

پلاسمون های سطحی در نانوفوتونیک کریستال های گرافن - طلا به عنوان آشکارساز در ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک

بنفشه یکتاپرست، زینب صادقی و حسین شیرکانی

گروه فیزیک، دانشگاه خلیج فارس، بوشهر

چکیده- پلاسمون های سطحی در گرافن به علت ویژگی های فوق العاده، کاربردهای بسیاری پیدا کرده اند. در این مقاله، با استفاده از فوتونیک کریستال یک بعدی از جنس نانو روبان های طلا در مجاورت گرافن، پلاسمون های سطحی در ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک ایجاد شده و خواص اپتیکی گرافن و ضریب خاموشی ساختار مورد بررسی قرار گرفته است. وابستگی طول موج تشدید پلاسمون ها به پارامترهای نوری از جمله ضریب شکست ماده مورد آشکارسازی بررسی شده و با معرفی ضریب حساسیت $S = \Delta\lambda / \Delta n$ میزان حساسیت ساختار نسبت به تغییرات جزئی ضریب شکست محاسبه شده است. همچنین مشاهده شد، ساختار بیشترین میزان حساسیت را به ازای ضریب شکست های $n=2$ الی $n=3$ در ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک با مقدار تقریبی $300\text{nm}/\text{RIU}$ نشان می دهد.

کلید واژه- پلاسمون های سطحی، گرافن، ضریب حساسیت، سنسورهای اپتیکی.

Surface Plasmon in Graphene-Gold Nano Photonic Crystal as Detector in Near Infrared and Visible Regimes

Banafsheh Yektaparast, Zeynab Sadeghi, Hossein Shirvani

Department of Physics, Persian Gulf University, Boushehr

Abstract-Surface Plasmon's in graphene have been used extensively due to their extraordinary specifications. In this paper, surface Plasmon's in visible and near infrared regions using a photonics crystal of gold nanoribbons in the vicinity of graphene was constructed and the optical properties of the graphene and the 1-R of the structure was studied. We have studied, the wavelength dependence of the Plasmon's resonance on the optical properties of the structure including the refractive index of the detected material. By introducing the sensitivity coefficient of $S = \Delta\lambda / \Delta n$, the sensitivity of the structure to the partial changes of the refractive index was calculated. It was also observed that this structure shows the highest sensitivity for the refractive indexes $n = 2$ to $n = 3$ with approx. $300\text{ nm}/\text{RIU}$ in the visible and infrared region.

Keywords: Surface Plasmon, Graphene, Sensitivity Coefficient, Photonic Crystal

۱- مقدمه

گرافن نامی است که به یک تک‌لایه تخت از اتم‌های کربن به شکل شبکه لانه‌زنبوری در صفحه دوبعدی اختصاص داده اند [۱]. مدول یانگ بالا، مقاومت بالا در برابر شکست، رسانایی حرارتی خوب، تحریک‌پذیری بالای حاملان بار یا به عبارت دیگر رسانایی الکتریکی بالا، مساحت سطحی ویژه‌ی بالا از خواص فوق‌العاده گرافن هستند. تک لایه گرافن تنها حدود ۲,۳ درصد از نور خورشید را جذب می‌کند، اما می‌توان این مقدار جذب را با قراردادن گرافن در ساختارهای فوتونیک یک بعدی و همچنین ساختارهای پلاسمونیک افزایش داد. تشدید پلاسمون‌های سطحی یک تکنیک اپتیکی در زمینه حسگرهای شیمیایی است که تحت شرایط مناسب، بازتاب از سیستم به شدت نسبت به تغییرات اپتیکی فصل مشترک دی‌الکتریک-فلز حساس است [۲].

با استفاده از پلاسمون‌های سطحی در گرافن می‌توان به بسیاری از فن‌آوری‌های مفید، من جمله طراحی سنسور های گازی و بیوسنسورها بر مبنای خواص اپتیکی مواد دست پیدا کرد [۳]. خواص الکترواپتیکی قابل تنظیم، پایداری کریستالی، اپتیک غیرخطی، میدان الکترومغناطیسی بزرگ با شدت بالا از مزایای پلاسمون گرافن‌ها هستند [۳].

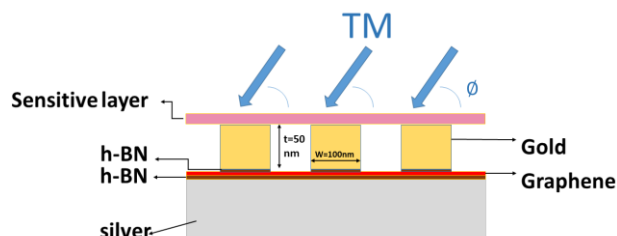
در این مقاله گرافن پلاسمون‌های تشکیل شده در ساختاری از فوتونیک کریستال‌های یک بعدی از نانو روبان‌های طلا در طول موج فروسرخ نزدیک و مرئی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- ساختار

از آنجایی که در ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک امکان جفت شدگی بین تکانه فوتون و تکانه پلاسمون در گرافن وجود ندارد، پلاسمون‌ها در گرافن نمی‌توانند مستقیماً توسط نور برانگیخته شوند [۴]. به همین دلیل برای بالا بردن برهمکنش گرافن و نور از نانوساختارهای بر پایه فلزات نجیب و دارای گریبتینگ استفاده می‌شود تا اولاً برانگیختگی پلاسمون‌ها بیشتر شود و دوماً نانوساختارهای گرافنی با قابلیت آشکارسازی حاصل شود [۴,۵].

در ساختار مورد مطالعه همانطور که در شکل ۱ دیده می‌شود یک لایه نقره در پایین‌ترین قسمت ساختار قرار دادیم، زیرا نقره دارای بیشترین زمان واپاشی دامنه پلاسمون‌های

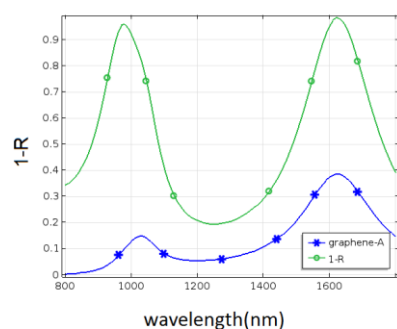
سطحی است. سپس نانو روبانهای طلا با پهنای ۱۰۰ نانومتر و فاصله ۵۰ نانومتر از یکدیگر روی تک لایه‌ای از گرافن که توسط دو لایه ۱ و ۲ نانومتری h-BN به ترتیب در بالا و پایین آن، ساندویچ شده است قرار داده شده است. قرار دادن یک لایه h-BN بین گرافن و نانو روبان‌های طلا از افت پلاسمون‌های سطحی تشکیل شده جلوگیری می‌کند و قرار دادن یک لایه دیگر از h-BN در زیرگرافن طول عمر پلاسمون‌های تشکیل شده را افزایش می‌دهد. در انتها یک لایه حساس، روی کل ساختار پوشانده شده و میزان حساسیت پلاسمون‌های سطحی نسبت به ضریب شکست این لایه مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور موج الکترومغناطیسی تخت با قطبش TM (مد های TE پلاسمون‌های سطحی را برای این ساختار تشکیل نمی‌دهند) تحت زاویه تابش θ به ساختار تابیده شده است.



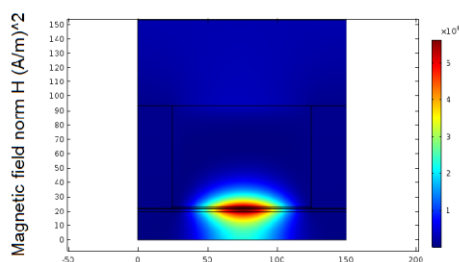
شکل ۱. شمایی از ساختار فوتونیک کریستال یک بعدی متشکل از نانو روبان‌های طلا، در مجاورت گرافن ساندویچ شده بین دو لایه h-BN که بر روی بستری از نقره قرار گرفته و لایه حساس بر بالای آن واقع شده است.

۳- بحث و بررسی نتایج

پتانسیل بالقوه گرافن در بالا بردن بازدهی سیستم‌های اپتیکی، ما را بر آن داشت تا به بررسی پلاسمون‌های سطحی گرافنی در سیستم‌های نانو اپتیکی در بازه طول موج فروسرخ و مرئی بپردازیم. با محاسبه ضریب جذب گرافن و ضریب خاموشی ساختار طول موج پیک‌های تشدید پلاسمون‌های سطحی را پیدا کرده و سپس اثر تغییرات ضریب شکست لایه حساس بر روی جابه‌جایی طول موج تشدید بررسی می‌گردد.



شکل ۳-الف

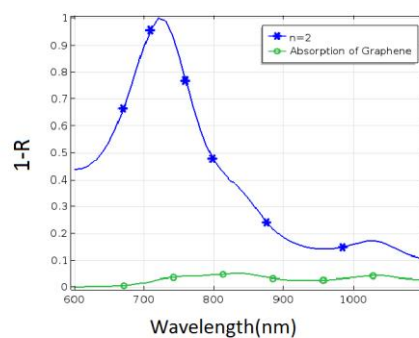


شکل ۳-ب

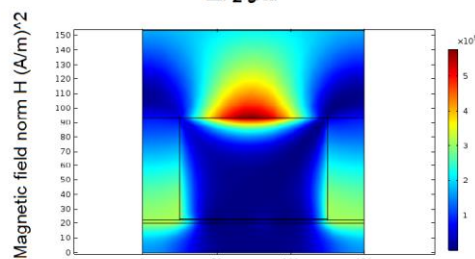
شکل ۳-الف مقایسه جذب گرافن (نمودار سبز) و خاموشی ساختار (نمودار آبی) بر حسب طول موج ۸۰۰ تا ۱۸۰۰ را نشان می‌دهد شکل ۳-ب نمودار شدت میدان مغناطیسی بر حسب محور y در طول موج بیشترین مقدار خاموشی سیستم برای ضریب شکست $n=3$ هستند.

تشخیص ضریب شکست در یک سنسور مبتنی بر فوتونیک کریستال، بر اساس خواص نوری آن فوتونیک کریستال و ویژگی‌های پلاسمون‌های سطحی بنا گذاشته شده است. طول موج تشدید می‌تواند بوسیله تنظیم پارامترهای نوری پلاسمون‌های سطحی من جمله ضریب شکست، عوض شود [۶].

به منظور بررسی حساسیت پلاسمون‌های سطحی نسبت به مواد مختلف، با تغییر ضریب شکست لایه حساس، ضریب خاموشی سیستم رسم شده است و مشاهده می‌شود پیک-های تشدید پلاسمون‌ها به ازای تغییرات کوچکی در ضریب شکست، شیفت پیدا می‌کنند. لذا به منظور بررسی میزان حساسیت سیستم، ضریب حساسیت $S = \Delta\lambda/\Delta n$ را معرفی می‌کنیم که نشان دهنده میزان شیفت طول موج پیک پلاسمون‌های سطحی به ازای تغییرات ضریب شکست است و هرچه این ضریب بزرگتر باشد، سنسور حساس‌تر است.



شکل ۲-الف



شکل ۲-ب

شکل ۲-الف مقایسه جذب گرافن (نمودار سبز) و خاموشی ساختار (نمودار آبی) بر حسب طول موج ۶۰۰ تا ۱۱۰۰ را نشان می‌دهد شکل ۲-ب نمودار شدت میدان مغناطیسی بر حسب محور y در طول موج بیشترین مقدار خاموشی سیستم برای ضریب شکست $n=2$ هستند.

در شکل ۲ الف، نمودار آبی رنگ، خاموشی سیستم ($1-R$) را در مقایسه با نمودار سبز رنگ که جذب گرافن است، نشان می‌دهد. به ازای ضریب شکست $n=2$ لایه حساس، ضریب خاموشی سیستم دارای پیکی در طول موج 720 nm و مقداری نزدیک به یک است و در این طول موج جذب گرافن مقدار بسیار کمی دارد. برای پیدا کردن دلیل بالا بودن ضریب خاموشی، شدت میدان مغناطیسی را در طول موج 720 بر حسب مکان رسم می‌کنیم (شکل ۲ ب و ج)، همانطور که مشاهده می‌شود پلاسمون‌های سطحی در مرز بین طلا و لایه حساس تشکیل شده‌اند.

به منظور بررسی اثر تغییر ضریب شکست بر چگونگی تشکیل پلاسمون‌های سطحی، ضریب خاموشی و ضریب جذب گرافن را به ازای $n=3$ رسم می‌کنیم (شکل ۳ الف). مشاهده می‌کنیم، در ضریب خاموشی دوپیک تشدید ایجاد می‌شود که به ازای طول موج 1620 nm علاوه بر پیک در ضریب خاموشی، ضریب جذب گرافن نیز بیشینه می‌شود. با رسم نمودار شدت میدان مغناطیسی بر حسب مکان (شکل ۳ ب) دیده می‌شود پلاسمون‌های سطحی در مرز طلا و گرافن ایجاد شده اند.

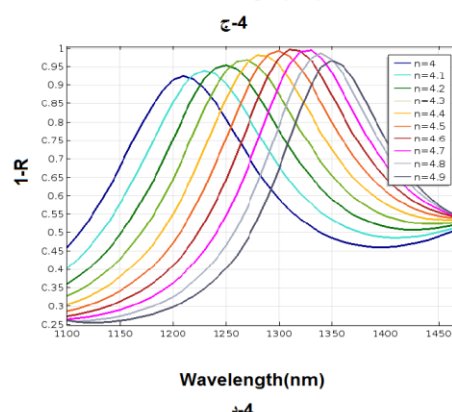
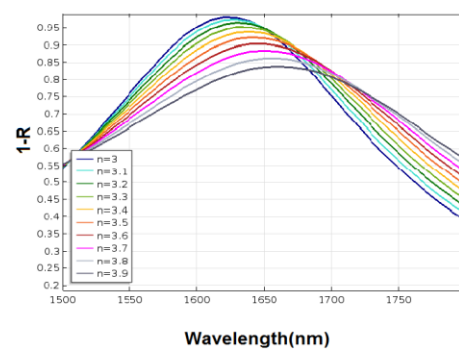
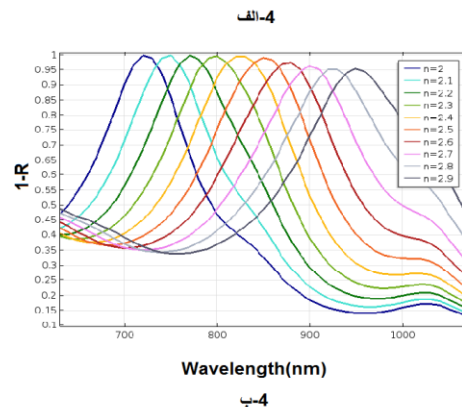
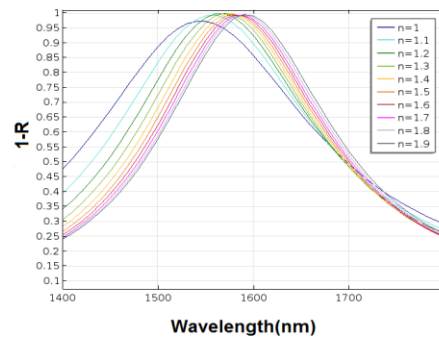
$n=5$ به ازای $\Delta n=0.1$ (شکل های ۴-الف الی ۴-د)، درمی-
یابیم این کمیت به ازای ضریب شکست های بین $n=2$ تا
 $n=3$ بیشترین میزان خود بین ۲۰۰ الی ۳۰۰ را دارد. این
میزان حساسیت برای بازه های ضریب شکستی $n=4$ تا
 $n=5$ ، مقدار نسبتاً خوب ۱۰۰ الی ۲۰۰ و به ازای ضریب
شکست های $n=1$ تا $n=2$ و $n=3$ تا $n=4$ کمترین میزان
حساسیت (مقادیر ۰ الی ۱۰۰) به دست می آید.

۴- نتیجه گیری

با بررسی خواص اپتیکی سیستم، به محاسبه میزان
حساسیت ساختار نسبت به ضریب شکست پرداخته ایم.
مهم ترین نتایج بدست آمده از این قرار است: با استفاده از
فوتونیک کریستال های ابعادی در مجاورت گرافن،
پلاسمون های سطحی در ناحیه مرئی و فروسرخ نزدیک
ایجاد شد. همچنین ضریب جذب گرافن و ضریب خاموشی
ساختار مورد بررسی قرار گرفت و بر اثر تشکیل پلاسمون
های سطحی، میزان جذب گرافن تا ۱۸ برابر گرافن معلق
افزایش یافت. با بررسی اثرات تغییر ضریب شکست ماده
مورد آشکارسازی در ضریب خاموشی ساختار، طول موج-
های تشدید پلاسمون های سطحی بدست آمد. با معرفی و
محاسبه ضریب حساسیت در بازه ضریب شکستی $n=1$ الی
 $n=5$ برای ماده مورد آشکارسازی، مشاهده شد بیشترین
حساسیت سیستم به ازای $n=2$ الی $n=3$ اتفاق می افتد، لذا
باتوجه به میزان حساسیت بالای سیستم در ناحیه مرئی و
فروسرخ نزدیک، می توان از این ساختار برای اهداف
سنسوری و بیوسنسوری برای مواد با ضریب شکست های
۲ الی ۳ استفاده کرد.

مراجع

- Geim, Andre K., and Konstantin S. Novoselov. "The rise of graphene." *Nature materials* 6, no. 3 pp: 183-191, 2007.
- Liedberg, Bo, Claes Nylander, and Ingemar Lunström. "Surface plasmon resonance for gas detection and biosensing." *Sensors and actuators* n0,4 pp: 299-304, 1983.
- Constant, Thomas J., Samuel M. Hornett, Darrick E. Chang, and Euan Hendry. "All-optical generation of surface plasmons in graphene." *Nature Physics* 12, no. 2 pp: 124-127, 2016.
- Huang, Shenyang, Chaoyu Song, Guowei Zhang, and Hugen Yan. "Graphene plasmonics: Physics and potential applications." *Nanophotonics*, 2016.
- Thongrattanasiri, Sukosin, Frank HL Koppens, and F. Javier Garcia De Abajo. "Complete optical absorption in periodically patterned graphene." *Physical review letters* 108, no. 4 pp: 047401, 2012.
- Chen, Ying, Jing Dong, Teng Liu, Qiguang Zhu, and Weidong Chen. "Refractive index sensing performance analysis of photonic crystal containing graphene based on optical Tamm state." *Modern Physics Letters B* 30, no. 04 pp: 1650030, 2016.



شکل ۴-رسم نمودار خاموشی سیستم پیشنهادی برحسب
طول موج، برای تغییرات ضریب شکست از $n=1$ تا
 $n=4$ شکل ۴-الف. برای $n=2$ تا $n=3$ شکل ۴-ب. برای $n=3$ تا
 $n=4$ شکل ۴-ج و برای $n=4$ تا $n=5$ شکل ۴-د.
با محاسبه این کمیت برای ضریب شکست های $n=1$ الی