بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه سیستان و بلوچستان،
زاهدان، ایران.
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹

کد مقاله : ۱-۲۴۷۷-۱۰-A

عملکرد خوب آشکارساز نوری پلاسمونی مبتنی بر گرافن با استفاده از نانو توری فلزی در طول موج‌های مخابراتی

الهام خسرویان[۱]، حمید رضا مشایخی[۱]، علی فرمانی[۲]

[۱] دانشکده فیزیک، دانشگاه شهید باهنر، کرمان، ایران، [۲] دانشکده برق، دانشگاه لرستان، لرستان، ایران

el.khosravian@phy.uk.ac.ir, mashhr@uk.ac.ir, farmani.a@lu.ac.ir

چکیده - در این مقاله، یک آشکارساز نوری پلاسمونی مبتنی بر گرافن با عملکرد خوب در محدوده طول موج‌های مخابراتی پیشنهاد شده است. ساختار پیشنهادی شامل زیر لایه سیلیسیوم/سیلیکا، نانو توری فلزی با ساختار تناوبی و لایه گرافن می‌باشد. رفتار نوری و الکتریکی ساختار به صورت عددی بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که با استفاده از فقط یک لایه گرافن، جذب ساختار به علت پدیده جفت شدگی پلاسمونی بین گرافن و نانو توری فلزی به بیش از ۰/۹۸می‌رسد. در این ساختار، جریان تاریک پایین و جریان نوری۰/۶۴ mA درباياس V ۲/۱- ودر طول موج مخابراتی۱/۵۵µmبه دست آمده است. همچنین،پاسخ دهی نوری ۱۳۰۰mA/W به ازای توان نور تابشی ۰/۵ mW به دست آمد.

کلید واژه- آشکارساز نوری، پلاسمونی، گرافن، نانو توری.

High-Performance Graphene-based Plasmonic Photodetector using Metal Nano-grating at Telecommunication Wavelengths

Elham Khosravian[1], Hamid Reza Mashayekhi[1], and Ali Farmani[2]

[1] Faculty of Physics, ShahidBahonar University, Kerman, Iran, [2] Electrical Engineering Department,Lorestan University, Lorestan, Iran

In this paper, a graphene-based plasmonic photodetector with high performance at telecommunication wavelengthshas been proposed. The proposed structure consists of SiO_2/Si substrate, metal nano-grating with periodic structure and graphene layer. The optical and electrical behavior ofthe structureis numerically investigated. Utilizing only one graphene layer, the results show that the absorption of the structure reaches to more than 0.98 due to the plasmonic coupling phenomena between graphene and metal nano-grating. In this structure, a low dark current and a photocurrent of 0.64 mA at-2.1 V bias and at wavelength of 1.55 µm are obtained. Also, the photoresponsivity of 1300 mA/Wat an incident optical power of0.5 mWis achieved.
Keywords: Graphene, Nano-grating,,Photodetector, Plasmonic.

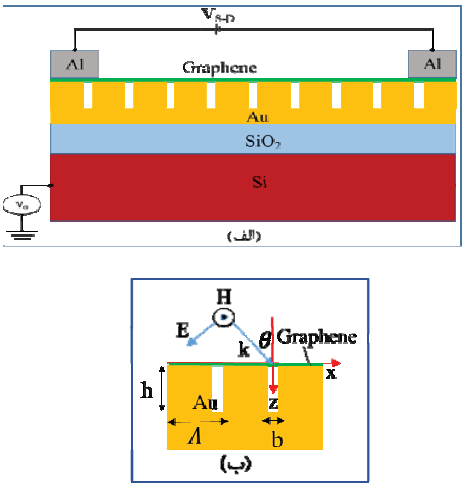
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

۱- مقدمه

آشکارسازهای نوری یکی از مهم ترین ادوات الکترونیک نوری وبه عنوان اولین بلوک گیرنده در شبکه مخابرات نوری عمل تبدیل سیگنال نوری به سیگنال الکتریکی را بر عهده دارند. اخیراً، مواد دوبعدی مانند گرافن، نیترید بورهگزاگونال (h-BN)، دی کالکوژنیدهای فلزات انتقالی (TMDCs) و پروسکایت و...در ساخت آشکارسازهای نوری مورد استفاده قرار گرفته‌اند[۱]. آشکارسازهای نوری مبتنی بر مواد دو بعدی به دلیل قابلیت پاسخ دهی بالا، پاسخ نوری فوق سریع و حساسیت نسبت به قطبش نوری بسیار مورد توجه قرار گرفته و محدوده کاری از طول موج فرابنفش تا تراهرتز را پوشش می دهند. گرافن به عنوان یکی از مواد دوبعدی، یک صفحه کربنی با ضخامت تک اتمی می‌باشد و ساختار شبکه آن به صورت لانه زنبوری است. گرافن با خواص منحصر به فرد نوری، الکترونیکی، مکانیکی و شکاف انرژی صفر دارای کاربردهای فراوان در زمینه‌های مختلفی مانند آشکارسازهای نوری، فیلترهای پلاسمونی، نانو آنتن‌ها و ترانزیستورها می‌باشد[۲].پخش الکترون در گرافن مانند فرمیون‌های دیراک بدون جرم یک رابطه خطی با انرژی و اندازه حرکت دارد که باعث افزایش تحرک پذیری حاملین بار می‌شود. گرافن در محدوده نور مرئی تا مادون قرمز نزدیک، تقریباً ٪۲/۳ از انرژی نور تابشی را جذب می‌کند که این مقدار جذب پایین برای کاربردهای آشکارسازی مناسب نیست[۳]. تکنیک‌های زیاد نوری برای بهبود جذب گرافن وجود دارد که از جمله آن استفاده از نانو ساختارهای پلاسمونی در کنار گرافن می‌باشد. در سال ۲۰۱۵با استفاده از یک فیلم فلزی شیاردارو ایجاد برانگیختگی پلاریتون مغناطیسی (MP)، جذب گرافن را در محدوده مادون قرمز نزدیک افزایش دادند[۲]. در سال ۲۰۱۷ یک جاذب نوری پلاسمونی، شامل یک فیلم فلزی با آرایه‌ای از شیارهای L شکل و لایه گرافن در محدوده طول موج های مخابراتی طراحی شده است[۳].در سال ۲۰۱۸یک آشکارسازنوری گرافنی با قابلیت پاسخ دهی بالا و تنظیم پذیری در محدوده طول موج مرئی تا مادون قرمز نزدیک طراحی شده است[۴].در سال ۲۰۲۰با استفاده از یک موجبر نوری سیلیکونی فوق نازک مجتمع شده با یک بازتاب کننده حلقوی، یک آشکارساز نوری گرافنی در طول موج کاری ۱۵۵۰ نانومتر ساخته شده است[۵].

۲- طراحی آشکارساز نوری مبتنی بر گرافن

در اینجا، ساختار جدیدی از یک آشکارساز نوری پلاسمونی مبتنی بر گرافن ارائه شده است. شکل ۱(الف) شماتیکی از این ساختار را نشان می‌دهد که شامل زیر لایه سیلیسیوم/ سیلیکا، نانو توری پراش فلزی از جنس طلاو لایه گرافن می‌باشد. شکل ۱(ب) نمای برشی از نانو توری و لایه گرافنی که سطح آن را پوشانده است، نشان می‌دهد.



شکل ۱: (الف) شماتیک آشکارساز نوری مبتنی بر گرافن طراحی شده، (ب) نمای برشی از نانو توری و گرافن.

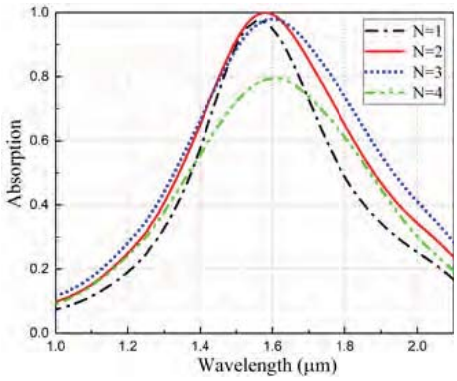
مطابق این شکل، در نانو توری عرض شیارها bError! Bookmark not defined.، Error! Bookmark not defined. ارتفاع hError! Bookmark not defined. دوره تناوب Λ و Error! Bookmark not defined.Error! Bookmark not defined.Error! Bookmark not defined. در نظر گرفته شده است. صفحه x-z به عنوان صفحه تابش در نظر گرفته شده است

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

و جهت میدان‌ها و بردار موج نشان داده شده است. طول موج کاری آشکارساز در محدوده مادون قرمز نزدیک با طول موج مرکزی ۱/۵۵ میکرومتر می‌باشد. نور تابشی به ساختار فقط باید نور قطبیده TM باشد زیرا در این قطبش مطابق شکل ۱ (ب) میدان مغناطیسی در راستای شیارهای نانو توری (محور y) می باشد و میدان الکتریکیدر امتداد سطح عمل می‌کند و دارای مولفه‌ای طولی است کهباعث برانگیختگی امواج پلاسمون سطحی می‌شود. بنابراین، با تابش نور قطبیده TM،پلاسمون پلاریتون‌های سطحی (SPPs) در نانو توری طلا ایجاد و سپس پدیده جفت شدگی پلاسمونی بین نانو توری و لایه گرافن سبب افزایش جذب در ساختار می‌شود.رسانایی کل در گرافن با استفاده از رابطه کوبو به صورت $\sigma_g = \sigma_{intra} + \sigma_{inter}$ تعریف می‌شود که شامل انتقالات درون باندی و میان باندی است[۳].یکی از مهمترین خصوصیات گرافن تنظیم پذیری خواص الکترونیکی نوری آن است که با تغییر پتانسیل شیمیایی μ_c انجام می‌شود ورابطه $|\mu_c| = \hbar v_f \sqrt{\pi |a_0 (V_g - V_D)|}$ برای آن تعریف می‌شود.در اینجا، $\hbar$ ثابت پلانک کاهش یافته، V_D ولتاژ دیراک، $v_f = 10^6 \, m/s$ سرعت فرمی، a_0 یک ثابت و $|(V_g - V_D)|$ به عنوان ولتاژ بایاس در نظر گرفته می‌شود.ثابت گذردهی گرافن با رابطه $\varepsilon_g(\omega) = 1 + \frac{i\sigma_g}{\varepsilon_0 \omega \Delta}$ تعریف می‌شود که ε_0 گذردهی الکتریکی خلأ، ω فرکانس زاویه‌ای و Δ ضخامت لایه گرافن می‌باشد.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت رفتار نوری و الکتریکی آشکارساز نوری پلاسمونی مبتنی بر گرافن پیشنهادی، بررسی می‌شود. جهتشبیه سازی پاسخ نوری آن از روش عددیتفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) دو بعدی استفاده شده است.شرایط مرزی در راستای zgx به ترتیب متناوب و لایه کاملاً جاذب (PML) انتخاب شده‌اند. منبع نوری از نوع موج تخت با قطبش TM و تابشبه صورت عمودی با زاویه $\theta = 0^\circ$ در نظر گرفته شده است. جهت دارا بودن بیشترین میزان جذب در محدوده طول موج‌های مخابراتی، پارامترهای ساختار و پارامترهای گرافن بهینه سازی شده‌اند. پارامترهای هندسی بهینه ساختاربه صورت $h = 210\,nm$ ، $b = 30\,nm$ و $\Lambda = 400\,nm$ می‌باشند. پتانسیل شیمیایی بهینه لایه گرافن $\mu_c = 0.3\,eV$ است. ضخامت لایه گرافن $\Delta = 0.34\,nm$ و زمان استراحت حامل به صورت $\tau = 10^{-13}\,s$ تعریف می‌شود.

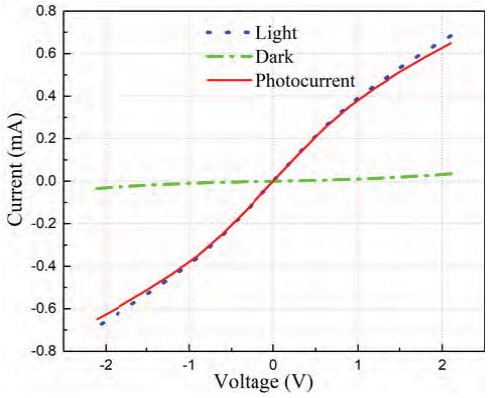


شکل ۲: طیف جذب ساختار به ازای لایه های مختلف گرافن.

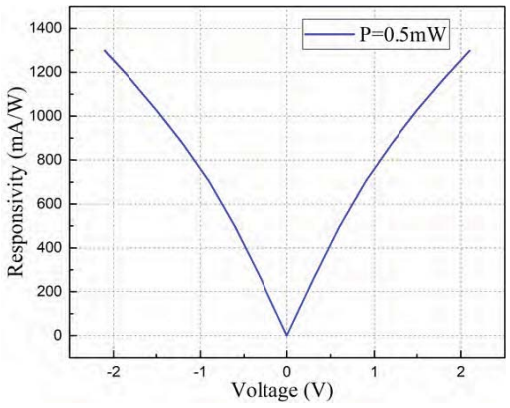
در شکل ۲ اثر لایه‌های مختلف گرافن $(N = 1,2,3,4)$ روی طیف جذب ساختارنشان داده شده است. مطابق شکل به ازای تک لایه و یا دو لایه گرافن، جذب ساختار بیشینه و سپس با افزایش لایه‌ها از دو تا چهار لایه جذب کاهش می‌یابد.در این ساختار، لایه‌های گرافن به وسیله یک لایه سیلیکا با ضخامت ۱ نانومتر از هم جدا شده‌اند که جذب بیشینه در ساختار با اضافه کردن لایه‌های گرافن تا دو لایه ادامه دارد. افزایش بیشتر لایه‌های گرافن باعث کاهش آثار پلاسمونی در فصل مشترک گرافن با نانو توری فلزی شده و در نهایت جذب کاهش می‌یابد. در اینجا، بیشینه جذبساختار حدود ۰/۹۸ در طول موج مخابراتی $1.55\,\mu m$ می‌باشد و تقریباً ۴۵ برابرجذب در لایه گرافن تنهاست.با جذب نوروردی توسط ناحیه فعال آشکارساز، حاملین نوری زوج الکترون-حفره تولید می‌شوند که با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی این حامل‌ها به سمت الکترودهای مخالف می‌روند و جریان الکتریکی تولید می‌شود. شکل ۳

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

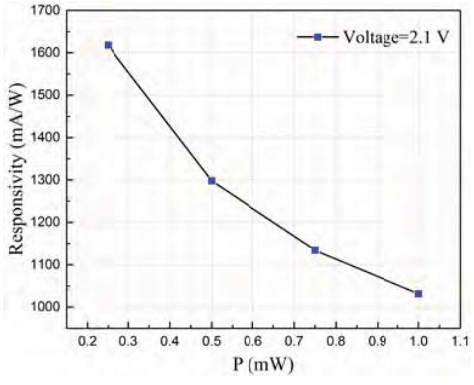
جریان تحت تابش،جریان تاریک و جریان خالص نوری آشکارساز را بر حسب ولتاژدر طول موج $1.55\,\mu m$نشان می‌دهد. جریان خالص نوریبا رابطه $I_{ph} = I_{light} - I_{dark}$به صورت تفریق جریان تحت تابش با جریان تاریک به دست می‌آید. پاسخ‌دهی آشکارساز با در نظر گرفتن Pتوان نور تابشی از مقدار عددی رابطه $R = I_{ph}/P$محاسبه می‌شود.



شکل ۳: جریان تحت تابش، جریان تاریک و جریان خالص نوری آشکارساز بر حسب ولتاژ.



شکل۴: پاسخ دهی نوری آشکارساز بر حسب ولتاژ.



شکل۵: پاسخ دهی نوری آشکارساز بر حسب توان نور تابشی.

با توجه به شکل ۳، بیشینه جریان خالص نوری در بایاس $-2.1V$برابر با مقدار عددی $0.64\,mA$است. شکل ۴ پاسخ دهی آشکارساز را بر حسب ولتاژ نشان می‌دهد. مطابق این شکل به ازای توان نور تابشی $0.5\,mW$در بایاس $-2.1V$ مقدار پاسخ دهی برابر $1300\ mA/W$است. شکل ۵ پاسخ‌دهی آشکارساز را بر حسب توان نور تابشی نشان می‌دهد. مطابق این شکل بیشترین مقدار پاسخ دهی مربوط به توان نور تابشی $0.25\,mW$می‌باشد.

۴- نتیجه گیری

مطابق با نتایج به دست آمده، آشکارساز نوری پلاسمونی مبتنی بر گرافن پیشنهادی دارای جذب حدود ۰/۹۸ با استفاده از تک لایه گرافن در طول موج $1.55\,\mu m$می‌باشد. همچنین این آشکارساز در این طول موج به ازای توان نور تابشی $0.5\,mW$و بایاس $-2.1V$دارای جریان نوری و پاسخ دهی نوری به ترتیب $0.64\,mA$و $1300\ mA/W$ است. همچنین، پاسخ دهی ساختار با افزایش توان منبع کاهش پیدا می‌کند.

مرجع‌ها

[1] M. Long, P. Wang, H. Fang, and W. Hu, "Progress, challenges, and opportunities for 2D material based photodetectors," Advanced Functional Materials **29**, 1803807, 2019.

[2] B. Zhao, J. Zhao, and Z. Zhang, "Resonance enhanced absorption in a graphene monolayer using deep metal gratings," JOSA B **32**, 1176-1185, 2015.

[3] M. S. Zare, N. Nozhat, and R. Rashiditabar, "Tunable graphene based plasmonic absorber with grooved metal film in near infrared region," Optics Communications **398**, 56-61, 2017.

[4] F. Luo, M. Zhu, Y. Tan, H. Sun, W. Luo, G. Peng, Z. Zhu, X.-A. Zhang, and S. Qin, "High responsivity graphene photodetectors from visible to near-infrared by photogating effect," AIP Advances **8**, 115106, 2018.

[5] J. Li, Y. Yin, J. Guo, C. Liu, and D. Dai, "Hybrid ultrathin-silicon/graphene waveguide

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.

photodetector with a loop mirror reflector," Optics Express **28**, 10725-10736 , 2020.

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترس باشد.