

طراحی حسگر ضریب شکست پلاسمونیک مبتنی بر ساختار دو بعدی دوره‌ای از جنس گرافن

مهدیزاده، فاطمه^۱؛ خزاعی نژاد قره تکان، مهدی^۱

^۱گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

چکیده

در این مقاله، ما یک حسگر ضریب شکست به کمک ساختاری دو بعدی و متناوب از حلقه‌های گرافن طراحی کردیم. ابتدا با تغییر ضخامت حلقه‌ها در ساختار، بهینه‌ترین حالت برای طول موج تشدید را بدست آوردیم. در ادامه با ثابت در نظر گرفتن مشخصات هندسی ساختار، به ازای تغییر ضریب شکست محیط سنجش از ۱ تا ۱/۵ طول موج تشدید از ۲۰/۹ میکرومتر به ۲۴/۷۹ میکرومتر انتقال پیدا می‌کند. با توجه به نتایج بدست آمده ساختار پیشنهادی دارای حساسیت ۷/۷۸ میکرومتر بر واحد تغییرات ضریب شکست است. این مقدار حساسیت نسبت به پژوهش‌های مشابه بیشتر است. محدوده طول موج مورد بررسی بین ۱۰ تا ۵۰ میکرومتر و در ناحیه ترا هرتز است. در این پژوهش از نرم‌افزار لومریکال مبتنی بر روش تفاضل‌های محدود در بازه زمان استفاده شده است.

واژه های کلیدی: حسگر ضریب شکست- گرافن- روش تفاضل‌های محدود بازه زمان- حساسیت.

Design of plasmonic refractive index sensor based on periodic two-dimensional structure of graphene

Mehdizadeh, Fatemeh¹; Khazaei Nezhad, Mehdi¹

¹ Department of Physics, Faculty of Science, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Abstract

In this paper, we designed a refractive index sensor based on two-dimensional and periodic structure of graphene rings. First, by changing the ring thickness in the structure, we obtain the optimal mode for the resonance wavelength. Then, keeping the geometric characteristics constant, for changing the refractive index of the measuring medium from 1 to 1.5, the resonant wavelength is transferred from 20.9 micrometers to 24.79 micrometers. According to these results, the proposed structure has a sensitivity of 7.78 micrometers per unit of refractive index changes. This amount of sensitivity is higher than similar reported studies. The investigated wavelength range is between 10 and 50 micrometers and in the terahertz region. The Lumerical package based on the finite difference time domain method has been used in this work.

Keywords: refractive index sensor -Graphene- FDTD - Sensitivity

PACS No.

مقدمه

فرودی مساوی شود آنگاه پدیده تشدید پلاسمون سطحی (SPR) اتفاق می‌افتد. این پدیده در فصل مشترک فلز-دی الکتریک و در مقیاس طول موج یک بستر عالی برای انواع کاربردهای اپتیکی فراهم می‌کند. ساختارهای مبتنی بر SPR به هندسه ساختار، جنس مواد و قطبش و فرکانس نوری ورودی بر آن حساس هستند. این ساختارها به طور گسترده در زمینه‌های زیستی و شیمیایی استفاده می‌شوند. از جمله کاربردهای SPR می‌توان به طراحی آشکارساز-های نوری، سلول‌های خورشیدی و حسگرها اشاره کرد. امروزه گرافن به عنوان اولین ماده دو بعدی کشف شده، بدلیل

به نوسانات دسته‌جمعی الکترون‌های آزاد فلزی در فصل مشترک فلز-دی الکتریک پلاسمون سطحی گویند. پلاسمون‌های سطحی در اثر تحریک توسط امواج الکترومغناطیس فرودی در یک بازه طول موجی معین، در فصل مشترک فلز-دی الکتریک منتشر شده و امواج پلاسمون سطحی را شکل می‌دهند. این امواج در راستای عمود بر فصل مشترک دو محیط منتشر می‌شوند و دارای دامنه گذرا و میرا شونده در داخل دو محیط هستند. هنگامی که فرکانس نوسان پلاسمون‌های تولیدی با فرکانس موج الکترومغناطیس

ضریب شکست n_{sub} و در یک محیط سنجش با ضریب شکست n_{med} مرتب شده‌اند.

رسانایی سطحی گرافن را می‌توان با استفاده از روابط موجود در مرجع [2] به دست آورد. در فرآیند محاسبه، دمای T در 300 کلوین تنظیم می‌شود. با کنترل چگالی حامل‌های بار در گرافن می‌توان شرط $E_F \gg K_B T$ را برآورده کرد. با در نظر گرفتن اصل طرد پائولی، تحت شرط فوق رسانایی سطحی گرافن به عنوان یک حالت خاص از مدل درود را می‌توان به صورت زیر تقریب زد:

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

در روابط 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 با روابط زیر محاسبه کرد:

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

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

n_g چگالی الکترونی گرافن و μ سرعت فرمی آن است. در این مقاله پاسخ طیفی حسگر پیشنهادی با استفاده از روش FDTD و به کمک نرم افزار لومریکال محاسبه شده است. در تمام فرآیند محاسبه، شرایط مرزی در جهت x, y متناوب انتخاب شده است. از لایه کاملاً منطبق (PML) به عنوان شرط مرزی به کار رفته در راستای انتشار Z استفاده شده است. در این شبیه‌سازی از موج صفحه‌ای به عنوان منبع نور ورودی با قطبش در راستای محور y استفاده می‌کنیم [3].

نتایج و بحث

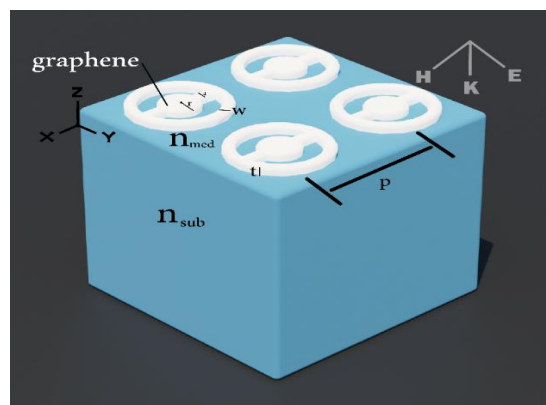
در این مقاله، از یک آرایه چهارتایی با دوره تناوب $P = 300$ nm از حلقه‌های گرافنی متصل به دیسک مطابق شکل (1) استفاده شده است. این سلول واحد گرافنی بر روی یک بستر با ضریب شکست $n_{sub} = 1.45$ و در محیط سنجش خلا با ضریب شکست $n_{med} = 1$ قرار دارد. با فرض اینکه چگالی حامل‌های بار در گرافن $n_g = 1 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ، عرض حلقه‌ها $w = 30$ nm، شعاع حلقه‌ها $r = 60$ nm و ضخامت حلقه‌ها $t = 1$ nm باشد، طیف عبور در این ساختار بر حسب طول موج مطابق شکل (2) است.

خواص نوری و الکترونیکی منحصر به فرد، توجه زیادی در تحقیقات الکترونیکی و فوتونیک به خود اختصاص داده است. از ویژگی‌های گرافن می‌توان به تنظیم خواص اپتیکی و الکترونی آن توسط دما، میدان الکتریکی، میدان مغناطیسی خارجی، تنش و کرنش مکانیکی اشاره کرد.

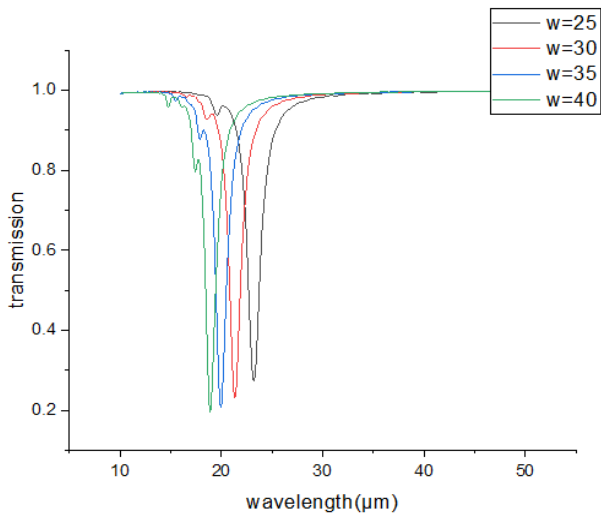
در این مقاله، ما یک حسگر ضریب شکست به کمک ساختارهای مبتنی بر تشدید پلاسمون‌های سطحی و به کمک آرایه‌ای از حلقه‌های متصل به دیسک گرافنی طراحی کردیم. پارامترهای بهینه جهت عملکرد حسگر طراحی شده به کمک نرم افزار لومریکال با استفاده از روش تفاضل محدود بازه‌ی زمان (FDTD) مورد مطالعه قرار گرفته است [1].

تئوری

در شکل (1)، ساختار هندسی حسگر مورد مطالعه ترسیم شده است. این ساختار شامل آرایه‌ای از حلقه‌های گرافنی است که توسط دو بازو به یک دیسک در مرکز حلقه متصل هستند. این آرایه بر روی یک بستر با ضریب شکست n_{sub} و یک محیط سنجش با ضریب شکست n_{med} قرار گرفته‌اند. ارتفاع بستر را به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته و آشکارساز جهت اندازه‌گیری طیف عبور ساختار را در داخل بستر قرار می‌دهیم. حلقه‌های از جنس گرافن با دوره تناوب ثابت P را روی بستر قرار می‌دهیم. پهنای حلقه‌های گرافنی w ، شعاع دیسک r و ضخامت آن‌ها t است.

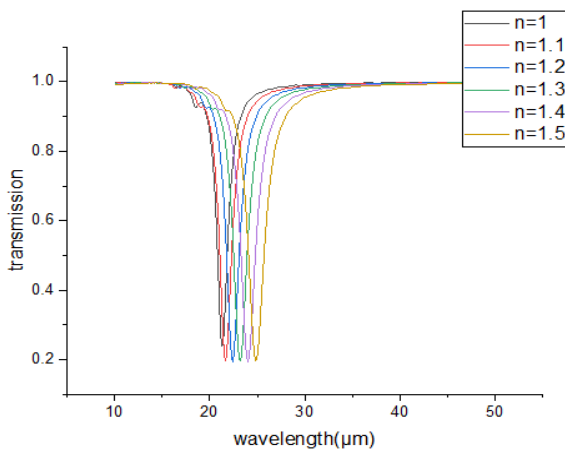


شکل 1: طرحواره ای از حسگر مورد مطالعه: حلقه‌ها را با دوره تناوب P، عرض حلقه‌های w، شعاع دیسک r و ضخامت حلقه‌های گرافنی t روی یک بستر با

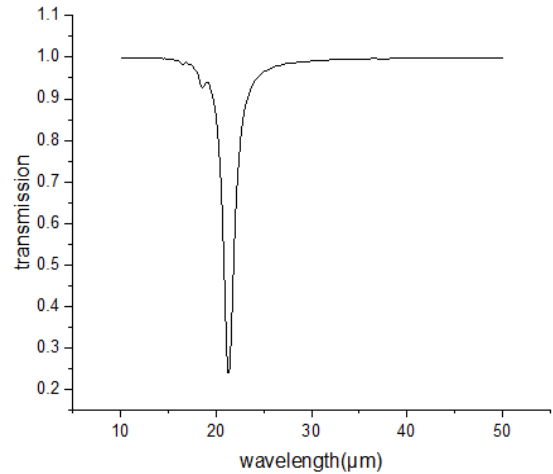


شکل ۳: طیف انتقال حسگر به‌ازای عرض‌های متفاوت حلقه‌های گرافنی.

مطابق نتایج به دست آمده در شکل (۳) با افزایش عرض حلقه‌ها (افزایش شعاع داخلی حلقه‌ها) طول موج تشدید اصلی کاهش یافته و با مد تشدید جانبی در طول موج‌های کوچک‌تر تزویج می‌گردد. این فرایند تزویج بر عملکرد حسگر تاثیر منفی می‌گذارد. بنابراین عرض بهینه برای طراحی حسگر عرض $w=30 \text{ nm}$ انتخاب می‌شود. در ادامه طیف انتقال برحسب طول موج با تغییر ضریب شکست محیط سنجش بررسی می‌شود. مطابق شکل (۴)، با افزایش ضریب شکست محیط اطراف، طول موج تشدید ساختار به سمت طول موج‌های بالاتر جا به جا می‌شوند.



شکل ۴- طیف انتقال گرافن برای ضریب شکست‌های محیطی متفاوت.



شکل ۲: طیف انتقال برحسب طول موج ساختار مورد بررسی.

همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، طیف عبور ساختار شامل یک دره تقریباً باریک در طول موج تشدید $20/79$ میکرو متر است. البته در کنار این دره تشدید قوی یک دره کوچک جانبی در طول موج‌های کوچک‌تر نیز ظاهر می‌شود. در طراحی حسگرها هر چه قدر حلقه‌ها (و یا دره‌ها) در طیف عبور ساختار عمیق‌تر و دارای پهنای کمتر و باریک‌تر باشند، این ساختار جهت طراحی حسگر مناسب‌تر است. به همین منظور تغییرات رخ داده برای دره عمیق‌تر را در فرایند سنجش میزان عملکرد حسگر مورد بررسی قرار داده‌ایم. همان‌گونه که ذکر شد پارامترهای هندسی بر روی کیفیت طیف عبور حسگر اثر می‌گذارند. به همین منظور تاثیر پارامترهای هندسی مختلف در طیف عبور ساختار مورد بررسی قرار گرفته است. از میان پارامترهای هندسی موجود یکی از پارامترهای اثرگذار، عرض حلقه‌ها است. برای بررسی هندسه ساختار با افزایش شعاع داخلی حلقه و در نتیجه کوچک‌تر شدن عرض حلقه‌ها طیف عبور ساختار بصورت شکل (۳) ظاهر می‌شود. بقیه پارامترها به جز w و r همان پارامترهای شکل (۲) می‌باشند.

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

مرجع	حساسیت حسگر ($\mu\text{m}/\text{RIU}$)
[4]	۴/۵
[5]	۵/۲۰
ساختار در این مقاله	۷/۷۸

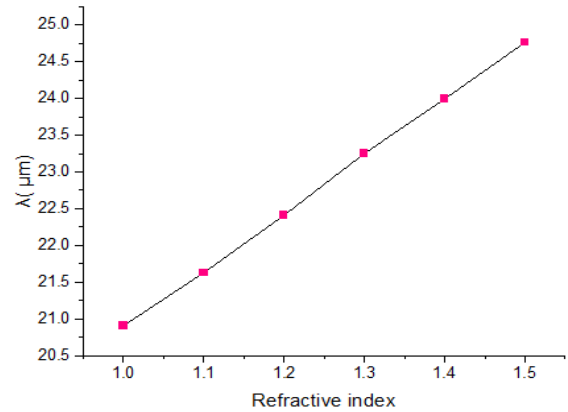
نتیجه گیری

در این مقاله، یک حسگر ضریب شکست مبتنی بر ساختارهای تشدید پلاسمون سطحی در ناحیه ترا هرتز طراحی شده است. ساختار مورد نظر شامل آرایه‌ای از حلقه‌های متصل به دیسک 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. میزان حساسیت حسگر بر حسب تغییر ضریب شکست محیط اطراف بررسی شده است. در مقایسه با ساختارهای قبلی، ساختار ارائه شده دارای حساسیت بیشتری است. با توجه به نتایج بدست آمده معتقدیم حسگر طراحی شده دارای قابلیت کاربردهای گسترده در زمینه زیستی و تصویر برداری است.

مراجع

- [1] S Pang, Y Hernandez, X Feng, K Müllen, "Graphene as transparent electrode material for organic electronics"; *Adv. Mater.*, **23**, (2011), 2779–2795.
- [2] T. Liu, H. Wang, Y. Liu, L. Xiao, C. Zhou, Y. Liu, C. Xu, S. Xiao, "Independently tunable dual-spectral electromagnetically induced transparency in a terahertz metal-graphene metamaterial" *J. Phys. D Appl. Phys.*, **51** (2018) 415105.
- [3] J Homola, SS Yee, G Gauglitz, "Surface plasmon resonance sensors", *Sensors and actuators B: Chemical*, **54**, (1999) 3-15.
- [4] J Liu, W Wang, F Xie, X Zhang, X Zhou, Y Yuan, "Excitation of Surface Plasmon Polariton Modes with Double-Layer Gratings of Graphene. *Nanomaterials*", **12** (2022) 1144.
- [5] C Cen, H Lin, J Huang, C Liang, X Chen, Y Tang, Z Yi, "A tunable plasmonic refractive index sensor with nanoring-strip graphene arrays" *Sensors*, **18** (2018), 4489.

مطابق نتایج بالا تاثیر تغییر ضریب شکست محیط سنسجش بر طول موج تشدید ساختار پلاسمونی مورد مطالعه مشهود است. در شکل (۵) نمودار تغییرات طول موج تشدید ساختار بر حسب تغییر ضریب شکست محیط اطراف رسم شده است.



شکل ۵: بررسی طول موج تشدید به ازای هر ضریب شکست

همان‌طور که در شکل (۵) مشاهده می‌شود تغییر طول موج تشدید بر حسب ضریب شکست محیط سنسجش یک رابطه خطی را نشان می‌دهد. حساسیت حسگر برابر با میزان تغییرات طول موج تشدید ساختار به ازای واحد تغییرات ضریب شکست محیط سنسجش است. به عبارتی شیب نمودار فوق میزان حساسیت (S) حسگر طراحی شده را نشان می‌دهد. طبق نتایج بدست آمده از این نمودار، این ساختار دارای حساسیتی برابر با ۷/۷۸ میکرو متر بر حسب واحد تغییرات ضریب شکست ($\mu\text{m}/\text{RIU}$) است.

بنابراین افزایش ضریب شکست محیط اطراف تا حدودی عملکرد حسگر را تحت تاثیر قرار می‌دهد. در انتها و در جدول (۱) میزان حساسیت حسگر طراحی شده در این مقاله با حسگرهای گرافنی مشابه در مراجع [4] و [5] مقایسه شده است. با مقایسه نتایج، حسگر مورد بررسی و حسگرهای مشابه آن در مقالات ارجاع داده شده در جدول ۱، افزایش میزان حساسیت ساختار قابل مشاهده است.