

Research Paper

Design of Simple Plasmonic Sensors based on Graphene Circles in THZ Region¹

Fatemeh Mehdizadeh² and Mehdi Khazaei Nezhad^{*3}

Received: 2023.04.15

Revised: 2023.07.31

Accepted: 2023.09.04

Abstract

The design of optical sensors in the THz region for application in various fields of biological and medical sciences has significantly expanded in the last two decades. In this paper, we proposed an optical sensor using two dimensional and periodic structure of graphene rings on the dielectric substrate. The surface plasmon resonance mechanism was employed to design the refractive index sensor. First, by changing the geometric parameters of the structure, the optimal parameters for the sensor performance have been extracted. Then, the sensor's sensitivity has been checked regarding the change in the refractive index of the surrounding environment. The sensitivity of the proposed simple structure is $11.2 \mu\text{m}/\text{RIU}$ and is larger than previous works. Also, increasing the refractive index of the measured medium diminished the quality of sensor operation. The proposed sensor can be used to detect environmental air pollution by proper calibration. The Lumerical software which is based on the finite difference time domain method is used to this end.

Keywords: *Plasmonic Sensor, 2D Materials, FDTD, Sensitivity, Figure of Merit.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2023.43454.1319

² M. Sc. Graduated, Department of Physics, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: mehdizadeh304@gmail.com.

³ Assistant Professor, Department of Physics, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. (Corresponding Author). Email: Khazaeinezhad@um.ac.ir.



طراحی حسگر پلاسمونیک ساده مبتنی بر حلقه‌های گرافنی در ناحیه تراهرتز^۱

فاطمه مهدی‌زاده^۲ و مهدی خزاعی نژاد قره تکان^{۳*}

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۵/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۶/۱۳

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال سیزدهم، پیاپی ۳۵، زمستان ۱۴۰۲

صص ۷ - ۱۹

چکیده:

در دو دهه اخیر طراحی حسگرهای اپتیکی در ناحیه تراهرتز جهت کاربرد در علوم زیستی و پزشکی مورد توجه پژوهشگران قرار گرفته است. در کار حاضر، طراحی یک حسگر اپتیکی به کمک ساختارهای دو بعدی و دوره‌ای از حلقه‌های گرافنی که بر روی یک زیرلایه دی الکتریک قرار گرفته پیشنهاد شده است. حسگر ضریب شکست پیشنهادی بر اساس پدیده تشدید پلاسمون سطحی عمل می‌کند. در ابتدا با تغییر پارامترهای هندسی ساختار، پارامترهای بهینه جهت عملکرد حسگر استخراج شده است. سپس میزان حساسیت حسگر بر اساس تغییر ضریب شکست محیط اطراف محاسبه شده است. میزان حساسیت حسگر پیشنهادی برابر با $11/2 \mu m/RIU$ است. مقدار حساسیت حسگر پیشنهادی با وجود سادگی ساختار هندسی آن از حسگرهای با ساختار مشابه بیشتر است. همچنین با افزایش ضریب شکست محیط سنجش کیفیت عملکرد حسگر تا حدودی کاهش می‌یابد. با مقیاس‌بندی مناسب حسگر پیشنهادی می‌توان از آن جهت آشکارسازی آلودگی‌های موجود در هوای اطراف حسگر استفاده کرد. در کار پیش‌رو از بسته نرم افزاری لومریکال که مبتنی بر روش تفاضل‌های متناهی در بازه زمانی عمل می‌کند، برای رسیدن به این هدف استفاده شده است.

واژگان کلیدی: حسگر پلاسمونیک، مواد دوبعدی، روش تفاضل‌های محدود بازه زمان، حساسیت، ضریب شایستگی.

¹ DOI: 10.22051/ijap.2023.43454.1319

^۲ دانش آموخته کارشناسی ارشد گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. Email: mehdizadeh304@gmail.com

^۳ استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. (نویسنده مسئول). Email: Khazaeinezhad@um.ac.ir



۱. مقدمه

پلاسمونیک بخش عمده‌ای از حوزه نانو فوتونیک را شامل می‌شود و در آن در جستجوی راهکارهایی جهت محصورسازی امواج الکترومغناطیسی در ابعادی برابر و یا حتی کوچک‌تر از طول موج میدان ورودی هستند. موضوع علم پلاسمونیک بررسی برهم‌کنش بین امواج الکترومغناطیسی و الکترون‌های رسانش در سطوح مشترک فلز-دی‌الکتریک یا در نزدیکی نانو ساختارهای فلزی کوچک است [۱-۳]. این برهم‌کنش‌ها منجر به تقویت میدان نوری در ناحیه پراش میدان نزدیک و در ابعاد زیر طول موجی می‌شود. براساس الگوی پلاسمایی برای فلزات، با قرار گرفتن فلز در معرض میدان الکترومغناطیسی، الکترون‌های آزاد درون فلز در پاسخ به میدان الکتریکی متناوب خارجی شروع به نوسانات دسته‌جمعی می‌کنند. این حرکت نوسانی، نوسانات پلاسمای نامیده می‌شود. به هر کوانتوم از این نوسانات، پلاسمون گویند. اگر نوسانات درون فلز ایجاد شود، به پلاسمون ایجاد شده پلاسمون حجمی و اگر نوسانات در نزدیکی سطح خارجی نانو ذرات فلزی و یا فصل مشترک فلز-دی‌الکتریک رخ دهد به آن پلاسمون سطحی می‌گویند. به عبارتی منظور از پلاسمون سطحی، نوسان دسته‌جمعی الکترون‌های رسانش فلزی در فصل مشترک بین فلز و دی‌الکتریک است [۱-۳]. پلاسمون‌های سطحی را به دو دسته‌ی پلاریتون پلاسمون‌های سطحی (SPP) و پلاسمون‌های سطحی جایگزیده (LSP) دسته‌بندی می‌کنند. در پلاریتون پلاسمون‌های سطحی، نوسانات تجمعی الکترون‌های رسانش فلزی به تقلید از میدان ورودی در فصل مشترک فلز-دی‌الکتریک منتشر می‌شوند. در حالی که در پلاسمون‌های سطحی جایگزیده نوسانات تجمعی الکترون‌های رسانش امکان انتشار ندارند و اغلب در محل گوشه‌ها در فصل مشترک یا در نزدیکی سطح خارجی نانو ذرات فلزی محدود شده‌اند. فرکانس تشدید پلاسمون‌های سطحی به جنس فلز و دی‌الکتریک و پارامترهای هندسی ساختار مانند شکل، اندازه و دوره تناوب ساختار بستگی دارد. اگر فرکانس نور فرودی بر فرکانس تشدید پلاسمون‌های سطحی برابر باشد، تشدید پلاسمون سطحی رخ می‌دهد. امروزه از پدیده تشدید پلاسمون‌های سطحی در زمینه‌هایی چون ساخت سلول-های خورشیدی، حسگرهای اپتیکی و لیتوگرافی با دقت بالا استفاده می‌شود [۱-۳].

حسگرهای اپتیکی، دستگاهی است که ورودی تحت اندازه‌گیری چون دما، فشار و ضریب شکست محیط اطراف را به خروجی دیگری بر حسب یکی از مشخصه‌های نوری مانند فاز، میدان مغناطیسی، قطبش، طول موج و زاویه جفت‌شدگی در خروجی تبدیل می‌نماید [۴-۶]. حسگرهای اپتیکی در علوم زیستی جهت آشکارسازی باکتری‌های مختلف، ویروس‌ها، پروتئین‌ها، گلوکز، اسید اوریک و سلول‌های سرطانی بسیار کاربرد دارند. این حسگرها بر اساس روش‌های مختلفی از جمله تداخل،



جذب، پراکندگی، تشدید، فلورسانس و انعکاس نور ورودی و در بسترهای مختلفی از قبیل تشدیدگرهای اپتیکی، فیبرهای نوری و بلورهای فوتونی طراحی می‌شوند. یک دسته مهم از حسگرهای اپتیکی جهت اندازه‌گیری تغییرات ضریب شکست محیط اطراف، حسگرهایی هستند که بر اساس پدیده تشدید پلاسمون‌های سطحی عمل می‌کنند. در این حسگرها با تغییر ضریب شکست محیط اطراف فرکانس تشدید پلاسمون‌های سطحی در طیف عبور، انعکاس و یا جذب ساختار تغییر می‌کند [۷ و ۸]. در حقیقت، از روی میزان جابه‌جایی فرکانس تشدید ساختار می‌توان به میزان تغییرات ضریب شکست محیط اطراف و نوع عامل خارجی پی برد. از مزایای حسگرهای مبتنی بر تشدید پلاسمون سطح می‌توان به سرعت اندازه‌گیری، دقت و حساسیت بالا، هزینه پایین آماده‌سازی و تولید، دقیق بودن نتایج، انتقال سریع داده‌ها اشاره کرد [۶-۴].

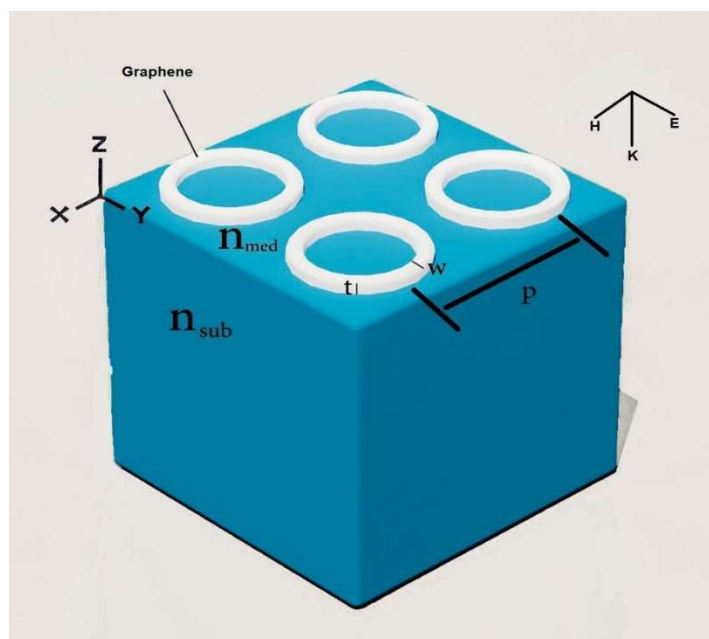
مواد دو بعدی، موادی هستند که تنها یک بعد آن‌ها در مقیاس نانو می‌باشد. با معرفی گرافن در سال ۲۰۰۴ به عنوان نازک‌ترین نانوساختار دو بعدی، مطالعات بسیاری روی نانو مواد دو بعدی به دلیل ویژگی‌های غیرطبیعی آن‌ها صورت پذیرفته است. مواد دو بعدی، به دلیل برخورداری از ویژگی‌های فیزیکی قابل توجه با ویژگی‌های انعطاف پذیری، همسانی و چند کاربردی بودن مورد توجه بسیاری از افراد قرار گرفته است [۹]. در سال‌های کنونی، برهم‌کنش موثر نور و ماده، به عنوان یک مسئله اساسی برای کاربرد یک ماده، توجه گسترده‌ای را در نانو فوتونیک و اپتو الکترونیک به ویژه برای مواد دو بعدی با ضخامت اتمی چون گرافن، فلزات واسطه دی‌کالکوژن و نیتريد بور شش ضلعی جلب کرده است [۱۰]. در میان مواد دو بعدی، گرافن با شکاف انرژی صفر می‌تواند با نور در یک طیف گسترده از ناحیه فرابنفش تا تراهرتز برهم‌کنش داشته باشد. گرافن بدلیل ویژگی‌های نوری و الکترونیکی منحصر به فرد، توجه زیادی را در پژوهش‌های الکترونیکی و فوتونیکی به خود اختصاص داده است. از ویژگی‌های گرافن می‌توان به تنظیم اختصاص اپتیکی و الکترونیکی آن با استفاده از عوامل خارجی از جمله اعمال میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی، تنش و کرنش مکانیکی اشاره کرد که منجر به تغییر رسانندگی الکتریکی موثر سطحی گرافن می‌شود [۱۴-۱۱].

در این مقاله، یک حسگر ضریب شکست پلاسمونیک مبتنی بر آرایه‌ای از حلقه‌های گرافنی طراحی و پیشنهاد می‌شود. با تغییر پارامترهای هندسی ساختار، پارامترهای بهینه جهت عملکرد حسگر استخراج شده است. در نهایت میزان حساسیت حسگر بر حسب تغییر ضریب شکست محیط اطراف بررسی شده است. در مقایسه با ساختارهای قبلی، ساختار ارائه شده در عین سادگی دارای حساسیت بیشتری است. در این پژوهش از نرم افزار لومریکال برای بررسی عملکرد ساختار استفاده شده است.

این نرم افزار بر اساس گسسته سازی معادلات ماکسول در حوزه زمان و مکان مبتنی بر روش تفاضل های محدود در بازه ی زمان (FDTD) عمل می کند [۱۵].

۲. ساختار و مشخصات حسگر

در شکل (۱)، ساختار هندسی حسگر مورد مطالعه ترسیم شده است. این ساختار شامل آرایه ای از حلقه های گرافنی است که بر روی یک بستر با ضریب شکست n_{sub} و یک محیط سنجش با ضریب شکست n_{med} قرار گرفته اند. ارتفاع بستر را به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته و آشکارساز جهت اندازه گیری طیف عبور ساختار را در داخل بستر قرار می دهیم. حلقه هایی از جنس گرافن با دوره تناوب ثابت P را روی بستر قرار می دهیم. پهنای حلقه های گرافنی W و ضخامت آنها t است.



شکل ۱ طرحواره ای از حسگر مورد بررسی شامل آرایه ای متناوب با دوره تناوب P از حلقه های گرافنی با پهنای W و ضخامت t بر روی یک بستر با ضریب شکست n_{sub} در یک محیط سنجش با ضریب شکست n_{med} .



رسانایی سطحی گرافن را می‌توان از راه رابطه کوپو در منبع [۱۶] بدست آورد. این رابطه شامل سهم انتقال درون نواری و بین نواری است. در محدوده فرکانسی پایین‌تر از تراهرتز، انتقال بین نواری و سهم انتشار فونون‌های نوری بسیار کم است و اثرات آن‌ها را می‌توان نادیده گرفت. افزون بر این، در فرآیند محاسبه، دمای T در 300 کلوین تنظیم می‌شود. با هدایت چگالی حامل‌های بار در گرافن می‌توان شرط $E_F \gg K_B T$ را برآورده کرد. به صورت کلی، بر اساس با اصل حذف پائولی، رسانای سطحی گرافن را می‌توان به عنوان یک حالت ویژه از الگوی درون نواری درود به صورت زیر تقریب زد [۱۶ و ۱۷]:

$$\sigma(\omega) = \frac{e^2 E_F}{\pi \hbar^2} \frac{1}{\omega + i\tau^{-1}} \quad (1)$$

در رابطه بالا، e بار الکترون، ω فرکانس زاویه‌ای موج فرودی و \hbar ثابت پلانک کاهش یافته است. پارامترهای زمان آرامش (τ) و انرژی فرمی (E_F) را می‌توان از روابط زیر بدست آورد:

$$\tau = \mu \hbar \sqrt{\pi |n_g|} / e v_F \quad (2)$$

$$E_F = \hbar v_F \sqrt{\pi |n_g|} \quad (3)$$

که در آن، n_g چگالی الکترونی گرافن، v_F سرعت فرمی و μ میزان تحرک پذیری حامل‌های بار در گرافن است. مقدار این پارامترها در منبع [۱۶] بیان شده است. گذردهی الکتریکی گرافن بر اساس رابطه زیر با رسانندگی سطحی و ضخامت حلقه‌های گرافنی ارتباط دارد [۱۸]:

$$\varepsilon_g(\omega) = 1 + \frac{i\sigma(\omega)}{\varepsilon_0 \omega t} \quad (4)$$

در این مقاله پاسخ طیفی حسگر طراحی شده مبتنی بر حلقه‌های گرافنی را با استفاده از روش $FDTD$ محاسبه می‌کنیم. برای شبیه‌سازی از نرم افزار لومریکال استفاده شده است. در فرآیند شبیه‌سازی با استفاده از رابطه پاشندگی بالا برای لایه‌های گرافن، ابتدا ضریب شکست و ضریب خاموشی گرافن را در طول موج‌های مختلف در ناحیه تراهرتز بدست آورده و به عنوان یک ماده جدید در نرم افزار لومریکال تعریف شده است. در تمام فرآیند محاسبه، شرایط مرزی در جهت‌های x, y متناوب انتخاب شده است. در راستای z شرط مرزی لایه کاملاً هم‌سو (PML) بکار گرفته شده است. موج فرودی در جهت z منتشر می‌شود. در تمامی شبیه‌سازی‌ها از موج صفحه‌ای تخت با قطبش در راستای محور y به عنوان منبع نور استفاده می‌کنیم [۷].

عملکرد یک حسگر اپتیکی با دو معیار حساسیت (S) و ضریب شایستگی (FOM) که به صورت زیر تعریف می‌شوند، سنجیده می‌شود [۱۹]:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \quad (5)$$

$$FOM = \frac{S}{FWHM} \quad (6)$$

بر اساس رابطه (۵)، حساسیت حسگر برابر با میزان جابه‌جایی طول موج تشدید ساختار به ازای واحد تغییرات ضریب شکست محیط سنجش است. در رابطه (۶)، پارامتر FWHM مقدار نیم‌پهنای قله (و یا دره) در نصف مقدار بیشینه (کمینه) در طیف عبور ساختار است. بنابراین شایستگی حسگر از تقسیم میزان حساسیت حسگر به پارامتر FWHM بدست می‌آید.

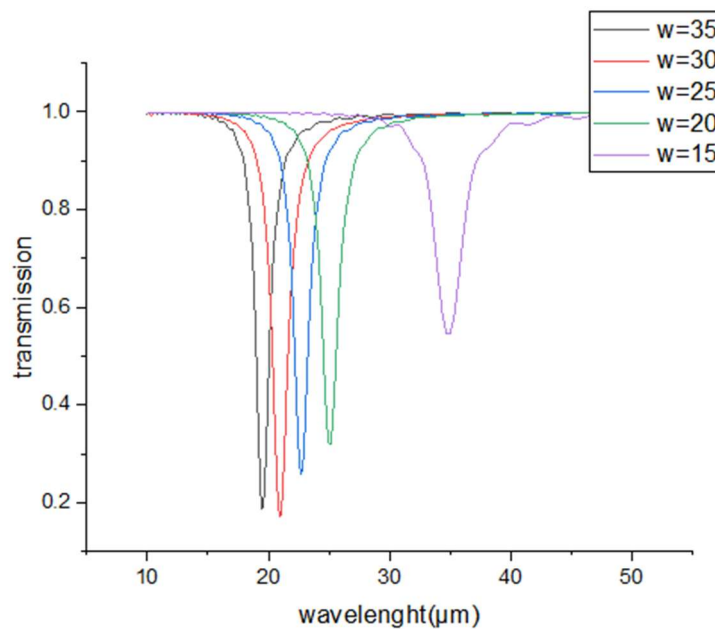
۳. نتایج و بحث

در این مقاله، از یک آرایه چهارتایی با دوره تناوب $p=300\text{ nm}$ از تک حلقه‌های گرافنی بر اساس شکل (۱) استفاده شده است. این سلول واحد گرافنی بر روی یک بستر با ضریب شکست $1/45$ و در محیط سنجش خلا با ضریب شکست $n_{sub}=1$ قرار دارد. با فرض اینکه چگالی حامل‌های بار در گرافن $n_g = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ و ضخامت حلقه‌ها $t=1\text{ nm}$ باشد، تاثیر پارامترهای هندسی مختلف در طیف عبور ساختار مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از پارامترهای اثرگذار، شعاع داخلی حلقه‌ها و پهنای حلقه‌ها است. در شکل (۲) طیف عبور ساختار به ازای پهنای مختلف حلقه‌های گرافنی نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، طیف عبور ساختار به ازای پهنای مختلف شامل یک دره کمابیش باریک است. با تغییر پهنای حلقه‌ها متوجه می‌شویم که آرایه‌های گرافنی طیف تشدید وسیعی دارند به گونه‌ای که با تغییر این پارامتر هندسی طول موج تشدید از $18/9$ به $34/8$ میکرومتر افزایش می‌یابد. همچنین مقدار FWHM در این نمودارها برای پهنای 15 ، 20 ، 25 ، 30 و 35 نانومتر به ترتیب برابر با $2/46$ ، $2/19$ ، $1/86$ ، $1/96$ و $1/62$ میکرومتر است. هنگامی که پهنای حلقه‌های گرافنی (W) از 15 به 35 نانومتر افزایش می‌یابد، فاصله بین حلقه‌ها کاهش می‌یابد و در نتیجه اثر جفت‌شدگی بین حلقه‌ها افزایش می‌یابد و منجر به افزایش عمق دره‌ها در طیف عبور حسگر می‌شود. افزون بر این، با افزایش W طول موج تشدید نیز افزایش می‌یابد و بعد از 30 نانومتر با کاهش ارتفاع دره در طیف عبور روبرو می‌شویم، در نتیجه در پهنای 30 نانومتر با اختلاف جزئی دره ایجاد شده در طیف عبور عمیق‌تر است.

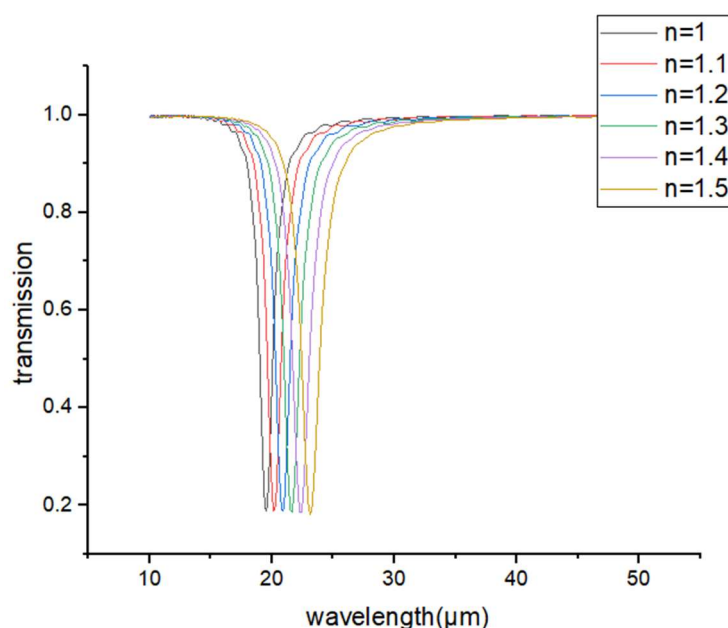


در ادامه طیف عبور حسگر پیشنهادی به ازای تغییر ضریب شکست محیط سنجش بررسی می‌شود. مطابق شکل (۳)، حسگر نسبت به افزایش ضریب شکست محیط اطراف تغییرات مثبتی را از خود نشان می‌دهد و با افزایش ضریب شکست محیط اطراف، طول موج تشدید ساختار به سمت طول موج‌های بالاتر جابه‌جا می‌شوند. بر اساس نتایج بالا تاثیر تغییر ضریب شکست محیط سنجش بر طول موج تشدید ساختار پلاسمونی مورد مطالعه مشهود است. همان طور که می‌دانیم طول موج تشدید در یک ساختار دو بعدی دوره ای از رابطه زیر تبعیت می‌کند [۱]:

$$\lambda_{SPP}(n, m) = \frac{p}{\sqrt{n^2 + m^2}} \sqrt{\frac{\epsilon_d \epsilon_g(\lambda)}{\epsilon_d + \epsilon_g(\lambda)}} \quad (7)$$



شکل ۲ طیف عبور حسگر پیشنهادی به ازای پهنای متفاوت حلقه‌های گرافنی با ضریب شکست ثابت 1 برای محیط سنجش.

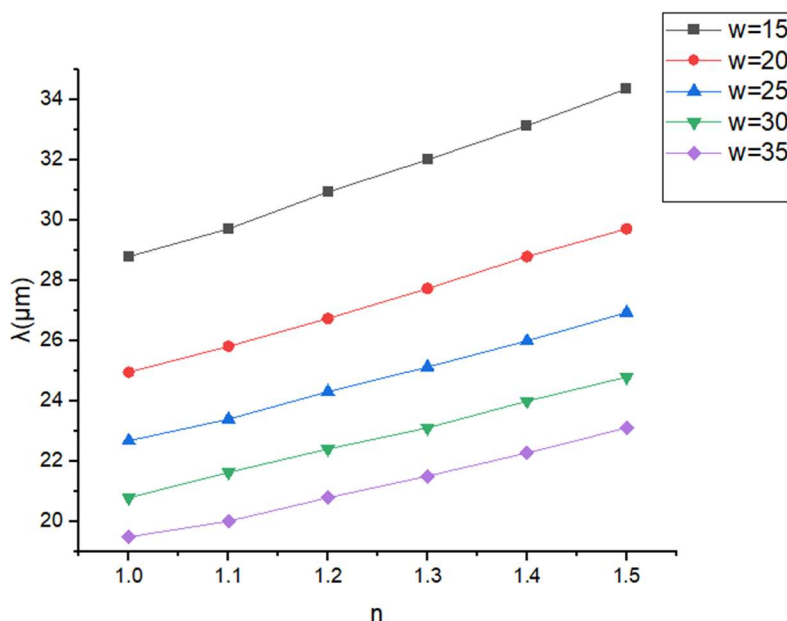


شکل ۳ طیف عبور حسگر پیشنهادی بر حسب تغییر ضریب شکست محیط مورد سنجش به ازای $w = 35 \text{ nm}$.

در رابطه بالا، p دوره تناوب ساختار، (m, n) شماره مد، ϵ_g گذردهی الکتریکی گرافن و ϵ_d ثابت گذردهی الکتریکی محیط دی الکتریک است. بر اساس این رابطه، جابه جایی طول موج تشدید مدهای پلاسمون سطحی با تغییر ضریب شکست و ثابت گذردهی الکتریکی محیط اطراف قابل انتظار است. نیاز به یاد آوری است که در ساختار مورد بررسی در ناحیه تر اهرتر یک مد تشدید پلاسمونی مشاهده می شود. در این مد با توجه به نتایج بدست آمده از نمودار شکل (۳) با افزایش ضریب شکست محیط اطراف طول موج تشدید پلاسمون سطحی افزایش می یابد.

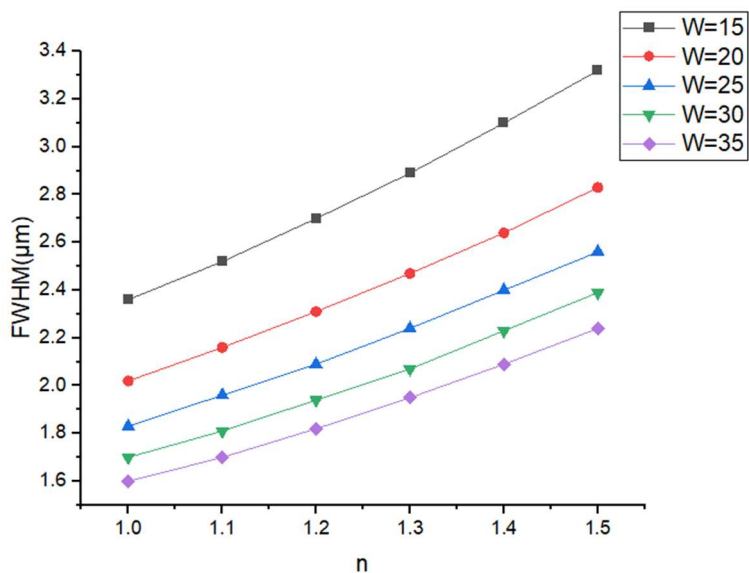
جهت انتخاب بهینه پارامترهای هندسی در شکل (۴) نمودار تغییرات طول موج تشدید ساختار بر حسب تغییر ضریب شکست محیط اطراف به ازای پهناهای مختلف حلقه های گرافنی رسم شده است. همان طور که در شکل (۴) مشاهده می شود، تغییر طول موج تشدید بر حسب ضریب شکست محیط سنجش یک رابطه خطی را نشان می دهد. بر اساس رابطه (۵)، شیب نمودار بالا میزان حساسیت (S) حسگر طراحی شده را نشان می دهد. با برازش خطی نمودارها و محاسبه شیب آنها مشاهده می کنیم که با کاهش پهنای حلقه های گرافنی از ۳۵ به ۱۵ نانومتر میزان حساسیت حسگر پیشنهادی از $7.3 \mu\text{m}/\text{RIU}$ به $11.2 \mu\text{m}/\text{RIU}$ افزایش می یابد.



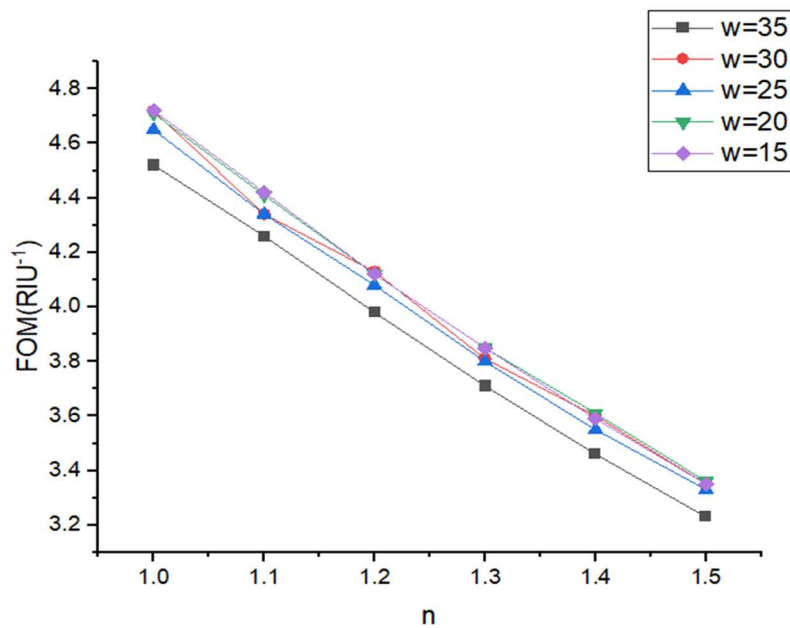


شکل ۴ بررسی طول موج تشدید حسگر پیشنهادی بر حسب تغییرات ضریب شکست محیط اطراف به ازای پهناهای مختلف حلقه‌های گرافنی.

یکی دیگر از پارامترهای اساسی در سنجش عملکرد یک حسگر کمیت ضریب شایستگی حسگر است. در شکل‌های (۵) و (۶) پارامترهای FWHM و FOM بر حسب تغییرات ضریب شکست محیط سنجش به ازای پهناهای مختلف حلقه‌های گرافنی ترسیم شده‌اند. نتایج حاصل از تحلیل نمودارهای رسم شده در شکل‌های (۵) و (۶) نشان می‌دهد که افزایش ضریب شکست محیط اطراف سبب پهن شدن دره‌ها در طیف عبور و کاهش ضریب شایستگی حسگر طراحی شده می‌شود. بنابراین افزایش ضریب شکست محیط اطراف تا حدودی عملکرد حسگر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. همچنین بر اساس این نمودارها کماکان هر چه پهناهای حلقه‌های گرافنی کمتر باشد، ضریب شایستگی و کیفیت عملکرد حسگر افزایش می‌یابد.



شکل ۵ میزان تغییرات FWHM حسگر پیشنهادی بر حسب تغییرات ضریب شکست محیط اطراف به ازای پهناهای مختلف حلقه‌های گرافنی.



شکل ۶ میزان تغییرات FOM حسگر پیشنهادی بر حسب تغییرات ضریب شکست محیط اطراف به ازای پهناهای مختلف حلقه‌های گرافنی.



بر اساس نتایج بدست آمده حسگر پیشنهادی دارای حساسیت بالا و ضریب شایستگی بزرگ در ضریب شکست‌های کوچک محیط اطراف می‌باشد. بنابراین از این حسگر می‌توان جهت سنجش آلودگی‌های ایجاد شده در هوای آزاد استفاده نمود. آلودگی‌های ایجاد شده می‌تواند به میزان جزئی ضریب شکست محیط اطراف ساختار را تحت تاثیر قرار دهد. تغییرات جزئی در ضریب شکست محیط اطراف منجر به جابه‌جایی قابل توجه در فرکانس تشدید در طیف عبور حسگر می‌شود. با مدرج کردن مناسب حسگر بر اساس عوامل زیست‌شناختی شناخته شده در هوای آزاد اطراف ساختار می‌توان پی به نوع آلودگی ایجاد شده برد.

در انتها و در جدول (۱) میزان حساسیت حسگر طراحی شده در این پژوهش با حسگرهای گرافنی مشابه در منابع [۲۰] و [۲۱] مقایسه شده است. با مقایسه نتایج حسگر مورد بررسی و حسگرهای مشابه آن در مقالات نشان داده شده در جدول (۱)، افزایش میزان حساسیت ساختار قابل مشاهده است.

جدول ۱ مقایسه میزان حساسیت ساختار مورد مطالعه در این پژوهش و ساختارهای مشابه

منبع	حساسیت حسگر ($\mu m/RIU$)
[۲۰]	۴/۵
[۲۱]	۵/۲۰
ساختار در این پژوهش	۱۱/۲

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک حسگر ضریب شکست مبتنی بر ساختارهای تشدید پلاسمون سطحی در ناحیه تراهرتز طراحی شده است. ساختار مورد نظر شامل آرایه‌ای از حلقه‌های گرافنی است که بر روی یک بستر با ضریب شکست ثابت ۱/۴۵ قرار گرفته‌اند. با تغییر پارامترهای هندسی ساختار، پارامترهای بهینه جهت عملکرد حسگر استخراج شده است. این حسگر را در داخل یک محیط سنجش با ضریب شکست متغیر قرار داده و میزان حساسیت حسگر بر حسب تغییر ضریب شکست محیط اطراف بررسی شده است. در مقایسه با ساختارهای پیشین، ساختار ارائه شده در عین سادگی دارای حساسیت بیشتری است. همچنین افزایش ضریب شکست محیط اطراف سبب افزایش پهنای نمودارها در طیف عبور و کاهش پارامتر ضریب شایستگی حسگر می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده باور داریم که حسگر طراحی شده دارای توانایی کاربرد گسترده در زمینه زیستی و شناسایی آلودگی‌های موجود در هوای آزاد اطرافش می‌باشد.

۵. تقدیر و تشکر

از مسئولین مجله فیزیک کاربردی ایران تقدیر و تشکر می‌شود. از داوران گرامی نیز به خاطر ارائه رهنمودهای ارزشمند سپاس گزاریم.

منابع

- [1] Oliveira L. C., Lima A. M. N., Thirstrup C., Neff H. F., "Surface plasmon resonance sensors: a materials guide to design and optimization", *Springer*, New York, 1st ed, 11-25, 2015.
- [2] Maier S. A., "Plasmonics: Fundamentals and Applications Springer", *Springer*, New York, 1st ed, 1-88, 2007.
- [3] Sovizi M. and Aliannezhadi, M., "Localized surface plasmon resonance (LSPR) of coupled metal nanospheres in longitudinal, transverse and three-dimensional coupling configurations", *Optik* **252**, p.168518, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.168518>.
- [4] Homola J., Yee S. S., Gauglitz G., "Surface plasmon resonance sensors", *Sensors and actuators B: Chemical* **54**, 3-15, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0925-4005\(98\)00321-9](https://doi.org/10.1016/S0925-4005(98)00321-9).
- [5] Danyiyal W. M. E. M. M., Wing Fen Y., Fauzi N. I. M., Hashim H. S., Ramdzan N. S., Omar N. A. S. Omar, "Recent advances in surface plasmon resonance optical sensors for potential application in environmental monitoring", *Sens. Mater* **32(12)**, 4191-4200, 2020. <https://doi.org/10.18494/SAM.2020.3204>.
- [6] Ogawa S, Fukushima S and Shimatani M, "Graphene Plasmonics in Sensor Applications: A Review", *Sensors* **20**, 3563, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20123563>.
- [7] Sovizi M. and Aliannezhadi, M., "Design and simulation of high-sensitivity refractometric sensors based on defect modes in one-dimensional ternary dispersive photonic crystal", *JOSA B* **36(12)**, pp.3450-3456, 2019. <https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.003450>.
- [8] Aliannezhadi M., Mozaffari M.H. and Amirjan, F., "Optofluidic R6G microbubble DBR laser: A miniaturized device for highly sensitive lab-on-a-chip biosensing", *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications* **53**, p.101108, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.photonics.2023.101108>.
- [9] Zhaohe D., Luqi L., Zhong Z., "Strain engineering of 2D materials: issues and opportunities at the interface", *Advanced Materials* **31(45)**, 1805417, 2019. <https://doi.org/10.1002/adma.201805417>.
- [10] Glavin N. R., Rao R., Varshney V., Bianco E., Apte A., Roy A, Ringe E, Ajayan P., "Emerging applications of elemental 2D materials", *Advanced Materials* **32(7)**, 1904302, 2020. <https://doi.org/10.1002/adma.201904302>.
- [11] Geim A. K., and K. S. Novoselov, "The Rise of Graphene", *Nature Materials* **6**, 3-183, 2007. <https://doi.org/10.1038/nmat1849>.
- [12] Katsnelson M. I., "Graphene: Carbon in Two Dimensions", *Materials Today* **10**, 1-20, 2007, [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(06\)71788-6](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(06)71788-6).
- [13] Pang S., Hernandez Y., Feng X., Müllen K., "Graphene as transparent electrode material for organic electronics", *Adv. Mater* **23**, 2779-2795, 2011. <https://doi.org/10.1002/adma.201100304>.



- [14] Lee C, Wei X, Kysar JW, Hone J., "Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene", *Science* **321**, 385-388, 2008. <https://doi.org/10.1126/science.1157996>.
- [15] Taflove A., Hagness S. C., Picket-May M., "Computational Electromagnetics: The Finite-Difference Time-Domain Method", In *the Electrical Engineering Handbook*, Elsevier Inc., 629-670, 2005. <https://doi.org/10.1016/B978-012170960-0/50046-3>.
- [16] Liu T., Wang H., Liu Y., Xiao L., Zhou C., Liu Y., Xu C., Xiao S., "Independently tunable dual-spectral electromagnetically induced transparency in a terahertz metal-graphene metamaterial", *J. Phys. D Appl. Phys.* **51**, 415105, 2018. <https://doi.org/10.1088/1361-6463/aadb7f>.
- [17] Shangguan Q., Chen Z., Yang H., Chrng S., Yang W., Yi Z., Wu X., Wang S., Yi Y., Wu P., "Design of ultra-narrow band graphene refractive index sensor", *Sensors* **22(17)**, 6483, 2022. <https://doi.org/10.3390/s22176483>.
- [18] Cheng Y., Zho X., Li J., Chen F., Luo H., Wu L., "Terahertz broadband tunable reflective cross-polarization convertor based on complementary cross-shaped graphene metasurface", *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* **134**, 114893, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2021.114893>.
- [19] Chen H., Chen, Z., Yang H., Wen L., Yi Z., Zhou Z., Dai B., Zhang J., Wue X., Wuf P., "Multi-mode surface plasmon resonance absorber based on dart-type single-layer grapheme", *RSC Adv.* **12**, 7821, 2022. <https://doi.org/10.1039/D2RA00611A>.
- [20] Liu J., Wang W., Xie F., Zhang X., Zhou X., Yuan Y., Wang L., "Excitation of Surface Plasmon Polariton Modes with Double-Layer Gratings of Graphene", *Nanomaterials* **12(7)**, 1144, 2022. <https://doi.org/10.3390/nano12071144>.
- [21] Cen C., Lin H., Huang J., Liang C., Chen X., Tang Y., Yi Z., Ye X., Liu J., Yi Y., Xiao S., "A tunable plasmonic refractive index sensor with nanoring-strip graphene arrays", *Sensors* **18(12)**, 4489, 2018. <https://doi.org/10.3390/s18124489>.



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

