2$  范德华吸附, 开发的先进改良滴铸方式(MDC)不需要对  $\text{MoS}_2$  基底做任何预处理, 直接在疏水  $\text{MoS}_2$  表面成功实现了大面积均匀成膜, 膜厚控制可达 10 nm。

在获得高质量超薄 MXene 薄膜后, 需要对其进行高精度图案化加工, 进而制备高密度集成电子器件。图 4(b)总结了四种图案化加工方式: 光刻+干法刻蚀、光刻+剥离、选择性表面处理+旋涂和微接触纳米印刷。基于光刻+干法刻蚀的技术是最有潜力的, 可以实现超高精度的 MXene 图案化工艺, 目前报道的图案精度达到 400 nm 级, 而其他三种工艺的精度在 5  $\mu\text{m}$  左右。和其他二维材料类似, MXene 薄膜的高精度图案化工艺也会涉及到随机性的薄膜脱落, 这会破坏微纳加工的可靠性。对 MXene 薄膜进行一定的预处理增加其与基底范德华黏附, 可降低微纳加工过程中的膜脱落现象<sup>[23]</sup>。

## 4 MXetronics 微纳器件

MXene 高精度微纳加工可行性经过初步验证后, 得益于此, MXene 微纳电子器件相关研究成果也在逐渐增多。图 5 列举了几个具有代表性的基于 MXene 的微纳电子器件。我们课题组将 MXene 应用于晶体管器件开展了一系列工作<sup>[17-24]</sup>。为了验证  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene 薄膜在标准微纳加工工艺过程中的可靠性, 采用 MXene 薄膜做源/漏/栅电极, 氧化铝/氧化钪做绝缘介电层, 自行生长的英寸级的  $\text{MoS}_2$  半导体做沟道<sup>[25-28]</sup>, 通过复杂的五步光罩工艺流程制备了顶栅超薄的薄膜晶体管集成电路(如图 5(a)所示), 在实验室条件下获得了优异的微纳加工可靠性和器件良率<sup>[23]</sup>。此外, 我们还将  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene 栅极和宽禁带半导体氮化镓 GaN 形成理想范德华界面的肖

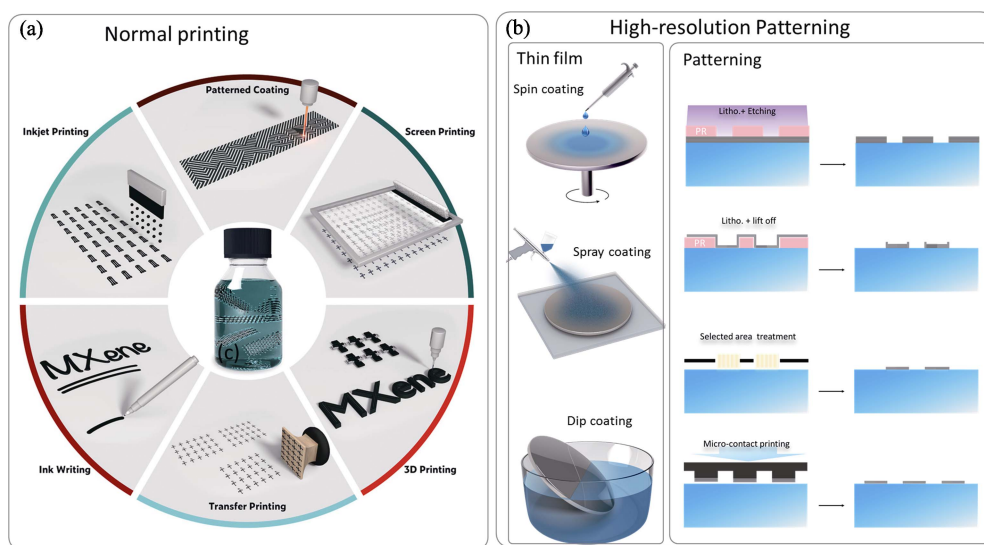


图 4 MXene 常规打印和高精度图案化工艺

Fig. 4 Normal printing and high-resolution processing of MXenes

(a) Various printing technologies to be used for MXene low-resolution patterning, usually above hundreds micrometer scale<sup>[16]</sup>; (b) MXene thin film processing and high-resolution patterning techniques<sup>[1]</sup>

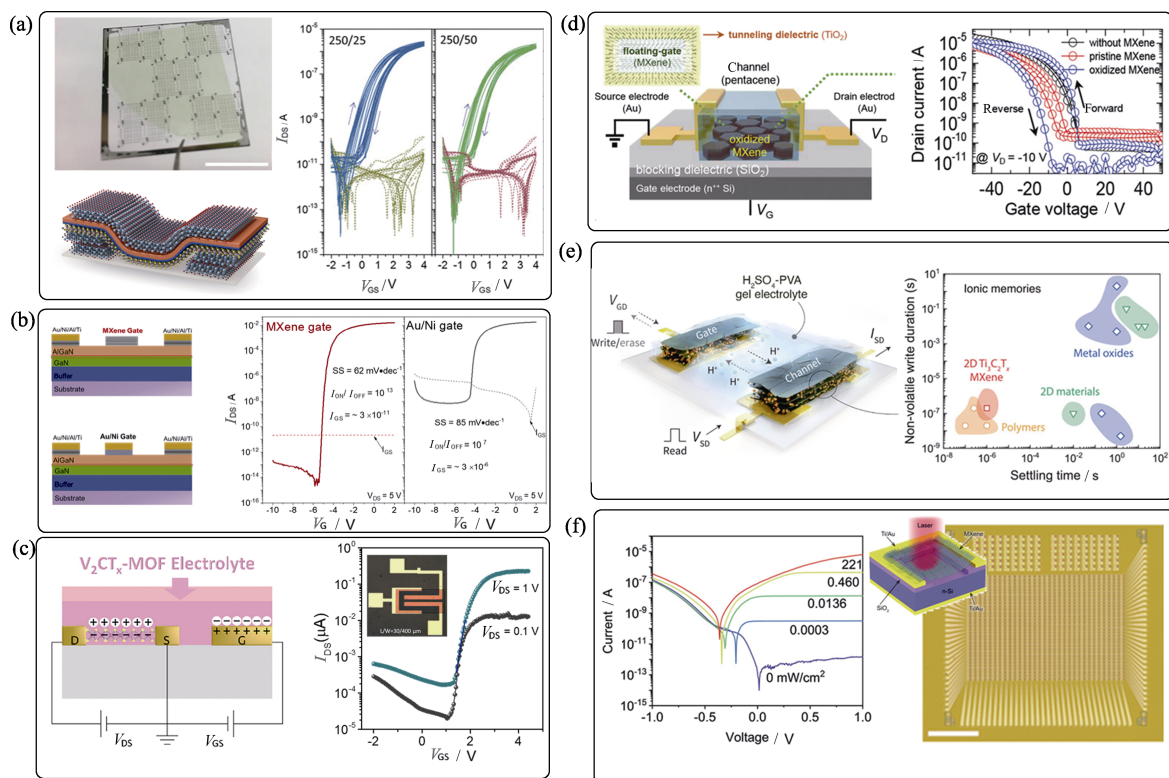


图 5 基于 MXene 的微纳电子器件和集成

Fig. 5 MXene-based micro or nanoelectronic devices and their integration

(a)  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene as source/drain/gate contact in 2D nano-electronics<sup>[28]</sup>; (b)  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene-gate for high-performance GaN high-electron-mobility transistors (HEMTs)<sup>[24]</sup>; (c) HEMTs MXene-derived MOF as the patternable ionic gate in  $\text{MoS}_2$  electron-double layer transistor<sup>[21]</sup>; (d) Partially oxidized  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  as floating gate in flash memory transistor<sup>[29]</sup>; (e)  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene as the channel in electron-double layer transistor for synaptic devices<sup>[30]</sup>; (f)  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene-Si Schottky diode array as image sensor<sup>[31]</sup>

特基结, 使 MXene 栅极对 GaN 高迁移率晶体管 (HEMTs) 沟道中的二维电子气具备极好的电场控制能力, 进而获得了该类器件破纪录的开关电流比 ( $10^{13}$ ) 和接近理论极限的亚阈值摆幅 ( $61 \text{ mV} \cdot \text{dec}^{-1}$ ), 远优于常用的传统金属电极 (图 5(b))<sup>[24]</sup>。除了将 MXene 用作接触电极, 我们还利用  $\text{V}_2\text{CT}_x$  MXene 作为金属前驱体, 制备了高质量的金属有机框架 (MOFs) 的纳米级薄膜, 验证了其微纳加工可行性并将其作为离子栅应用于双电层电化学晶体管器件 (图 5(c))<sup>[21]</sup>。

不仅仅应用于晶体管, MXene 在存储器、传感器、类脑计算元器件等各类微纳器件中均展现出独特的功能。图 5(d~f) 重点示出了 MXene 在闪存、突触晶体管和光电成像器件中的应用。Choi 课题组<sup>[29]</sup>将多层  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  纳米片进行半氧化, 形成二维  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ - $\text{TiO}_2$  核壳结构,  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  核层作为浮栅,  $\text{TiO}_2$  核壳作为绝缘隧穿层, 成功制备了具有浮栅结构的闪存器件, MXene 浮栅可以有效地限域空穴载流子, 从而实现其存储功能 (图 5(d))。Hamed 课题组<sup>[30]</sup>通过将  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  和三(3-氨基丙基)胺复合后用其作为可快速传输电子离子的氧化还原沟道层, 制备了具有神

经突触功能的电化学存储器, 验证了其性能的可靠性和高温稳定性, 以及和硅基电子后端工艺制程 (BEOL) 的兼容性。孙东明课题组<sup>[31]</sup>通过标准的半导体微纳加工工艺将  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  和硅形成垂直结构的肖特基异质结, 实现了晶圆级的超像素密度的光电探测器阵列, 该器件表现出出色的均匀性和高分辨成像能力, 如图 5(f) 所示。

目前 MXene 基电子器件的相关研究大多数利用其良好的导电性、快速导离子特性以及功函数可调性。MXene-半导体肖特基异质结充分体现了 MXene 独特优势, 但 MXene-半导体欧姆结的相关研究相对少见。此外, MXene 的电导率在电场控制下的变化幅度依然远小于其他二维半导体材料, 换言之, MXene 基半导体尚待实验充分验证。

## 5 MXene 电子学展望

MXene 在宏观电子器件领域的应用充分显示出其独特的潜力, 然而在微纳电子器件领域, MXene 的相关研究仍然处于早期阶段, 尽管已初步显示出其应用潜力, 却在物性挖掘、微电子级合成、

微纳加工以及器件应用上仍然面临着诸多的挑战。图6概括显示了MXene电子学相关的重点研究方向。

在MXene物性探索方面, MXene结构的半导体性质仅被理论预测, 尚未得到实验充分验证, 主要难点在于没有合适的选择性化学刻蚀MAX的方法, 相关工作一旦取得实质性突破, 必将从根本上扩展MXetronics的发展; 其次, MXene的表面官能团的精准工程化和功函数宽范围调控潜力远未充分挖掘, 熔盐合成方法相对而言更容易实现MXenes表面官能团的单一化, 但是合成的MXene纳米片尺寸小、合成产率低。基于MXene-半导体的异质结多体现为肖特基类型, MXene欧姆接触虽已被理论预测, 但尚未能通过实验验证。

在合成方面, 1) 基于水系酸刻蚀的MXene已经初步达到微电子级, 然而截至目前, 绝大多数研究只是基于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的MXene结构, 其他类型的MXene的微电子级应用尚待开发。2) 基于熔融盐的MXene虽然可以使合成MXene具备更加可控的表面官能团结构, 有助于挖掘MXene新的物理性质, 但是其尚未被用于制备微纳级的电子器件。3) 通过CVD直接生长出MXene范德华结构虽然最近才得到验证, 但极有可能为MXene的本征物性研究以及MXene电子学的相关研究提供途径, CVD MXene生长的重点将是单晶二维纳米片以及晶圆级单晶膜。此外, 基于MXene前驱体合成其他新兴微电子材料也将是研究的重点。

MXene微纳加工的可靠性已经得到初步验证, 但其加工精度目前处于百纳米级, 微缩MXene必然

要求进一步提高MXene的加工精度。目前仅仅是 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 的MXene结构经历了微纳加工工艺的开发, 其他类型的MXene还有待验证。MXene的稳定性也是MXetronics器件制备过程中不可忽视的难题, 通常而言, MXene薄膜稳定性要好于MXene的水悬浮液。通过合成更高质量的MXene或者表面钝化MXene可以进一步提升MXene稳定性。

MXene的器件应用将会进一步多样化, 包括但不限于晶体管、二极管、忆阻器、传感器、神经突触以及超导量子器件等。随着MXene物性的充分挖掘、合成方式的进一步发展以及精细加工的充分验证, MXetronics电子器件的应用研究将会呈现出蓬勃发展的趋势。

## 参考文献:

- [1] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, **306**(5696): 666.
- [2] XU X, GUO T, LANZA M, *et al.* Status and prospects of MXene-based nanoelectronic devices. *Matter*, 2023, **6**(3): 800.
- [3] NAGUIB M, KURTOGLU M, PRESSER V, *et al.* Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of  $\text{Ti}_3\text{AlC}_2$ . *Advanced Materials*, 2011, **23**(37): 4248.
- [4] WANG H, YAO Z, ACAUAN L, *et al.* Toward MXene interconnects. *Matter*, 2021, **4**(5): 1447.
- [5] KHAZAEI M, ARAI M, SASAKI T, *et al.* Novel electronic and magnetic properties of two-dimensional transition metal carbides and nitrides. *Advanced Functional Materials*, 2013, **23**(17): 2185.
- [6] KAMYSBAYEV V, FILATOV A S, HU H, *et al.* Covalent surface modifications and superconductivity of two-dimensional metal carbide MXenes. *Science*, 2020, **369**(6506): 979.
- [7] LIU 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.
- [8] 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.
- [9] LIPATOV A, GOAD A, LOES M J, *et al.* High electrical conductivity and breakdown current density of individual monolayer  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene flakes. *Matter*, 2021, **4**(4): 1413.
- [10] LIPATOV A, LOES M J, VOROBEOVA N S, *et al.* High breakdown current density in monolayer  $\text{Nb}_4\text{C}_3\text{T}_x$  MXene. *ACS Materials Letters*, 2021, **3**(8): 1088.
- [11] HU C, WEI Z, LI L, *et al.* Strategy toward semiconducting  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ -MXene: phenylsulfonic acid groups modified  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  as photosensitive material for flexible visual sensory-neuromorphic system. *Advanced Functional Materials*, DOI: 10.1002/adfm. 202302188.
- [12] HU C, DU Z, WEI Z, *et al.* Functionalized  $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$  MXene with layer-dependent band gap for flexible NIR photodetectors. *Applied Physics Reviews*, 2023, **10**: 021402.
- [13] LI Y, SHAO H, LIN Z, *et al.* A general Lewis acidic etching route for preparing MXenes with enhanced electrochemical performance in non-aqueous electrolyte. *Nature Materials*, 2020, **19**(8): 894.
- [14] WANG D, ZHOU C, FILATOV A S, *et al.* Direct synthesis and chemical vapor deposition of 2D carbide and nitride MXenes. *Science*, 2023, **379**(6638): 1242.
- [15] WU H, ALMALKI M, XU X, *et al.* MXene-derived metal-organic

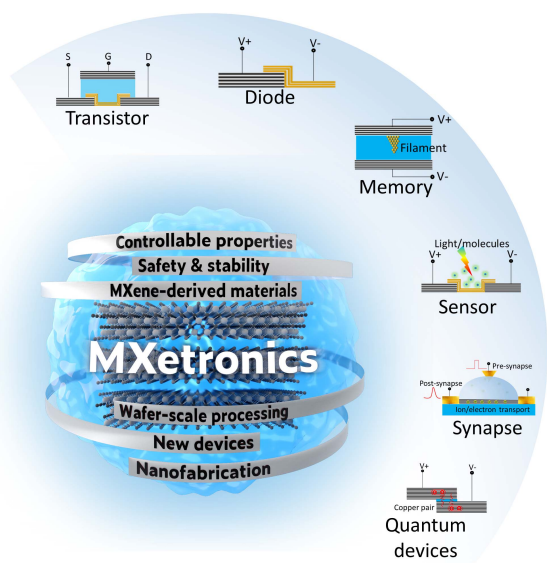


图6 MXene电子学展望

Fig. 6 Perspective of MXetronics

- frameworks. *Journal of the American Chemical Society*, 2019, **141(51)**: 20037.
- [16] ZHANG Y Z, WANG Y, JIANG Q, *et al.* MXene printing and patterned coating for device applications. *Advanced Materials*, 2020, **32(21)**: 1908486.
- [17] GUO T, XU X, LIU C, *et al.* Large-area metal-semiconductor heterojunctions realized via MXene-induced two-dimensional surface polarization. *ACS Nano*, 2023, **17(9)**: 8324.
- [18] WANG Z, KIM H, ALSHAREEF H N. Oxide thin-film electronics using all-MXene electrical contacts. *Advanced Materials*, 2018, **30(15)**: 1706656.
- [19] KIM H, WANG Z, ALSHAREEF H N. MXetronics: electronic and photonic applications of MXenes. *Nano Energy*, 2019, **60**: 179.
- [20] KIM H, ALSHAREEF H N. MXetronics: MXene-enabled electronic and photonic devices. *ACS Materials Letters*, 2019, **2(1)**: 55.
- [21] XU X, WU H, HE X, *et al.* Iontronics using  $V_2CT_x$  MXene-derived metal-organic framework solid electrolytes. *ACS Nano*, 2020, **14(8)**: 9840.
- [22] KIM H, NUGRAHA M I, GUAN X, *et al.* All-solution-processed quantum dot electrical double-layer transistors enhanced by surface charges of  $Ti_3C_2T_x$  MXene contacts. *ACS Nano*, 2021, **15(3)**: 5221.
- [23] XU X, GUO T, HOTA M K, *et al.* High-yield  $Ti_3C_2T_x$  MXene-MoS<sub>2</sub> integrated circuits. *Advanced Materials*, 2022, **34(48)**: 2107370.
- [24] WANG C, XU X, TYAGI S, *et al.*  $Ti_3C_2T_x$  MXene van der Waals gate contact for GaN high electron mobility transistors. *Advanced Materials*, **35**: 2211738.
- [25] XU X, WANG Z, LOPATIN S, *et al.* Wafer-scale quasi-single crystalline MoS<sub>2</sub> realized by epitaxial phase conversion. *2D Materials*, 2019, **6(1)**: 015030.
- [26] XU X, DAS G, HE X, *et al.* High-performance monolayer MoS<sub>2</sub> films at the wafer scale by two-step growth. *Advanced Functional Materials*, 2019, **29(32)**: 1901070.
- [27] XU X, ZHANG C, HOTA M K, *et al.* Enhanced quality of wafer-scale MoS<sub>2</sub> films by a capping layer annealing process. *Advanced Functional Materials*, 2020, **30(11)**: 1908040.
- [28] XU X, GUO T, KIM H, *et al.* Growth of 2D Materials at the wafer scale. *Advanced Materials*, 2022, **34(14)**: 2108258.
- [29] LYU B, CHOI Y, JING H, *et al.* 2D MXene-TiO<sub>2</sub> core-shell nanosheets as a data-storage medium in memory devices. *Advanced Materials*, 2020, **32(17)**: 1907633.
- [30] MELIANAS A, KANG M A, VAHIDMOHAMMADI A, *et al.* High-speed ionic synaptic memory based on 2D titanium carbide MXene. *Advanced Functional Materials*, 2022, **32(12)**: 2109970.
- [31] LI B, ZHU Q B, CUI C, *et al.* Patterning of wafer-scale MXene films for high-performance image sensor arrays. *Advanced Materials*, 2022, **34(17)**: 2201298.