کاربرد نانوساختارهای پلاسمونیک در بهبود مشخصات آشکارسازهای نوری باند مادون قرمز میانی مبتنی بر گرافن

بهنام جعفری[۱]، هادی صوفی[۱]

[۱]دانشکده مهندسی فناوری های نوین، دانشگاه تبریز، تبریز ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱، ایران

استفاده از گرافن در آشکارسازهای نوری به دلیل دینامیک بسیار سریع حامل ها و جذب مستقل از فرکانس این ماده، از جذابیت های بسیاری برخوردار است. با این حال میزان کم جذب آن بر روی پارامترهای آشکارسازی تاثیر منفی می گذارد. در این مقاله یک آشکارساز نوری مادون قرمز میانی مبتنی بر گرافن تک لایه طراحی و مدل سازی شده است که در ساختار آن، نانوآنتن های فلزی برای افزایش جذب و بهبود مشخصات آشکار ساز قرار گرفته است. این نانوساختارها توسط اثرات پلاسمونیک و افزایش شدید شدت میدان الکتریکی موج در مرز مشترک فلز-گرافن، موجب افزایش جذب گرافن می شوند. در این مقاله نشان داده شده است که با تغییرات اندک در ساختار نانوآنتن می توان پیک جذب را بین طول موج های ۴ تا ۶μm جابجا کرد. هم چنین اثر پتانسیل شیمیایی گرافن بر روی میزان جذب نیز بررسی شده است. به طور خلاصه، در این مقاله، بیشینه مقدار جذب برای آشکارساز طراحی شده برای طول موج های ۴/۶μm و ۵/۵μm به ترتیب برابر با ۹٪ و ۱۲٪ محاسبه شده است. هم چنین نشان داده شده است که با افزودن یک لایه دیگر گرافن می توان جذب در طول موج ۴/۶μm را تا ۱۴٪ افزایش داد.

کلید واژه- آشکارسازهای نوری مادون قرمز ، گرافن ، پلاسمونیک

Application of Plasmonic Nano Structures in Enhancing the Characteristics of Graphene Based Mid-IR Photo Detectors

Behnam Jafari[1], Hadi Soofi[1]

[1]School of Engineering- Emerging Technologies, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Abstract- Employing graphene in optical photo detectors is very promising due to the unique features of graphene such as fast dynamic of carriers and wavelength independent absorption. However, the low absorption of graphene has a negative impact on the photo detection characteristics. In this article, a mid-Infrared photo detector based on single layer graphene is designed and simulated which incorporates metallic Nano-antennas to enhance the absorption and hence the photo-detector response. In these structures, plasmonic effects are responsible for the enhanced absorption by severely increasing the electric field magnitude at the metal-graphene interface. In this article, it is shown that by a slight modification in the nanostructure design, it is possible to shift the peak absorption wavelength between 4 to 6μm. The impact of the graphene chemical potential on the absorption strength is also discussed. In brief, maximum absorption of the designed photo detector for 4.6μm and 5.5μm are calculated to be 9% and 12% respectively. Moreover, it is shown that by addition of another layer of graphene, it is possible to increase the absorption at the wavelength at λ=4.6μm to nearly 14%.

Keywords: Mid-Infrared photo detectors, Graphene, Plasmonics

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

۱- مقدمه

استفاده از گرافن در آشکارسازهای نوری در سالیان اخیر توجه فراوانی را به خود جلب کرده است [۱] که عمده دلیل آن را می توان خواص منحصر به فرد گرافن از جلمه دینامیک بسیار سریع حامل ها [۲]، جذب مستقل از طول موج [۳]، مشخصات نوری قابل تنظیم با استفاده از دوپینگ الکترواستاتیکی [۴]، نرخ تلفات کم، قابلیت تحرک بالا و توانایی حبس انرژی الکترومعناطیسی در حجم بسیار کوچک،[۵] دانست. قابلیت تحرک بالای گرافن باعث تبدیل شدن بسیار سریع فوتون یا پلاسمون به جریان یا ولتاژ الکتریکی می شود. از طرف دیگر، میزان جذب نوری گرافن تک لایه برای یک موج الکترومغناطیسی که به صورت عمود بر آن بتابد، تقریبا مستقل از فرکانس نور و برابر با $\alpha\pi = 2.3\%$ است. تا به حال آشکارسازهای نوری گرافنی مبتنی بر اثرات فیزیکی مختلفی نظیر اثر فتوولتایی [۶] و اثر فوتو-ترمو-الکتریکی [۷] در بازه های فرکانسی مختلفی نظیر ماوری بنفش، مادون قرمز و تراهرتز با مشخصات قابل توجه معرفی شده اند. علی رغم قابلیت های مهم برشمرده در سطور فوق برای گرافن، میزان جذب اندک گرافن تک لایه، یکی از موانع مهم در طراحی آشکارسازهای نوری گرافنی است.

یکی از روش های نوین پیشنهاد شده در سالیان اخیر برای افزایش اندرکنش موج الکترومغناطیسی با گرافن، استفاده از نانوساختارهای های فلزی و استفاده از اثرات پلاسمونیک است. یکی از خصوصیات مهم پلاسمون پلاریتون های سطحی حبس شدید نور و لذا افزایش شدت میدان الکتریکی موج در مرز بین فلز-دی الکتریک یا فلز-گرافن است. در این ساختارها، جذب نوری گرافن به دلیل اثرات پلاسمونیکی این نانوساختارهای فلزی تا حد بسیار زیادی افزایش می یابد. با ترکیب گرافن با نانوساختارهای فلزی در سالیان اخیر آشکارسازهایی با مشخصات بهبود یافته در بازه طول موجی مرئی [۸] و همچنین مادون قرمز دور [۹] پیشنهاد شده اند. در یک پژوهش دیگر، با استفاده از نانوآنتن های فلزی جذب نوری گرافن تک لایه تا ۹٪ افزایش یافته و آشکارسازی با پاسخ دهی ۰/۴V/W در طول موج ۴/۴۵μm در حوزه مادون قرمز میانی پیشنهاد شده است [۱۰].

در مقاله حاضر، یک آشکار ساز با ساختاری شامل نانوآنتن های فلزی کوپل شده به گرافن پیشنهاد شده است و نشان داده شده است که توسط بهینه سازی ساختارنانوآنتن می توان نسبت توان جذب شده را تا ۱۲٪ افزایش داد. هم چنین تاثیر پتانسیل شیمیایی گرافن بر روی میزان جذب بررسی شده است و در نهایت نشان داده شده است که با افزودن یک لایه گرافن دیگر بر روی ساختار می توان میزان جذب را به تقریبا ۱۴٪ رساند. انتظار می رود این میزان قابل توجه در بهبود جذب باعث بهبود جریان نوری و سایر مشخصات آشکارسازی گردد.

۲- طراحی آشکار ساز

یکی از روش های محاسبه ی جذب نوری گرافن استفاده از مدل هدایت سطحی می باشد. هدایت سطحی برای یک لایه ی گرافن $\sigma(\omega,\mu_C,\Gamma,T)$ تابعی از فرکانس زاویه ای ω ، پتانسیل شیمیایی μ_C ، نرخ برخورد حامل ها Γ و دمای T می باشد [۱۱].

$$\sigma(\omega,\mu_c,\Gamma,T)=\frac{je^2(\omega-j2\Gamma)}{\pi\hbar^2}\times \left[\frac{1}{(\omega-j2\Gamma)^2}\int_0^\infty \varepsilon\left(\frac{\partial f_d(\varepsilon)}{\partial\varepsilon}-\frac{\partial f_d(-\varepsilon)}{\partial\varepsilon}\right)d\varepsilon - \int_0^\infty \frac{f_d(-\varepsilon)-f_d(\varepsilon)}{(\omega-j2\Gamma)^2-4(\varepsilon/\hbar)^2}d\varepsilon\right] \quad (۱)$$

در رابطه (۱)، e بار الکترون، $\hbar$ ثابت پلانک کاهیده و $f_d(E)$ تابع توزیع فرمی دیراک می باشد. در رابطه (۱) عبارت اول گذارهای درون باندی (Intraband) و عبارت دوم گذارهای بین باندی (Interband) را نشان می دهد. در رابطه (۲)، μ پتانسیل شیمیایی گرافن است.

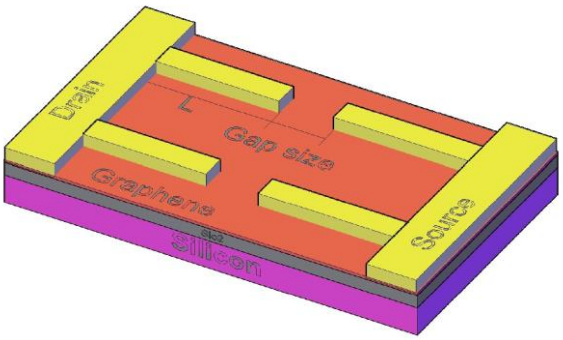
هم چنین با استفاده از مدل هدایت سطحی، می توان میزان توان نوری جذب شده در سطح گرافن را از رابطه (۲) محاسبه کرد [۱۱]. در این رابطه فرض شده است که گرافن در صفحه x-y واقع شده است. هم چنین E_x و E_y مولفه های میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی در راستاهای x و y بر روی سطح گرافن هستند.

$$\langle p\rangle=\frac{1}{2}\iint(\mathrm{Re}(\sigma_{xx})|E_x|^2+\mathrm{Re}(\sigma_{yy})|E_y|^2)dxdy \quad (۲)$$

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

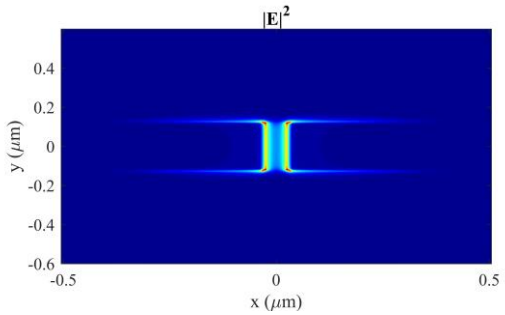
نمای بالا از آشکارساز پیشنهادی در شکل ۱ دیده می شود. همان طور که مشاهده می شود، این آشکارساز از آنتن های کوپل شده پشت سر هم بر روی ورقه ی گرافنی تشکیل یافته است. هر یک از آنتن ها هم به عنوان الکترودی برای جمع آوری حامل های نوری و هم شکاف بین آنها به عنوان محلی برای متمرکز شدن شدت میدان الکتریکی می باشد. در شکاف بین آنتن ها اندرکنش بین نور و گرافن شدیدا افزایش می یابد. هر کدام از آنتن ها از یک لایه پالادیوم به ضخامت ۱۰ نانومتر زیر فلز طلا (به ضخامت ۳۰ نانومتر) تشکیل شده است. پالادیوم به منظور کمتر کردن مقاومت اتصال بین گرافن و طلا استفاده شده است. مقاومت اتصال بین گرافن و فلز به دلیل چگالی حالت های کم گرافن در مقایسه با فلز محدود می شود. هم چنین نشان داده شده است که این مقاومت به پتانسیل شیمیایی گرافن وابسته است [۱۲]. برای مثال برای اتصال پالادیوم/گرافن، مقاومت ویژه از حدود ۹۰۰Ωcm برای پتاسیل شیمیایی در نقطه دیراک به حدود ۲۰۰Ωcm برای گرافن شدیداً دوپ شده کاهش می یابد. هم چنین سیلیکون زیرین به عنوان گیت برای کنترل پتانسیل شیمیایی گرافن استفاده شده است.



شکل۱: شماتیک سه بعدی از آشکارساز نوری_گرافنی بهبود داده شده با نانو ذرات فلزی. ساختار در جهت طولی و عرضی متناوب می باشد ، دوره ی تناوب نانو ذرات در جهت عرضی ۱/۲μm می باشد، هر یک از شکاف های ما بین آنتن ها به عنوان یک نانو آشکارساز نوری در نظر گرفته شده است.

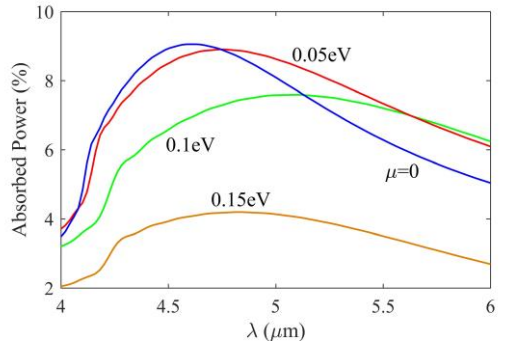
۳- نتایج و بحث

با استفاده از روش FDTD چگونگی توزیع میدان الکتریکی تحت تابش نور فرودی محاسبه شده است. شکل ۲ توزیع میدان الکتریکی در فاصله ی ۱ نانومتری از سطح گرافن را نشان می دهد، شدت میدان الکتریکی در داخل شکاف بین دو آنتن متمرکز شده است.



شکل۲: نمودار توزیع اندازه ی میدان الکتریکی در طول موج رزونانس ساختار (نرمالیزه). مانیتور ثبت میدان الکتریکی در یک نانومتری بالای سطح گرافن قرار داده شده است.

در شکل ۳ نسبت توان جذب شده در سطح گرافن به توان موج فرودی که توسط رابطه (۳) محاسبه شده است بر حسب طول موج و برای سطوح پتانسیل شیمیایی مختلف آورده شده است. در این شکل، فاصله بین نانوآنتن ها برابر با ۶۰nm می باشد. همان طور که ملاحضه می شود، بیشترین میزان جذب برابر ۹٪ برای سطح پتانسیل شیمیایی صفر یا در واقع گرافن ذاتی است. زیرا در این سطح شیمیایی، گذارهای بین باندی به دلیل خالی بودن حالت های نوار هدایت و پر بودن حالت های نوار ظرفیت با بیشترین شدت انجام می گیرند. همان طور که از شکل ۳ برمی آید، طول موج رزونانس ساختار برای گرافن ذاتی، $\lambda_R \approx 4.6\mu m$ می باشد.



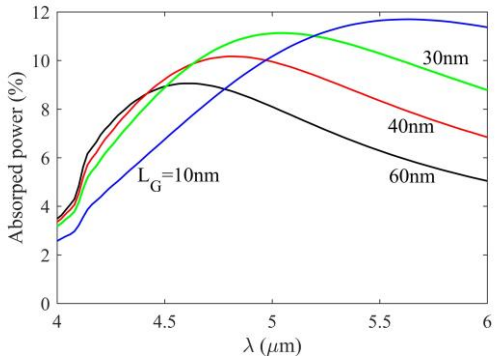
شکل ۳: نسبت توان نوری جذب شده در سطح گرافن بر حسب طول موج به ازای پتانسیل های شیمیایی مختلف.

با بهینه کردن ابعاد آنتن ها می توان میزان جذب را افزایش داد و نیز طول موج متناظر با پیک جذب که در واقع همون طول موج رزونانس پلاسمون ها است را جابجا کرد. در شکل ۴ نمودار جذب نور بر حسب فاصله شکاف

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

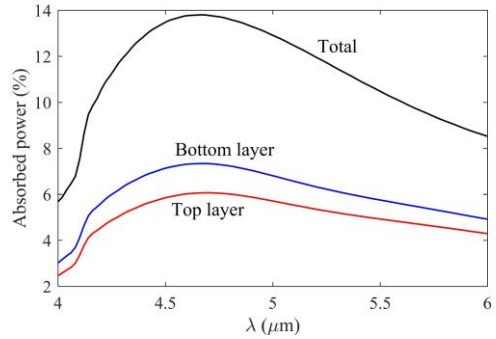
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

بین آنتن ها نشان داده شده است. هانطور که دیده می شود با کاهش دادن شکاف بین آنتن ها مقدار جذب افزایش یافته است و پیک جذب به سمت طول موج های بلندتر شیفت یافته است. میزان جذب برای فاصله بین نانوآنتن ها برابر با ۱۰nm دارای بیشترین مقدار در طول موج ۵/۵μm و برابر با تقریبا ۱۲٪ است.



شکل۴: درصد توان جذب شده در سطح گرافن بر حسب فاصله شکاف بین آنتن ها.

برای افزایش جذب ساختار و بهبود مشخصات آشکار ساز نوری در طول موج ۴/۶μm، در این مقاله استفاده از دو لایه گرافن که یکی از آن ها زیر الکترودهای طلا و دیگری بر روی الکترودهای طلا قرار می گیرد، پیشنهاد شده است. در واقع در شکل ۱، یک لایه دیگر گرافن نیز بر روی الکترودهای طلا قرار گرفته است. نسبت توان جذب شده در این دو لایه گرافن به همراه جذب کلی در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل۵ : درصد توان جذب شده در گرافن پایینی (خط چین)، بالایی نقطه-خط) و جذب کل ساختار (خط ساده) بر حسب طول موج.

همان طور که در شکل ۵ نشان داده شده است، میزان جذب به حدود ۱۴٪ افزایش می یابد. این جذب افزایشی تقریباً ۵۰ درصدی را نسبت به مقاله مرجع نشان می دهد. علاوه بر آن، در این مقاله نشان داده شد که مشخصات ساختاری و نیز پتانسیل شیمیایی نیز بر روی طول موج رزونانس تاثیر زیادی دارد و به طور مثال، با کنترل پتانسیل شیمیایی توسط اعمال ولتاژ گیت، می-توان یک آشکار ساز نوری تنظیم پذیر طراحی نمود.

۴- نتیجه گیری:

در این مقاله نشان دادیم که می توان از نانوآنتن های فلزی کوپل شده به گرافن برای افزایش جذب گرافن و طراحی آشکارسازهای مادون قرمز میانی با مشخصات بهینه بهره برد. هم چنین نشان داده شده است که میزان جذب به طراحی نانوساختار وابسته است. برای مثال در نانوآنتن پیشنهاد شده، با کاهش فاصله بین نانوآنتن ها، میزان جذب افزایش یافته و طول موج آشکارسازی به سمت طول موج های بلندتر شیفت پیدا می کند. در این مقاله، آشکارسازی با جذب تقریبا ۱۲٪ در طول موج ۵/۵μm طراحی شده است. هم چنین نشان داده شده است که با افزودن یک لایه گرافن دیگر به ساختار می توان میزان جذب را به تقریبا ۱۴٪ در طول موج ۴/۶μm افزایش داد.

مراجع:

[1] F. Koppens, T. Mueller, et al., “Photodetectors based on graphene, other two-dimensional materials and hybrid systems”, Nature Nanotechnology, vol. 9, pp. 780-793, 2014.
[2] D. Brida, A. Tomadin, et al., “Ultrafast collinear scattering and carrier multiplication in graphene”, Nature Communications, vol. 4, 2013.
[3] J. Dawlaty, S. Shivaraman, et al., “Measurement of the optical absorption spectra of epitaxial graphene from terahertz to visible”, Applied Physics Letters, vol. 93, p. 131905, 2008.
[4] Z. Li, E. Henriksen, et al., “Dirac charge dynamics in graphene by infrared spectroscopy”, Nature Physics, vol. 4, pp. 532-535, 2008.
[5] A. Grigorenko, M. Polini and K. Novoselov, “Graphene plasmonics”, Nature Photonics, vol. 6, pp. 749-758, 2012.
[6] T. Mueller, F. Xia, et al., "Role of contacts in graphene transistors: A scanning photocurrent study", Physical Review B, vol. 79, 2009.
[7] X. Xu, N. Gabor, et al., “Photo-Thermoelectric Effect at a Graphene Interface Junction”, Nano Letters, vol. 10, pp. 562-566, 2010.
[8] T. Echtermeyer, S. Milana, et al., “Surface Plasmon Polariton Graphene Photodetectors”, Nano Letters, vol. 16, pp. 8-20, 2015.
[9] Y. Su, Z. Guo, et al., “Ultra-sensitive graphene photodetector with plasmonic structure”, Applied Physics Letters, vol. 109, p. 173107, 2016.
[10] Y. Yao, R. Shankar, et al., “High-Responsivity Mid-Infrared Graphene Detectors with Antenna-Enhanced Photocarrier Generation and Collection”, Nano Letters, vol. 14, pp. 3749-3754, 2014.
[11] G. Hanson, “Dyadic Green’s functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene”, Journal of Applied Physics, vol. 103, p. 064302, 2008.
[12] F. Xia, V. Perebeinos, et al., “The origins and limits of metal–graphene junction resistance”, Nature Nanotechnology, vol. 6, pp. 179-184, 2011.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]