مقاله مروري

مروری بر پیشرفتهای اخیر در زیست حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر پیکربندی کرچمان با تمرکز بر مواد دوبعدی

مریم قدرتی

دانشگاه لرستان

1-دانشآموخته دکتری، دانشکده فنی و مهندسی،

چکیدہ

در دهههای اخیر، شیوع بیماریهای انسانی به طور پیوسته افزایش یافته است، این امر محققان را به سمت طراحی زیست حسگرهایی با فناوریهای جدید سوق داده است. تحقیقات نشان می دهد که ترکیب نانومواد دو بعدی با فلزات نجیب نقش بسزایی در توسعه پارامترهای عملکرد حسگرها همچون حساسیت، ضریب شایستگی و دقت تشخیص دارد. نانو مواد دو بعدی مانند گرافن، فسفر سیاه، مکسینها و دیکالکوژنیدهای فلزات واسطه پارامترهای عملکرد را به طور قابل ملاحظهای بهبود می دهند و از لایههای فلزی در برابر اکسیداسیون نیز محافظت می کنند. حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی مبتنی بر منشور مزایای قابل توجهی نسبت به سایر حسگرهای نوری دارند، از جمله می توان به حساسیت قابل ملاحظه، دقت و سرعت پاسخ بالا، تشخیص بدون برچسب، مقاومت بالا در مرابر تغییرات دمایی محیط و امکان تشخیص مولکولهای زیستی با غلظت و حجم کم اشاره نمود. در این مقاله مروری، تاریخچه و وضعیت فعلی زیست حسگرهای پلاسمونی مبتنی بر پیکربندی کرچمان با تمرکز بر مواد دو بعدی بررسی شده است و کاربردهای بالقوه آنها در حوزههای مختلف به ویژه پزشکی ارزیابی شده است. علاوه بر زیست حسگرهای و تعیین پارامترهای عملکردشان نیز بررسی شده است. این مقاله مروری می تواند برای اهداف حسگرهای و پلاسمونی و تعیین پارامترهای عملکردشان نیز بررسی شده است. این مقاله مروری می تواند برای جامعه علمی که علاقهمند به پژوهش در حوزه زیست حسگرهای پلاسمونی هستند، مید برای مدل سازی زیست حسگرهای

> نویسنده مسئول: مریم قدرتی پست الکترونیک:

> > شمارہ تماس:

ghodrati.ma@fe.lu.ac.ir

09169763551

کلمات کلیدی: مواد دوبعدی، زیستحسگر، تشدید پلاسمون سطحی، حساسیت، پیکربندی کرچمان.

مقدمه

با توسعه فناوري علم مواد، مواد دو بعدي جديدي كشف شدند كه با داشتن خواص ویژه فیزیکی، شیمیایی، الکتریکی، حرارتی، مکانیکی و نوری گزینه بسیار مناسبی برای کاربرد در حوزههای مختلف ازجمله الکترونیک، ایتیک، پلاسمونیک، انرژی و پزشکی به شمار ميروند [5-1]. گرافن، اولين ماده دو بعدي با شكاف نوار انرژي صفر و ماهیت نیمهفلزی است که با داشتن خواصی منحصربهفرد زمینه دستیابی به دیگر مواد دو بعدی را فراهم ساخت [11–6]. ازجمله مواد دو بعدی شناختهشده علاوهبر گرافن می توان به نیترید بور هگزاگونال¹ (h-BN)، دىكالكوژنيدهاى فلزات واسطه² (TMDCs)، فسفر سياه³ (BP)، اكسيدهاي فلزات واسطه لايهاي⁴ (LTMOs)، هالیدهای پروسکایتی لایهای⁵، کاربید و نیترید فلزات واسطه⁶ (MXenes) اشاره نمود. این مواد با داشتن خواص فوق العاده گزینههای مؤثری برای فناوریهای متنوعی همچون لیزر، دیودهای نوری، سلولهای خورشیدی، حسگرها و زیستحسگرها هستند[17-12]. در سالهای اخیر توسعه زیستحسگرهای با حساسیت بالا جهت تشخیص در حوزه یزشکی و سلامت همواره كانون توجه محققان بوده است. زيستحسگر تشديد يلاسمون سطحی⁷ (SPR)، یک حسگر زیستی نوری بدون بر چسب⁸ است که در آن تغییرات ناشی از اندرکنش های زیستی بر روی ضریب شکست محيط سنجش ⁹ اثر مي گذارد. در اين حسگرها محيط سنجش شامل یک لایه فلز و یک لایه دیالکتریک است که کوچکترین تغییرات حاصل از اندرکنش های زیستی شرایط تشدید پلاسمون های سطحی را در مرز مشترک لایه فلز و دیالکتریک تغییر میدهد. بنابراین

مروری بر پیشرفتهای اخیر در زیستحسگرهای تشدی پلاسمون سطحی مبتنی بر پیکربندی کرچمان با ټرکز بر مواد دوبعدی

میتوان از پدیده تشدید پلاسمون سطحی در آشکارسازی باکتریها، ویروسها، آنزیمها، پروتئینها، اسیدهای نوکلئیک و سلولها یا بافتهای سرطانی استفاده نمود [23-18]. از مزایای زیست حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی می توان به حساسیت بالا، تشخیص بدون برچسب، مقاومت بالا در برابر تغییرات دمایی محیط و امکان تشخیص مولکولهای زیستی با غلظت و حجم کم اشاره نمود. پلاسمونهای سطحی معمولاً توسط فوتونهای نورمرئی یا فرابنفش برانگیخته می شوند و برای تحریک پلاسمون های سطحی از روشهای مختلفی نظیر جفتشدگی منشور¹⁰ و توری¹¹ استفاده میشود [29–23]. یکی از روش،های مبتنی بر منشور سامانههای کرچمان¹² هستند این سامانهها بهعنوان یکی از اساسیترین پیکربندیهای تشدید پلاسمون سطحی برای زیستحسگرها به شمار می روند که معمولاً توسط منشور و فیلم فلزی ساخته مى شوند [36-30]. طراحى و ساخت زيست حسگرهاى يلاسمونى متنوع با استفاده از نانو مواد دوبعدی حاکی از آن است که مواد نانوساختار نقش تعیینکننده در بهبود پارامترهای عملکرد بهویژه حساسیت دارند. با پیشرفت فناوری نانو مواد، انتظار می رود که زیستحسگرهای پلاسمونی بتوانند مواد زیستی یا شیمیایی را با حساسیت و دقت بیشتری تشخیص دهند. این مقاله مروری به شرح زیر سازماندهی شده است: در ابتدا شرح مختصری از پدیده تشدید پلاسمون سطحی ارائه خواهد شد، سپس کاربردهای مختلف آن به ویژه در حوزه حسگری مطرح میشود. در ادامه سامانههای کرچمان مورد بررسی قرار خواهند گرفت و انواع نانو مواد دوبعدی کاربردی در طراحی زیستحسگرهای پلاسمونی و نیز روشهای تولید آنها توضيح داده مي شود. ساختارهاي اخير زيست حسگرهاي پلاسموني مبتنی بر سامانههای کرچمان براساس نانو مواد دوبعدی و روشهای تحلیل پارامترهای عملکرد حسگرها شرح داده می شود. در پایان نتیجهگیری و نیز چشماندازهای آینده در این زمینه ارائه می گردد.

¹ Hexagonal Boron nitride (h-BN)

² Transition Metal Dichalcogenides (TMDCs)

³ Black phosphorus (BP)

⁴ layered Transition Metal Oxide (LTMOs)

⁵ layered halide perovskites

⁶ Carbide and Nitride Transition Metal (MXenes)

⁷ Surface Plasmon Resonance (SPR)

⁸ Label Free

⁹ Sensing Medium

¹⁰ Prism

¹¹ Grating

¹² Kretsch`mann

پديده تشديد پلاسمون سطحى

پلاسمون،ها نوسان،های همدوس الکترون،های آزاد در فصل مشترک فلز و دیالکتریک هستند که به دو شکل پلاسمون پلاریتونهای سطحي¹ و يلاسمون هاي سطحي جايگزيده² وجود دارند. يلاسمون یلاریتونهای سطحی امواج الکترومغناطیسی هستند که در فصل مشترک فلز و دیالکتریک انتشار می یابند[40-37]. این امواج در اثر تزويج نوسان پلاسمونهای سطحی با پرتو نور فرودی ایجاد میشوند که دامنه میدان الکترومغناطیسی این امواج در راستای عمود بر فصل مشترک میرا میگردد. در حالیکه پلاسمون های سطحی جایگزیده تحريك غيرانتشاري الكترون هاي فلز هستند كه ميدان الكترومغناطيسي به آنها تزویج شده است و این مودها درون ذرات کوچک فلزی در یک میدان الکترومغناطیسی نوسانی به وجود میآیند[43-41]. عملكرد حسكرهاي تشديد يلاسمون سطحي عمدتاً به محيط دىالكتريك، فلزات و محيط حسگرى بستگى دارد و نيز تحت تأثير عمق نفوذ پلاسمون های سطحی و برهمکنش نور فرودی با امواج يلاسمون سطحي است. به طور كلي، فلزات نجيب مانند طلا (Au)، نقره (Ag)، آلومینیوم (Al) و مس (Cu) مواد پلاسمونیکی پرکاربرد برای حسگرهای SPR هستند. اما نقره نسبت به سایر فلزات ارجحیت دارد زیرا تشدید پلاسمونهای سطحی در فلز نقره در محدوده طولموجهای مرئی رخ میدهد ازسویدیگر پایداری شیمیایی، میل ترکیبی زیستی بالا و حساسیت قابل ملاحظهای را نشان میدهد. علاوهبراین فلز نقره در مقایسه با طلا بسیار مقرونبهصرفهتر است و نیز تلفات ذاتی آن از طلا و مس کمتر است بنابراین در مقایسه با دیگر فلزات نجیب، کاربرد بیشتری دارد [48-44]. در حسگرهای SPR، تغییرات ناشی از حضور یا اندرکنش آنالیت³ در سطح حسگر باعث تغییرات ضریب شکست می شود که این امر، تغییرات ثابت انتشار پلاسمونهای سطحی را در فصل مشترک فلز-دی الکتریک در یی دارد. درنتیجه شرایط تزویج، بین نور تابشی و پلاسمونهای سطحي تغيير ميكند كه ميتوان اين تغييرات را به عنوان خروجي حسگر، آشکارسازی نمود[50-47]. زیستحسگرهای پلاسمونی

براساس اینکه کدام یک از مشخصههای نوری شان با پلاسمون های سطحی برهم کنش دارد به انواع مدولا سیون های شد⁴، زاویه ای⁵ و طول موج⁶ دسته بندی می شوند [49، 48]. شکل 1، مدولا سیون شدت، زاویه ای و طول موج را نشان می دهد. در مدولا سیون شدت، طول موج و زاویه نور فرودی ثابت است و با اندازه گیری میزان تغییرات در شدت نور بازتابشی فرآیند حسگری صورت می گیرد در حالی که در مدولا سیون زاویه ای طول موج نور فرودی ثابت است و پاسخ تشدید پلاسمون سطحی از طریق پویش زاویه تابش حاصل می شود. در مدولا سیون طول موج نیز، زاویه تابش ثابت است و طول موج منبع نور برای بدست آوردن پاسخ تشدید پلاسمون سطحی تغییر می کند. معمولاً برای اندازه گیری پارامترهای عملکرد همچون حساسیت در زیست حسگرهای SPR مدولا سیون طول موج و زاویه ای بیشتر استفاده می شوند [49، 48].



پیکربندی کرچمان

ازآنجاییکه بین مود پلاسمونهای سطحی و نور در فضای آزاد عدم تطابقاندازه حرکت⁷نوری وجوددارد، تزویج کردن فوتون با پلاسمون های سطحی به روش بازتاب کلی ضعیف شده⁸ (ATR) و از طریق سامانههای کرچمان امکان پذیر می شود. پیکربندی کرچمان به طور

⁴ Intensity Modulation

⁵ Angular modulation

⁶ Wavelength modulation

⁷ Momentum Mismatching

⁸ Attenuated Total Reflection (ATR)

¹ Surface plasmon polaritons

² Localized Surface Plasmons

³ Analyte

گستردهای در کاربردهای حسگری و زیست حسگری استفاده می شود که در آن یک لایه فلزی مانند طلا یا نقره با ضخامت مناسب بر سطح منشور اعمال می شود[48، 6، 5، 1]. همان طور که در شکل 2 دیده می شود برای تشدید پلاسمون های سطحی باید نمودار پاشندگی¹ پلاسمون های سطحی با پاشندگی فوتون در یک نقطه تلاقی نمایند. از آنجاکه نمودار پاشندگی پلاسمون های سطحی همواره زیر خط نور قرار دارد، نمودار پاشندگی فوتون را در هیچ نقطه ای قطع نمی کند [48، 6، 5، 1].



شکل 2- الف) جفتشدگی منشور با پیکربندی کرچمان ب) نمودار پاشندگی فوتون و پلاسمونهای سطحی (نقطهچین سبز پاشندگی نور فرودی از فضای آزاد، نقطهچین آبی پاشندگی نور فرودی از منشور و خط قرمز پاشندگی پلاسمون سطحی) [48].

اما در روش جفتشدگی منشور با پیکربندی کرچمان، چنانچه ثابت دیالکتریک منشور بزرگتر از یک باشد فوتونی که از میان منشور با زاویهای مانندθ، بگذرد دارای بردار موجی موازی با فصل مشترک و به

مروری بر پیشرفتهای اخیر در زیستحسگرهای تشدی پلاسمون سطحی مبتنی بر پیکربندی کرچمان با تمرکز بر مواد دوبعدی

 $k_x = \omega / c \sqrt{\varepsilon_p} \sin \theta$ خواهد بود[48، 6، 5، 7]. اگر عدد موج فوتون با عدد موج پلاسمونهای سطحی در زاویهای همچون θ برابر شود، آنگاه پلاسمونها تحریک میشوند. بر این اساس با تنظیم زاویه تابش نور فرودی، جفتشدگی و درنتیجه تلاقی نمودار پاشندگی فوتون و پلاسمونهای سطحی حاصل میشود. لازم به ذکر است که برای امواج پلاسمون سطحی فقط قطبش مغناطیسی عرضی² (TM) وجود دارد. این امواج به صورت نمایی در فصل مشترک دی الکتریک و فلز میرا میشوند. ثابت انتشار امواج پلاسمون سطحی با رابطه زیر تعریف میشود [48، 6، 5، 1]:

(1)

$$k_x = \beta_{sp} \Rightarrow \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_p} \sin \theta = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\varepsilon_d \varepsilon_m}{\varepsilon_d + \varepsilon_m}}, \theta_{sp} = \sin^{-1} \sqrt{\frac{\varepsilon_d \varepsilon_m}{\varepsilon_d + \varepsilon_m (\varepsilon_p)}}$$

که در آن c سرعت نور، Em ثابت دیالکتریک فلز، Ed ثابت دیالکتریک عایق و Ep ثابت دیالکتریک منشور است. در زاویه جفتشدگی (θSP)، که انرژی نور فرودی مود پلاسمون سطحی را تغذیه میکند پرتوهای بازتاب کلی ضعیفتر میشوند. در عمل، شدت موج بازتاب به صورت تابعی از زاویه نور فرودی اندازهگیری میشود، که فرورفتگی در شدت موج بازتاب نشاندهنده جذب نور فرودی و تحریک پلاسمونهای سطحی است (شکل). اگرچه تشدید پلاسمونهای سطحی به روش پیکربندی کرچمان اغلب در کاربردهای حسگری و زیستحسگری مورد استفاده قرار می گیرد، اما این روش معایبی نیز دارد. چون، منشور بایستی بر روی یک گونیومتر³ نصب شود، این امر منجربه افزایش هزینه تجهیزات حسگر می گردد. ازسویدیگر، برای دریافت سیگنال نور مدولهشده SPR قوی، میز منشور و آشکارساز باید همزمان با استفاده از یک موتور چرخاننده دو محوری بچرخند. بنابراین برای بدستآوردن مقدار بهینه نور در خروجی، پیکربندی حسگر باید بارها تنظیم شود، که به میزان قابل توجهي به زمان مورد نياز براي راهاندازي اضافه مي كند [48، 6، 5، .[1

² Transverse Magnetic polarization (TM)

³ Goniometer

¹ Dispersion

مــريم قدرتي | 57



شکل 3- طیف بازتاب تابعی از زاویه نور فرودی در منشور برای تحریک پلاسمونهای سطحی[48].

نانومواد دوبعدى

بعد مواد، یکی از عوامل اصلی در تعیین ویژگیهای مواد به شمار میرود. نانو مواد دو بعدی، گروهی از مواد هستند که یک بُعدشان در مقیاس نانومتر (کمتر از 100 نانومتر) قرار دارد. این مواد دارای خواص فیزیکی و ساختاری مطلوبی هستند و بهدلیل جذب سطحی عالی، شکاف نواری مستقیم و خواص ویژه نوری، شیمیایی، حرارتی، مغناطیسی و الکتریکی برای کاربرد در زیست سگرها بسیار مناسب مستند. پژوهشهای انجامشده نشان میدهد با ترکیب مواد نانوساختاری همچون گرافن، دیکالکوژنیدهای فلزات واسطه، مکسینها و فسفر سیاه با فلزات نجیب، حساسیت حسگرها به طور چشمگیری افزایش مییابد[23–19].

گرافن

گرافن با ساختار دوبعدی و شبکه لانه زنبوری از پیوند کووالانسی اتمهای کربن به ضخامت یک اتم وجود آمده است که طول پیوند کربن – کربن در گرافن در حدود 0/142 نانومتر است. گرافن دارای خواص فوقالعاده همچون رسانندگی الکتریکی و گرمایی، چگالی و تحرکپذیری بالای حاملهای بار، رسانندگی نوری و خواص مکانیکی است [42، 23، 20]. در شکل 4 ساختار دوبعدی و شبکه

لانه زنبوری گرافن و همچنین ساختار نوار الکترونی تکلایه گرافن نشان داده شده است. گرافن تکلایه به ضخامت 0/34 نانومتر ازنظر نوری شفاف است و تنها %2/2 از نور مرئی را جذب میکند، با افزایش تعداد لایههای گرافن می توان جذب نوری آن را افزایش داد. این ماده یک شبهفلز دارای شکاف نوار انرژی صفر است، که با تبدیل گرافن به نانونوارهای گرافنی می توان الکترون را در یک جهت محدود کرد و سبب بازشدن شکاف نوار انرژی در گرافن شد. بازشدن شکاف نوار انرژی گرافن سبب هدایت پلاسمونها می شود که این قابلیت نقره از مزایایی همچون قابلیت تنظیم پذیری، تمرکز فوق العاده و اتلاف کم برخوردار است که بستری عالی برای کاربردهای حسگری و زیست حسگری فراهم می کند [24، 23، 20].



شکل 4- الف) ساختار دوبعدی و شبکه لانه زنبوری گرافن ب) ساختار نوار الکترونی تکلایه گرافن[42].

دىكالكوژنيدهاى فلزات واسطه

دیکالکوژنیدهای فلزات واسطه گروهی دیگر از مواد دوبعدی با رابطه عمومی MX2 هستند که در آنها M مخفف فلز (مولیبدن (Mo) یا تنگستن (W)) و X به کالکوژنید (گوگرد (S)، سلنیوم (Se) یا تلوریم (TMDCs میتوان دیسولفید مولیبدن (MoS2)، دیسلنید مولیبدن (MoSe2)،

دی سولفید تنگستن (WS2) و دی سلنید تنگستن (WSe2) را بر شمرد [72، 14]. در شکل 5 ساختار لانه زنبوری TMDCs نشان داده شده است همان طور که ملاحظه می شود این مواد دارای شبکه شش ضلعی هستند. علاوهبراین، از ویژگی های ممتازی همچون تحرک الکترونی و جذب نوری بالا، انعطاف پذیری و پایداری گرمایی برخوردار هستند. اغلب این مواد شکاف نواری مستقیم کمتر از 2 الکترون -ولت در ناحیه مادون قرمز نزدیک و مرئی دارند که در حوزه فوتونیک و پلاسمونیک پرکاربرد هستند. این مواد دارای شکاف نواری پهن پلاسمونیک پرکاربرد هستند. این مواد دارای شکاف نواری پهن فیرمستقیم تغییر می دهد. در دمای اتاق، شکاف نواری توده 2000، MoSe2 و SoM، 2008 و SoM، 2000، 2009 و 2007 الکترون – ولت و برای نوع تکلایه 2004، 2005 و WSe2 شکاف نواری به ترتیب برابر با 1/80، 2005 و 10/1 الکترون – ولت می باشد [7, 14].



شکل 5- ساختار شبکه ششضلعی TMDCs، که در آن M فلز و X کالکوژنید است[14].

مكسينها (MXenes)

مکسین ها با رابطه عمومی Mn+1XnTx معرفی می شوند که در آن حرف M نشاندهنده فلزات واسطه، X کربن و یا نیتر وژن، نمایه n عددی متغیر بین 1 تا 3 و TX نیز معرف گروه های عاملی سطحی ¹ همچون

مروری بر پیشرفتهای اخیر در زیستحسگرهای تشدی پلاسمون سطحی مبتنی بر پیکربندی کرچمان با تمرکز بر مواد دوبعدی

هیدروکسیل (OH)، اکسیژن (O) و فلورین (F) است. این مواد یکی از بزرگترین خانواده مواد دو بعدی را تشکیل می دهند که شامل کاربیدها، كربونيتريدها و نيتريدهاي فلزات واسطه هستند [51، 50، 16، 11]. در بین انواع مکسین ها، کاربید تیت انیوم (Ti3C2Tx MXene)، با زدایش کردن انتخابی لایه های آلومینیومی از Ti3AlC2 در محلول آبی اسید هیدروفلوئوریک در دمای اتاق تولید می شود که با قرار گرفتن در محلول آبي سطوح منتهي شده به گروه هاي عاملي سطحي تشکيل می شوند. ساختار بلوری مکسین کاربید تیتانیوم در نمای کنار و بالا در شکل 6 نشان داده شده است. تحقیقات نشان میدهد که گروه های عاملي سطحي مي توانند تا حد زيادي بر خواص ساختاري، الكتروني و نوری MXenes تاثیرگذار باشند. به گونهای که ویژگی های نوری و رفتار پلاسمونیکی Ti3C2Tx MXene را میتوان توسط ضخامت لایه ها و گروههای عاملی سطحی ایجاد شده در فرآیند تولید، کنترل و تنظیم نمود[50، 16، 11]. مكسين كاربيد تيتانيوم از رسانايي حرارتي، الكتريكي ونورى بالا، انعطاف يذيري، جذب سطحي بالا، زيست سازگاري² فرق العاده، قابليت تنظيم يذيري³ و سطحي آبدوست⁴ بر خوردار است و گزینه بسیار مناسبی برای کاربردهای يلاسمونى به ويژه در ساخت حسگرها محسوب مي شود. [50، 16].



شکل 6- نمای کنار و بالا برای ساختار بلوری Ti3C2Tx MXene [50].

¹ Surface functional groups

² Biocompatibility

³ Tunability

⁴ Hydrophilic

فسفر سياه

این ماده نیز همچون دیگر مواد دوبعدی بهدلیل خواص بسیار عالی ساختاری، مکانیکی، الکتریکی، مغناطیسی، نوری و ارتعاشی مورد توجه محققان قرار گرفته است[31، 23، 19]. شکل 7 ساختار چند لایه فسفر سیاه را نشان میدهد. فسفر سیاه دارای ساختار ششضلعی دوبعدی است که بین لایههای آن برهمکنشهای واندروالسی¹ وجود دارد، ضخامت هر لایه فسفر سیاه حدود 6/0 نانومتر است. شکاف انرژی فسفر سیاه تودهای حدود 10 الکترون – ولت است درحالیکه شکاف انرژی نوع تکلایه آن حدود 2 الکترون – ولت است. خواص شکاف انرژی نوع تکلایه آن حدود 2 الکترون – ولت است. خواص سطح ویژه بزرگ، جذب قوی در مناطق فرابنفش و نزدیک به مادون قرمز و زیست سازگاری عالی آن را به عنوان یک ماده بالقوه برای طراحی و ساخت حسگرها و زیست حسگرها تبدیل کرده است [31، 23، 19].



شکل 7- ساختار چند لایه فسفر سیاه [19].

روشهای تولید مواد دوبعدی

درحالحاضر روشهای تولید مواد دوبعدی به دو روش سنتز بالا به پایین² و سنتز پایین به بالا³ انجام میشود. در روش سنتز پایین به بالا با تجمع اتمها در شرایط خاص، ساختار اتمی از ابتدا و اتم به اتم تشکیل میشود. درحالیکه در رویکرد سنتز بالا به پایین برای تولید ماده هدف، یک ماده تودهای⁴ را شکلدهی و اصلاح میکنند. در حقیقت یک ماده بزرگ با کاهش ابعاد و شکلدهی مناسب، به یک

ماده با ابعاد نانو تبدیل میگردد، این روش مستلزم کاهش اندازه به کمترین میزان ممکن تا مقیاس نانومتری است[50، 42، 19، 14].

روش لايەلايەكردن شيميايى

تولید مواد دوبعدی از بالا به پایین به روش لایه لایه کردن⁵ شیمیایی انجام می شود، در این روش پیوندهای بین لایه ها به صورت شیمیایی، شیمیایی – حرارتی یا شیمیایی – مکانیکی شکسته می شوند و بیشتر فرآیندهای لایه برداری شیمیایی در مایعات انجام می شود. به عنوان مثال تولید مکسین کاربید تیتانیوم به روش لایه لایه کردن شیمیایی، به طور معمول با زدایش⁶ پیش ماده لایه ای شروع می شود که در اسید هیدروفلونوریک یا محلول لیتیم فلورید / اسید هیدروکلریک محلول آبی – اسیدی، ساختارهای مکسین شکل می گیرند. روش لایه لایه کردن شیمیایی کم هزینه و پربازده است و در حال حاضر به روش اصلی ساخت نانو مواد دوبعدی تبدیل شده است[50، 42، 19].

روش رسوب بخار شیمیایی

تولید مواد دوبعدی از پایین به بالا به روش رسوب بخار شیمیایی⁷ صورت میگیرد در این روش، بسیاری از پارامترها مانند دمای زیرلایه، مقدار و نوع پیش ماده، سرعت تغییر دما، زمان رشد، فشار، جریان گاز حامل میتوانند فرآیند رسوبگذاری لایه مواد دوبعدی را تحت تاثیر قرار دهند. در این روش پیش ماده به محفظه واکنش وارد میشود و سپس به سمت زیرلایه حرکت کرده و رسوب میکند. انتقال پیش ماده در حالت بخار یا گاز به وسیله همرفت و انتشار صورت میگیرد. در طی این فرآیند محصولات فرعی فراری تشکیل می شود که از زیرلایه جداشده و از محفظه خارج میگردد. مزیت اصلی روش رسوب بخار شیمیایی نسبت به لایه لایه کردن شیمیایی، مساحت بزرگتر به دست آمده در این روش است. از سوی دیگر تولید

¹ Vanderwaals

² Top-Down MXene Synthesis

³ Bottom-Up MXene Synthesis

⁴ Bulk

⁵ Exfoliation

⁶ Etching

⁷ Chemical vapor deposition (CVD)

مروری بر پیشرفتهای اخیر در زیستحسگرهای تشدی پلاسمون سطحی مبتنی بر پیکربندی کرچمان با تمرکز بر مواد دوبعدی

> محصولات فرعی فرار که اغلب سمی نیز هستند از محدودیتهای این فرآیند محسوب می شود[50، 42، 19، 14].

عملکرد زیستحسگرهای SPR مبتنی بر پیکربندی کرچمان براساس نانومواد دوبعدی

در این بخش به تحلیل و بررسی زیست حسگرهای SPR مبتنیبر پیکربندی کرچمان با استفاده از نانو مواد دوبعدی می پردازیم. در سال Ti3C2TxMXene يكازيست حسگريلاسمونى بامادەدو بعدى2022 برای تشخیص اسید اوریک با استفاده از تثبیت آنزیم اورات اکسیداز طراحي شد [10]. ساختار زيستحسگر پلاسموني پيشنهادشده براساس پیکربندی کرچمان در شکل 8 آورده شده است. طرح ييشنهادشده شامل منشور SF11، شيشه BK7، فلز نقره، دىسولفيد تنگستن، گرافن، مکسین کاربید تیتانیوم و محیط حسگری است. در یژوهش انجام شده برای مدلسازی زیست حسگر پلاسمونی و حل معادلات ماکسول از روش عددی تفاضل محدود در حوزه زمان¹ (FDTD) استفاده شده است. عملکرد زیست حسگر با استفاده از روش مدولاسیون زاویهای مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته است که در آن منبع نور تابشی یک موج تخت با قطبش TM در طولموج 633 نانومتر فرض شده است. در زیستحسگر پیشنهادشده برای تحريک پلاسمون هاي سطحي زاويه منبع نور فرودي در محدوده 40 تا 80 درجه متغیر در نظر گرفته شده است. همچنین برای اینکه انرژی الکترومغناطیسی تابیدهشده به مرز جذب شود و بازتاب مرز کاهش یابد، از شرایط مرزی جذب لایه کاملاً مطابقت یافته² (PML) استفاده شده است[10].



¹ Finite Difference Time Domain (FDTD)

شکل 8- ساختار زیستحسگر تشدید پلاسمون سطحی پیشنهادشده در [10]. برای ارزیابی اثر و نقش هر یک از مواد لایهای بکاررفته در طراحی زیستحسگر مذکور چهار ساختار بررسی شده که در جدول یک فهرست شدهاند. شکل 9 طیف بازتاب را برای هر چهار ساختار قبل از جذب مولکول های زیستی (RI =1/33 RIU) و پس از جذب مولکول های زیستی (RI =1/3334 RIU) و پس از جذب مولکول های زیستی (RI =1/3334 RIU) انشان می دهد. حساسیت بدست آمده در ساختارهای 1، 2، 3 و 4 به ترتیب برابر با بدست آمده در ساختارهای 1، 2، 3 و 4 به ترتیب برابر با 155/88 deg/RIU ، 132/35 deg/RIU و بدست حسگر پیشنهادشده (ساختار 4) دارای بیشترین حساسیت در زیست حسگر پیشنهادشده (ساختار 4) دارای بیشترین حساسیت در مقایسه با سه ساختار دیگر است، که این افزایش حساسیت به علت محصور شدن حامل های بار و افزایش برهم کنش نور – ماده است که با ترکیب لایه های ایجاد شده است[10].



شکل 9- طیف بازتاب برحسب زاویه فرودی برای الف) ساختار 1 ب) ساختار 2 ج) ساختار 3 و د) ساختار 4 (ساختار پیشنهادی) [10].

² Perfectly Matched Layers (PML)

جدول 1- چهار ساختار زیستحسگر تشدید پلاسمون سطح
ارائەشدە در [10].

ساختار	ترتيب لايهها			
ساختار 1	SF11 prism/ BK7/ Ag/ sensing medium			
2 In 1	SF11 prism/ BK7/ Ag/ Ti3C2Tx MXene/			
ساحتار 2	sensing medium			
3 1-1	SF11 prism/ BK7/ Ag/ WS2/ Ti3C2Tx			
ساحتار 3	MXene/ sensing medium			
ساختار 4 (پيشنهاد	SF11 prism/ BK7/ Ag/ WS2/ graphene/			
شده)	Ti3C2Tx MXene/ sensing medium			

این گروه پژوهشی برای رسیدن به بیشترین حساسیت و کمینه بازتاب، ضخامت نقره و تعداد لایههای MXene را ارزیابی نمودند. شکل 10 طیف بازتاب را برای ضخامتهای مختلف نقره و تعداد لايەھاي مختلف Ti3C2Tx MXene نشان ميدهد. مشاهده مي شود كه با افزايش ضخامت لايه نقره از 35 تا 50 نانومتر، تشديد پلاسمونی تقویت میشود، درحالیکه برای ضخامتهای بزرگتر از 50 نانومتر تشديد يلاسموني تضعيف شده است كه اين امر بهدليل افزایش تلفات نور در ضخامت های زیاد فلز نقره است. علاوهبراین، با افزایش تعداد لایه های MXene از یک لایه تا شش لایه کمینه بازتاب زیاد میگردد و دره پلاسمونی تضعیف میشود. بررسیهای انجام شده نشان می دهد که با افزایش تعداد لایه های MXene از یک لایه تا چهار لایه حساسیت افزایش چشمگیری دارد. براساس نتایج گزارششده، بالاترین حساسیت¹، ضریب شایستگی² و دقت تشخیص³ برای زیست حسگر پیشنهادشده به ترتیب برابر با deg/RIU 41/50 1/RIU ،273/53 و 0/151 1/deg در ازاي چهار لايه Ti3C2Tx MXene قابل دستيابى است[10].



شکل 10- طیف بازتاب برحسب زاویه فرودی الف) به ازای ضخامتهای مختلف نقره ب) به ازای تعداد لایههای مختلف Ti3C2Tx MXene [10].

در .2Error! Not a valid bookmark self-reference اثر ضخامت فلز نقره و تعداد لایههایTi3C2Tx MXene بر پارامترهای عملکرد زیست حسگر حساسیت (S)، دقت تشخیص (DA) ، ضریب شایستگی (FOM) و پهنای طیف در نصف مقدار بیشینه4 (FWHM) برای ساختار پیشنهاد شده خلاصه شده است.

جدول 2- اثر ضخامت نقره و تعداد لایههای MXene (با تک لایههای ثابت WS2 و گرافن) بر پارامترهای عملکرد زیست *حس*گر پیشنهادشده در [10].

ضخامت Ag (nm)	تعداد لايههای Ti3C2Tx MXene	S (deg/RIU)	DA (1/deg)	FOM (1/RIU)	FWHM (deg)		
50	L = 1	182/35	0/193	35/20	5/18		
50	L = 2	202/94	0/184	37/51	5/41		
40	L = 1	176/47	0/141	24/92	7/08		
45	L = 1	180/88	0/162	29/41	6/15		
50	L = 3	232/35	0/177	41/26	5/63		
50	L = 4	273/53	0/151	41/50	6/59		
55	L = 1	188/23	0/229	43/17	4/36		
35	L = 1	161/76	0/132	21/48	7/53		
وو و همکارانش ⁵ [46] یک زیستحسگر پلاسمونی مبتنیبر							

پیکربندی کرچمان که ساختار ناهمگونی⁶ از چند ماده دوبعدی بود، ارائه دادند. در شکل 11 ساختار زیستحسگر تشدید پلاسمون

⁴ Full Width at Half Maximum (FWHM)

⁵ Wu et al

⁶ Heterostructure

¹ Sensitivity

² Figure of Merit (FOM)

³ Detection Accuracy (DA)

سطحی براساس ترکیبهای مختلفی از فسفر سیاه، گرافن و لایههایی از TMDCs نشان داده شده است.



شکل 11- حسگر SPR متشکل از فسفر سیاه، گرافن و TMDCs [46].

در شکل 12 طیف بازتاب با زاویه نور فرودی به ازای لایههایی از TMDCs نشان داده شده است. با توجه به نمودار حداکثر مقدار حساسیت برای ساختار ناهمگون فسفر سیاه به ضخامت 5 نانومتر با WSe2 می MoS2، دو لایه MoSe2، و دو لایه WSe2 به ترتیب برابر با WSe2 مالی 237 deg/RIU، 218 deg/RIU و 279 deg/RIU و 237 deg/RIU توانستند بیشترین حساسیت 279 deg/RIU را برای ساختار ناهمگون فسفر سیاه و دو لایه WSe2 به دست آورند[46].



شکل 12- تغییرات طیف بازتاب و حساسیت با تعداد لایههای مختلفی از دیکالکوژنیدهای فلزات واسطه [46].

مروری بر پیشرفتهای اخیر در زیستحسگرهای تشدی پلاسمون سطحی مبتنی بر پیکربندی کرچمان با تمرکز بر مواد دوبعدی

در سال 2021 كومار و همكارانش¹ [47] ساختار حسگر پلاسمونی را با منشور BK7، فلز نقره، لایهای از سیلیكون (Si) و مكسین دو بعدی ارائه دادند، به منظور تحلیل عددی ساختار، از روش ماتریس انتقال² (TMM) استفاده شده است (شكل 13 الف)). پژوهش های صورت گرفته نشان داد كه استفاده از لایه مكسین به دلیل مساحت سطحی بیشتر و اندركنش قوی بین ماده و نور، جذب مولكول های زیستی را تسهیل می كند.



شکل 13- الف) ساختار زیستحسگر پیشنهاد شده ب) بازتاب نسبت به تغییرات ضریب شکست بدون لایه Si (ج) با لایه Si [77].

علاوهبراین حساسیت، دقت تشخیص و ضریب شایستگی برای فلز نقره به ضخامت 50 نانومتر، سیلیکون به ضخامت 5 نانومتر و برای تکلایهای از مکسین، به ترتیب برابر با مقادیر 231 deg/RIU 0/171/deg و 3/83 28/83 حاصل شده است. براساس گزارشهای انجامشده ساختار زیست حسگر بدون لایه سیلیکون از حساسیت، دقت تشخیص و ضریب شایستگی به ترتیب برابر با حساسیت، دقت تشخیص و ضریب شایستگی به ترتیب برابر با دساسیت، دقت تشخیص و ضریب شایستگی به ترتیب برابر با مسامید، دقت تشخیص و ضریب شایستگی و مکسین باعث بهبود نشان می دهد استفاده از لایه سیلیکون، بین نقره و مکسین باعث بهبود عملکرد زیست حسگر شده است [47]. در سال 2018 گروه تحقیقاتی دیگری ساختار زیست حسگر پلاسمونی را برای تشخیص مرام با استفاده از منشور SF10، فلز طلا، دی سولفید تنگستن و گرافن پیشنهاد دادند (شکل 14 (الف)) [45]. برای تحلیل رفتار

¹ Kumar et al

² Transfer Matrix Method (TMM)

ديابت در بيماران استفاده شد. در طرح ارائهشده اولين لايه، منشور BK7، با ضريب شكست 1/5151 RIU در طول موج 633 نانومتر درنظر گرفتهشده که فلز نقره روی آن رسوب می کند تا امکان تحریک يلاسمون هاي سطحي را فراهم كند. سيس، ديسولفيد موليبدن روي لایه نقره قرار میگیرد که برهمکنشهای نور - ماده و جذب انرژی را افزايش دهد، زيرا بخش حقيقي ضريب شكست آن بزرگ است. لايه ترى اكسيد موليبدن با شكاف نوارى در حدود 2/39 تا 2/90 الكترون - ولت، بر لايه MoS2 لايهنشاني مي شود. ضريب شكست مختلط MoS2 = 5/0947 + 1/2327 i و ضریب شکست MoS2 MoO3 برابر با MoO3 = 1/8233 + 0/00204 i در طول موج مرئی در نظر گرفته شده است [7]. ماده دوبعدی Ti3C2Tx MXene بهعنوان لایه پنجم تعامل بین لایهای و زیستسازگاری عالی را فراهم مى كند و ضريب شكست آن برابر با nMXene = 2/38 + 1/33 i در طول موج 633 نانومتر است. آخرین لایه، محیط حسگری است که آنالیتها در آن قرار دارند، از آنجا که Ti3C2Tx MXene مساحت سطحي بزرگي دارد و به دليل ماهيت لايهاي آن، سطح تماس مناسبي را برای اتصال آنزیم گلوکز اکسیداز (GOx) فراهم میکند. آنزیم گلوکز اکسیداز تثبیتشده روی سطح مکسین تعامل با محلول گلوکز را امکان پذیر میکند. بنابراین هنگامی که گلوکز در محل های فعال² آنزیم قرار میگیرد، ضریب شکست محیط حسگری تغییر میکند و باعث جابجایی در زاویه تشدید پلاسمونی می شود. در این طرح غلظت محلول گلوکز در محدوده وزنی صفر تا 30 درصد درنظر گرفتهشده و ضریب شکست آن از 1/3282 تا 1/377 (RIU Δn =0/0488) متغير فرض شده است[7].



شکل 15- طرحواره زیستحسگر SPR پیشنهادشده چندلایه برای تشخیص گلوکز [7]. نوری حسگر پیشنهادشده و محاسبه میدانهای الکترومغناطیسی از روش ماتریس انتقال استفاده شده است. بررسیهای انجام شده نشان داد که افزایش تعداد لایههای گرافن، بدون لایه WS2 حساسیت ساختار را بالا میبرد، درحالیکه موجب کاهش سایر پارامترهای عملکرد زیست حسگر همچون دقت تشخیص و ضریب کیفیت¹ میگردد. این گروه پژوهشی برای بهبود عملکرد ساختار زیست حسگر از تکلایه WS2، بین لایه گرافن و طلا استفاده نمودند و تغییرات طیف بازتاب را به ازای ضریب شکستهای مختلف NAA بررسی کردند (شکل 14 (ب)). نتایج نشان داد که استفاده از دی سولفید تنگستن ضمن بهبود پارامترهای عملکرد زیست حسگر، دی سولفید تنگستن ضمن بهبود پارامترهای عملکرد زیست حسگر، حساسیت را به مقدار 95/71 deg/RIU و ضریب کیفیت را به میزان



شکل 14- الف) ساختار زیستحسگر SPR برای تشخیص DNA ب) نمودار بازتاب نسبت به ضریب شکستهای مختلف DNA [45].

در سال 2023 یک زیست-سگر SPR مبتنی بر پیکربندی FDTD میتنی بر ویک زیست-سگر SPR مبتنی بر پیکربندی ارزیابی شد. حسگر پیشنهادی با استفاده از منشور BK7، فلز نقره، دی سولفید مولیبدن (MoO3)، تری اکسید مولیبدن (MoO3) و مکسین کاربید تیتانیوم (Ti3C2Tx MXene) طراحی شد همان گونه که در شکل 15 نشان داده شده است [7]. در این کار پژوهشی از غلظتهای مختلف گلوکز در یک محلول آبی برای تشخیص وجود

² Active Sites

¹ Quality Factor (QF)

برای بررسی مزایای ساختار پیشنهادشده، عملکرد چهار زیست حسگر در شکل 16 (الف) تا (د) ارزیابی شده است. در ساختار 1، شکل 16 الف) با M =0 و N = 0، که در آن N و M به ترتیب تعداد لایههای MoS2 و MXene هستند حساسیت برابر با 147/96 deg/RIU و جابجايي زاويه تشديد برابر با 1/450 درجه برای تغییرات ضریب شکست ۵۸ ۵۳/۵۵۹ An در محیط سنجش حاصل شد. در ساختار2، Error! Reference source not کل 16 ب) با M = 1 وM = 1. جابجایی زاویه تشدید برابر با found. 1/870درجه و حساسیت 190/82 deg/RIU به دست آمد. در ساختار 3، شكل 16 ج) با M =0 وN = N حساسيت برابر deg/RIU 148/11 و جابجایی زاویه تشدید 1/451 درجه تعیین شد. در ساختار 4، شکا, 16 د) با M =1 و N = 1 حساسیت برابر با deg/RIU 196/94 و جابجايي زاويه تشديد 1/930 درجه حاصل شد. براساس نتايج گزارش شده ساختار 4 (زيستحسگر پيشنهاد شده) بهدليل وابستگی به راندمان جذب لایههای مختلف، حساسیت بالاتری را در مقایسه با سه ساختار دیگر نشان می دهد [7].



شکل 16- طیف بازتاب با زاویه نور فرودی $N = 0 \ M = 1$ (ب) $N = 0 \ M = 1$ (س) $N = 0 \ M = 1$ (س) $N = 1 \ M = 0$ (س) $N = 1 \ M = 0$ (ساختار پیشنهادی) [7].

مروری بر پیشرفتهای اخیر در زیستحسگرهای تشدی پلاسمون سطحی مبتنی بر پیکربندی کرچمان با تمرکز بر مواد دوبعدی

شکل 17 (الف) تا (د) جابجایی طیف بازتاب را با تغییرات غلظت گلوکز برای چهار ساختار نشان می دهد. مشاهده می شود که برای هر نمونه از محلول گلوکز، یک افت در طیف بازتاب وجود دارد و با افزایش غلظت نمونه، زاویه تشدید به سمت زوایای بزرگتر جابجا می شود. براساس نتایج گزارش شده ساختار پیشنهاد شده در مقایسه با سه ساختار دیگر دارای تغییرات طیفی بزرگتری است. بیشترین سه ساختار دیگر دارای تغییرات طیفی بزرگتری است. بیشترین منشور BK7، نقره به ضخامت 45 نانومتر، تکلایهای از MXens ضخامت 10 نانومتر ۵۵03 و سه لایه از MXens برای تشخیص گلوکز با MXens است[7].





به طور مشابه، پال و همکاران¹ [31] یک ساختار ناهمگون واندوالس را با استفاده از TMDCs ،BP و MXene پیشنهاد کردند (شکل 18(الف)). پارامترهای عملکرد حسگر SPR با تعداد لایههای

¹ Pal et al

MXene ، BP و TMDCs مختلف بررسی شد. این گروه تحقیقاتی توانستند به حساسیت قابل توجه 388 deg/RIU با نُه لایه BP، تکلایه MXene و سه لایه WS2 دست یابند. علاوهبراین، ضریب شایستگی برابر با 1/RIU و دقت تشخیص برابر با 21/deg از نتایج دیگر ساختار حسگر پیشنهادی این گروه تحقیقاتی است.



MXene با فسفر سیاه، TMDCs و SPR با فسفر سیاه، TMDCs و MXene و (ب) تغییرات حساسیت نسبت به تغییرات ضریب شکست لایه حسگری به ازای TMDCs مختلف[31].

در سال 2018 یک حسگر تشدید پلاسمون سطحی با استفاده از مکسین پیشنهاد شده است. ساختار ارائه شده از منشور BK7، لایههایی از فلز طلا و MXene تشکیل شده است (شکل 19 (الف)). بررسیهای انجام شده نشان داد با تغییر ضریب شکست برابر با 20/05 = ۵۸ در ناحیه سنجش، ساختار حسگر بدون لایه MXene، دارای حساسیت 137 deg/RIU است و با اضافهشدن لایه

MXene به ساختار، حساسیت حسگر به حدود MXene به ساختار، حساسیت حسگر نسبت به میرسد (شکل 19 (ب)). همچنین حساسیت حسگر نسبت به تغییرات نوع فلز به ازای طلا (Au)، نقره (Ag)، آلومینیوم (Al) و مس (Cu)، و تعداد لایههای مختلف MXene مورد بررسی قرار گرفته شد. نتایج بررسیهای انجام شده افزایش 46 درصدی حساسیت را نشان دادکه با فلز Al و با 12 لایه MXene حاصل شد [16].



0.2^{(0), 10, 1, 3²2² x | 1 65 70 75 80 85 90 Incident angle (degree) (ب)}

(b) Au+Ti_sC_sT

شکل 19- (الف) ساختار زیستحسگر SPR با استفاده از MXene (ب) تغییرات طیف بازتاب با زاویه نور فرودی [16].

چشماندازهای آینده

در دهههای اخیر، شیوع بیماریهای انسانی بهطور پیوسته افزایش یافته است، ازاینرو محققان باید استفاده از سیستمهای زیستحسگری با دسترسی آسان، دقت تشخیص و حساسیت بالا را برای منافع عمومی گسترش دهند. تا به حال، زیستحسگرهای متنوعی ارائه شدهانـد کـه

مروری بر پیشرفتهای اخیر در زیستحسگرهای تشدی پلاسمون سطحی مبتنی بر پیکربندی کرچمان با تمرکز بر مواد دوبعدی

نتيجەگيرى

در این مقاله، مروری بر زیستحسگرهای SPR مبتنی بر منشور با پیکربندی کرچمان انجام شد. ساختارهای مختلفی از حسگرهای SPR با استفاده از انواع مواد دوبعدی مورد مطالعه قرار گرفته شد. پارامترهای عملکرد زیستحسگرها همچون حساسیت، ضریب شایستگی و دقت تشخیص بررسی شدند. در جدول 3 یارامترهای عملکرد حسگرهای SPR مبتنی بر مواد دوبعدی براساس پیکربندی کرچمان که در چند سال اخیر گزارش شدهاند آورده شده است. یژوهش های انجام شده نشان میدهد که ترکیب مواد دوبعدی با فلزات نجیب نقش بسزایی در توسعه و بهبود پارامترهای عملکردی زیست حسگرها دارند. این مواد نه تنها حساسیت را افزایش می دهند بلکه از لایههای فلزی در برابر اکسیداسیون نیز محافظت میکنند. زيستحسگرهاي پلاسموني ابزاري توانمند جهت شناسايي مولکول های زیستی هستند، و مزایایی همچون حساسیت بالا، دقت تشخيص خوب، تكراريذيري عالى، قابليت تشخيص بدون برچسب، امکان تشخیص آنالیتها با غلظت و حجم کم را ارائه میدهند. در نتیجه، در بسیاری از کاربردها از جمله نظارت بر محیط زیست، صنایع غذایی، صنایع کشاورزی، صنایع شیمیایی و بهویژه در حوزه پزشکی استفاده میشوند. بیشترین کاربرد زیستحسگرها در تشخیص های پزشکی و علوم آزمایشگاهی است، بنابراین با توجه به افزایش روزافزون بیماریهای مختلف، نیاز به حسگرهایی با قابلیت استفاده آسان و تشخیص سریع بیشاز پیش احساس میشود.

م_____ مرانبه زیست حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی، زیست حسگرهای مبتنی بر توری [9]، موجبر نوری [2]، فیبرهای نورى[8]، و زيست حسگرهاي مبتني بر بلورهاي فوتوني[43، 42، 4] اشاره نمود. طراحي و ساخت زيستحسگرهاي پلاسموني متنوع با استفاده از مواد دوبعدی نشان میدهـد ايـن مـواد نقـش مهمـی در بهبود عملکرد زیستحسگرهای پلاسمونی دارند. بنابراین با پیشرفت فناوری نانو مواد، پیشبینی میشود که حسگرهای پلاسمونی بتوانند مواد زیستی و یا شیمیایی را با حساسیت و سرعت خوبی تشخیص دهند. یکی از مسائل مهم در مطالعات زیست حسگری انتخاب گری، بهبود پایداری شیمیایی و حرارتی به ویژه در دماهای بالا و در محیطهای مرطوب است. ایجاد برهمکنش های غیر اختصاصی در سطح حسگر و تغییرات ناخواسته ضریب شکست محیط حسگری که به طور معمول از ناپایداری حرارتی، تداخل رطوبت یا تغییرات ترکیب نشات میگیرد چالش برانگیز است. بنابراین محققان بایـد بـر گزینش پذیری و انتخاب گری زیست حسگرهای پلاسمونی توجه ویژهای داشته باشد. اگرچه، محققان ساختارهای جدید را برای افزایش پارامترهای عملکرد حسگر مانند حساسیت، دقت تشخیص، ضریب شایستگی و ضریب کیفیت در کاربردهای مختلف پیشنهاد کردهاند. بااینوجود باید حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی را با استفاده از روشهای عددی برای طول موجهای نزدیک به فروسـرخ و غیرمرئی توسعه دهند. مواد دوبعدی مانند گرافن، BP ،MXene، TMDCs ،hBN و غیرہ نقش مہمی در بھبود پارامترہای عملکرد زیستحسگرها دارند، بااین حال تحقیقات بر روی نانو مواد دوبعدی هنوز در مراحل ابتدایی است و به عنوان یک زمینه بسیار جـ ذاب از علم و فناوري نياز به پژوهش و تحقيقات بيشتري دارد.

		 پارامتر					
منبع	مواد لايهای و پيکربندی	روش	λ (nm)	S (deg/RIU)	QF (1/RIU)	FWHM (deg)	
[15]	BK7/ZnO/Ag/Au/graphen	SPR	632/8	76	13/79	_	
[12]	SF10/ZnO/Au/MoS2/graphene	SPR	632/8	101/58	15/11	-	
[16]	BK7/Au/ Ti3C2Tx	SPR	633	160	-	-	
[11]	BK7 / Au / TMDC / Au / Ti3C2Tx	SPR	633	198	-	-	
[31]	Prism/ Au/ Si/ BP/ TMDCs layers	SPR	633	163/1	11/13	14/65	
[28]	Prism/Au/ BlueP/ MoS2/ Antimonene	SPR	633	194/8	25/37	6/6	
[35]	Prism/Zno/Ag/Au/ BaTiO3	SPR	632/8	116/67	32/87	_	
[19]	BK7/ Au / Ti3C2Tx/ WS2/ BP	SPR	633	190/22	15/51	12/26	
[20]	SiO2 / Ag / graphene / Ti3C2Tx	SPR	633	196/86	-	8/44	
[23]	Prism/Au/BP /graphene	SPR	633	218	26/13	8/34	
[27]	Prism/Ti/ Ag/ graphene/ MXene/ MoS2	SPR	633	144/72	-	_	
[32]	Prism/ Metal/ Si/ metal/ PtSe2	SPR	633	193	18/31	10/58	
[7]	BK7 Ag/ MoS2/ MoO3/ Ti3C2Tx (M = 3)	SPR	633	227/08	35/09	6/47	
[22]	BK7 Ag/ Au/ WS2/ Ti3C2Tx ($M = 4$)	SPR	633	348	28/07	_	
[10]	SF11/glass/Ag/WS2/graphene/Ti3C2Tx (M = 4)	SPR	633	273/53	41/50	6/59	

جدول3- مقایسه پارامترهای عملکرد حسگرهای پلاسمونی گزارش شده در سالهای اخیر.

مروری بر پیشرفتهای اخیر در زیستحسگرهای تشدی پلاسمون سطحی مبتنی بر پیکربندی کرچمان با تمرکز بر مواد دوبعدی

References:

- 1- S.A. Maier, Plasmonics: Fundamentals and Applications, Springer Science & Business Media, 2007.
- 2- M.R. Rakhshani, A. Tavousi, M.A. Mansouri-Birjandi, "Design of a plasmonic sensor based on a square array of nanorods and two slot cavities with a high figure of merit for glucose concentration monitoring", Appl. Opt., vol. 57, no. 27, pp.7798–7804, 2018.
- 3- C.F. Snyder, A.T. Hattenburg, "Refractive indices and densities of aqueous solutions of invert sugar", 1963.
- 4- M. Hosseinzadeh Sani, A. Ghanbari, H. Saghaei, High-sensitivity biosensor for simultaneous detection of cancer and diabetes using photonic crystal microstructure, Opt Quantum Electron., vol. 54, no. 2, 2022.
- 5- E. Kretschmann and H. Raether, "Radiative decay of non-radiative surface plasmons by light," Z. Naturforsch, vol. 23, no. a, pp. 2135–2136, 1968.
- 6- A. Otto, "Excitation of nonradiative surface plasma waves in silver by the method of frustrated total reflection," Zeitschrift für Phys., vol. 216, no. 4, pp. 398–410, 1968.
- 7- M. Ghodrati, A. Mir, A. Farmani, "Numerical analysis of a surface plasmon resonance based biosensor using molybdenum disulfide, molybdenum trioxide, and MXene for the diagnosis of diabetes", Diam. Relat. Mater.,vol. 132,109633,2023.
- 8- S. A. Madani, M. Bahrami, and A. Rostami, "Modulation instability and highly sensitive optical fiber biosensor", OSA Contin., vol. 1, pp. 816-825, 2022.
- 9- Sh. Joseph, S. Sarkar, J. Joseph, "Grating Coupled Surface Plasmon Sensor with Large Penetration Depth", ICEE, 2020, doi.org/10.1109/ICEE50728.2020.9777094.
- 10- M. Ghodrati, A. Mir, A. Farmani, "Proposing of SPR biosensor based on 2D Ti3C2Tx MXene for uric acid detection immobilized by uricase enzyme", J Comput Electron (2022). https://doi.org/10.1007/s10825-022-01959-w.

- 11- Y. Xu, Y.S. Ang, L. Wu, L.K. Ang, "High sensitivity surface plasmon resonance sensor based on two-dimensional MXene and transition metal dichalcogenide: a theoretical study", Nanomaterials., vol. 9, no. 2, 165, 2019.
- 12- A.S. Kushwaha, A. Kumar, R. Kumar, S, Srivastava, "A study of surface plasmon resonance (SPR) based biosensor with improved sensitivity", Photonics Nanostructures - Fundam. Appl., vol. 31, pp. 99–106, 2018.
- 13- A. Naderi, M. Ghodrati, "Improving band-toband tunneling in a tunneling carbon nanotube field effect transistor by multi-level development of impurities in the drain region", Eur. Phys. J. Plus. vol.132 p.510, 107397, 2017.
- 14- M. Ghodrati, A. Mir, A. Naderi, "New structure of tunneling carbon nanotube FET with electrical junction in part of drain region and step impurity distribution pattern", AEU- Int. J. Electr. Commun. vol. 117, 153102, 2020.
- 15- R. Kumar et al., "Enhancement in sensitivity of graphene-based zinc oxide assisted bimetallic surface plasmon resonance (spr) biosensor", Appl. Phys. A., vol. 124, no. 3, pp. 1–10, 2018.
- 16- LM. Wu, Q. You, YX. Shan et al., "Fewlayer Ti3C2Tx MXene: A promising surface plasmon resonance biosensing material to enhance the sensitivity", Sensor Actuat. B Chem., vol. 277, pp. 210–215, 2018.
- 17- A. Naderi, M. Ghodrati, S. Baniardalani, "The use of a Gaussian doping distribution in the channel region to improve the performance of a tunneling carbon nanotube field-effect transistor", J Comput. Electron., vol. 19, pp. 283-290, 2020.
- 18- A. Naderi, and M. Ghodrati, "An efficient structure for T-CNTFETs with intrinsic-ndoped impurity distribution pattern in drain region", Turk J. Electr. Eng., vol. 26, pp. 2335 – 2346, 2018.
- 19- A. Srivastava, A. Verma, R. Das et al., "A theoretical approach to improve the performance of SPR biosensor using MXene and black phosphorus", Optik., vol.203, 163430, 2020.

مـريم قدرتي | 69

- 20- AK. Pandey, "Graphene-Ti3C2Tx MXene hybrid nanostructure: a promising material for sensitivity enhancement in plasmonic sensor", Appl. Phys. A., vol. 127, no. 2, pp.1–6, 2021.
- 21- A. Naderi, and M. Ghodrati, "Cut Off Frequency Variation by Ambient Heating in Tunneling p-i-n CNTFETs", ECS J. Solid State Sci. Technol, vol. 7, pp. M6-M10, 2018.
- 22- M. Ghodrati, A. Mir, A. Farmani," Sensitivity-Enhanced Surface Plasmon Resonance Sensor with Bimetal/ Tungsten Disulfide (WS2)/MXene (Ti3C2Tx) Hybrid Structure", Plasmonics, vol. 17, pp.1973–1984, 2022.
- 23-Y. Singh, M. K. Paswan, and S. K. Raghuwanshi, "Sensitivity Enhancement of SPR Sensor with the Black Phosphorus and Graphene with Bilayer of Gold for Chemical Sensing," Plasmonics, vol. 16, pp. 1781–1790, 2021.
- 24-B.Dey, M.S.Islam, and J.Park, "Numerical design of high-performance WS2/metal/WS2/graphene heterostructure based surface plasmon resonance refractive index sensor," Results Phys., vol. 23, p. 104021,2021.
- 25- M. Ghodrati, A. Farmani, and A. Mir, "Nanoscale Sensor-Based Tunneling Carbon Nanotube Transistor for Toxic Gases Detection: A First-Principle Study", IEEE Sens. J., vol. 19, pp. 7373 – 7377, 2019.
- 26- M. Ghodrati, A. Mir, A. Naderi, "Proposal of a doping-less tunneling carbon nanotube fieldeffect transistor", Mater. Sci. Eng. B., vol. 265, 115016, 2021.
- 27- A. Kumar, A. Kumar, S.K. Srivastava, "A study on surface plasmon resonance biosensor for the detection of CEA biomarker using 2D materials graphene, Mxene and MoS2", Optik, vol. 258, 168885, 2022.
- 28- M.K. Singh, S. Pal, Y.K. Prajapati, J.P. Saini, "Sensitivity improvement of surface plasmon resonance sensor on using BlueP/MoS2Heterostructure and antimonene", IEEE Sensors Letters, vol. 4, pp. 1–4, 2020.
- 29- M. Ghodrati, A. Mir, A. Farmani, "Nondestructive label-free biomaterials detection using tunneling carbon nanotube-based biosensor", IEEE Sens. J., vol. 21, pp. 8847-8854, 2021.

- 30- M. Ghodrati, A. Mir, and A. Farmani, "Carbon nanotube field effect transistorsbased gas sensors", in Nanosensors for Smart Cities. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier. (2020) 171–183.
- 31- S. Pal, A. Verma, J.P. Saini, Y.K. Prajapati, "Sensitivity enhancement using silicon black phosphorus–TMDC coated surface plasmon resonance biosensor" IET Optoelectronics., vol. 13, no. 4, pp. 196–201, 2019.
- 32- Z. Lin, Y. Shu, W. Chen, Y. Zhao, J. Li, "High-Sensitivity PtSe2 Surface Plasmon Resonance Biosensor Based on Metal-Si-Metal Waveguide Structure", Biosensors., vol. 12, no. 27, 2022.
- 33- M. Ghodrati, A. Mir, A. Farmani, "Improving the Angular Sensitivity of a Surface Plasmon Resonance Biosensor Based on bilayer of Ag and MXene: a Simulation-Based Approach", 11th Majlesi Conference on Electrical Engineering, Islamic Azad University Majlesi Branch, IRAN, 2022.
- 34- M. Ghodrati, A. Mir, A. Farmani, "Proposal of a plasmonic sensor based on 2D material Ti3C2Tx MXene in terahertz frequency", 1th National Conference on Soft Computing of Engineering Science in Industry and Society, Velayat University, IRAN, 2022.
- 35- N. Mudgal, A. Saharia, A. Agarwal, and G. Singh, "ZnO and Bi-metallic (Ag–Au) Layers Based Surface Plasmon Resonance (SPR) Biosensor with BaTiO3 and Graphene for Biosensing Applications," IETE J. Res., 2020, doi: 10.1080/03772063.2020.1844074.
- 36-A.Z. Warsi, F. Aziz, S. Zulfiqar, S. Haider, I. Shakir, P.O. Agboola, "Synthesis, Characterization, Photocatalysis, and Antibacterial Study of WO3, MXene and WO3/MXene Nanocomposite", Nanomaterials.,vol.12,713,2022.
- 37- M. Ghodrati, A. Mir, "Improving the Performance of a Doping-Less Carbon Nanotube FET with Dual Junction Source and Drain Regions: Numerical Studies", J. Circuits Syst. Comput., 2022, doi.org/10.1142/S0218126622501821.
- 38] M. Ghodrati, A. Mir, A. Farmani, "FDTD Analysis of a High-Sensitive SPR Biosensor employing 2D Material MXene (Ti3C2Tx) for Biosensing Applications", 11th Majlesi

مروری بر پیشرفتهای اخیر در زیستحسگرهای تشدی پلاسمون سطحی مبتنی بر پیکربندی کرچمان با تمرکز بر مواد دوبعدی 70 | فصلنامه لیزر در پزشکی / دوره بیستم / شماره (1)

Conference on Electrical Engineering, Islamic Azad University Majlesi Branch, IRAN, 2022.

- 39] Ch. Peng et al., "WO3 Nanorods/MXene composite as high performance electrode for Supercapacitors", J. Alloys Compd., vol. 810, 151928, 2019.
- 40] Y. Zhao, Y. Zhang, Z. Yang, Y. Yan K. Sun, "Synthesis of MoS2 and MoO2 for their applications in H2 generation and lithium ion batteries: a review", Sci. Technol. Adv. Mater., vol. 14, 043501, 2013.
- 41] F. Parandin, F. Heidari, Z. Rahimi, S. Olyaee, "Two-Dimensional photonic crystal Biosensors: A review", Opt Laser Technol.,vol. 144, 107397, 2021.
- 42] Q. Shangguan, Z. Chen, H. Yang, S. Cheng, W. Yang, Z. Yi, X. Wu, S. Wang, Y. Yi, P. Wu, "Design of Ultra-Narrow Band Graphene Refractive Index Sensor", Sensors 2022, 22, 6483. https://doi.org/10.3390/s22176483.
- 43] D. Wang, Z. Yi, G. Ma, B. Dai, J. Yang, J. Zhang, Y. Yu, C. Liu, X. Wu, Q. Bian, " Two-channel photonic crystal fiber based on surface plasmon resonance for magnetic field and temperature dual-parameter sensing", Phys. Chem. Chem. Phys., 2022,24, 21233-21241.
- 44] H. Chen Z. Chen, H. Yang, L. Wen, Z. Yi, Z. Zhou, B. Dai, J. Zhang, X. Wue and P. Wuf, "Multi-mode surface plasmon resonance absorber based on dart-type single-layer graphene", RSC Adv., 2022,12,

- 45- M.S. Rahman et al., "A novel graphene coated surface plasmon resonance biosensor with tungsten disulfide (WS2) for sensing DNA hybridization", Optical Materials. 75, pp. 567–573, 2018. DOI:https://doi.org/10.1016/j.optmat.2017.11.013.
- 46-Wu, L., Guo, J., Wang, Q., Lu, S., Dai, X., Xiang, Y. and Fan, D. "Sensitivity enhancement by using few-layer black phosphorus-graphene/TMDCs heterostructure in surface plasmon resonance biochemical sensor", Sensors and Actuators B: Chemical.249, pp.542–548, 2017.
- 47- R. Kumar, et al., "Sensitivity enhancement of MXene based SPR sensor using silicon: Theoretical analysis", Silicon. 13, 6, pp.1887–1894, 2021.
- 48- D.T. Nurrohman, N.F.Chiu, "A review of graphene-based surface plasmon resonance and surface-enhanced raman scattering biosensors: Current status and future prospects", Nanomaterials. 11, 1, 2021, 1–30. DOI:https://doi.org/10.3390/nano11010216.
- 49-G.P. Singh, N. Sardana, "Smartphone-based Surface Plasmon Resonance Sensors: a Review", Plasmonics, 2022. DOI:https://doi.org/10.1007/s11468-022-01672-1.
- 50- Z. Xiao et al., 2020. MXenes and MXenesbased Composites.
- 51- M. Ghodrati, A. Mir, and A. Farmani, "2D Materials/Heterostructures/Metasurfaces in Plasmonic Sensing and Biosensing", in Plasmonics-Based Optical Sensors and Detectors. Jenny Stanford Publishing. (2024) 339–371.