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 : ۱-۲۴۸۷-۱۰-A

آشکارساز نور حساس فوتوترموالکتریک گرافنی در بازه تراهرتز

لیلی مسعودی، هادی صوفی

دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
leili.masoodi97@ms.tabrizu.ac.ir, h.soofi@tabrizu.ac.ir

چکیده - پرتوهای تراهرتزدر کاربردهای مختلفی ، از امنیت تا پزشکی ، استفاده می شوند.بااین حال همواره آشکارسازی حساس امواج تراهرتز در دمای اتاق دشوار بوده است. گرافن به دلیل دینامیک سریع حامل های بار ماده ای ایده آل برای کاربردهای مختلف ازجمله آشکارسازی است. ضمن اینکه جذب گرافن در بازه وسیعی از فرکانس ثابت و برابر ۲.۳٪ است، لذا افزایش جذب گرافن برای استفاده درهر کاربردی ضروری است. برای رفع این مشکل میتوان از اثرات پلاسمونیک در مرزمشترک گرافن-فلز استفاده کرد؛ که با افزایش شدت میدان الکتریکی باعث افزایش قابل توجه جذب گرافن در فرکانس رزونانس حتی تا حدود ۸۰٪ میشود. اثر فوتوترموالکتریک در گرافن، یک مکانیزم آشکارسازی امیدوارکننده است؛ حاملهایبرانگیخته شده توسط نوربه دلیل اندرکنش های الکترون-الکترون قوی و ظرفیت گرمایی الکترونیکی پایین گرافن،به سرعت و به صورت قابل توجه گرم می شوند. در اینمقاله یک آشکارساز گرافنی در بازه تراهرتزبا استفاده از اثر فوتوترموالکتریک طراحی و مدل سازیشده است.

کلید واژه- آشکارساز نوری ، پلاسمونیک ، تراهرتز ، فوتوترموالکتریک ، گرافن

Sensitive THzgraphene photo-thermoelectric photodetector

Leili Masoudi, HadiSoofi

Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iranleili.masoodi97@ms.tabrizu.ac.ir,h.soofi@tabrizu.ac.ir

Abstract- THz radiation has various applications from medical to security. However, sensitive detection of THz radiation at room temperature has complications. Graphene due to fast charge carrier dynamics is an ideal material for different applications like photodetection. Because of constant 2.3% absorption of graphene in a wide range of frequencies, increasing graphene absorption is necessary for any application. Plasmonic effects in graphene-metal interfaces can be used to solve this problem; which can improve graphene absorption in resonance frequency even to 80% with increasing electric field magnitude. Photo-thermoelectric (PTE) effect is aninspiringdetection mechanism in graphene. Photo-excited carriers thermalize rapidly due to strong electron-electron interactions and low electronic heat capacity of graphene. In this article a graphene based photo-detector in THz range have been designed and simulated benefiting photo-thermoelectric effect.

Keywords: photodetector, graphene, photo-thermoelectric, plasmonic, THz

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

مقدمه

گرافن یک لایه اتم کربن با آرایش شبکه لانه زنبوری است که به دلیل ویژگیهای جذاب مانند ساخت نسبتا آسان، تحرک بالای حامل ها و چگالی پایین الکترون در زمینه های گوناگونی به کار گرفته می شود[۱].

درحالیکه گرافن یک ماده امیدوارکننده در آشکارسازهای نوری سریع است، ولی جذب پایین ٪۲/۳ در بازه فرکانس مرئی تا فروسرخ، با کاهش پاسخ دهی نوری، کاربرد آن را در آشکارسازها محدود کرده است. روش های مختلفی تاکنون برای افزایش جذب یک لایه گرافن بکار گرفته شده اند. ادغام گرافن داخل ساختار ساندویچی فلز-دی الکتریک-گرافن (MDG)یکی از این روش های مطرح شده است که جذب قابل توجهی را در بازه وسیع فرکانسی نشان داده است[۲].

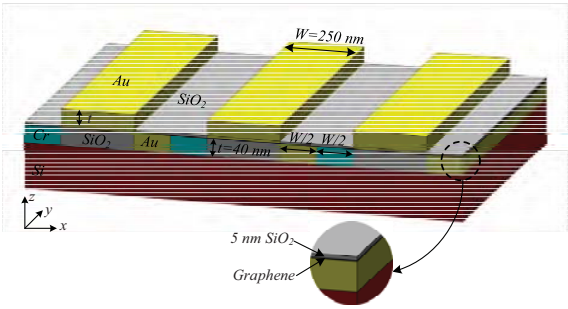
آشکارسازی نور متکی بر تبدیلسیگنال نوری جذب شده به یک سیگنال الکتریکی است.اثر فوتوترموالکتریک (PTE) مکانیزم مناسبی برای آشکارسازی حامل های داغ در آشکارسازهای مبتنی برگرافن است. اثر PTEبرپایه گرمای ایجادشده از نور جذب شده بوده و ولتاژ بدست آمده را می توان توسط اثر سیبک محاسبه کرد.ظرفیت گرمایی الکترونیکی پایین گرافن درمقایسه با سایر مواد، باعث ایجاد تغییر دمای بیشتر به ازای توان جذب شده یکسان میشود[۴,۳].

به دلیل اختلاف موجود بین توابع کار گرافن و فلز، در نواحی اتصال گرافن با فلز، الکترون ها و حفره ها مابین آن دو تبادل خواهند شد که درنتیجه آن پتانسیل شیمیایی گرافن در ناحیه اتصال تغییر خواهد کرد[۱]. چنانچه دو نوع فلزمختلف به عنوان الکترود انتخاب شوند، پتانسیل شیمیایی گرافن در دو طرف کانال متفاوت بوده و با ایجاد عدم تقارن در پروفایل ضریب سیبک، ولتاژ نهایی ایجاد شده در این شرایط غیرصفر خواهد بود[۴].

در این مقاله یک آشکارساز نور تراهرتز با ساختار مبتنی بر MDG که یک لایه گرافن درون آن جای گرفته است، طراحی شده و توسط روش تفاضل محدود (FDTD) شبیه سازی شده است. پلاسمون های گرافن که در اطراف مرز مشترک گرافن-دی الکتریک حبس شده‌اند، برانگیخته شده و اندرکنش بین نور و گرافن را بهبود می‌بخشند که موجب افزایش جذب گرافن و بهبود پاسخ دهی آشکارساز خواهد شد.

ساختار و روش ها

ساختار آشکارساز گرافنی مطرح شده در شکل۱ نشان داده شده است؛ که از ساندویچ فلز-دی الکتریک-گرافن ایجاد شده است. بستر سیلیکونی با ضخامت ۲/۵μm، که میتوان به عنوان گیت و برای اعمال ولتاژ جهت تنظیم تراز فرمی گرافن از آن استفاده کرد، در نظر گرفته شده است. هم چنین برای افزایش جذب، در پشت سیلیکون، لایه ای طلا با ضخامت ۱۵۰ nm در نظر گرفته شده است. نوارها با ضخامت ۴۰ نانومتر روی لایه عایق SiO_2 با ضخامت ۵ نانومتر قرار داده شده است که زیر آن تک لایه گرافن (بدون طرح) وجود دارد.



شکل ۱: ساختار مطرح شده مبتنی بر MDG و استفاده از طلا و کروم به عنوان فلزات کانتکت در اطراف کانال گرافن. (لایه زیرین طلا نشان داده نشده است)

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

همانطور که قبلا توضیح داده شدبرای ایجاد ولتاژ غیرصفر بین کانتکت ها، از فلزات مختلف در دو طرف کانال گرافن استفاده شده است. برای ایجاد گرافن های نوع n و p از فلزات کروم و طلا میتوان به عنوان کانتکت استفاده کرد که هر کدام دارای ضخامت ۴۰ نانومتر هستند. با قرار دادن این ساختار روی سطح فلزی و بازتاب کننده، جذب ساختار افزایش خواهد یافت؛ چرا که نور بعد از عبور از لایهSiبه فلز زیر ساختار میرسد و بازتاب شده دوباره به داخل ساختار برمیگردد، که به این ترتیب فلز طلا زیر ساختار مانع موج از ترک ساختار می شود.

این ساختار به طور دقیق در [۲] توصیف شده است و شامل کاواک های فابری-پیرو است که از نوار SiO_2 مابین دو فلز که به عنوان دوقطبی الکتریکی عمل می‌کنند، تشکیل شده است. پلاسمون های برانگیخته شده گرافن که در مرزمشترک فلز-دی الکتریک حبس شده اند، در طول دی الکتریک در جهت های مخالف و به سمت هم منتشر میشوند و با هم تداخل می کنند؛ در نتیجه تداخل های سازنده پلاسمون های گرافن، امواج ایستا تشکیل خواهند شد که منجر به ایجاد رزونانسهای فابری-پیرو با پیک های جذب چندگانه میشود که برای کاربرد های آشکارسازی مناسب نیستند، ولی می توان با راهکارهایی مانند کاهش طول کاواک و یا انتخاب ترازهای فرمی کوچک برای گرافن تعداد پیک ها را در بازه فرکانس کاهش داد تا به یک پیک رسید.

مکانیزم این آشکارساز نوری مبتنی بر اثر فوتوترموالکتریک است که میتوان به صورت مختصر چنین توصیف کرد: بعداز قرارگرفتن ساختار در برابر نور تراهرتز، قسمت عمده نور در لایه گرافن جذب خواهد شد که باعث برانگیخته شدن الکترون ها و حفره ها شده و الکترون های داغ ایجاد میشوند که به دلیل وجود گرادیان دما و تحرک پذیری بالای حامل ها در گرافن، به سرعت به سمت کانتکت‌ها حرکت کرده و طبق اثر سیبک ولتاژ نوری ایجاد شده با رابطه $\nabla V(x) = - S(x)\ \nabla T(x)$بیان میشود، که در آن S ضریب سیبک و ∇Tگرادیان دمایی ایجاد شده پس از جذب نور و Vاختلاف پتانسیل ایجاد شده بین کانتکت هاست.

برای بدست آوردن پتانسیل شیمیایی محلی لایه گرافن در طول کانال میتوان از روابط پتانسیل الکترواستاتیکی ایجاد شده توسط فلز استفاده کرد[۱]:

$$V(x) = \mu_F + sign(\sigma)\sqrt{\left|\frac{V_B|V_B|}{x/l_s} - \mu_F|\mu_F|\right|} \qquad (1)$$

که در این رابطه μ_F پتانسیل شیمیایی کل سیستم و σ چگالی بار ایجادشده در گرافن وV_B،پتانسیل مرزی است که برای نواحی درکانتکت با طلا[۱]$0.33eV$ و کروم[۳]-$0.002eV$ فرض شده است. در رابطه بالا l_s $|V_B|/\pi\alpha=\hbar v$است که $\hbar v = 6.05\ eVA^{\circ}$ و$\alpha=2.38/\kappa$ثابت ریزساختارگرافن و κثابت دی الکتریک موثر می باشد. با استفاده از این روابط میتوانپتانسیل شیمیایی محلی گرافن،$\mu(x)$ ، را محاسبه کرد[۱]:

$$\mu(x) = \mu_F - V(x) \qquad (2)$$

به این ترتیب ضریب سیبک را میتوان بدین صورت محاسبه نمود[۴]:

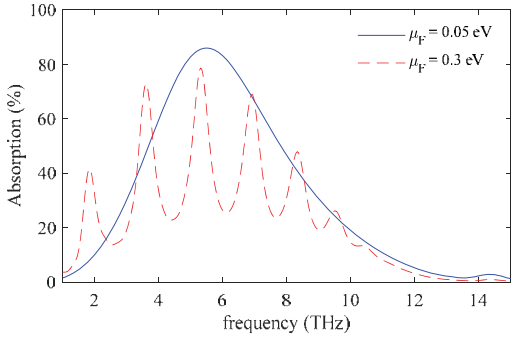
$$S = -\frac{2\pi^{3/2}k_B^2T}{3q\hbar\upsilon_f}\frac{(n-p)\sqrt{|n-p|}}{(n+p)^2} \qquad (3)$$

کهK_B ثابت بولتزمن ، T دما و برابر ۳۰۰ کلوین ،q بار واحد الکترون،$\hbar$ثابت پلانک کاهش یافته و$\upsilon_f=10^6\ m/s$سرعت فرمی در گرافن است. nوp چگالی الکترون وحفره در واحد سطح هستند که با استفاده از$\mu(x)$محاسبه می شوند[۴].

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

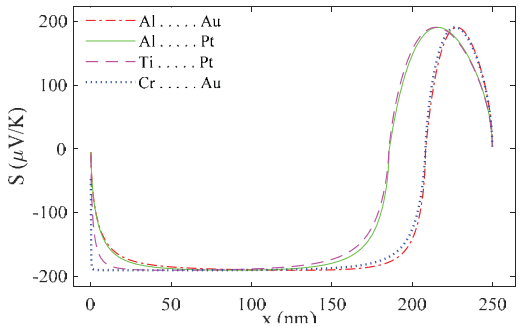
نتایج و بحث

درصد جذب که برابر درصدی از توان برخوردی به ساختار است که توسط لایه گرافن جذب شده، در شکل۲ نشان داده شده است که همانطور که مشاهده میشود در تراز فرمی بالاتر چندین پیک جذب ناشی از رزونانس فابری-پیرو وجود دارد و برای آشکارساز بایدگرافن دارای تراز فرمی کوچک باشد.



شکل ۲: نمودار جذب ساختار دارای تناوب یک میکرومتر در راستای x به ازای تراز فرمی 0.05eV و 0.3eV گرافنبرحسب فرکانس

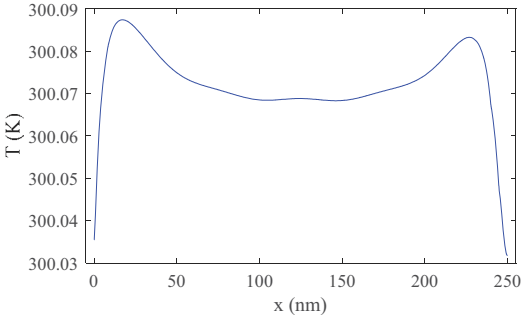
ضریب سیبک توسط روابط بیان شده در قسمت قبل برای زوج فلزات مختلف در دو طرف کانال گرافن دارای تراز فرمی 0.05eV محاسبه شده و در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳: نمودار ضریب سیبک در طول کانال گرافن با فرض ساختار دارای تناوب ۵۰۰ نانومتر و کانال گرافن ۲۵۰ نانومتر

برای استخراج پروفایل دما در طول کانال طبق شکل ۴ از نرم افزار Deviceاستفاده شده است که از روش المان محدود برای شبیه سازی استفاده میکند.

طبق رابطه بیان شده اثر سیبک، ولتاژ نوری تولید شده در فرکانس رزونانس برابر 12.77μVو پاسخ دهی برای ساختار با عرض یک میکرومتر در راستای yبرابر 12.77V/Wخواهد شد.



شکل ۴: پروفایل دما بر حسب کلوین در طول کانال گرافن به ازای نور برخوردی با توان یک میکرو وات روی یک تناوب از ساختار به طول 500nm در راستای x و عرض 1μm در راستای y در فرکانس رزونانس ۸ تراهرتز

نتیجه‌گیری

دراین مقاله با استفاده از ساختار MDG یک آشکارساز نوری براساس اثر فوتوترموالکتریک در بازه تراهرتز طراحی و شبیه سازی شده است. که دارای پاسخ دهی 12.77V/W برای ساختار با عرض یک میکرومتر در راستای y می باشد. این پاسخ دهی نسبت عکس با عرض ساختار دارد، به عبارت دیگر با کاهش عرض ساختار در راستای y میتوان پاسخ دهی را افزایش داد، به نحوی که ساختار با عرض 10nm دارای پاسخ دهی قابل توجه 1277V/W خواهد بود.

مرجع‌ها

[1] P. Khomyakov, A. Starikov, G. Brocks, and P. J. Kelly, "Nonlinear screening of charges

induced in graphene by metal contacts," *Physical Review B,* vol. 82, no. 11, p. 115437, 2010.

[2] Z. Wang and Y. Hou, "Ultra-multiband absorption enhancement of graphene in a metal-dielectric-graphene sandwich structure covering terahertz to mid-infrared regime," *Optics express,* vol. 25, no. 16, pp. 19185-19194, 2017.

[3] X. Cai *et al.*, "Sensitive room-temperature terahertz detection via the photothermoelectric effect in graphene," *Nature nanotechnology,* vol. 9, no. 10, p. 814, 2014.

[4] A. Amirhosseini and R. Safian, "Photo-thermoelectric current enhancement in graphene-based photodetectors using plasmonic nanostructures," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics,* vol. 24, no. 2, pp. 1-7, 2017.

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