

MXene Nanoparticle-based Conductive Inks: Structure, Synthesis, Properties, and Applications in Printed Electronics

Mehri Noroozi Tisseh, Morteza Behzadnasab*

Department of Paint and Surface Coatings Group, Iran Polymer and Petrochemical Institute, P. O. Box: 14965/115, Tehran, Iran.

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 22-12-2025

Accepted: 07-02-2026

Available online: 06-04-2026

Print ISSN: 1735-8779

Online ISSN: 2383-2169

DOI:10.30509/jcst.2026.167744.1279

Keywords:

Mxene

2D materials

Conductive inks

Printed electronics

Nanoparticles

ABSTRACT

Two-dimensional materials have revolutionized printable electronics, driven by their unique electronic and mechanical properties. MXenes are a novel family of two-dimensional transition-metal carbides, nitrides, and carbonitrides, arranged in chemically ordered or disordered structures across multiple atomic layers, with surface chemistry characterized by surface terminations. The first reported MXene, $Ti_3C_2T_x$, has proven to be an excellent candidate for formulating conductive inks and for promising inks printing applications, owing to its high electrical conductivity, tunable surface chemistry, excellent biocompatibility, and intrinsic hydrophilicity. The broad applications of these inks in advanced fields, particularly in printed, flexible, and wearable electronics, include printed circuits, highly sensitive and selective sensors, energy storage systems such as micro-supercapacitor electrodes and thin-film batteries, electromagnetic shielding, and biosensors. This paper reviews recent progress in the development of MXene inks, including synthesis procedures, ink formulation and performance, and printing methods. We further examine various printing techniques for fabricating precise conductive patterns with these inks, addressing prevailing challenges and exploring methods for improving the electrical conductivity of MXenes.

*Corresponding author: * M.Behzadnasab@ippi.ac.ir





جوهرهای رسانا مبتنی بر نانو ذرات مکسن: ساختار، سنتز، خواص و کاربرد در الکترونیک چاپی

مهروی نوروزی تیسه^۱، مرتضی بهزادنسب^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه رنگ و روکش‌های سطح، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۴۹۶۵/۱۱۵

۲- استادیار، گروه رنگ و روکش‌های سطح، پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران، تهران، ایران، صندوق پستی: ۱۴۹۶۵/۱۱۵

چکیده

مواد دوبعدی به دلیل خواص الکترونیکی و مکانیکی منحصر به فرد خود، انقلاب عظیمی در حوزه الکترونیک چاپی ایجاد کرده‌اند. ظهور مکسن‌ها به عنوان یک خانواده دوبعدی از کاربیدها، نیتریدها یا کربونیتریدهای فلزات واسطه با ساختارهای لایه‌ای منظم یا نامنظم و شیمی سطح وابسته به گروه‌های عاملی، افق تازه‌ای در حوزه‌های مختلف فناوری گشوده است. اولین مکسن شناخته شده ترکیب $Ti_3C_2T_x$ بوده که به دلیل داشتن رسانایی الکتریکی بالا، شیمی سطح قابل تنظیم، خاصیت زیست‌سازگاری و آب‌دوستی ذاتی به عنوان گزینه‌ای مناسب برای فرمول‌بندی جوهرهای رسانا مطرح گردید. از قابلیت‌های ویژه این جوهرها می‌توان در حوزه‌های متنوعی نظیر الکترونیک انعطاف‌پذیر و پوشیدنی (مانند مدارهای چاپی)، توسعه حسگرهای حساس و گزینش‌پذیر، محافظ‌های الکترومغناطیسی، ذخیره‌سازهای انرژی (مانند میکرو ابرخازن‌ها و باتری‌های لایه‌نازک) و همچنین در فناوری‌های پزشکی و ساخت شناساگرهای زیستی بهره برد. این مقاله مروری، به بررسی جامع آخرین پیشرفت‌ها در زمینه روش‌های پیشرفته سنتز، اصلاح سطح و کاربرد مکسن‌ها در جوهرهای رسانا می‌پردازد. در ادامه، به روش‌های مختلف چاپ برای ایجاد الگوهای رسانای دقیق، چالش‌های موجود و افزایش رسانایی الکتریکی مکسن‌ها پرداخته می‌شود.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۲

در دسترس به صورت الکترونیکی: ۱۴۰۵/۰۱/۱۷

شاپا چاپی: ۱۷۳۵-۸۷۷۹

شاپا الکترونیکی: ۲۳۸۳-۲۱۶۹

DOI:10.30509/jcst.2026.167744.1279

واژه‌های کلیدی:

مکسن

مواد دوبعدی

جوهرهای رسانا

الکترونیک چاپی

نانوذرات



۱- مقدمه

ظرفیت بسیار بالا (بیش از ۱۰۰۰ میلی آمپر- ساعت بر گرم) تا حسگرهای زیستی با قابلیت تشخیص تک مولکولی به عنوان موادی کلیدی شناخته شوند (۲۸، ۲۷). همچنین با توجه به رسانایی الکتریکی فوق العاده این ماده و ارتقای آن، می توان کاربردهای الکترونیکی متحول کننده ای برای مکسن ها متصور شد که به عنوان یک چالش اصلی در پژوهش های جاری مطرح گردیده و به یک محور تحقیقاتی بسیار مهم تبدیل شده است (۳۰، ۲۹). از این رو می توان گفت، سیر تکامل پژوهش های مکسن در سه مرحله متمایز خلاصه می شود: مرحله نخست کشف ویژگی های بنیادی (۲۰۱۵-۲۰۱۱)، مرحله دوم توسعه کاربردهای تخصصی (۲۰۲۰-۲۰۱۵) و مرحله کنونی تمرکز بر چالش های تجاری سازی شامل پایداری و تولید در مقیاس انبوه بوده است (۱۷).

در این راستا، این مقاله مروری که با تمرکز بر رسانایی الکتریکی مکسن ها و کاربرد آن ها در جوهرهای رسانا ارائه شده است، در واقع یک مروری نظام مند در بررسی راهکارهای بهبود رسانایی الکتریکی نانو ساختار $Ti_3C_2T_x$ از طریق بهینه سازی روش های سنتز است. همچنین پتانسیل کاربردهای نوین این ماده در حوزه الکترونیک از طریق چاپ جوهرهای رسانای مبتنی بر نانوذرات مکسن بررسی کرده و در نهایت روش های چاپی آن را مورد تحلیل قرار می دهد. در واقع، هدف نهایی این مقاله، ارائه چارچوبی راهبردی برای به کارگیری موثر نانو ساختارهای $Ti_3C_2T_x$ در کاربردهای الکترونیکی در حوزه جوهرهای چاپ، دستیابی به نانوبلورهای با هدایت الکتریکی موثر، بهینه سازی طول عمر و کاهش فرایندهای اکسایش این مواد است.

۲- ساختار مکسن ها

مکسن ها با فرمول شیمیایی $M_{n+1}X_nT_x$ شناخته می شوند که در آن M فلز واسطه (مانند تیتانیم، وانادیم، نیوبیم و مولیبدن) و تشکیل دهنده اسکلت ساختاری مکسن، X اتم های کربن و/یا نیتروژن و ایجاد کننده پیوندهای کووالانسی قوی با فلز، n عدد صحیح (۴-۱) نشان دهنده تعداد لایه های X بین لایه های M و T_x گروه های عاملی سطحی (مانند اکسیژن، هیدروکسیل و فلوئور) هستند که در فرایند سنتز روی سطح ذرات تشکیل شده اند. این مواد از پیش ماده فاز مکس^۸ با فرمول $M_{n+1}AX_n$ مشتق می شوند که در آن A عناصری از گروه سه یا چهار جدول تناوبی (مانند آلومینیم، سیلیسیم و...) بوده که به صورت انتخابی اچ می شود (۳۰). در فاز مکس، اتم های M و X ساختار بلوری شش ضلعی تشکیل می دهند. در این آرایش، اتم های X در مرکز ساختارهای هشت وجهی تشکیل شده توسط اتم های M قرار گرفته و با لبه های این ساختار اشتراک فضایی دارند. با حذف اتم های A از

نانومواد دوبعدی به دلیل دارا بودن خواص برجسته مکانیکی، الکتریکی، نوری، حرارتی و سایر ویژگی های منحصربه فرد در سال های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته اند (۶-۱). پس از ابداع گرافن^۱ انواع مختلفی از مواد دوبعدی از قبیل دیکالکوژنیدهای فلزات واسطه^۲، سیلیسین^۳، هیدروکسیدهای دوتایی لایه ای، فسفورن^۴، ترکیبات آلی- فلزی و مکسن ها یکی پس از دیگری توسعه و گسترده شدند. در این میان، مکسن ها به عنوان نسل نوینی از نانومواد دوبعدی که خانواده بزرگی از کاربیدها، نیتریدها و یا کربونیتریدهای فلزات واسطه محسوب می شوند مطرح گردیدند (۱۶-۷). از زمان نخستین سنتز ماده مکسن در سال ۲۰۱۱ یعنی تهیه $Ti_3C_2T_x$ از پیش ماده Ti_3AlC_2 ^۵، محققان در سراسر جهان موفق به سنتز بیش از ۵۰ ترکیب شیمیایی از این مواد با آرایش های گوناگون فلزات و عناصر کربن/نیتروژن شدند. به عبارت دیگر، بر پایه مطالعات نظری با تلفیق فلزات واسطه مختلف، تنظیم نسبت کربن به نیتروژن در لایه های بین فلزی و مهندسی شیمی سطح، امکان سنتز و دستیابی به صدها ترکیب جدید نیز امکان پذیر شده است. تنوع ساختاری و انعطاف پذیری بالای ترکیبات، بستر مناسبی برای تنظیم دقیق و هدفمند ویژگی های فیزیکی- شیمیایی فراهم می آورد به گونه ای که مکسن ها را به یکی از سازگارترین و آینده دارترین مواد در حوزه نانو فناوری از کاربرد در باطری ها تا تجهیزات پزشکی تبدیل کرده است (۱۹-۱۷).

آنچه مکسن ها را از سایر مواد دوبعدی متمایز می کند خصوصیات فیزیکی - شیمیایی آن ها از قبیل رسانایی فلزی بالا (تا $1.5 \times 10^5 \text{ S.cm}^{-1}$)، آبدوستی ذاتی (زاویه تماس کمتر از ۱۰ درجه) و استحکام مکانیکی قوی (مدول یانگ حدود ۰/۵ TPa) این دسته از ترکیبات است (۲۱، ۲۰). در واقع، میزان رسانایی الکتریکی و استحکام مکانیکی مکسن ها به ترتیب به ماهیت ذاتی فلز و وجود کاربیدها و نیتریدهای فلزی در ساختارشان وابسته است و منشا این خواص را می توان در دو ویژگی بنیادی جستجو کرد: ۱- ساختار الکترونی مکسن ها، جایی که اوربیتال های d فلزات واسطه امکان انتقال موثر بار را فراهم می سازند و ۲- شیمی سطح قابل تنظیم که امکان پیونددهی کووالانسی که در گرافن امکان پذیر نیست را در مکسن ها مهیا می سازد (۲۶-۲۲). چنین ویژگی هایی موجب شده است که مکسن ها در گستره وسیعی از کاربردها از باتری های با

1. Graphene
2. Transition metal dichalcogenides
3. Silicene
4. Phosphorene
5. Organometallic frame materials
6. MXene
7. Precursor

8. MAX
9. Etch

به صورت $(Mo_4V)AlC_4$ کشف شد که با حذف انتخابی لایه‌های آلومینیم از این فاز، اولین مکسن از نوع $M_5X_4T_x$ به فرمول $(Mo_4V)C_4T_x$ سنتز گردید (شکل ۲) (۳۶).

علاوه بر ترکیبات اشاره شده، به کمک جایگزینی فلزات واسطه خاص با نسبت‌های استوکیومتری دقیق، امکان سنتز مکسن‌های با فلزات واسطه دوتایی منظم فراهم شد. این دسته شامل مکسن‌های با نظم درون-صفحه‌ای در ساختارهای M_2XT_x مانند $(Mo_{2/3}Ti_{1/3}CT_x)$ و یا مکسن‌های با نظم برون-صفحه‌ای در ساختارهای $M_3X_2T_x$ و $M_4X_3T_x$ مانند $Mo_2TiC_2T_x$ و $Mo_2Ti_3C_3T_x$ می‌باشد (۳۶).

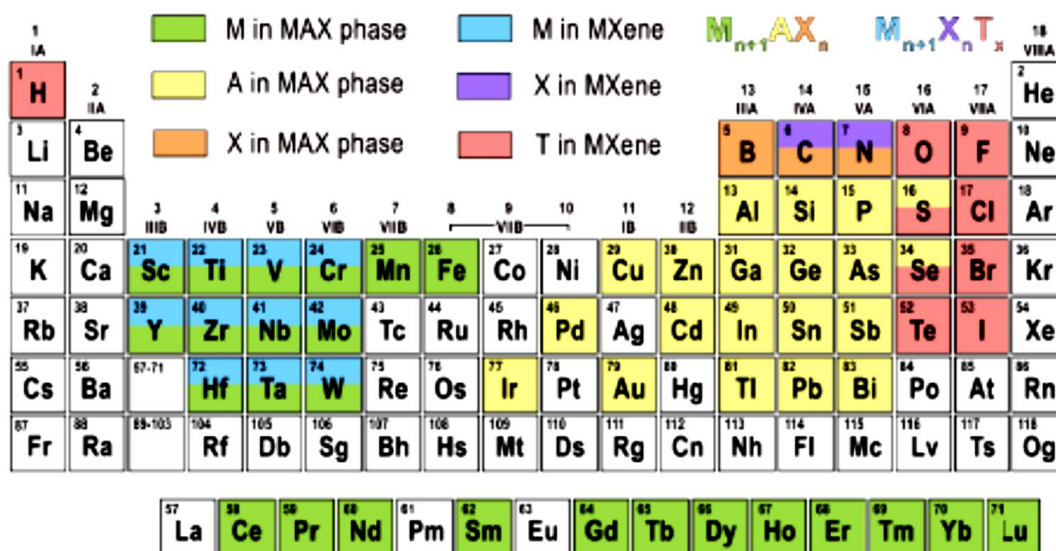
روش‌های میکروسکوپ الکترونی در شناسایی ساختارهای نوین مکسن، تعیین ترکیبات شیمیایی و مطالعه توزیع نقص‌های کریستالی نقش محوری دارند (۱۶). یکی دیگر از مکسن‌های سنتزی به کمک مهندسی و طراحی ساختارهای پیش‌ماده، سنتز مکسن‌هایی با بی‌نظمی زیاد است. در یک پژوهشی، نمایی و همکارانش موفق به سنتز دو مکسن با بی‌نظمی بالا از نوع $M_4X_3T_x$ با فرمول‌های $TiVNBMoC_3T_x$ و $TiVCrMoC_3T_x$ شدند. (شکل ۲) (۳۷). از این رو می‌توان گفت، کشف مکسن‌های با بی‌نظمی زیاد توانسته سطح جدیدی از قابلیت تنظیم خواص را به این حوزه پژوهشی رو به رشد اضافه نماید (۳۷).

1. Solid solution
2. Defect distributions
3. High-entropy

لایه‌های $M_{n+1}X_n$ ، شبکه شش‌ضلعی متشکل از عناصر M و X همچنان حفظ می‌شود. این فرایند منجر به تشکیل لایه‌های $M_{n+1}X_n$ از طریق حذف اتم‌های A می‌گردد. نمایی از عناصر تشکیل دهنده مکسن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است (۳۰).

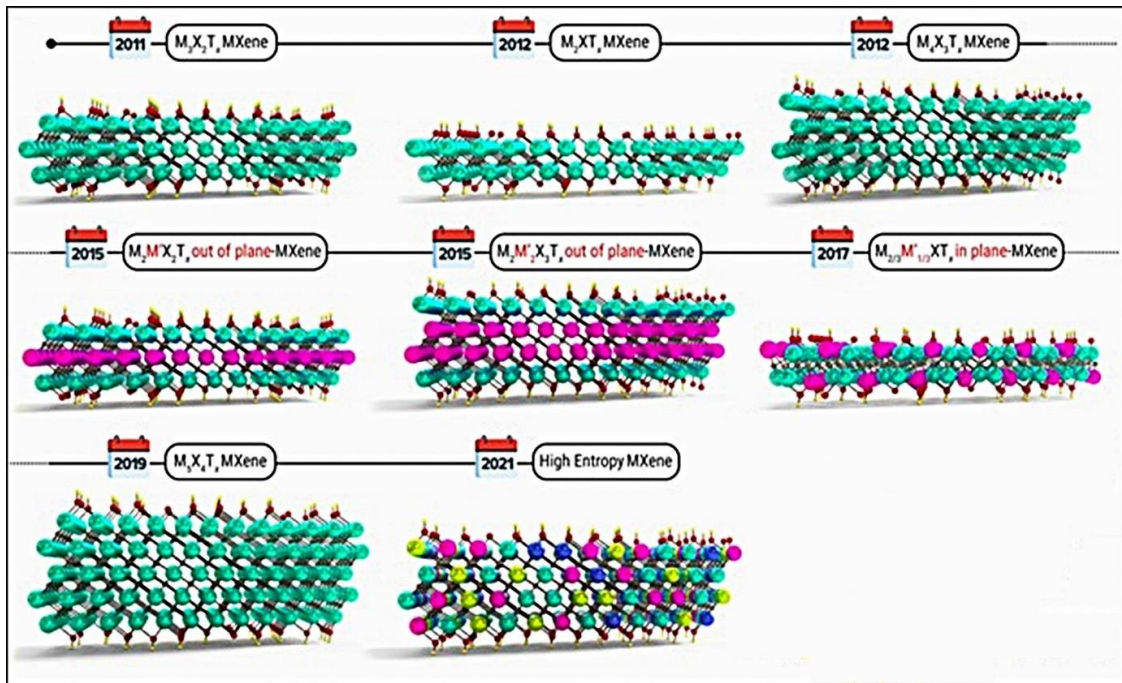
۳- انواع مکسن‌ها

تاکنون چهار نوع فرمول ترکیبی مختلف از مکسن‌ها به صورت $M_5X_4T_x$ ، $M_4X_3T_x$ ، $M_3X_2T_x$ ، M_2XT_x گزارش شده است (۳۱). همان‌طور که قبلاً اشاره شد، $Ti_3C_2T_x$ با ساختار $M_3X_2T_x$ ، اولین بار به‌عنوان نخستین مکسن معرفی شده است (۱) و همچنین بیش‌ترین مطالعه بر روی آن صورت گرفته است (۳۲، ۳۳) که شمایی از آن در (شکل ۲) نشان داده شده است. پس از آن، در سال ۲۰۱۲، با سنتز Ti_2CT_x و $Ti_4C_3T_x$ به صورت محلول‌های جامد، دو ساختار جدید با فرمول‌های M_2XT_x و $M_4X_3T_x$ (شکل ۲) کشف شدند (۳۴). عامل n در فرمول مکسن‌ها که نشان‌دهنده تعداد لایه‌ها است، به‌طور مستقیم توسط ساختار پیش‌ماده مکس تعیین می‌شود (۳۵)؛ به‌عنوان مثال دو ترکیب Ti_2CT_x و $Ti_3C_2T_x$ به ترتیب با حذف لایه‌های آلومینیم از دو فاز پیش‌ماده متفاوت Ti_2AlC و Ti_3AlC_2 به دست می‌آیند. این وابستگی ساختاری بدان معناست که برای دستیابی به مکسن‌هایی با ضخامت‌های بیشتر یعنی با مقادیر n بالاتر در فرمول $M_{n+1}X_nT_x$ یا ترکیب‌های شیمیایی جدید از M و X، نیاز به سنتز پیش‌ماده‌های مکس جدید وجود دارد. در سال ۲۰۱۹، فاز مکسی با پنج لایه فلزی



شکل ۱: نمایش ترکیبات یا بلوک‌های سازنده مکسن‌ها با رنگ‌های مختلف در جدول تناوبی (۳۰).

Figure 1: Displaying MXenes compositions or building blocks using different colors on the periodic table (30).



شکل ۲: شمای مختلفی از ساختارهای مکسن (کره‌های سبز، زرد، صورتی و آبی به ترتیب نشان‌دهنده فلزات انتقالی، کربن/نیتروژن، گروه‌های عاملی سطحی و موقعیت‌های احتمالی اتم‌ها در ساختار مکسن هستند) (۳۱).

Figure 2: The schematic illustration of different MXene structures (The green, yellow, pink, and blue color spheres represent early transition metals in MXenes) (31).

سطح با گروه‌هایی مانند $-F$ ، $-OH$ ، $=O$ می‌شود که بر خواص الکتروشیمیایی تأثیر می‌گذارند (۳۹).

۲-۴- روش سنتز پایین به بالا

در تقابل با روش‌های مذکور، تکنیک‌های سنتز از پایین به بالا نظیر رسوبدهی شیمیایی از فاز بخار و فرایند پرتو مولکولی (MBE)، مکسن‌ها را با چینش اتم به اتم و مولکول به مولکول بر روی یک بستر ایجاد می‌کند. این روش‌ها پتانسیل دستیابی به فیلم‌های نازک، یکنواخت، با کیفیت بالا و همچنین با کنترل دقیق بر ضخامت، اندازه و ساختار شیمیایی را فراهم کرده و منجر به تولید ساختارهای بدون نقص که فاقد گروه‌های عاملی ناخواسته می‌باشند، می‌گردد.

به طور کلی روش بالا به پایین عمدتاً برای کاربردهای توده‌ای نظیر پوشش‌های رسانا یا سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی مناسب بوده، در حالی که روش‌های پایین به بالا به دلیل دقت اتمی، گزینه منتخب برای کاربردهای دقیق تر در حوزه‌هایی چون نانوالکترونیک و ادوات کوانتومی محسوب می‌شوند. برای درک بهتر این تمایزات، جدول ۱ خلاصه‌ای تطبیقی از روش‌های سنتز از بالا به پایین، پایین به بالا و روش‌های پیشرفته را ارائه می‌دهد (۳۹).

1. Molecular Beam Epitaxy

۴- روش‌های سنتز مکسن‌ها

روش‌های سنتز مکسن‌ها عمدتاً به دو دسته کلی سنتز بالا به پایین و پایین به بالا تقسیم‌بندی می‌شوند که هر یک مزایای منحصر به فردی را در کاربردهای مختلف فراهم می‌کنند (۳۸). با بررسی نظام‌مند، به تحلیل مقایسه‌ای روش‌های سنتز این ترکیبات پرداخته می‌شود.

۴-۱- روش سنتز بالا به پایین

روش سنتز بالا به پایین به دلیل سادگی فرایند و قابلیت تکرارپذیری، به عنوان متداول‌ترین و پرکاربردترین روش تولید مکسن‌ها شناخته می‌شود. این فرایند شامل اچ کردن شیمیایی عنصر A از فاز مادر یعنی مکس با استفاده از هیدروفلوئوریک اسید (HF) یا اچ کننده‌های جایگزین مانند نمک‌های فلئورید (NH_4HF_2) و یا نمک‌های مذاب مانند کلرید روی $(ZnCl_2)$ است که منجر به تشکیل لایه‌های کاربیدها یا نیتريد‌های فلزات واسطه می‌شود. به عبارت دیگر، در این فرایندها، پیوندهای شیمیایی قوی بین لایه‌های M و A در فاز مکس شکسته و لایه‌های A حذف می‌گردند و در نهایت ساختار چندلایه‌ای مکسن به دست می‌آید که متعاقباً با فرایند لایه‌لایه شدن و امواج فراصوت به نانو لایه‌های مجزا تبدیل می‌شود. این روش امکان تولید مقادیر زیاد را فراهم می‌کند اما اغلب منجر به ایجاد عیوب ساختاری مانند حفره و ناپیوستگی در صفحه مکسن و همچنین عامل دار شدن

جدول ۱: بررسی مقایسه‌ای از روش‌های سنتز مکسن (۴۰-۴۲).

Table 1: Comparative analysis of MXene synthesis methods (40-42).

Parameter	Top-Down	Bottom-Up	Advanced Methods
Process	Acid etching of MAX phases + delamination	Atomic assembly (CVD/MBE)	Electrochemical/molten salt etching
Yield	10-100 & II: latch	<100 mg/batch	1-10 g/batch (pilot scale)
Flake Quality	0.1-5 μm , moderate defects	1-50 μm , low defects	0.5-10 μm , controlled defects
Termination Control	Moderate (-O/-OH ratio)	Excellent (atomic precision)	Good (tunable termination)
Equipment Cost	50 k-200 k	500 k-2 M	100 k-500 k
Scalability	Industrial-ready	Lab-scale only	Pilot-scale demonstrated
Advantages	Simple protocol High yield	Atomic precision Excellent crystallinity	Safer chemicals Better environmental
Disadvantages	Toxic etchants Batch variability	Extremely costly Very low throughput	Immature technology Lower yields
Best For	Bulk applications: Conductive coatings	Precision applications: Nanoelectronics	Emerging applications: Biomedical
TRL*	6-7 (pilot production)	3-4 (lab demonstration)	4-5 (lab-to-pilot transition.)

*TechrraLogy Readiness Level. (TRL).

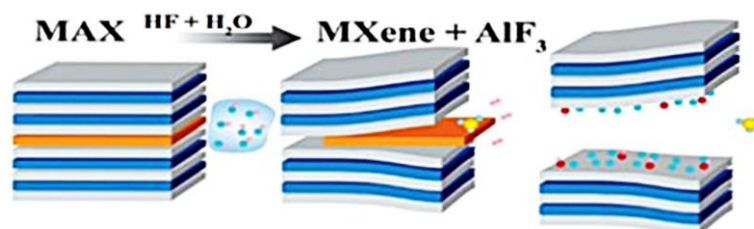
که علی‌رغم بازدهی و قابل اطمینان بودن این روش، همچنان چالش‌های عمده‌ای از قبیل سمیت بسیار بالای HF، تولید پساب‌های خطرناک حاوی فلئوئورید مانند AlF_3 و همچنین تولید گاز HF وجود دارند. روش‌های اصلاح‌شده مبتنی بر تولید اسید هیدروفلوئوریک درمحل یعنی استفاده از ترکیبات NH_4HF_2 و یا مخلوط LiF/HCl ، اگرچه نیاز به استفاده مستقیم از HF را کاهش می‌دهند، اما با چالش‌های مقیاس‌پذیری مواجه هستند. این محدودیت عمدتاً ناشی از ناپایداری ذاتی اندازه ذرات لایه‌ای در دسته‌های مختلف تولید و نیز توزیع گروه‌های عاملی سطحی است. شکل ۳ شمایی کلی از فرایند اچ کردن مبتنی بر HF روی فاز مکس را نشان می‌دهد (۴۴).

1. In situ

۴-۴-۴ روش‌های اچ کردن و جداسازی لایه‌ای در فرایند تولید مکس‌ها

۴-۴-۴-۱ روش مبتنی بر اچ‌کننده حاوی فلئور

همان‌طور که اشاره شد، روش اچ کردن مبتنی بر اسید هیدروفلوئوریک به دلیل بازده بالا، به‌عنوان پرکاربردترین روش شناخته شده است. در دستورالعمل‌های استاندارد، فازهای مکس در معرض محلول HF قرار می‌گیرند. این فرایند منجر به حذف کامل لایه A می‌شود، درحالی‌که ساختار پایه‌ای و اصلی M_{n+1}X_n که شامل کاربید یا نیتريد فلزات واسطه می‌باشد، دست نخورده و پایدار باقی می‌ماند (۴۳). در نتیجه می‌توان گفت روش مذکور با داشتن تکرارپذیری، منجر به تولید مکسن‌هایی با بلورینگی مناسب و گروه‌های عاملی سطحی کنترل‌پذیر می‌گردد. اما باید در نظر داشت



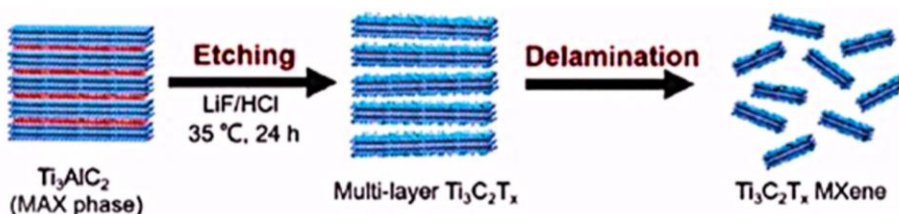
شکل ۳: روش اچ مبتنی بر مخلوط اسید هیدروفلوئوریک / آب برای فاز مکس Ti_3AlC_2 (۴۴).

Figure 3: HF/H₂O-based etching of Ti₃AlC₂ MAX phase (44).

می‌شود. اگرچه این شرایط نیاز به استفاده از دیگر ترکیبات میان لایه‌ای را مرتفع ساخته اما باعث کاهش رسانایی الکتریکی ترکیب $Ti_3C_2T_x$ نیز می‌شود. از طرفی، با توجه به هدایت یونی بالای یون‌های لیتیم می‌توان گفت، تأثیر آن بر رسانایی الکتریکی نانوساختار $Ti_3C_2T_x$ ، به مراتب کمتر از دیگر ترکیبات بین‌لایه‌ای است (۴۷).
 با توجه به شکل ۵ و صرف نظر از نوع اچ‌کننده مورد استفاده، فرایند تولید مکسن‌ها مستلزم سه مرحله اساسی است:

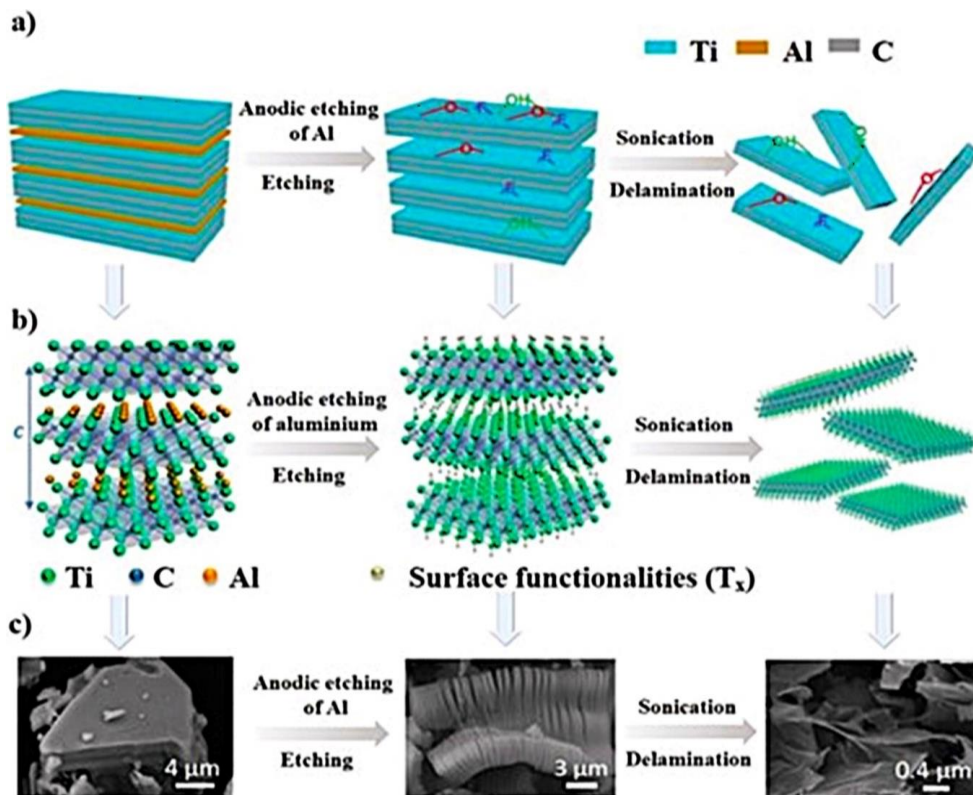
- ۱- فرایند اچ‌کردن
- ۲- فرایند شستشو، رسیدن به محدوده pH برابر با ۴ تا ۶، صافش
- ۳- فرایند لایه‌سازی و ایجاد مکسن‌های تک‌لایه (۵۱-۴۹).

به‌طور کلی با افزایش غلظت HF، مدت زمان لازم برای اچ‌کردن کاهش می‌یابد. اما نکته قابل توجه آن است که، غلظت‌های بالاتر HF منجر به افزایش میزان نقص در نانوبلورهای $Ti_3C_2T_x$ تولیدی می‌شود که این امر بر کیفیت، پایداری، رسانایی و سایر ویژگی‌های ماده تأثیر مستقیم می‌گذارد (۴۵،۴۶). بر اساس گزارشی در سال ۲۰۱۴، نانوبلورهای $Ti_3C_2T_x$ سنتزی به روش در محل با نقص‌های ساختاری کمتری تولید شدند (شکل ۴). نکته حائز اهمیت آن است که در فرایند اچ با LiF/HCl، یون‌های لیتیم (Li^+) موجود در محلول به‌عنوان ماده بین‌لایه‌ای عمل کرده و خود را بین لایه‌های $Ti_3C_2T_x$ جایگزین می‌کنند که این امر منجر به افزایش فاصله بین لایه‌ها



شکل ۴: فرایند سنتز نانولایه‌های مکسن $Ti_3C_2T_x$ (۴۸).

Figure 4: Synthesis process of $Ti_3C_2T_x$ MXene nanosheets (48).



شکل ۵ (a-c): نمودارهای شمایی، ساختارهای اتمی و تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی متناظر از سنتز نانوصفحات $Ti_3C_2T_x$ از پیش‌ماده فاز مکس با فرمول Ti_3AlC_2 (۵۱).

Figure 5: a-c): Schematic diagrams, atomic structures, and corresponding SEM images of the synthesis of $Ti_3C_2T_x$ from Ti_3AlC_2 MAX phase precursor (51).

تترامتیل آمونیم (TMAOH)، هیدروکسید تترابوتیل آمونیوم (TBAOH)، دی‌متیل سولفواکسید (DMSO) و دی‌متیل فرمامید (DMF) مخلوط می‌گردد. در مرحله بعد، محلول حاصل تحت امواج فراصوت حمامی قرار گرفته و در نهایت فرایند رسوبدهی با به‌کارگیری روش‌های پیشرفته‌ای مانند صافش تحت خلا انجام پذیرفت. با قرارگیری ترکیبات TMAOH، TBAOH، DMF و DMSO در بین ساختار لایه‌های $Ti_3C_2T_x$ ، فاصله بین لایه‌ها افزایش می‌یابد که این امر نقش مهمی در فرایند لایه‌لایه‌شدن ایفا می‌کند (۵۳). اما توجه به این نکته حائز اهمیت است که مولکول‌ها یا یون‌های آلی مانند TMAOH، TBAOH و DMF از رسانایی پایینی برخوردار بوده که این موضوع مهاجرت الکترون‌ها را به شدت محدود کرده و موجب افزایش مقاومت بین‌لایه‌ای و در نهایت کاهش محسوس رسانایی ماده مکسن می‌گردد. همچنین اگرچه امکان لایه‌لایه‌شدن صرفاً با استفاده از امواج فراصوت وجود دارد، اما این روش موجب کاهش ابعاد لایه‌های $Ti_3C_2T_x$ و ایجاد نقص‌های ساختاری کوچک می‌شود که در نهایت به کاهش رسانایی الکتریکی ماده منجر می‌گردد (۵۴). از طرفی، زمانی که تعداد اتم‌های کربن در زنجیره آلکیل کاتیونی به ۶ یا ۸ افزایش یابد، مقاومت ویژه آن از حدود 6000 به $5 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ کاهش می‌یابد (شکل ۶f).

۵- خواص ساختاری و فیزیکی مکسن‌ها

همان‌طور که اشاره شد مکسن‌ها گروهی تحول‌آفرین از مواد دوبعدی به شمار می‌روند؛ زیرا ساختار بلوری ویژه آن‌ها انعطاف‌پذیری فوق‌العاده‌ای به این مواد می‌بخشد. به‌عبارت‌دیگر، با انتخاب هدفمند اجزای آن، می‌توان خواص الکترونیکی، رفتار مکانیکی، عملکرد شیمیایی (مانند آب‌دوستی قابل تنظیم) و همچنین پاسخ‌های نوری را به‌صورت دقیق مهندسی کرد (۵۴). جدول ۲ مروری بر انواع مختلف مکسن‌ها و ساختار، ویژگی‌های کلیدی و زمینه‌های کاربردی آن‌ها ارائه می‌دهد. با توجه به جدول مذکور، این انعطاف‌پذیری ترکیبی منجر به تولید انواع مختلفی از مکسن‌ها شده که هر یک دارای ویژگی خاص و بهینه‌شده برای کاربردی خاص می‌باشند. برای مثال، رسانایی فلزی $Ti_3C_2T_x$ ، آن را برای محافظت الکترومغناطیسی مناسب می‌سازد، در حالی که فعالیت کاتالیستی Mo_2CT_x زمینه‌ساز پیشرفت‌های مهمی در واکنش‌های تکامل هیدروژن شده است. به‌عبارت‌دیگر، جنبه‌های بنیادی موثر بر عملکرد مکسن‌ها را می‌توان بدین‌صورت توصیف کرد:

الف) معماری کریستالوگرافی که به تبیین تقارن شش‌ضلعی $P6_3/mmc$ و فاصله بین‌لایه‌ای (0.3 تا 1.2 نانومتر) می‌پردازد و پدیده‌هایی مانند رسانایی ناهمسان‌گرد^۲ و بین‌لایه‌ای یونی‌گزینشی^۳

بر اساس پژوهش‌های لیپاتوف و همکارانش در سال ۲۰۱۶، با بهینه‌سازی نسبت فلوراید لیتیم به هیدروکلریک اسید غلیظ که به روش MILD نیز شناخته شده است، نانوبلورهای $Ti_3C_2T_x$ با ابعاد بزرگ‌تر، نقص‌های ساختاری کمتر و رسانایی الکتریکی بالاتری را تولید کردند (شکل ۶b).

۴-۲- روش مبتنی بر اچ‌کننده فاقد فلئور

روش هیدروترومال^۱ القا شده با محیط قلیایی، رویکردی جایگزین به منظور حذف فلئور برای سنتز نانوماده $Ti_3C_2T_x$ محسوب می‌شود. نتایج آزمون‌های سطحی نشان می‌دهد که محصول حاصل از این روش عمدتاً توسط گروه‌های عاملی اکسیژنی =O و -O پوشش یافته و فاقد هرگونه گروه عاملی فلئوردار است. از سوی دیگر، قرارگیری یون‌های سدیم بین لایه‌ها در حین فرایند سنتز، موجب افزایش قابل توجه فاصله بین‌لایه‌ای در ساختار نانوماده در مقایسه با نمونه‌های سنتز شده با اسید هیدروفلوئوریک می‌شود. روش‌های دیگر سنتز مکسن از جنس $Ti_3C_2T_x$ بدون استفاده از فلئور برای اچ‌کردن نیز مورد بررسی قرار گرفته‌اند که از آن جمله می‌توان به روش اچ‌کردن الکتروشیمیایی، نمک مذاب و هیدروترومال قلیایی اشاره کرد (۵۱).

۴-۵- فرایند جداسازی لایه‌ای در تولید مکسن $Ti_3C_2T_x$

در مقایسه با ساختار چندلایه‌ای $Ti_3C_2T_x$ ، مقاومت بین‌لایه‌ای در نمونه‌های دارای تعداد لایه‌های کم یا حتی تک‌لایه، بسیار کم است و این ویژگی می‌تواند بر رسانایی الکتریکی تأثیر بگذارد. سانگ و همکارانش (۴۶) با استفاده از ترانزیستورهای ساخته شده از نانوصفحات تک‌لایه و چندلایه $Ti_3C_2T_x$ ، اثر تعداد لایه‌ها بر رسانایی را مورد مطالعه قرار دادند. همان‌طور که شکل ۶c نیز نشان می‌دهد، مقاومت ویژه ترانزیستورهای مبتنی بر نانوصفحات تک‌لایه و کم‌لایه $Ti_3C_2T_x$ با افزایش ضخامت، افزایش می‌یابد.

همچنین در روشی با استفاده از پوشش‌دهی چرخشی، ضخامت لایه‌های $Ti_3C_2T_x$ کنترل شده و ضخامت فیلم از طریق اندازه‌گیری عبور نور محاسبه شده است. در این روش رسانایی الکتریکی فیلم، علیرغم افزایش ضخامت در محدوده‌ای مشخص (از ۲ نانومتر تا بیش از ۱۰۰ نانومتر) پایدار باقی می‌ماند (شکل ۶d). علاوه بر آن در روشی دیگر از پوشش‌دهی تیغه‌ای برای تهیه فیلم‌هایی با ضخامت‌های مختلف استفاده شده که رسانایی الکتریکی متفاوتی را مطابق شکل ۶e به دست می‌دهد (۵۱، ۵۲).

به‌طور معمول، ساختار $Ti_3C_2T_x$ اچ‌شده با HF به صورت چند لایه بوده که جهت دستیابی به ساختار کم‌لایه یا تک‌لایه، نیازمند اعمال فرایند لایه‌زدایی به همراه امواج فراصوتی است. در این فرایند ابتدا سوسپانسیون $Ti_3C_2T_3$ با ترکیبات لایه‌زدایی از قبیل هیدروکسید

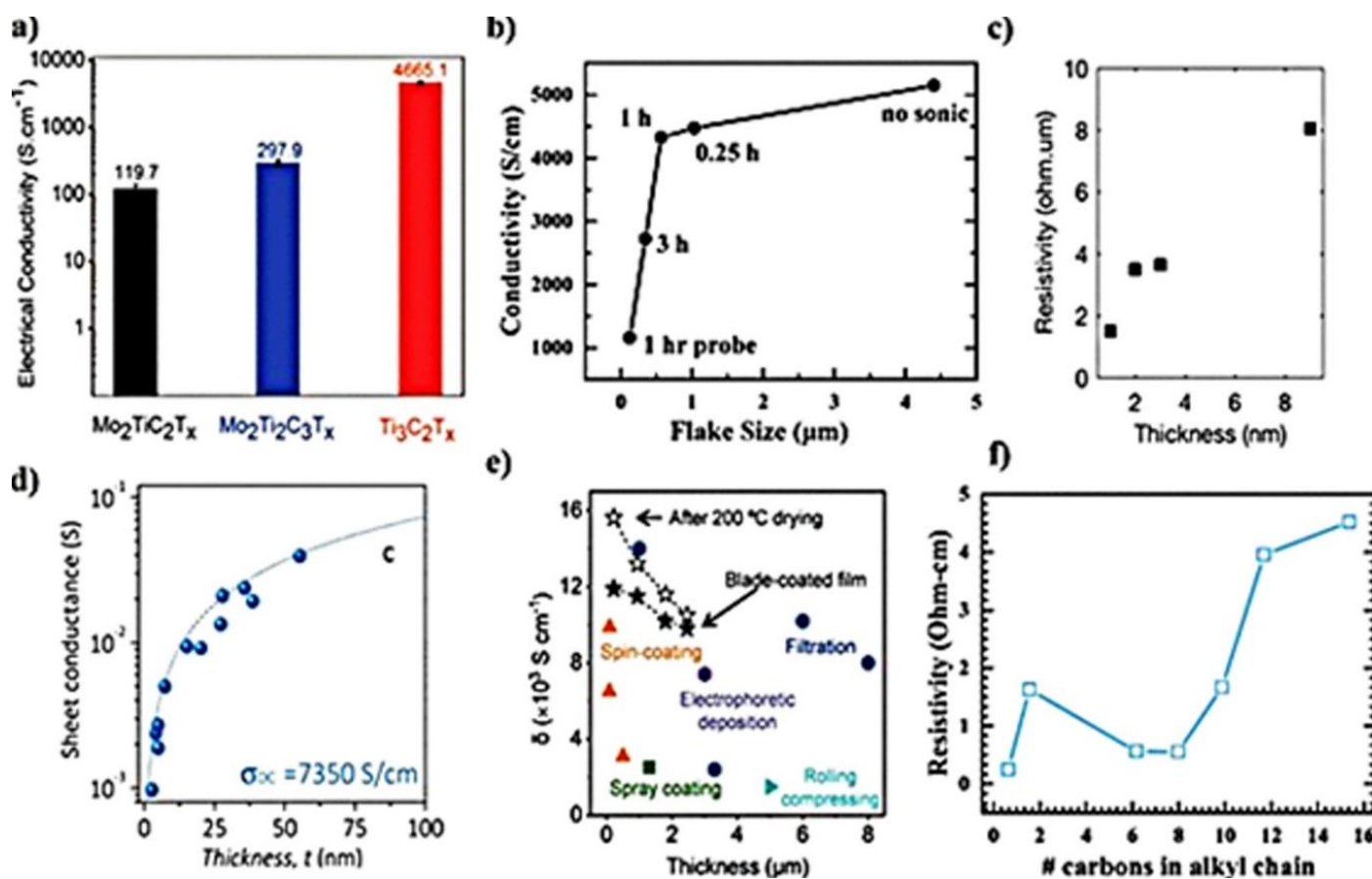
را ممکن می‌سازند.

می‌باشد.

ت) مهندسی سطح به چگونگی نقش‌آفرینی گروه‌های عاملی سطحی در کنترل برهم‌کنش‌های میان‌سطحی، از غشاهای آب‌دوست تا پوشش‌های مقاوم در برابر خوردگی، با دقتی در مقیاس اتمی می‌پردازد.

ب) پدیده‌های الکترونیکی و نوری که برهم‌کنش‌های میان اوربیتال‌های d فلزات واسطه و گروه‌های عاملی سطحی که منجر به ویژگی‌های اپتوالکترونیکی برجسته‌ای همچون پلاسمونیک^۴ در ناحیه فرسرخ تا اثرات محصورسازی کوانتومی می‌شود، بررسی می‌کند. پ) رفتار حرارتی و شیمیایی است که پایداری حرارتی قابل توجه (تا حدود ۱۰۰۰ °C در اتمسفرهای بی‌اثر) و مکان‌های فعالی که کاربردهایی از پوشش‌های دما بالا تا مبدل‌های کاتالیستی را تسهیل می‌کنند بیان می‌کند. در واقع این مقاومت چشم‌گیر عمدتاً ناشی از وجود پیوندهای کووالانسی قوی میان فلز واسطه و کربن/نیتروژن

- 1. Hydrothermal method
- 2 Anisotropic conduction
- 3 Selective ion intercalation
- 4 Plasmonics



شکل ۶: (a) مقایسه رسانایی الکتریکی نانوصفحات Mo₂TiC₂T_x, Mo₂Ti₂C₃T_x و Ti₃C₂T_x. (b) رابطه بین اندازه لایه‌های Ti₃C₂T_x و رسانایی الکتریکی، (c) وابستگی مقاومت الکتریکی به ضخامت نمونه در ترانزیستورهای مبتنی بر لایه‌های تک‌لایه و چندلایه Ti₃C₂T_x. (d) رسانایی صفحه‌ای فیلم‌های Ti₃C₂T_x. (e) رابطه بین ضخامت فیلم‌های تهیه شده با روش‌های مختلف و رسانایی الکتریکی و (f) اثر طول زنجیره آلکیل بر مقاومت الکتریکی (۵۱).

Figure 6: a) The electrical conductivity of Mo₂TiC₂T_x, Mo₂Ti₂C₃T_x, and Ti₃C₂T_x, b) The relation between Ti₃C₂T_x flake size and conductivity, c) Resistivity as a function of Ti₃C₂T_x thickness for transistors based on single- and few-layer Ti₃C₂T_x flakes, d) Sheet conductance of Ti₃C₂T_x films, e) The relationship between the thickness of the films prepared by different methods and the conductivity, and f) Effect of alkyl chain length on resistivity (51).

جدول ۲: مروری جامع بر ساختار، ویژگی‌ها و کاربردهای کلیدی مواد مکسن (۱۷).

Table 2: Overview of MXene materials, structure, properties, and key applications (17).

MXene Material	Formula	Structure/Phase	Surface Termination	Key Properties	Key Applications	Ref
Titanium Carbide	Ti ₃ C ₂ T _x	2D Layered (Hexagonal)	-OH, -O, -F	• Metallic conductivity (6000–8000 S.cm ⁻¹)	• Li/Na-ion batteries	(55, 56)
Titanium Carbonitride	Ti ₂ CT _x /Ti ₂ C _x N _{1-x} T _x	2D Layered	-OH, -O, -F	• Tunable bandgap (0.5–1.2 eV)	• Supercapacitors • Electrocatalysis	(57-59)
Niobium Carbide	Nb ₂ CT _x /Nb ₄ C ₃ T _x	2D layered (Hexagonal)	-OH, -O, -F	• High pseudocapacitance	• Supercapacitors • Hydrogen	(60, 61)
Vanadium Carbide	V ₂ CT _x /V ₄ C ₃ T _x	2D Layered (Hexagonal)	-OH, -O, -F	• High electronic conductivity	• Battery anodes • Electrochemical	(62-64)
Molybdenum Carbide	Mo ₂ CT _x	2D Layered	-OH, -O, -F	• Extreme stability (up to 500 °C)	• Fuel cells • Water splitting	(65, 66)
Chromium Carbide	Cr ₂ CT _x	2D layered	-OH, -O, -F	• Anti-corrosion • Magnetic ordering	• Protective coatings	(22, 67)
Zirconium Carbide	Zr ₃ C ₂ T _x	2D Layered	-OH, -O, -F	• High thermal	• Nuclear reactors • Aerospace	(68, 69)
Hafnium Carbide	Hf ₃ C ₂ T _x	2D Layered	-OH, -O, -F	• Ultra-high temp. • Stability	• Hypersonic vehicles	(70, 71)
Tantalum Carbide	Ta ₄ C ₃ T _x	2D Layered	-OH, -O, -F	• Chemical inertness • PLasmoni	• Biomedical implants	(72, 73)
Niobium Nitride	Nb ₂ NT _x	2D Layered	-OH, -O, -F	• Superconductivity (T _c ≈ 5 K)	• Quantum computing	(74, 76)
Vanadium Nitride	V ₂ NT _x	2D layered	-OH, -O, -F	• Metallic conductivity • High Li-ion Storage	• Fast-charging batteries	(63, 77, 78)

با بالاترین رسانایی الکتریکی دسته‌بندی می‌شود، اما همچنان ظرفیت قابل توجهی برای بهبود بیشتر این ویژگی وجود دارد. در بخش‌های آتی، مهم‌ترین روش‌های ساخت و پردازش که برای بهبود رسانایی الکتریکی این ماده به کار می‌روند، مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۴-۲- نقش منبع کربن در فاز مکس

تحقیقات شک و همکارانش نشان می‌دهد که انتخاب منبع کربن در سنتز فاز مکس، تأثیر مستقیمی بر ریزساختار و در نهایت رسانایی الکتریکی نانولایه‌های Ti₃C₂T_x دارد (۸۳). در این پژوهش، آن‌ها به ترتیب گرافیت، دوده (کربن بلک) و کاربید تیتانیم (TiC) را با پودر تیتانیم و آلومینیم مخلوط کردند تا نسبت اتمی Ti:Al:C معادل ۱:۱:۱٫۸ حاصل شود. سپس مخلوط حاصل در دمای ۱۶۵۰ °C و در اتمسفر آرگون تفجوشی شد تا فاز مکس Ti₃AlC₂ سنتز گردد. در نهایت، سه نمونه پودر از ترکیب Ti₃AlC₂ به‌عنوان پیش‌ماده برای تولید Ti₃C₂T_x مورد استفاده قرار گرفت و نمونه‌های مکسن به دست آمده به ترتیب Graphite-Ti₃C₂T_x، TiC-Ti₃C₂T_x و Lampblack-Ti₃C₂T_x نام‌گذاری شدند. نتایج نشان داد بیشترین خلوص فاز مکس Ti₃AlC₂، یعنی ۹۵/۲ درصد، زمانی به دست آمد که گرافیت به‌عنوان منبع کربن

۴-۶ کاربردهای مکسن‌ها در الکترونیک چاپی

در میان کاربردهای ذکر شده، مکسن‌ها به‌ویژه ترکیب Ti₃C₂T_x در حوزه الکترونیک کاربرد زیادی دارند (۷۹) که از آن جمله می‌توان به استفاده از این نانومواد دو بعدی در جوهرهای رسانا اشاره کرد. در ادامه به کاربرد این دسته از مواد در جوهرهای چاپ، روش‌های اعمال، خواص الکتریکی، مکانیکی، پایداری، کاربردهای کلیدی، چالش‌ها و چشم‌اندازهای آن پرداخته می‌شود.

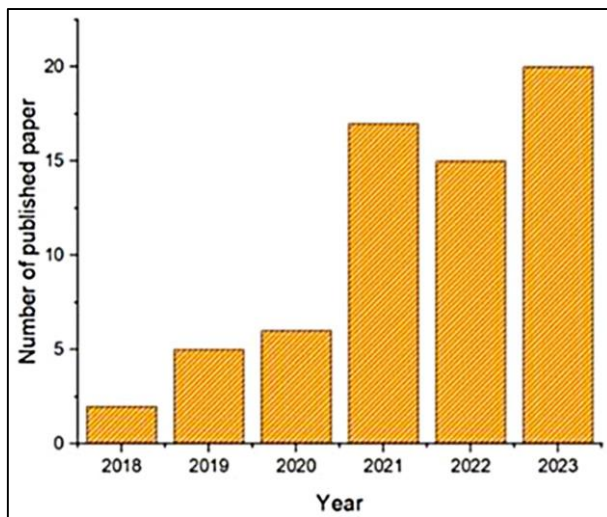
۴-۱- رسانایی الکتریکی مکسن، Ti₃C₂T_x و عوامل موثر بر آن

با در نظر گرفتن نظریه تابعی چگالی (DFT) و تأثیرپذیری رسانایی الکتریکی نانولایه‌ها و فیلم‌های نازک Ti₃C₂T_x از عناصر M، X و به‌ویژه گروه‌های عاملی سطحی، رسانایی به عوامل دیگری از جمله پیش‌ماده فاز مکس، ترکیبات میان‌لایه‌ای و روش رسوب‌دهی نیز بستگی دارد (۸۰). هانتاناسیریساکول و همکارانش با مطالعه جایگزینی عنصر X به‌صورت تجربی نشان دادند که رسانایی ترکیب Ti₃C₂T_x به‌طور قابل توجهی بالاتر از نمونه حاوی نیتروژن مانند Ti₃CNT_x است (۸۱). به‌طور مشابه در تحقیقی دیگر گزارش شد که رسانایی Ti₃C₂T_x در مقایسه با نمونه Mo₂TiC₂T_x بیشتر است (شکل ۶a) (۸۲). اگرچه ترکیب Ti₃C₂T_x در خانواده مکسن جز موادی

2. Graphite
3. Carbon lamp black

1. Density functional theory (DFT)

الکتریکی بالا، با روش‌های چاپ مختلف سازگار باشد و خواص مکانیکی مطلوبی نیز ارائه دهد؛ که در این میان، مکسن‌ها به دلیل دارا بودن رسانایی الکتریکی بسیار زیاد و منحصربه‌فرد خود ($20000 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ تا $200000 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$) در فیلم‌های نازک و دیگر خواص کلیدی آن‌ها که پیش‌تر به آن اشاره شد، به‌عنوان گزینه‌ای مطلوب و پیشرو مطرح شده‌اند (۸۷-۸۵). بخش عمده مطالعات پیشین در حوزه جوهرهای چاپ روی ترکیب $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ به‌عنوان پرکاربردترین ماده در کاربردهای الکترونیک چاپی متمرکز بوده، زیرا این ماده از رسانایی الکتریکی به مراتب بالاتری در مقایسه با مواد پیشین مانند نانولوله‌های کربنی، کربن مشتق شده از کاربرد، گرافن یا کربن‌های متخلخل برخوردار است (۸۹، ۸۸). در سال‌های اخیر، افزایش چشم‌گیری در تعداد مقالات منتشر شده با محوریت جوهرهای رسانای مکسن برای کاربردهای الکترونیک چاپی مشاهده شده است که این روند، حاکی از افزایش پژوهش‌ها در حوزه الکترونیک چاپی است. نمودار شکل ۷ که براساس جستجوی اسکوپوس آدر سال ۲۰۲۳ برای جوهرهای رسانای مکسن ترسیم شده، یک روند صعودی قابل توجه‌ای در تعداد انتشارات مرتبط با این جوهرها را در سال‌های قبل به تصویر می‌کشد (۹۰).



شکل ۷: تعداد مقالات منتشر شده در زمینه جوهرهای رسانای مکسن از سال ۲۰۱۸ تا ۲۰۲۳ استخراج شده از پایگاه داده اسکوپوس (۹۰).

Figure 7: The number of published articles on MXene conductive inks from 2018 to 2023 extracted from the Scopus database (90).

1. Wearable electronics
2. Flexible electronic
3. Scopus

استفاده شده است. همچنین، اندازه لایه‌های $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ حاصل از این سه پیش‌ماده، اختلاف قابل توجهی داشتند؛ یعنی ترکیب $\text{Graphite-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ دارای اندازه بیشینه $19/2$ میکرومتر و میانگین $4/2$ میکرومتر، ترکیب $\text{TiC-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ دارای اندازه بیشینه $9/3$ میکرومتر و میانگین $2/6$ میکرومتر و ترکیب $\text{Lampblack-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ دارای کوچک‌ترین اندازه با حداکثر $2/4$ میکرومتر و میانگین $0/5$ میکرومتر می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده، نمونه $\text{Graphite-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ در مقایسه با دو نمونه دیگر، کمترین چگالی نقص را در ساختار خود داشته است که این امر می‌تواند بر میزان رسانایی الکتریکی مکسن تاثیر بگذارد. به عبارت دیگر، از آنجا که اثر رسانایی الکتریکی $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ تحت تاثیر مستقیم چگالی نقص و اندازه لایه‌ها می‌باشد، از این رو فیلم‌های ساخته شده از $\text{Graphite-Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ ، بهترین عملکرد را از خود نشان داده و رسانایی الکتریکی بالایی در حدود $4400 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ داشته‌اند. در نتیجه می‌توان گفت، انتخاب منبع کربن مناسب برای پیش‌ماده فاز مکس TiAlC_2 و همچنین استفاده از یک فاز مکس با خلوص و کیفیت بالا، می‌تواند به‌طور مؤثری منجر به بهبود رسانایی الکتریکی محصول نهایی گردد (۸۳).

۳-۶- تاثیر میزان آلومینیم اضافی بر رسانایی الکتریکی فاز مکس

در پژوهشی متیس و همکارانش دریافتند که رسانایی الکتریکی فیلم‌های $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ که از فاز مکس با پودر آلومینیم اضافی سنتز شدند، تقریباً برابر با $20000 \text{ S}\cdot\text{cm}^{-1}$ است (۸۴). در این پژوهش، آن‌ها طی فرایند ساخت فاز پیش‌ماده، مقدار اضافی پودر آلومینیم افزودند تا نسبت مولی اجزا TiC:Al:C را به $2:1,25:2,2$ برسانند. در فرایند تکلیس در دماهای بالا، آلومینیم مایع موجب افزایش نفوذپذیری واکنش‌دهنده‌ها می‌شود و در نتیجه ذرات Ti_3AlC_2 با نظم ساختاری و ریخت بهبودیافته‌ای تشکیل می‌گردند. پس از آن، پودر Ti_3AlC_2 به دست آمده با کلریدریک اسید شستشو داده می‌شود تا فازهای بین‌فلزی ایجاد شده ناشی از آلومینیم اضافی حذف شوند.

۴-۶- جوهرهای رسانای الکتریکی

جوهرهای رسانا به‌عنوان عوامل مؤثری در صنایع مختلف الکترونیک چاپی، ذخیره‌سازهای انرژی و غیره مطرح می‌شوند. چاپ مبتنی بر جوهرهای حاوی مواد دوبعدی در کاربردهای متعددی از جمله ابزارهای الکترونیکی پوشیدنی، الکترودهای میکروابرخان‌ها، باتری‌های فیلم نازک، ابزارهای الکترونیکی انعطاف‌پذیر، پوست‌های مصنوعی الکترونیکی، حسگرهای پیش سلامت برای تجهیزات پزشکی کاشتنی و ریزریات‌ها دیده می‌شود. چالش اصلی در توسعه این جوهرها، یافتن ماده رسانایی است که علاوه بر دارا بودن رسانایی

ویژگی کلیدی است که به طور مستقیم بر الگوی چاپی نهایی تأثیر می‌گذارد؛ به طوری که فرمول‌بندی‌های با گرانروی بالا موجب ایجاد لایه‌های ضخیم‌تر در الگوهای چاپی می‌شوند، در حالی که جوهرهای با گرانروی پایین می‌توانند باعث جریان غیرقابل کنترل قطرات جوهر، به ویژه در چاپگرهای جوهرافشان، گردند. علاوه بر این، چسبندگی بین جوهرهای رسانا و بستر نیز از جمله عواملی است که در کاربردهای الکترونیک چاپی در نظر گرفته می‌شود. افزون‌براین، یکنواختی الگوهای چاپ‌شده و ویژگی‌های عملکردی آن‌ها به شدت تحت تأثیر ترکیب جوهر قرار دارند که معمولاً شامل افزودنی‌های گوناگون مانند اصلاح‌کننده‌های رئولوژی و کشش‌سطحی، پیونده، ضدکف‌ها و تقویت‌کننده‌های چسبندگی است.

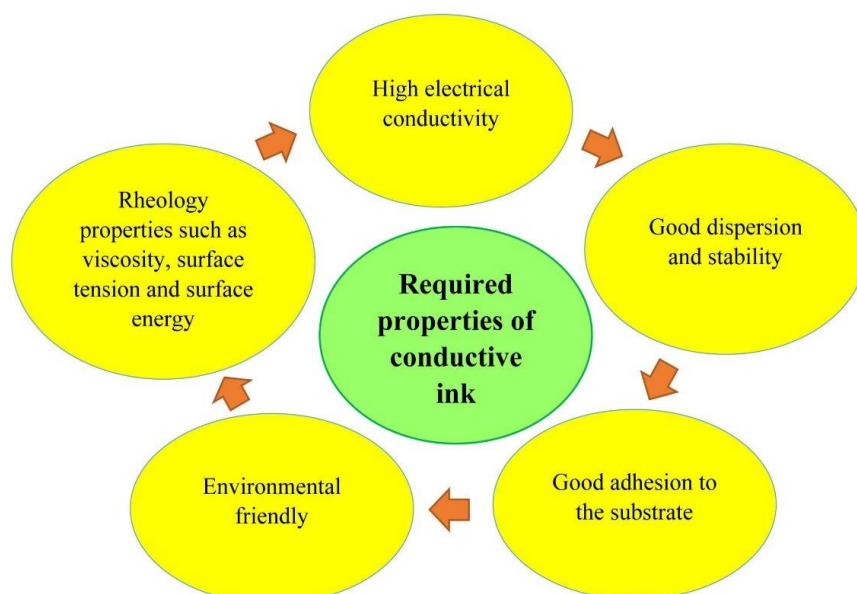
۴-۲-۴-۲ ملزومات کاربرد مکسن در جوهرهای رسانا

در فرایند آماده‌سازی جوهرهای رسانا بر پایه مکسن‌ها، به منظور جلوگیری از نتایج نامطلوب، تحلیل دقیق خصوصیات فیزیکی-شیمیایی آن به ویژه خواص رئولوژیکی، برهم‌کنش‌های ذره-حلال، تبخیر حلال و سرعت‌های تبخیر آن، امری ضروری است. به‌عنوان مثال، پراکنش مکسن‌های با اندازه متوسط در غلظت‌های پایین (۳۰-۱۰ درصد وزنی) منجر به پراکنش تصادفی ذرات با حداقل تماس میان آن‌ها می‌شود؛ در حالی که در غلظت‌های بالا (بیش از ۶۰ درصد وزنی)، تشکیل شبکه‌های نانولایه‌ای پیوسته، منجر به ایجاد

به‌طور کلی، جوهرهای رسانا از ذرات رسانای معلق در یک حلال یا مخلوط حلالی مناسب تشکیل شده و حاوی مواد تثبیت‌کننده‌ای مانند پلیمرها، مواد سطح‌فعال یا مواد چسبنده هستند (۹۱). از جمله ویژگی‌های مطلوب جوهرهای رسانا می‌توان به رسانایی الکتریکی بالا، قابلیت چاپ، دوام، چسبندگی به بسترهای مختلف و گرانروی پایین اشاره کرد (۹۲). علاوه بر این، جوهر رسانا پس از چاپ، ضمن حفظ رسانایی الکتریکی خود باید از لحاظ شیمیایی بی‌اثر بوده و به صورت یک لایه متراکم و یکنواخت بر روی بستر خشک شود تا بتواند یک فیلم رسانای چسبنده و یکپارچه تشکیل دهد. همچنین، زیست‌سازگاری جوهرهای رسانا در پیشرفت تجهیزات الکترونیکی پوشیدنی و دستگاه‌های الکترونیکی زیستی موثر از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است (۹۳-۹۵).

۴-۶-۱ فرمول‌بندی جوهرهای رسانا

فرمول‌بندی جوهر رسانا، یکی از ارکان اساسی در فناوری الکترونیک چاپی است؛ به گونه‌ای که این جوهرها باید علاوه بر حفظ گرانروی دقیق و جلوگیری از انسداد نازل‌های چاپ، کشش‌سطحی و چاپ‌پذیری مناسب، از خواص مطلوب و متناسب با فرایند و نوع چاپگر انتخابی نیز برخوردار باشند. همان گونه که نمودار شمایی شکل ۸ نشان می‌دهد، فرموله‌کردن جوهرهای رسانای مناسب برای بستر و روش چاپ مورد نظر، نیازمند دانش پیشرفته در زمینه فیزیک و شیمی آن است (۹۶-۹۸). گرانروی جوهرهای الکترونیک چاپی یک



شکل ۸: خواص تشکیل‌دهنده جوهرهای رسانا (۹۰).

Figure 8: The essential properties required in the formulation of conductive inks (90).

ژل‌های کلئیدی با استحکام قابل توجه می‌گردد. از طرفی در غلظت‌های متوسط (۶۰-۴۰ درصد وزنی) یک سل-ژل نیز می‌تواند شکل گیرد (۹۹). به‌طور کلی جوهرهای رسانای بر پایه‌ی مکسن در آب یا سایر حلال‌های آلی مانند اتانل، متانل، استن، استونیتیل، دی‌متیل فرمامید، دی‌متیل سولفوکسید، N-متیل ۲-پیرولیدون و غیره به خوبی پراکنده می‌شوند (۱۰۰). همچنین برخی مطالعات با یک طبقه‌بندی ساختاریافته، طیف وسیعی از جوهرهای کامپوزیتی مکسن را معرفی می‌کنند. به جوهرهای کامپوزیتی مبتنی بر مکسن‌ها نیز اشاره نمود. این طبقه‌بندی شامل جوهرهای مکسن-پلیمر، مکسن-کربن، مکسن-فلز، مکسن-سرامیک/اکسید فلزی، جوهرهای پایه مکسن زیست‌سازگار، و الاستومری است (۱۰۱). در هر دسته، برهم‌کنش‌ها در سطح مشترک و تاثیر آن بر خواص نهایی جوهر به وضوح مشاهده شده است. به‌عنوان مثال، در جوهرهای مکسن-پلیمر، از پلیمرهای مانند پلی‌وینیل الکل (PVA) یا پلی‌اتیلن‌گلیکول دی‌آکریلات (PEGDA) استفاده شده که نه تنها به‌عنوان بهبوددهنده چسبندگی و رئولوژی عمل می‌کنند، بلکه انعطاف‌پذیری مکانیکی و پایداری سازه چاپ‌شده را نیز افزایش می‌دهند. از کاربرد این جوهرها می‌توان در حسگرهای کششی، میکروابراخان‌ها و رابط‌های بیوالکترونیک نام برد (۱۰۲). در جوهرهای مکسن-کربن، مواد کربنی مانند نانولوله‌های کربنی یا گرافن، شبکه‌های رسانای الکتریکی مستحکم‌تری ایجاد کرده و از تجمع مجدد لایه‌های مکسن جلوگیری می‌کنند و در نتیجه پایداری جوهر و وضوح چاپ را افزایش می‌دهند. مطالعات نشان داده‌اند جوهرهای کامپوزیتی حاوی نانولوله‌های کربنی، یکپارچگی ساختاری چشمگیری تحت شرایط خمش از خود نشان داده‌اند که کاربرد آن‌ها در الکترونیک‌های کشش‌پذیر و حسگرهای پوشیدنی را ممکن ساخته است (۱۰۳). در جوهرهای مکسن-فلز، افزودن نانوذرات فلزی مانند نقره، نیکل یا مس به افزایش رسانایی، فعالیت کاتالیزوری و پایداری ساختاری کمک می‌کنند (۱۰۴). در جوهرهای مکسن-سرامیک/اکسید فلزی، با به‌کارگیری اکسیدهای رایج نظیر اکسید تیتانیم (TiO₂)، اکسید منگنز (MnO₂) و غیره باعث بهبود رفتار شبه‌خازنی، فعالیت کاتالیزوری نوری و پایداری حرارتی الکترودهای ابرخازنی می‌شوند (۱۰۵). همچنین تهیه جوهرهای زیست‌سازگار مبتنی بر مکسن با پایه پلیمرزیستی مانند ژلاتین و آلژینات برای کاربردهای پزشکی (سیستم‌های رهایش دارو) و حسگرهای پوشیدنی و یا بر پایه پلی‌دی‌متیل‌سیلوکسان (PDMS) و پلی‌پورتان برای کاربردهای الکترونیکی قابل کشش مورد استفاده قرار می‌گیرند (۱۰۶، ۱۰۷).

در پژوهشی دیگر، بین ژانگ و همکارانش به ارائه روشی نوین و کارآمد برای ساخت قاب‌های سه‌بعدی مبتنی بر مکسن با استفاده از فناوری چاپ مستقیم با جوهر می‌پردازد. هدف اصلی، تولید سازه‌های سبک، مقاوم و بسیار رسانا با قابلیت محافظت تنظیم‌پذیر در برابر امواج

۴-۳-۴-۶- پایداری شیمیایی جوهرهای رسانای بر پایه مکسن‌ها

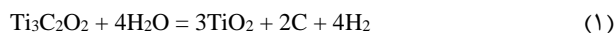
با وجود رسانایی الکتریکی بالا، خواص الکتروشیمیایی مطلوب و قابلیت آب‌دوستی ذاتی مکسن‌ها مانند Ti₃C₂T_x، ساخت و توسعه جوهرهای مبتنی بر آن‌ها برای چاپ با موانع عمده‌ای روبه‌رو است. یک چالش محوری، اکسایش و ناپایداری ذرات مکسن در سوسپانسیون‌های آبی است که منجر به تخریب سریع خواص الکتریکی جوهر و تشکیل TiO₂ می‌شود و در نهایت باعث از دست رفتن عملکرد قطعه چاپ شده می‌گردد (۱۰۹). این مسئله، عمر مفید جوهر^۱ را به شدت تحت تاثیر قرار می‌دهد و نیاز به شرایط پردازش و نگهداری کنترل‌شده مانند محیط عاری از اکسیژن ایجاد می‌نماید.

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، مکسن‌ها از پایداری پراکندگی بسیار مطلوبی در حلال‌های مختلف از جمله آب برخوردارند. با این حال، شواهد نشان می‌دهد اکسیژن محلول در آب با تخریب شیمیایی لایه‌های مکسن، موجب تجزیه ساختاری در لایه‌ها و کاهش طول عمر این جوهرها می‌شود. به‌طور مثال، حضور TiO₂ روی سطح Ti₃C₂T_x باعث می‌شود در اثر قرارگیری در معرض نور یا دماهای بالا، تغییر فاز و دگرریختی ساختاری در مکسن رخ دهد (۱۱۰). فرایند اکسایش به‌طور معمول از لبه‌ها آغاز شده و سپس به سطوح پایه گسترش می‌یابد. در واقع این حالت ممکن است در تمام محیط‌ها رخ دهد و لایه‌های کوچک‌تر با سرعت بیشتری نسبت به ذرات بزرگ‌تر اکسید شوند. همچنین وابستگی مستقیم سرعت اکسایش به نوع محیط باعث می‌شود این سرعت در فاز مایع به حداکثر و در فاز جامد به حداقل برسد (۱۱۱). از این‌رو به نظر می‌رسد، حذف اکسیژن محلول در آب از طریق اشباع آن با گازهای نیتروژن یا آرگون می‌تواند روشی مؤثر برای کاهش نرخ اکسایش باشد. بر اساس مطالعات ژانگ و همکارانش (۱۱۲)، اکسایش مکسن در هوا با سرعت بسیار بالایی صورت گرفته و حتی احتمال تخریب

آلیله شده ۴،۳-دی‌هیدروکسی-ال-فنیل‌آلنین (ADOPA) به نام جوهر AD-Mxene انجام شد که امکان چاپ الکترودهای پایدار در محیط‌های مرطوب و دارای اکسیژن را فراهم می‌کند (۱۱۴). این جوهر با استفاده از روش چاپ الکتروهیدرودینامیک برای ساخت ترانزیستورهای لایه‌نازک (TFT) کاملاً محلول به کار رفته و عملکرد بهتری نسبت به الکترودهای فلزی متداول مانند طلا و آلومینیم نشان می‌دهد. در واقع، با عامل‌دار کردن سطح مکسن $Ti_3C_2T_x$ با لیگاند ADOPA، ساختاری ایجاد می‌شود که گروه کاتکول^۲ در سر لیگاند با گروه‌های سطحی مکسن پیوند هیدروژنی قوی برقرار می‌کند، درحالی‌که انتهای آب‌گریز آن، پراکنش خوب در حلال‌های آلی مانند اتانل را ممکن می‌سازد. در این حالت، رسانایی الکتریکی فیلم‌های تهیه شده از این جوهر، حدود $5579 S \cdot cm^{-1}$ اندازه‌گیری شد که نزدیک به رسانایی الکتریکی مکسن خالص یعنی $6900 S \cdot cm^{-1}$ است. همچنین الکترودهای چاپ شده با جوهر AD-Mxene در اتانول، نیاز به ولتاژ عملیاتی پایین‌تری دارد و خطرات ناشی از ولتاژ بالا را کاهش می‌دهد و بدون نیاز به چسب از چسبندگی خوبی نیز برخوردارند. از طرفی، ترانزیستورهای لایه‌نازک ساخته‌شده با الکترودهای AD-MXene و لایه فعال اکسید روی-قلع، عملکرد بهتری نسبت به نمونه‌های مشابه با الکترودهای طلا و آلومینیم نشان دادند. تحرک‌پذیری مؤثر (μ_{eff}) این ترانزیستورها به $3/24 cm^2/Vs$ رسید که بالاتر از مقادیر مربوط به آلومینیم ($2/61$) و طلا ($1/75$) بود (شکل ۹). علاوه بر موارد مشاهده‌شده، به‌دلیل ماهیت آب‌گریزی لیگاندهای ADOPA، الکترودهای AD-MXene در برابر رطوبت و اکسایش مقاومت بالایی از خود نشان دادند به‌گونه‌ای که پس از ۳۰ روز قرارگیری در شرایط ۶۰ درصد رطوبت نسبی و دمای $25^\circ C$ ، کاهش ناچیزی در عملکرد الکتریکی داشتند (۱۱۴).

در پژوهشی دیگر، به طراحی هدفمند و مؤثر برای تولید فیلم‌های رسانای شفاف با کارایی بسیار بالا بر پایه جوهرهای آبی حاوی مکسن $Ti_3C_2T_x$ پرداخته شده است. در واقع، این پژوهش با هدف توسعه الکترودهای شفاف رسانای مبتنی بر مکسن انجام شده تا بتواند جایگزینی مناسب برای اکسید قلع ایندیم در کاربردهای الکترونیک شفاف و انعطاف‌پذیر مانند صفحه‌های لمسی، آنتن‌های شفاف و میکرو ابرخازن‌ها باشد. با این حال، تاکنون دستیابی به فیلم‌های شفاف مکسن با شاخص شایستگی بالا (یعنی FOM_e) که به‌عنوان نسبت شفافیت به مقاومت سطحی تعریف می‌شود، اغلب به‌دلیل پدیده نفوذ و مقاومت بین‌لایه‌ای، با چالش مواجه بوده است.

سوپانسیون این ترکیبات در گاز آرگون نیز پس از ۲۵ روز تا حدود ۱/۲ درصد ممکن است وجود داشته باشد. سازوکار احتمالی اکسایش نیز بر اساس مطالعات پیشین به صورت واکنش ۱ می‌باشد (۱۱۳).



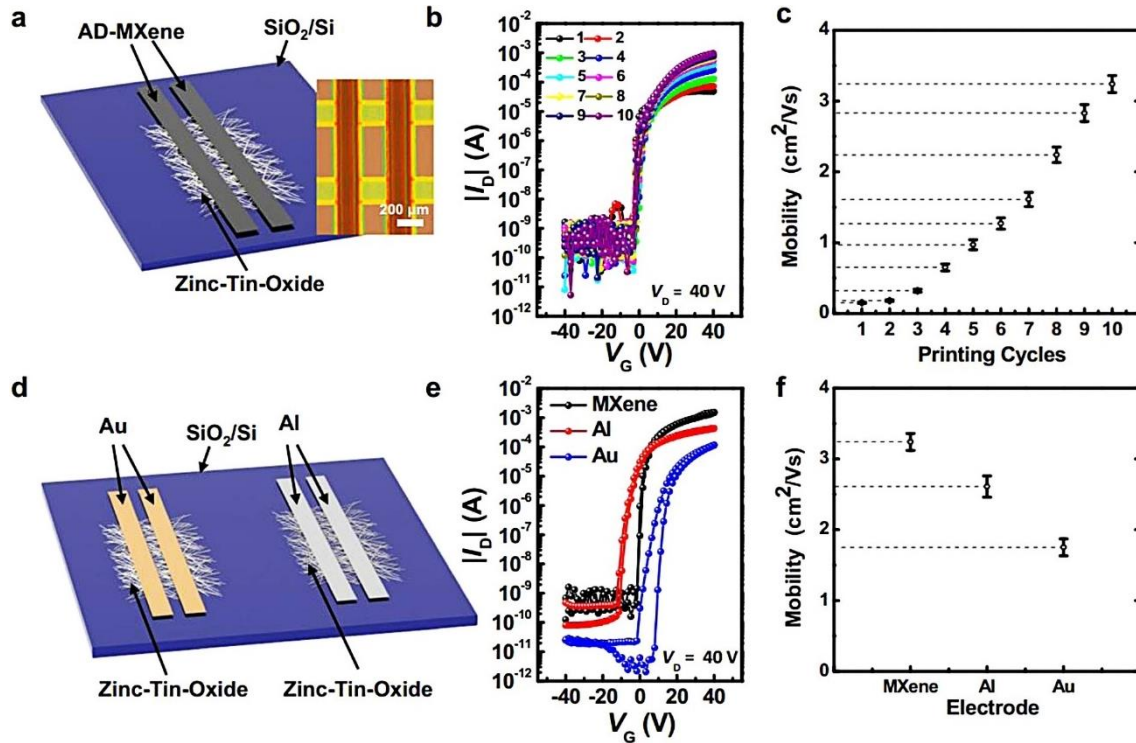
همچنین باید در نظر داشت که نگهداری طولانی مدت ترکیبات مکسن با چالش‌هایی همراه است. به‌عنوان مثال به منظور حفظ پایداری و جلوگیری از اکسایش جوهرهای مبتنی بر مکسن، می‌توان این ترکیبات را در ظرف‌های کاملاً پوشیده همراه با گاز آرگون در دماهای پایین (کمتر از $4^\circ C$) و دور از نور نگهداری کرد (۱۱۳)؛ زیرا همچنان نگهداری مکسن خشک‌شده در شرایط خلا یا در حلال‌های آلی نیز می‌تواند گزینه مناسبی باشد، زیرا که شواهد نشان داده جوهرهای مکسن در این شرایط برای چندین ماه پایدار باقی می‌مانند. ذکر این نکته ضروری است که در صورت نگهداری در شرایط خشک، به‌ویژه در دماهای بالا، پدیده توده‌ای شدن لایه‌ها ممکن است رخ دهد (۱۱۳). بر اساس پژوهش‌های ژائو و همکارانش، مشخص شده که پاداکسنده مانند سدیم آسکوربات می‌تواند حتی در حضور آب و اکسیژن، مقاومت در برابر اکسایش را افزایش دهد (۱۱۳). بدین‌صورت که سدیم آسکوربات با لایه‌های دارای بار مثبت مکسن پیوند برقرار کرده و از تخریب ناشی از اکسایش جلوگیری می‌کند. مزیت پاداکسنده‌ها در این است که معمولاً پایداری شیمیایی، کلئیدی یا رسانایی الکتریکی را دست‌خوش تغییر نمی‌کنند؛ برای مثال، در مورد $Ti_3C_2T_x$ ، پس از ۲۱ روز، خواص آن همچنان به خوبی حفظ شده است. همچنین می‌توان به‌عنوان روشی جایگزین، از نمک‌های پلی‌یونی مانند پلی‌فسفات‌ها یا پلی‌سیلیکات‌ها برای مقابله با اکسایش استفاده کرد، زیرا علاوه بر صرفه‌اقتصادی و امکان شست‌وشوی آسان، تولید مقیاس‌پذیر و ذخیره‌سازی بلندمدت جوهرهای مکسن را فراهم می‌سازند در همین راستا لی و همکارانش (۷۱) با توسعه روش عملیات حرارتی هیدروژنی^۱ برای بهبود مقاومت اکسایشی مکسن خالص نشان دادند که اصلاح هیدروژنی^۱ می‌تواند پایداری اکسایشی فیلم‌های مکسن را تحت شرایط سخت مانند دماهای بالا و رطوبت نسبی ۱۰۰ درصد به‌طور قابل‌توجهی افزایش دهد و ۲- امکان بازیابی رسانایی الکتریکی فیلم‌هایی را که قبلاً دچار اکسایش شده‌اند فراهم آورده و بدین‌ترتیب پتانسیل بالای کاربردهای صنعتی مکسن را نمایان سازد.

به منظور غلبه بر چالش‌های اصلی مکسن‌های معمولی در کاربردهای الکترونیکی چاپی، از جمله ناپایداری در محیط‌های مرطوب، پایداری پراکنش ضعیف در حلال‌های آلی و تولید الکترونیک‌های چاپی مقرون‌به‌صرفه و انعطاف‌پذیر، پژوهشی توسط سئون جین کین و همکارانش با عنوان تهیه جوهر مبتنی بر مکسن عامل‌دار شده با لیگاند

2. Catechol

3. Transparent conductive electrodes

1. Hydrogen annealing



شکل ۹: ویژگی‌های انتقال و تحرک پذیری ترانزیستورهای لایه نازک (TFTs) با الکترودهای مختلف (a) نمایش شماتیک و تصویر میکروسکوپ نوری از یک TFT با تماس بالایی مجهز به الکترودهای چاپ شده به روش الکترو هیدرودینامیک (EHD)، مشخصه‌های انتقال (b) و مقادیر μ_{FET} ، (c) مربوط به TFT دارای الکترودهای AD-MXene که با تعداد چرخه‌های مختلف چاپ EHD ساخته شده‌اند، (d) نمایش شماتیک ترانزیستورهای لایه نازک با تماس بالایی مجهز به الکترودهای طلا (Au) و آلومینیم (Al) لایه نشانی شده در خلا، مشخصه‌های انتقال (e) و مقادیر μ_{FET} (f) مربوط به TFT دارای الکترودهای AD-MXene، آلومینیم و طلا (۱۱۴).

Figure 9: Transfer characteristics and mobilities of TFTs with different electrodes. a Schematic representation and an optical microscope image of top-contact TFT with EHD printed AD-MXene electrodes. Transfer characteristics, (b) and μ_{FET} values, (c) of TFTs employing AD-MXene electrodes produced with various numbers of EHD printing cycles, (d) Schematic representation of top-contact TFTs employing vacuum-deposited Au and Al electrodes. Transfer characteristics (e) and μ_{FET} values (f) of TFTs employing AD-MXene, Al, and Au electrodes (114).

از این رو، در این تحقیق، پژوهشگران با تمرکز بر دو عامل کلیدی، به حل این چالش‌ها پرداخته‌اند:

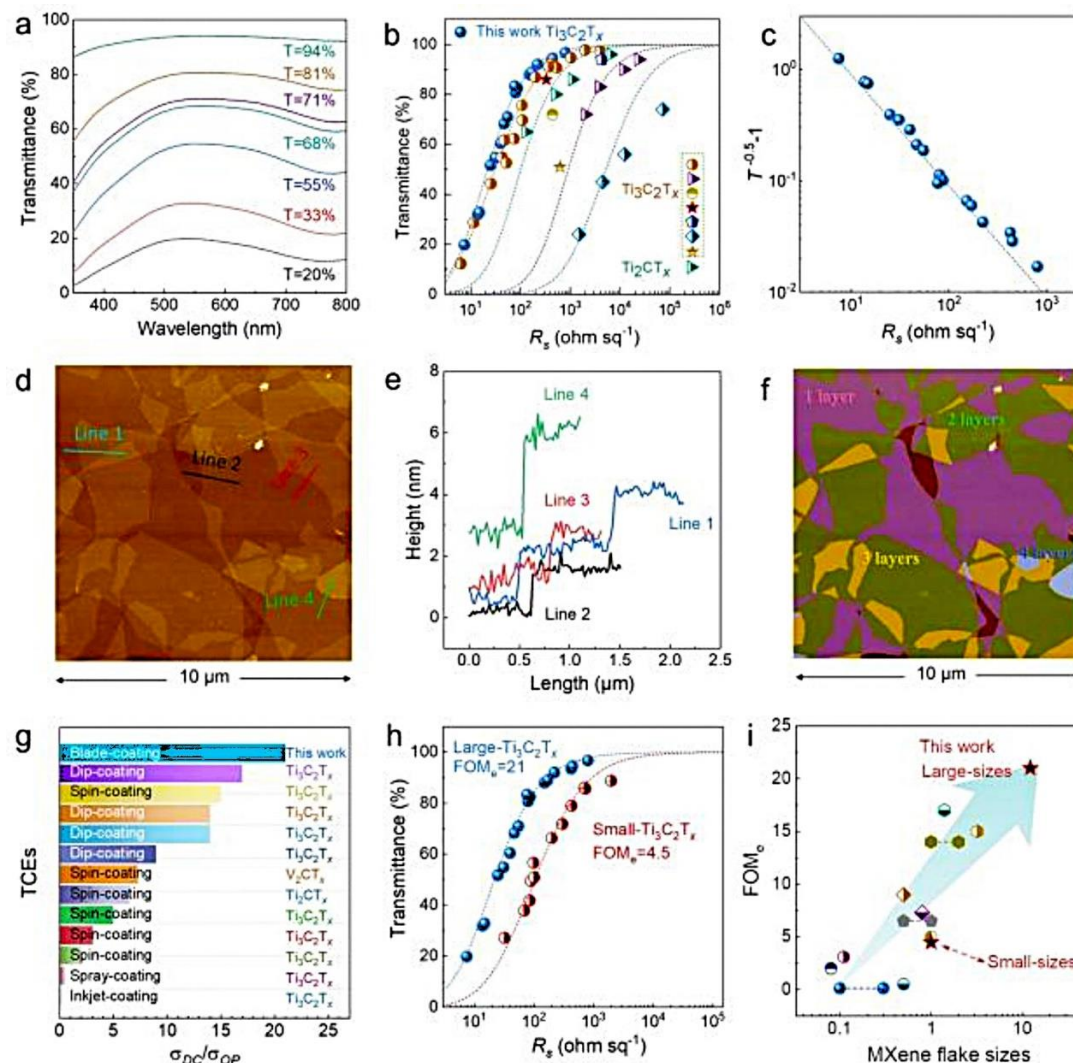
۱- استفاده از نانولایه‌های مکسن با اندازه بسیار بزرگ (در حدود ۱۲/۲ میکرومتر) که به طور طبیعی تعداد نقاط اتصال و بنابراین موانع انتقال الکترون را به حداقل می‌رساند.

۲- به کارگیری روش پوشش دهی تیغه‌ای که با اعمال نیروی برشی کنترل شده، این نانولایه‌های بزرگ را به صورتی فشرده و کاملاً هم‌راستا روی زیرلایه آرایش می‌دهد و یک شبکه رسانای پیوسته و بدون شکاف تشکیل می‌دهد.

با این روش، فیلم نهایی با ضخامت حدود ۶/۷ nm و شفافیت

۸۳/۴ درصد، شاخص FOM_e با مقدار ۲۹ و رسانایی بسیار بالایی در حدود 19325 S.cm^{-1} نشان داد که بالاترین مقدار گزارش شده برای فیلم‌های شفاف مکسن تا آن زمان یعنی سال ۲۰۲۳ بوده است. همچنین برخلاف روش‌های رایج مانند پوشش چرخه‌ای یا جوهرافشان، حتی در شفافیت‌های بسیار بالا (مثلاً ۹۴ درصد) مشکل نفوذ مشاهده نشد. این امر ناشی از پوشش تقریباً کامل سطح توسط نانولایه‌های بزرگ و تشکیل مسیرهای رسانای پیوسته است (۱۱۵). شکل ۱۰ خواص اپتوالکترونیکی فیلم‌های نازک $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ را نشان می‌دهد.

1. Spin coating



شکل ۱۰: خواص اپتوالکترونیکی فیلم‌های نازک $Ti_3C_2T_x$ (a) طیف‌های UV-Vis فیلم‌ها با درصد عبورهای نوری مختلف، (b) رابطه بین عبور نور (T) و مقاومت سطحی (R_s) مقادیر T و R_s بر نمودار $T^{-0.5} - 1$ بر حسب R_s ، (c) نمودار $T^{-0.5} - 1$ بر حسب R_s ، (d) تصویر AFM از یک فیلم $Ti_3C_2T_x$ با T برابر ۹۴ درصد (پوشش مکسن برابر با ۹۸ درصد)، (e) نمودارهای ارتفاع مربوط به خطوط مشخص شده در بخش (d)، (f) نواحی متشکل از تعداد لایه‌های مختلف در تصویر (d) که با رنگ‌های متفاوت نمایش داده شده‌اند، (g) مقایسه نسبت σ_{DC}/σ_{OP} (FOM_e) در فیلم‌های شفاف رسانای مختلف مبتنی بر مکسن و (i) رابطه بین شاخص FOM_e و اندازه لایه‌های مکسن (۱۱۵).

Figure 10: Optoelectronic properties of $Ti_3C_2T_x$ thin films (a) UV-vis spectra of films with various transmittance, (b) The relationship between transmittance (T) and sheet resistance (R_s), curves T and R_s , (c) $T^{-0.5} - 1$ as a function of R_s to confirm the fitting value, (d) AFM image of a $Ti_3C_2T_x$ film at T = 94% (MXene coverage 98%), (e) Height profiles of the different lines marked on (d), (f) Areas comprising different numbers of layers in (d) are shown with different colors, (g) Comparison of σ_{DC}/σ_{OP} (FOM_e) in various transparent conductive MXene films, and (i) Relationship between FOM_e and MXene flake sizes (115).

یکپارچه‌سازی جوهرهای عملکردی با خواص مهندسی شده ویژه از نظر گرانبوی، چگالی و کشش سطحی است که همگی عوامل حیاتی برای پاشش مناسب محسوب می‌شوند (۱۲۰-۱۱۶). به همین دلیل، ضروری است که فناوری‌های چاپ موجود ارتقا یافته و رویکردهای طراحی نوینی نیز پایه‌گذاری کردند. در ادامه به برخی پرکاربردترین روش‌های چاپ جوهرهای رسانا پرداخته می‌شود.

۷- روش‌های اعمال جوهرهای بر پایه مکسن‌ها

در مقایسه با روش‌های تولید سنتی، روش‌های چاپ جوهر شامل چاپ جوهرافشان، چاپ سیلک اسکرین و چاپ سه‌بعدی یا روش مهرزنی، همگی فرایندهایی سریع، کم هزینه و آسان هستند که امکان دستیابی به وضوح چاپ بالا و الگوپردازی دیجیتال منعطف را فراهم می‌سازند. مزیت دیگر استفاده از چاپ جوهر، قابلیت

۱-۷ چاپ سیلک اسکرین

چاپ اسکرین به دلیل پایداری و قابلیت تکرارپذیری بالا، در تولید ابرخازن‌های میکرونی، باتری‌های لایه‌نازک، الکترونیک‌های انعطاف‌پذیر و الکترودهای حسگر مورد استفاده قرار می‌گیرد (۱۲۱). در این روش، از یک شابلون میان جوهر و بستر استفاده می‌شود و سپس طرح یا الگوی مورد نظر پس از خشک شدن جوهر روی بستر تشکیل می‌شود و این فرایند می‌تواند برای ایجاد لایه‌های چندگانه، چندین بار تکرار شود. وضوح الگوهای ایجادشده وابسته به دقت شابلونی است که جوهر از آن عبور می‌کند. انتقال جوهر از شابلون نیز به طور مستقیم به میزان گرانیوی و اندازه مش شابلون مربوطه وابسته است. لی و همکارانش (۱۲۲) با استفاده از اکسید روتیم آبدار، نانولایه‌های مکسن و نانوذرات‌های نقره، یک جوهر با رفتار تیکستروپیک برای چاپ اسکرین تهیه کردند. آن‌ها دریافتند که جوهر تیکستروپیک و جوهر خالص حاوی مکسن، در تنش‌های کمتر از حد تسلیم همچون جامد رفتار می‌کنند، اما در تنش‌های برشی بالاتر از حد تسلیم، رفتاری سیال‌گونه نشان می‌دهند. این ویژگی موجب می‌شود جوهر مکسن به راحتی از شابلون عبور کند. همچنین مشخص شد که ذرات نقره با توزیع یکنواخت در جوهر باعث افزایش رسانایی جوهر و جلوگیری از تجمع مجدد صفحات مکسن می‌شود.

چاپ سیلک اسکرین با وجود برخورداری از مزایای متعددی از قبیل امکان کنترل ضخامت لایه چاپی، مقرون به صرفه بودن و قابلیت تولید انبوه، با معایب عمده‌ای همچون وضوح پایین چاپ، زبری سطح و استفاده از جوهر با غلظت بالا مواجه است؛ این کاستی‌ها گویای این واقعیت است که همچنان نیاز به تحقیقات بیشتر و تغییرات گسترده‌تری در این حوزه وجود دارد.

۲-۷ چاپ جوهرافشان

به عنوان یک روش چاپ غیرتماسی و دیجیتال که بسیار سریع‌تر از چاپ سیلک اسکرین عمل می‌کند، چاپ جوهرافشان به طور متداول برای ساخت دستگاه‌های متعددی از جمله ابرخازن‌های میکرونی، حسگرها و ترانزیستورها به کار می‌رود (۱۲۶-۱۲۳). با این حال، این روش با چندین محدودیت همراه است، از جمله اینکه جوهر با گرانیوی بسیار زیاد به سختی از نازل خارج می‌شود، درحالی‌که با گرانیوی بسیار کم ممکن است، پاشش بیش از حد روی سطح زیرلایه رخ دهد و بر وضوح و شفافیت چاپ تأثیر نامطلوب داشته باشد. جوهرهای حاوی مکسن‌های تک‌لایه حتی در غلظت‌هایی پایین 0.2 mg/mL رفتار الاستیک از خود نشان می‌دهند؛ این ویژگی باعث

می‌شود تا این جوهرها برای روش‌هایی مانند اسپری یا پوشش‌دهنده چرخشی مناسب باشند. بر خلاف جوهرهای متداول یکی از مزایای مهم این جوهرها، پایداری ذاتی آن‌ها بدون نیاز به افزودنی‌های شیمیایی است. ژانگ و همکارانش (۱۲۷) توانستند روی زیرلایه‌های PET پوشش داده شده با AlO_x ، جوهرهای حاوی مکسن در هر دو غلظت بالا و پایین را با وضوح بالا چاپ نمایند. نکته قابل توجه در این مطالعه آن است که جوهر چسبندگی بسیار بالایی نسبت به بستر داشته و پس از چسباندن و جداکردن نوار چسب از سطح نمونه، هیچ لایه‌ای از چاپ جدا نشده است. همچنین می‌توان گفت، ابرخازن‌های چاپ‌شده با روش جوهرافشان نیز دارای ظرفیتی معادل 562 F/cm^3 و چگالی انرژی $0.32 \mu\text{Wh/cm}^2$ بوده که این مقادیر بالاترین عملکرد گزارش شده در مقایسه با سایر میکروخازن‌های چاپی به شمار می‌آیند.

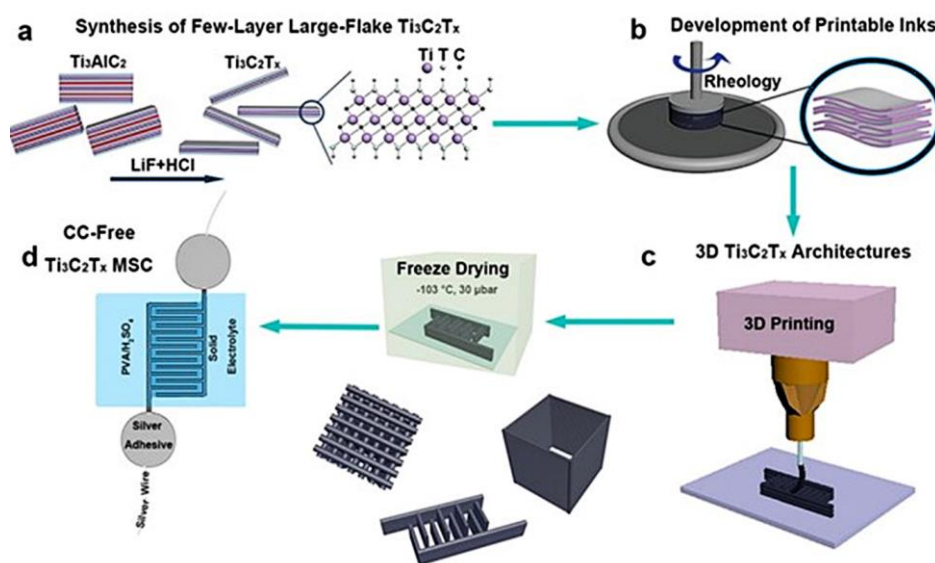
۳-۷ چاپ سه‌بعدی

روش چاپ سه‌بعدی به عنوان شکلی از ساخت افزایشی شناخته می‌شود. همان‌طور که از نام آن بر می‌آید، این فرایند با افزودن تدریجی مواد در یک الگوی مشخص جهت ساخت محصول عمل می‌کند، درحالی‌که ساخت کاهشی بر پایه برداشت ماده است. چاپ سه‌بعدی شامل چاپ مبتنی بر جوهر و چاپ مبتنی بر نور است. روش‌های مبتنی بر نور، مانند استریولیتوگرافی و لیزر تف‌جوشی، امکان دستیابی به الگوهای چاپی با وضوح بالا را فراهم می‌کنند؛ هر چند سرعت چاپ در این فناوری‌ها محدود است. همچنین، نوع موادی که در این روش قابل استفاده‌اند، محدود بوده و معمولاً از رزین‌های پلیمری گرمانرم‌ترای چاپ سه‌بعدی مبتنی بر نور استفاده می‌شود. از سوی دیگر، ونجی و همکارانش (۱۲۷) نیز موفق به ساخت فرمول‌بندی جوهر دو بعدی $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ با خواص گران‌روکشسان بهینه برای چاپ سه‌بعدی شدند. شکل ۱۱ مراحل چاپ سه بعدی خازن‌های میکرونی را به تصویر می‌کشد. از مزایای بارز این فناوری می‌توان به کنترل دقیق بر ابعاد و هندسه محصول، انعطاف‌پذیری بالا در چاپ، مقرون به صرفه بودن و سازگاری با محیط زیست اشاره کرد.

در حوزه چاپ سه‌بعدی زیستی، راستین و همکارانش (۱۲۸) نیز نشان داده‌اند که نانوصفحات تیتانیم کاربید موسوم به مکسن را می‌توان برای ساخت جوهرهای زیستی سه‌بعدی به کار برد، علی‌رغم این واقعیت که اکثر جوهرهای زیستی رایج از رسانایی الکتریکی ضعیفی برخوردارند. مطالعات نشان داده‌اند که آب‌زل‌های دارای رسانایی الکتریکی، انتقال سیگنال بین سلول‌ها را بهبود بخشیده‌اند.

4. 3D printing
5. Thermoplastic
6. Viscoelastic

1. Screen printing
2. Thixotropy
3. Inkjet printing



شکل ۱۱: شمایی از مراحل ساخت چاپ سه‌بعدی سازه‌های مکسن و میکرو ابرخازن‌ها (a) فرایند سنتز نانوصفحات مکسن $Ti_3C_2T_x$ ، (b) آماده‌سازی جوهرهای $Ti_3C_2T_x$ در pH خنثی، (c) چاپ سه‌بعدی جوهرهای دارای خواص گران‌روکشسان مناسب برای تولید اشیا مختلف با طراحی سه‌بعدی و (d) میکرو ابرخازن‌ها حالت جامد ساخته‌شده به روش چاپ سه‌بعدی (۱۲۷)

Figure 11: Schematic illustration of the manufacturing steps for 3D printing of freestanding MXene and MSC (a) Synthesis process of $Ti_3C_2T_x$ MXene, (b) Preparation of $Ti_3C_2T_x$ inks at neutral pH, (c) The 3D printing of inks with ideal viscoelastic properties to manufacture various 3D design objects, and (d) Solid-state MSC manufactured by 3D printing (127).

بار منفی در سرعت جریان کنترل شده به درون بستر ویسکوز سیلیکون روغن- لیگاند تزریق گردید. در این روش، جوهر حاوی مکسن که دارای بار منفی بوده با دبی کنترل شده به درون بستر سیلیکون روغن- لیگاند تزریق شد. پس از تکمیل فرایند اختلاط، جوهر در فصل مشترک دو سیال متمرکز شده و ساختاری شبیه به رشته سه‌بعدی تشکیل می‌دهد.

در پژوهشی، چانفانگ ژانگ و همکارانش به ارائه یک راهبرد نوین در چاپ مستقیم در دمای اتاق برای ساخت ادوات الکترونیک بی‌سیم منعطف پرداختند. هدف اصلی این تحقیق، غلبه بر چالش‌های متداول در فناوری‌های چاپ ادوات الکترونیک از قبیل دقت چاپ پایین، دشواری در چاپ دقیق و کاملاً منطبق روی سطوح منحنی، نیاز به فرمول‌بندی‌های پیچیده جوهر و فرایندهای عملیاتی حرارتی با بهره‌گیری از ویژگی‌های منحصربه‌فرد مکسن‌ها است. نتایج نشان داد رسانایی الکتریکی بالا بدون نیاز به عملیات حرارتی به دست آمد. یعنی رسانایی الکتریکی اولیه خطوط چاپ شده برابر با مقدار 6260 S.cm^{-1} بود اما پس از خشک کردن در شرایط رطوبت نسبی پایین (حدود ۱۰ درصد) به 6900 S.cm^{-1} افزایش یافت. این مقدار رسانایی که بدون نیاز به هیچ‌گونه فرایند حرارتی یا پخت با UV حاصل شده، می‌تواند با رسانایی فلزات مقایسه شود. به‌علاوه، همان‌طور که در شکل ۱۲ نشان داده شده است، جوهر مکسن

در بیشتر موارد، این مواد بیونیک رسانا با ترکیب زیست‌پلیمرها و پلیمرهای رسانا توسعه یافته‌اند، اما مطالعات بر روی مواد رسانای دوبعدی محدود بوده است. یافته‌ها حاکی از آن است که بیوژل‌های هیالورونیک اسید/آلژینات حاوی نانوصفحات Ti_3C_2 از قابلیت چاپ پذیری برجسته و وضوح مناسبی برخوردارند. رسانایی الکتریکی جوهر زیست‌کامپوزیتی مذکور با افزودن ماده Ti_3C_2 به آن می‌تواند به مقادیر $5500 \pm 85 \mu\text{S cm}^{-1}$ و $7200 \pm 126 \mu\text{S cm}^{-1}$ برسد که به‌طور شگفت‌انگیزی بالاتر از مقادیر مربوط به جوهرهای معمول بوده و این امر، کاربرد این مواد در حوزه پزشکی از جمله مهندسی بافت عصبی را افزایش می‌دهد (۱۲۹،۵۰).

۴-۷ چاپ مستقیم

چاپ مستقیم جوهر یکی دیگر از روش‌های تولید ساختارهای چاپی است که بر پایه اکستروژن مواد گران‌روکشسان با رفتار غیرنیوتنی انجام می‌شود. در مطالعه‌ای، کین و همکارانش (۱۳۱) با استفاده از نانولایه‌های $Ti_3C_2T_x$ و n - بوتیل آمین در فصل مشترک روغن- آب، موفق به چاپ سه‌بعدی مکسن‌ها شدند. در این روش، جوهر مکسن با

1. Conductive bionics
2. Hyaluronic acid/Alginate biogels
3. Direct printing

مورد مطالعه به شمار می‌روند. در این میان، جوهرهای مبتنی بر مکسن‌ها به وضوح ثابت کرده‌اند که از پتانسیل بالایی در خصوص نوآوری در صنایع الکترونیک چاپی و همچنین بازده بالا برخوردار هستند. توانایی تنظیم خواص از طریق سنتز، لایه‌سازی و فرمول‌بندی جوهر، آن‌ها را به موادی با سازگاری بالا تبدیل کرده است به گونه‌ای که از رساناها و حسگرهای انعطاف‌پذیر تا باتری‌های پیشرفته، کاربردهای متعددی با استفاده از این جوهرها به نمایش درآمده است. اگرچه چالش‌هایی در زمینه پایداری و مقیاس‌پذیری وجود دارد، اما تحقیقات بسیاری در این زمینه در حال انجام است تا موانع پیش‌روی مرتفع شوند.

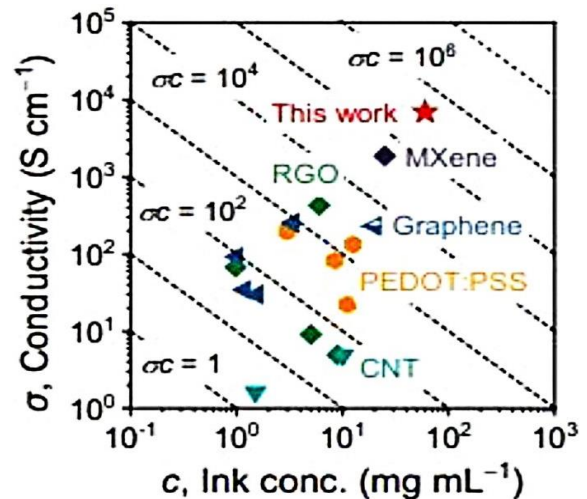
فرمول‌بندی جوهرهای مکسن مبتنی بر درک عمیق برهم‌کنش‌های بین نانولایه‌های مکسن و حلال‌ها و تثبیت‌کننده‌ها می‌باشد. پژوهش‌ها نشان داده‌اند که مهندسی دقیق خصوصیات فیزیکی مانند گرانشی و رفتار رئولوژیکی و کشش‌سطحی نه تنها چاپ‌پذیری را ممکن می‌سازد، بلکه به‌طور مستقیم بر یکنواختی، وضوح و در نهایت عملکرد الکترونیکی فیلم نهایی تأثیر می‌گذارد. جوهرهای مبتنی بر مکسن با روش‌های مختلف چاپی از جمله اسکرین، جوهرافشان، گراور، سه‌بعدی و چاپ مستقیم طیف وسیعی از لایه‌های چاپی را حاصل می‌نمایند. در مسیر تجاری‌سازی کامل این جوهرها غلبه بر چالش حفظ پایداری جوهرها ضروری است. به‌عبارت‌دیگر، پایداری اکسایشی این جوهرها که به‌عنوان یکی از بزرگترین چالش‌های این حوزه مطرح است، به ناپایداری مکسن‌ها در برابر آب و اکسیژن اشاره دارد. با توجه به آنکه نگهداری این دسته از جوهرها در محیط‌های بی‌اثر می‌تواند به حفظ پایداری آن‌ها در برابر اکسید شدن کمک کند اما تنها راه حل این چالش در آینده نخواهد بود. در نهایت می‌توان گفت جوهرهای مبتنی بر مکسن در آستانه تبدیل شدن از یک ماده ساده در پژوهش‌های دانشگاهی به یک ماده مهندسی شده و کاربردی در صنعت قرار دارند. با ادامه تحقیقات در حوزه‌های شیمی، پزشکی و علم مواد، انتظار می‌رود ظهور نسل جدیدی از دستگاه‌های الکترونیکی چاپی، هوشمند و با دوام رخ دهد. از این رو، دهه پیش‌رو، می‌تواند عصر طلایی برای بلوغ و شکوفایی فناوری جوهرهای مکسن باشد.

تشکر و قدردانی

از پژوهشگاه رنگ برای حمایت و پشتیبانی برای انجام این مطالعه تشکر و قدردانی می‌گردد.

تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.



شکل ۱۲: نمودار مقایسه رسانایی (σ) و غلظت (c) جوهر مکسن با سایر جوهرهای چاپ‌پذیر گزارش شده (۱۳۲).

Figure 12: The comparison of ink conductivity (σ) and concentration (c) of the MXene ink with other reported printable ink systems (132).

فرموله‌شده (با میانگین تعداد لایه برابر با ۲) به یک رکورد در شاخص FOM (که در اینجا به صورت حاصل‌ضرب رسانایی الکتریکی (σ) در غلظت (c) تعریف می‌شود) (۱۳۱) رسیده که برابر با $414000 \text{ S.cm}^{-1} \text{ mg mL}^{-1}$ بوده و از تمامی جوهرهای چاپ‌پذیر گزارش شده تا سال ۲۰۲۲ فراتر رفته است (۱۳۲).

۷-۵ چاپ گراور

چاپ گراور، یکی از پرکاربردترین روش‌های چاپ است که جوهر از طریق حفره‌های کوچک حکاکی‌شده بر روی یک سیلندر به بستر انجام می‌شود. گرانشی این دسته جوهرهای چاپ بسیار کم و برابر با $0.1/0.2$ Pa.s است. بزرگ‌ترین چالش پیش‌روی چاپ گراور، دستیابی به خطوط چاپی با وضوح بالا (کمتر از ۲۰ میکرومتر) است. از این رو، به‌عنوان مثال عدم ایجاد ساختارهای یکنواخت امکان استفاده از این روش جهت چاپ لایه‌های نهایی در دستگاه‌های الکترونیکی چندان مناسب نمی‌باشد (۱۳۳).

۸- نتیجه‌گیری

پژوهشگران به‌دلیل ویژگی‌های الکتریکی، شیمیایی و فیزیکی منحصر به فرد مواد لایه‌ای دوبعدی، توجه زیادی به این دسته از مواد نشان داده‌اند. ظهور مکسن‌ها به‌عنوان گروهی از مواد دوبعدی که از لایه‌برداری شیمیایی کاربیدها، نیتريد‌ها یا کربونیتريد‌های فلزات واسطه به‌دست می‌آیند، یکی از کارآمدترین و امیدبخش‌ترین مواد

۵- مراجع

- Chen X, Zhao Y, Li L, Wang Y, Wang J, Xiong J, et al. MXene/polymer nanocomposites: preparation, properties, and applications. *Polym Rev.* 2021;61(1):80-115. <https://doi.org/10.1080/15583724.2020.1729179>.
- Xu M, Liang T, Shi M, Chen H. Graphene-like two-dimensional materials. *Chem Rev.* 2013;113(5):3766-3798. <https://doi.org/10.1021/cr300263a>.
- Naguib M, Mochalin VN, Barsoum MW, Gogotsi Y. 25th anniversary article: MXenes: a new family of two-dimensional materials. *Adv Mater.* 2014;26(7):992-1005. <https://doi.org/10.1002/adma.201304138>.
- Ayodhya D. A review of recent progress in 2D MXenes: Synthesis, properties, and applications. *Diamond and Related Materials.* 2023; 132:109634. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.109634>.
- Bhimanapati GR, Meunier V, Jung Y, Cha J, Das S, Xiao D, et al. Two-dimensional nanosheets produced by liquid exfoliation of layered materials. *ACS Nano.* 2015; 9(12): 11509-11539. <https://doi.org/10.1021/acsnano.5b05556>.
- Kim H, Wang Z, Alshareef HN. MXetronics: electronic and photonic applications of MXenes. *Nano Energy.* 2019; 60:179-197. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2019.03.024>.
- Wang QH, Kalantar-Zadeh K, Kis A, Coleman JN, Strano MS. Electronics and optoelectronics of two-dimensional transition metal dichalcogenides. *Nat Nanotechnol.* 2012; 7(11):699-712. <https://doi.org/10.1038/nnano.2012.193>.
- Manzeli S, Ovchinnikov D, Pasquier D, Yazyev OV, Kis A. 2D transition metal dichalcogenides. *Nat Rev Mater.* 2017; 2:17033. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2017.33>.
- Munkhbat B, Yankovich AB, Baranov DG, Verre R, Olsson E, Shegai TO. Transition metal dichalcogenide Munkhbat B, Yankovich A metamaterials with atomic precision. *Nat Commun.* 2020; 11:4604. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18428-2>.
- Zhao J, Liu H, Yu Z, Quhe R, Zhou S, Wang Y, et al. Rise of silicene: a competitive 2D material. *Prog Mater Sci.* 2016; 83:24-151. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2016.04.001>.
- Molle A, Grazianetti C, Tao L, Taneja D, Alam MH, Akinwande D. Silicene, silicene derivatives, and their device applications. *Chem Soc Rev.* 2018;47(16):6370-6387. <https://doi.org/10.1039/c8cs00338f>.
- Lv L, Yang Z, Chen K, Wang C, Xiong Y. 2D layered double hydroxides for oxygen evolution reaction: from fundamental design to application. *Adv Energy Mater.* 2019; 9(17):1803358. <https://doi.org/10.1002/aenm.201803358>.
- Hu T, Gu Z, Williams GR, Strimaite M, Zha J, Zhou Z, et al. Layered double hydroxide-based nanomaterials for biomedical applications. *Chem Soc Rev.* 2022;51(14):6126-6176. <https://doi.org/10.1039/d2cs00336a>.
- Lin Z, Wang C, Chai Y. Emerging group-VI elemental 2D materials: preparations, properties, and device applications. *Small.* 2020;16(15):e2003319. <https://doi.org/10.1002/smll.202003319>.
- Qiu M, Ren WX, Jeong T, Won M, Park GY, Sang DK, et al. Omnipotent phosphorene: a next-generation, two-dimensional nanoplatform for multidisciplinary biomedical applications. *Chem Soc Rev.* 2018;47(15):5588-5601. <https://doi.org/10.1039/c8cs00342d>.
- Lin Z, Li X, Zhang H, Xu J, Wang C, Li A, et al. Research progress of MXenes and layered double hydroxides for supercapacitors. *Inorg Chem Front.* 2023;10(15):4358-4392. <https://doi.org/10.1039/d3qi00852a>.
- Lamiel C, Hussain I, Warner JH, Zhang K. Beyond Ti-based MXenes: a review of emerging non-Ti based metal-MXene structure, properties, and applications. *Mater Today.* 2023; 63:313-338. <https://doi.org/10.1016/j.mattod.2023.01.019>.
- Antony Jose S, Price J, Lopez J, Perez-Perez E, Menezes PL. Advances in MXene materials: fabrication, properties, and applications. *Materials.* 2025;18(21):4894. <https://doi.org/10.3390/ma18214894>.
- Rahman UU, Humayun M, Ghani U, Usman M, Ullah H, Khan A, et al. MXenes as emerging materials: synthesis, properties, and applications. *Molecules.* 2022;27(15):4909. <https://doi.org/10.3390/molecules27154909>.
- Chaudhari NK, Jin H, Kim B, Baek DS, Joo SH, Lee K. MXene: an emerging two-dimensional material for future energy conversion and storage applications. *J Mater Chem A.* 2017;5(47):24564-24579. <https://doi.org/10.1039/c7ta09094c>.
- Jose SA, Ralls AM, Kasar AK, Antonitsch A, Neri DC, Image J, et al. MXenes: manufacturing, properties, and tribological insights. *Materials.* 2025;18(18):3927. <https://doi.org/10.3390/ma18183927>.
- Saini H, Srinivasan N, Šedajová V, Majumder M, Dubal DP, Otyepka M, et al. Emerging MXene@metal-organic framework hybrids: design strategies toward versatile applications. *ACS Nano.* 2021;15(12):18742-18776. <https://doi.org/10.1021/acsnano.1c08483>.
- Protyai MIH, Rashid AB. A comprehensive overview of recent progress in MXene-based polymer composites: their fabrication processes, advanced applications, and prospects. *Heliyon.* 2024;10(11):e37030. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e37030>.
- Vergier L, Xu C, Natu V, Cheng HM, Ren W, Barsoum MW. Overview of the synthesis of MXenes and other ultrathin 2D transition metal carbides and nitrides. *Curr Opin Solid State Mater Sci.* 2019;23(4):149-163. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2019.02.001>.
- Hart JL, Hantanasirisakul K, Lang AC, Anasori B, Pinto D, Pivak Y, et al. Control of MXenes' electronic properties through termination and intercalation. *Nat Commun.* 2019; 10(1):522. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08169-8>.
- Khazaei M, Ranjbar A, Arai M, Sasaki T, Yunoki S. Electronic properties and applications of MXenes: a theoretical review. *J Mater Chem C.* 2017;5(10):2488-2503. <https://doi.org/10.1039/c7tc00140a>.
- Anasori B, Lukatskaya MR, Gogotsi Y. 2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage. *Nat Rev Mater.* 2017;2:16098. <https://doi.org/10.1038/natrevmats.2016.98>.
- Kumar JA, Prakash P, Krithiga T, Amarnath DJ, Premkumar J, Rajamohan N, et al. Methods of synthesis, characteristics, and environmental applications of MXene: a comprehensive review. *Chemosphere.* 2022;286(Pt3):131607. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.131607>.
- Zhan X, Si C, Zhou J, Sun Z. MXene and MXene-based composites: synthesis, properties and environment-related applications. *Nanoscale Horiz.* 2020;5(2):235-258. <https://doi.org/10.1039/c9nh00571d>.
- Shen X, Hai R, Wang X, Li Y, Wang Y, Yu F, et al. MXene-based electrocatalysts for hydrogen evolution reaction. *J Mater Chem A.* 2020;8(37):19309-19320. <https://doi.org/10.1039/d0ta06033a>.

31. Oliveira FM, Gusmão R. MXene-based electrochemical sensors: a review. *ACS Appl Electron Mater.* 2020; 2(10):3048-3070. <https://doi.org/10.1021/acsaelm.0c00585>.
32. Firouzjaei MD, Karimiziarani M, Moradkhani H, Elliott M, Anasori B. MXenes: the two-dimensional influencers. *Mater Today Adv.* 2022;13:100202. <https://doi.org/10.1016/j.mtadv.2021.100202>.
33. Gogotsi Y, Anasori B. The rise of MXenes. *ACS Nano.* 2019;13(8):8491-8494. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b06394>.
34. Naguib M, Mashtalir O, Carle J, Presser V, Lu J, Hultman L, et al. Two-dimensional transition metal carbides. *ACS Nano.* 2012;6(2):1322-1331. <https://doi.org/10.1021/nn204153h>.
35. Sokol M, Natu V, Kota S, Barsoum MW. On the chemical diversity of the MAX phases. *Trends Chem.* 2019;1(2):210-223. <https://doi.org/10.1016/j.trechm.2019.02.016>.
36. Deysher G, Shuck CE, Hantanasirisakul K, Frey NC, Foucher AC, Maleski K, et al. Synthesis of Mo₄VAIC₄ MAX phase and two-dimensional Mo₄VC₄ MXene with 5 atomic layers of transition metals. *ACS Nano.* 2019; 14(1):204-217. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b07708>.
37. Han M, Shuck CE, Rakhmanov R, Parchment D, Anasori B, Koo CM, et al. Beyond Ti₃C₂T_x: MXenes for electromagnetic interference shielding. *ACS Nano.* 2020; 14(4):5008-5016. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c01312>.
38. Han M, Maleski K, Shuck CE, Yang Y, Glazar JT, Foucher AC, et al. Tailoring electronic and optical properties of MXenes through forming solid solutions. *J Am Chem Soc.* 2020;142(45):19110-19118. <https://doi.org/10.1021/jacs.0c07326>.
39. Thakur A, Chandran BSN, Davidson K, Bedford A, Fang H, Im Y, et al. Step-by-step guide for synthesis and delamination of Ti₃C₂T_x MXene. *Small Methods.* 2023; 7(7):2300030. <https://doi.org/10.1002/smt.202300030>.
40. Shuck CE, Sarycheva A, Anayee M, Levitt A, Zhu Y, Uzun S, et al. Scalable synthesis of Ti₃C₂T_x MXene. *Adv Eng Mater.* 2020;22(3):1901241. <https://doi.org/10.1002/adem.201901241>.
41. Amrillah T, Abdullah CAC, Hermawan A, Sari FNI, Alviani VN. Towards greener and more sustainable synthesis of MXenes: a review. *Nanomaterials (Basel).* 2022;12(23): 4280. <https://doi.org/10.3390/nano12234280>.
42. Keshmiri N, Alaghehmand H, Mokhtarpour F. Effect of hydrofluoric acid surface treatments on surface roughness and three-point flexural strength of Suprinity ceramic. *Front Dent.* 2020;17:22. <https://doi.org/10.18502/fid.v17i22.4317>.
43. Srivastava P, Mishra A, Mizuseki H, Lee KR, Singh AK. Mechanistic insight into the chemical exfoliation and functionalization of Ti₃C₂ MXene. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2016;8(36):24256-24264. <https://doi.org/10.1021/acsmi.6b08413>.
44. Naguib M, Kurtoglu M, Presser V, Lu J, Niu J, Heon M, et al. Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti₃AlC₂. *Adv Mater.* 2011;23(37):4248-4253. <https://doi.org/10.1002/adma.201102306>.
45. Sang X, Xie Y, Lin MW, Alhabeb M, Van Aken KL, Gogotsi Y, et al. Atomic defects in monolayer titanium carbide (Ti₃C₂T_x) MXene. *ACS Nano.* 2016;10(10):9193-9200. <https://doi.org/10.1021/acsnano.6b05240>.
46. Ghidui M, Lukatskaya MR, Zhao MQ, Gogotsi Y, Barsoum MW. Conductive two-dimensional titanium carbide 'clay' with high volumetric capacitance. *Nature.* 2014;516 (7529): 78-81. <https://doi.org/10.1038/nature13970>.
47. Zhang Z, Yao Z, Zhang X, Jiang Z. MXene-based materials for supercapacitor applications. *Electrochim Acta.* 2020;359: 136960. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2020.136960>.
48. Yang S, Zhang P, Wang F, Ricciardulli AG, Lohe MR, Blom PWM, et al. A delamination strategy for thinly layered nanostructures. *Angew Chem Int Ed Engl.* 2018;57(46): 15491-15495. <https://doi.org/10.1002/anie.201809662>.
49. Zhu Y, Liu J, Guo T, Wang JJ, Tang X, Nicolosi V. Multifunctional Ti₃C₂T_x MXene composite hydrogels with strain sensitivity toward absorption-dominated electromagnetic-interference shielding. *ACS Nano.* 2021;15(1): 1465-1474. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c08830>.
50. Mashtalir O, Naguib M, Mochalin VN, Dall'Agnese Y, Heon M, Barsoum MW, et al. Intercalation and delamination of layered carbides and carbonitrides. *Nat Commun.* 2013; 4:1716. <https://doi.org/10.1038/ncomms2664>.
51. Qiao C, Wu H, Xu X, Guan Z, Ou-Yang W. Electrical conductivity enhancement and electronic applications of 2D Ti₃C₂T_x MXene materials. *Adv Mater Interfaces.* 2021; 8(17):2100903. <https://doi.org/10.1002/admi.202100903>.
52. Feng A, Yu Y, Jiang F, Wang Y, Mi L, Yu Y, et al. Fabrication and thermal stability of two-dimensional carbide Ti₃C₂ nanosheets. *Ceram Int.* 2017;43(8):6322-6328. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.02.039>.
53. Mirkhani SA, Zeraati AS, Aliabadian E, Naguib M, Sundararaj U. High dielectric constant and low dielectric loss via poly(vinylalcohol)/Ti₃C₂T_x MXene nanocomposites. *ACS Appl Mater Interfaces.* 2019;11(20): 18599-18608. <https://doi.org/10.1021/acsmi.9b00393>.
54. Shi H, Zhang P, Liu Z, Park S, Lohe MR, Wu Y, et al. Ambient-stable two-dimensional titanium carbide (MXene) enabled by iodine etching. *Angew Chem Int Ed Engl.* 2021; 60(16):8689-8693. <https://doi.org/10.1002/anie.202015627>.
55. Tang H, Yang Y, Wang R, Sun J. Aqueous MXene/PH1000 hybrid inks for inkjet-printing micro-supercapacitors with high areal capacitance. *J Mater Chem C.* 2020;8(18):6214-6221. <https://doi.org/10.1039/d0tc00624a>.
56. Gouveia JD, Gomes JRB. Structural and electronic properties of the titanium carbide MXene with variable sublattice oxygen composition. *Surf Interfaces.* 2024;46: 103920. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2024.103920>.
57. Syamsai R, Kollu P, Jeong SK, Grace AN. Synthesis and properties of 2D-titanium carbide MXene sheets towards electrochemical energy storage applications. *Ceram Int.* 2017; 43(16):13119-13126. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2017.07.021>.
58. Zhang W, Li S, Fan X, Zhang X, Fan S, Bei G. Two-dimensional carbonitride MXenes: from synthesis to properties and applications. *Carbon Energy.* 2024;6(5):e609. <https://doi.org/10.1002/cey2.609>.
59. Zhang T, Shuck CE, Shevchuk K, Anayee M, Gogotsi Y. Synthesis of three families of titanium carbonitride MXenes. *J Am Chem Soc.* 2023;145(40):22374-22383. <https://doi.org/10.1021/jacs.3c08607>.
60. Liang K, Tabassum A, Kothakonda M, Zhang X, Zhang R, Kenney B, et al. Two-dimensional titanium carbonitride MXene as a highly efficient electrocatalyst for hydrogen evolution reaction. *Mater Rep Energy.* 2022;2(2):100075. <https://doi.org/10.1016/j.matre.2022.100075>.
61. Rasheed PA, Pandey RP, Banat F, Hasan SW. Recent advances in niobium MXenes: synthesis, properties, and emerging applications. *Matter.* 2022;5(2):546-572. <https://doi.org/10.1016/j.matt.2021.12.010>.

62. Ponnalagar D, Hang DR, Islam SE, Liang CT, Chou MMC. Recent progress in two-dimensional Nb₂C MXene for applications in energy storage and conversion. *Mater Des.* 2023;231:112046. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112046>.
63. Gao Z, Shi D, Xu J, Hai T, Zhao Y, Qin M, et al. Vanadium-based MXenes: types, synthesis, and recent advances in supercapacitor applications. *Nanomaterials (Basel).* 2025; 15(8):1038. <https://doi.org/10.3390/nano15081038>.
64. Jenitha M, Durgalakshmi D, Balakumar S, Rakkesh RA. Vanadium-based MXenes: synthesis, structural insights, and electrochemical properties for Zn-ion battery applications: a beginner's guide. *Emergent Mater.* 2025;8:1311-1336. <https://doi.org/10.1007/s42247-024-0>.
65. Syamsai R, Grace AN. Synthesis, properties and performance evaluation of vanadium carbide MXene as supercapacitor electrodes. *Ceram Int.* 2020;46(4):5323-5330. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.10.286>.
66. Hussain I, Amara U, Bibi F, Hanan A, Lakhani MN, Soomro IA, et al. Mo-based MXenes: synthesis, properties, and applications. *Adv Colloid Interface Sci.* 2024;324:103077. <https://doi.org/10.1016/j.cis.20>.
67. Seh ZW, Fredrickson KD, Anasori B, Kibsgaard J, Strickler AL, Lukatskaya MR, et al. Two-dimensional molybdenum carbide (MXene) as an efficient electrocatalyst for hydrogen evolution. *ACS Energy Lett.* 2016;1(3):589-594. <https://doi.org/10.1021/acsenergylett.6b00247>.
68. VahidMohammadi A, Rosen J, Gogotsi Y. The world of two-dimensional carbides and nitrides (MXenes). *Sci.* 2021; 372(6547):eabf1581. <https://doi.org/10.1126/science.abf1581>.
69. Elsa G, Hanan A, Walvekar R, Numan A, Khalid M. Zirconium-based MXenes: synthesis, properties, applications, and prospects. *Coord Chem Rev.* 2025;526:216355. <https://doi.org/10.1016/j.ccr.2024.216355>.
70. Meng Q, Ma J, Zhang Y, Li Z, Hu A, Kai JJ, et al. Theoretical investigation of zirconium carbide MXenes as prospective high capacity anode materials for Na-ion batteries. *J Mater Chem A.* 2018;6(27):13652-13660. <https://doi.org/10.1039/c8ta03981a>.
71. Zhou J, Zha X, Zhou X, Chen F, Gao G, Wang S, et al. Synthesis and electrochemical properties of two-dimensional hafnium carbide. *ACS Nano.* 2017;11(4):3841-3850. <https://doi.org/10.1021/acsnano.7b00030>.
72. Zeng Q, Peng J, Oganov AR, Zhu Q, Xie C, Zhang X, et al. Prediction of stable hafnium carbides: stoichiometries, mechanical properties, and electronic structure. *Phys Rev B.* 2013;88(21):214107. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.88.214107>.
73. Li M, Xu L, Guo M, Shang H, Luo X, Ma Y. Recent advances in tantalum carbide MXenes: synthesis, structure, properties, and novel applications. *Crystals.* 2025;15(6):558. <https://doi.org/10.3390/cryst15060558>.
74. Dong L, Chu H, Li Y, Ma X, Pan H, Zhao S, et al. Surface functionalization of Ta₄C₃ MXene for broadband ultrafast photonics in the near-infrared region. *Appl Mater Today.* 2022;26:101341. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101341>.
75. Yadav M, Kumar M, Sharma A. Progress in niobium-derived MXenes: synthesis, properties and applications. *CrystEngComm.* 2025;27:3180-3213. <https://doi.org/10.1039/d4ce01193a>.
76. Kewate OJ, Hussain I, Tyagi N, Saxena S, Zhang K, Rajamansingh EG, et al. Nb-Based MXenes: Structures, Properties, Synthesis, and Application Towards Super-capacitors. *J Energy Storage.* 2024;94:112445. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112445>.
77. Guan G, Guo F. A Review of Nb₂CTx MXene: Synthesis, Properties and Applications. *Batteries.* 2023;9(4):235. <https://doi.org/10.3390/batteries9040235>.
78. Venkateshalu S, Cherusseri J, Karnan M, Kumar KS, Kollu P, Sathish M, et al. New Method for the Synthesis of 2D Vanadium Nitride (MXene) and Its Application as a Supercapacitor Electrode. *ACS Omega.* 2020;5(29):17983-92. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01215>.
79. Rafique M, Anwar S, Irshad M, Khan MI, Tahir MB, Nabi G, et al. Novel Synthesis and Electrochemical Performance of 2D Molybdenum Nitride (MXene) for Supercapacitor Application. *J Energy Storage.* 2024;103:114354. <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.114354>.
80. Jolly S, Paranthaman MP, Naguib M. Synthesis of Ti₃C₂Tz MXene from low-cost and environmentally friendly precursors. *Mater Today Adv.* 2021;10:100139. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.100139>.
81. Shuck CE, Han M, Maleski K, Hantanasirisakul K, Kim SJ, Choi J, et al. Effect of Ti₃AlC₂ MAX Phase on Structure and Properties of Resultant Ti₃C₂Tx MXene. *ACS Appl Nano Mater.* 2019;2(6):3368-76. <https://doi.org/10.1021/acsnm.9b00286>.
82. Mathis TS, Maleski K, Goad A, Sarycheva A, Anayee M, Foucher AC, et al. Modified MAX Phase Synthesis for Environmentally Stable and Highly Conductive Ti₃C₂ MXene. *ACS Nano.* 2021;15(4):6420-9. <https://doi.org/10.1021/acsnano.0c08357>.
83. Enyashin AN, Ivanovskii AL. Atomic structure, comparative stability and electronic properties of hydroxylated Ti₂C and Ti₃C₂ nanotubes. *Comput Theor Chem.* 2012;989:27-32. <https://doi.org/10.1016/j.comptc.2012.02.034>.
84. Treifeldt JE, Firestein KL, Fernando JFS, Zhang C, Siriwardena DP, Lewis CEM, et al. Synthesis of Mo-based MXenes. *Mater Des.* 2021;199:109403. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2020.109>.
85. Palladino DL, Bairo F. MXenes: Properties, Applications, and Potential in 3D Printing. *Ceramics.* 2025;8(1):64. <https://doi.org/10.3390/ceramics8010064>.
86. Aghayar Z, Malaki M, Zhang Y. MXene-Based Ink Design for Printed Applications. *Nanomaterials (Basel).* 2022;12(23):4346. <https://doi.org/10.3390/nano1223434>.
87. Huang H, Chu X, Su H, Zhang H, Xie Y, Deng W. Massively manufactured paper-based all-solid-state flexible micro-supercapacitors with sprayable MXene conductive inks. *J Power Sources.* 2019;415:1-7. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2019.01>.
88. Miao C, Cui X, Sun J, Lu S, Liu X. High flexibility and wide sensing range human health monitoring sensors based on Ti₃C₂Tx MXene/CNTs/WPU/CNFs composite ink film. *Mater Sci Semicond Process.* 2023;158:107384. <https://doi.org/10.1016/j.mssp.2023.107384>.
89. Wang G, Zhang R, Zhang H, Cheng K. Aqueous MXene inks for inkjet-printing microsupercapacitors with ultrahigh energy densities. *J Colloid Interface Sci.* 2023;645:359-70. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2023.04.121>.
90. Li J, Ye F, Vaziri S, Muhammed M, Lemme MC, Östling M. Efficient Inkjet Printing of Graphene. *Adv Mater.* 2013; 25(29):3985-92. <https://doi.org/10.1002/adma.201300361>.
91. Htwe YZN, Mariatti M. Printed graphene and hybrid conductive inks for flexible, stretchable, and wearable electronics: progress, opportunities, and challenges. *J Sci*

- Adv Mater Devices. 2022;7(3):100435. <https://doi.org/10.1016/j.jsamd.2022.100435>.
92. Htwe YZN, Mariatti M. Surfactant-assisted water-based graphene conductive inks for flexible electronic applications. *J Taiwan Inst Chem Eng.* 2021;125:402-12. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2021.06.050>.
 93. Fan X, Liu B, Ding J, Deng Y, Han X, Hu W, et al. Flexible and wearable power sources for next-generation wearable electronics. *Batteries Supercaps.* 2020;3(12):1262-1274. <https://doi.org/10.1002/batt.202000132>.
 94. Htwe YZN, Abdullah MK, Mariatti M. Water-based graphene/AgNPs hybrid conductive inks for flexible electronic applications. *J Mater Res Technol.* 2022;16:59-73. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.11.117>.
 95. Carey T, Cacovich S, Divitini G, Ren J, Mansouri A, Kim JM, et al. Fully inkjet-printed two-dimensional material field-effect heterojunctions for wearable and textile electronics. *Nat Commun.* 2017;8(1):1202. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01210-2>.
 96. Lin X, Kavalakkatt J, Lux-Steiner MC, Ennaoui A. Inkjet-printed $\text{Cu}_2\text{ZnSn}(\text{S},\text{Se})_4$ solar cells. *Adv Sci (Weinh).* 2015; 2(6):1500028. <https://doi.org/10.1002/advs.201500028>.
 97. Gebauer JS, Mackert V, Ognjanović S, Winterer M. Tailoring metal oxide nanoparticle dispersions for inkjet printing. *J Colloid Interface Sci.* 2018;526:400-9. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2018.05.015>.
 98. Tang Z, Fang K, Bukhari MN, Song Y, Zhang K. Effects of viscosity and surface tension of a reactive dye ink on droplet formation. *Langmuir.* 2020;36(31):9481-8. <https://doi.org/10.1021/acs.langmuir.0c01261>.
 99. Krainer S, Smit C, Hirn U. The effect of viscosity and surface tension on inkjet printed picoliter dots. *RSC Adv.* 2019;9(57):31708-19. <https://doi.org/10.1039/c9ra04453c>.
 100. Orangi J, Hamade F, Davis VA, Beidaghi M. 3D printing of additive-free 2D $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ (MXene) ink for fabrication of micro-supercapacitors with ultra-high energy densities. *ACS Nano.* 2020;14(1):640-50. <https://doi.org/10.1021/acsnano.9b07325>.
 101. Li H, Li X, Liang J, Chen Y. Hydrous RuO_2 -decorated MXene coordinating with silver nanowire inks enabling fully printed micro-supercapacitors with extraordinary volumetric performance. *Adv Energy Mater.* 2019;9(24):1803987. <https://doi.org/10.1002/aenm.201803987>.
 102. Fallah K, Elmi Fard N, Ghamarpoor R. A review of MXene/polymer-based inks for 3D printing of electrochemical energy storage devices. *Surf Interfaces.* 2026;80:108365. <https://doi.org/10.1016/j.surfin.2026.108365>.
 103. Chen YC, Lin HW, Wang YJ, Chen SY, Hsu SH. Facilitation of osteogenic differentiation of hASCs on PEDOT:PSS/MXene composite sponge with electrical stimulation. *ACS Appl Polym Mater.* 2023;5(7):4753-66. <https://doi.org/10.1021/acsp.3c00618>.
 104. Chen X, Yang R, Wu X. Printing of MXene-based materials and the applications: a state-of-the-art review. *2D Mater.* 2022;9(4):042002. <https://doi.org/10.1088/2053-1583/ac8009>.
 105. Kong W, Deng J, Li L. Recent advances in noble metal MXene-based catalysts for electrocatalysis. *J Mater Chem A.* 2022;10(28):14674-91. <https://doi.org/10.1039/d2ta02452a>.
 106. Zhang C, Zhao Y, Zhang Y, Yu L, Wang H, Huang X, et al. 3D printing of molecularly-imprinted Ti_3C_2 MXene-derived hierarchically porous sensing platform toward ultrasensitive photoelectrochemical monitoring. *Microchem J.* 2024; 200: 110246. <https://doi.org/10.1016/j.microchem.2024.110246>.
 107. Gomez IJ, Alegret N, Dominguez-Alfaro A, Vázquez Sulleiro M. Recent Advances on 2D Materials towards 3D Printing. *Chemistry.* 2021;3(4):1314-43. <https://doi.org/10.3390/chemistry3040095>.
 108. Das P, Marvi PK, Ganguly S, Tang XS, Wang B, Srinivasan S, et al. MXene-Based Elastomer Mimetic Stretchable Sensors: Design, Properties, and Applications. *Nano-Micro Lett.* 2024;16(1):135. <https://doi.org/10.1007/s40820-024-01349-w>.
 109. Wu X, Tu T, Dai Y, Tang P, Zhang Y, Deng Z, et al. Direct Ink Writing of Highly Conductive MXene Frames for Tunable Electromagnetic Interference Shielding and Electromagnetic Wave-Induced Thermochromism. *Nano-Micro Lett.* 2021;13(1):148. <https://doi.org/10.1007/s40820-021-00665-9>.
 110. Maleski K, Mochalin VN, Gogotsi Y. Dispersions of two-dimensional titanium carbide MXene in organic solvents. *Chem Mater.* 2017;29(4):1632-40. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.6b02443>.
 111. Alhabeab M, Maleski K, Anasori B, Lelyukh P, Clark L, Sin S, et al. Guidelines for synthesis and processing of two-dimensional titanium carbide ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ MXene). *Chem Mater.* 2017;29(18):7633-44. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b02443>.
 112. Zhang CJ, Pinilla S, McEvoy N, Cullen CP, Anasori B, Long E, et al. Oxidation stability of colloidal two-dimensional titanium carbides (MXenes). *Chem Mater.* 2017;29(11):4848-56. <https://doi.org/10.1021/acs.chemmater.7b02443>.
 113. Zhao X, Vashisth A, Prehn E, Sun W, Shah SA, Habib T, et al. Antioxidants unlock shelf-stable $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ (MXene) nanosheet dispersions. *Matter.* 2019;1(2):513-26. <https://doi.org/10.1016/j.matter.2019.02.001>.
 114. Habib T, Zhao X, Shah SA, Chen Y, Sun W, An H, et al. Oxidation stability of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ MXene nanosheets in solvents and composite films. *npj 2D Mater Appl.* 2019;3:8. <https://doi.org/10.1038/s41699-019-0089-3>.
 115. Ko TY, Ye H, Murali G, Lee SY, Park YH, Lee J, et al. Functionalized MXene ink enables environmentally stable printed electronics. *Nat Commun.* 2024;15(1):3459. <https://doi.org/10.1038/s41467-024-47700-y>.
 116. Guo T, Zhou D, Deng S, Jafarpour M, Avaro J, Neels A, et al. Rational Design of $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{Tx}$ MXene Inks for Conductive, Transparent Films. *ACS Nano.* 2023;17(4):3737-49. <https://doi.org/10.1021/acsnano.3c00618>.
 117. Hu G, Albrow-Owen T, Jin X, Ali A, Hu Y, Howe RCT, et al. Black phosphorus ink formulation for inkjet printing of optoelectronics and photonics. *Nat Commun.* 2017;8:278. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-00358-1>.
 118. Aleeva Y, Pignataro B. Recent advances in upscalable wet methods and ink formulations for printed electronics. *J Mater Chem C.* 2014;2(32):6436-53. <https://doi.org/10.1039/c4tc00618f>.
 119. Secor EB, Prabhumirashi PL, Puntambekar K, Geier ML, Hersam MC. Inkjet Printing of High Conductivity, Flexible Graphene Patterns. *J Phys Chem Lett.* 2013;4(8):1347-51. <https://doi.org/10.1021/jz400644c>.
 120. Lin Y, Gao Y, Fang F, Fan Z. Recent progress on printable power supply devices and systems with nanomaterials. *Nano Res.* 2018;11(6):3065-87. <https://doi.org/10.1007/s12274-018-2029-5>.
 121. Htwe YZ, Bakar S, Mohamed A, Muqoyyanah, Othman M, Mamat MH, et al. Progress in etching-driven MXene synthesis and utilization in conductive inks for printed electronics applications: A comprehensive review. *Synth Met.* 2024;306:117631. <https://doi.org/10.1016/j.synmet.2024.117631>.

122. He P, Cao J, Ding H, Liu C, Neilson J, Li Z, et al. Screen-printing of a highly conductive graphene ink for flexible printed electronics. *ACS Appl Mater Interfaces*. 2019;11(35):32225-34. <https://doi.org/10.1021/acsami>.
123. Vural M, Pena-Francesch A, Bars-Pomes J, Jung H, Gudapati H, Hatter CB, et al. Inkjet Printing of Self-Assembled 2D Titanium Carbide and Protein Electrodes for Stimuli-Responsive Electromagnetic Shielding. *Adv Funct Mater*. 2018;28(32):1801972. <https://doi.org/10.1002/adfm>.
124. Wu CW, Unnikrishnan B, Chen IWP, Harroun SG, Chang HT, Huang CC. Excellent oxidation resistive MXene aqueous ink for micro-supercapacitor application. *Energy Storage Mater*. 2020;25:563-571. <https://doi.org/10.1016/j>.
125. Saleh A, Wustoni S, Bihar E, El-Demellawi JK, Zhang Y, Hama A, et al. Inkjet-printed Ti_3C_2Tx MXene electrodes for multimodal cutaneous biosensing. *J Phys Mater*. 2020;3(4):044004. <https://doi.org/10.1088/2515-7639/abbc5c>.
126. Coelho J, Kremer M, Pinilla S, Nicolosi V. An outlook on printed microsupercapacitors: Technology status, remaining challenges, and opportunities. *Curr Opin Electrochem*. 2020;21:69-75. <https://doi.org/10.1016/j>.
127. Truby R, Lewis JA. Printing soft matter in three dimensions. *Nature*. 2016;540(7633):371-8. <https://doi.org/10.1038/nature21003>.
128. Rastin H, Zhang B, Mazinani A, Hassan K, Bi J, Tung TT, et al. 3D bioprinting of cell-laden electroconductive MXene nanocomposite bioinks. *Nanoscale*. 2020;12(30):16069-80. <https://doi.org/10.1039/d0nr03219a>.
129. Yang W, Yang J, Byun JJ, Moissinac FP, Xu J, Haigh SJ, et al. 3D Printing of Freestanding MXene Architectures for Current-Collector-Free Supercapacitors. *Adv Mater*. 2019;31(2):1902725. <https://doi.org/10.1002/adma>.
130. Cain JD, Azizi A, Maleski K, Anasori B, Glazer EC, Kim PY, et al. Sculpting Liquids with Two-Dimensional Materials: The Assembly of Ti_3C_2Tx MXene Sheets at Liquid-Liquid Interfaces. *ACS Nano*. 2019;13(11):12385-92. <https://doi.org/10.1021/acsnano>.
131. Zhang CJ, McKeon L, Kremer MP, Park SH, Ronan O, Seral-Ascaso A, et al. Additive-free MXene inks and direct printing of micro-supercapacitors. *Nat Commun*. 2019;10:1795. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-09398-1>.
132. Shao Y, Wei L, Wu X, Jiang C, Yao Y, Peng B, et al. Room-temperature high-precision printing of flexible wireless electronics based on MXene inks. *Nat Commun*. 2022;13(1):3220. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30648-2>.
133. Abdolhosseinzadeh S, Schneider R, Jafarpour M, Merlet C, Nüesch F, Zhang CJ, et al. MXene Inks for High-Throughput Printing of Electronics. *Adv Electron Mater*. 2024;10(11):2400170. <https://doi.org/10.1002/aelm>.

How to cite this article:

Noroozi Tisbeh M, Behzadnasab M. MXene Nanoparticle-based Conductive Inks: Structure, Synthesis, Properties, and Applications in Printed Electronics. *J Color Sci Tech*. 2026;19(4):353-376. <https://doi.org/10.30509/jcst.2026.167744.1279> [In Persian]