

مروری بر روش‌های سنتز، مشخصه‌یابی و کاربرد مکسن (MXene) به عنوان جاذب‌های امواج

مایکروویو

آرزو حاجی احمدی^۱، میرسعید سید دراجی^{۱*}، سیده فاطمه حسینی^۱

۱. آزمایشگاه تحقیقاتی شیمی کاربردی، گروه شیمی، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

پیشرفت‌های اخیر حاکی از آن است که یک خانواده‌ی بزرگ و جدیدی از فلزات واسطه‌ی دوبعدی متشکل از کاربیدها، کربونیت‌ریدها و نیت‌ریدها با نام عمومی مکسن (MXene) توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. مکسن‌ها دارای خصوصیات فیزیکی و شیمیایی قابل توجه با تنوع غنی از عناصر اساسی هستند. جهت تنظیم موثر خواص مکسن‌ها در راستای دستیابی به کاربردهای مختلف، می‌توان آن‌ها را به آسانی با مواد دیگری همچون پلیمرها، اکسیدها و نانولوله‌های کربنی ترکیب کرد. به دلیل سرشار شدن زندگی روزمره‌ی بشر از آلودگی امواج الکترومغناطیسی (EM) که تهدیدکننده‌ی سلامت انسان است، توسعه‌ی مواد پیشرفته‌ی جاذب امواج مایکروویو به موضوع مهمی مبدل گشته است. مواد دوبعدی مانند مکسن‌ها، گرافن و مولیبدن دی سولفید (MoS_2) به دلیل ساختار خاص، رسانایی الکتریکی عالی، سطح غنی و استحکام مکانیکی خوب دارای خواص الکترومغناطیسی منحصر به فردی بوده و کاربردهای بالقوه‌ای در جذب امواج الکترومغناطیسی، محافظت و استتار امواج مایکروویو دارند. در همین راستا مکسن‌ها به دلیل دارا بودن ساختارها و خواص مطلوبی مانند ساختار لایه‌ای ویژه، گروه‌های عاملی فعال سطحی فراوان و قابل تنظیم، هدایت الکتریکی فوق‌العاده و سطح ویژه بالا، به عنوان کاندیدای مناسب برای جاذب‌های امواج مایکروویو با کارایی بالا تبدیل شده‌اند. در این مقاله، در ابتدا روش‌های سنتز و خواص مکسن‌ها خلاصه شده و سپس پیشرفت‌های اخیر آن‌ها را در کاربردهای مرتبط با حوزه‌ی جاذب‌های امواج مایکروویو که از اهمیت بسزایی برخوردار هستند، بررسی شده است. در نهایت چالش‌ها و افق‌های روشن تحقیقات آینده در زمینه‌ی مواد دوبعدی جدید مکسن مطرح گردیده است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۵/۲۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۰۱/۲۷

مکسن، مواد دوبعدی، نانوساختار، ساختارهای دوبعدی، ساختارهای لایه‌ای، امواج مایکروویو، جاذب امواج مایکروویو.

واژگان کلیدی



AMNC

An overview of the methods of synthesis, characterization and applications of MXene as a Microwave absorber

Arezoo Hajiahmadi¹, Mir Saeed Seyed Dorraji^{1*}, Seyyedeh Fatemeh Hosseini¹

1. Applied Chemistry Research Laboratory, Department of Chemistry, Faculty of Science, University of Zanjan, Zanjan, Iran.

Abstract

Recent developments indicate that a large and new family of two-dimensional transition metals consisting of carbides, carbonitrides and nitrides with the general name of MXene have attracted much attention. MXenes have significant physical and chemical properties with a rich variety of basic elements. In order to effectively adjust the properties of MXenes to achieve different applications, they can be easily combined with other materials such as polymers, oxides and carbon nanotubes. Due to the fact that human daily life is full of electromagnetic wave (EM) pollution, which threatens human health, the development of advanced microwave absorbing materials has become an important issue. Two-dimensional materials such as MXene, graphene, and molybdenum disulfide (MoS_2) have unique electromagnetic properties and potential applications in absorbing electromagnetic waves, shielding, and microwave waves stealth due to their special structure, excellent electrical conductivity, rich surface, and good mechanical strength. In this regard, because of having desirable structures and properties such as a special layered structure, abundant and adjustable surface active functional groups, excellent electrical conductivity, and high specific surface area MXenes are suitable candidates for absorbents. In this article, the synthesis methods and properties of MXenes are summarized first, and then their recent developments in applications related to the field of microwave absorbers, which are of great importance, have been reviewed. Finally, the challenges and bright horizons of future research in the field of new two-dimensional materials of MXenes have been presented.

Keywords

MXene, 2D materials, nanostructure, two-dimensional structures, layered structures, Microwaves, Microwave absorber

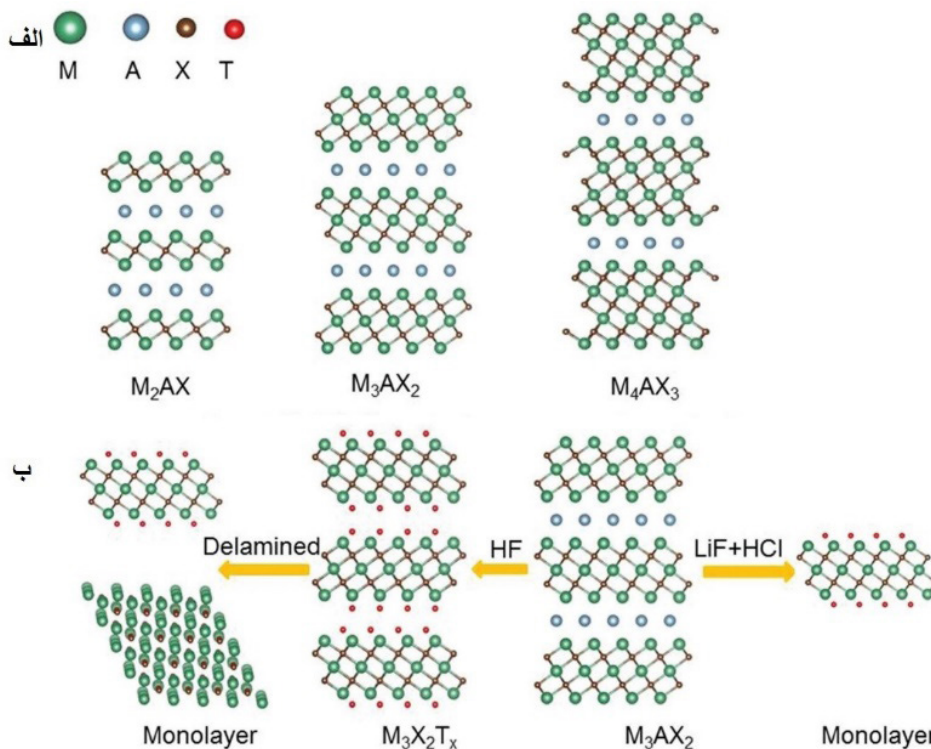
۱-مقدمه

که فرمول هر واحد به صورت $M_{n+1}X_n$ میباشد و لایه‌های A به‌طور متناوب روی هم قرار میگیرند (شکل ۱ الف را مشاهده کنید) [۲۳]؛ به دلیل اینکه پیوندهای M-X بسیار قویتر از پیوندهای M-A هستند، لایه‌های A میتوانند بدون تخریب پیوندهای M-X به‌طور گزینش‌پذیری شیمیایی، اسیدشویی شوند، در نتیجه پیوندهای ضعیف موجود در واحدهای $M_{n+1}X_n$ لایه‌ها را میتوان به راحتی با فراصوت از هم جدا کرد [۲۴]. ترکیبات دوبعدی تشکیل شده که مکسن نامیده میشوند، فشار لایه‌های A را از فاز ماکس اصلی کم میکنند و ماهیت دوبعدی آن‌ها شبیه به گرافن میباشد. لازم به ذکر است که در فرایند اسیدشویی، سطوح واحدهای $M_{n+1}X_n$ همیشه با گروه‌های عاملی مانند اکسیژن (=O)، هیدروکسیل (-OH) و/یا فلورین (-F) پوشانده می‌شوند [۲۵ و ۲۶]؛ بنابراین فرمول شیمیایی مکسن‌ها به صورت $M_{n+1}X_nT_x$ خلاصه می‌شود، به‌طوری‌که T_x نشان‌دهنده گروه‌های عاملی سطح است. از نظر ذهنی، نسبت گروه‌های عاملی مختلف بر روی سطوح مکسن نامشخص است و با شرایط اسیدشویی تغییر میکند.

با رونق سریع فناوری ارتباطات 5G، مردم به‌طور فزاینده‌ای

از زمان کشف گرافن در سال ۲۰۰۴، مواد دوبعدی (2D) علاقه زیادی را به خود جلب کرده‌اند [۴-۱]. این مواد به دلیل کاهش ابعاد و اندازه، خواص جذاب بسیاری را به نمایش گذاشته‌اند که در نمونه‌های عمده آن‌ها یافت نمی‌شوند و در نتیجه افق جدیدی برای مجموعه‌ای از برنامه‌های کاربردی اعم از دستگاه‌های الکترونیکی و الکترونیکی نوری برای تجزیه الکتروشیمیایی باز کرده‌اند [۹-۵]. در سال‌های اخیر، با پیشرفت‌های چشمگیر در تکنیک‌های سنتز، مواد دوبعدی دیگری با موفقیت تولید شده است [۱۰]. در میان آن‌ها، یک خانواده‌ی بزرگ از فلزات واسطه دوبعدی کاربیدها و/یا نیتريد‌های فلزی^۲ به نام «مکسن‌ها»^۳، به سرعت در حال پیشرفت است [۱۸-۱۱]. مکسن‌ها به عنوان یک خانواده‌ی مهم از مواد دوبعدی اولین بار توسط گروه گوتسی^۴ در سال ۲۰۱۱ گزارش شده‌اند [۱۵] مکسن‌ها به‌طور عمده با اسیدشویی لایه‌های A از فازهای ماکس^۵ [۲۱-۱۹] با فرمول شیمیایی عمومی $M_{n+1}AX_n$ (M فلز واسطه اولیه، عنصری از گروه یا عنصری از گروه است، کربن و/یا نیتروژن است و ۱، ۲، ۳ میباشد [۲۲]) ساخته می‌شوند. فازهای ماکس دارای ساختارهای شش‌ضلعی لایه‌ای هستند

- 1-Two-dimensional
- 2-Transition metal carbides, nitrides, or carbonitrides
- 3-MXene
- 4-Gogotsi
- 5-MAX phase



شکل ۱ الف) ساختارهای کریستالی فازهای M_2AX ، M_3AX_2 و M_4AX_3 . ب) سنتز مکسن‌های چندلایه‌ی اسیدشویی شده توسط HF یا مکسن‌های تک‌لایه‌ی اسیدشویی شده توسط LiF + HCl. کره‌های سبز، آبی روشن، قهوه‌ای و قرمز به ترتیب نمایانگر M (فلز واسطه)، A (بیشتر Al یا Si)، X (C یا N) و T (O، F یا OH) هستند [۲۳-۱۹ و ۲۷].

پیشرفت تحقیقات مواد دوبعدی مکسن در زمینه‌ی جذب امواج مایکروویو، کامپوزیت‌های مبتنی بر آن‌ها و روش‌های مؤثر برای بهبود ویژگی‌های جذب امواج مایکروویو آن‌ها خلاصه گردیده است. در نهایت چشم‌اندازها، چالش‌های باقیمانده و دیدگاه‌های تحقیقات مورد انتظار آتی مطرح گردیده است.

۲- سنتز مکسن‌ها

طبق بررسی‌ها و مطالعات، اغلب مکسن‌ها با اسیدشویی شیمیایی انتخابی لایه‌های اتمی خاص از کاربرد لایه‌ای، نیتريد یا کربونیتريد سنتز شده‌اند. تلفیق‌ها را میتوان به‌طور عمده به دو دسته تقسیم کرد: محلول‌های اسیدی حاوی یون‌های فلوراید (HF)، مخلوطی از LiF و HCl یا (NH_4HF_2) و نمک‌های حاوی یون‌های فلورین (NaF یا LiF , KF , NH_3F).

در ابتدا، مکسن‌ها با غوطه‌ور کردن فازهای ماکس در اسیدهای خاص و گسستن پیوندهای M-A از فازهای ماکس جدا می‌شوند. در این فرایند، به یک زمان خوردگی خاص و هم‌زدن کامل نیاز است. ناگیوب و همکاران^۱ اولین مکسن‌ها، $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ را در سال ۲۰۱۱ با غوطه‌وری به مدت ۲ ساعت در پودرهای Ti_3AlC_2 از هیدروفلوئوریک اسید غلیظ (HF) ۵۰٪ در دمای اتاق (RT) سنتز کردند [۲۴]. شکل ۲ الف الگوی پراش اشعه X (XRD) را قبل و بعد از اسیدشویی Ti_3AlC_2 نشان می‌دهد. به وضوح مشاهده می‌شود که پس از تاثیر HF موقعیت پیک اصلی در الگوی XRD از حدود 40° به حدود 10° انتقال میابد که نشان‌دهنده این است که Ti_3AlC_2 توسط $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ جایگزین شده است. توجه داشته باشید که الگوی تجربی XRD پس از اسیدشویی HF، شبیه الگوهای XRD شبیه‌سازی شده از $\text{Ti}_3\text{C}_2(\text{OH})_2$ و $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{F}_2$ (منحنی‌های سبز و قرمز در شکل ۲ الف) است، که نشان‌دهنده‌ی حضور گروه‌های عاملی است. متعاقباً، این روش اسیدشویی HF به‌طور موفقیت‌آمیزی برای سایر فازهای ماکس اعمال می‌شود و بسیاری از مکسن‌های جدید از جمله Ti_2NT_x [۳۰]، Nb_2CT_x [۳۱ و ۳۰]، V_2CT_x [۲۹]، Ti_2CT_x [۳۲]، $(\text{Ti}_{0.5}\text{Nb}_{0.5})_2\text{CT}_x$ [۳۳]، $(\text{V}_{0.5}\text{Cr}_{0.5})_3\text{C}_2\text{T}_x$ [۳۳]، $\text{Ti}_3\text{C}-\text{W}_{4/3}\text{CT}_x$ [۳۶]، $\text{Nb}_{4/3}\text{CT}_x$ [۳۴]، $\text{Mo}_{4/3}\text{CT}_x$ [۳۷ و ۳۸]، $\text{Ta}_4\text{C}_3\text{T}_x$ [۳۹]، $\text{Nb}_4\text{C}_3\text{T}_x$ [۳۳]، Ti_3CNT_x [۳۷ و ۳۸]، $\text{Mo}_2\text{Ti}_2\text{C}_3\text{T}_x$ [۴۱]، $\text{Mo}_2\text{TiC}_2\text{T}_x$ [۴۰]، $\text{V}_4\text{C}_3\text{T}_x$ [۳۳] و $[\text{Cr}_2\text{TiC}_2\text{T}_x]$ [۴۱] به دست می‌آیند.

با توجه به اینکه HF برای بدن انسان و محیط زیست مضر است،

به دستگاه‌های الکترونیکی و انتقال اطلاعات مبتنی بر امواج الکترومغناطیسی (EMW)، متکی هستند [۲۸]. جذب EM، توسعه فناوری EM و تجهیزات پیشرفته EM را ترویج میکند. آماده‌سازی و خواص نانوکامپوزیت‌های محافظ و جذب EM جدید برای کاربردهای مختلف (از جمله کاربردهای نظامی و غیرنظامی) سال به سال در حال افزایش است [۹۹ و ۹۸]. مواد محافظ و جذب EM در زمینه‌های الکترونیک قابل‌حمل، ارتباطات بی‌سیم، هوافضا، نظامی و تجهیزات پزشکی حیاتی هستند و برای عملکرد مناسب تجهیزات ضروری هستند [۱۰۰]. به لطف پیشرفت شدید دستگاه‌های الکترونیکی جدید، تقاضا برای مواد سبک‌وزن، انعطاف‌پذیر، محافظ الکترومغناطیسی و مواد جذب، ضروری‌تر شده است [۱۰۴-۱۰۱]. در پاسخ به این تقاضا، محققان نانوکامپوزیت‌های رسانای کاربردی متعددی مانند نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر نانولوله‌های کربنی (CNTs)، گرافن، کاربیدهای فلزات واسطه (مکسن‌ها) و نانوالیاف فلزی ایجاد کرده‌اند [۱۰۸-۱۰۵]. کاربردهای جدیدترین و محبوب‌ترین کلاس مواد دوبعدی هستند که در مجموع به عنوان مکسن‌ها شناخته می‌شوند [۱۰۴ و ۱۱۱-۱۰۹]. در میان آن‌ها، مکسن، به عنوان درخشان‌ترین ستاره در خانواده نانو مواد دوبعدی، چشم‌انداز کاربردی بسیار خوبی را در زمینه‌های مختلف با رسانایی بالا و مساحت سطح بزرگ از خود نشان داده است که منجر شده است تا از جدیدترین و محبوب‌ترین مواد کلاس دوبعدی به شمار آید [۱۱۴-۱۱۲]. ماده $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ به دلیل رسانایی الکتریکی بالا و فرآیند سنتزی کامل، در میان خانواده‌ی مکسن‌ها بیشترین استفاده را دارد [۱۱۷-۱۱۵]. در حال حاضر، گزارش‌های متعدد ثابت کرده‌اند که مکسن‌ها چشم‌انداز منحصر به فردی در زمینه جذب موثر (EA) و تداخل الکترومغناطیسی (EMI) دارند [۱۰۰ و ۱۱۸]. با این حال، آن‌ها هنوز برای کاربردهای چندمنظوره به عنوان جذب‌ها و مواد محافظ EMI، شناخته شده نیستند [۱۲۲-۱۱۹]. بنابراین، بررسی مکانیسم جذب و محافظ کاربردهای گسترده آن ضروری است [۱۲۵-۱۲۳].

در بخش‌های بعدی، مروری خواهیم داشت بر پیشرفت‌های اخیر مکسن‌ها و کامپوزیت‌های آن‌ها که شامل مطالعات تجربی و نظری است. در ابتدا یک بررسی مختصر از سنتز و پردازش مکسن‌ها انجام شده است، سپس خصوصیات مکانیکی، الکترونیکی و مغناطیسی آن‌ها مورد بحث قرار گرفته است. تنوع ویژگی‌های ساختاری، فیزیکی و شیمیایی مکسن‌ها باعث می‌شود که بهینه‌سازی عملکرد جذب امواج EM آن‌ها انتخابی‌تر باشد. در این مقاله به‌طور سیستماتیک،

1-Naguib et al
2-Hydrofluoric acid
3-Room temperature
4-X-ray diffraction

1-Electromagnetic waves
2-Effective absorption
3-Electromagnetic interference

پیش‌بینی شده است که مکسن‌هایی با گروه انتهایی O سختی بسیار بالا، اما مکسن‌های با گروه‌های انتهایی دیگر (F و OH) سختی الاستیک کمتری نسبت به همتایان خود با گروه انتهایی O-، از خود نشان می‌دهند [۴۹]. این موضوع ممکن است مربوط به ثابت‌های شبکه‌ای مختلف مکسن با گروه انتهایی مختلف باشد: معمولاً مکسن‌هایی با گروه انتهایی O- دارای پارامترهای شبکه کوچکتری نسبت به مکسن‌های با گروه‌های انتهایی F یا OH هستند [۵۰]. در مقایسه با مکسن‌های ساده، مکسن‌های با سطوح عامل‌دار شده، دارای انعطاف‌پذیری بیشتری هستند. به عنوان مثال با استفاده از Ti_2C ، گو و همکاران^۱ دریافتند که عامل‌دار کردن باعث کاهش مدول یانگ Ti_2C می‌شود، اما Ti_2C عامل‌دار شده می‌تواند فشار بیشتری نسبت به Ti_2C برهنه (ساده) و حتی گرفتن تحمل کند [۵۱]. گروه‌های انتهایی به عنوان یک لایه بافر برای Ti_2C تحت تغییر شکل کششی عمل می‌کنند که روند فروپاشی لایه‌های Ti را کاهش می‌دهند و ارزش کرنش بحرانی را در شکستگی Ti_2C افزایش می‌دهند.

۳-۲- خواص الکترونیکی

مکسن‌ها به واسطه تنوع بالای ترکیب، سطح عامل‌دار شده و توانایی کنترل انعطاف‌پذیری ضخامت، خواص الکترونیکی مختلفی از فلز و نیمه رسانایی تا عایق‌پذیری توپولوژیکی را پوشش می‌دهند [۵۳ و ۵۲]. در میان آن‌ها، تمام مکسن‌های ساده و اکثر مکسن‌های با سطوح عامل‌دار شده، فلزی هستند. جالب توجه است که توابع کار^۲ (WFs) محاسبه شده مکسن‌های فلزی، همانطور که در شکل ۳ الف نشان داده شده است، می‌توانند در یک محدوده بسیار گسترده از

1-Guo et al
2-Work functions

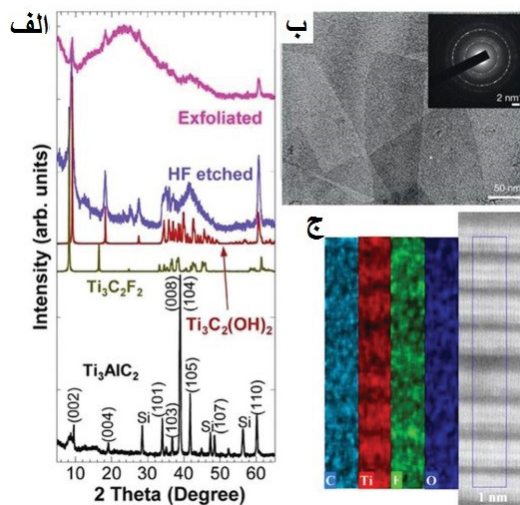
برای توسعه‌ی این روش باید از مواد کم‌ضرر دیگری استفاده کنیم. گیدیو و همکاران^۱، از یک محلول مخلوط امتر اسید کلریدریک (HCl) و لیتیوم فلورید (LiF) استفاده کردند که در آن پودرهای Ti_3AlC_2 در ۲۵ درجه سانتیگراد به مدت ۲۴ ساعت غوطه‌ور شده‌اند تا $Ti_3C_2T_x$ به دست آید [۴۲]. از تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) $Ti_3C_2T_x$ (شکل ۲ ب) میتوان دریافت که نمونه سنتز شده، نقص کمتری دارد. از آنجاکه محلول مخلوط HCl و LiF دارای یون‌های هیدروژن و فلورید است، می‌توانیم نتیجه بگیریم که فازهای ماکس از همان مکانیسم اسیدشویی توسط محلول HF برخوردار هستند. در حقیقت، از ترکیبات دیگری از اسیدها (H_2SO_4) و نمک‌های حاوی یون‌های فلورین^۳ (NaF , FeF_3) (CaF_2 , KF , CsF) نیز برای سنتز مکسن‌ها استفاده شده است [۵۶]. تاکنون بسیاری از مکسن‌ها از جمله Ti_2CT_x [۴۳]، Mo_2C- T_x [۴۴]، V_2CT_x [۴۵]، $W_{4/3}CT_x$ [۴۶]، $Ti_3C_2T_x$ [۴۲]، Ti_3CNT_x [۴۶]، $Cr_2TiC_2T_x$ [۴۷]، $(Nb_{0.8}Zr_{0.2})_4C_3T_x$ [۴۸] و $(Nb_{0.8}Ti_{0.2})_4C_3T_x$ [۴۸] با استفاده از محلول‌های مخلوط اسیدها و نمک‌های حاوی یون‌های فلورین با موفقیت تولید شده‌اند. با این حال، در پردازش اسیدشویی این محلول‌های مخلوط نیز مقداری گاز مضر HF آزاد می‌شود.

۳-۳- خواص

۳-۱- خواص مکانیکی

خواص مکانیکی مکسن‌ها به شدت به گروه انتهایی آن‌ها بستگی دارد.

1-Ghidiu et al
2-Hydrochloric acid
3-Lithium fluoride
4-Transmission electron microscopy



شکل ۲ الف) الگوی XRD، Ti_3AlC_2 قبل و بعد از اسیدشویی توسط HF. (ب) تصویر TEM از $Ti_3C_2T_x$. الگوی پراش الکترون تمامی مناطق انتخاب شده‌ی داخلی نشان داده شده است. (ج) تصویر STEM (صفحه سمت راست) و نقشه‌های EDX (صفحه سمت چپ) $Ti_3C_2T_x$ [۴۷].

کردند [۵۴]. بنابراین، برای دستیابی به عملکرد کار خیلی کمتر (یا خیلی بیشتر) مکسن‌هایی با گروه انتهایی OH (یا O) و کنترل دقیق انواع گروه‌های عاملی سطح ضروری است.

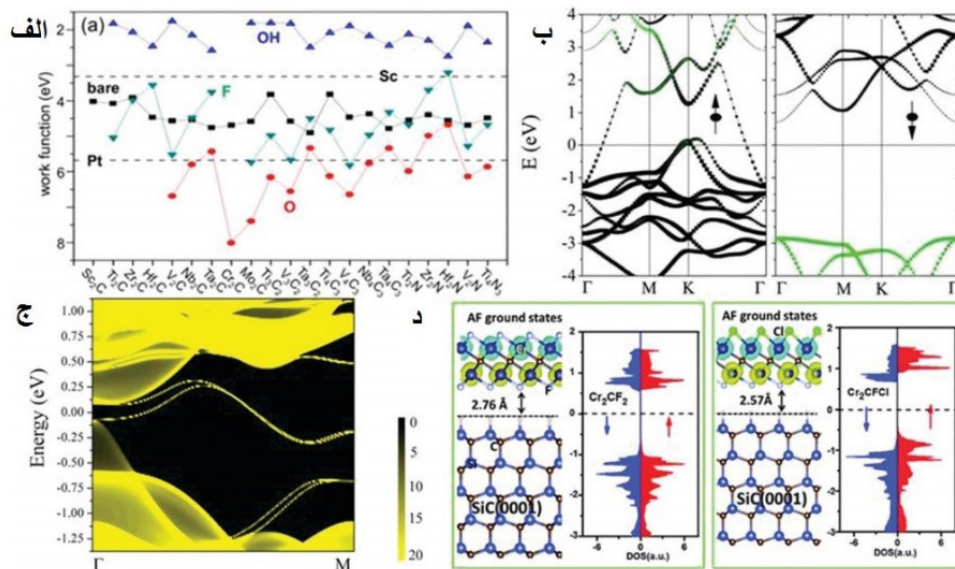
۳-۳- خواص مغناطیسی

اگرچه بسیاری از مواد دوبعدی یافت شده‌اند، اما اکثر آن‌ها غیرمغناطیسی هستند که باعث محدود شدن کاربردهای آن‌ها در اسپینترونیک^۱ می‌شود. بنابراین، دستیابی به مغناطیس کنترل شده در مواد دوبعدی، یک هدف طولانی مدت بوده است. با این حال پیش‌بینی شده‌است که برخی از مکسن‌ها مانند Ti_2C ، Ti_2N ، Cr_2C ، Cr_2N و Mn_2C مواد مغناطیسی ذاتی هستند. در این میان، $[55] Ti_2C$ ، $[56] Ti_2N$ و $[57] Cr_2C$ فرومغناطیسی هستند، درحالی‌که Cr_2N [۵۵] و $[58] Mn_2C$ ضدمغناطیسی هستند. به‌طور خاص، اخیراً توجه فزاینده‌ای به مکسن‌های مغناطیسی با نیمه-فلزات^۲ شده‌است. در نیمه-فلزات، یک کانال چرخش فلزی است، درحالی‌که کانال چرخش دیگر، نیمه‌رسانا است و در نتیجه در تراز فرمی الکترون‌های کاملاً چرخشی - قطبی ایجاد میشوند. Cr_2C اولین نیمه-فلز پیش‌بینی شده از خانواده مکسن‌ها است [۵۷]. ساختار پیوند آن در شکل ۳ ب نشان داده شده است، جایی که به‌وضوح میتوان یک کانال چرخشی فلزی و یک کانال چرخشی عایق را مشاهده کرد. علاوه بر این، شکاف نیمه-فلزی آن، تفاوت بین تراز فرمی و حداکثر باند چرخش پایین اشغال شده که به اندازه حدود $2/9 eV$ است، نشان میدهد که میتواند

- 1-Single Dirac cone
- 2-Spintronics

$1/8 eV$ تا $8 eV$ متفاوت باشند [۵۳]. مشاهده میشود که WFs مکسن‌ها به سطح شیمیایی آن‌ها حساس هستند؛ برای یک مکسن معین در مقایسه با سطح ساده، ساختار OH(O) همیشه WF را کاهش می‌دهد (افزایش می‌دهد)، درحالی‌که ساختار F هر یک از روندها را با تکیه بر ماده خاص خود نمایش می‌دهد. درحالی‌که تمام مکسن‌های با گروه انتهایی OH، دارای WF برابر $2/8 eV$ هستند که این مقدار پایین‌تر از Sc، با تقریباً پایین‌ترین WF در میان فلزات اساسی، است. از طرف دیگر، WFs برخی از مکسن‌ها با گروه انتهایی O حتی از Pt که بالاترین WF را در بین همه فلزات اساسی دارد، بزرگتر هستند. همچنین WFs مکسن‌هایی با گروه انتهایی F- همیشه بین هم‌تایان خود که به OH- و O- پایان یافته‌اند، قرار می‌گیرند. قابل ذکر است که تغییر WF پس از عامل‌دار شدن سطح از تغییر گشتاور دو قطبی سطح ناشی می‌شود [۵۳]. گروه انتهایی OH(O) همیشه منجر به یک گشتاور دو قطبی سطح منفی (مثبت) می‌شود؛ بنابراین WF کاهش می‌یابد (افزایش می‌یابد)، درحالی‌که گروه انتهایی F می‌تواند بسته به ماده خاص مکسن، هر دو گشتاور دو قطبی سطح منفی یا مثبت را نشان دهد. با این حال، اشاره شده‌است که در آزمایش‌های فعلی، مخلوط گروه‌های انتهایی O، F، OH بر روی سطوح مکسن، معمولاً WFs مکسن‌ها را به مقدار متوسط برمی‌گرداند. به عنوان مثال، با انجام تجزیه و تحلیل میکروسکوپ نیروی تشخیص کلون^۱، سو و همکاران^۲ WF ترکیب $Ti_2C(OH)_x F_y$ را که $4/98 eV \approx$ تخمین زده می‌شود، تعیین

- 1-Performing Kelvin probe force microscopy
- 2-Xu et al



شکل 3 الف) عملکردهای مکسن‌ها با خاتمه‌های مختلف. مربع‌های سیاه، دایره‌های قرمز، مثلتهای آبی رو به بالا و مثلتهای رو به پایین فیروزهای به ترتیب برای مکسن‌های ساده، ختم شده با O، ختم شده با OH و ختم شده با F هستند. برای مقایسه، توابع کار Pt و Sc نیز با خطوط تیره نشان داده میشوند. ب) ساختار باند Cr_2C . ج) تراکم حالات محلی برای $Mo_2HfC_2O_2$ در لبه زیگزاگ. حالات لبه‌ای ظرفیت عمده و باندهای رسانای تشکیل شده از یک مخروط تک دیراک در نقطه M را به هم متصل میکند. د) تراکم حالت‌های Cr_2CF_2 (صفحه سمت چپ) و Cr_2CFCl (صفحه راست) که در بستر $SiC(0001)$ پشتیبانی میشود [53و27].

۱۰۰٪ بازده فیلتر چرخشی در یک دامنه‌ی گسترده حفظ شود. متعاقباً، خاصیت نیمه-فلز بودن نیز در Ti_2C و Ti_2N پیش‌بینی شده‌است [۵۶].

۴- کاربرد در زمینه‌ی جذب امواج مایکروویو

۴-۱- کاربرد مواد دوبعدی جاذب مایکروویو

از یک طرف، امواج الکترومغناطیسی را میتوان به عنوان حامل اطلاعات برای برنامه‌های کاربردی در ارتباطات، تلویزیون، سنسور از دور، نوبری و غیره استفاده کرد. از سوی دیگر، آن‌ها همچنین می‌توانند به عنوان حامل انرژی برای کاربردهای گرمایش مایکروویو، مواجهه الکترومغناطیسی، درمان پزشکی و غیره عمل کنند. در هر دو مورد، ممکن است تشعشعات الکترومغناطیسی وجود داشته باشد که نه تنها برای سلامت انسان مضر است، بلکه با ابزارها و تجهیزات الکترونیکی مختلف می‌توانند تداخل پیدا کنند. علاوه بر این، امواج الکترومغناطیسی پیوندهای قوی با کاربردهای دفاعی، مانند جذب مایکروویو برای استتار دارند [۵۹].

۴-۲- کاربردهای مکسن در زمینه‌ی جذب امواج مایکروویو

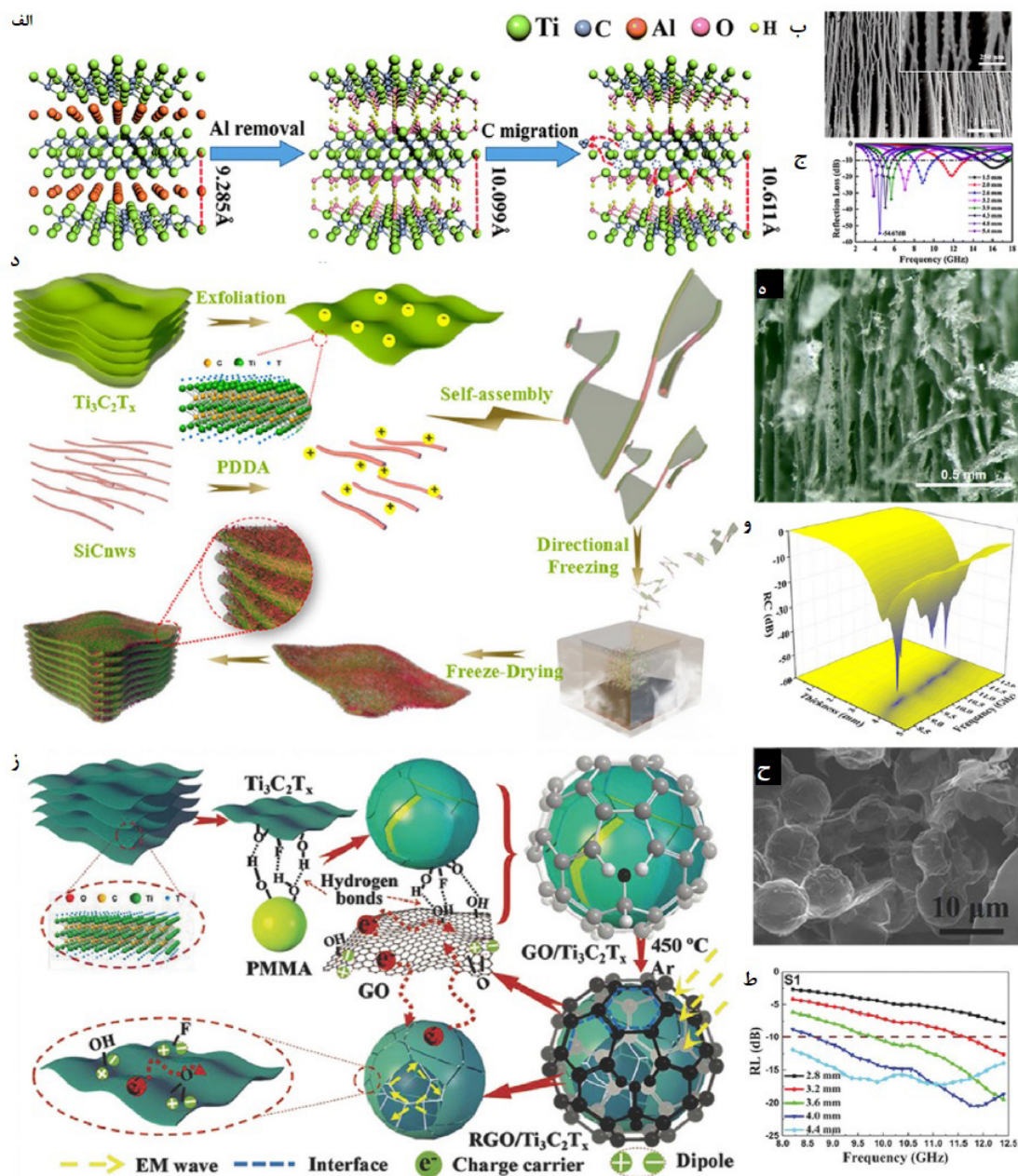
مکسن‌ها به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فردشان از جمله هدایت الکتریکی استثنایی، پایداری مکانیکی، گروه‌های سطح قابل تنظیم، سهولت پردازش به عنوان جایگزین‌های امیدوارکننده‌ی برای گرافن به شمار می‌آیند. با دارا بودن این ویژگی‌های منحصربه‌فرد، اخیراً پیشرفت‌هایی در زمینه‌های ارتباطات بیسیم، محافظت از تداخل الکترومغناطیسی و جذب امواج الکترومغناطیسی داشتند. در همین راستا هی و همکاران [۶۰] به بررسی خصلت جذب امواج الکترومغناطیس مکسن‌ها با توجه به ساختارهای کریستالی و الکترونیکی آن‌ها پرداختند و دوپینگ مغناطیسی^۲ را به‌طور جامع مورد مطالعه قرار دادند. آن‌ها دریافتند که با افزایش اتلاف مغناطیسی^۳، عملکرد جذب موج الکترومغناطیسی را میتوان به‌طور قابل توجهی افزایش داد. دای و همکاران^۴ هیبریدهای دوبعدی مکسن $Ti_3C_2T_x$ و نانوکربن را از طریق فرآیند اسیدشویی با موفقیت سنتز کردند [۶۱]. هیبریدهای مکسن سنتز شده دارای ساختار لایه‌ای دوبعدی و مرزهای ناهمگن فراوان هستند که تطابق امپدانس خوبی نشان میدهند و دارای عملکرد قابل توجهی در جذب امواج EM با حداکثر افت بازتابی (RL) ۵۴/۶۷- در ۳/۹۷ GHz هستند (شکل ۴ الف-ج). کامپوزیت کاربید تیتانیوم لایه‌لایه شده ($D-Ti_3C_2T_x$) نانوصفحه‌ی (NS) مکسن

و موم می‌توانند مقدار زیادی از انرژی موج EM را از طریق از دست دادن هدایت و از دست دادن پلاریزاسیون به انرژی حرارتی تبدیل کنند [۶۲]. فوم مکسن یکی دیگر از مواد بالقوه جذب مایکروویو است. در گزارش بین و همکاران^۱، فوم‌های هیبریدی $Ti_3C_2T_x/SiCnws$ با چگالی بسیار کم، با حداقل مقدار RL ۵۵/۷- سنتز کردند. برهمکنش منحصربه‌فرد بین $Ti_3C_2T_x$ و $SiCnws$ همراه با تخلخل درجه‌بندی شده، میزان تجمع ذرات را تا حد زیادی کاهش داد و اتلاف الکترومغناطیسی را تسهیل کرد (شکل ۴ د-و) [۶۳ و ۶۴]. در طول تشکیل فوم مکسن، لایه‌های اتصال به صورت پل، لایه‌های مجاور را به یک شبکه متصل می‌کنند که نقش مهمی در پایداری ساختار فوم دارد. در نهایت، ساختار منحصربه‌فرد فوم مکسن، که صفحات انعطاف‌پذیر دوبعدی مکسن $SiCnws$ را می‌پوشاند، منجر به افزایش افت پتانسیل و تطابق امپدانس می‌شود. مکسن همچنین می‌تواند با سایر مواد جاذب مایکروویو برای بهبود عملکرد آن‌ها ادغام شود. برای مثال، ژانگ و همکاران^۲ یک فوم سه‌بعدی سبک مکسن به شکل کره توخالی را که توسط RGO پوشانده شده بود، سنتز کردند (شکل ۴ ز-ط) [۶۴]. گروه‌های عاملی اکسید گرافن احیا شده می‌توانند با گروه‌های انتهایی (OH، O، F) سطح مکسن پیوند هیدروژنی تشکیل دهند. از طرف دیگر، ساختار هسته-پوسته و نقص‌های ایجاد شده در طول سنتز، جذب مایکروویو را با اثر پلاریزاسیون بهبود می‌بخشد. علاوه بر فوم سه‌بعدی RGO/مکسن، کامپوزیت‌های PANI/مکسن با ساختار ساندویچی دارای خواص جذب مایکروویو عالی به دلیل اثر هم‌افزایی بین مکسن و PANI می‌باشند [۶۵]. مکسن Ti_2CT_x همچنین می‌تواند با عملیات حرارتی در اتمسفر CO_2 به نانو کامپوزیت‌های Ti_2CT_x/TiO_2 و C/TiO_2 تبدیل شود. در مقایسه با مکسن Ti_2CT_x اصلی، Ti_2CT_x/TiO_2 و C/TiO_2 قابلیت جذب امواج الکترومغناطیسی بهتری را نشان می‌دهند که به کاهش پلاریزاسیون و افت هدایت قوی‌تر نسبت داده می‌شود [۶۶].

ژانگ و همکاران [۶۷] فوم‌های آبگریز، سبک و انعطاف‌پذیر مکسن را که اولین مواد آبگریز و متخلخل بر پایه‌ی مکسن بودند، همان‌طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، ساختند. آن‌ها با فوم‌های سبک مکسن، به دلیل ساختار متخلخل مطلوب آن‌ها، به جاذب‌های الکترومغناطیسی برجسته‌ای دست یافتند. علاوه بر این، عملکردهای جذب ماکروویو و محافظ الکترومغناطیسی نانوصفحات مکسن نیز توسط بین [۶۸]، هی [۶۹] و دیگران [۷۰ و ۷۱] گزارش شده است.

1-Yin et al
2-Agglomeration
3-Zhang et al

1-Peng He et al
2-Magnetic doping
3-Magnetic loss
4-Dai et al
5-Nanosheet

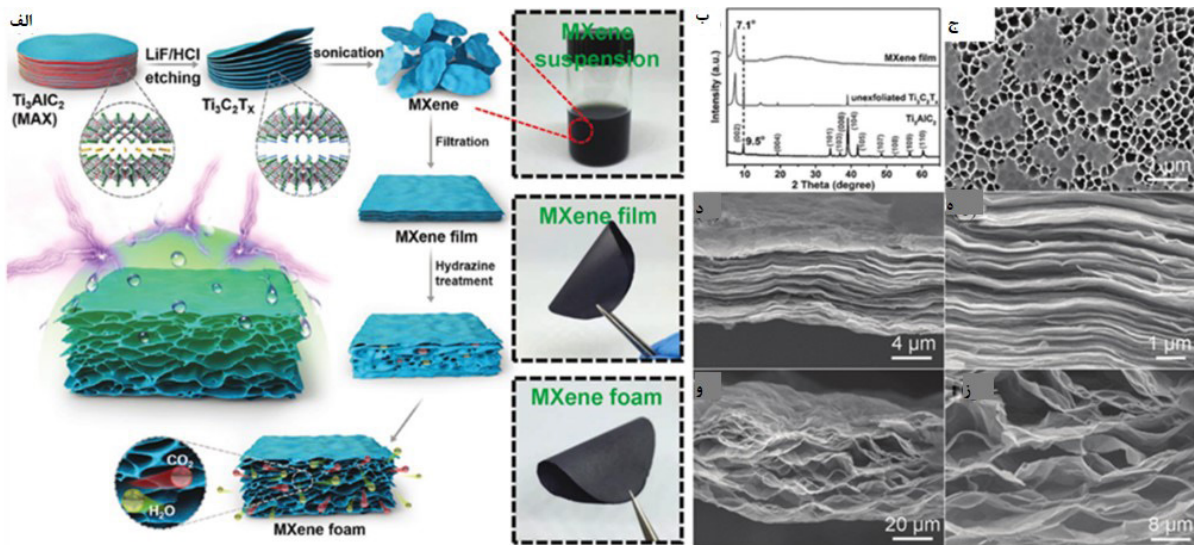


شکل ۴ الف) مکانیسم سنتز، (ب) تصویر SEM و (ج) جریان R_L مکسن $Ti_3C_2T_x$ /فضاهای هیبریدی نانوکربن. (د) تصویر شماتیک نشان دهنده‌ی تشکیل فوم هیبریدی $f-Ti_3C_2T_x/SiCnws$. تصویر (د) و جریان R_L سه بعدی (و) فوم هیبریدی $f-Ti_3C_2T_x/SiCnws$. (ز) تصویر SEM فرایند سنتز $RGO/Ti_3C_2T_x$ و جریان R_L (ح) و (ط) $RGO/Ti_3C_2T_x$ [۶۶و۶۷].

برهمکنش‌های بین لایه‌های ضعیف، از لایه‌برداری ورقه‌های مکسن سود می‌برد. ورقه‌های مکسنی که به خوبی لایه‌برداری شده بودند بسیار نازک و تقریباً شفاف بودند که از طریق آن، منافذ غشای اکسید آلومینیوم آنودایز شده (AAO) قابل مشاهده شده بود (شکل ۵ ج). در تصاویر SEM به وضوح تکامل ساختاری نشان داده شده است (شکل ۵ د-ز). فیلم مکسن ساختاری موازی منظم شده، فشرده و لایه‌ای داشت که انعطاف‌پذیری فوق‌العاده و خواص مکانیکی بالایی

1-Anodized aluminum oxide

شکل ۵ الف، فرایند ساخت فوم مکسن را نشان می‌دهد. ورقه‌های مکسن با لایه‌لایه سازی یک پیش‌ماده Ti_3AlC_2 با LiF/HCl با اسیدشویی انتخابی لایه‌های Al آن تهیه شدند [۱۲۶]. آماده‌سازی موفقیت‌آمیز $Ti_3C_2T_x$ با تغییر قله‌ی (۰۰۲) به یک زاویه کوچکتر و قله بسیار ضعیف شده در 39° تأیید شد (شکل ۵ ب) [۱۲۷]. تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) ساختار انباشته‌شده‌ی ذرات $Ti_3C_2T_x$ اسیدشویی شده را نشان می‌دهند که به دلیل



شکل ۵ (الف) تصویر شماتیکی از ساخت فوم‌های مکسن آگریز و انعطاف‌پذیر. (ب) الگوهای XRD، Ti_3AlC_2 ، $Ti_3C_2T_x$ لایه‌برداری نشده و فیلم‌های مکسن. (ج) تصویر SEM صفحات مکسن $Ti_3C_2T_x$ بر روی یک فیلتر AAO. (د، ه) تصاویر SEM مقطعی فیلم‌های مکسن (و، ز) و فوم‌های مکسن [۱۲۷ و ۱۲۶ و ۱۲۷ و ۱۲۷].

۳/۵ بود و حداقل RL به ۶۳ dB- رسید. در همان زمان، ادعا شده است که $Ti_3C_2/Fe_3O_4/PANI$ [۸۹ و ۸۸] و نقره/CNF/ مکسن [۹۰]، عملکردهای جذب میکروویو بالایی را از خود نشان داده‌اند. در این کامپوزیت‌ها، ساختار چندلایه‌ی Ti_3C_2 منجر به شکل‌گیری مرزهای زیادی می‌شود که ممکن است قطبش مرزی را در مواد افزایش دهد. در همان زمان، واکنش اسیدشویی باعث تشکیل گروه‌های عاملی سطحی فراوان و نقص‌های موضعی می‌شود که قطبش دوقطبی ایجاد می‌کند و منجر به از دست دادن دی‌الکتریک بالا می‌شود. علاوه بر این، حضور پلیمرهای رسانا می‌تواند مسیرهای رسانای بیشتری را برای مهاجرت بارها فراهم کند.

همان‌طور که در جدول ۱ نشان داده شده است، نانوصفحات مکسن برای اینکه قابلیت جذب میکروویو قوی‌تری داشته باشند، باید بهبود پیدا کنند. از طرف دیگر، عملکرد جذب میکروویو این نانوصفحات پس از ترکیب با فریت‌ها تا حد زیادی افزایش نیافته است که این موضوع به این معنی است که عوامل موثر دیگری، مانند روش‌های اسیدشویی مختلف و دمای واکنش می‌توانند در عملکرد جاذب‌های امواج الکترومغناطیس موثر باشند [۷۸].

۴-۳- مکانیسم جذب امواج میکروویو

جاذب‌های میکروویو را با توجه به مکانیسم‌های اتلافشان می‌توان به سه دسته تقسیم کرد؛ یعنی (i) جاذب مقاومتی، (ii) جاذب اتلاف دی‌الکتریک و (iii) جاذب اتلاف مغناطیسی که در این قسمت مورد

را برای مواد فراهم می‌کند [۷۲].

ژانگ و همکاران [۷۳] مکسن بهبود داده شده با نیکل را که به دلیل اتلاف مغناطیسی اضافی، قابلیت جذب میکروویو افزایش یافته را از خود نشان داد، معرفی کردند. لیانگ و همکاران [۷۴] و جیانگ و همکاران [۷۵] خواص محافظ الکترومغناطیسی کامپوزیت‌های Ni-Mکسن را گزارش کردند، اما تیم دوم PVDF را برای تنظیم مکانیسم اتلاف و در نتیجه مکانیسم تضعیف مواد اضافه کردند. کیم و همکاران [۷۶] و دنگ و همکاران [۷۷] کامپوزیت‌های ZnO-Mکسن خارپشت‌مانند^۵ و کامپوزیت‌های Co_3O_4 /مکسن را برای افزایش عملکرد جذب الکترومغناطیسی ساختند. مکسن FeCo- Ti_3C_2 [۷۸] و $CoFe@Ti_3C_2T_x$ ساندویچ‌مانند [۷۹]، برای بهبود تطابق امپدانس و افزایش پلاریزاسیون سطحی طراحی شدند. در همان زمان، فریت‌های اسپینل با مکسن ترکیب شدند تا کامپوزیت‌های جاذب میکروویو، مانند $ZnFe_2O_4$ /مکسن [۸۰]، $Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe_2O_4$ /مکسن [۸۱] و $Fe_3O_4@Ti_3C_2T_x$ [۸۲] را توسعه دهند.

علاوه بر این، مواد جاذب دی‌الکتریک و مقاومتی نیز، مانند SiC [۸۳]، کربن [۸۴] و پلی‌آنیلین [۸۵]، به‌طور گسترده برای ترکیب با مکسن استفاده می‌شوند. برای مثال، بین و همکاران [۸۶]، لی و همکاران [۸۷] هیبریدهای TiC/Ti_3AlC_2 /گرافیت را برای افزایش جذب EM سنتز کردند. پهنای باند جذب در ضخامت ۱/۲ mm، GH

1-Liang et al
2-Jiang et al
3-Qian et al
4-Deng et al
5-Urchin-like
6-Li et al

جدول ۱ ویژگیهای جذب مایکروویو مواد مبتنی بر مکسن.

منبع	پهنای باند (GHz)	RL (dB)	ضخامت (mm)	جاذب
[۷۱]	۳/۶۶	-۴۰/۸۰	۱/۶۸	مکسن
[۹۱]	۲/۸۰	-۳۰/۰۰	۱/۸۰	مکسن
[۹۲]	۴/۵۰	-۴۳/۴۰	۲/۰۰	مکسن/آئروژل های سلولزی
[۷۹]	۳/۲۰	-۳۶/۲۹	۲/۲۰	CoFe@Ti ₃ C ₂ T _x
[۸۴]	۴/۰۰	-۳۶/۰۰	۱/۶۰	TiO ₂ /کربن
[۷۸]	۸/۸۰	-۱۷/۸۶	۱/۶۰	FeCo-Ti ₃ C ₂
[۹۳]	۹/۰۰	-۲۵/۰۰	۲/۰۰	NiO&TiO ₂ @C
[۷۳]	۳/۰۰	-۲۴/۸۰	۲/۰۰	مکسن/Ni
[۷۴]	۲/۱۰	-۴۹/۹۰	۱/۷۵	هیبرید مکسن/Ni
[۹۴]	۲/۱۰	-۵۸/۴۰	۳/۶۰	Ti ₃ C ₂ T _x /CNZF
[۹۵]	۱/۴۰	-۵۷/۲۰	۴/۲۰	Fe ₃ O ₄ @Ti ₃ C ₂ T _x
[۹۶]	۳/۶۰	-۴۷/۰۶	۱/۵۰	کره های Ti ₃ C ₂ T _x /Ni
[۹۷]	۱/۰۰	-۵۰/۹۶	۲/۱۸	Ti ₃ C ₂ T _x @NiCo ₂ O ₄
[۸۵]	۳/۰۰	-۵۶/۳۰	۱/۸۰	مکسن/PANI
[۸۲]	۲/۰۰	-۵۷/۳۰	۱/۹۰	TiO ₂ /Ti ₃ C ₂ T _x /Fe ₃ O ₄
[۸۸]	۵/۲۰	-۴۰/۳۰	۱/۹۰	Ti ₃ C ₂ /Fe ₃ O ₄ /PANI
[۸۹]	۱/۶۰	-۴۶/۳۰	۲/۸۰	PVB/Ba ₃ Co ₂ Fe ₂₄ O ₄₁ /Ti ₃ C ₂

بحث قرار می گیرند. قطبش های ثابت، از جمله قطبش جابجایی یونی، قطبش جابجایی ابر الکترونی و قطبش تبدیل حوزه فروالکترونیک، از دست می رود [۱۴۰ و ۱۴۱].

۴-۳-۳- (iii) مواد جاذب مایکروویو مغناطیسی

مواد جذب مایکروویو مغناطیسی، امواج الکترومغناطیسی را عمدتاً از طریق اثرات مغناطیسی ضعیف می کنند [۱۴۲]. تاکنون، مواد جذب کننده مایکروویو مغناطیسی به دلیل اتلاف مغناطیسی و اتلاف دی الکترونیک بالای خود، قابلیت جذب امواج الکترومغناطیسی قوی دارند، اما چگالی بالای آن ها کاربرد آن ها را در برخی مناطق محدود می کند [۱۴۶-۱۴۳]. مکانیسم های اتلاف مواد جذب مایکروویو مغناطیسی عمدتاً شامل از دست دادن پسماند، از دست دادن جریان گردابی، تشدید ابعادی، رزونانس طبیعی و غیره است [۱۴۷ و ۱۴۸]. به طور کلی، سطح از دست دادن پسماند را میتوان با استفاده از پارامترهای به دست آمده از حلقه پسماند، مانند مغناطیس اشباع و نیروی اجباری ارزیابی کرد. تاثیر پسمان مغناطیسی به تاخیر القای مغناطیسی با توجه به تغییر میدان مغناطیسی خارجی اشاره دارد [۱۴۹]. هنگامی که یک میدان مغناطیسی متناوب به یک هادی اعمال می شود، جریان گردابی از دست می رود [۱۵۰ و ۱۵۱]. تشدید طبیعی در غیاب میدان مغناطیسی پایدار خارجی

بحث قرار می گیرند.

۴-۳-۱- (i) مواد جاذب مایکروویو رسانا

جاذب های مقاومتی، مانند کربن سیاه رسانا [۱۲۸]، گرافیت [۱۲۹]، کاربید سیلیکون و پلیمرهایی با رسانایی بالا [۱۳۰]، عمدتاً از طریق برهم کنش خود با میدان الکترونیک، امواج الکترومغناطیسی را جذب می کنند. عملکرد مواد جاذب مایکروویو می تواند با افزودن پرکننده های رسانا، مانند کربن سیاه و گرافیت، تا حد زیادی افزایش یابد [۱۳۱]. وجود پرکننده های رسانا منجر به تشکیل یک شبکه رسانای موضعی یا زنجیره رسانا در داخل مواد می شود [۱۳۲ و ۱۳۳]. در عین حال، ذرات پرکننده های رسانا دارای اندازه های بسیار کوچکی هستند، به طوری که می توانند به طور مساوی در ماتریس توزیع شوند و تعداد زیادی محل پراکندگی برای مصرف امواج الکترومغناطیسی تشکیل دهند [۱۳۹-۱۳۴].

۴-۳-۲- (ii) مواد جاذب مایکروویو دی الکترونیک

جاذب های دی الکترونیک امواج الکترومغناطیسی را عمدتاً از طریق استراحت پلاریزاسیون رسانه کاهش می دهند. هنگامی که امواج الکترومغناطیسی وارد مواد دی الکترونیک می شوند، انرژی عمدتاً به دلیل

به دلیل وجود یک میدان ناهمسان‌گرد کریستال مغناطیسی معادل در داخل مواد فرومغناطیسی رخ می‌دهد [۱۴۵ و ۱۵۲ و ۱۵۳].

۴-۳-۴- مکانیسم جذب امواج مایکروویو در مگسِن‌ها

مواد دوبعدی که توسط گرافن نشان داده میشوند، عموماً مقادیر بالایی از ثابت دی‌الکتریک دارند [۱۳۵ و ۱۵۴]. گرافن نازک‌ترین ماده در خانواده‌ی کربن است و پتانسیل بالایی به عنوان جاذب امواج مایکروویو دارد [۱۵۵-۱۵۹]. به‌طور مشابه، مواد کامپوزیتی مبتنی بر MoS_2 و ماتریس مگسِن‌ها نیز، عمدتاً به دلیل سطوح عملکردی، نقص‌های فراوان و فواصل بین‌لایه‌ای زیاد، که منجر به پلاریزاسیون دوقطبی می‌شوند، دارای عملکرد جذب مایکروویو عالی هستند [۱۳۲ و ۱۶۰-۱۶۲].

مگسِن‌ها، به عنوان یک نامزد امیدوارکننده برای جذب امواج الکترومغناطیسی، به دلیل انواع مختلف عناصر و ضخامت چندین لایه‌ای اتمی، می‌تواند قطبش دوقطبی و بار را در جهت ضخامت نشان دهد [۱۶۳]. علاوه بر این، واکنش شیمیایی Ti_3AlC_2 با هیدروفلوئوریک اسید، نقایص ذاتی بیشتری را ایجاد می‌کند که منجر به آرامش دی‌الکتریک قوی و پلاریزاسیون در این مناطق می‌شود. همچنین وجود سطح پایانی، آن‌ها را قادر می‌سازد تا خواص تنظیم‌شونده‌ای داشته باشند [۱۶۴]. هم‌چنین این گروه‌های عاملی در ساختارهای چندلایه، فاصله‌ی بین لایه‌ها و چگالی انتگرال کمتری را گسترش می‌دهند و فرصت‌های تنظیم بیشتری برای پاسخ‌های مایکروویو ارائه می‌دهند [۱۶۵]. تک‌لایه‌های برهنه‌ی فلزی مگسِن با چگالی الکترونی بالا در نزدیکی سطح فرمی در نظر گرفته می‌شوند [۱۶۶]. بنابراین، ساختار منحصربه‌فرد، عیوب و خواص فلزی، مگسِن را به یک گزینه مفید در برنامه جذب مایکروویو تبدیل کرده است.

۴-۴- بهبود عملکرد حفاظتی EMI و EMA

در سال‌های اخیر، ساخت معقول جاذب‌های EM باعث توسعه فناوری EM و دستگاه‌های پیشرفته EM شده است و با استفاده از جاذب‌های تبدیل انرژی EM چشم‌انداز روشنی برای طراحی دستگاه‌های مختلف دارند [۱۷۰-۱۶۷]. تعمیق درک اصول اساسی فیزیکی و خواص شیمیایی مگسِن و اتخاذ استراتژی‌های فیزیکی یا شیمیایی برای بهره‌برداری از این خواص، برای محققان بسیار مهم است. به‌طور خاص، اثرات اصلاح سطح مگسِن بر رسانایی الکتریکی و پارامترهای الکترومغناطیسی آشکار می‌شود و استراتژی‌های ترکیبی مختلفی برای بهبود پهنای باند EA و EMW طراحی شده‌اند [۱۷۱]. لازم به ذکر است که در آزمایشگاه، پارامترهای EM مگسِن عمدتاً با تحلیلگرهای شبکه برداری اندازه‌گیری می‌شوند؛ بنابراین در

سناریوهای کاربردی واقعی، فاصله بین تحقیقات پایه و کاربردهای عملی باید پر شود. اینکه آیا فرآیند محصول تولید شده برای تولید انبوه مناسب است و آیا پس از فرآیند تولید انبوه، نوسان زیادی در عملکرد EMA محصول وجود دارد یا خیر، نیاز به تحقیقات دقیق بیشتری دارد. به‌طور خاص، در زمینه EMA، محصولات مبتنی بر مگسِن باید دارای تطبیق امپدانس و اتلاف دی‌الکتریک برجسته باشند. به عنوان مثال، میتوان انتظار داشت که با ادغام ابعاد و مواد ساختاری مختلف، قابلیت‌های تضعیف مایکروویو بالاتری تولید شود. مواد مبتنی بر مگسِن عمدتاً به عنوان فیلم‌های مگسِن برای اندازه‌گیری بازده حفاظتی تداخل الکترومغناطیسی (EMI SE) ساخته می‌شوند و عملکرد محافظ EMI نیز به عملکرد EMA بستگی دارد [۱۷۲].

۵- نتیجه‌گیری و چشم‌انداز

در این مقاله، پیشرفت‌های اخیر در سنتز نانوصفحات دوبعدی مگسِن و کامپوزیت‌های مبتنی بر مگسِن، خصوصیات و کاربردهای آن‌ها در زمینه‌ی جذب امواج الکترومغناطیسی از زمان اولین گزارش در سال ۲۰۱۸، خلاصه شده است. در چند سال گذشته بیش از ۲۰ نوع مگسِن با استفاده از اسیدشویی انتخابی و لایه‌برداری از فازهای ماکس تولید شده است. این فرایند سنتز منجر به آرایش سطح مگسِن‌ها توسط گروه‌های عاملی مختلف از جمله O، F و OH می‌شود که بسته به زمان و درجه حرارت اسیدشویی، نسبت گروه‌های عاملی مختلف، متغیر است. با توجه به شیمی سطح متنوع مگسِن‌ها، این ترکیبات خصوصیات الکترونیکی، مغناطیسی، الکتروشیمیایی و مکانیکی منحصربه‌فردی از خود به نمایش گذاشته‌اند. با توجه به انعطاف‌پذیری عالی، ساختار دوبعدی و لایه‌ای، مگسِن‌ها به راحتی با مواد دیگر ترکیب می‌شوند که یک روش موثر برای تنظیم ویژگی‌ها و عملکردهای مگسِن‌ها برای کاربردهای مختلف می‌باشد. از طرف دیگر، در مقایسه با گرافن، گروه‌های سطحی قابل تنظیم در مگسِن میتواند به‌طور مؤثر قطبش گروه‌های سطحی را تنظیم کند. در همین حال، نقص‌های طبیعی ایجاد شده توسط فرآیند اسیدشویی نیز می‌توانند به‌طور موثر قطبش دوقطبی را تشکیل دهند و امواج EM را تضعیف کنند. ساختار لایه‌های مگسِن‌ها برای تولید پلاریزاسیون مرزی برای جذب امواج EM مساعد است. رسانایی بالای مگسِن‌ها به ساخت شبکه‌ی رسانا در داخل جاذب کمک می‌کند تا عملکرد جذب آن را افزایش دهد. علاوه بر این، پایداری مکانیکی و سهولت پردازش در مگسِن‌ها، آن‌ها را در دستیابی به مواد جذب امواج EM چندعملکردی، سودمند می‌سازد. در چند سال اخیر، عملکرد جذب مگسِن‌ها به‌طور مداوم با بررسی رابطه‌ی بین ساختار و ویژگی‌های آن‌ها به‌روز شده است.

1-Electromagnetic Interference Shielding Efficiency

۵- مراجع

- [1] Shao, Yuyan, Jun Wang, Hong Wu, Jun Liu, Ilhan A. Aksay, and Yuehe Lin. "Graphene based electrochemical sensors and biosensors: a review." *Electroanalysis: An International Journal Devoted to Fundamental and Practical Aspects of Electroanalysis* 22, no. 10 (2010): 1027-1036.
- [2] Allen, Matthew J., Vincent C. Tung, and Richard B. Kaner. "Honeycomb carbon: a review of graphene." *Chemical reviews* 110, no. 1 (2010): 132-145.
- [3] Mattevi, Cecilia, Hokwon Kim, and Manish Chhowalla. "A review of chemical vapour deposition of graphene on copper." *Journal of Materials Chemistry* 21, no. 10 (2011): 3324-3334.
- [4] Wang, Haibo, Thandavarayan Maiyalagan, and Xin Wang. "Review on recent progress in nitrogen-doped graphene: synthesis, characterization, and its potential applications." *ACS catalysis* 2, no. 5 (2012): 781-794.
- [5] Li, Likai, Yijun Yu, Guo Jun Ye, Qingqin Ge, Xuedong Ou, Hua Wu, Donglai Feng, Xian Hui Chen, and Yuanbo Zhang. "Black phosphorus field-effect transistors." *Nature nanotechnology* 9, no. 5 (2014): 372-377.
- [6] Lalmi, Boubekour, Hamid Oughadou, Hanna Enriquez, Abdelkader Kara, Sébastien Vizzini, Bénédicte Ealet, and Bernard Aufray. "Epitaxial growth of a silicene sheet." *Applied Physics Letters* 97, no. 22 (2010): 223109.
- [7] Dávila, M. E., Lede Xian, Seymour Cahangirov, Angel Rubio, and Guy Le Lay. "Germanene: a novel two-dimensional germanium allotrope akin to graphene and silicene." *New Journal of Physics* 16, no. 9 (2014): 095002.
- [8] Liu, Han, Adam T. Neal, Zhen Zhu, Zhe Luo, Xianfan Xu, David Tománek, and Peide D. Ye. "Phosphorene: an unexplored 2D semiconductor with a high hole mobility." *ACS nano* 8, no. 4 (2014): 4033-4041.
- [9] Cahangirov, Seymour, Mehmet

علیرغم دستاوردهای اساسی تاکنون در بهبود عملکرد جاذب‌های امواج مایکروویو، فرصت‌ها و چالش‌های زیادی در این زمینه باقی مانده است. از طرف دیگر، پیشرفت‌های زیادی در تحقیقات مکسن‌ها با تلاش محققان در سراسر جهان حاصل شده است. مکسن‌ها با خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر به فرد، پتانسیل گسترده‌ای برای کاربرد در زمینه‌ی جذب امواج الکترومغناطیس از خود نشان داده است. با این حال، بسیاری از گونه‌های مکسن پیش‌بینی شده از لحاظ نظری نیاز به اعتبارسنجی تجربی دارند. سپس، اصلاح سطح و ساختار مواد مکسن با سایر ترکیبات بایستی بیشتر مورد توجه قرار گیرد. در راستای تحقیقات آینده پیشنهاد می‌گردد که در مرحله‌ی اول، تلاش‌های بیشتری در زمینه‌ی آماده‌سازی، بهینه‌سازی ساختار نانوصفحات مکسن به منظور بهبود عملکرد جاذب‌های امواج الکترومغناطیس صورت گیرد. سپس، مکانیسم عملکرد جاذب امواج الکترومغناطیس توسط نانوکامپوزیت‌های مبتنی بر مکسن مورد مطالعه قرار گیرد. از این رو، تحقیق در مورد نانوکامپوزیت‌های بر مکسن هنوز فضای زیادی برای نوآوری و رشد دارد و انتظار می‌رود پیشرفت‌های زیادی در این زمینه صورت گیرد.

- Topsakal, Ethem Aktürk, Hasan Şahin, and Salim Ciraci. "Two- and one-dimensional honeycomb structures of silicon and germanium." *Physical review letters* 102, no. 23 (2009): 236804.
- [10] Bhimanapati, Ganesh R., Zhong Lin, Vincent Meunier, Yeonwoong Jung, Judy Cha, Saptarshi Das, Di Xiao et al. "Recent advances in two-dimensional materials beyond graphene." *ACS nano* 9, no. 12 (2015): 11509-11539.
- [11] Tang, Xiao, Xin Guo, Wenjian Wu, and Guoxiu Wang. "2D metal carbides and nitrides (MXenes) as high-performance electrode materials for Lithium-based batteries." *Advanced Energy Materials* 8, no. 33 (2018): 1801897.
- [12] Anasori, Babak, Maria R. Lukatskaya, and Yury Gogotsi. "2D metal carbides and nitrides (MXenes) for energy storage." *Nature Reviews Materials* 2, no. 2 (2017): 1-17.
- [13] Gogotsi, Y., and B. Anasori. "ACS Nano 2019, 13, 8491; b) M. Naguib, VN Mochalin, MW Barsoum, Y. Gogotsi." *Adv. Mater* 26 (2014): 992-1005.
- [14] Hantanasirisakul, Kanit, and Yury Gogotsi. "Electronic and optical properties of 2D transition metal carbides and nitrides (MXenes)." *Advanced Materials* 30, no. 52 (2018): 1804779.
- [15] Khazaei, Mohammad, Ahmad Ranjbar, Masao Arai, Taizo Sasaki, and Seiji Yunoki. "Electronic properties and applications of MXenes: a theoretical review." *Journal of Materials Chemistry C* 5, no. 10 (2017): 2488-2503.
- [16] Liu, Yi-Tao, Xiao-Dong Zhu, and Long Pan. "Hybrid architectures based on 2D MXenes and low-dimensional inorganic nanostructures: methods, synergies, and energy-related applications." *Small* 14, no. 51 (2018): 1803632.
- [17] Nan, J., X. Guo, J. Xiao, X. Li, W. Chen, W. Wu, H. Liu, Y. Wang, M. Wu, and G. Wang. "Small, 2019, e1902085."
- [18] Ng, Vincent Ming Hong, Hui Huang, Kun Zhou, Pooi See Lee, Wenxiu Que, Jason Zhichuan Xu, and Ling Bing Kong. "Recent progress in layered transition metal carbides and/or nitrides (MXenes) and their composites: synthesis and applications." *Journal of Materials Chemistry A* 5, no. 7 (2017): 3039-3068.
- [19] Barsoum, Michel W., and Tamer El-Raghy. "The MAX phases: Unique new carbide and nitride materials: Ternary ceramics turn out to be surprisingly soft and machinable, yet also heat-tolerant, strong and lightweight." *American scientist* 89, no. 4 (2001): 334-343.
- [20] Barsoum, Michel W. "The MN+1AXN phases: A new class of solids: Thermodynamically stable nanolaminates." *Progress in solid state chemistry* 28, no. 1-4 (2000): 201-281.
- [21] Sun, Z. M. "Progress in research and development on MAX phases: a family of layered ternary compounds." *International Materials Reviews* 56, no. 3 (2011): 143-166.
- [22] Högberg, Hans, Lars Hultman, Jens Emmerlich, Torbjörn Joelsson, Per Eklund, Jon M. Molina-Aldareguia, J-P. Palmquist, Ola Wilhelmsson, and Ulf Jansson. "Growth and characterization of MAX-phase thin films." *Surface and Coatings Technology* 193, no. 1-3 (2005): 6-10.
- [23] Zhang, Xiaodong, Jianguang Xu, Hui Wang, Jiajia Zhang, Hanbing Yan, Bicao Pan, Jingfang Zhou, and Yi Xie. "Ultrathin nanosheets of MAX phases with enhanced thermal and mechanical properties in polymeric compositions: Ti₃Si_{0.75}Al_{10.25}C₂." *Angewandte Chemie International Edition* 52, no. 16 (2013): 4361-4365.
- [24] Naguib, Michael, Murat Kurtoglu, Volker Presser, Jun Lu, Junjie Niu, Min Heon, Lars Hultman, Yury Gogotsi, and Michel W. Barsoum. "Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti₃AlC₂." *Advanced materials* 23, no. 37 (2011): 4248-4253.
- [25] Berdiyrov, Golibjon R., and Khaled A. Mahmoud. "Effect of surface termination on ion intercalation selectivity of bilayer

- Ti₃C₂T₂ (T= F, O and OH) MXene." Applied Surface Science 416 (2017): 725-730.
- [26] Li, Shuang, Ping Tuo, Junfeng Xie, Xiaodong Zhang, Jianguang Xu, Jian Bao, Bica Pan, and Yi Xie. "Ultrathin MXene nanosheets with rich fluorine termination groups realizing efficient electrocatalytic hydrogen evolution." Nano Energy 47 (2018): 512-518.
- [27] Zhan, Xiaoxue, Chen Si, Jian Zhou, and Zhimei Sun. "MXene and MXene-based composites: synthesis, properties and environment-related applications." Nanoscale Horizons 5, no. 2 (2020): 235-258.
- [28] Gogotsi, Yury, and Qing Huang. "MXenes: two-dimensional building blocks for future materials and devices." ACS nano 15, no. 4 (2021): 5775-5780.
- [29] Zhu, Kai, Yuming Jin, Fei Du, Shuang Gao, Zhongmin Gao, Xing Meng, Gang Chen, Yingjin Wei, and Yu Gao. "Synthesis of Ti₂CT_x MXene as electrode materials for symmetric supercapacitor with capable volumetric capacitance." Journal of energy chemistry 31 (2019): 11-18.
- [30] Naguib, Michael, Joseph Halim, Jun Lu, Kevin M. Cook, Lars Hultman, Yury Gogotsi, and Michel W. Barsoum. "New two-dimensional niobium and vanadium carbides as promising materials for Li-ion batteries." Journal of the American Chemical Society 135, no. 43 (2013): 15966-15969.
- [31] Vahid Mohammadi, Armin, Ali Hadjikhani, Sina Shahbazmohamadi, and Majid Beidaghi. "Two-dimensional vanadium carbide (MXene) as a high-capacity cathode material for rechargeable aluminum batteries." ACS nano 11, no. 11 (2017): 11135-11144.
- [32] Soundiraraju, Bhuvaneshwari, and Benny Kattikkanal George. "Two-dimensional titanium nitride (Ti₂N) MXene: synthesis, characterization, and potential application as surface-enhanced Raman scattering substrate." ACS nano 11, no. 9 (2017): 8892-8900.
- [33] Naguib, Michael, Olha Mashtalir, Joshua Carle, Volker Presser, Jun Lu, Lars Hultman, Yury Gogotsi, and Michel W. Barsoum. "Two-dimensional transition metal carbides." ACS nano 6, no. 2 (2012): 1322-1331.
- [34] Tao, Quanzheng, Martin Dahlqvist, Jun Lu, Sankalp Kota, Rahele Meshkian, Joseph Halim, Justinas Palisaitis et al. "Two-dimensional Mo_{1.33}C MXene with divacancy ordering prepared from parent 3D laminate with in-plane chemical ordering." Nature communications 8, no. 1 (2017): 14949.
- [35] Halim, Joseph, Justinas Palisaitis, Jun Lu, J. Thörnberg, E. J. Moon, M. Precner, P. Eklund, PO Å. Persson, M. W. Barsoum, and J. Rosen. "Synthesis of two-dimensional Nb_{1.33}C (MXene) with randomly distributed vacancies by etching of the quaternary solid solution (Nb_{2/3}Sc_{1/3})₂AlC MAX phase." ACS Applied Nano Materials 1, no. 6 (2018): 2455-2460.
- [36] Meshkian, Rahele, Martin Dahlqvist, Jun Lu, Björn Wickman, Joseph Halim, Jimmy Thörnberg, Quanzheng Tao et al. "W-based atomic laminates and their 2D derivative W_{1.33}C MXene with vacancy ordering." Advanced Materials 30, no. 21 (2018): 1706409.
- [37] Wang, Xuefeng, Xi Shen, Yurui Gao, Zhaoxiang Wang, Richeng Yu, and Liquan Chen. "Atomic-scale recognition of surface structure and intercalation mechanism of Ti₃C₂X." Journal of the American Chemical Society 137, no. 7 (2015): 2715-2721.
- [38] Wang, Hsiu-Wen, Michael Naguib, Katharine Page, David J. Wesolowski, and Yury Gogotsi. "Resolving the structure of Ti₃C₂T_x MXenes through multilevel structural modeling of the atomic pair distribution function." Chemistry of Materials 28, no. 1 (2016): 349-359.
- [39] Zhao, Shuangshuang, Xing Meng, Kai Zhu, Fei Du, Gang Chen, Yingjin Wei, Yury Gogotsi, and Yu Gao. "Li-ion uptake and increase in interlayer spacing of Nb₄C₃ MXene." Energy Storage Materials 8 (2017): 42-48.
- [40] Tran, Minh H., Timo Schäfer, Ali Shahraei, Michael Dürschnabel, Leopoldo

- Molina-Luna, Ulrike I. Kramm, and Christina S. Birkel. "Adding a new member to the MXene family: synthesis, structure, and electrocatalytic activity for the hydrogen evolution reaction of V4C3Tx." *ACS Applied Energy Materials* 1, no. 8 (2018): 3908-3914.
- [41] Anasori, Babak, Yu Xie, Majid Beidaghi, Jun Lu, Brian C. Hosler, Lars Hultman, Paul RC Kent, Yury Gogotsi, and Michel W. Barsoum. "Two-dimensional, ordered, double transition metals carbides (MXenes)." *ACS nano* 9, no. 10 (2015): 9507-9516.
- [42] Ghidui, Michael, Maria R. Lukatskaya, Meng-Qiang Zhao, Yury Gogotsi, and Michel W. Barsoum. "Conductive two-dimensional titanium carbide 'clay' with high volumetric capacitance." *Nature* 516, no. 7529 (2014): 78-81.
- [43] Kajiyama, Satoshi, Lucie Szabova, Keitaro Sodeyama, Hiroki Iinuma, Ryohei Morita, Kazuma Gotoh, Yoshitaka Tateyama, Masashi Okubo, and Atsuo Yamada. "Sodium-ion intercalation mechanism in MXene nanosheets." *ACS nano* 10, no. 3 (2016): 3334-3341.
- [44] Anasori, B., Y. Xie, M. Beidaghi, J. Lu, B. C. Hosler, L. Hultman, P. R. C. Kent, Y. Gogotsi, and M. W. Barsoum. "ACS Nano 2015, 9, 9507; d) J. Halim, S. Kota, MR Lukatskaya, M. Naguib, M." Q. Zhao, EJ Moon, J. Pitock, J. Nanda, SJ May, Y. Gogotsi, MW Barsoum, *Adv. Funct. Mater* 26 (2016): 3118.
- [45] Liu, Fanfan, Jie Zhou, Shuwe Wang, Bingxin Wang, Cai Shen, Libo Wang, Qianku Hu, Qing Huang, and Aiguo Zhou. "Preparation of high-purity V2C MXene and electrochemical properties as Li-ion batteries." *Journal of the Electrochemical Society* 164, no. 4 (2017): A709.
- [46] Du, Fei, Huan Tang, Limei Pan, Tian Zhang, Hanmei Lu, Jie Xiong, Jian Yang, and Chuanfang John Zhang. "Environmental friendly scalable production of colloidal 2D titanium carbonitride MXene with minimized nanosheets restacking for excellent cycle life lithium-ion batteries." *Electrochimica Acta* 235 (2017): 690-699.
- [47] Anasori, Babak, Yu Xie, Majid Beidaghi, Jun Lu, Brian C. Hosler, Lars Hultman, Paul RC Kent, Yury Gogotsi, and Michel W. Barsoum. "Two-dimensional, ordered, double transition metals carbides (MXenes)." *ACS nano* 9, no. 10 (2015): 9507-9516.
- [48] Yang, Jian, Michael Naguib, Michael Ghidui, Li-Mei Pan, Jian Gu, Jagjit Nanda, Joseph Halim, Yury Gogotsi, and Michel W. Barsoum. "Two-dimensional Nb-based M4C3 solid solutions (MXenes)." *Journal of the American Ceramic Society* 99, no. 2 (2016): 660-666.
- [49] Bai, Yuele, Kun Zhou, Narasimulu Srikanth, John HL Pang, Xiaodong He, and Rongguo Wang. "Dependence of elastic and optical properties on surface terminated groups in two-dimensional MXene monolayers: a first-principles study." *RSC advances* 6, no. 42 (2016): 35731-35739.
- [50] Zha, Xian-Hu, Kan Luo, Qiuwu Li, Qing Huang, Jian He, Xiaodong Wen, and Shiyu Du. "Role of the surface effect on the structural, electronic and mechanical properties of the carbide MXenes." *Europhysics Letters* 111, no. 2 (2015): 26007.
- [51] Guo, Zhonglu, Jian Zhou, Chen Si, and Zhimei Sun. "Flexible two-dimensional Tin+1Cn (n= 1, 2 and 3) and their functionalized MXenes predicted by density functional theories." *Physical Chemistry Chemical Physics* 17, no. 23 (2015): 15348-15354.
- [52] Khazaei, Mohammad, Masao Arai, Taizo Sasaki, Ahmad Ranjbar, Yunye Liang, and Seiji Yunoki. "OH-terminated two-dimensional transition metal carbides and nitrides as ultralow work function materials." *Physical Review B* 92, no. 7 (2015): 075411.
- [53] Liu, Yuanyue, Hai Xiao, and William A. Goddard III. "Schottky-barrier-free contacts with two-dimensional semiconductors by surface-engineered MXenes." *Journal of the American Chemical Society* 138, no. 49 (2016): 15853-15856.
- [54] Xu, Jiao, Jaewoo Shim, Jin Hong

- Park, and Sungjoo Lee. "MXene electrode for the integration of WSe₂ and MoS₂ field effect transistors." *Advanced Functional Materials* 26, no. 29 (2016): 5328-5334.
- [55] Wang, Guo. "Theoretical prediction of the intrinsic half-metallicity in surface-oxygen-passivated Cr₂N MXene." *The Journal of Physical Chemistry C* 120, no. 33 (2016): 18850-18857.
- [56] Gao, Guoying, Guangqian Ding, Jie Li, Kailun Yao, Menghao Wu, and Meichun Qian. "Monolayer MXenes: promising half-metals and spin gapless semiconductors." *Nanoscale* 8, no. 16 (2016): 8986-8994.
- [57] Si, Chen, Jian Zhou, and Zhimei Sun. "Half-metallic ferromagnetism and surface functionalization-induced metal-insulator transition in graphene-like two-dimensional Cr₂C crystals." *ACS applied materials & interfaces* 7, no. 31 (2015): 17510-17515.
- [58] Hu, Lin, Xiaojun Wu, and Jinlong Yang. "Mn₂C monolayer: a 2D antiferromagnetic metal with high Néel temperature and large spin-orbit coupling." *Nanoscale* 8, no. 26 (2016): 12939-12945.
- [59] Ahmad, Husnain, Asra Tariq, Amir Shehzad, Muhammad S. Faheem, Muhammad Shafiq, Iqra A. Rashid, Ayesha Afzal et al. "Stealth technology: Methods and composite materials—A review." *Polymer Composites* 40, no. 12 (2019): 4457-4472.
- [60] He, Peng, Meng-Jiao Zheng, Qi Liu, Zi-Yi Liu, Ru-Zhong Zuo, Wen-Qiang Cao, Jie Yuan, and Mao-Sheng Cao. "MXene nanohybrids: Excellent electromagnetic properties for absorbing electromagnetic waves." *Ceramics International* 48, no. 2 (2022): 1484-1493.
- [61] Dai, Binzhou, Biao Zhao, Xi Xie, Tingting Su, Bingbing Fan, Rui Zhang, and Rui Yang. "Novel two-dimensional Ti₃C₂T_x MXenes/nano-carbon sphere hybrids for high-performance microwave absorption." *Journal of Materials Chemistry C* 6, no. 21 (2018): 5690-5697.
- [62] He, Peng, Mao-Sheng Cao, Jin-Cheng Shu, Yong-Zhu Cai, Xi-Xi Wang, Quan-Liang Zhao, and Jie Yuan. "Atomic layer tailoring titanium carbide MXene to tune transport and polarization for utilization of electromagnetic energy beyond solar and chemical energy." *ACS Applied Materials & Interfaces* 11, no. 13 (2019): 12535-12543.
- [63] Li, Xinliang, Yin, Xiaowei, Xu, Hailong, Han, Meikang, Li, Minghang, Liang, Shuang, Cheng, Laifei, Zhang, Litong. "Ultralight MXene-Coated, Interconnected SiC_nws Three-Dimensional Lamellar Foams for Efficient Microwave Absorption in the X-Band" *ACS Applied Materials & Interfaces* 10 (2018) 34524e34533.
- [64] Li, Xinliang, Xiaowei Yin, Changqing Song, Meikang Han, Hailong Xu, Wenyan Duan, Laifei Cheng, and Litong Zhang. "Self-assembly core-shell graphene-bridged hollow MXenes spheres 3D foam with ultra-high specific EM absorption performance." *Advanced Functional Materials* 28, no. 41 (2018): 1803938.
- [65] Wei, H.W., Dong, J.D., Fang, X.J., Zheng, W.H., Sun, Y.T., Qian, Y., Jiang, Z.X., Huang, Y.D. "Ti₃C₂T_x MXene/polyaniline (PANI) sandwich intercalation structure composites constructed for microwave absorption." *Composite Science and Technology* 169 (2019): 52-59.
- [66] Zeng, Xiaojun, Xiaoyu Cheng, Ronghai Yu, and Galen D. Stucky. "Electromagnetic microwave absorption theory and recent achievements in microwave absorbers." *Carbon* 168 (2020): 606-623.
- [67] Liu, Ji, Hao-Bin Zhang, Renhui Sun, Yafeng Liu, Zhangshuo Liu, Aiguo Zhou, and Zhong-Zhen Yu. "Hydrophobic, flexible, and lightweight MXene foams for high-performance electromagnetic-interference shielding." *Advanced Materials* 29, no. 38 (2017): 1702367.
- [68] Li, Xinliang, Xiaowei Yin, Shuang Liang, Minghang Li, Laifei Cheng, and Litong Zhang. "2D carbide MXene Ti₂CT_x as a novel high-performance electromagnetic interference shielding material." *Carbon* 146 (2019): 210-217.
- [69] He, Peng, Xi-Xi Wang, Yong-Zhu

- Cai, Jin-Cheng Shu, Quan-Liang Zhao, Jie Yuan, and Mao-Sheng Cao. "Tailoring Ti₃C₂T_x nanosheets to tune local conductive network as an environmentally friendly material for highly efficient electromagnetic interference shielding." *Nanoscale* 11, no. 13 (2019): 6080-6088.
- [70] Naguib, Michael, Murat Kurtoglu, Volker Presser, Jun Lu, Junjie Niu, Min Heon, Lars Hultman, Yury Gogotsi, and Michel W. Barsoum. "Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti₃AlC₂." *Advanced materials* 23, no. 37 (2011): 4248-4253.
- [71] Cui, Guangzhen, Xin Zheng, Xuliang Lv, Qi Jia, Wei Xie, and Guangxin Gu. "Synthesis and microwave absorption of Ti₃C₂T_x MXene with diverse reactant concentration, reaction time, and reaction temperature." *Ceramics International* 45, no. 17 (2019): 23600-23610.
- [72] Liu, Ji, Hao-Bin Zhang, Renhui Sun, Yafeng Liu, Zhangshuo Liu, Aiguo Zhou, and Zhong-Zhen Yu. "Hydrophobic, flexible, and lightweight MXene foams for high-performance electromagnetic-interference shielding." *Advanced Materials* 29, no. 38 (2017): 1702367.
- [73] Feng, Wanlin, Heng Luo, Sifan Zeng, Chen Chen, Lianwen Deng, Yongqiang Tan, Xiaosong Zhou, Shuming Peng, and Haibin Zhang. "Ni-modified Ti₃C₂ MXene with enhanced microwave absorbing ability." *Materials Chemistry Frontiers* 2, no. 12 (2018): 2320-2326.
- [74] Liang, Luyang, Gaojie Han, Yang Li, Biao Zhao, Bing Zhou, Yuezhan Feng, Jianmin Ma, Yaming Wang, Rui Zhang, and Chuntai Liu. "Promising Ti₃C₂T_x MXene/Ni chain hybrid with excellent electromagnetic wave absorption and shielding capacity." *ACS Applied Materials & Interfaces* 11, no. 28 (2019): 25399-25409.
- [75] Wang, Shi-Jun, Dian-Sen Li, and Lei Jiang. "Synergistic effects between MXenes and Ni chains in flexible and ultrathin electromagnetic interference shielding films." *Advanced Materials Interfaces* 6, no. 19 (2019): 1900961.
- [76] Qian, Yue, Huawei Wei, Jidong Dong, Yunzhe Du, Xiaojiao Fang, Wenhui Zheng, Yutong Sun, and Zaixing Jiang. "Fabrication of urchin-like ZnO-MXene nanocomposites for high-performance electromagnetic absorption." *Ceramics International* 43, no. 14 (2017): 10757-10762.
- [77] Deng, Ruixiang, Bingbing Chen, Haogeng Li, Ke Zhang, Tao Zhang, Yun Yu, and Lixin Song. "MXene/Co₃O₄ composite material: Stable synthesis and its enhanced broadband microwave absorption." *Applied Surface Science* 488 (2019): 921-930.
- [78] He, Jun, Dongyong Shan, Shuoqing Yan, Heng Luo, Can Cao, and Yuhui Peng. "Magnetic FeCo nanoparticles-decorated Ti₃C₂ MXene with enhanced microwave absorption performance." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 492 (2019): 165639.
- [79] Zhou, Congli, Xiaoxia Wang, Heng Luo, Lianwen Deng, Shiliang Wang, Shuang Wei, Yiwei Zheng, Qiang Jia, and Jingquan Liu. "Interfacial design of sandwich-like CoFe@Ti₃C₂T_x composites as high efficient microwave absorption materials." *Applied Surface Science* 494 (2019): 540-550.
- [80] Yu, Fei, Xingjie Wang, Rong Du, Fuyi Jiang, and Yanli Zhou. "ZnFe₂O₄ nanoparticles decorated Ti₃C₂T_x nanosheet as anode materials for enhanced lithium storage." *Materials Letters* 253 (2019): 162-165.
- [81] Li, Youbing, Xiaobing Zhou, Jing Wang, Qihuang Deng, Mian Li, Shiyu Du, Young-Hwan Han, Jaehyung Lee, and Qing Huang. "Facile preparation of in situ coated Ti₃C₂T_x/Ni_{0.5}Zn_{0.5}Fe₂O₄ composites and their electromagnetic performance." *Rsc Advances* 7, no. 40 (2017): 24698-24708.
- [82] Liu, Peijiang, Vincent Ming Hong Ng, Zhengjun Yao, Jintang Zhou, and Ling Bing Kong. "Ultrasmall Fe₃O₄ nanoparticles on MXenes with high microwave absorption performance." *Materials Letters* 229 (2018): 286-289.
- [83] Cai, Yanzhi, Nan Wang, Lai-fei Cheng, Xiaowei Yin, Hongfeng Yin,

Yuan Wang, Xuanxuan Ren, Xuan Li, and Xiaomeng Fan. "Electrical conductivity and electromagnetic shielding properties of Ti₃SiC₂/SiC functionally graded materials prepared by positioning impregnation." *Journal of the European Ceramic Society* 39, no. 13 (2019): 3643-3650.

[84] Han, Meikang, Xiaowei Yin, Xinliang Li, Babak Anasori, Litong Zhang, Laifei Cheng, and Yury Gogotsi. "Laminated and two-dimensional carbon-supported microwave absorbers derived from MXenes." *ACS applied materials & interfaces* 9, no. 23 (2017): 20038-20045.

[85] Wei, Huawei, Jidong Dong, Xiaojiao Fang, Wenhui Zheng, Yutong Sun, Yue Qian, Zaixing Jiang, and Yudong Huang. "Ti₃C₂T_x MXene/polyaniline (PANI) sandwich intercalation structure composites constructed for microwave absorption." *Composites Science and Technology* 169 (2019): 52-59.

[86] Li, Xinliang, Xiaowei Yin, Hailong Xu, Meikang Han, Minghang Li, Shuang Liang, Laifei Cheng, and Litong Zhang. "Ultralight MXene-coated, interconnected SiCnws three-dimensional lamellar foams for efficient microwave absorption in the X-band." *ACS applied materials & interfaces* 10, no. 40 (2018): 34524-34533.

[87] Li, Mian, Meikang Han, Jie Zhou, Qihuang Deng, Xiaobing Zhou, Jianmin Xue, Shiyu Du, Xiaowei Yin, and Qing Huang. "Novel scale-like structures of graphite/TiC/Ti₃C₂ hybrids for electromagnetic absorption." *Advanced Electronic Materials* 4, no. 5 (2018): 1700617.

[88] Wang, Yan, Xiang Gao, Lijuan Zhang, Xinming Wu, Qiguan Wang, Chunyan Luo, and Guanglei Wu. "Synthesis of Ti₃C₂/Fe₃O₄/PANI hierarchical architecture composite as an efficient wide-band electromagnetic absorber." *Applied Surface Science* 480 (2019): 830-838.

[89] Yang, Haibo, Jingjing Dai, Xiao Liu, Ying Lin, Jingjing Wang, Lei Wang, and Fen Wang. "Layered PVB/Ba₃Co₂Fe₂₄O₄₁/Ti₃C₂ MXene composite: enhanced electro-

magnetic wave absorption properties with high impedance match in a wide frequency range." *Materials Chemistry and Physics* 200 (2017): 179-186.

[90] Xin, Wei, Guo-Qiang Xi, Wen-Tao Cao, Chang Ma, Tong Liu, Ming-Guo Ma, and Jing Bian. "Lightweight and flexible MXene/CNF/silver composite membranes with a brick-like structure and high-performance electromagnetic-interference shielding." *RSC advances* 9, no. 51 (2019): 29636-29644.

[91] Han, Meikang, Xiaowei Yin, Heng Wu, Zexin Hou, Changqing Song, Xinliang Li, Litong Zhang, and Laifei Cheng. "Ti₃C₂ MXenes with modified surface for high-performance electromagnetic absorption and shielding in the X-band." *ACS applied materials & interfaces* 8, no. 32 (2016): 21011-21019.

[92] Jiang, Yue, Xi Xie, Yu Chen, Yujing Liu, Rui Yang, and Guoxin Sui. "Hierarchically structured cellulose aerogels with interconnected MXene networks and their enhanced microwave absorption properties." *Journal of Materials Chemistry C* 6, no. 32 (2018): 8679-8687.

[93] Feng, Wanlin, Heng Luo, Yu Wang, Sifan Zeng, Yongqiang Tan, Lianwen Deng, Xiaosong Zhou, Haibin Zhang, and Shuming Peng. "MXenes derived laminated and magnetic composites with excellent microwave absorbing performance." *Scientific reports* 9, no. 1 (2019): 3957.

[94] Liu, Peijiang, Zhengjun Yao, Vincent Ming Hong Ng, Jintang Zhou, and Ling Bing Kong. "Novel multilayer-like structure of Ti₃C₂T_x/CNZF composites for low-frequency electromagnetic absorption." *Materials Letters* 248 (2019): 214-217.

[95] Zhang, Xiang, Hehe Wang, Rui Hu, Chenyang Huang, Wengjin Zhong, Limei Pan, Yongbao Feng, Tai Qiu, Chuanfang John Zhang, and Jian Yang. "Novel solvothermal preparation and enhanced microwave absorption properties of Ti₃C₂T_x MXene modified by in situ coated Fe₃O₄ nanoparticles." *Applied Surface Science* 484

- (2019): 383-391.
- [96] Li, Ning, Xi Xie, Hongxia Lu, Bingbing Fan, Xiaohui Wang, Biao Zhao, Rui Zhang, and Rui Yang. "Novel two-dimensional Ti₃C₂Tx/Ni-spheres hybrids with enhanced microwave absorption properties." *Ceramics International* 45, no. 17 (2019): 22880-22888.
- [97] Hou, Tianqi, Bingbing Wang, Mingliang Ma, Ailing Feng, Zhengyong Huang, Yi Zhang, Zirui Jia, Guangxin Tan, Haijie Cao, and Guanglei Wu. "Preparation of two-dimensional titanium carbide (Ti₃C₂Tx) and NiCo₂O₄ composites to achieve excellent microwave absorption properties." *Composites Part B: Engineering* 180 (2020): 107577.
- [98] Li, Ran, Xiaoyuan Ma, Jianmin Li, Jun Cao, Hongze Gao, Tianshu Li, Xiaoyu Zhang et al. "Flexible and high-performance electrochromic devices enabled by self-assembled 2D TiO₂/MXene heterostructures." *Nature Communications* 12, no. 1 (2021): 1587.
- [99] Shahzad, Faisal, Mohamed Alhabeab, Christine B. Hatter, Babak Anasori, Soon Man Hong, Chong Min Koo, and Yury Gogotsi. "Electromagnetic interference shielding with 2D transition metal carbides (MXenes)." *Science* 353, no. 6304 (2016): 1137-1140.
- [100] Wu, Han, Yimei Xie, Yanan Ma, Binbin Zhang, Bin Xia, Pengxiang Zhang, Wei Qian et al. "Aqueous MXene/Xanthan Gum Hybrid Inks for Screen-Printing Electromagnetic Shielding, Joule Heater, and Piezoresistive Sensor." *Small* 18, no. 16 (2022): 2107087.
- [101] Huang, Xianwu, Jiahui Huang, Guishu Zhou, Yanwei Wei, Peiyi Wu, Angang Dong, and Dong Yang. "Gelation-Assisted Assembly of Large-Area, Highly Aligned, and Environmentally Stable MXene Films with an Excellent Trade-Off between Mechanical and Electrical Properties." *Small* 18, no. 21 (2022): 2200829.
- [102] Wang, Jie, Xiaoyan Ma, Jiale Zhou, Fanglin Du, and Chao Teng. "Bioinspired, high-strength, and flexible MXene/aramid fiber for electromagnetic interference shielding papers with Joule heating performance." *ACS nano* 16, no. 4 (2022): 6700-6711.
- [103] Song, Qiang, Fang Ye, Xiaowei Yin, Wei Li, Hejun Li, Yongsheng Liu, Kezhi Li et al. "Carbon nanotube-multilayered graphene edge plane core-shell hybrid foams for ultrahigh-performance electromagnetic-interference shielding." *Advanced Materials* 29, no. 31 (2017): 1701583.
- [104] Han, Meikang, Christopher Eugene Shuck, Roman Rakhmanov, David Parchment, Babak Anasori, Chong Min Koo, Gary Friedman, and Yury Gogotsi. "Beyond Ti₃C₂Tx: MXenes for electromagnetic interference shielding." *ACS nano* 14, no. 4 (2020): 5008-5016.
- [105] Wei, Yi, Peng Zhang, Razium A. Soomro, Qizhen Zhu, and Bin Xu. "Advances in the synthesis of 2D MXenes." *Advanced materials* 33, no. 39 (2021): 2103148.
- [106] Li, Tian, Dan-Dan Zhi, Zi-Hao Guo, Jin-Zhe Li, Yao Chen, and Fan-Bin Meng. "3D porous biomass-derived carbon materials: biomass sources, controllable transformation and microwave absorption application." *Green Chemistry* 24, no. 2 (2022): 647-674.
- [107] Shi, Yuyang, Zhen Xiang, Lei Cai, Fei Pan, Yanyan Dong, Xiaojie Zhu, Jie Cheng, Haojie Jiang, and Wei Lu. "Multi-interface assembled N-doped MXene/HCFG/AgNW films for wearable electromagnetic shielding devices with multimodal energy conversion and healthcare monitoring performances." *ACS nano* 16, no. 5 (2022): 7816-7833.
- [108] Sun, Renhui, Hao-Bin Zhang, Ji Liu, Xi Xie, Rui Yang, Yue Li, Song Hong, and Zhong-Zhen Yu. "Highly conductive transition metal carbide/carbonitride (MXene)@ polystyrene nanocomposites fabricated by electrostatic assembly for highly efficient electromagnetic interference shielding." *Advanced Functional Materials* 27, no. 45 (2017): 1702807.
- [109] Koo, Chong Min, Pradeep Sambyal, Aamir Iqbal, Faisal Shahzad, and Junpyo

- Hong. Two-Dimensional Materials for Electromagnetic Shielding. John Wiley & Sons, 2021.
- [110] Li, Ya, Xiaofang Liu, Xiaoyu Nie, Wenwen Yang, Yidong Wang, Ronghai Yu, and Jianglan Shui. "Multifunctional organic-inorganic hybrid aerogel for self-cleaning, heat-insulating, and highly efficient microwave absorbing material." *Advanced Functional Materials* 29, no. 10 (2019): 1807624.
- [111] Liang, Luyang, Qianming Li, Xu Yan, Yuezhao Feng, Yaming Wang, Hao-Bin Zhang, Xingping Zhou, Chuntai Liu, Changyu Shen, and Xiaolin Xie. "Multifunctional magnetic Ti₃C₂T_x MXene/graphene aerogel with superior electromagnetic wave absorption performance." *ACS nano* 15, no. 4 (2021): 6622-6632.
- [112] Han, Meikang, Xiaowei Yin, Heng Wu, Zexin Hou, Changqing Song, Xinliang Li, Litong Zhang, and Laifei Cheng. "Ti₃C₂ MXenes with modified surface for high-performance electromagnetic absorption and shielding in the X-band." *ACS applied materials & interfaces* 8, no. 32 (2016): 21011-21019.
- [113] Li, Ruosong, Qiang Gao, Hongna Xing, Yangzhe Su, Hongming Zhang, Dan Zeng, Bingbing Fan, and Biao Zhao. "Lightweight, multifunctional MXene/polymer composites with enhanced electromagnetic wave absorption and high-performance thermal conductivity." *Carbon* 183 (2021): 301-312.
- [114] Sun, Fengqiang, Mingwei Tian, Xu-antong Sun, Tailin Xu, Xuqing Liu, Shifeng Zhu, Xueji Zhang, and Lijun Qu. "Stretchable conductive fibers of ultrahigh tensile strain and stable conductance enabled by a worm-shaped graphene microlayer." *Nano letters* 19, no. 9 (2019): 6592-6599.
- [115] Li, Lei, Mengke Shi, Xiaoya Liu, Xiuxiu Jin, Yanxia Cao, Yanyu Yang, Wanjie Wang, and Jianfeng Wang. "Ultrathin titanium carbide (MXene) films for high-temperature thermal camouflage." *Advanced Functional Materials* 31, no. 35 (2021): 2101381.
- [116] Zhang, Zhiwei, Zhihao Cai, Yi Zhang, Yaling Peng, Ziyuan Wang, Lun Xia, Suping Ma et al. "The recent progress of MXene-Based microwave absorption materials." *Carbon* 174 (2021): 484-499.
- [117] Guo, Xiangdong, Ning Li, Chenchen Wu, Xiaokang Dai, Ruishi Qi, Tianyu Qiao, Tuoyi Su et al. "Studying Plasmon Dispersion of MXene for Enhanced Electromagnetic Absorption (*Adv. Mater.* 33/2022)." *Advanced Materials* 34, no. 33 (2022): 2270237.
- [118] Liang, Leilei, Weihua Gu, Yue Wu, Baoshan Zhang, Gehuan Wang, Yi Yang, and Guangbin Ji. "Heterointerface engineering in electromagnetic absorbers: new insights and opportunities." *Advanced Materials* 34, no. 4 (2022): 2106195.
- [119] Ren, Huaying, Liming Zheng, Guorui Wang, Xin Gao, Zhenjun Tan, Jingyuan Shan, Lingzhi Cui et al. "Transfer-medium-free nanofiber-reinforced graphene film and applications in wearable transparent pressure sensors." *Acs Nano* 13, no. 5 (2019): 5541-5548.
- [120] Qin, Zhen, Yingying Yin, Wenzheng Zhang, Congju Li, and Kai Pan. "Wearable and stretchable triboelectric nanogenerator based on crumpled nanofibrous membranes." *ACS applied materials & interfaces* 11, no. 13 (2019): 12452-12459.
- [121] Nie, Baoqing, Ruya Li, Jennifer Cao, James D. Brandt, and Tingrui Pan. "Flexible transparent iontronic film for interfacial capacitive pressure sensing." *Advanced Materials* 27, no. 39 (2015): 6055-6062.
- [122] Malakooti, Mohammad H., Navid Kazem, Jiajun Yan, Chengfeng Pan, Eric J. Markvicka, Krzysztof Matyjaszewski, and Carmel Majidi. "Liquid metal supercooling for low-temperature thermoelectric wearables." *Advanced functional materials* 29, no. 45 (2019): 1906098.
- [123] Yun, Taeyeong, Hyerim Kim, Aamir Iqbal, Yong Soo Cho, Gang San Lee, Myung-Ki Kim, Seon Joon Kim et al. "Electromagnetic shielding of monolayer MXene assemblies." *Advanced Materials* 32, no. 9 (2020):

1906769.

[124] Sun, Kang, Fan Wang, Wenke Yang, Hu Liu, Caofeng Pan, Zhanhu Guo, Chuntai Liu, and Changyu Shen. "Flexible conductive polyimide fiber/MXene composite film for electromagnetic interference shielding and joule heating with excellent harsh environment tolerance." *ACS applied materials & interfaces* 13, no. 42 (2021): 50368-50380.

[125] Zhou, Bing, Mengjie Su, Daozheng Yang, Gaojie Han, Yuezhan Feng, Bo Wang, Jialu Ma, Jianmin Ma, Chuntai Liu, and Changyu Shen. "Flexible MXene/silver nanowire-based transparent conductive film with electromagnetic interference shielding and electro-photo-thermal performance." *ACS applied materials & interfaces* 12, no. 36 (2020): 40859-40869.

[126] Anasori, M. R. "Lukatskaya, and Y. Gogotsi." *Nat. Rev. Mater* 2, no. 2 (2017): 16098.

[127] Naguib, Michael, Murat Kurtoglu, Volker Presser, Jun Lu, Junjie Niu, Min Heon, Lars Hultman, Yury Gogotsi, and Michel W. Barsoum. "Two-dimensional nanocrystals produced by exfoliation of Ti_3AlC_2 ." *Advanced materials* 23, no. 37 (2011): 4248-4253.

[128] Gupta, Shivam, and Nyan-Hwa Tai. "Carbon materials and their composites for electromagnetic interference shielding effectiveness in X-band." *Carbon* 152 (2019): 159-187.

[129] Song, Weina, Chunying He, Wang Zhang, Yachen Gao, Yixiao Yang, Yiqun Wu, Zhimin Chen, Xiaochen Li, and Yongli Dong. "Synthesis and nonlinear optical properties of reduced graphene oxide hybrid material covalently functionalized with zinc phthalocyanine." *Carbon* 77 (2014): 1020-1030.

[130] Gai, Lixue, Yumeng Zhao, Guilin Song, Qingda An, Zuoyi Xiao, Shangru Zhai, and Zhongcheng Li. "Construction of core-shell PPy@MoS₂ with nanotube-like heterostructures for electromagnetic wave absorption: Assembly and enhanced mecha-

nism." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 136 (2020): 105965.

[131] Dikin, Dmitriy A., Sasha Stankovich, Eric J. Zimney, Richard D. Piner, Geoffrey HB Dommett, Guennadi Evmenenko, SonBinh T. Nguyen, and Rodney S. Ruoff. "Preparation and characterization of graphene oxide paper." *Nature* 448, no. 7152 (2007): 457-460.

[132] Li, Mian, Meikang Han, Jie Zhou, Qihuang Deng, Xiaobing Zhou, Jianmin Xue, Shiyu Du, Xiaowei Yin, and Qing Huang. "Novel scale-like structures of graphite/TiC/Ti₃C₂ hybrids for electromagnetic absorption." *Advanced Electronic Materials* 4, no. 5 (2018): 1700617.

[133] Zhang, Xiao, Jia Xu, Xiaoye Liu, Shen Zhang, Haoran Yuan, Chunling Zhu, Xitian Zhang, and Yujin Chen. "Metal organic framework-derived three-dimensional graphene-supported nitrogen-doped carbon nanotube spheres for electromagnetic wave absorption with ultralow filler mass loading." *Carbon* 155 (2019): 233-242.

[134] Zhang, Xinci, Jia Xu, Haoran Yuan, Shen Zhang, Qiuyun Ouyang, Chunling Zhu, Xitian Zhang, and Yujin Chen. "Large-scale synthesis of three-dimensional reduced graphene oxide/nitrogen-doped carbon nanotube heteronanostructures as highly efficient electromagnetic wave absorbing materials." *ACS applied materials & interfaces* 11, no. 42 (2019): 39100-39108.

[135] Zhang, Xu, Xiaoqun Wang, Fanbo Meng, Jiajun Chen, and Shanyi Du. "Broadband and strong electromagnetic wave absorption of epoxy composites filled with ultralow content of non-covalently modified reduced graphene oxides." *Carbon* 154 (2019): 115-124.

[136] Huang, Yixing, Xujin Yuan, Mingji Chen, Wei-Li Song, Jin Chen, Qunfu Fan, Liqun Tang, and Daining Fang. "Ultrathin multifunctional carbon/glass fiber reinforced lossy lattice metastructure for integrated design of broadband microwave absorption and effective load bearing." *Carbon* 144 (2019): 449-456.

- [137] Mo, Ran, Xiaowei Yin, Fang Ye, Xiaofei Liu, Xiaokang Ma, Quan Li, Litong Zhang, and Laifei Cheng. "Electromagnetic wave absorption and mechanical properties of silicon carbide fibers reinforced silicon nitride matrix composites." *Journal of the European Ceramic Society* 39, no. 4 (2019): 743-754.
- [138] Xin, Wei, Guo-Qiang Xi, Wen-Tao Cao, Chang Ma, Tong Liu, Ming-Guo Ma, and Jing Bian. "Lightweight and flexible MXene/CNF/silver composite membranes with a brick-like structure and high-performance electromagnetic-interference shielding." *RSC advances* 9, no. 51 (2019): 29636-29644.
- [139] Sambyal, Pradeep, Aamir Iqbal, Junpyo Hong, Hyerim Kim, Myung-Ki Kim, Soon Man Hong, Meikang Han, Yury Gogotsi, and Chong Min Koo. "Ultralight and mechanically robust Ti₃C₂T_x hybrid aerogel reinforced by carbon nanotubes for electromagnetic interference shielding." *ACS Applied Materials & Interfaces* 11, no. 41 (2019): 38046-38054.
- [140] Li, Mian, Xiaowei Yin, Guopeng Zheng, Meng Chen, Mingjie Tao, Laifei Cheng, and Litong Zhang. "High-temperature dielectric and microwave absorption properties of Si₃N₄-SiC/SiO₂ composite ceramics." *Journal of Materials Science* 50 (2015): 1478-1487.
- [141] Saboor, Abdul, Saad Mahmood Khalid, Rahim Jan, Ahmad Nawaz Khan, Tanveer Zia, Muhammad Umer Farooq, Shaista Afridi, Muhammad Sadiq, and Muhammad Arif. "PS/PANI/MoS₂ hybrid polymer composites with high dielectric behavior and electrical conductivity for EMI shielding effectiveness." *Materials* 12, no. 17 (2019): 2690.
- [142] Liu, Jiaolong, Hongsheng Liang, and Hongjing Wu. "Hierarchical flower-like Fe₃O₄/MoS₂ composites for selective broadband electromagnetic wave absorption performance." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 130 (2020): 105760.
- [143] Liu, Yousong, Bin Quan, Xiaohui Liang, Bing Huang, Shiliang Huang, Xiaodong Li, Guangbin Ji, Zhong Jin, and Guangcheng Yang. "Energetic metal-organic frameworks deflagration enabled ultrafast low-temperature synthesis of ultra-light magnetic nanoparticles decorated high-lossy materials." *Carbon* 165 (2020): 286-295.
- [144] Alam, Reza Shams, Mahmood Moradi, Hossein Nikmanesh, Joao Ventura, and Mohammad Rostami. "Magnetic and microwave absorption properties of BaMg_x/2Mn_x/2Co_xTi₂Fe_{12-4x}O₁₉ hexaferrite nanoparticles." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 402 (2016): 20-27.
- [145] Yang, Haibo, Jingjing Dai, Lei Wang, Ying Lin, Fen Wang, and Pan Kang. "A novel approach to prepare Bi₂Fe₄O₉ flower-like spheres with enhanced photocatalytic performance." *Scientific Reports* 7, no. 1 (2017): 768.
- [146] Lan, Di, Ming Qin, Ruisheng Yang, Shuang Chen, Hongjing Wu, Yuancheng Fan, Quanhong Fu, and Fuli Zhang. "Facile synthesis of hierarchical chrysanthemum-like copper cobaltate-copper oxide composites for enhanced microwave absorption performance." *Journal of colloid and interface science* 533 (2019): 481-491.
- [147] Ma, Mingliang, Wenting Li, Zhouyu Tong, Weibo Huang, Rongzhen Wang, Ping Lyu, Yong Ma et al. "Facile synthesis of the one-dimensional flower-like yolk-shell Fe₃O₄@SiO₂@NiO nanochains composites for high-performance microwave absorption." *Journal of Alloys and Compounds* 843 (2020): 155199.
- [148] Wang, Rui, Xiaosi Qi, Ren Xie, Xiu Gong, Chaoyong Deng, and Wei Zhong. "Constructing heterostructural Fe@Fe₃C@carbon nanotubes/reduced graphene oxide nanocomposites as lightweight and high-efficiency microwave absorbers." *Journal of Materials Chemistry C* 8, no. 41 (2020): 14515-14522.
- [149] Wang, Zhenhua, Rongli Gao, Gang Chen, Xiaoling Deng, Wei Cai, and Chunlin Fu. "Dielectric, ferroelectric and magne-

- toelectric properties of in-situ synthesized CoFe₂O₄/BaTiO₃ composite ceramics." *Ceramics International* 46, no. 7 (2020): 9154-9160.
- [150] Wang, Lei, Xuefeng Yu, Mengqiu Huang, Wenbin You, Qingwen Zeng, Jie Zhang, Xianhu Liu, Min Wang, and Renchao Che. "Orientation growth modulated magnetic-carbon microspheres toward broadband electromagnetic wave absorption." *Carbon* 172 (2021): 516-528.
- [151] Jia, Hanxiao, Honglong Xing, Xiaoli Ji, and Shengtao Gao. "Self-template and in-situ polymerization strategy to lightweight hollow MnO₂@polyaniline core-shell heterojunction with excellent microwave absorption properties." *Applied Surface Science* 537 (2021): 147857.
- [152] Luo, Hui, Rongzhou Gong, Xian Wang, Kai Song, Changming Zhu, and Liguang Wang. "Synthesis and excellent microwave absorption properties of reduced graphene oxide/FeNi₃/Fe₃O₄ composite." *New Journal of Chemistry* 40, no. 7 (2016): 6238-6243.
- [153] Afshar, SR Saedi, M. Hasheminasari, and S. M. Masoudpanah. "Structural, magnetic and microwave absorption properties of SrFe₁₂O₁₉/Ni_{0.6}Zn_{0.4}Fe₂O₄ composites prepared by one-pot solution combustion method." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 466 (2018): 1-6.
- [154] Gupta, Ankur, Tamilselvan Sakthivel, and Sudipta Seal. "Recent development in 2D materials beyond graphene." *Progress in Materials Science* 73 (2015): 44-126.
- [155] Cao, Maosheng, Chen Han, Xixi Wang, Min Zhang, Yanlan Zhang, Jincheng Shu, Huijing Yang, Xiaoyong Fang, and Jie Yuan. "Graphene nanohybrids: excellent electromagnetic properties for the absorbing and shielding of electromagnetic waves." *Journal of Materials Chemistry C* 6, no. 17 (2018): 4586-4602.
- [156] Yang, Jinbo, Wenyun Yang, Fashen Li, and Yingchang Yang. "Research and development of high-performance new microwave absorbers based on rare earth transition metal compounds: a review." *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 497 (2020): 165961.
- [157] Cao, Mao-Sheng, Xi-Xi Wang, Wen-Qiang Cao, and Jie Yuan. "Ultrathin graphene: electrical properties and highly efficient electromagnetic interference shielding." *Journal of Materials Chemistry C* 3, no. 26 (2015): 6589-6599.
- [158] Meng, Fanbin, Huagao Wang, Fei Huang, Yifan Guo, Zeyong Wang, David Hui, and Zuowan Zhou. "Graphene-based microwave absorbing composites: A review and prospective." *Composites Part B: Engineering* 137 (2018): 260-277.
- [159] Cao, Mao-sheng, Yong-Zhu Cai, Peng He, Jin-Cheng Shu, Wen-Qiang Cao, and Jie Yuan. "2D MXenes: electromagnetic property for microwave absorption and electromagnetic interference shielding." *Chemical Engineering Journal* 359 (2019): 1265-1302.
- [160] Liu, Ji, Hao-Bin Zhang, Renhui Sun, Yafeng Liu, Zhangshuo Liu, Aiguo Zhou, and Zhong-Zhen Yu. "Hydrophobic, flexible, and lightweight MXene foams for high-performance electromagnetic-interference shielding." *Advanced Materials* 29, no. 38 (2017): 1702367.
- [161] Liu, Ji, Hao-Bin Zhang, Renhui Sun, Yafeng Liu, Zhangshuo Liu, Aiguo Zhou, and Zhong-Zhen Yu. "Hydrophobic, flexible, and lightweight MXene foams for high-performance electromagnetic-interference shielding." *Advanced Materials* 29, no. 38 (2017): 1702367.
- [162] Wang, Hongyu, and Hongbin Ma. "The electromagnetic and microwave absorbing properties of MoS₂ modified Ti₃C₂T_x nanocomposites." *Journal of Materials Science: Materials in Electronics* 30 (2019): 15250-15256.
- [163] Hu, Mingjun, Naibo Zhang, Guangcun Shan, Jiefeng Gao, Jinzhang Liu, and Robert KY Li. "Two-dimensional materials: Emerging toolkit for construction of ultrathin high-efficiency microwave shield and absorber." *Frontiers of Physics* 13 (2018):

- 1-39.
- [164] Feng, Wanlin, Heng Luo, Sifan Zeng, Chen Chen, Lianwen Deng, Yongqiang Tan, Xiaosong Zhou, Shuming Peng, and Haibin Zhang. "Ni-modified Ti₃C₂ MXene with enhanced microwave absorbing ability." *Materials Chemistry Frontiers* 2, no. 12 (2018): 2320-2326.
- [165] Liu, Peijiang, Zhengjun Yao, Vincent Ming Hong Ng, Jintang Zhou, Ling Bing Kong, and Kan Yue. "Facile synthesis of ultrasmall Fe₃O₄ nanoparticles on MXenes for high microwave absorption performance." *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 115 (2018): 371-382.
- [166] Qing, Yuchang, Wancheng Zhou, Fa Luo, and Dongmei Zhu. "Titanium carbide (MXene) nanosheets as promising microwave absorbers." *Ceramics International* 42, no. 14 (2016): 16412-16416.
- [167] Song, Qiang, Fang Ye, Luo Kong, Qingliang Shen, Liyuan Han, Lei Feng, Gaojie Yu, Yuanan Pan, and Hejun Li. "Graphene and MXene nanomaterials: toward high-performance electromagnetic wave absorption in gigahertz band range." *Advanced Functional Materials* 30, no. 31 (2020): 2000475.
- [168] Xiang, Zhen, Yuyang Shi, Xiaojie Zhu, Lei Cai, and Wei Lu. "Flexible and waterproof 2D/1D/0D construction of MXene-based nanocomposites for electromagnetic wave absorption, EMI shielding, and photothermal conversion." *Nano-Micro Letters* 13, no. 1 (2021): 150.
- [169] Cao, Mao-Sheng, Jin-Cheng Shu, Bo Wen, Xi-Xi Wang, and Wen-Qiang Cao. "Genetic dielectric genes inside 2D carbon-based materials with tunable electromagnetic function at elevated temperature." *Small Structures* 2, no. 11 (2021): 2100104.
- [170] Liu, Ji, Hao-Bin Zhang, Xi Xie, Rui Yang, Zhangshuo Liu, Yafeng Liu, and Zhong-Zhen Yu. "Multifunctional, superelastic, and lightweight MXene/polyimide aerogels." *Small* 14, no. 45 (2018): 1802479.
- [171] Wang, Huagao, Hesong Ren, Changfei Jing, Jinzhe Li, Qiang Zhou, and Fanbin Meng. "Two birds with one stone: Graphene oxide@sulfonated polyaniline nanocomposites towards high-performance electromagnetic wave absorption and corrosion protection." *Composites Science and Technology* 204 (2021): 108630.
- [172] Guan, Xiaomeng, Zhihong Yang, Ming Zhou, Le Yang, Reza Peymanfar, Bagher Aslibeiki, and Guangbin Ji. "2D MXene nanomaterials: Synthesis, mechanism, and multifunctional applications in microwave absorption." *Small Structures* 3, no. 10 (2022): 2200102.