بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

طراحی آشکارساز نوری مبتنی بر گرافن با جذب و قابلیت پاسخ دهی بالا

محمد حسین مهدابی نژاد، مریم پور محی‌آبادی

دانشگاه شهید باهنر کرمان، دانشکده فنی، بخش مهندسی برق

mohammadmnejad@yahoo.com,Maryam.mahyabadi@gmail.com

چکیده – در این مقاله، ساختار جدیدی از آشکارسازهای نوری که از لایه های متناوب گرافن و سیلیکا بر روی یک لایه فلز با شیارهای حلقوی سیلیکا تشکیل شده است، ارائه می‌شود. در این طرح، تشدید پلاسمونهای سطحی نزدیک به شیارهای حلقوی، باعث افزایش جذب نور در لایه گرافن می‌شود. نتایج تحلیل عددی نشان می‌دهد که جذب در لایه گرافن از۲/٪۳ به ۵/۴۷٪ و ماگزیمم جذب برای۳ لایه گرافن تا ۷/۸۰٪ در محدوده طول موج باند *C* مخابراتی افزایش می یابد. ماگزیمم جذب به عمق شیارها، شعاع حلقه‌ها و تعداد لایه‌ها بستگی دارد. همچنین در این آشکارساز، جریان نوری و پاسخ دهی نوری به ترتیب به ۵۰mA و ۱۰۰ A/W در بایاس ۵/۱V- و در طول موج ۵۵/۱µmبه دست آمد.

کلید واژه- گرافن، آشکارساز نوری ، پاسخ دهی نوری ، جریان نوری ، پلاسمونیک.

Design of Graphene Based Photodetector with High Absorption and Responsivity

Mohammad Hossein Mahdabi nezhad, Maryam Pourmahyabadi

Electrical Engineering Department, Shahid Bahonar University of Kerman

Abstract- In this paper, a novel structure of photodetector consisting of periodic layers of graphene and silica located on a metal film with groove rings of silica is proposed. The excited localized Plasmon resonance in groove rings makes a strong enhancement of light absorption in the graphene layer. The numerical results revealed that the graphene absorption increases from 2.3% to %47.5 and even in three-layer graphene, increases up to a maximum value of %80.7 in the C band. In addition, the absorption peak is dependent on the groove depth and ring radius as well as the number of graphene layers. Also, a photoresponsivity of 100A/W and photocurrent of 50mA at -1.5V bias and at wavelength of 1.55µm are achieved.

Keywords: Graphene, Photodetector, Photoresponsivity, Photocurrent ,Plasmonic.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

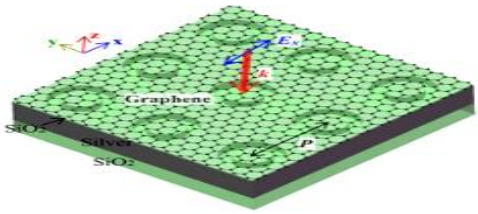
این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

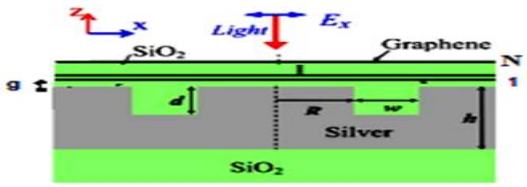
آشکارساز نوری یکی از بلوکهای تشکیل دهنده اتصالات نوری ـ الکترونیکی است که عمل تبدیل سیگنال نوری به الکتریکی را انجام می دهد. آشکارسازهای نوری سیلیکونی به طور گسترده در رنج طیف مرئی به کار گرفته شده اند [۲]. این آشکارسازها، برای آشکارسازی تابشهای نزدیک مادون قرمز (NIR) مناسب نیستند، زیرا انرژی فوتونهای NIR (۷۸/۰-۹۸/۰eV) در طول موجهای مخابراتی برای اینکه بر شکاف انرژی سیلیکون غلبه کنند، مناسب نیستند. در نتیجه تولید زوج الکترون ـ حفره در اثر تابش، محدود و هیچ جریان نوری تولید نمی شود. در سالهای اخیر، صنعت ادوات نوری از ترکیب سیلیسیم با ژرمانیوم و ادغام با نیمه هادی-های گروه ۳ و۵ جدول تناوبی، جهت غلبه بر این مشکل استفاده کردند. اما این روشها به فرآیند ساخت پیچیده و پیشرفته نیاز دارند و با تکنولوژی CMOS سازگار نیستند، لذا از گرافن در آشکارسازهای نوری استفاده کردند. گرافن یک صفحه کربنی دو بُعدی است که ساختار شبکه آن به صورت لانه زنبوری است و تنها به اندازه یک اتم ضخامت دارد. گرافن خواص نوری ، الکترونیکی و گرمایی بی‌شماری دارد. الکترونهای پخش شده در گرافن همانند فرمیونهای دیراک بدون جرم، با رابطه خطی انرژی - اندازه حرکت رفتار می‌کنند و باعث افزایش تحرک پذیری حاملهای گرافن در دمای محیط تا cm/Vs ۱۰۵ و دردماهای پایین تا cm/Vs ۱۰۶ می شود. ضریب جذب گرافن نسبت به سایر نیمه‌هادی مرسوم بیشتر است، هدایت حرارتی بالا (W/mK ۵۰۰۰ برای تک لایه گرافن) و شکاف انرژی صفر، از خواص دیگر گرافن می‌باشند که باعث شده از گرافن در ادوات از قبیل آشکارسازهای نوری، سلولهای خورشیدی و دیودهای انتشار دهنده نور و ... استفاده شود. شایان ذکر است که گرافن با وجود جذب نوری بالا که بستگی به طول اندرکنش کوتاه آن با نور دارد فقط ۳/۲٪ نور مرئی تا مادون قرمز را جذب می-کند .این مقدار جذب نوری در گرافن برای کاربردهای آشکار سازی کافی نیست. اخیرا از تکنولوژیهای نوری جهت بهبود جذب نوری گرافن استفاده شده است. اشتر مایر و همکارانش لایه گرافن را با نانو ساختارهای پلاسمونیک ترکیب کردندکه کارایی آشکارسازهای گرافنی را افزایش داد[۱].اباجو و همکارانش از الگودهی گرافن به صورت پریودیک جهت بهبود جذب نور در محدوده نور مادون قرمز استفاده کردند[۳].ژائو و همکارانش از گریتینگ فلزی جهت افزایش جذب نور در گرافن استفاده کردند[۵]. ژو و همکارانش دریافتند که تزویج پلاسمونیک آرایه‌ای از حفره های توخالی در حد نانو در محدوده نور مرئی، جذب نوری گرافن را تا ۳۰٪ افزایش می دهد[۶]. گزارش های بالا نشان می دهندکه پلاسمونیک در نانو ساختارهای فلزی به طور بالقوه جهت بهبود جذب نور در گرافن استفاده شده است.

۲- طراحی آشکارساز نوری

در اینجا، ساختار جدیدی از آشکارسازهای نوری که از لایه های متناوب گرافن و سیلیکا بر روی یک لایه فلز با شیارهای حلقوی سیلیکا تشکیل شده است،ارائه میشود. شکل ۱ نمودار سه بعدی و برش عرضی ساختار مورد استفاده در آشکار ساز نوری مبتنی بر گرافن را نشان می دهد.



(الف)



(ب)

شکل ۱: الف) نمودار سه بعدی ساختار مورد استفاده در آشکارساز نوری ب) برش عرضی یک سلول واحد از ساختار تناوبی گرافن و سیلیکا.

دراین ساختارعرض شیارها w، عمق شیارها d، شعاع داخلی شیارها R و پریود شیارها p می باشند. فلز بکار رفته در این ساختار از جنس نقره می باشد که ثابت گذر دهی آن با استفاده از مدل Drude از رابطه زیر تعریف می‌شود :

$$\varepsilon(\omega)=\varepsilon_{\infty}-\frac{\omega_p^2}{\omega^2+i\omega\gamma} \qquad (۱)$$

در این رابطه ε_{∞} ثابت دی الکتریک ، ω_p فرکانس پلاسما،

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

γ فرکانس برخورد الکترونها و ω فرکانس زاویه‌ای نور فرودی می‌باشند. هدایت گرافن از رابطه کوبو و ثابت گذردهی آن به صورت زیر تعریف می شوند:

(۲)

$$\sigma_g = \sigma_{intra} + \sigma_{inter}$$

$$\sigma_{intra} = i\frac{e^2 K_B T}{\pi^2(\omega + i\tau^{-1})}\left[\frac{\mu_c}{K_B T} + 2Ln\left(\exp\left(-\frac{\mu_c}{K_B T}\right)+1\right)\right]$$

$$\sigma_{inter} = i\frac{e^2}{4\pi\hbar}Ln\left[\frac{2|\mu_c| - \hbar(\omega + i\tau^{-1})}{2|\mu_c| + \hbar(\omega + i\tau^{-1})}\right]$$

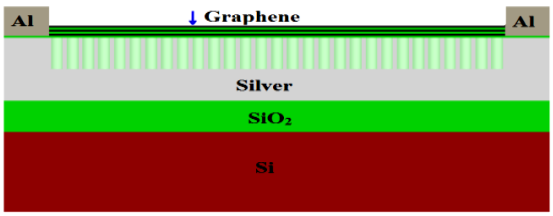
$$\varepsilon_g = 1 + i\frac{\sigma_g}{\omega\varepsilon_\circ\Delta}$$

(۳)

در این رابطه τ زمان استراحت حامل ها، μ_c پتانسیل شیمیایی، e بار الکترون، $\hbar$ ثابت پلانگ کاهشی، Δ ضخامت گرافن و ω فرکانس زاویه ای می باشد.

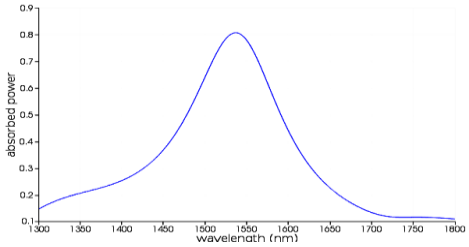
۳- نتایج تحلیل عددی

جهت تحلیل و آنالیز ساختار آشکارساز نوری از روش FDTD استفاده شده است. در تحلیل عددی، شرایط مرزی در جهت x و y به صورت پریودیک و درجهت z به صورت PML انتخاب شده اند. یک منبع نور صفحه ای با میدان الکتریکی در جهت x ، بالای آشکارساز قرار داده شده است. پارامترهای ساختار g=۱nm ، w =۵۵nm ، d=۲۰۰nm ، R=۲۰۵nm ، P=۷۰۰nm و ضخامت فلز h=۴۰۰nm در نظر گرفته شده است. پارامترهای نقره $\varepsilon_\infty = 3/7$ ، $\omega_p = 9/1ev$ و $\gamma = 0/018ev$ ثابت گذردهی سیلیکا $\varepsilon = 2/25$ و پارامترهای گرافن $\Delta = 0/5nm$ ، $\mu_c = 0/15ev$ ، T=۳۰۰K° و $\tau = 0/5ps$ تعریف می شوند. شکل ۲ شماتیک آشکارساز نوری ارائه شده را نشان می دهد. این آشکارساز یک ترانزیستور نوری FET می باشد که در آن از سه لایه گرافن استفاده شده است . در این ساختار لایه های گرافن به صورت پشته بر روی هم قرار گرفته و توسط لایه های سیلیکا از هم جدا شده و در کل ساختار نامتجانسی را تشکیل می دهند.



شکل ۲ : شماتیک آشکارساز نوری طراحی شده.

شکل (۳) جذب نور در سه لایه گرافن را نشان می دهد که ماگزیمم آن در طول موج ۵۳۶/۱μm برابر ۷/۸۰٪ بوده و تقریبا ۳۵ برابر جذب نوری درگرافن تنها است.



شکل ۳: جذب نور در سه لایه گرافن برحسب طول موج.

پلاسمونیک در نانو ساختارهای فلزی به طور بالقوه جذب نور در گرافن را بهبود می بخشند. جذب نور در این ساختار بستگی به افزایش میدان نزدیک،محبوس کردن بالای نور و تشدید پلاسمونهای سطحی نزدیک شیارهای حلقوی دارد و باعث افزایش اندرکنش نور با گرافن می شود. با توجه به تئوری مودهای تزویج شده موقتی (temporal coupled-mode theory)در این ساختار جذب نور در لایه گرافن از رابطه زیر بدست می آید[۴]:

$$A_{gr} = \frac{4\gamma_e\gamma_g}{(\omega - \omega_o)(\gamma_e + \gamma_g + \gamma_m)}$$

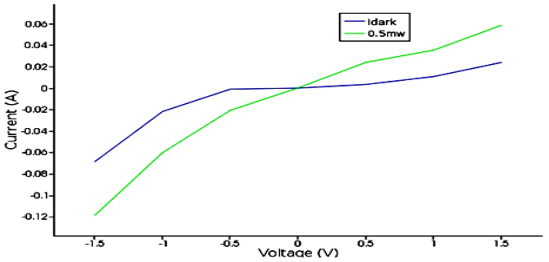
(۴)

γ_e نرخ واپاشی میدان که بستگی به فرار انرژی به فضای خارج دارد، γ_g و γ_m نرخ واپاشی ناشی از تلفات جذبی گرافن و تلفات فلز می باشد. در این آشکارساز اولا به منظور افزایش جذب نور درگرافن از نانوساختارهای پلاسمونیک(شیارهای حلقوی فلزی) و سه لایه گرافن استفاده شده است. ثانیا جهت جلوگیری از باز ترکیب حاملهای تولید شده در اثر نور از اتصال فلز ـ گرافن و ساختار نامتجانس گرافن ، شامل لایه های گرافن که توسط یک لایه اکسید به عنوان لایه تونلی مدفون شده نازک از هم جدا شده اند ، استفاده شده است. تحت شدت نور ورودی، حاملهای داغ برانگیخته (الکترون ـ حفره) بر اثر تونل زنی کوانتومی از هم جدا شده و به لایه گرافن مخالف می روند، بنابراین بازترکیب حاملهای داغ

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

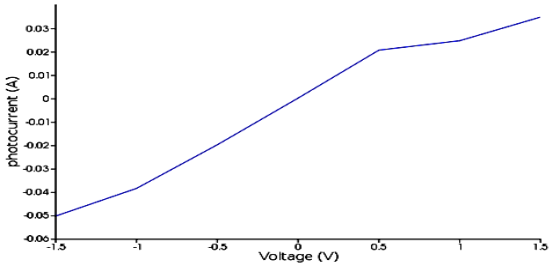
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]

مینیمم می شود. با اعمال یک میدان الکتریکی خارجی این حاملهای نور از هم جدا شده و به الکترودهای مخالف می روند و یک جریان و پاسخ دهی نوری بی نظیر را بوجود می آورد[۱۱]. شکل (۴) جریان تاریک و جریان تحت تابش آشکار ساز را بر حسب ولتاژ نشان می دهد.



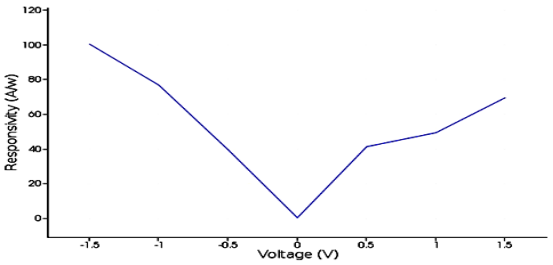
شکل ۴ :جریان تحت تابش و تاریک آشکارساز بر حسب ولتاژ

جریان خالص نوری که از تفریق جریان تاریک و جریان تحت تابش به دست می‌آید نیز در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل ۵: جریان نوری آشکارساز بر حسب ولتاژ.

با توجه به شکل، بیشینه جریان نوری در بایاس ۱/۵V- ، برابر ۵۰mA است. در نتیجه پاسخ دهی نوری این آشکارساز ۱۰۰A/W خواهد بود. شکل(۶) پاسخ دهی آشکارساز بر حسب ولتاژ را نشان می دهد.



شکل۶ :پاسخ دهی نوری آشکارساز بر حسب ولتاژ.

جدول ۱ مقایسه پاسخ‌دهی و جریان نوری چند آشکارساز در محدوده طول موج مخابراتی ۵۵/۱μm با طرح ارائه شده را نشان می دهد که حاکی از برتری آشکارساز طراحی شده به طرحهای موجود است.

جدول ۱ مقایسه مقادیر پاسخ‌دهی و جریان آشکارساز پیشنهادی با آشکارسازهای نوری

جریان نوری	پاسخ دهی نوری	توان یا شدت ورودی	مراجع
۷۶۵/۲mA	۱/۰A/W	۸۰mW/cm	[۷]
۴۵/۰μA	۹/۰mA/W	۵/۰mW	[۸]
۱۳۷/۰mA	۲۷۳/۰A/W	۵/۰mW	[۹]
۲۲۲/۰μA	۳۷/۰A/W	۶/۰μW	[۱۰]
۵۰ mA	۱۰۰A/W	۵/۰mW	دراین طرح

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طرح یک آشکارساز نوری با لایه های متناوب گرافن و سیلیکا بر روی یک لایه فلز با شیارهای حلقوی سیلیکا تشکیل شده است، ارائه شد.نتایج نشان داد که این آشکارساز، در قیاس با آشکارسازهای موجود از عملکرد بهتری برخوردار بوده و دارای جریان نوری و پاسخ دهی نوری به ترتیب به ۵۰mA و ۱۰۰ A/W در بایاس ۵/۱V- و در طول موج ۵۵/۱μm است.

مراجع

[1] T. Echtermeyer, L. Britnell, P. Jasnos, A. Lombardo, R. Gorbachev, A. Grigorenko, A. Geim, A. Ferrari, and K. Novoselov,“strong plasmonic enhancement of photovoltage in grapheme ”, Nat.Commun,. 2, 458 ,2011.

[2] Sze, S. M., Kwok, K. N, “*Physics of semiconductor devices*”, Wiley, New York, 2006.

[3] S. Thongrattanasiri, F. Koppens, and F. Abajo ,“Total light absorption in graphene” ,Phys.Rev,. Lett.108,047401 ,2012.

[4] S. Fan, W. Suh, and J. Joannopoulos, “Temporal coupled-mode theory for the Fano resonance in optical resonators”, Opt. Soc. Am. A 20, 569,2003.

[5] B. Zhao, J. M. Zhao, and Z. M. Zhang, “Enhancement of near-infrared absorption in graphene with metal gratings”, Appl.Phys. Lett.105, 031905 ,2014.

[6] X. Zhu, L. Shi, M. Schmidt, A. Boisen, O. Hansen, J. Zi, S. Xiao, and N. Mortensen, “Enhanced light-matter interactions in graphene covered gold nanovoid arrays”, Nano. Lett,.13, 4690 .2013.

[7] Basant Chitara , L. S. Panchakarla , S. B. Krupanidhi , and C. N. R. Rao,Infrared Photodetectors Based on Reduced Graphene Oxide and Graphene Nanoribbons”,23,5419-5424,2011.

[8] Zhenzhou Cheng, Jiaqi Wang, Ke Xu, Hon Ki Tsang, ChesterShu,“Graphene on Silicon on-Sapphire Waveguide Photodetectors”, Optoelectronics, 130.0250, 2015.

[9] iaqi Wang, Zhenzhou Cheng, Zefeng Chen,Xi Wan , Bing qing Zhu,Hon Ki Tsang,“High responsivity graphene-on-silicon slotwaveguide photodetectors”,2016.

[10] lya Goykhman, Ugo Sassi, Boris Desiatov, Noa Mazurski, “On chipintegrated silicongraphene plasmonic Schottky photodetector with high responsivity andavalanche photogain”, Nano Letters, 2016.

[11] Chang Hua Liu, You Chia Chang, Theodore B. Norris, and Zhaohui Zhong,“Graphene photodetectors with ultra broadband and high responsivity at room temperature”, nature nanotechnology, 2014.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-13]