

طراحی حسگر تشخیص مایعات مبتنی بر تغییر ضریب شکست محیط و بررسی ویژگی‌های آن

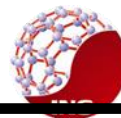
مهران نادی، زهرا اعلایی ورنوسفادرائی*

دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد

چکیده

یکی از مسائل کلیدی زیست حسگرهای تشدید پلاسمون سطحی که اغلب پژوهشگران بر آن متمرکز شده اند بهبود حساسیت آن برای آشکارسازی مقادیر کوچک آنالیت در یک محلول است. اغلب توسعه ها در این خصوص، بر روش بهبود حساسیت ناشی از پدیده تشدید پلاسمون سطحی موضعی متمرکز شده است که بهبود حساسیت آن ناشی از مکانی کردن پلاسمون پلاریتون های سطحی بر یک سطح نانو ساختاری است. در این تحقیق عملکرد حس گرهای پلاسمونی سطحی موضعی در نانو ساختارها که کارایی وسیعی در زمینه پزشکی، داروسازی و اندازه گیری پارامترهای شیمیایی و فیزیکی تا مانیتورینگ ها را دارد مورد بررسی قرار می دهیم. گسترش روزافزون این شاخه از علم را می توان بیشتر به پایین آوردن حد پراش نور و کوچک تر کردن آن از مرتبه طول موج نسبت داد. کیفیت و کارایی این حس گرها به دو عامل حساسیت و ضریب شایستگی وابسته است. عملکرد سنسورهای پلاسمونی مستقیم با مقدار اتلاف انرژی در ساختار فلزی یک سنسور ارتباط دارد. به عنوان مثال، استفاده از یک سازه فلزی با تلفات زیاد منجر به گسترش موج رزونانس پلاسمونی شده و از این رو ضریب شایستگی سنسور را کاهش می یابد. سادگی، پیاده سازی آسان تر، هزینه ی کم، قابلیت اندازه گیری محلی، باعث شده حسگرهای پلاسمونی سطحی موضعی نسبت به حس گرهای پلاسمون سطحی انتشاری اولویت داشته باشند. افزون بر این، در این زیست حس گرها خصوصیات حسگری، اغلب در طول موج های مرئی مورد مطالعه قرار گرفته و از آنجائی که در رژیم نزدیک فروسرخ، موج الکترومغناطیسی حاصل از تشدید پلاسمون سطحی عمق نفوذ زیادی داشته و همچنین تعیین دقیق تر عمق های آن در این رژیم امکان پذیر است، تحقق یک حس گر پلاسمونی سطحی موضعی در محدوده طول موج های نزدیک فروسرخ از اهمیت ویژه ای برخوردار است. ما یک آرایه سه بعدی از نانو ساختار هیبریدی متشکل از هسته طلا و پوسته های اول و دوم به ترتیب هگزاگونال بورنیتريد - گرافن را بر روی یک بستر شامل سیلیکا و سیلیکون نیتريد به عنوان یک حس گر مایعات شبیه سازی کردیم، که دارای ضریب شایستگی و حساسیتی به ترتیب برابر ۱۲۵۰ و ۲۸۳ nm/RIU است، که یک بهبود قابل توجهی نسبت به کارایی پیشین در زمینه ی حس گرهای تشدید پلاسمون منطقه ای است.

واژه های کلیدی: پلاسمونیک، تشدید پلاسمون سطحی موضعی، ضریب شایستگی، حساسیت، هگزاگونال بورنیتريد.



۱- مقدمه

پلاسمون، درواقع برانگیختگی دسته‌جمعی گاز الکترون ماده رسانا به‌وسیله تابش است نوسانات بار در این محدوده‌های نانو باعث ایجاد باند تشدید قوی هم در جذب و پراکندگی شده که امکان تنوع کاربردهای متفاوت را می‌دهد. در طی دهه های گذشته پدیده تشدید پلاسمون سطحی به دلیل سرعت و دقت حسگری نوری در اندازه گیری پارامترهای متفاوت فیزیکی، شیمیایی و بیوشیمیایی توجه زیادی به خود جلب کرده است [۱]. با توجه به ویژگی منحصره‌فرد نانو ساختارهای فلزی، امروزه کاربرد آن‌ها در زمینه‌های متفاوت موردبررسی قرارگرفته است. تشدید پلاسمون سطحی منطقه‌ای (LSPR) یکی از این خصوصیات ویژه است که به تازگی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. این تشدیدها مرتبط با نانو ساختارهای فلزات نوبل است که در اثر برهم‌کنش نور با نانو ساختارها، طیف جذبی تیز و پیک‌های پراکندگی شدیدی در طول‌موج‌های مشخصی به وجود می‌آورند. در دهه گذشته شاهد بهبودهای مهمی در تهیه نانو ساختارهای فلزی نوبل بوده‌ایم که سبب توسعه در چندین زمینه علوم و فناوری بر پایه پلاسمونیک بوده است. راملی^۶ و همکاران [۲] حسگر گازی LSPR را برای تشخیص گازهای حاوی ترکیبات آلی فرار طراحی کرده اند. وود^۷ و همکاران پیشگام کاربرد حسگر LSPR برای استفاده و شناسایی بیماری آلزایمر بودند و آن را مورد بررسی قرار دادند [۳]. دمیرکی^۸ و گروهش زیرمجموعه های HIV را با استفاده از LSPR به خوبی شناخته‌اند [۴،۵،۶]. کاربردهای دیگر حسگر LSPR شامل تشخیص گلوکز در ادرار [۷]، پلاسمای خون [۸]، سرم [۹] و مایع مغزی نخاعی [۱۰]، تشخیص ویروس و سرطان است [۱۱،۱۲] پارک و همکارانش [۱۳]، یک حسگر برای تشخیص جیوه که براساس انتقال LSPR یک نانوحلقه طلا است در گستره غلظت نانو تا غلظت میلی مولار ایجاد کردند. طلا به‌عنوان یکی از مناسب‌ترین مواد، به دلیل مقاومت بالا در برابر اکسیداسیون و داشتن پایداری شیمیایی بالا به عنوان فلز در نانوحسگرها نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. با این حال، قابلیت اندرکنش بیومولکول ها با طلا پایین است، بنابراین باعث کاهش حساسیت حسگر می‌شود. برای رفع این مشکل، در مطالعات اخیر بر ساختار بیوحسگرها از یک یا چند لایه گرافن به دلیل بالا بودن نسبت سطح به حجم و تحرک پذیری الکتریکی بالا و ساختار اتمی پایدار استفاده شده است [۱۴]. گرافن در پلاسمونیک یکی از موضوعات داغ با توجه به ویژگی‌های فوق‌العاده گرافن است، توانایی کنترل هدایت پویا از طریق ولتاژ خارجی و از سوی دیگر، پشتیبانی از موج سطحی گرافن، که ساختارهایی با انتشار امواج سطحی را ارائه می‌دهد بسیار موردتوجه قرارگرفته و همچنین ساخت این سازه‌ها به نسبت ساده و مقرون‌به‌صرفه است. گرافن به علت ویژگی‌های فوق‌العاده‌ای مانند شفافیت در طیف نور سفید، تحرک الکتریکی بالا، افت کم اهم، مساحت سطح بالا و شکاف باند قابل تنظیم، به تازگی در جنبه‌های نظری و تجربی نیز توجه زیادی را به خود جلب کرده است. عدم وجود گاف باند در

گرافن، از افزایش قابل توجه حساسیت بیوحسگرهای مبتنی برگرافن ممانعت می‌کند. دراین زمینه بورنیتريد شش‌ضلعی نیزهمانند گرافن، می‌تواند متورق شده و لایه‌های نازکی ایجاد کند. لیام بریتنل^۹ از محققان این پروژه می‌گوید با کوچک شدن قطعات الکترونیکی می‌توان از بورنیتريد به‌عنوان لایه‌ی دی‌الکتريک استفاده کرد. یک گروه تحقیقاتی در دانشگاه کلمبیا در سال ۲۰۱۰ گزارش کردند که گرافن روی بستر بورنیتريد هدایت الکتریکی بسیار بیشتری نسبت به دی‌اکسید سیلیکون خواهد داشت، بنابراین، برای جلوگیری از تغییر در ساختار الکترونیکی گرافن، باید از ماده‌ای که دارای باند گپ بزرگ و فاقد پیوندهای دانگلینگ^{۱۰} باشد به‌عنوان بستر استفاده کرد. برخلاف گرافن که یک شبه فلز است و با گاف نواری صفر عایق الکتریکی است، بورنیتريد دارای باند گپ انرژی بالایی حدود ۵ الکترون‌ولت است [۱۵]. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که ازنقطه‌نظر توپوگرافی گرافن روی بور نیتريد با گرافن روی دی‌اکسید سیلیس تفاوت زیادی دارند. زبری گرافن روی بورنیتريد بسیار کمتر از گرافن روی دی‌اکسید سیلیس است. همچنین دانسیته بار روی بستر بورنیتريد بسیار کمتر است. عموماً حسگرهای پلاسمونی سطحی موضعی به دلیل آلایش یا میرایی تشعشعی بالا بر روی پلاسمون های سطحی دارای پیک‌های رزونانسی عریض بوده که باعث کاهش ضریب شایستگی حسگر می شود و این بر خلاف حسگرهای پلاسمون سطحی انتشاری (PSPR) که ضریب شایستگی بالاتری دارند است. سادگی، پیاده‌سازی آسانتر، هزینه کم، قابلیت اندازه‌گیری محلی، باعث شده حسگرهای پلاسمونی سطحی موضعی نسبت به حسگرهای پلاسمون سطحی انتشاری اولویت داشته باشند. همچنین، در این زیست حسگرها خصوصیات حسگری، اغلب در طول موج‌های مرئی مورد مطالعه قرار گرفته است و از آنجائی که در رژیم نزدیک فروسخ، موج الکترومغناطیسی حاصل از تشدید پلاسمون سطحی عمق نفوذ زیادی داشته و همچنین، تعیین دقیق تر عمق های آن در این رژیم امکان پذیر است [۱۶،۱۷]. پس، برای تحقق یک حسگر پلاسمونی سطحی منطقه ای با ضریب شایستگی بالا جهت تشخیص بهتر مایع مرجع، نیازمند پیک رزونانسی با FWHM کم و حساسیت بالا می‌باشیم. در این زمینه کارها و تحقیق های زیادی انجام گرفته است. به تازگی ونگ و همکارانش^{۱۱} آرایه های متناوب چند لایه و تک لایه بر پلاسمون‌های شبکه‌ای از نانوذرات طلا بررسی و گزارش کرده است که آرایه های متناوب از نانوذرات طلا منجر به پیک‌های رزونانسی باریکتر نسبت به تک آرایه‌ها است [۱۸]. در یک مطالعه نیده‌ی^{۱۲} و همکارانش [۱۹]، ساختارهای یکپارچه از نانوذرات نقره و طلا را با روش غوطه‌وری ساخته اند تا انرژی LSPR را کنترل کنند. پلاسمون های سطحی منطقه‌ای دارای دو اثر مهم هستند. نخستین اثر، افزایش میدان الکتریکی در نزدیکی سطح نانوذرات است که با فاصله گرفتن از سطح میدان الکتریکی به‌سرعت کم می‌شود. دومین اثر این است که نور عبور کرده از ذرات، دارای یک بیشینه در فرکانس تشدید پلاسمون است که برای فلزات واسطه در طول‌موج مرئی اتفاق

document.

۱

بدست می آید [۲۳]، که متغیر S حساسیت حسگر و FWHM کل عرض در نصف مقدار ماکزیمم پیک رزونانسی است. همچنین حساسیت حسگر را می توان نسبت خروجی آشکارساز به تغییر ضریب شکست محیط نمونه تعریف کرد که از معادله ی (Error! No text of specified style in) بدست می آید.

$$S = \frac{\Delta y}{\Delta n}$$

Error! No text of specified style in document.

۲

۲- مدل عددی و صفحه بندی

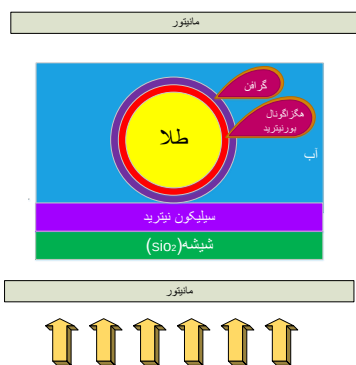
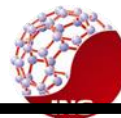
روش های متفاوتی برای مطالعه رفتار میدان الکترومغناطیس مانند روش های چندگانه وجود دارد [۲۴]، از جمله روش FDTD [۲۵] که برای حل معادلات ماکسول در هندسه های پیچیده و رسانه های پاشنده مانند طلا و نقره مطمئن است. ما در این تحقیق به منظور حل معادله ماکسول و محاسبه طیف خاموشی نانو ساختارهای هیبریدی طلا-گرافن-هگزآگونال بورن نیتريد در بالای یک بستر سیلیکا از روش FDTD در حالت سه بعدی در محیط نرم افزار لومریکال استفاده خواهیم کرد. در کل شبیه سازی دما برابر با ۳۰۰ درجه کلوین و همچنین محیط اطراف ساختار را هوا یا به عبارت دیگر ضریب شکست محیط پیرامون برابر یک ($n = 1$) در نظر گرفته شده است. شرایط مرزی متناوب در جهت x و y را برای کاهش زمان محاسبه جایگزین کردیم [۲۶]. از لایه تطبیق کامل (PML) در جهت z برای مطالعه ویژگی های انتقال و انعکاس میدان الکترومغناطیسی استفاده کردیم. در واقع در شرط مرزی PML یک ماده مجازی ناهمسانگرد تعریف می شود که در مرزها قرار می گیرد و رسانندگی آن طوری تنظیم می شود که امواج وارد شده از همه زوایا بدون انعکاس جذب شوند [۲۷]. وضوح شبکه محاسبه (به عنوان مثال، اندازه سلول مش) به اندازه ۵ نانومتر (فاصله نقطه ای به نقطه) در هر سه جهت مختصات دکارتی لحاظ شد. زمان شبیه سازی ۳۰۰۰ فمتوثانیه در نظر گرفته شده است تا از کوچک ترین تغییرات چشم پوشی نشود و بیشترین دقت در نتیجه شبیه سازی اعمال شود. از آنجا که برای داشتن مدل فیزیکی دقیق تر از مواد در واکنش به امواج الکترومغناطیسی در یک محدوده فرکانسی باید اثر پاشندگی مواد را نیز در مسئله لحاظ کرد. پس، برای سه نانو ذره به کار رفته در ساختار حسگر این اثرات را مدل خواهیم کرد. در شکل ۱-۲ ضریب شکست نانو ذره طلا طبق مدل لورنتس-دروود مدل شده و با داده های تجربی CRC منطبق شده است. همچنین،

می افتد. این پیک عبوری به ضریب شکست محیط پیرامون وابسته است [۲۰]. طبق تئوری مای^{۱۲}، تشدید پلاسمون سطحی منطقه ای نانو ذره به طور عمده به پنج عامل اندازه، شکل، ترکیب یا مواد تشکیل دهنده نانو ذره، فاصله بین ذرات و در نهایت ضریب شکست محیط اطراف نانو ذرات وابسته است [۲۱]. این خصوصیات، اساس حسگرهای شیمیایی و بیولوژیکی می شود، به این صورت که این خصوصیات بر طول موج و شدت پیک تأثیر می گذارند. گونه هایی که بتوانند این خصوصیات را تغییر دهند، توانایی تغییر طول موج را دارند و می توانند به وسیله ی حسگرهای پلاسمونی سطحی موضعی شناسایی شوند [۲۲]. بنابراین، بهینه سازی سیگنال های نوری می تواند به سادگی با کنترل ویژگی فیزیکی و شیمیایی آن ها انجام شود. معمولاً مولکول های آلی دارای ضریب شکست بالاتری نسبت به محلول های بافر هستند، بنابراین، اتصال آن ها به نانو ساختارها موجب افزایش ضریب شکست محلی شده و در نتیجه انتقال به ناحیه قرمز و پراش اتفاق می افتد. از این دیدگاه، روش های مبتنی بر LSPR کاربرد زیادی در بخش حسگری نوری عاری از برچسب پیدا کرده اند، جایی که تغییرات ضریب شکست نانو ساختار پلاسمونیک برای رصد رویدادهای اتصال در سطح به صورت زنده مورد استفاده قرار می گیرد. ساده ترین کاربرد تشخیص نانو ذراتی که LSPR فعال دارند، تشخیص تغییرات ضریب شکست محیط پیرامون از طریق جابه جایی در طول موج پیک LSPR است. پیک های LSPR معمولاً به وسیله ی اندازه گیری طیف عبوری یا پراکندگی آشکارساز می شوند. رابطه تغییرات ضریب شکست محیط پیرامون با جابه جایی در طول موج پیک LSPR تقریباً خطی است. حساسیت ضریب شکست که با s نشان داده می شود، مقدار جابه جایی پیک بر حسب نانومتر به ازای تغییر یک واحد ضریب شکست است. اگر ابتدا برای یک محیط، طول موج λ با عرض پیک $\Delta \lambda$ وجود داشته باشد، با تغییر ضریب شکست به اندازه dn طول موج به اندازه $d\lambda$ جابه جا می شود. در این نوع تشخیص، عرض پیک طیفی مهم است به دلیل اینکه تشخیص برپایه جابه جایی پیک است. نانو ذرات بزرگ تر تمایل دارند که حساسیت بالایی داشته باشند، زیرا $d\lambda$ بزرگ تری دارند، ولی پیک آن ها به وسیله ی برانگیختگی های چند قطبی و کاهش دامنه نوسانات پهن است.

در نتیجه، برای بررسی توانایی تشخیص نانو ذرات، عبارت دیگری به نام FOM تعریف شد که در آن حساسیت به پهنای پیک تقسیم می شود و از این رو اثر پهنای پیک هم در نظر گرفته می شود که طبق معادله ی (Error! No text of specified style in) بدست می آید.

$$FOM = S / FWHM$$

Error! No text of specified style in



شکل ۲- ساختار کلی حسگر LSPR. Error! No text of specified style in document.

از دو مانیتور در بالا و پایین ساختار جهت محاسبه نور بازتابی و نوری که از ساختار عبور می‌کند استفاده کردیم تا بتوانیم مقدار جذب ساختار را طبق معادله‌ی Error! No text of specified style in document. ۳- به صورت دقیق محاسبه کنیم.

Error! No text of specified style in document.
 $absorption = 1 - (Monitor1 + Monitor2)$
 Error! No text of specified style in document.
 ۳-

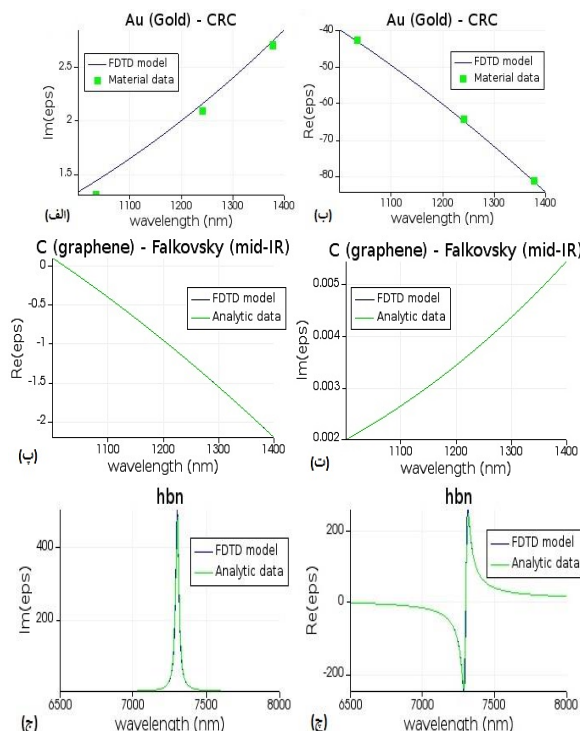
۳- نتایج شبیه‌سازی

در این بخش، ما حسگر مورد نظر را با نرم افزار لومریکال شبیه سازی نمودیم و تاثیرات متفاوتی از جمله تغییر دور تناوب ساختار، تغییر نسبت پوخته به هسته، تاثیر اضافه کردن پوخته‌ی دوم هگزگونال بورنیتريد را در شدت میدان پیک های رزونانسی بررسی خواهیم نمود. حضور پیک‌های رزونانسی را می توان ناشی از تحریک پلاسمون سطح گرافن- بورنیتريد در نانو ساختار که در نتیجه اتصال بین نور تابشی و شبکه توری مانند نانو ساختار هیبریدی Au-Hbn-G دانست. در نهایت پارامترهای بررسی حسگر از جمله ضریب شایستگی و حساسیت را محاسبه می کنیم که نتایج حاکی از بهبود قابل توجهی نسبت به ساختارهای پیشین که تنها از پوخته گرافن روی نانوکره طلا استفاده کردند می باشد [۳۲]. همچنین، استفاده از بستر سیلیکون نیتريد به علت جذب در طیف فروسرخ نزدیک در این ساختار از نکات حائز اهمیت نسبت به ساختارهای پیشین است که عموماً از بستر سیلیکون استفاده شده است.

۳-۱- تاثیر دوره تناوب

ما برای بررسی اثرات تغییر تناوب بر خصوصیات تشدیدکنندگی پلاسمون های سطحی ساختار حسگر پیشنهادی در شکل ۲-۲

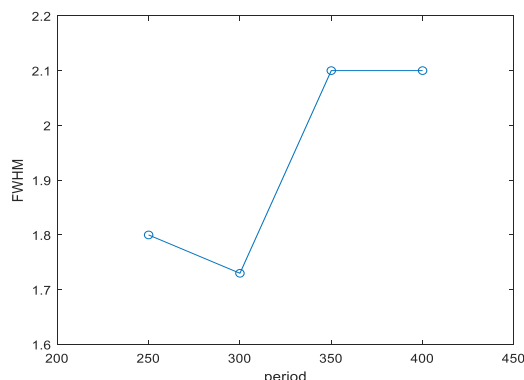
ضریب شکست گرافن طبق مدل فالكوفسکی^{۱۴} و هگزگونال بورنیتريد را طبق روابط و معادلات مندرج در مرجع [۲۸] بر حسب طول موج مدل و رسم شده است.



شکل Error! No text of specified style in document. ۱- (الف) قسمت موهومی ضریب شکست طلا. (ب) قسمت حقیقی ضریب شکست طلا. (پ) قسمت حقیقی ضریب شکست گرافن. (ت) قسمت موهومی ضریب شکست گرافن. (ج) قسمت موهومی ضریب شکست هگزگونال بورنیتريد. (د) قسمت حقیقی ضریب شکست هگزگونال بورنیتريد.

۲-۱- ساختار حسگر

حسگر پیشنهادی همانند شکل ۲-۲ از نانو کره طلا به عنوان هسته و پوخته‌هایی به ترتیب، گرافن/ بورنیتريد که روی بستی متشکل از سیلیکون (SiO₂) و سیلیکون نیتريد (Si₃N₄) قرار گرفته استفاده شده است که سطح آن از مایع مرجع (به عنوان مثال آب با ضریب شکست n=1.333) پوشیده شده است. منبع سینوسی با دامنه نوسان یک ولت در طول موج ۱۰۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر به ساختار تابانده می‌شود.



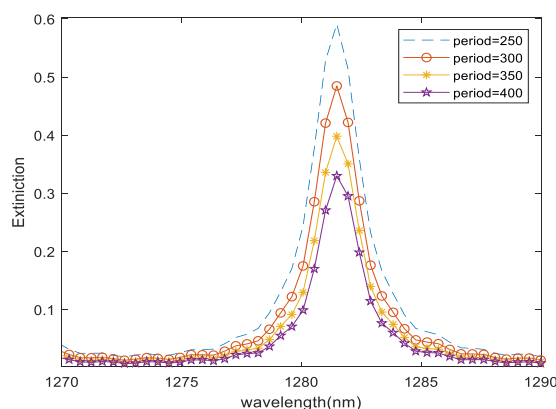
شکل ۲: تغییر دوره تناوب نسبت به FWHM. Error! No text of specified style in document.

۳-۲- تأثیر تغییر قطر هسته طلا و پوسته گرافن

همان
طور
که

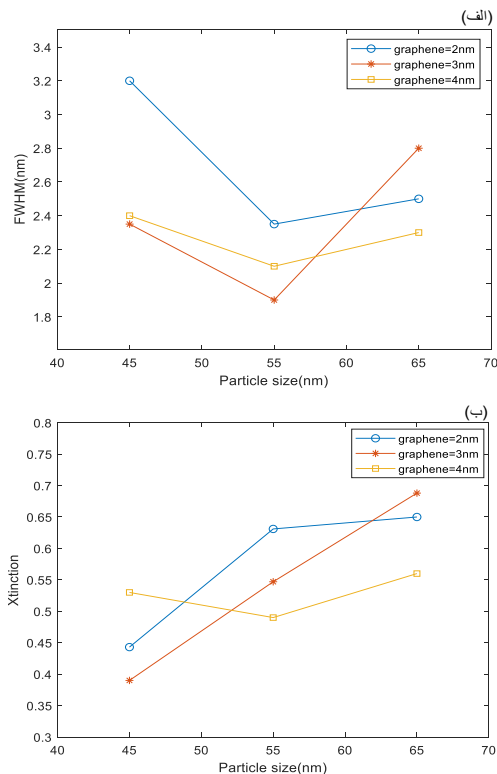
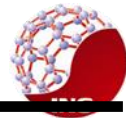
پیشتر اشاره شد، اندازه نانو ساختار در پیک‌های رزونانسی حسگر LSPR بسیار تأثیرگذار است. با تغییر شکل هندسی سطح چگالی میدان الکتریکی ساختار تغییر کرده و این باعث تغییر در فرکانس ارتعاشی الکترون‌ها می‌شود. بنابراین، ذرات با شکل و اندازه‌های متفاوت ویژگی پلاسمونی متفاوتی از خود نشان می‌دهند. پس، در این بخش با تغییر قطر هسته کروی شکل نانوذره طلا در بازه‌های ۴۵ تا ۶۵ نانومتر با گام افزایشی ۱۰ نانومتر اثر این تغییرات را در شدت پیک‌های رزونانسی بررسی خواهیم نمود. همچنین ضخامت پوسته گرافن را در سه مقدار ۲ و ۳ و ۴ نانومتر مورد ارزیابی قرار خواهیم داد. همچنین این شبیه‌سازی را با دوره تناوب ۳۰۰ نانومتر انجام دادیم که نتایج آن در شکل ۳-۳ مشخص شده است و طیف‌های انقراض نانو ساختار هیبریدی طلا-گرافن را نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت با تغییر قطر نانوذره طلا و یا تغییر در ضخامت پوسته گرافن شدت پیک‌های رزونانسی و موقعیت آن‌ها (طول‌موج‌ها) متفاوت است و برای ما تنها، پیک‌های رزونانسی با شدت میدان زیاد و FWHM کم حائز اهمیت است تا به حساسیت مطلوب در حسگر برسیم.

برای نمونه از نانوکره طلا با قطر ۵۶ نانومتر که دارای پوسته‌ی گرافن به ضخامت ۳ نانومتر است. برای بررسی این اثر به صورت تئوری استفاده نمودیم. تناوب را به صورتی که ساختار در امتداد محور x و y در گستره ۲۵۰ تا ۴۰۰ نانومتر با یک گام افزایشی ۵۰ نانومتری تغییر کند، انتخاب کردیم. شکل ۳-۱ نشان می‌دهد که تغییر تناوب بر روی طیف خاموش‌سازی نانو ساختار هیبرید طلا-گرافن تأثیر مهمی دارد. همانطور که مشخص است، هیچ تغییری در موقعیت پیک رزونانسی وجود ندارد و این نشان‌دهنده‌ی این است که این فرکانس‌های تشدید، رزونانس پلاسمون سطحی موضعی هستند.

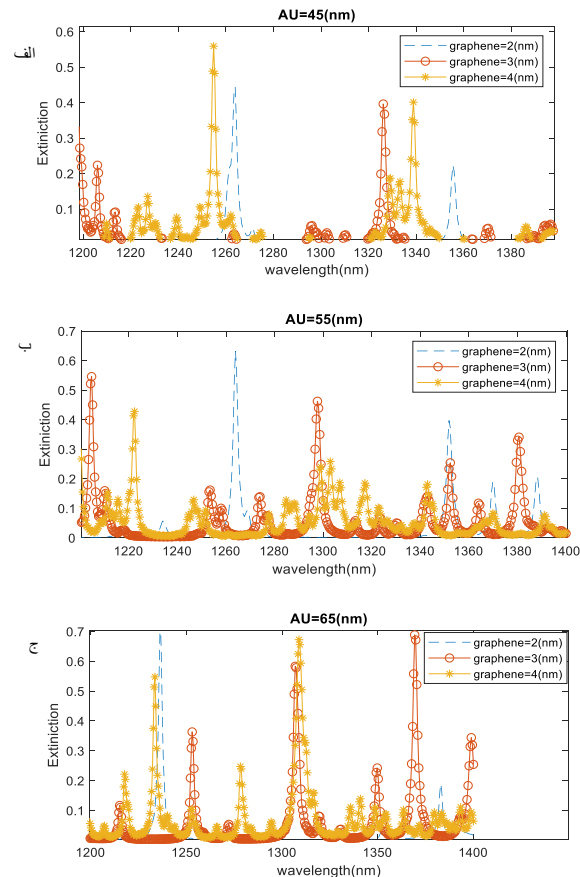


شکل ۳-۱: طیف انقراض آرایه نانو ساختار Au-G در دوره‌های تناوبی متفاوت.

همانطور که در شکل ۳-۱ مشخص است، در طول موج ۱۲۸۱،۵۶ نانومتر شدت میدان پیک‌های رزونانسی با کاهش تناوب از ۴۰۰ به ۳۰۰ افزایش یافته است و به طبع FWHM نیز کاهش پیدا خواهد کرد، که این امر را می‌توان به علت فرونشانی پلاسمای سطحی پراکنده از نانو ساختار ترکیبی طلا - گرافن در تناوب ساختاری کوچک‌تر که موجب افزایش دامنه میدان الکتریکی در محل پیک‌های رزونانسی می‌شود دانست. بنابراین با افزایش تناوب ساختار در جهت محور x و y مقدار انقراض در پیک‌های رزونانسی افزایش یا به عبارت دیگر شدت میدان کاهش پیدا می‌کند که معمولاً با کاهش FWHM نیز همراه است. در شکل ۳-۱ مقدار FWHM برای هر چهار دوره تناوب ذکر شده محاسبه شد که این مقادیر در شکل ۳-۲ آورده شده است. پس همانطور که مشخص است بهترین FWHM در تناوب ۳۰۰ نانومتری به دست آمده است.



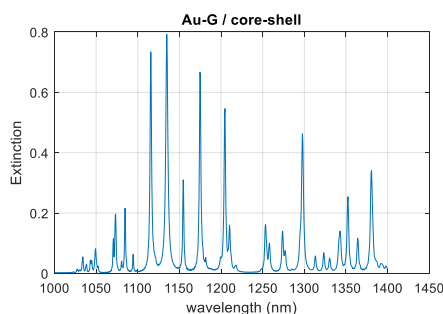
شکل ۵-۳: طیف پیک های رزونانسی هسته طلا و پوسته گرافن



شکل ۴-۳: Error! No text of specified style in document.

انقراض نانو ساختار هیبریدی طلا-گرافن با قطر هسته : الف) ۴۵ نانومتر - ب) ۵۵ نانومتر - ج) ۶۵ نانومتر. با ضخامت پوسته گرافن از ۲ الی ۳ نانومتر. ساختار متناوب با دوره ۳۰۰ نانومتر و دامنه موج برخوردی یک الکترون ولت.

در نهایت با تابش موج برخوردی با دامنه یک الکترون ولت به ساختار طیف پیک های تشدید رزونانس سطحی منطقه ای همانند شکل ۳-۵ به دست آمد. همانطور که مشخص است در طیف طول موج بین ۱۰۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر پیک های رزونانسی سطحی محلی متفاوتی ظاهر شده است که ایده آل ترین حالت از نظر اندازه و ضخامت در ابعاد ساختاری است.

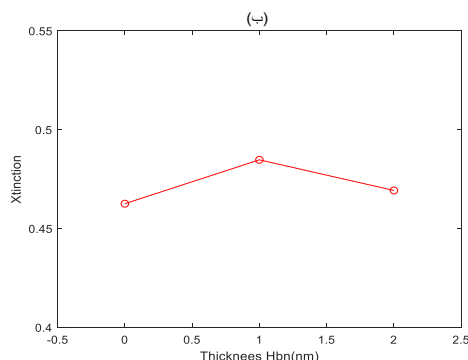


شکل ۶-۳: Error! No text of specified style in document. طیف پیک های تشدید پلاسمون سطحی منطقه ای بدون پوسته هگزگونال بورن نیتريد و با حضور این پوسته ها با ضخامت ۱ تا ۲ nm

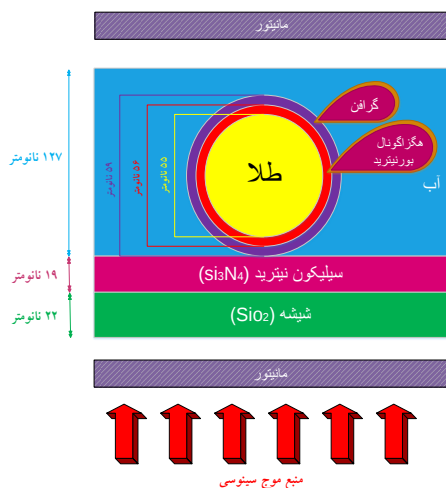
۳-۳- پوسته هگزگونال بورنیتريد

افزودن پوسته ای دوم هگزگونال بورنیتريد در زیرپوسته گرافن همانند به دلیل نقص ساختاری که دارد یک فوتون در طیف فروسرخ نزدیک ایجاد می کند که موجب ایجاد پیک های

همانطور که در شکل ۳-۴ الف مشخص است، کمترین مقدار FWHM (ایده آل ترین حالت) در حالتی است که قطر نانو کره طلا ۵۵ نانومتر و ضخامت پوسته گرافنی ۳ نانومتر باشد و همچنین، با توجه به شکل ۳-۴ ب می توان گفت که بیشترین تشدید در پیک های رزونانسی مربوط به قطر ۶۵ نانومتر با ضخامت گرافنی ۳ نانومتر است. همچنین، قطرهای ۵۵ و ۶۵ نانومتر با ضخامت گرافن ۲ نانومتر نیز مورد قبول هستند. در مجموع می توان نتیجه گرفت که قطر ۵۵ نانومتر برای نانو ذره طلا با ضخامت پوسته گرافنی ۲ الی ۳ نانومتر ایده آل ترین حالات برای ساختار حسگر LSPR ما هستند. در مجموع ساختار شکل ۲-۲ را با قطر هسته طلا به اندازه ۵۵ نانومتر و پوسته گرافن ۳ نانومتری با تناوب ۳۰۰ نانومتری پیاده سازی نمودیم که ایده آل ترین حالت طبق نتایج بدست آمده است.



شکل ۳-۷: الف-تأثیر تغییرات ضخامت پوسته هگزاگونال بورنیتريد بر روی FWHM ساختار ب- تأثیر تغییرات ضخامت پوسته هگزاگونال بورنیتريد بر شدت پیک یا انقراض ساختار.



۳-۴- ساختار بهینه شده

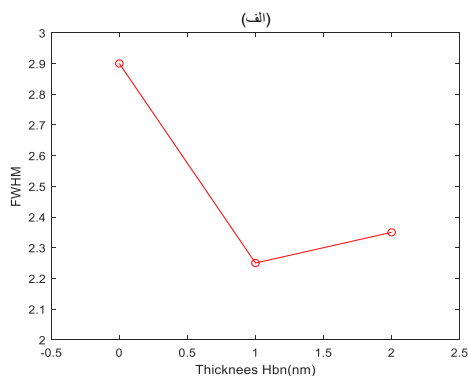
بر اساس بهینه‌سازی‌های انجام‌شده در بخش‌های قبلی ساختار نهایی حسگر LSPR را با توجه به بهترین ابعاد می‌توان به صورت شکل ۴-۱ در نظر گرفت. فاصله مانیتورها از ساختار در کمترین فاصله در نظر گرفته شده است تا با جزئیات بالا نمونه برداری کند همچنین ارتفاع مایع مرجع در کمترین حالت یعنی ۱۲۷ نانومتر در نظر گرفته شد. در ابتدا مایع مرجع را آب ($n=1.333$) در نظر گرفتیم. سپس، از مایعات متفاوت با ضریب شکست‌های $n=1.333$ الی $n=1.383$ جهت تشخیص نوع مایع و بررسی استفاده می‌کنیم به عنوان مثال، از اتانول [۲۹]، محلول گلوکز در آب [۳۰]، گلوکز خون [۳۱] که ضریب شکست آن‌ها در دامنه گفته شده است، می‌توان برای شناسایی استفاده کرد.

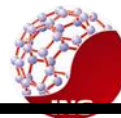
در ساختار شکل ۴-۱ میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی در اثر تابش موج فرودی یک الکترون ولت بدست آورده شده است که در شکل ۴-۲ مشخص شده است. میدان‌ها توسط مانیتوری که در راستای محور Z و در مرکز کره قرار دادیم نمونه‌برداری (دوبعدی) شده است. همانطور که در میدان الکتریکی و مغناطیسی مشخص است، میدان در نواحی که پوسته‌ها

رزونانسی جدید در طیف ۱۰۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر با FWHM کم می‌شود و در نتیجه به بهبود حساسیت حسگر کمک می‌کند و نسبت به ساختارهای پیشین که تنها از پوسته گرافن استفاده نمودند حساسیت بالاتری دارد. برای اثبات و تأثیر اضافه کردن این پوسته به ساختار، طیف پیک‌های رزونانس پلاسمون سطحی محلی را در بازه‌ی ۱۰۰۰ الی ۱۴۰۰ نانومتر در حالت‌های بدون پوسته هگزاگونال بورنیتريد، با ضخامت ۱ نانومتر، و ضخامت ۲ نانومتر مورد بررسی قرار دادیم که در شکل ۳-۶ نشان داده است. همانطور که مشخص است جابجایی و تغییر را در طول موج و همچنین در شدت پیک‌های رزونانسی می‌توان مشاهده کرد.

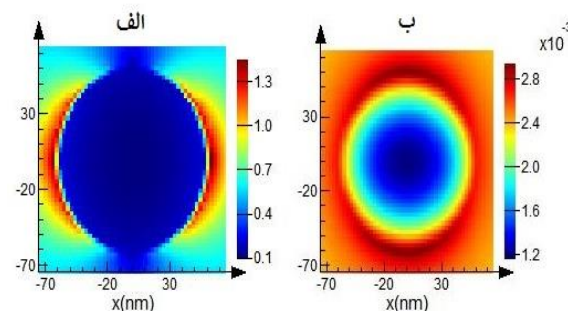
به دلیل این‌که در این ساختار پیک‌های رزونانسی با طول‌موج‌های بزرگتر حساسیت بهتر نسبت به تغییر ضریب شکست محیط دارند پس پیک‌های رزونانسی با طول موج بزرگتر برای ما حائز اهمیت هستند و همانطور که در شکل ۳-۶ مشخص است ساختار با حضور پوسته هگزاگونال بورنیتريد در طول‌موج‌های ۱۳۱۱٫۷۶ و ۱۲۸۱٫۸ دو پیک رزونانسی ایجاد کرده است که نسبت به حالت بدون پوسته هم از تعداد پیک‌های رزونانسی بیشتر و همچنین FWHM پیک‌ها نیز کمتر شده است. همچنین، این بهبود را می‌توان در شکل ۳-۷ نیز مشاهده کرد. در قسمت (الف) با افزایش ضخامت پوسته هگزاگونال بورنیتريد شیب نمودار FWHM به شدت کاهش پیدا می‌کند و به موازات آن نیز در شکل ۳-۷ (ب) شدت پیک‌های رزونانسی نیز افزایش پیدا کرده است که در نتیجه این بهبودها انتظار می‌رود حساسیت و FOM نانوحسگر LSPR نیز افزایش پیدا کند.

در مجموع انتخاب ضخامت یک نانومتری پوسته هگزاگونال بورنیتريد حالت ایده آلی است که در بخش بعدی به طور مفصل‌تری این تغییرات را مورد بررسی قرار خواهیم داد.





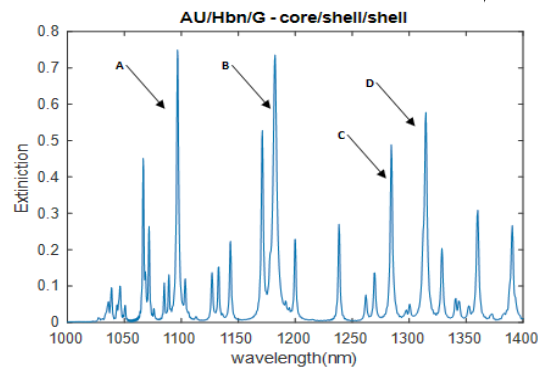
گرافن-بورنیتريد) افزوده شدند، بسیار قوی‌تر است که باعث افزایش شدت پیک‌های رزونانسی در ساختار شده است.



شکل ۳-۴: الف) مولفه‌ی میدان مغناطیسی، ب) مولفه‌ی میدان الکتریکی

۳-۵- محاسبه FWHM ساختار

همان‌طور که در بخش قبلی گفته شد FWHM اندازه‌ی پهنای در نصف مقدار بیشینه در یک پیک است، که هر چه مقدار این عدد کوچک‌تر باشد مطلوب‌تر و حساسیت بیشتری دارد، پس برای ساختار پیشنهادی (شکل ۱-۴) این مقدار را در صورتی که مایع مرجع دارای ضریب شکست ۱,۳۳۳ باشد محاسبه می‌کنیم. همان‌طور که در شکل ۳-۴ مشخص است مقدار FWHM چهار پیک A, B, C, D را مورد بررسی قرار می‌دهیم.



شکل ۳-۴: پیک‌های رزونانسی حسگر LSPR (شکل ۱-۴) در طیف مرئی

A →	Wavelength = 1095.57 Peak _{max} = 0.7511 Peak _{max} = 0.3755 FWHM = 2	C →	Wavelength = 1281.47 Peak _{max} = 0.4847 Peak _{max} = 0.2424 FWHM = 2.25
B →	Wavelength = 1180.25 Peak _{max} = 0.7405 Peak _{max} = 0.3852 FWHM = 3.5	D →	Wavelength = 1311.76 Peak _{max} = 0.5840 Peak _{max} = 0.2920 FWHM = 3

Error! No text of specified style in document.

همان‌طور که طبق روابط ۱-۴ مشخص است، کمترین مقدار FWHM مربوط به پیک‌های A و C است، که نسبت به مرجع [۳۲] که این مقدار برابر ۲,۲۷ به دست آمده است بهبود یافته است، اما یکی دیگر از پارامترهای مهم در سنجش و ارزیابی حسگر حساسیت حسگر است، پس در ادامه به بررسی حساسیت پیک‌های رزونانسی A, B, C, D می‌پردازیم زیرا FWHM پیک رزونانسی تنها در صورتی مطلوب است که دارای حساسیت بالا نیز باشد.

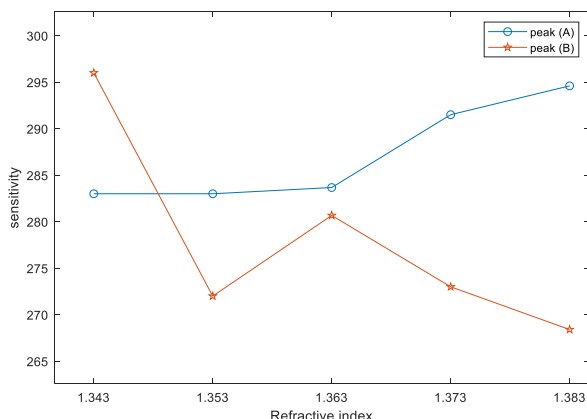
۳-۶- محاسبه حساسیت حسگر

در این بخش قصد داریم حساسیت حسگر را در پیک‌های رزونانسی مربوط به شکل ۱-۴ بررسی نماییم. پس با تغییر ضریب شکست مایع مرجع که آب (ضریب شکست ۱,۳۳۳) در نظر گرفته شده بود به نتیجه مورد نظر خواهیم رسید، بدین‌صورت که ما شیف‌ت پیک‌های رزونانسی ساختار را در ضریب شکست‌های ۱,۳۳۳ الی ۱,۳۸۳ بررسی خواهیم کرد، و هرچه قدر پیک‌ها به تغییر ضریب شکست محیط (آب) حساس‌تر باشند شیف‌ت بیشتری خواهند یافت و از این‌رو می‌توان بهترین حساسیت را در بین پیک‌های رزونانسی تشخیص داد. نحوه‌ی محاسبه‌ی حساسیت حسگرها در بخش‌های قبلی توضیح داده شد و طبق معادله‌ی ۲-۱ قابل‌اندازه‌گیری است. شکل ۴-۴ نمایانگر شیف‌ت پیک‌های رزونانسی در اثر تغییر ضریب شکست مایع مرجع در بازه‌ی مذکور (۱,۳۳۳ الی ۱,۳۸۳) است.

چون هدف ما پیدا کردن پیک‌های رزونانسی با حساسیت بالا و همچنین دارای طول موج بالاتر است پس در شکل ۴-۴ به بررسی حساسیت دودسته از پیک‌های رزونانسی یعنی دسته‌ی C و D می‌پردازیم به این علت که در طول موج‌های بزرگ مثل بازه‌ی ۱۲۵۰ الی ۱۳۶۰ نانومتر پیک‌های رزونانسی از شیف‌ت‌های بهتری در اثر تغییر ضریب شکست محیط برخوردار است. پس از پیک‌های رزونانسی در طول موج‌های پایین‌تر از ۱۲۰۰ نانومتر صرف نظر می‌کنیم.

در شکل ۴-۴ نمودار آبی‌رنگ واقع در طول موج ۱۲۸۱,۴۷ نانومتر پیک رزونانسی مربوط به ضریب شکست ۱,۳۳۳ است پس آن را به عنوان پیک مرجع انتخاب می‌کنیم و دیگر پیک‌های رزونانسی را نسبت به آن مورد سنجش قرار می‌دهیم. به عنوان مثال نمودار بنفش‌رنگ (نمایانگر ضریب شکست ۱,۳۶۳ واقع در طول موج ۱۲۸۹,۹۸ نانومتر) نسبت به پیک مرجع (آبی‌رنگ) تغییر شیف‌ت پیدا کرده است که این جابه‌جایی در پیک به سبب تغییر ضریب شکست مایع از ۱,۳۳۳ به ۱,۳۶۳ است. اگر ضریب شکست مایع مرجع را با n_0 و مختصات طول موج پیک رزونانسی مرجع را با λ_0 نشان دهیم آنگاه در ادامه می‌توانیم حساسیت دودسته پیک C و D را طبق معادله‌ی ۲-۱ که در بخش اول گفته شد بدست آوریم. که نتایج و مقدار حساسیت‌های بدست آمده در معادلات ۲-۴ و ۳-۴ مشخص شده است.

پیک C را به عنوان بهترین طول موج کاری حسگر پیشنهادی در نظر گرفت.



در ادامه، باید ضریب شایستگی حسگر نیز محاسبه شود تا بتوان بهترین پیک رزونانسی را از لحاظ کیفی و کمی به دست آورد چراکه پارامتر ضریب شایستگی برابر است با نسبت دو پارامتر، حساسیت حسگر بر FWHM که در بخش‌های قبلی محاسبه شدند.

۳-۷- ضریب شایستگی حسگر

همانطور که در بخش پیش گفته شد، ضریب شایستگی یا FOM از نسبت حساسیت حسگر به FWHM به دست می‌آید (معادله ۱-۱) هم‌اکنون با توجه به مقادیر محاسبه شده در بخش‌های پیشین (معادلات ۳-۴ و ۲-۴) به محاسبه ضریب شایستگی می‌پردازیم که در جدول ۱-۴ مشخص است. همانطور که مشخص است بالاترین FOM به دست آمده برابر است با ۱۲۵٫۸ که نسبت به ساختارها و کارهای پیشین بهبود قابل توجهی پیدا کرده است.

جدول -Error! No text of specified style in document.

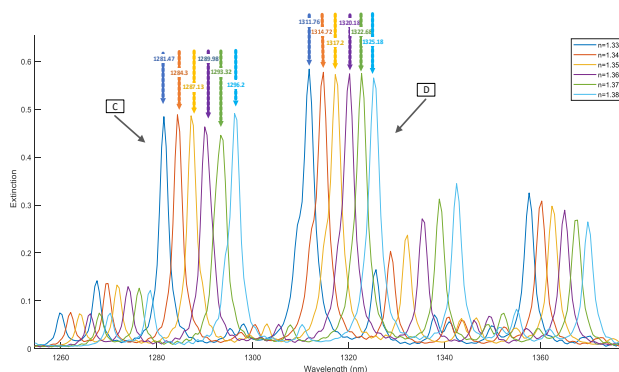
۱: ضریب شایستگی برای دو پیک رزونانسی A و B

p	Δn	λ_{res} (nm)	S_{λ} (nm/RIU)	FWHM	Resonance peak	FOM
A	۰٫۰۱	۱۲۸۴٫۳۰	۲۸۳	۲٫۲۵	۰٫۴۸۸۵۹	۱۲۵٫۸
	۰٫۰۲	۱۲۸۷٫۱۳	۲۸۳	۲٫۲۵	۰٫۴۸۶۴۱	۱۲۵٫۸
	۰٫۰۳	۱۲۸۹٫۹۸	۲۸۳٫۶۷	۲٫۳	۰٫۴۶۳۳۵	۱۲۳٫۴
	۰٫۰۴	۱۲۹۳٫۳۲	۲۹۱٫۵۰	۲٫۶	۰٫۴۴۵۶۸	۱۱۲٫۱
	۰٫۰۵	۱۲۹۶٫۲	۲۹۴٫۶۰	۲٫۶	۰٫۴۹۱۱۱	۱۱۳٫۳
B	۰٫۰۱	۱۳۱۴٫۷۲	۲۹۶	۲٫۹	۰٫۵۷۷۴۳	۱۰۲٫۱
	۰٫۰۲	۱۳۱۷٫۲۰	۲۷۲	۲٫۹	۰٫۵۷۲۴۸	۹۳٫۸۰

$$C \Rightarrow \begin{cases} S(n_1=1.343) = \frac{\Delta y}{\Delta n} = \frac{y_1 - y_0}{n_1 - n_0} = \frac{1284.30 - 1281.47}{1.343 - 1.333} = 283 \\ S(n_2=1.353) = \frac{\Delta y}{\Delta n} = \frac{y_2 - y_0}{n_2 - n_0} = \frac{1287.13 - 1281.47}{1.353 - 1.333} = 283 \\ S(n_3=1.363) = \frac{\Delta y}{\Delta n} = \frac{y_3 - y_0}{n_3 - n_0} = \frac{1289.98 - 1281.47}{1.363 - 1.333} = 283.67 \\ S(n_4=1.373) = \frac{\Delta y}{\Delta n} = \frac{y_4 - y_0}{n_4 - n_0} = \frac{1293.13 - 1281.47}{1.373 - 1.333} = 291.50 \\ S(n_5=1.383) = \frac{\Delta y}{\Delta n} = \frac{y_5 - y_0}{n_5 - n_0} = \frac{1296.20 - 1281.47}{1.383 - 1.333} = 294.60 \end{cases} \quad ۴-۲$$

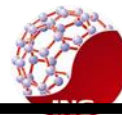
$$D \Rightarrow \begin{cases} S(n_1=1.343) = \frac{\Delta y}{\Delta n} = \frac{y_1 - y_0}{n_1 - n_0} = \frac{1314.72 - 1311.76}{1.343 - 1.333} = 296 \\ S(n_2=1.353) = \frac{\Delta y}{\Delta n} = \frac{y_2 - y_0}{n_2 - n_0} = \frac{1317.20 - 1311.76}{1.353 - 1.333} = 272 \\ S(n_3=1.363) = \frac{\Delta y}{\Delta n} = \frac{y_3 - y_0}{n_3 - n_0} = \frac{1320.18 - 1311.76}{1.363 - 1.333} = 280.67 \\ S(n_4=1.373) = \frac{\Delta y}{\Delta n} = \frac{y_4 - y_0}{n_4 - n_0} = \frac{1322.68 - 1311.76}{1.373 - 1.333} = 273 \\ S(n_5=1.383) = \frac{\Delta y}{\Delta n} = \frac{y_5 - y_0}{n_5 - n_0} = \frac{1325.18 - 1311.76}{1.383 - 1.333} = 268.40 \end{cases} \quad ۴-۳$$

معادلات ۲-۴ نمایانگر پیک‌های دسته C است، همانطور که مشخص است بیشترین مقدار حساسیت در این دسته متعلق به ضریب شکست ۱٫۳۸۳ با مقدار ۲۹۴٫۶۰ است. همچنین معادلات ۳-۴ پیک‌های دسته D را مشخص می‌کنند که بیشترین حساسیت مربوط به ضریب شکست ۱٫۳۴۳ با مقدار ۲۹۶ است.



شکل ۵-۴: حساسیت دو پیک رزونانسی A و B نسبت به تغییر ضریب شکست محیط.

شکل ۵-۴ نشان‌دهنده تغییرات ضریب شکست به حساسیت در هر دو پیک رزونانسی اشاره شده است همانطور که مشخص است حساسیت به‌طور کلی در پیک رزونانسی C نسبت به D از مقدار قابل توجه‌تری برخوردار است و می‌توان این طول موج



Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science 4.21, 396-402, (1902)

[4] T. Burak, et al. "Grating coupler integrated photodiodes for plasmon resonance based sensing." Lab on a Chip 11, 21-27, (2011).

[5] R. W. Wood Localized Surface Plasmon Resonance Sensors-Department of Physics and Astronomy- 8,110-118, (2011).

[6] Mie, G Beitr?ge zur Optik trüber Medien, speziell kolloider Metall?ungen. Ann Phys 25:377, (1908).

[7] desing Localized Plasmon Resonance Sensors- publisher.nano-number 210

[8] Svedendahl, M.; Chen, S.Dmitriev, A., et al., Refractometric Sensing Using Propagating versus Localized Surface Plasmons: A Direct Comparison. Nano Letters 2009, 9 (12), 4428-4433.

[9] F.P. Zamborini, L. Bao, R. Dasari, Anal. Chem. 84, 64-69, (2012).

[10] W.P. Hall, S.N. Ngatia, R.P.V. Duyne, J. Pharm. Chem. C 115, 1410-1418, (2011).

[11] S. Nengsih, A. Ali Umar, M. Mat Salieh, M. Yahaya, Sains Malaysiana 40, 231-238, (2011).

[12] A.J. Haes, W.P. Hall, L. Chang, W.L. Klein, R.P.V. Duyne, Nano Lett. 4, 1029-1034, (2004).

[13] H. Altug, A. Cetin, A. F. Coskun, et al. In Hand-Held and High-Throughput Biosensor with Plasmonics and Lens-Free Imaging, Latin America Optics and Photonics Conference, Cancun, 2014/11/16; Optical Society of America: Cancun, 81, 321-328, (2014).

[14] Y.Q He, S.P Liu, A study on the sizes and concentrations of gold nanoparticles by spectra of absorption, resonance Rayleigh scattering and resonance non-linear scattering Spectrochimica Acta Part A, 67, 123-129,(2010).

[15] A.H.C. Neto, F. Guinea, N.M.R. Peres,K.S. Novoselov, A.K. Geim, The electronicproperties of graphene, Reviews of ModernPhysics, ,

[16] X. Huang, P. K Jain, Nanomedicine 2, 681-691, (2007).

[17] S.L. Westcott, S.J. Oldenburg, "Construction of Simple Gold Nanoparticle Aggregates with Controlled Plasmon—Plasmon Interactions", Chem. Phys. Lett., 3651, 912-920, (2006).

۰,۰۳	۱۳۲۰,۱۸	۲۸۰,۶۷	۲,۹	۰,۵۷۴۰۷	۹۶,۸۷
۰,۰۴	۱۳۲۲,۶۸	۲۷۳	۲,۸	۰,۵۷۵۰۸	۹۷,۵۰
۰,۰۵	۱۳۲۵,۱۸	۲۶۸,۴۰	۲,۸	۰,۵۶۵۵۳	۹۵,۸۶

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، نوعی از حسگرهای پلاسمونیک برای تشخیص مایعات با استفاده از روش FDTD تحلیل و شبیه‌سازی شد. از جنبه‌های مثبت این شبیه‌سازی می‌توان به تحلیل سه‌بعدی اشاره نمود که نسبت به تحلیل‌های دوبعدی در تحقیق‌های پیشین از دقت بالاتری برخوردار است. ما حسگر مورد نظر را توسط نرم افزار لومریکال شبیه سازی نمودیم و تاثیرات متفاوتی از جمله تغییر دور تناوب ساختار، تغییر نسبت پوسته به هسته، تاثیر اضافه کردن پوسته‌ی دوم هگزاگونال بورنیتريد و همچنین به اثرات زیر لایه‌ی سیلیکون نیتريد در شدت میدان پیک های رزونانسی پرداختیم. در نهایت پارامترهای ارزیابی حسگر از جمله ضریب شایستگی و حساسیت را محاسبه نمودیم. ساختار ما آرایه‌ای سه‌بعدی از نانو ساختار متشکل از هسته طلا و پوسته‌های اول و دوم به ترتیب بورنیتريد- گرافن را بر روی یک بستر کوارتز است که به‌عنوان یک حسگر مایعات معرفی نمودیم که دارای ضریب شایستگی و حساسیتی به ترتیب برابر ۱۲۵,۸ و ۲۸۳ است و یک بهبود قابل‌توجهی نسبت به کارای پیشین در زمینه‌ی حسگرهای تشدید پلاسمون منطقه‌ای در مراجع [۳۳] و آرایه‌های نانو حفره‌ای [۳۴] و ساختارهای نانو خمیده فلز-عایق-فلز در [۳۵] و همچنین نانو ساختار طلا گرافن که در مرجع [۳۲] با ضریب شایستگی ۱۰۲ ارائه شده است. همچنین، تعداد پیک‌های جذب حسگر در طیف فروسرخ نزدیک به‌مراتب نسبت به کارهای پیشین چندین برابر شده است. این بهبودها در اثر اضافه کردن لایه‌های بورنیتريد شش‌وجهی و سیلیکون نیتريد به ساختار است که وجه تمایز آن با ساختارهای پیشین است.

۵- مراجع

- [1] D.H. Gijsbers, J.H.S. Lurvink, 'Personal exposure to ultrafine particles in the workplace: exploring sampling techniques and strategies". 81, 439-453, (2004)
- [2] J.A. Ruemmele, W.P. Hall, A Localized Surface Plasmon Resonance Imaging The Instrument for Multiplexed Biosensing. Analytical Chemistry 61, 85- 92, (2013).
- [3] R. W. Wood, "XLII. On a remarkable case of uneven distribution of light in a diffraction grating spectrum." London, Edinburgh, and

- [32] T. Maurer, R. Nicolas, Gold-Graphene Core-Shell Nanostructure Surface Plasmon Sensors-Accepted: 29, 455-56, (2016).
- [33] KM. Mayer, J.H. Hafner, Localized surface plasmon resonance sensors. *Chem Rev* 11(6), 3828-3857, (2011).
- [34] J.N Anker, W.P Hall, O. Lyandres, N.C. Shah, Biosensing with plasmonic nanosensors. *Nat Mater*, 7, 45-57, (2008).
- [35] T. Maurer, R. Nicolas, Enhancing LSPR sensitivity of Au gratings through graphene coupling to Au film. *Plasmonics*, 9(3):507-512, (2013).
- [18] D. Wang, A. Yang, A.J. Hryn, Superlattice plasmons in hierarchical Au nanoparticle arrays. *ACS Photonics*, 2(12):1789-1794, (2015)
- [19] N. Nath, A. Chilkoti, Label Free Colorimetric Biosensing Using Nanoparticles. *Journal of Fluorescence* 14 (4), 377-383, (2004).
- [20] W.P. Hall, Localized Surface Plasmon Resonance Sensors-Department of Physics and Astronomy- June 8, 51-62, (2011).
- [21] G. Mie, speziell kolloider Metall?ungen. *Ann Phys* 25, 377-381, (1908).
- [22] A.J. Haes, Desing Localized Plasmon Resonance Sensors- publisher.(2010).
- [23] S. Zhu, Y. Fu. Biomed Microdevices 11." Hybridization of localized surface plasmon resonance-based Au-Ag nanoparticles "51, 579-589, (2009).
- [24] R. Wannemacher, Plasmon supported-transmission of light through nanometric holes in metallic thin films. *Opt Commun* 195,107-118, (2001).
- [25] M. Irannejad, B. Cui, M. Yavuz Optical properties and liquid sensitivity of Au-SiO₂-Au nanobelt structure. *Plasmonics* 11(1):1-9, (2015).
- [26] Y. Lide, R. David, Mesh-refinement options, 81, 67-74, (2015).
- [27] A. Deinega, I.Valuev, Long-time behavior of PML absorbing boundaries for layered periodic structures, *Computer Physics Communications* 182, 149-151, (2011).
- [28] B. Zhang, Perfect mid-infrared absorption by hybrid phonon-plasmon polaritons in hBN/metal-grating anisotropic structures. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 106, 34-42, (2016).
- [29] T. Zajac, Optics, Fourth Edit. Pearson Higher Education. ISBN 978-0-321-18878, (2003).
- [30] Y. Lide, R. David, CRC Handbook of Physics and Chemistry (82nd ed.). Cleveland, OH: The Chemical Rubber Company. ISBN 978, -0-8493-0482-8, (2001).
- [31] Giannios, P; et, al (2016). "Visible to near-infrared refractive properties of freshly-excised human-liver tissues: marking hepatic malignancies".