لیزر در پزشکی؛ ۱۴۰۳، دورهٔ ۲۱، شماره ۳، صفحات: ۴۳-۲۸ .

مقاله مروری

مروری بر خواص الکترونیکی و نوری مکسین کاربید تیتانیوم و کاربردهای نوین آن در زیست‌پزشکی

مریم قدرتی

گروه الکترونیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

خلاصه

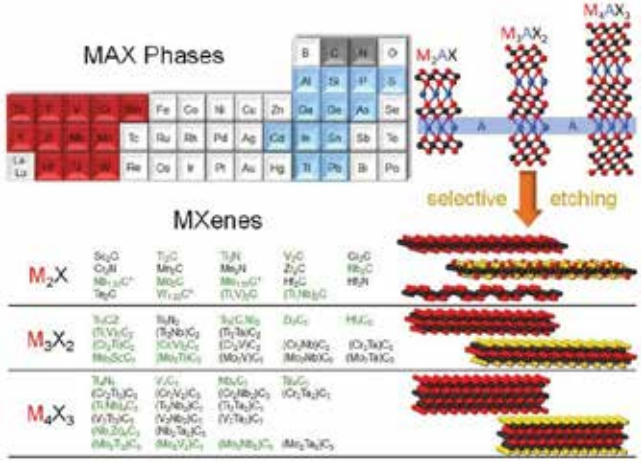
ظهور مواد دوبُعدی منجر به کاربردهای بالقوه آن‌ها برای نانوپزشکی و مواد زیستی شده است، به این امید که آن‌ها بتوانند بر برخی محدودیت‌های ذاتی مواد ترانوستیک مرسوم غلبه کنند. در سال‌های اخیر، مکسین‌ها با ساختار لایه‌ای و ویژگی‌های خاص خود، به عنوان جایگزینی جذاب برای مواد ترانوستیک مطرح شده‌اند. این مواد دارای ضخامت بسیار کم و سطح بالایی هستند که می‌توانند به طور مؤثری با بافت‌های بیولوژیکی تعامل داشته باشند. علاوه بر این دارای خواص نوری و الکترونی عالی هستند که قادرند در تصویربرداری و درمان‌های هدفمند به کار روند. مکسین‌ها و کامپوزیت‌های مبتنی بر آن به عنوان کنتراست‌دهنده‌های مؤثر در تصویربرداری پزشکی موثر عمل می‌کنند. این مواد دارای پایداری بالا و ایمنی مناسب برای استفاده در محیط‌های بیولوژیکی هستند. در این مقاله مروری، خواص الکترونیکی و نوری مکسین کاربید تیتانیوم و همچنین روش‌های سنتز و تولید آن بررسی شده است. علاوه بر این به برخی از کاربردهای نوین آن در زیست‌پزشکی شامل قابلیت حسگر زیستی، تصویربرداری زیستی، تشخیص سرطان، رسانش دارو و ... پرداخته شده است. با توجه به ویژگی‌های ممتاز مکسین‌ها، انتظار می‌رود که در آینده نزدیک، کاربردهای بیشتری در پزشکی و زیست‌پزشکی پیدا کنند. این روند می‌تواند به بهبود دقت تشخیص و کارایی درمان‌ها کمک کند و به توسعه روش‌های نوین در پزشکی منجر شود.

واژگان کلیدی: مواد دوبعدی، مکسین کاربید تیتانیوم، پایانه‌های سطحی، زیست‌پزشکی

نویسنده مسئول: مریم قدرتی
پست الکترونیک: ghodrati.ma@fe.lu.ac.ir

مقدمه

بُعد مواد، یکی از عوامل اصلی در تعیین ویژگی‌های مواد محسوب می‌شود. مواد دو بُعدی، گروهی از موادند که یک بُعد ماده در آن‌ها در مقیاس نانومتر (کمتر از ۱۰۰ نانومتر) است. مواد دو بُعدی مانند گرافن[۱]، در مقایسه با مواد صفربُعدی مانند فولرن[۲]، مواد یک‌بُعدی مانند نانولوله‌های کربنی[۳] و مواد سه بُعدی مانند الماس یا گرافیت، خصوصیات متمایزی دارند[۳-۱]. گرافن، به‌عنوان اولین ماده دو بُعدی با شکاف نوار انرژی صفر و ماهیت نیمه‌فلزی است که الکترون‌ها در آن تحرک و رسانایی بالایی نشان داده‌اند. خواص منحصربه‌فرد گرافن منجر به کاربردهای گسترده آن در حوزه‌های مختلف و نیز زمینه‌ساز دستیابی به دیگر مواد دو بُعدی شده است. از جمله مواد دو بُعدی شناخته شده علاوه‌بر گرافن می‌توان به نیترید بور هگزاگونال[۴]، دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه[۵]، فسفر سیاه[۶]، هیدروکسیدهای دوگانه لایه‌ای[۷]، اکسیدهای فلزات واسطه لایه‌ای[۸]، هالیدهای پروسکایتی لایه‌ای[۹]، کاربید و نیترید فلزات واسطه[۱۰] اشاره نمود. بسته به ترکیب‌های شیمیایی و پیکربندی ساختاری آن‌ها، مواد دو بُعدی را می‌توان به‌عنوان فلز، نیمه‌فلز، عایق یا ابررسانا طبقه‌بندی نمود [۷-۴]. این مواد با داشتن خواص فوق‌العاده گزینه مؤثری برای فناوری‌های متنوعی همچون حسگرها، دیودهای نوری، ترانزیستورها، لیزرها، سلول‌های خورشیدی و ... هستند. اخیراً دسته‌ای از مواد لایه‌ای با ساختار شش‌ضلعی تشکیل‌شده از کاربید و نیترید که به مکس‌فازها[۱۱] معروف هستند، به‌عنوان یک ماده‌ی نوین موردتوجه قرار گرفته‌اند. این مواد ترکیب‌های سه‌تایی با رابطه عمومی $M_{n+1}AX_n$ هستند که در رابطه عمومی ذکر شده، حرف M نشان‌دهنده یک فلز واسطه (تیتانیوم[۱۲]، تانتالیوم[۱۳]، مولیبدن[۱۴]، نایوبیوم[۱۵]، زیرکونیوم[۱۶]، وانادیوم[۱۷] و...)، حرف A نشان‌دهنده عناصر گروه‌های دوازده تا شانزده جدول تناوبی (آلومینیوم[۱۸]، ژرمانیم[۱۹]، سیلیسیم[۲۰]، فسفر[۲۱] و ...) و حرف X نیز معرف عنصر کربن[۲۲] و یا نیتروژن[۲۳] است [۱۲-۸]. مقدار نمایه n از ۱ تا ۳ متغیر است، که بسته به مقدار آن، مکس‌فازها به سه گروه مجموعه ۲۱۱ با رابطه عمومی M_2AX، مجموعه ۳۱۲ با رابطه عمومی M_3AX_2 و مجموعه ۴۱۳ با رابطه عمومی M_4AX_3 تقسیم‌بندی می‌شوند (شکل ۱). این مواد دارای ساختار بلوری شش وجهی لایه‌ای هستند و تفاوت اصلی ساختاری در فازهای اصلی این ترکیب‌ها، در شمار تعداد لایه‌های M است که در بین دو لایه A قرار گرفته است. مکس‌فازها از ویژگی‌های منحصر به فردی مانند خواص فلزی، سرامیکی، فیزیکی، الکتریکی و مکانیکی برخوردار هستند [۱۶-۱۳]. پیوندهای مکس‌فازها از نوع پیوند فلزی، کووالانسی و یونی هستند، پیوند بین M-X پیوندی قوی و از نوع کووالانسی، یونی و یا فلزی است و پیوند بین M-A ضعیف است، بنابراین امکان حذف گروه A برای رسیدن به مکسین[۲۴] وجود دارد. مکسین‌ها از زدایش[۲۵] لایه A در مکس‌فازها در یک محیط اسیدی آبی مانند اسیدهیدروفلوئوریک[۲۶] تولید می‌شوند. مکسین تولید شده به دلیل زدایش در محیط آبی به پایانه‌های سطحی[۲۷] مانند اکسیژن (O)، هیدروکسیل (OH) و فلورین (F) منتهی می‌شود[۲۱-۱۷]. بر این اساس مکسین‌ها با رابطه عمومی $M_{n+1}X_nT_x$ معرفی می‌شوند که در آن حرف M نشان‌دهنده فلزات واسطه، X کربن و یا نیتروژن، نمایه n عددی متغیر بین ۱ تا ۳ و TX نیز معرف پایانه‌های سطحی همچون هیدروکسیل، اکسیژن و فلورین است. بنابراین بسته به مقدار نمایه n مکسین‌ها به سه گروه کلی



شکل ۱. طرح‌واره ساختاری مکس‌فازها با رابطه عمومی $M_{n+1}AX_n$ و مکسین‌ها با رابطه عمومی $Mn+1X_nT_x$

1. Graphene
2. Fullerene
3. Carbon nanotube
4. Hexagonal Boron nitride (h-BN)
5. Transition Metal Dichalcogenides (TMDCs)
6. Black phosphorus (BP)
7. layered double hydroxide (LDHs)
8. layered Transition Metal Oxide (LTMOs)
9. layered halide perovskites
10. Carbide and Nitride Transition Metal (MXenes)
11. Max Phases
12. Titanium
13. Tantalum
14. Molybdenum
15. Niobium
16. Zirconium
17. Vanadium
18. Aluminum
19. Germanium
20. Silicon
21. Phosphorus
22. Carbon
23. Nitrogen
24. MXene
25. Etch
26. Hydrofluoric acid (HF)
27. Surface functional

به‌ترتیب با رابطه‌های عمومی M_2X، M_3X_2 و M_4X_3 تقسیم‌بندی می‌شوند (شکل ۱). این مواد یکی از بزرگ‌ترین خانواده‌ی مواد دوبُعدی را تشکیل می‌دهند که شامل کاربیدها، کربونیتریدها و نیتریدهای فلزات واسطه هستند [۲۷-۲۲].

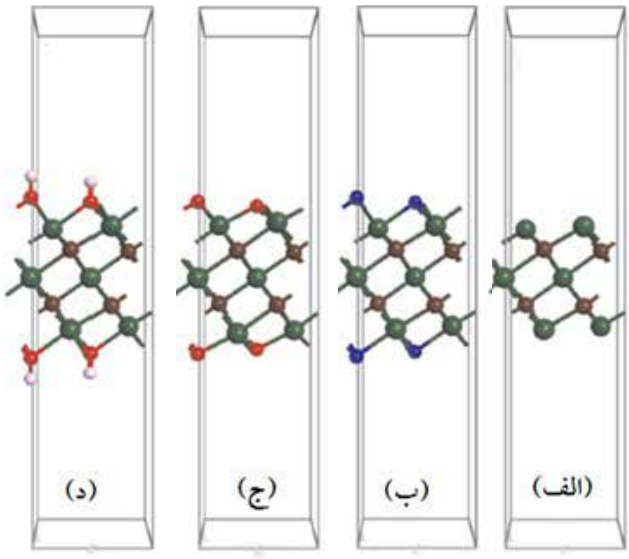
مکسین‌ها برای نخستین‌بار، طی همکاری‌های تحقیقاتی بارسوم و همکارانش[۲۸] در دانشگاه درکسل[۲۹] در سال ۲۰۱۱ میلادی کشف و توسعه یافتند. محققان دانشگاه درکسل، در مقاله‌ای که در سال ۲۰۱۱ در مجله Advanced Materials با عنوان «نانوکریستال‌های دو بُعدی سنتز شده توسط لایه‌لایه‌کردن Ti_3AlC_2» چاپ کردند، برای نخستین بار، توانایی تبدیل تیتانیوم آلومینیوم کاربید سه‌بُعدی را به یک ساختار دوبُعدی با خواص بسیار متفاوت نشان دادند [۳۰-۲۸، ۱]. مکسین‌ها دارای خواص استثنایی همچون ساختار دوبُعدی و لایه‌ای، رسانایی حرارتی و الکترونیکی بالا، آب‌دوستی، چکش‌خواری و انعطاف‌پذیری هستند. از این‌رو، درزمینه‌های مختلفی مانند انرژی، کاتالیست، تولید لیزر، حسگری زیستی و زیست‌پزشکی کاربردهای متنوعی دارند [۳۱، ۳۰]. در این مقاله، مروری بر خواص الکترونیکی و نوری مکسین کاربید تیتانیوم (Ti_3C_2MXene) ارائه شده است. علاوه بر این، کاربردهای نوین آن در زیست‌پزشکی مانند فعالیت آنتی‌باکتریایی، تشخیص سرطان، قابلیت تصویربرداری توموگرافی کامپیوتری[۳۰]، رسانش دارو[۳۱]، تصویربرداری رزونانس مغناطیسی[۳۲] و قابلیت حسگر زیستی بررسی می‌شود. در پایان طرح کلی از چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده مکسین برای کاربردهای زیست‌پزشکی مطرح می‌شود.

خواص و روش‌های تولید مکسین

مکسین کاربید تیتانیوم ماده دوبُعدی با ساختار لایه‌ای است که در آن هر لایه حاوی دو صفحه اتم کربن است که بین سه صفحه اتم تیتانیوم قرار گرفته‌اند. پیوستن پایانه‌های سطحی مانند فلورین، هیدروکسیل و اکسیژن در طی فرآیند زدایش مکس‌فاز در محلول آبی- اسیدی مکسین‌های $Ti_3C_2F_2$، $Ti_3C_2(OH)_2$ و $Ti_3C_2O_2$ را تولید می‌کند. ساختارهای بلوری Ti_3C_2، $Ti_3C_2F_2$، $Ti_3C_2O_2$ و $Ti_3C_2(OH)_2$ در شکل ۲ نشان داده شده است.

مکسین‌ها دارای ویژگی‌هایی همچون ساختار لایه‌ای، رسانایی حرارتی و الکترونیکی بالا، آب‌دوستی، چکش‌خواری و انعطاف‌پذیری و تنظیم‌پذیری خواص الکترونیکی و نوری هستند. در جدول ۱ برخی از خصوصیات مکسین کاربید تیتانیوم آورده شده است [۱].

28. Barsoum et al
29. Drexel
30. Computed Tomography (CT) scan
31. Drug delivery
32. Magnetic Resonance Imaging (MRI)



شکل ۲- ساختار بلوری $Ti_3C_2T_x$ MXene (الف) Ti_3C_2، (ب) $Ti_3C_2F_2$، (ج) $Ti_3C_2O_2$ و (د) $Ti_3C_2(OH)_2$ [۲]

مکسین‌ها دارای ویژگی‌هایی همچون ساختار لایه‌ای، رسانایی حرارتی و الکترونیکی بالا، آب‌دوستی، چکش‌خواری و انعطاف‌پذیری و تنظیم‌پذیری خواص الکترونیکی و نوری هستند. در جدول ۱ برخی از خصوصیات مکسین کاربید تیتانیوم آورده شده است. [1]

جدول ۱- خصوصیات ویژه‌ی $Ti_3C_2T_x$ MXene.

ویژگی	مقدار
هدایت حرارتی بالا	۲۴۰۰۰۰ S/m
رسانایی الکترونیکی بالا	~10^4 S/cm
مدول یانگ بالا	۳۳۰ ± ۳۰ GPa
تحرک الکترونیکی بالا	۰/۷ ± ۰/۲ cm^2 / Vs
چگالی حامل‌های آزاد	۸ ± ۳ × 10^{21} cm^{-3}
شکاف نوار انرژی	۰/۲۵ -۲ eV
تابع کار	۱/۶ - ۸ eV
جذب بالای نوری	-
سطح آب‌دوست	-

روش لایه‌لایه کردن شیمیایی یکی از رویکردهای اصلی ساخت مکسین‌ها محسوب می‌شود. مکسین کاربید تیتانیوم، از پیش‌ماده تیتانیوم آلومینیوم کاربید (Ti_3AlC_2)، در محلول آبی اسید هیدروفلوئوریک از طریق بهینه‌سازی دما، غلظت اسید و زمان زدایش تولید می‌شود. [۱۷،۱] تولید مکسین کاربید تیتانیوم با زدایش کردن انتخابی[۳۳] لایه‌های آلومینیومی، از تیتانیوم آلومینیوم کاربید در دمای اتاق انجام می‌شود.

33. Selective etching

در این فرآیند پودر تیتانیوم آلومینیوم کاربید در اسید هیدروفلوئوریک رقیق شده با آب، برای مدت زمان مشخصی به هم می‌خورد تا به غلظت مشخصی برسد، به دنبال آن فیلتراسیون[۳۴] مخلوط انجام می‌گردد تا جامد از سایر مواد شناور در آب جدا شود. سپس با شست‌وشوی مداوم جامد با آب دیونیزه شده، PH تعلیقه[۳۵] به مقادیر بین ۴ تا ۶ می‌رسد (شکل ۳).

در طی این فرآیند چندین واکنش اساسی رخ می‌دهد که می‌توان آن‌ها را به‌صورت زیر نوشت [۱۷]:

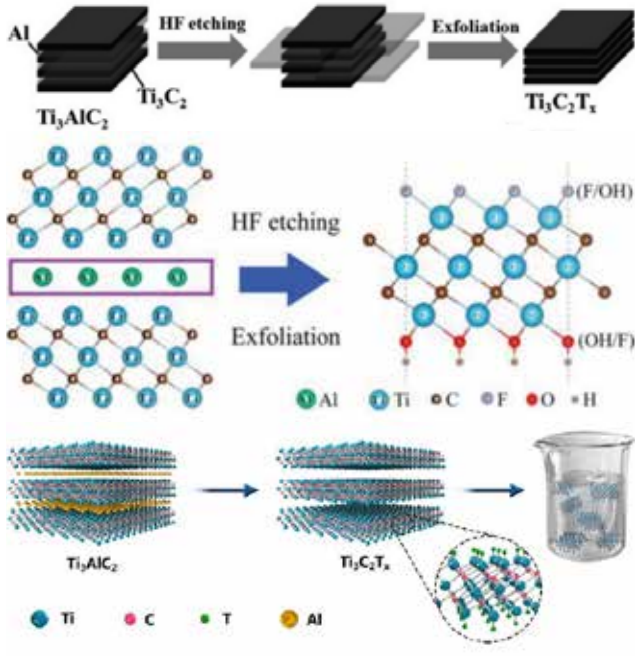
$$Ti_3AlC_2 + 3HF = AlF_3 + \frac{3}{2}H_2 + Ti_3C_2 \quad (۱)$$

$$Ti_3C_2 + 2HF = Ti_3C_2F_2 + Ti_3C_2 \quad (۲)$$

$$Ti_3C_2 + 2H_2O = Ti_3C_2(OH)_2 + H_2 \quad (۳)$$

$$Ti_3C_2 + O_2 = Ti_3C_2O_2 \quad (۴)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود واکنش اولیه یعنی رابطه (۱)، فرآیند جداسازی Ti_3AlC_2 را با تشکیل AlF_3، Ti_3C_2 و H_2 توصیف می‌کند و سپس فرآیندهایی که در معادلات (۲)، (۳) و (۴) رخ می‌دهند مسئول تشکیل پایانه‌های سطحی مختلف اکسیژن، هیدروکسیل و فلورین هستند. از این‌رو، پس از زدایش انتخابی در محلول ۵۰٪ اسید هیدروفلوئوریک،



شکل ۳- تولید $Ti_3C_2T_X$ از پیش‌ماده Ti_3AlC_2 [۱۷]

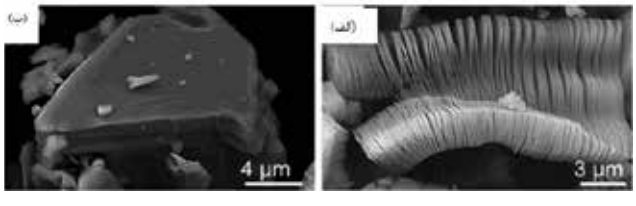
34. Filtration
35. Suspension

مکسین تولیدشده دارای پایانه‌های سطحی شامل اکسیژن، هیدروکسیل و فلورین می‌باشد [۱۷، ۱]. خواص مکسین به لایه پایانه سطحی آن وابسته است براین‌اساس امکان تنظیم‌پذیری[۳۶] ویژگی‌های شیمیایی، مکانیکی، الکترونی و نوری با کنترل این پایانه‌های سطحی وجود دارد. درنتیجه عملیات زدایش انتخابی در محلول اسید هیدروفلوئوریک، ذرات متراکم مکس‌فاز به ساختارهای بسته‌بندی‌شده آکاردئونی تبدیل می‌شوند که مشابه گرافیت لایه‌برداری شده است. به این ساختارها، مکسین‌های چندلایه[۳۷] و اگر تعداد لایه‌ها کمتر از پنج باشد به آن‌ها مکسین با تعداد لایه‌های کم[۳۸] گفته می‌شود. این فرآیند آسان، کم هزینه و پر بازده است و در حال حاضر به روش اصلی ساخت مکسین‌ها تبدیل شده است. در شکل ۴ تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی[۳۹]، نمونه‌هایی از مکسین کاربید تیتانیوم و مکس‌فاز تیتانیوم آلومینیوم کاربید نشان داده شده است [۱۷، ۱].

مکسین تولیدشده، هنگام خشک‌شدن هدایت الکتریکی بالایی از خود نشان می‌دهد همین ویژگی، توانمندی و قابلیت فراوانی را در کاربردهای ذخیره‌سازی انرژی فراهم می‌کند. مکسین با قرارگرفتن در محلول آبی سطوح منتهی‌شده به پایانه‌های هیدروکسیل، فلورین و اکسیژن دارد، بنابراین برخلاف گرافن آب‌دوست است و به‌همین‌دلیل، در بسیاری از کاربردها، می‌تواند یک ویژگی بسیار مثبت باشد. انعطاف‌پذیری و چکش‌خواری از دیگر خصوصیات این ماده محسوب می‌شود که با توجه به این ویژگی، می‌توان آن را به اشکال پیچیده‌ای قالب‌گیری نمود [۱۷، ۱].

ویژگی‌های الکترونیکی مکسین

با توجه به فرآیند تولید مکسین‌ها در محلول‌های آبی- اسیدی، مکسین‌های آماده‌شده اغلب به پایانه‌های سطحی ازجمله فلورین، هیدروکسیل و اکسیژن متصل می‌شوند. نوع پایانه‌های سطحی عمدتاً به‌روش تولید بستگی دارد. به‌طورکلی، مکسین‌های عامل‌دار شده با اکسیژن، پارامترهای شبکه کوچک‌تر و استحکام مکانیکی قوی‌تری را درمقایسه با مکسین‌های عامل‌دار شده با گروه‌های فلورین و هیدروکسیل نشان می‌دهند[۱۷, ۱]. فلز یا نیمه‌هادی‌بودن مکسین‌ها به آرایش فضایی



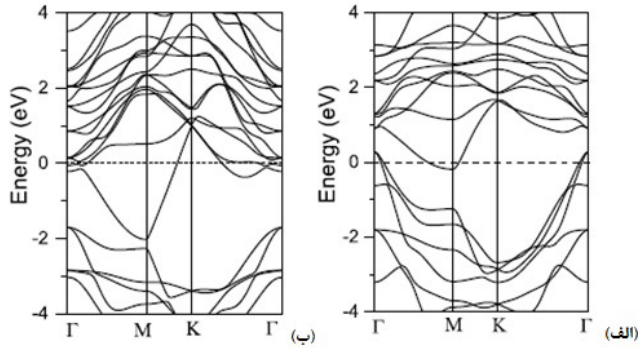
شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی (الف) نمونه‌های مکسین کاربید تیتانیوم ($Ti_3C_2T_X$) پس از زدایش در اسید هیدروفلوئوریک (ب) نمونه‌های مکس فاز تیتانیوم آلومینیوم کاربید (Ti_3AlC_2) [۱۷]

36. Tunability
37. Multi layer MXenns (ML-MXenes)
38. Few layer MXenns (FL–MXenes)
39. Scanning Electron Microscope (SEM)

پایانه‌های سطحی بستگی شدیدی دارد به‌گونه‌ای که با تغییر پایانه‌های سطحی و ساختار هندسی آن‌ها، خصوصیات مکسین‌ها تغییر می‌کند. ساختار نوار انرژی مکسین کاربید تیتانیوم در شکل ۵ نشان داده شده است.

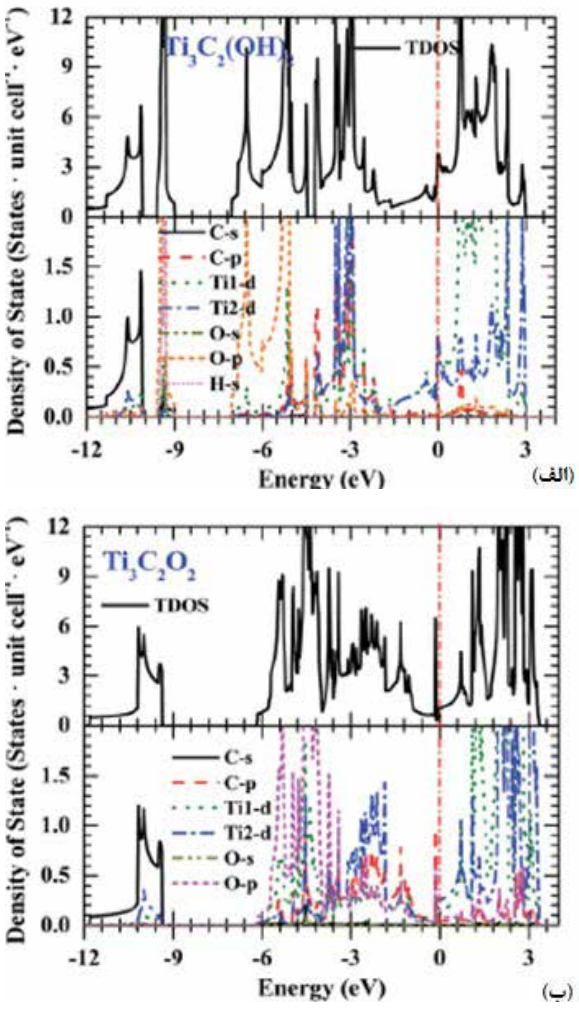
همان‌طورکه دیده می‌شود مکسین کاربید تیتانیوم با پایانه‌های سطحی اکسیژن و هیدروکسیل خاصیت فلزی از خود نشان می‌دهند، از طرفی برای تعیین خصوصیات الکترونیکی، بررسی چگالی حالت‌ها در اطراف انرژی فرمی ضروری است. برای شناخت بیشتر ماهیت ساختار نواری، چگالی نهایی حالت‌ها برای $Ti_3C_2O_2$ و $Ti_3C_2(OH)_2$ و چگالی جزیی حالت‌ها برای Ti، C، O و H در شکل ۶ نشان داده شده است. در مکسین با پایانه‌ی سطحی هیدروکسیل همان‌طورکه دیده می‌شود در نوار رسانش توزیع چگالی حالت‌ها مربوط به اوربیتال d اتم‌های Ti_1 و Ti_2 است. در نوار ظرفیت نیز بیشترین توزیع چگالی حالت‌ها مربوط به اوربیتال d اتم‌های Ti_1 و Ti_2 است، پایین نوار ظرفیت با حالت‌های H-s، O-p و O-s اشغال شده است، یک قله در اطراف انرژی ۱۰eV- مشاهده می‌شود که مربوط به هیبریداسیون[40] بین حالت‌های H-s و O-p است که با توزیع کمی از حالت O-s ترکیب شده‌اند[۱۷, ۱]. در مکسین با پایانه‌ی سطحی اکسیژن، در نوار رسانش بیشترین توزیع چگالی حالت مربوط به اوربیتال d اتم‌های Ti_1 و Ti_2 است که با توزیع کمی از اوربیتال‌های p اتم O ترکیب شده است. در نوار ظرفیت نزدیک سطح فرمی[41] بیشترین توزیع چگالی حالت‌ها ناشی از اوربیتال‌های d اتم‌های Ti_1 و Ti_2، اوربیتال p اتم C و اوربیتال p و s اتم O می‌باشد که نشان‌دهنده هیبریداسیون قوی بین اتم‌های O با مکسین کاربید تیتانیوم می‌باشد. در اطراف تراز فرمی، چگالی الکترونی قابل مشاهده است و در این نمودار هیچ شکاف نواری وجود ندارد. بنابراین، ترکیب‌های موردنظر رفتار فلزی از خود نشان می‌دهند [۱۷, ۱].

همان‌طورکه پیش‌تر اشاره شد در طی فرآیند تولید مکسین در محلول‌های آبی- اسیدی، مکسین‌های تهیه شده با پایانه‌های سطحی



شکل ۵- ساختار نوار انرژی $Ti_3C_2T_x$ MXene (الف) $Ti_3C_2O_2$ (ب) $Ti_3C_2(OH)_2$ [۱۷]

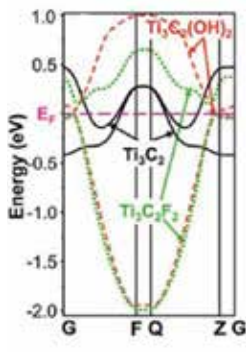
40. Hybridization
41. Fermi level



شکل ۶- چگالی حالت‌ها برای (الف) $Ti_3C_2(OH)_2$ MXene و (ب) $Ti_3C_2O_2$ MXene [۱۷].

همچون فلورین، هیدروکسیل و اکسیژن عامل‌دار می‌شوند. پایانه‌های سطحی که با اتم‌های فلز واسطه لایه بیرونی پیوند دارند، می‌توانند ساختار نوارهای الکترونی را به میزان قابل‌توجهی تغییر دهند. همان‌طورکه در شکل ۷ دیده می‌شود شکاف نواری مکسین کاربید تیتانیوم صفر و دارای خاصیت فلزی است و پایانه‌های سطحی هیدروکسیل و فلورین باعث بازشدن شکاف نواری آن شده‌اند. بنابراین پایانه‌های سطحی می‌توانند مکسین فلزی را به نیمه‌هادی‌هایی با شکاف نوار انرژی حدود ۰/۲۵ تا ۲ الکترون-ولت تبدیل کنند[۸].

علاوه‌براین مکسین‌ها دارای تابع کار و فاصله بین لایه‌ای تنظیم‌پذیر نیز هستند، که محدوده‌ی تابع کار برای مکسین‌های عامل‌دار شده بین ۱/۶ تا ۸ الکترون ولت است. در شکل ۸ تغییرات تابع کار برای مکسین‌های مختلف و تحت تاثیر پایانه‌های سطحی فلورین، هیدروکسیل و اکسیژن نشان داده شده است. دیده می‌شود که پایانه‌های سطحی منجر به تغییر تابع کار مکسین‌ها می‌شوند، تابع کار مکسین‌ها با پایانه سطحی

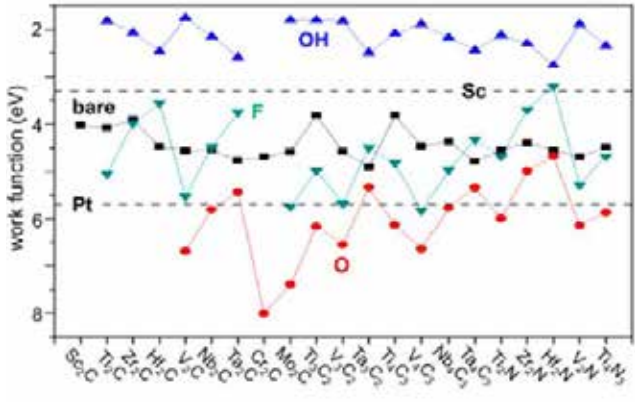


شکل ۷- ساختار نواری مکسین کاربید تیتانیوم و تبدیل از حالت فلزی به نیمه‌هادی [۸].

هیدروکسیل کمتر از ۲/۸ الکترون ولت را نشان می‌دهند که کمتر از اسکاندیم[۴۲] است که پایین‌ترین تابع کار را در بین همه فلزات دارد. از سوی دیگر، تابع کار مکسین‌ها با پایانه سطحی اکسیژن حتی بزرگتر از پلاتین[۴۳] است که بالاترین تابع کار را در بین فلزات دارد. تابع کار مکسین‌ها با پایانه سطحی فلورین نیز بین پایانه‌های سطحی اکسیژن و هیدروکسیل قرار دارد [۸، ۱۷].

ویژگی‌های نوری

خصوصیات نوری مواد به شکاف نوار انرژی مستقیم یا غیرمستقیم و به‌طور خاص‌تر، پراکندگی تابع دی‌الکتریک (ε)، وابسته است. به‌طور کلی، ویژگی‌های نوری یک محیط را می‌توان با تابع دی‌الکتریک مختلط آن برابر با توصیف نمود، که در آن ω فرکانس موج الکترومغناطیسی، و به‌ترتیب بخش حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک هستند. تابع دی‌الکتریک، پاسخ ماده به امواج الکترومغناطیس است و از دو سهم مربوط به گذارهای درون نواری[۴۴] و گذارهای بین نواری[۴۵] تشکیل شده است. روابط کرامرز-کرونیگ[۴۶] بخش‌های حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک را به هم مرتبط می‌کند



شکل ۸- تغییرات تابع کار مکسین‌ها تحت‌تأثیر پایانه‌های سطحی[۸]

42. Scandinium
43. Platinum
44. Intraband
45. Interband
46. Kramers-Kronig relations

و تمام ثابت‌های نوری را می‌توان از این داده‌ها به دست آورد. بخش موهومی تابع دی‌الکتریک برای گذارهای بین نواری به‌صورت زیر به‌دست می‌آید[۱۷، ۶، ۳، ۱]:

$$\mathrm{Im}\varepsilon^{\{interband\}}(\omega) = -\frac{2}{\omega\pi} P\int_0^{\infty} \frac{\omega'^2[\mathrm{Re}\,\varepsilon(\omega')-1]}{\omega'^2-\omega^2}\, d\omega' \qquad (۵)$$

و بخش حقیقی تابع دی‌الکتریک نیز از معادله زیر تعیین می‌گردد:

$$\mathrm{Re}\varepsilon^{\{interband\}}(\omega) = 1+\frac{2}{\pi} P\int_0^{\infty} \frac{\omega'^2\,\mathrm{Im}\,\varepsilon(\omega')}{\omega'^2-\omega^2}\, d\omega' \qquad (۶)$$

رابطه بین ضریب شکست مختلط و ثابت دی‌الکتریک مختلط، توسط معادله زیر تعریف می‌شود[۶،۳]:

$$n(\omega) + i\kappa(\omega) = \sqrt{\varepsilon(\omega)} \qquad (۷)$$

که در آن $n(\omega)$ و $\kappa(\omega)$ به ترتیب ضریب شکست و ضریب خاموشی[۴۷] هستند، و از معادله‌های زیر تعیین می‌شوند[۶،۳]:

$$n(\omega) = \left[\frac{\sqrt{\mathrm{Re}\varepsilon^2(\omega)+\mathrm{Im}\varepsilon^2(\omega)} + \mathrm{Re}\varepsilon^2(\omega)}{2}\right]^{1/2} \qquad (۸)$$

$$\kappa(\omega) = \left[\frac{\sqrt{\mathrm{Re}\varepsilon^2(\omega)+\mathrm{Im}\varepsilon^2(\omega)} - \mathrm{Re}\varepsilon^2(\omega)}{2}\right]^{1/2} \qquad (۹)$$

گذار درون نواری در مکسین‌ها با مدل درود[۴۸] توصیف می‌شود. از آن‌جا که ضریب گذردهی فلزات با مدل درود تعریف می‌گردد، سهم گذارهای درون باندی برای بخش حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک از معادلات زیر محاسبه می‌شوند[۱۷، ۶، ۳، ۱]:

$$\mathrm{Re}\varepsilon^{\{intraband\}}(\omega) = 1-\frac{\omega_p^2}{\omega(\omega^2+\Gamma^2)} \qquad (۱۰)$$

$$\mathrm{Im}\varepsilon^{\{intraband\}}(\omega) = \frac{\Gamma\omega_p^2}{\omega(\omega^2+\Gamma^2)} \qquad (۱۱)$$

که در آن ω_p فرکانس پلاسمای فلز است که توسط چگالی الکترون‌های آزاد فلز در حالت تعادل و جرم موثر الکترون از رابطه $\omega_p^2 = ne^2/\varepsilon_0 m$ تعیین می‌گردد و پارامتر Γ معکوس زمان برخورد الکترون با الکترون، فونون یا ناخالصی است. در نهایت، تابع دی‌الکتریک کل، شامل هر دو گذار بین باندی و درون باندی، از معادله زیر حاصل می‌شود[۱۷،۱۲، ۶، ۳، ۱]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon^{\{intraband\}}(\omega) + \varepsilon^{\{interband\}}(\omega) \qquad (۱۲)$$

پاسخ نوری مواد به‌طور مستقیم با خواص ساختاری و الکترونی آن‌ها مرتبط است، خواص الکترونی مکسین نیز به لایه پایانه‌ی سطحی، که فلز

47. Extinction coefficient
48. Drude model

واسطه در فرآیند آماده‌سازی مکسین می‌پذیرد، وابسته است. بنابراین، امکان تغییر خواص الکترونی با کنترل این عوامل وجود دارد. شکل ۹ نمودارهای بخش حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک، طیف بازتاب، طیف جذب و طیف اتلاف انرژی را برای مکسین کاربید تیتانیوم و در دو قطبش میدان الکتریکی موازی (E||x) و عمود (E||z) نشان می‌دهد. قله‌های بخش موهومی تابع دی‌الکتریک، انتقال دوقطبی الکتریکی مجاز بین نوارهای ظرفیت و هدایت را نشان می‌دهد[۱،۳، ۶، ۱۲،۱۷]. با توجه به نمودار بخش موهومی اولین قله برای قطبش میدان الکتریکی موازی در انرژی ۱/۸۳۶ الکترون ولت رخ می‌دهد و در قطبش میدان الکتریکی عمود در انرژی ۰/۰۳ الکترون ولت است. همچنین مقدار ثابت دی‌الکتریک استاتیک در قطبش میدان الکتریکی عمود دارای مقداری مثبت است و در انرژی صفر معادل ۳۱/۲۳ است. با توجه به نمودار بخش حقیقی و موهومی ثابت دی‌الکتریک قله‌های اصلی انتقال‌های الکترونی بین نواری و درون نواری را نشان می‌دهد و همان‌طور که دیده می‌شود برای انرژی‌های بالاتر، بازتاب از بین می‌رود. بازتاب به‌عنوان یک کمیت مهم با رابطه زیر تعریف می‌شود[۱، ۳، ۶، ۱۲،۱۷]:

$$R(\omega)=\left|\frac{\mathrm{Re}\varepsilon(\omega)+i\mathrm{Im}\varepsilon(\omega))^{1/2}-1}{\mathrm{Re}\varepsilon(\omega)+i\mathrm{Im}\varepsilon(\omega))^{1/2}+1}\right|^2 \qquad (۱۳)$$

با توجه به نمودار بازتاب مشاهده می‌شود که قله‌های بازتاب مانند نمودار بخش حقیقی تابع دی‌الکتریک هستند، این قله‌ها با مقادیر منفی قسمت حقیقی تابع دی‌الکتریک توافق دارند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود برای انرژی‌های کمتر از ۱ الکترون ولت در قطبش میدان الکتریکی عمود یعنی در مود TE[۴۹] بازتابش ۱۰۰٪ نیست و مقداری از طیف عبور داده می‌شود در حالی که در قطبش میدان الکتریکی موازی یعنی در مود TM[۵۰] بازتابش برای همان انرژی‌ها ۱۰۰٪ است. بر اساس بخش‌های حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک، ضریب جذب نوری به‌صورت زیر تعریف می‌شود [۱، ۳، ۶، ۱۲]:

$$A(\omega)=2\,\omega\left[\frac{\mathrm{Re}\varepsilon^2(\omega)+\mathrm{Im}\varepsilon^2(\omega))^{1/2}-\mathrm{Re}\varepsilon(\omega)}{2}\right]^{1/2} \qquad (۱۴)$$

قله‌های جذب رفتاری مطابق با بخش موهومی تابع دی‌الکتریک دارند، جذب مربوط به انتقال بین حالت‌های اشغال شده و غیر اشغال شده ناشی از برهم‌کنش فوتون و الکترون است. به عبارت دیگر، جذب نوری ناشی از گذارهای میان نواری و درون نواری است. در محدوده انرژی بین ۰-۲۰ الکترون ولت، قله‌های پهن حاصل از گذار میان نواری ملاحظه می‌شوند. با توجه به طیف جذب برای هر دو قطبش میدان الکتریکی موازی و عمود، اولین قله جذب در انرژی ۰/۹۳۸۸ الکترون ولت رخ می‌دهد. بیشترین مقدار ضریب جذب در قطبش میدان الکتریکی موازی در انرژی ۸/۷۴۸۵ الکترون ولت و در قطبش عمود در انرژی ۷/۹۰۴۹ الکترون ولت اتفاق می‌افتد. طیف اتلاف انرژی به‌عنوان کمیت مهم دیگر به‌صورت زیر با تابع دی‌الکتریک رابطه دارد[۱، ۳، ۶، ۱۲]:

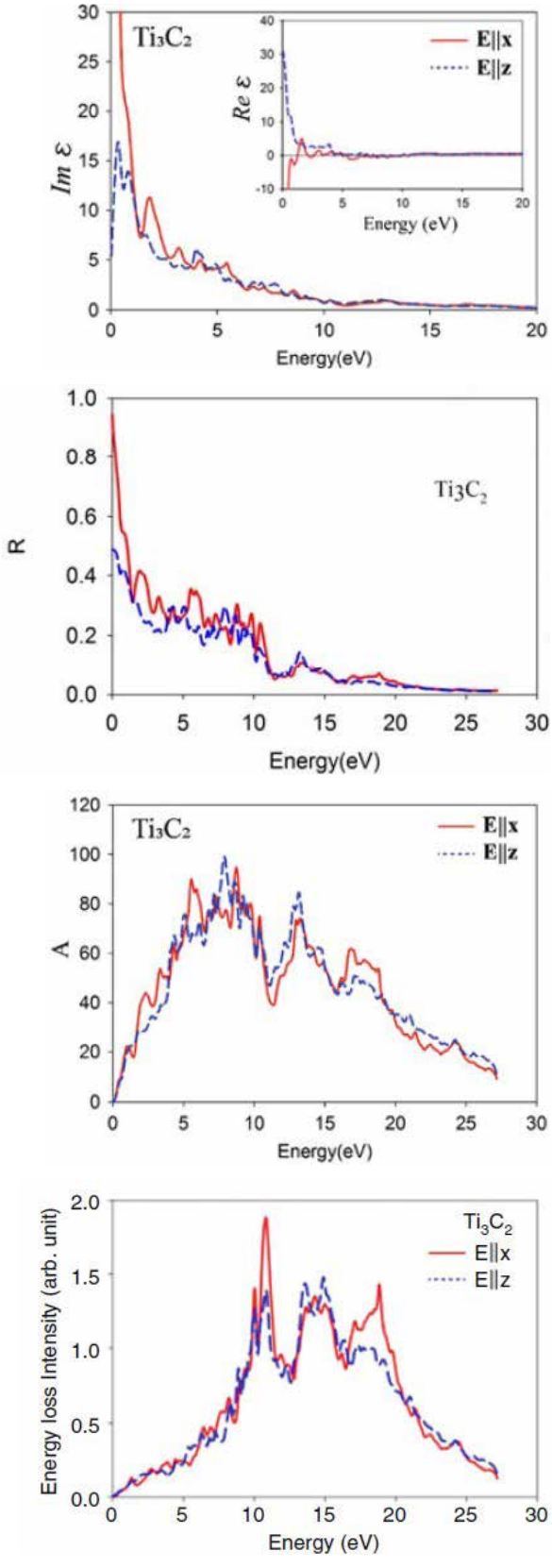
$$Eloss:\ \mathrm{L}(\omega)=\frac{\mathrm{Im}\varepsilon^2(\omega)}{\mathrm{Re}\varepsilon^2(\omega)+\mathrm{Im}\varepsilon^2(\omega)} \qquad (۱۵)$$

این طیف در برگیرنده‌ی تحریک دسته‌جمعی الکترون‌های ظرفیت به نوار هدایت است. این کمیت که با بخش موهومی تابع دی‌الکتریک ارتباط دارد، در بازه‌هایی از انرژی که طیف اتلاف انرژی دارای قله است، بخش موهومی تابع دی‌الکتریک مقادیر کوچکی دارند. شاخص‌ترین قله در طیف اتلاف انرژی به‌عنوان قله پلاسمونی شناخته می‌شود که بیانگر تحریک‌های جمعی چگالی بار الکترونی در ماده است و قله‌ها نشان‌دهنده‌ی فرکانس‌های پلاسمونی هستند[۱، ۳، ۶، ۱۲]. با توجه به نمودار اتلاف انرژی، قله‌ها مربوط به گذار میان نواری و درون نواری هستند و قله‌های اصلی مربوط به گذار درون نواری است. با توجه به طیف اتلاف انرژی دیده می‌شود که در مود TM پیک پلاسمونی در انرژی ۱۰/۸۱ الکترون ولت رخ می‌دهد و در مود TE پیک پلاسمونی در انرژی ۱۴/۸۹ الکترون ولت رخ می‌دهد[۱، ۳، ۶، ۱۲].

بیرونی‌ترین اتم‌های فلز واسطه از تک‌لایه مکسین به‌دلیل فرآیندهای آماده‌سازی توسط گروه‌های سطحی، مانند فلورین، هیدروکسیل و اکسیژن عامل‌دار می‌شوند. پایانه‌های سطحی می‌توانند تا حد زیادی بر خواص ساختاری، الکترونی و نوری مکسین‌ها تأثیرگذار باشند. در شکل ۱۰ بخش‌های حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک وابسته به فرکانس، برای مکسین‌های $Ti_3C_2F_2$، $Ti_3C_2(OH)_2$، $Ti_3C_2O_2$ و Ti_3C_2 بررسی و مقایسه شده‌اند[۲].

همان‌طورکه مشاهده می‌شود با تغییر پایانه‌های سطحی در محدوده طیفی مشخص‌شده تغییرات قابل‌توجهی در توابع دی‌الکتریک دیده می‌شود. با افزایش انرژی فوتون، بخش حقیقی تابع دی‌الکتریک برای مکسین‌های با پایانه‌های سطحی فلورین، اکسیژن، و هیدروکسیل بیشتر از Ti_3C_2MXene است. در محدوده مرئی، بخش حقیقی تابع دی‌الکتریک برای پایانه‌های سطحی فلورین و هیدروکسیل بیشتر از اکسیژن است[۱۳، ۷، ۲]. همان‌طور که ملاحظه می‌شود در انرژی‌های بالاتر همه مکسین‌ها خواص دی‌الکتریک تقریباً مشابه‌ای دارند. بخش موهومی تابع دی‌الکتریک نیز تحت‌تأثیر پایانه‌های سطحی قرار دارد در انرژی‌های کمتر قله‌هایی در همه مکسین‌ها مشاهده می‌شود که برای مکسین با پایانه سطحی اکسیژن، در انرژی ۱/۳ الکترون ولت یک قله دیگر دیده می‌شود که مربوط به سهم قوی‌تر اکسیژن، در چگالی موضعی حالت‌ها است[۲]. مکسین‌های با پایانه‌های هیدروکسیل و فلورین دارای قله‌های یکسانی هستند و همان‌طورکه دیده می‌شود در انرژی‌های بالاتر از ۴ الکترون ولت تفاوت در بخش موهومی تابع دی‌الکتریک مکسین‌ها کاهش می‌یابد.

49. Transverse Electric (TE) mode
50. Transverse Magnetic (TM) mode



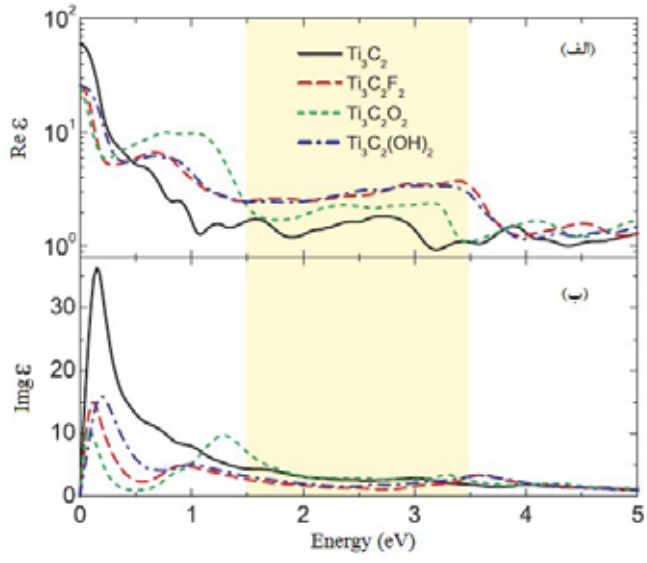
شـــکل ۹- (الف) نمودار بخش حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک (ب) طیف بازتاب (ج) طیـــف جذب (د) طیف اتلاف انرژی برای قطبش میـــدان الکتریکی موازی (E||x) و عمود (E||z) از Ti_2C_2 Mxene [۶ ,۱۲]

شـــکل ۱۱ طیف جذب را نشان می‌دهد ملاحظه می‌شود که تفاوت‌های قابل‌توجهـــی بیـــن پایانه‌های ســـطحی در طیف‌های جـــذب، به‌ویژه در انرژی‌های پایین‌تر وجود دارد که نشـــان‌دهنده اهمیـــت تأثیر گروه‌های ســـطحی بر خواص نهایی مکســـین اســـت. در محـــدوده‌ی طیف مرئی، $Ti_3C_2O_2$ MXene جذب بیشـــتری را نشـــان می‌دهـــد، در حالی که مکســـین‌های با پایانه سطحی هیدروکســـیل و فلورین جذب ضعیف‌تری نسبت به Ti_3C_2MXene دارند[۱۳، ۲]. این امر به دلیل مشارکت بیشتر اتم‌های اکســـیژن، در چگالی موضعی حالت‌ها نزدیک تراز فرمی است. در محدوده‌ی طیفـــی ماورابنفش، همه پایانه‌ها منجـــر به افزایش جذب در مکسین می‌شوند. به‌طور معمول پیش‌بینی می‌شود $M_{n+1}X_n$ MXene با n کوچک‌تر به‌دلیل چگالی حالت کمتر در مقایسه با $M_{n+1}X_n$ MXene با n بزرگ‌تر شفاف‌تر هستند[۱۳، ۷، ۲].

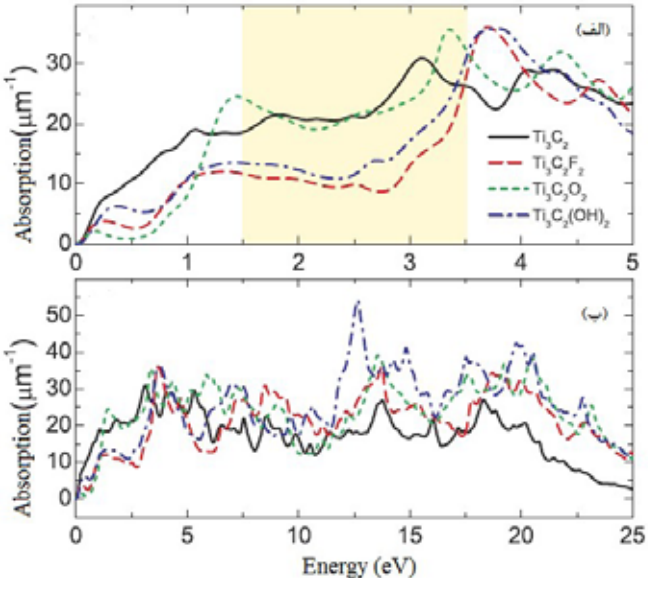
ســـاخـــت کامپوزیت‌های مبتنـــــی بر مکسین برای افـــزایش راندمان ترانوستیک

ترانوســـتیک[۵۱] بـــه علمی اطلاق می‌شـــود که از سیســـتم‌های درمانی مبتنـــی بر نانوذرات بهره می‌برد، به‌گونه‌ای که عمل تشـــخیص، درمان و تصویربرداری به‌طور همزمان انجام می‌شود. در سال‌های اخیر، ترانوستیک که ترکیبی از درمان و تشـــخیص اســـت، به یکی از روش‌های کلیدی در تحقیقات سرطان تبدیل شده است [۲۷]. این رویکرد بر این فرض استوار است که با تشـــخیص به‌موقع، می‌توان در روند پیشرفت سرطان اختلال ایجاد کرده و درمان را تسهیل نمود. با این وجود، مواد ترانوستیک دارای محدودیت‌های ذاتی هســـتند. از جمله اینکه برخی از مواد ترانوســـتیک ممکن است در شرایط خاصی ناپایدار باشند و این می‌تواند بر کارایی آن‌ها تأثیر بگذارد[۳۲-۲۷]. پاسخ‌های بیولوژیکی به مواد ترانوستیک می‌تواند در افراد مختلف متفاوت باشـــد، که ایـــن موضوع می‌تواند چالش‌هایی در درمان ایجاد کند. فرآیند تولید مواد ترانوســـتیک اغلب پیچیده و پرهزینه است، که ممکن است دسترسی به آن‌ها را محدود کند. در این راستا، ظهور مواد دوبُعدی به ویژه مکسین به‌عنوان یک جایگزین جذاب برای مقابله با این چالش‌ها به شـــمار می‌آید [۲۷]. با توجه به ساختار لایه‌ای مکسین‌ها و همچنین انعطاف‌پذیری بالای آن‌ها، این مواد به‌عنوان گزینه‌ای مناسب برای تولید کامپوزیت‌های متنوع در کاربردهای مختلف شناخته می‌شوند. مکسین‌ها با خواص منحصر به فرد فیزیکی، شیمیایی، مکانیکی و قابلیت تنظیم‌پذیری خواص الکترونیکی و نـــوری، توجه زیادی را در زمینه‌های مختلف از جمله ترانوستیک جلب کرده‌اند. ساخت کامپوزیت‌های مبتنی بر مکســـین‌ها می‌تواند کارایی و راندمان ترانوستیک را افزایش دهد[۳۶، ۳۳، ۲۷]. به‌عنوان مثال ترکیب خواص الکترونیکی و نوری مکسین با دیگر مواد می‌تواند دقت تشـــخیص را افزایش دهد. این کامپوزیت‌ها می‌توانند به‌عنوان حامل‌های دارویی عمل کرده و داروها را به‌طور مؤثرتری به محل

51. Theranostic materials



شکل ۱۰- نمودار بخش حقیقی و موهومی تابع دی‌الکتریک وابسته به فرکانس، برای Ti_3C_2 MXene و گروه‌های سطحی مختلف [۲]



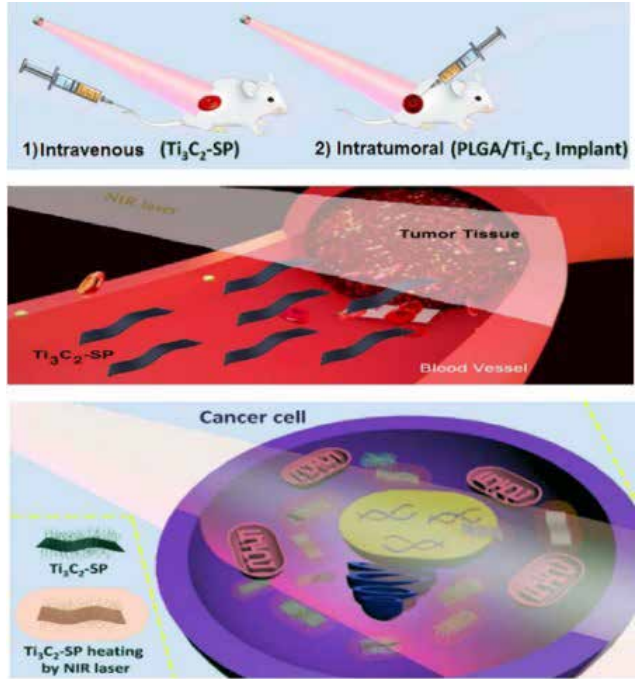
شکل ۱۱- نمودار طیف جذب برای Ti_3C_2 MXene و پایانه‌های سطحی مختلف[۲]

هدف منتقل کنند و با هدف‌گیری دقیق‌تر، می‌توان عوارض جانبی درمان را کاهش داد. تاکنون کامپوزیت‌های بسیاری از مکسین با مواد مختلف از جمله اکسیدهای فلزی، نانولوله‌های کربنی، نانوذرات فلزی، گرافن و دی‌کالکوژنیدهای فلزات واسطه تولید و گزارش شده است. کامپوزیت مکسین کاربید تیتانیوم- نانولوله کربنی ($Ti_3C_2T_x$-CNT) و کاربرد آن در حسگرهای فشار و زیست‌حسگرها دارای عملکردهای استثنایی از جمله حساسیت بالا، انعطاف‌پذیری بالا و قابلیت تنظیم محدوده‌ی سنجش می‌باشد[۳۹، ۳۷، ۲۷]. کامپوزیت‌های اکسید فلزی- مکسین به‌دلیل رسانایی الکتریکی بالا و پایداری الکتروشیمیایی خوب پتانسیل بالقوه‌ای برای کاربرد حسگرها و تصویربرداری پزشکی دارند. تاکنون ترکیب‌های متعددی از آن‌ها گزارش شده است که بیشتر آن‌ها اکسیدهای فلزات واسطه[۵۲] هستند که می‌توان به کاربید تیتانیوم- دی‌اکسید قلع[۵۳] (SnO_2-$Ti_3C_2T_x$)، کاربید تیتانیوم- دی‌اکسید آهن[۵۴] (Fe_3O_4-$Ti_3C_2T_x$)، کاربید تیتانیوم- دی‌اکسید تیتانیوم[۵۵] (TiO_2-$Ti_3C_2T_x$) و کاربید تیتانیوم-تری اکسید مولیبدن[۵۶] (MoO_3- Ti_3C_2Tx) اشاره نمود. این کامپوزیت‌ها با داشتن مساحت سطحی بزرگ، رسانایی عالی و زیست‌سازگاری بالقوه خود، برای روش‌های درمانی و تشخیص تومور مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این کامپوزیت‌های منگنز اکسید[۵۷] - مکسین کاربید تیتانیوم ($MnOx$-Ti_3C_2Tx) و نانوذرات اکسید آهن[۵۸] - مکسین کاربید تیتانیوم ($IONPs$-Ti_3C_2Tx) توجه بسیاری را در زمینه تصویربرداری پزشکی، به ویژه در تصویربرداری MRI به خود جلب کرده‌اند. این کامپوزیت‌ها باعث افزایش نواحی کنتراست در تصاویر MRI می‌شود[۴۰، ۳۹، ۲۷]. ساخت کامپوزیت‌های مبتنی بر مکسین‌ها به‌عنوان یک راهکار نوآورانه برای افزایش راندمان ترانوستیک در درمان بیماری‌ها، به‌ویژه سرطان، مورد استفاده قرار گیرد. این رویکرد می‌تواند به بهبود دقت تشخیص و کارایی درمان کمک کند و در نهایت به نتایج بهتری در حوزه پزشکی منجر شود. به‌عنوان مثال در [۲۷] محققان کامپوزیت فسفولیپیدهای سویا[۵۹] - مکسین و اثر فتوترمال[۶۰] آن بر سلول‌های سرطانی را بررسی کردند. شکل ۱۲ تجمع نانوصفحات Ti_3C_2-SP MXene در سلول‌های سرطانی با لیزر مادون قرمز نزدیک[۶۱] را نشان می‌دهد که تخریب فتوترمال سلول‌های سرطانی توسط این کامپوزیت انجام می‌شود. کامپوزیت Ti_3C_2-SP MXene قادر است نور مادون قرمز را جذب کرده و در نتیجه دما را در نواحی هدف (مانند تومورهای سرطانی) افزایش دهد. این افزایش دما می‌تواند منجر به مرگ سلول‌های سرطانی شود. همچنین کامپوزیت مذکور می‌تواند به‌طور خاص به سلول‌های سرطانی متصل شود و در نتیجه اثرات جانبی کمتری بر بافت‌های سالم داشته باشد. قدرت فتوترمال این کامپوزیت به‌طور مؤثری بر روی سلول‌های سرطانی تأثیر گذاشته و به‌عنوان یک روش غیرتهاجمی در درمان سرطان مورد استفاده قرار می‌گیرد[۲۷].

کاربردهای زیست‌پزشکی مکسین

نانومواد دوبُعدی، مواد نوظهوری هستند که پتانسیل بالایی برای کاربردهای زیست‌پزشکی دارند. این نانومواد به واسطه ویژگی‌های فیزیکی،

52. Transition Metal Oxides (TMOs)
53. Tin Dioxide (SnO_2)
54. Iron dioxide (Fe_3O_4)
55. Titanium dioxide (TiO_2)
56. Molybdenum Trioxide (MoO_3)
57. Manganese Oxide (MnO_x)
58. Iron oxide nanoparticles (IONPs)
59. Soybean Phospholipid (SP)
60. Photothermal
61. Near Infrared (NIR)



شکل ۱۲- تجمع Ti_3C_2-SP در سلول‌های سرطانی و تخریب فتوترمال سلول‌های بدخیم توسط Ti_3C_2-SP با استفاده از لیزر NIR [۲۷]

شیمیایی، مکانیکی، الکتریکی و نوری برجسته، به گزینه‌های جذابی برای فرآیندهای درمانی، حسگری زیستی، تصویربرداری زیستی[۶۲]، تشخیص سرطان و رسانش دارو تبدیل شده‌اند. در این بین، مکسین‌ها به‌دلیل نسبت عالی سطح به حجم، می‌توانند تعاملات بهینه‌ای با بیومولکول‌ها و سلول‌ها برقرار کنند. این ویژگی باعث می‌شود که نسبت به مواد معمولی، تعاملات آن‌ها با سلول‌ها و مولکول‌های بیولوژیکی به شکل فوق‌العاده‌ای افزایش یابد. این پتانسیل می‌تواند سطح کارایی مکسین‌ها را در کاربردهای مختلف زیست‌پزشکی به‌طور چشمگیری ارتقا دهد (شکل ۱۳).

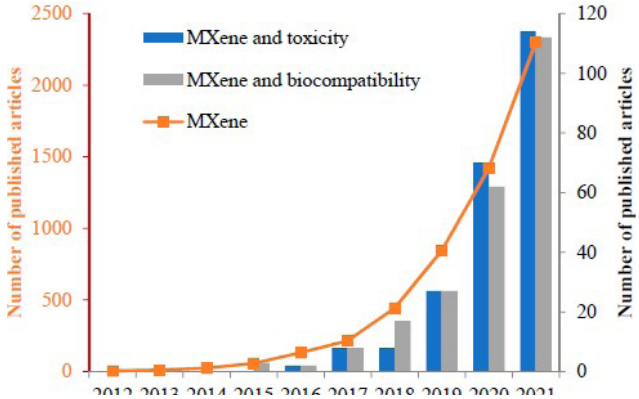
حسگر زیستی

تحقیق و پژوهش در مورد ماده دوبُعدی مکسین به‌طور پیوسته در حال افزایش است . همان‌طور که در نمودار شکل ۱۴ نیز مشخص است تعداد مقالات مربوط به سمیت و زیست‌سازگاری مکسین سالانه در حال رشد است، اما تعداد آن‌ها کمتر از ۵٪ از تعداد کل انتشارات مکسین‌ها است. این امر نیاز به مطالعه نظری و عملی بیشتر اثرات زیستی مکسین‌ها را با توجه به پتانسیل زیاد آن‌ها برای کاربردهای زیست‌حسگری، زیست‌پزشکی و زیست‌محیطی نشان می‌دهد [۱۶].

عملکرد شیمی سطح مکسین توسط پایانه‌های سطحی آن یعنی هیدروکسیل، اکسیژن و فلورین انجام می‌شود و از این طریق می‌توان به کاربردهای شیمیایی مکسین از جمله حسگری دست یافت. حسگرهای مبتنی بر مکسین، به‌عنوان طرحی پیشرفته و مفید برای تشخیص در



شکل ۱۳- کاربردهای زیست‌پزشکی مکسین [۹]



شکل ۱۴- افزایش‌نمایی انتشارات مربوط به مکسین‌ها برگرفته از پایگاه داده اسکوپوس [۱۶]

زمینه‌هایی مانند پزشکی، محیط‌زیست، سلامت و دارو در نظر گرفته شده‌اند. مساحت سطحی، هدایت حرارتی و الکتریکی برجسته مکسین آن‌ها را به گزینه‌ای مناسب برای کاربردهای حسگر زیستی تبدیل می‌کند[۳۲-۲۹]. مکسین‌ها زیست‌سازگاری بالایی دارند و می‌توانند به سرعت در شرایط آبی در مقایسه با گرافن پراکنده شوند. این ویژگی‌ها آن‌ها را به کاندیدای مناسبی برای کاربردهای حسگر زیستی تبدیل می‌کند .با حساسیت و انتخاب‌پذیری بسیار عالی، می‌توان از حسگرهای زیستی مبتنی بر مکسین برای شناسایی گلوکز خون، اسید اسکوربیک، دوپامین و اسید اوریک و تشخیص دیگر مواد زیستی کوچک استفاده نمود. علاوه‌براین به دلیل تحرک فوق‌العاده حامل‌ها و شکاف نواری وابسته به ضخامت و پایانه‌های سطحی، از آن‌ها برای تشخیص آنزیم‌ها به خوبی استفاده می‌شود[۳۲، ۳۱].

در زیست‌حسگرهای تشخیص گلوکز، نانو ساختارهای طلا و نقره به‌طور

62. Bioimaging

گسترده‌ای برای حفظ فعالیت زیستی آنزیم‌ها استفاده می‌شوند. به‌منظور تشخیص مولکول‌های زیستی، الکترودهای اصلاح شده با مکسین، مبدل مؤثری برای تثبیت دریافت‌کننده‌های زیست‌پزشکی (از جمله آنزیم‌ها) روی سطح آن هستند. به‌عنوان مثال ترکیب نانو ذرات نقره- مکسین سطحی مناسب برای تثبیت آنزیم گلوکز اکسیداز[۶۳] است. در [۳۶] یک حسگر زیستی آنزیمی مبتنی بر مکسین کاربید تیتانیوم گزارش شده است. همان‌طور که در شکل ۱۵ ملاحظه می شود مکسین کاربید تیتانیوم، از پیش‌ماده مکس فاز تیتانیوم آلومینیوم کاربید، در محلول آبی اسید هیدروفلوئوریک، از طریق بهینه‌سازی دما، غلظت اسید و زمان زدایش تولید می‌شود. مکسین لایه برداری شده در اسید هیدروفلوئوریک از طریق تترابوتیلامونیوم هیدروکسید، به‌عنوان بستری برای تثبیت آنزیم گلوکز اکسیداز روی الکترود کار پوشانده شده است. این امر فاصله انتقال بار بین آنزیم و الکترودها را کاهش می‌دهد و عملکرد حسگری را بهبود بخشد.

هم‌چنین پروتئین فعال معمولاً زمانی که مستقیماً با سطح الکترود تماس می‌گیرد، زیست‌فعالی خود را از دست می‌دهد، از این رو مواد خاصی برای تثبیت پروتئین‌های فعال و حفظ فعالیت آن‌ها انتخاب می‌شوند[۲۰, ۱۶, ۱۵]. در حالی که مکسین‌ها به‌عنوان بستری مناسب برای تثبیت پروتئین، نه‌تنها می‌توانند به محافظت از پروتئین‌های فعال کمک کنند، بلکه انتقال مستقیم الکترون بین آنزیم و الکترود را تسهیل می‌کنند و امکان ساخت زیست‌حسگرهای بدون واسطه را ایجاد می‌کنند [۵, ۴]. در [۳۷] یک حسگر زیستی ترانزیستور اثر میدان مبتنی بر گرافن و مکسین برای تشخیص ویروس آنفولانزا A (H^1N^1) و سارس کووید ۱۹[۶۴] ارائه شده است (شکل ۱۶). کانال ترانزیستور اثر میدان از کامپوزیت[۶۵] گرافن – مکسین ساخته شده است با توجه به سطح متخلخل مکسین از آن به‌عنوان بستری برای تثبیت آنتی‌بادی‌ها و شناسایی انتخابی آنتی‌ژن استفاده می‌شود، این درحالی است که گرافن در تسهیل انتقال بار نقش دارد. هنگام بارگذاری ویروس آنفولانزا و سارس کووید، ترانزیستور اثر میدان تغییرات مشخصی را در جریان سورس- درین[۶۶] و ولتاژ گیت[۶۷] ایجاد می‌کند که در تشخیص ویروس‌های محیطی بسیار مؤثر است.

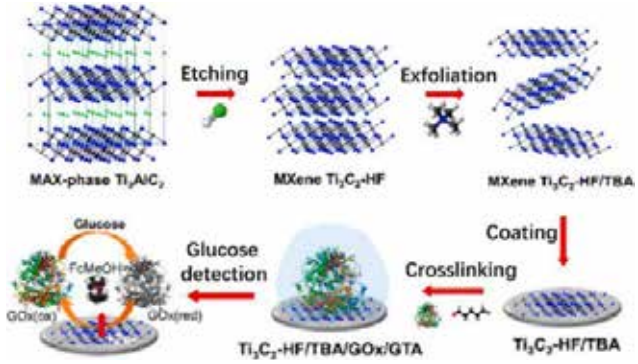
مکسین کاربید تیتانیوم برای تثبیت هموگلوبین[۶۸]، نیز به دلیل رسانایی بالا و مساحت سطحی بزرگ در زیست‌حسگرها عملکرد عالی را نشان داده است. در [۱۵] یک حسگر زیستی پلاسمونی[۶۹] با پیکربندی کرچمان[۷۰] مبتنی بر هیبرید[۷۱] مکسین کاربید تیتانیوم و دی سولفید مولیبدن[۷۲] برای تشخیص غلظت هموگلوبین در نمونه‌های خون پیشنهاد شده است (شکل ۱۷). حسگر زیستی پیشنهادی به‌طور مؤثری قدرت برهمکنش بین نور فرودی و آنالیت[۷۳] را افزایش می‌دهد، براساس نتایج حاصل شده با تغییر غلظت هموگلوبین، زاویه تشدید پلاسمونی به سمت زوایای بزرگ‌تر جابجا می‌شود و این امر پارامتر حساسیت را افزایش می‌دهد. بنابراین، حسگر پیشنهادی کاندیدای مناسبی برای شناسایی و تشخیص زیست مولکول‌ها محسوب می‌شود.

مکسین‌ها می‌توانند به‌عنوان بسترهایی برای شناسایی و تشخیص اسیدهای نوکلئیک[۷۴] استفاده شوند. این حسگرها می‌توانند با اتصال به توالی‌های مشخص، تغییرات نوری را ایجاد کنند که به شناسایی و کمی‌سازی نمونه‌ها کمک می‌کند[۱۵]. مکسین‌ها در کاربردهای زیست‌محیطی نیز، به دلیل تشخیص آلودگی‌ها گزینه مناسبی هستند، علاوه بر این در تشخیص گازهای سمی نیز مفیدند و می‌توانند مانند حسگر گازی عمل کنند. حسگرهای مبتنی بر مکسین قادر به شناسایی گازهای مضر مانند آمونیا[۷۵]، دی‌اکسید نیتروژن[۷۶] و سولفید هیدروژن[۷۷] هستند که در صنایع و محیط زیست بسیار اهمیت دارد [۲۰، ۱۷, ۱۶].

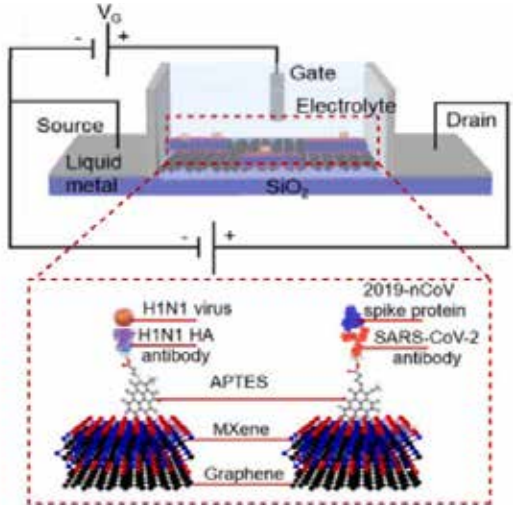
رسانش دارو

مکسین‌ها، به‌عنوان مواد نوظهور و چندمنظوره، درزمینه دارورسانی کاربردهای قابل‌توجهی دارند و می‌توانند به‌عنوان حامل‌های دارویی عمل کنند. این مواد قابلیت دارند که داروها را به‌طور مؤثری بارگذاری و در نواحی هدف منتقل کنند. به دلیل سطح وسیع و خواص نانوهندسی مکسین‌ها قادر به بارگذاری مقادیر بیشتری از دارو هستند. علاوه بر این می‌توانند به‌عنوان سیستم‌های کنترل‌شده برای آزادسازی دارو نیز عمل کنند[۳۲، ۳۱]. با تغییر ساختار یا ترکیب آن‌ها می‌توان نرخ آزادسازی داروها را تنظیم کرد تا در زمان مناسب و با سرعت مناسب آزاد شوند. مکسین‌ها با داروهای خاص، می‌تواند اثرات درمانی را تقویت کند. به‌عنوان مثال، مکسین‌ها می‌توانند اثرهای هم‌افزایی با داروهای شیمی درمانی داشته باشند و به بهبود کارایی آن‌ها کمک کنند. با افزودن لیگاندها[۷۸] یا آنتی‌بادی‌ها[۷۹] به سطح مکسین‌ها، می‌توان آن‌ها را برای هدف‌گیری دقیق سلول‌های سرطانی یا باکتری‌ها طراحی کرد. این ویژگی می‌تواند به کاهش عوارض جانبی و افزایش اثربخشی درمان کمک کند. همچنین این مواد می‌توانند به‌عنوان پایه‌ای برای طراحی نانوکپسول‌ها یا نانوذرات دارویی عمل کنند که امکان کنترل بهتر بر فرآوری و توزیع داروها را فراهم می‌آورند. مکسین‌ها به دلیل خواص نوری خود، در سیستم‌های دارورسانی

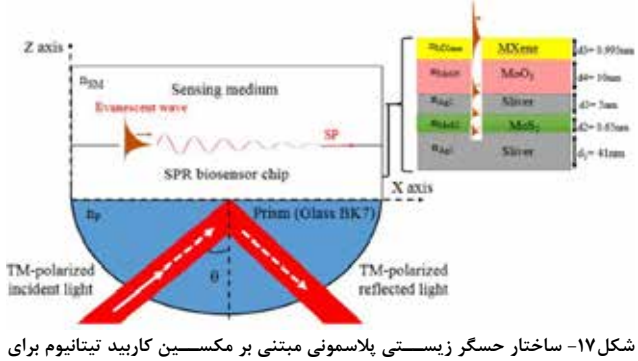
63. Glucose oxidase (GOx)
64. Severe Acute Respiratory Syndrome Coronavirus² (SARS-CoV-2)
65. Composite
66. Drain- Source Current
67. Gate Voltage
68. Hemoglobin (Hb)
69. Surface Plasmon Resonance (SPR)
70. Kretschmann configuration
71. Hybrid
72. Molybdenum Disulfide (MoS_2)
73. Analyte
74. Nucleic acids
75. Ammonia (NH_3)
76. Nitrogen dioxide (NO_2)
77. Hydrogen sulfide (H_2S)
78. Ligands
79. Antibodies



شکل ۱۵ - حسگر زیستی آنزیمی مبتنی بر مکسین کاربید تیتانیوم [۳۶]



شکل۱۶ - حسگر زیستی ترانزیستور اثر میدان مبتنی بر مکسین برای تشخیص ویروس آنفولانزا A (H^1N^1) و سارس کووید [۳۷]



شکل۱۷- ساختار حسگر زیستی پلاسمونی مبتنی بر مکسین کاربید تیتانیوم برای تشخیص غلظت هموگلوبین [۱۵]

به‌عنوان مواد تصویربرداری MRI عمل می‌کنند و به پزشکان امکان می‌دهند تا نحوه توزیع و اثرگذاری دارو در بدن را مشاهده کنند[۳۴، ۳۳].

تشخیص سرطان

مکسین‌ها به دلیل نسبت سطح به حجم عالی و خاصیت الکتروشیمیایی مناسب، می‌توانند برای شناسایی و تشخیص بیومارکرهای سرطان با حساسیت بالا مورد استفاده قرار گیرند. قابلیت مهندسی سطح مکسین‌ها به پژوهشگران این امکان را می‌دهد که آن‌ها را به‌طور ویژه برای شناسایی مولکول‌های خاص مرتبط با سرطان طراحی کنند [۳۳، ۳۲]. این انتخاب‌پذیری می‌تواند به کاهش نتایج مثبت کاذب و افزایش دقت تشخیص کمک کند. علاوه‌براین حسگرهای زیستی مبتنی بر مکسین معمولاً پاسخ‌های سریع و معتبر دارند. این ویژگی در تشخیص زودهنگام سرطان می‌تواند بسیار مفید باشد، زیرا زمان در چنین مواردی بسیار حیاتی است. مکسین‌ها می‌توانند به‌عنوان نانوحمل‌کننده‌های دارویی در درمان سرطان نیز عمل کنند. این مسئله می‌تواند به تعامل هدفمندتر با سلول‌های سرطانی و تشخیص آن‌ها کمک کند [۳۳، ۳۲].

تصویربرداری زیستی

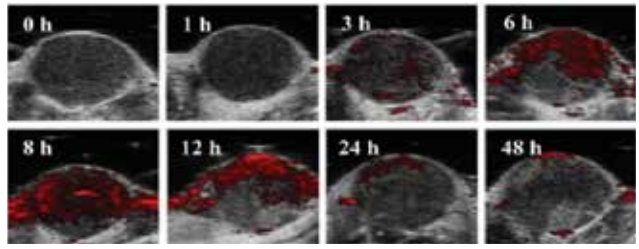
مکسین‌ها به‌عنوان کنتراست‌دهنده طبیعی در تصویربرداری با تشدید مغناطیسی نیز قابلیت دارند. آنها دارای خواص مغناطیسی و الکتریکی ویژه‌ای هستند که می‌توانند حساسیت تصویر را افزایش دهند و وضوح تصاویر مغزی یا تومورهای سرطانی را بهبود بخشند. همچنین این مواد قادرند در تصویربرداری نوری، مانند تصویربرداری فلورسانس، به‌عنوان مواد کنتراست و نشانگر استفاده شوند. این ویژگی می‌تواند به شناسایی دقیق‌تر و تفکیک تومورها از بافت‌های سالم کمک کند[۳۸، ۳۴، ۳۳]. به‌عنوان مثال کامپوزیت منگنز اکسید - مکسین کاربید تیتانیوم باعث افزایش نواحی کنتراست در تصاویر MRI می‌شود. منگنز اکسید دارای خاصیت مغناطیسی و قابلیت جذب آب بالا است که می‌تواند سیگنال MRI را تقویت کند. مکسین کاربید تیتانیوم به‌عنوان حامل و ترکیب‌دهنده عمل می‌کند. این ماده می‌تواند با خاصیت الکتریکی و سطح ویژه بالای خود، بر تعاملات با بافت‌های بیولوژیکی تأثیر بگذارد. ترکیب این دو ماده می‌تواند بهترین نتایج را از نظر کیفیت تصویر فراهم کند. توانایی جذب آب بالا در منگنز اکسید و ویژگی‌های سطحی مکسین می‌توانند باعث برهم‌کنش‌های موثرتری با بافت‌های بیولوژیکی شوند. این برهم‌کنش‌ها به بهبود کیفیت تصویر در نواحی مشخص منجر می‌شوند. از مزایای این کامپوزیت می‌توان به زیست‌سازگار بودن و پایداری بالای آن اشاره کرد. علاوه بر این، برای بهینه‌سازی کنتراست و کیفیت تصویر، نسبت‌های منگنز اکسید و مکسین می‌توانند در فرایند تولید و طراحی کامپوزیت تغییر یابند [۳۸، ۳۴، ۳۳].

کامپوزیت نانوذرات اکسید آهن - مکسین کاربید تیتانیوم ترکیبی از مواد پیشرفته هستند که به دلیل خواص منحصر به فرد خود، توجه بسیاری را در زمینه تصویربرداری پزشکی، به ویژه در تصویربرداری MRI به خود جلب کرده‌اند. مکسین کاربید تیتانیوم خواص الکترونیکی و حرارتی فوق‌العاده‌ای دارد و نانوذرات اکسید آهن به‌عنوان کنتراست‌دهنده MRI عمل می‌کنند که می‌توانند وضوح تصویر را افزایش دهند[۴۰، ۳۹.] این کامپوزیت دارای بازدهی ریلکسیشن T-2[80] بسیار بالایی است که باعث

80. T-2 relaxivity

افزایش کنتراست تصویر MRI می‌شود. بازدهی $394/2\ mM^{-1}\ s^{-1}$ نشان‌دهنده این است که این مواد می‌توانند به‌طور مؤثری تومورها را در تصاویر MRI شناسایی کنند (شکل ۱۸). این کامپوزیت‌ها به‌طور خاص به بافت‌های توموری تمایل دارند، بنابراین می‌توانند تصاویر واضح‌تری از تومورها فراهم کنند. با توجه به عملکرد فتوترمال بالای (۴۸/۶٪)، این کامپوزیت‌ها به‌طور مؤثری قادر به حذف بافت‌ها و سلول‌های توموری درون و خارج از بدن هستند. این مواد می‌توانند با حداقل عوارض جانبی، تصویربرداری دقیق درمان مؤثرتری را ارائه دهند. بنابراین کامپوزیت Ti_3C_2-IONPs MXene با ترکیب خواص نانوذرات و فناوری مکسین دوبُعدی، به‌عنوان یک ابزار نوآورانه در تصویربرداری و درمان تومورهای سرطانی به حساب می‌آیند[۴۰، ۳۹].

مکسین‌ها دارای هدایت الکتریکی بسیار بالایی هستند که این ویژگی می‌تواند به بهبود کیفیت تصاویر در تصویربرداری سی‌تی‌اسکن نیز کمک کند و تشخیص بیماری‌ها را تسهیل نمایند. به‌عنوان مثال، مکسین‌ها می‌توانند به‌عنوان کنتراست‌دهنده‌های مبتنی بر نانوذرات عمل کنند که به‌طور خاص به بافت‌های هدف متصل می‌شوند. به دلیل اینکه مکسین‌ها می‌توانند بارهای الکترونی قابل توجهی تولید کنند، برای استفاده به‌عنوان کنتراست‌دهنده در تصویربرداری سی‌تی‌اسکن بسیار مناسب هستند. [۳۵، ۳۲]. استفاده از مکسین‌ها به‌عنوان کنتراست‌دهنده می‌تواند عوارض جانبی ناشی از مواد کنتراست‌دهنده سنتی را کاهش دهد، زیرا مکسین‌ها معمولاً زیست‌سازگارتر هستند. همچنین این مواد به دلیل خواص جذب بالای اشعه ایکس، می‌توانند به‌عنوان کنتراست‌دهنده‌های مؤثر در تصویربرداری‌های با دقت و وضوح بالا عمل کنند. یکی از مزایای ویژه مکسین‌ها این است که می‌توانند در سیستم‌های تصویربرداری چند تنظیمه استفاده شوند. این امر به پزشکان امکان می‌دهد که با ترکیب داده‌های مختلف، تصویر جامع‌تری از وضعیت بیمار و تومورها به دست آورند. مکسین‌ها برای شناسایی بیومارکرهای سرطانی و بهبود دقت در شناسایی زودهنگام سرطان از طریق تصویربرداری نیز استفاده می‌شوند. این ویژگی می‌تواند به تشخیص به موقع و مداخلات پزشکی مؤثرتر کمک کند. مکسین‌ها می‌توانند به راحتی با دیگر مواد ترکیب شوند و به‌عنوان حامل‌های دارویی یا کنتراست‌دهنده‌ها عمل کنند، این قابلیت می‌تواند به توسعه فناوری‌های جدید در تصویربرداری پزشکی کمک کند [۳۵، ۳۲].



شکل ۱۸- تصویربرداری زیستی مبتنی بر مکسین، تصویربرداری صوتی در شرایط واقعی مطابق با شدت نور سیگنال تومور نمایش داده شده است [۳۹]

فعالیت آنتی‌باکتریال

ماهیت آب‌دوست، رسانایی الکتریکی عالی، پایانه‌های سطحی حاوی اکسیژن روی سطح، ضخامت لایه اتمی و ویژگی‌های ساختاری، شیمیایی و نوری، همه عواملی هستند که در مکانیسم آنتی‌باکتریایی مکسین نقش اساسی دارند. مکسین‌ها قادرند باکتری‌ها را به دو روش فیزیکی و شیمیایی هدف قرار دهند. نانوساختارهای آن‌ها می‌توانند به دیواره باکتری‌ها متصل شده و باعث آسیب به آن‌ها شوند[۳۵، ۳۳]. می‌توان مکسین‌ها را با داروهای آنتی‌بیوتیک بارگذاری کرد، این امر باعث می‌شود که باکتری‌ها تحت تأثیر قرار بگیرند و عفونت‌ها به‌طور مؤثرتری درمان شوند. مکسین‌ها می‌توانند به‌عنوان پوشش‌هایی برای سطوح پزشکی یا تجهیزات استفاده شوند. این پوشش‌ها می‌توانند رشد باکتری‌ها را مهار کرده و از عفونت‌های پس از جراحی جلوگیری کنند. مکسین‌ها با قابلیت دفع رادیکال‌های آزاد و التهاب، می‌توانند به کاهش خطر عفونت و بهبود سرعت درمان نیز کمک کنند. ترکیب مکسین‌ها با پلیمرها یا سایر مواد می‌تواند خواص آنتی‌باکتریالی آن‌ها را تقویت کند و در نتیجه به کاربردهای بهداشتی و درمانی جدیدی منجر شود[۳۵-۳۳].

مهندسی بافت

مکسین‌ها دارای ساختار لایه‌ای و دو بُعدی هستند که می‌توانند به راحتی با دیگر مواد ترکیب شوند و سطح بالایی برای تعامل با سلول‌ها فراهم کنند. با توجه به هدایت الکتریکی بالای این مواد، می‌توانند به‌عنوان محرک‌های الکتریکی برای تحریک سلول‌ها و تسریع فرآیندهای ترمیم بافت عمل کنند [۳۸-۳۵]. علاوه‌براین معمولاً زیست‌سازگار هستند و می‌توانند به‌عنوان بسترهای مناسب برای رشد سلول‌ها و بافت‌ها عمل کنند. این بسترها می‌توانند به بهبود چسبندگی و تکثیر سلول‌ها کمک کنند. با ترکیب مکسین‌ها با دیگر مواد بیولوژیکی، می‌توان بافت‌های مصنوعی با ویژگی‌های مطلوب ایجاد کرد. این بافت‌ها می‌توانند در ترمیم بافت‌های آسیب‌دیده یا جایگزینی بافت‌های آسیب‌دیده استفاده شوند. باتوجه به ویژگی‌های منحصر به فرد این مواد قادرند به بهبود فرآیندهای ترمیم بافت و توسعه بافت‌های مصنوعی کمک کنند. با پیشرفت تحقیقات در این زمینه، انتظار می‌رود که مکسین‌ها به یکی از ابزارهای کلیدی در مهندسی بافت تبدیل شوند [۳۸-۳۵].

چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده

مکسین‌ها نانوساختارهای دوبُعدی به‌عنوان موادی نوظهور در حوزه زیست‌پزشکی پتانسیل‌های زیادی دارند، اما درعین‌حال با چالش‌هایی نیز مواجه هستند. در ادامه به بررسی این چالش‌ها و چشم‌اندازهای آینده آن‌ها در کاربردهای زیست‌پزشکی پرداخته شده است.

چالش‌ها

سمیّت: برخی از مکسین‌ها ممکن است سمّی باشند یا بر روی سلول‌ها و بافت‌ها تأثیر منفی بگذارند. بنابراین بررسی دقیق زیست‌سازگاری این مواد یک نیاز اساسی است.

پایداری شیمیایی: پایداری مکسین‌ها در محیط‌های بیولوژیکی (مانند خون یا مایعات بافتی) می‌تواند یک چالش باشد. تغییرات شیمیایی در طول زمان ممکن است خاصیت حسگری آن‌ها را تحت تأثیر قرار دهد.

تولید و مقیاس‌پذیری: شیوه‌های تولید مکسین‌ها هنوز به اندازه کافی بهینه نشده‌اند و تولید این مواد با کیفیت بالا و در مقیاس بزرگ هنوز یک چالش است. برای استفاده از آن‌ها در محصولات تجاری، نیاز به روش‌های مقیاس‌پذیر و اقتصادی وجود دارد.

سفارشی‌سازی: طراحی مکسین‌ها با ویژگی‌های خاص برای کاربردهای ویژه در زیست‌پزشکی می‌تواند پیچیده باشد و تحقیقات بیشتری در این زمینه ضروری است.

تنظیم دقیق و کنترل: نیاز به انجام تحقیقات بیشتر جهت درک نحوه تعامل مکسین‌ها با بیومولکول‌ها و بافت‌های زنده و همچنین تعیین شرایط بهینه برای استفاده از آن‌ها وجود دارد.

چشم‌اندازهای آینده

حسگرهای زیستی پیشرفته: با تحقیقات نظری و عملی بیشتر، مکسین‌ها می‌توانند به‌عنوان حسگرهای زیستی با حساسیت و دقت بالا برای تشخیص بیماری‌ها و نظارت بر وضعیت سلامتی افراد استفاده شوند.

تحویل دارو: مکسین‌ها به‌عنوان حامل‌های دارویی به دلیل خصوصیات سطحی مناسب و قابلیت اصلاح شیمیایی، می‌توانند در سیستم‌های تحویل داروهای هدفمند مورد استفاده قرار گیرند.

تصویربرداری زیستی: مکسین‌ها می‌توانند به‌عنوان مواد کنتراست در تکنیک‌های تصویربرداری پزشکی مانند MRI یا CT استفاده شوند، که به بهبود کیفیت تصویربرداری کمک می‌کند.

مهندسی بافت: به دلیل ساختار نانو و قابلیت انعطاف‌پذیری و تطبیق‌پذیری، مکسین‌ها می‌توانند در مهندسی بافت و ساخت مواد زیست‌سازگار به کار گرفته شوند.

با پیشرفت فناوری و فهم بهتر از رفتار مکسین‌ها، می‌توان انتظار داشت که این مواد به یکی از مواد اصلی در تحقیقات زیست‌پزشکی تبدیل شوند. با از بین بردن چالش‌ها و ادامه تحقیقات در این زمینه، مکسین‌ها می‌توانند جایگاه مهمی در آینده زیست‌پزشکی پیدا کنند و نوآوری‌های قابل‌توجهی را به ارمغان بیاورند.

نتیجه‌گیری

در این مقاله، مروری بر خواص الکترونیکی و نوری مکسین کاربید تیتانیوم و کاربردهای نوین آن در زیست پزشکی ارائه شد. مکسین‌ها با ساختار شش‌ضلعی و لایه‌ای، خواص ویژه الکترونیکی، نوری، فیزیکی، شیمیایی و مکانیکی به‌طور گسترده در زمینه‌های انرژی، سلول خورشیدی، تولید لیزر و حسگر زیستی مورد توجه هستند. در طی فرآیند تولید مکسین‌ها به ویژه مکسین کاربید تیتانیوم در محلول‌های آبی- اسیدی، مکسین‌های تهیه شده با گروه‌های سطحی همچون فلورین، هیدروکسیل و اکسیژن عامل‌دار می‌شوند، که از این طریق می‌توان ویژگی‌های نوری، شکاف نواری، تابع کار و ساختار الکترونی آن‌ها را در طی فرآیند آماده‌سازی کنترل و تنظیم نمود. مکسین‌ها به‌عنوان موادی نوظهور در عرصه تحقیقات برای همکاری‌های بین رشته‌ای بسیار مناسب هستند. هنوز مطالعات نظری و عملی نسبتاً کمی در مورد خواص مکسین‌ها به‌ویژه خواص الکترونیکی، نوری و مغناطیسی وجود دارد و نیازمند پژوهش بیشتر و گسترش آن در کاربردهای نوین به ویژه زیست‌پزشکی است.

References:

1. Anasori B, Gogotsi ÛG. 2D metal carbides and nitrides (MXenes). Berlin: Springer; 2019.

2. Berdiyorov GR. Optical properties of functionalized Ti3C2T2 (T= F, O, OH) MXene: First-principles calculations. Aip Advances. 2016 May 1;6(5).

3. Chaudhuri K, Alhabeb M, Wang Z, Shalaev VM, Gogotsi Y, Boltasseva A. Highly broadband absorber using plasmonic titanium carbide (MXene). Acs Photonics. 2018 Jan 10;5(3):1115-22.

4. Ghodrati M, Mir A, Farmani A. Numerical analysis of a surface plasmon resonance based biosensor using molybdenum disulfide, molybdenum trioxide, and MXene for the diagnosis of diabetes. Diamond and Related Materials. 2023 Feb 1; 132:109633.

5. Ghodrati M, Mir A, Farmani A. Proposing of SPR biosensor based on 2D Ti3C2T x MXene for uric acid detection ımmobilized by uricase enzyme. Journal of Computational Electronics. 2023 Feb; 22(1):560-9.

6. Chaudhuri K, Wang Z, Alhabeb M, Maleski K, Gogotsi Y, Shalaev V, Boltasseva A. Optical properties of MXenes. 2D Metal Carbides and Nitrides (MXenes) Structure, Properties and Applications. 2019:327-46.

7. Jhon YI, Lee JH, Jhon YM. Surface termination effects on the terahertz-range optical responses of two-dimensional MXenes: density functional theory study. Materials today communications. 2022 Aug 1;32:103917.

8. Jiang X, Kuklin AV, Baev A, Ge Y, Ågren H, Zhang H, Prasad PN. Two-dimensional MXenes: From morphological to optical, electric, and magnetic properties and applications. Physics Reports. 2020 Mar 15;848:1-58.

9. Solangi NH, Mazari SA, Mubarak NM, Karri RR, Rajamohan N, Vo DV. Recent trends in MXene-based material for biomedical applications. Environmental Research. 2023 Apr 1; 222:115337.

10. Ghodrati M. A review of recent advances in surface plasmon resonance biosensors based on Kretschmann configuration with a focus on two-dimensional materials. Journal of Lasers in Medicine. 2024 Feb 10;20(1):53-70.

11. Khan K, Tareen AK, Aslam M, Wang R, Zhang Y, Mahmood A, Ouyang Z, Zhang H, Guo Z. Recent developments in emerging two-dimensional materials and their applications. Journal of Materials Chemistry C. 2020;8(2):387-440.

12. Lashgari H, Boochani A, Shekaari A, Solaymani S, Sartipi E, Mendi RT. Electronic and optical properties of 2D graphene-like ZnS: DFT calculations. Applied Surface Science. 2016 Apr 30;369:76-81.

13. Miranda A, Halim J, Lorke A, Barsoum MW. Rendering Ti3C2T x (MXene) monolayers visible. Materials Research Letters. 2017 Sep 3;5(5):322-8.

14. Ghodrati M, Mir A, Wen J. Metamaterials and Metasurfaces for Sensor and Biosensor Applications. InElectromagnetic Wave Control Techniques of Metasurfaces and Metamaterials 2024 (pp. 61-105). IGI Global.

15. Ghodrati M, Mir A, Farmani A. Sensitivity Enhancement of the Surface Plasmon Resonance Biosensor Based on Hybrid Structure Using MXene and MoS2 for Refractive Index Sensing: An Angular Interrogation Approach. Sensing and Imaging. 2024 Jul 10;25(1):39.

16. Vasyukova IA, Zakharova OV, Kuznetsov DV, Gusev AA. Synthesis, toxicity assessment, environmental and biomedical applications of MXenes: A review. Nanomaterials. 2022 May 24;12(11):1797.

17. Xiao Z, Ruan S, Kong LB, Que W, Zhou K, Liu Y, Zhang T. MXenes and MXenes-based composites. Springer; 2020.

18. Azadmanjiri J, Kumar P, Srivastava VK, Sofer Z. Surface functionalization of 2D transition metal oxides and dichalcogenides via covalent and non-covalent bonding for sustainable energy and biomedical applications. ACS Applied Nano Materials. 2020 Mar 17;3(4):3116-43.

19. Ghodrati M, Mir A, Farmani A. Sensitivity-enhanced surface plasmon resonance sensor with bimetal/tungsten disulfide (WS2)/MXene (Ti3C2Tx) hybrid structure. Plasmonics. 2022 Oct;17(5):1973-84.

20. Yang R, Chen X, Ke W, Wu X. Recent research progress in the structure, fabrication, and application of MXene-based heterostructures. Nanomaterials. 2022 Jun 2;12(11):1907.

21. Xu Y, Ang YS, Wu L, Ang LK. High sensitivity surface plasmon resonance sensor based on two-dimensional MXene and transition metal dichalcogenide: a theoretical study. Nanomaterials. 2019 Jan 29;9(2):165.

22. Ghodrati M, Farmani A, Mir A. Nanoscale sensor-based tunneling carbon nanotube transistor for toxic gases detection: a first-principle study. IEEE Sensors Journal. 2019 May 14;19(17):7373-7.

23. Kumar S, Lei Y, Alshareef NH, Quevedo-Lopez MA, Salama KN. Biofunctionalized two-dimensional Ti3C2 MXenes for ultrasensitive detection of cancer biomarker. Biosensors and Bioelectronics. 2018 Dec 15;121:243-9.

24. Yang Y, Cao Z, He P, Shi L, Ding G, Wang R, Sun J. Ti3C2Tx MXene-graphene composite films for wearable strain sensors featured with high sensitivity and large range of linear response. Nano Energy. 2019 Dec 1;66:104134.

25. Zhu J, Wang H, Ma L, Zou G. Observation of ambipolar photoresponse from 2D MoS2/MXene heterostructure. Nano

Research. 2021 Oct;14(10):3416-22.

26. Ghodrati M, Mir A, Farmani A. Non-destructive label-free biomaterials detection using tunneling carbon nanotube-based biosensor. IEEE Sensors Journal. 2021 Jan 25;21(7):8847-54.

27. Lin H, Wang X, Yu L, Chen Y, Shi J. Two-dimensional ultrathin MXene ceramic nanosheets for photothermal conversion. Nano letters. 2017 Jan 11; 17(1):384-91.

28. Sharma S, Kumari R, Varshney SK, Lahiri B. Optical biosensing with electromagnetic nanostructures. Reviews in Physics. 2020 Nov 1;5:100044.

29. Li Y, Xiong C, Huang H, Peng X, Mei D, Li M, Liu G, Wu M, Zhao T, Huang B. 2D Ti3C2Tx MXenes: visible black but infrared white materials. Advanced Materials. 2021 Oct;33(41):2103054.

30. Kumar J, Neiber RR, Nafady A, Albaqami MD, Soomro RA, Baraka M, Ahmed N, Karakus S. Robust Electrochemical Sensors for Detection of Isoprenaline Using Hexagonal Co3O4 Nanoplates Embedded in Few-Layer Ti3C2T x Nanosheets. ACS Applied Nano Materials. 2022 Aug 15;5(8):11352-60.

31. Ghodrati M, Mir A, Farmani A. 2D materials/heterostructures/ metasurfaces in plasmonic sensing and biosensing. InPlasmonics-Based Optical Sensors and Detectors 2023 Aug 24 (pp. 339-371). Jenny Stanford Publishing.

32. Li L, Zhang R, Gu W, Xu ZP. Mannose-conjugated layered double hydroxide nanocomposite for targeted siRNA delivery to enhance cancer therapy. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology and Medicine. 2018 Oct 1; 14(7):2355-64.

33. Rafieerad A, Sequiera GL, Yan W, Kaur P, Amiri A, Dhingra S. Sweet-MXene hydrogel with mixed-dimensional components for biomedical applications. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials. 2020 Jan 1; 101:103440.

34. Ronchi RM, Arantes JT, Santos SF. Synthesis, structure, properties and applications of MXenes: Current status and perspectives. Ceramics International. 2019 Oct 15; 45(15):18167-88.

35. Shuck CE, Han M, Maleski K, Hantanasirisakul K, Kim SJ, Choi J, Reil WE, Gogotsi Y. Effect of Ti3AlC2 MAX phase on structure and properties of resultant Ti3C2T x MXene. ACS Applied Nano Materials. 2019 May 13; 2(6):3368-76.

36. Chia HL, Mayorga-Martinez CC, Antonatos N, Sofer Z, Gonzalez-Julian JJ, Webster RD, Pumera M. MXene titanium carbide-based biosensor: strong dependence of exfoliation method on performance. Analytical chemistry. 2020 Jan 24;92(3):2452-9.

37. Li Y, Peng Z, Holl NJ, Hassan MR, Pappas JM, Wei C, Izadi OH, Wang Y, Dong X, Wang C, Huang YW. MXene–graphene field-effect transistor sensing of influenza virus and SARS-CoV-2. ACS omega. 2021 Mar 2; 6(10):6643-53.

38. Dai C, Lin H, Xu G, Liu Z, Wu R, Chen Y. Biocompatible 2D titanium carbide (MXenes) composite nanosheets for pH-responsive MRI-guided tumor hyperthermia. Chemistry of Materials. 2017 Oct 24; 29(20):8637-52.

39. Yin H, Guan X, Lin H, Pu Y, Fang Y, Yue W, Zhou B, Wang Q, Chen Y, Xu H. Nanomedicine-enabled photonic thermogaseous cancer therapy. Advanced Science. 2020 Jan; 7(2):1901954.

40. Huang K, Li Z, Lin J, Han G, Huang P. Two-dimensional transition metal carbides and nitrides (MXenes) for biomedical applications. Chemical Society Reviews. 2018;47(14):5109-24.