

بهبود عملکرد قطبشگر شبکه سیمی مبتنی بر گرافن

عاطفه امین، مریم پورمحمادی

گروه برق، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده - امروزه به قطبشگرهای نوری با میزان قطبی شدگی بالا و محدوده طول موجی وسیع در مدارات مجتمع نوری نیاز است. کنترل قطبش، نقش اساسی در کاربردهای مختلف مثل طیف سنجی، فوتولیتوگرافی و بیضی سنجی دارد. یکی از انواع قطبشگرها، قطبشگرهای شبکه سیمی است که به راحتی با قطعات نوری در ابعاد نانومتر مجتمع می شوند. در این مقاله یک قطبشگر با میزان قطبی شدگی بالا در محدوده وسیعی از طول موج ارائه شده است. این قطبشگر شامل یک آرایه از فلز- دی الکتریک - فلز است که بر روی یک زیرلایه از جنس سیلیکا قرار گرفته است. دو لایه آلومینیوم در زیر ساختار و لایه های گرافن در سطح مشترک فلز و دی الکتریک قرار گرفته اند. تاثیر وجود تعداد لایه های گرافن و جنس فلزات بر روی میزان قطبی شدگی با استفاده از روش FDTD مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که میزان قطبی شدگی در ساختار پیشنهادی، به دلیل ایجاد پلاسمون پلاریتون سطحی افزایش می یابد. با استفاده از ۳ لایه گرافن و فلز آلومینیوم میزان قطبی شدگی به مقدار ۱۵۸ dB در طول موج ۲۴۰۰ nm می رسد که نسبت به ساختارهای موجود، حدود ۶۲٪ بهبود یافته است.

کلید واژه- میزان قطبی شدگی، گرافن، پلاسمون پلاریتون سطحی، قطبشگرهای شبکه سیمی.

Performance Improvement of Graphene Based Wire Grid Polarizer

Atefeh Amin, Maryam Pourmahyabadi

Shahid Bahonar University of Kerman

Abstract- Optical polarizers with high extinction ratio over a wide wavelength rang are required for on-chip optical circuits and integrated optics. Controlling the polarization state is an important issue in various application such as spectroscopy, photolithography or ellipsometry. One kind of the polarizers is wire grid polarizer (WGP) that can be easily integrated with the other nano-optic devices. In this paper, a wire grid polarizer with high extinction ratio over a wide wavelength range, is presented. The proposed structure consists of an array of metal-insulator-metal (MIM) grating on silica substrate in which graphene layers sandwiched between metal and insulator layers. The influences of different metal materials and the number of graphene layers have been investigated with finite difference time domain (FDTD) analyzer. The results show the significant improving of the extinction ratio by using aluminum as metal and 3 graphene layers that has been increased to 158dB at 2400nm wavelength due to the formation of surface plasmon polaritons. Therefore, the proposed structure exhibits an improvement of 62% in compared to that of the other existing WGP.

Keywords: Extinction Ratio, Graphene, Surface Plasmon Polariton, Wire Grid Polarizer.

۱- مقدمه

یکی از مهمترین قطعات در سیستم‌های نوری قطبشگرها هستند. نور قطبیده شده کاربردهای زیادی در صفحات نمایش، ژیرسکوپ نوری و سنسورهای پلاسمونی دارند. قطبشگرهای مرسوم را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: صفحات قطبشگر با استفاده از جذب‌کننده‌های غیرهمسانگرد، منشورهای قطبشگر با استفاده از شکست نور و قطبشگرهای زاویه بروستر با استفاده از انعکاس نور. این قطبشگرها به راحتی قابلیت مجتمع شدن در قطعات نوری را ندارند.

در مقایسه با قطبشگرهای ذکر شده، قطبشگرهای شبکه‌های سیمی فشرده و مسطح هستند که قابلیت مجتمع شدن در قطعات نوری را دارند و همچنین از آن‌ها می‌توان به عنوان قطبشگرهای فیلم نازک استفاده کرد. در کنار سائز بسیار کوچک این قطبشگرها، با انتقال بسیار خوب نور در یک جهت خاص و مسدود کردن نور در جهت مخالف، دارای بازدهی بسیار بالایی هستند. از مزایای دیگر این قطبشگرها پهنای باند بالا و روند ساخت آسان آن‌ها می‌باشد. میزان قطبی‌شدگی قطبشگرها از طریق رابطه (۱) محاسبه می‌شود. راه حل مؤثر برای افزایش میزان قطبی‌شدگی کاهش انتقال مود TE است. یک روش برای کاهش انتقال مود TE و در نتیجه افزایش قطبی‌شدگی، افزایش ابعاد شبکه‌های سیمی است. اما این روش باعث کاهش انتقال مود TM هم می‌شود [۱].

$$ER = 10 \log \frac{T_{TM}}{T_{TE}} \quad (1)$$

ساختارهای فلزی دوگانه، باعث افزایش انتقال مود TM و میزان قطبی‌شدگی می‌شوند. با قرار دادن دو لایه فلز در دو طرف CaF_2 یک قطبشگر پهن باند با میزان قطبی‌شدگی ۷۰ dB در طول موج $0.3 \mu\text{m}$ تا $5 \mu\text{m}$ خواهیم داشت [۲]. اما این قطبشگرها دارای ابعاد بزرگی هستند. به بیان دیگر بسیاری از قطبشگرهای ارائه شده مبتنی بر تشدید شبکه‌های فلزی یک بعدی عمل می‌کنند که باعث کاهش پهنای باند می‌شوند. یک روش برای کنترل پهنای باند این است که اثر متقابل بین مودهای تشدید را تنظیم کنیم. با استفاده از تزویج تشدید فابری پرو یا پلاریتون پلاسمون‌های مغناطیسی می‌توان یک قطبشگر پهن باند ایجاد کرد [۳]. یک روش دیگر برای ساخت قطبشگرهای پهن باند استفاده

از روش بدون تشدید است که ساختارهای فلزی پهن باند ارائه شده را در این دسته قرار دارند [۴]. در این مقاله از این روش جهت طراحی یک قطبشگر استفاده شده است. از اینگونه قطبشگرها به دلیل طول موج وسیع عملکردشان، در بسیاری از کاربردها مثل مخابرات نوری و سنسورها استفاده می‌شود.

۲- خصوصیات نوری گرافن

گرافن به دلیل کنترل‌پذیر بودن تابع هدایت آن، به یک ماده مهم در قطعات پلاسمونیک تبدیل شده است. هدایت گرافن را می‌توان از طریق رابطه کوپو به صورت زیر تعریف کرد [۵]:

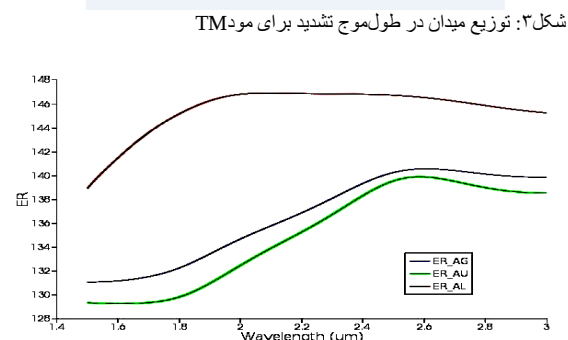
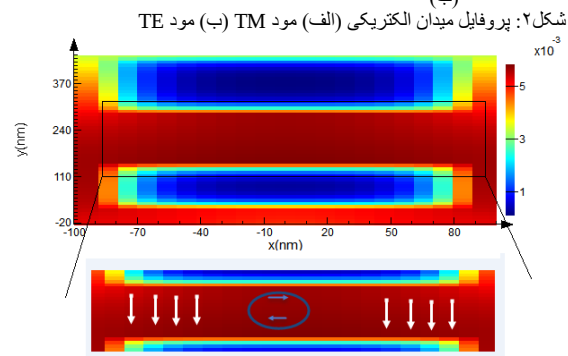
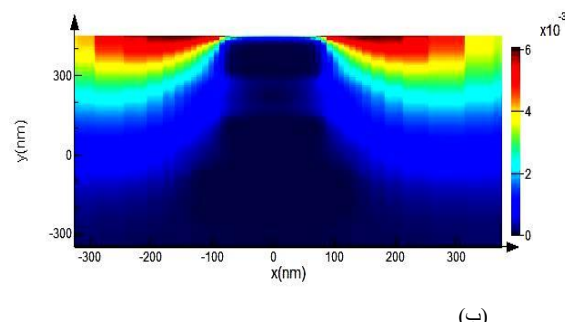
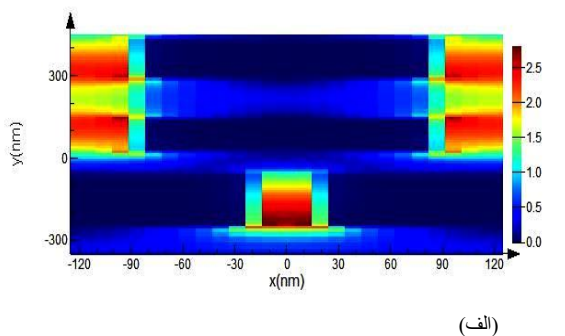
$$\begin{aligned} \sigma_g(\omega, \mu_c, \Gamma, T) &= \sigma_{\text{Intra}}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) + \sigma_{\text{Inter}}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) \\ &= \frac{-ie^2}{\pi \hbar^2 (\omega + i2\Gamma)} \left[\int_0^\infty \left(\frac{\partial f_d(\varepsilon)}{\partial \varepsilon} - \frac{\partial f_d(-\varepsilon)}{\partial \varepsilon} \right) d\varepsilon \right] \\ &\quad - \frac{ie^2 (\omega + i2\Gamma)}{\pi \hbar^2} \left[\int_0^\infty \frac{f_d(-\varepsilon) - f_d(\varepsilon)}{(\omega + i2\Gamma)^2 - 4(\varepsilon/\hbar)^2} d\varepsilon \right] \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه فوق، Γ نرخ پراکندگی $(\Gamma = \frac{1}{2\tau})$ و τ زمان استراحت حاملها، μ_c پتانسیل شیمیایی، $f_d(\varepsilon)$ تابع توزیع فرمی-دیراک، i واحد موهومی، e بار الکترون، $\hbar$ ثابت پلانک کاهش یافته، ω فرکانس زاویه‌ای و T دما می‌باشد. پتانسیل شیمیایی گرافن (μ_c) به چگالی حامل‌ها بستگی دارد و این مقدار می‌تواند به وسیله ولتاژ گیت خارجی، آلایش شیمیایی، میدان الکتریکی و یا میدان مغناطیسی کنترل شود. قسمت موهومی تابع هدایت گرافن بسته به سطح پتانسیل شیمیایی می‌تواند مقادیر مثبت یا منفی را در محدوده‌های متفاوت فرکانسی داشته باشد. زمانی که قسمت موهومی تابع هدایت مثبت باشد، گرافن مانند یک لایه نازک فلزی عمل می‌کند و در نتیجه می‌تواند پلاسمای سطحی را انتقال دهد [۶] که به آن پلاسمون سطحی گرافن (GSP) می‌گویند. اگر قسمت موهومی منفی باشد، گرافن مانند یک لایه دی الکتریک عمل می‌کند.

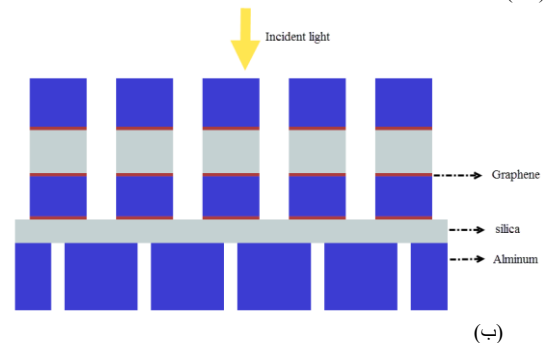
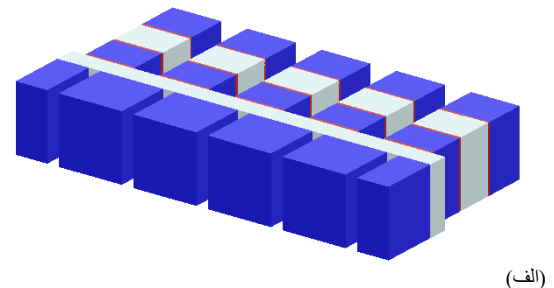
۳- طراحی ساختار و نتایج عددی

شکل ۱ (الف) نمای سه بعدی و شکل ۱ (ب) نمای دوبعدی قطبشگر پیشنهادی را نشان می‌دهد که از آرایه آلومینیم-سیلیکا-آلومینیم با پریود 280 nm و عرض 170 nm بر روی یک زیرلایه سیلیکا با ضخامت 70 nm قرار گرفته است. در زیر زیرلایه سیلیکا از دو لایه آلومینیوم دیگر با

انتقال، منفی (مثبت) می‌شود، بنابراین امپدانس تشدید مغناطیسی نمی‌تواند (می‌تواند) با دی‌الکتریک خارجی هماهنگ شود و در خروجی کمترین (بیشترین) انتقال را خواهیم داشت. میدان مغناطیسی همچنین می‌تواند از فضای ایجاد شده بین دو گرافن (سیلیکا)، خارج شود که در نتیجه باعث کاهش ضریب کیفیت تشدید مغناطیسی می‌شود. معمولاً هر چه این فضا بیشتر باشد ضریب کیفیت آن کمتر می‌شود و هر چه ضریب کیفیت تشدید مغناطیسی کمتر باشد، پهنای باند قطبشگر بیشتر خواهد شد.



عرض 110nm و ضخامت 300nm استفاده شده است. ضریب شکست مؤثر تمام مواد به جز گرافن از مدل پالیک به دست می‌آید [۷]. برای شبیه‌سازی و تحلیل قطبشگر ارائه شده از روش تحلیل عددی محدود (FDTD) استفاده می‌شود. در این ساختار برای به دست آوردن بیشترین مقدار قطبی‌شدگی از گرافن با پتانسیل شیمیایی $0/\text{eV}$ استفاده می‌کنیم. همچنین بقیه پارامترها مثل ضخامت لایه گرافن، زمان استراحت حامل‌ها و دما به ترتیب $\Delta = 0.3$ ، $T = 300^\circ\text{K}$ و $\tau = 0.5\text{ps}$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۱: (الف) نمای سه بعدی قطبشگر مبتنی بر گرافن (ب) نمای دو بعدی قطبشگر مبتنی بر گرافن

شکل ۲ پروفایل میدان را در دو مود TM و TE نشان داده است. مود TM از ساختار عبور می‌کند، اما مود TE از آن منعکس می‌شود. در شکل ۳ فلش‌های سفید جهت و شدت میدان الکتریکی در داخل سیلیکا تحدید می‌شود، اما میدان الکتریکی به صورت یک حلقه قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده تشدید مغناطیسی است و می‌تواند باعث انتقال بیشتر نور شود [۱۱]. اگرچه زمانی که تشدید مغناطیسی تحریک می‌شود، انتقال مود TM کاهش می‌یابد. این تغییرات مقدار نور انتقالی می‌تواند به دلیل گذردهی متفاوت ساختارهای فلز-دی‌الکتریک-فلز در طول موج تشدید مغناطیسی باشد. با قرار دادن گرافن، میزان انتقال مود TM، به دلیل افزایش برهم‌کنش نور در طول موج پلاریتون مغناطیسی، افزایش می‌یابد. گذردهی مؤثر در کمترین (بیشترین) طول موج

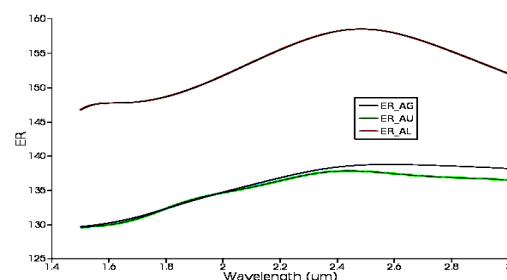
جدول ۱: مقایسه قطبشگر پیشنهادی با طرحهای دیگر

قطبشگر	ER	λ
قطبشگر پهن باند شبکه سیمی [۸]	۸۰ dB	۳۰۰ nm
قطبشگر پهن باند با استفاده از دو لایه فلز [۹]	۸۰ dB	۳۰۰ nm
قطبشگر پهن باند با استفاده از سیلیکون [۱۰]	۹۷ dB	۱۵۱۰ nm
قطبشگر پیشنهادی مبتنی بر گرافن	۱۵۸ dB	۲۴۰۰ nm

مراجع

- [1] J. J. Wang, L. Chen, X. Liu, P. Sciortino, F. Liu, F. Walters, and X. Deng, "30-nm-wide aluminum nanowire grid for ultrahigh contrast and transmittance polarizers made by UV-nanoimprint lithography," *Appl. Phys. Lett.* Vol.89, No.14, pp.141105 (2006).
- [2] Z. Y. Yang and Y. F. Lu, "Broadband nanowire-grid polarizers in ultraviolet-visible-near-infrared regions," *Opt. Express*, Vol.15, No.15, pp. 9510-9519 (2007).
- [3] C. Cheng, J. Chen, D.-J. Shi, Q.-Y. Wu, F.-F. Ren, J. Xu, Y.-X. Fan, J. Ding, and H.-T. Wang, "Physical mechanism of extraordinary electromagnetic transmission in dual-metallic grating structures," *Phys. Rev. B*, Vol.78, No.7, pp. 075406 (2008).
- [4] G. Subramania, S. Foteinopoulou, and I. Brener, "Nonresonant broadband funneling of light via ultrasubwavelength channels," *Phys. Rev. Lett.*, Vol.107, No. 16, pp. 163902 (2011).
- [5] G. Zhen, H. Zhang, L. Xu, Y. Liu, "Enhanced absorption of graphene monolayer with a single-layer resonant grating at the Brewster angle in the visible range," *Optics letters*, Vol.41, No.10, pp.2274-2277, (2016).
- [6] X. Peng, L. ErPing, and H. Ran, "Graphenealuminum oxide metamaterial for a compact polarization-independent modulator," *Advanced Materials and Processes for RF and THz Applications (IMWS-AMP)*, IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on, pp. 1-3, 2015
- [7] ED Palik, *Handbook of optical constants of solids*, 1985
- [8] Dai, M., Wan, W., Zhu, X., Song, B., Liu, X., Lu, M., Cui, B. and Chen, Y., 2015. Broadband and wide angle infrared wire-grid polarizer. *Optics express*, Vol.23, No.12, pp.15390-15397.
- [9] Yang, Z.Y., Zhao, M., Dai, N.L., Yang, G., Long, H., Li, Y.H. and Lu, P.X., 2008. Broadband polarizers using dual-layer metallic nanowire grids. *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol.20, No. 9, pp.697-699.
- [10] Lee, K.J., Curzan, J., Shokooh-Saremi, M. and Magnusson, R., 2011. Resonant wideband polarizer with single silicon layer. *Applied Physics Letters*, Vol.98, No.21, pp.211112.
- [11] L. Wang and Z. M. Zhang, "Effect of magnetic polaritons on the radiative properties of double-layer nanoslit arrays," *J. Opt. Soc. Am. B*, Vol.27, No.12, pp.2595-2604, (2010).
- [12] [1] Ho, Jinfa, Satoshi.I, and Yasuhiko.A, "Design of efficient surface plasmon polariton modulators using graphene," *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.53, pp. 82, 2014.

(الف)



(ب)

شکل ۴: نمودار قطبی شدگی قطبشگر پیشنهادی به ازای فلزات مختلف (الف) بدون گرافن (ب) با استفاده از گرافن

برای دست یافتن به میزان قطبی شدگی بالا، انتظار می رود میزان عبور مد TE به صفر برسد. اما معمولاً بخش کوچکی از این مد نیز از ساختار عبور می کند. وجود گرافن در سطح مشترک فلز و گرافن میزان تلفات در مد TE را افزایش می دهد [۱۲] و در نتیجه باعث کاهش انتقال مد TE می شود. شکل ۴ میزان قطبی شدگی قطبشگر پیشنهادی به ازای سه فلز مختلف نقره، طلا و آلومینیم را با حضور گرافن و بدون آن نشان می دهد. می بینیم که با استفاده از فلز آلومینیم بیشترین میزان قطبی شدگی به دست می آید و با استفاده از لایه گرافن میزان قطبی شدگی ۱۵۸ dB در طول موج ۲۴۰۰ nm به دست می آید، اما این مقدار بدون استفاده از گرافن ۱۴۶ dB است. همانطور که مشاهده می شود با استفاده از گرافن میزان قطبی شدگی به صورت چشمگیری افزایش یافته است. پارامترهای مربوط به سه نوع قطبشگر در جدول (۱) مقایسه شده است. نتایج نشان می دهد که میزان قطبی شدگی به اندازه ۶۲٪ نسبت به قطبشگرهای پیشین، افزایش یافته است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله، تأثیر لایه های گرافن و همچنین استفاده از فلزات مختلف در میزان قطبش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می دهد که به ازای استفاده از فلز آلومینیم و ۳ لایه گرافن، میزان قطبی شدگی ۱۵۸ dB در طول موج ۲۴۰۰ nm به دست می آید که حاکی از بهبود عملکرد این قطبشگر در محدوده وسیعی از طول موج نسبت به قطبشگرهای دیگر است. ساختار ارائه شده دارای کاربردهای زیادی مثل قطبشگرهای مادون قرمز، فیلترها و جداکننده های مودها هستند.