بهبود عملکرد قطبشگرشبکه سیمی مبتنی بر گرافن

عاطفه امین، مریم پورمحی‌آبادی

گروه برق، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنرکرمان

چکیده - امروزه به قطبشگرهای نوری با میزان قطبی‌شدگی بالا و محدوده طول موجی وسیع در مدارات مجتمع نوری نیاز است. کنترل قطبش، نقش اساسی در کاربردهای مختلف مثل طیف‌سنجی، فوتولیتوگرافی و بیضی سنجی دارد. یکی از انواع قطبشگرها، قطبشگرهای شبکه سیمی است که به راحتی با قطعات نوری در ابعاد نانومتر مجتمع می‌شوند. در این مقاله یک قطبشگر با میزان قطبی‌شدگی بالا در محدوده وسیعی از طول‌موج ارائه شده است. این قطبشگر شامل یک آرایه از فلز- دی‌الکتریک – 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 دی‌الکتریک قرار گرفته‌اند. تاثیر وجود تعداد لایه‌های گرافن و جنس فلزات بر روی میزان قطبی‌شدگی با استفاده از روش FDTD مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که میزان قطبی‌شدگی در ساختار پیشنهادی، به دلیل ایجاد پلاسمون پلاریتون سطحی افزایش می‌یابد. با استفاده از ۳ لایه گرافن و فلز آلومینیوم میزان قطبی‌شدگی به مقدار dB ۱۵۸ در طول موج nm ۲۴۰۰ می‌رسد که نسبت به ساختارهای موجود، حدود ۶۲٪ بهبود یافته است.

کلید واژه- میزان قطبی‌شدگی، 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 WGPs.

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

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

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 شبکه های 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 سایز بسیار کوچک این قطبشگرها، با انتقال بسیار خوب نور در یک جهت خاص ومسدود 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 می-شود. 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].

$$ER = 10\log\frac{T_{TM}}{T_{TE}} \qquad (۱)$$

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 ۷۰dB در طول‌موج ۰/۳μm تا ۵μm خواهیم داشت[۲]. اما این قطبشگرها دارای ابعاد بزرگی هستند. به بیان دیگر بسیاری از قطبشگرهای ارائه شده مبتنی بر تشدید شبکه های 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 پهن‌باند استفاده از روش بدون تشدید است که ساختارهای فلزی پهن باند ارائه شده را در این دسته قراردارند [۴]. در این مقاله از این روش جهت طراحی یک قطبشگر استفاده شده است. از اینگونه قطبشگرها به‌دلیل طول‌موج وسیع عملکردشان، در بسیاری از کاربردها مثل مخابرات نوری و سنسوها استفاده می‌شود.

۲-خصوصیات نوری گرافن

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

$$\begin{aligned}\sigma_g(\omega,\mu_C,\Gamma,T) &= \sigma_{Intra}(\omega,\mu_C,\Gamma,T)+\sigma_{Inter}(\omega,\mu_C,\Gamma,T)\\ &= \frac{-ie^2}{\pi\hbar^2(\omega+i2\Gamma)}\left[\int_0^\infty \varepsilon\left(\frac{\partial f_d(\varepsilon)}{\partial\varepsilon}-\frac{\partial f_d(-\varepsilon)}{\partial\varepsilon}\right)d\varepsilon\right]\\ &-\frac{ie^2(\omega+i2\Gamma)}{\pi\hbar^2}\left[\int_0^\infty \frac{f_d(-\varepsilon)-f_d(\varepsilon)}{(\omega+i2\Gamma)^2-4(\varepsilon/\hbar)^2}\,d\varepsilon\right]\end{aligned} \qquad (۲)$$

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.

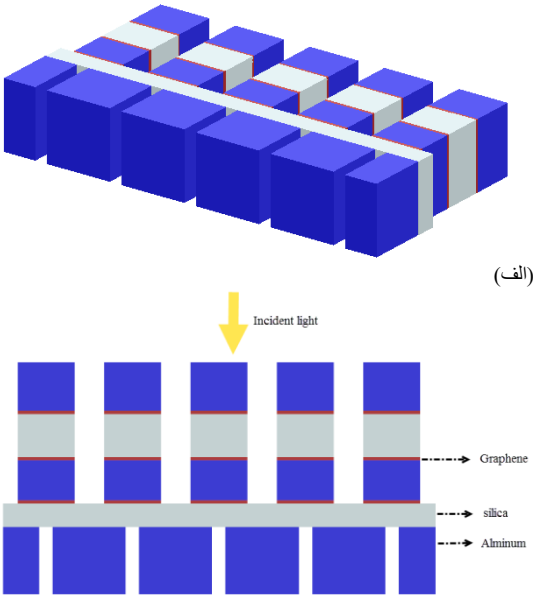
۳- طراحی ساختارو نتایج عددی

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 ۲۸۰nm و عرض ۱۷۰nm بر روی یک زیرلایه سیلیکا با ضخامت ۷۰nm قرار گرفته است. در زیر زیرلایه سیلیکا از دو لایه آلومینیوم دیگر با

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

عرض۱۱۰nm و ضخامت ۳۰۰nm 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 پتانسیل‌شیمیایی ۰/۷eV استفاده می‌کنیم. همچنین بقیه پارامترها مثل ضخامت لایه گرافن، زمان استراحت حامل‌ها و دما به ترتیب $\Delta = 0.3$، $T = 300°K$ و $\tau = 0.5ps$ درنظر گرفته شده است.

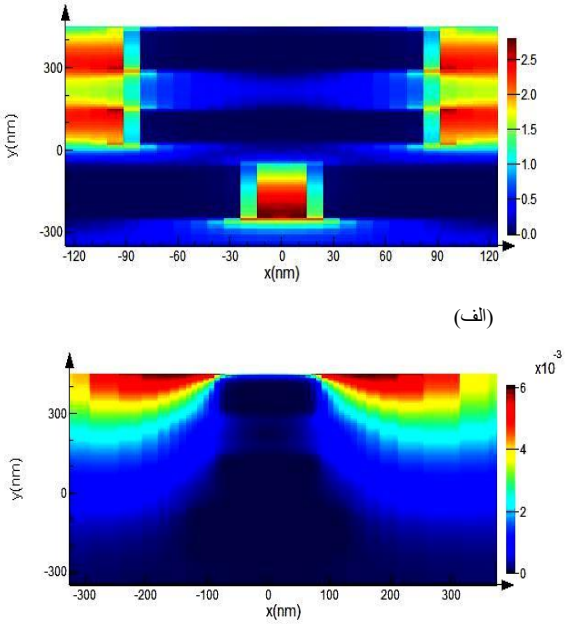


(الف)

(ب)

شکل۱: (الف) نمای سه بعدی قطبشگر مبتنی بر گرافن (ب) نمای دو بعدی قطبشگر مبتنی بر گرافن

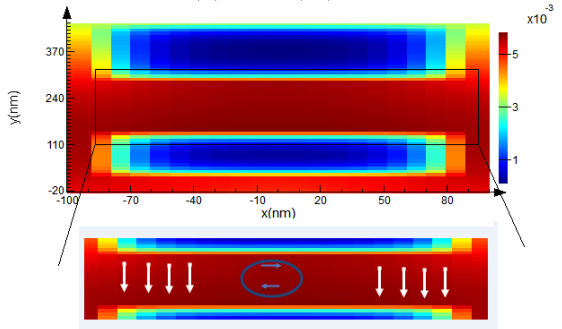
شکل ۲ پروفایل میدان را در دو مود TM و TE نشان داده است. مود TM از ساختار عبور می‌کند، اما مود TE از آن منعکس می‌شود. در شکل۳ فلش‌های سفید جهت و شدت میدان الکتریکی مود TM را نشان داده است. میدان مغناطیسی در داخل سیلیکا تحدید می‌شود، اما میدان الکتریکی به صورت یک حلقه قرار می‌گیرد که نشان‌دهنده تشدید مغناطیسی 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 طول‌موج تشدید مغناطیسی باشد. با قرار دادن گرافن، میزان انتقال مد TM، به دلیل افزایش برهم‌کنش نور در طول موج پلاریتون مغناطیسی، افزایش می‌یابد. گذردهی مؤثر درکمترین (بیشترین) طول‌موج 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. معمولا هر چه این فضا بیشتر باشد ضریب کیفیت آن کمتر می‌شود و هرچه ضریب کیفیت تشدید مغناطیسی کمتر باشد، پهنای باند قطبشگر بیشتر خواهد شد.



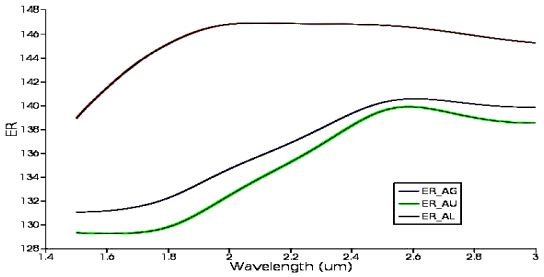
(الف)

(ب)

شکل۲: پروفایل میدان الکتریکی (الف) مود TM (ب) مود TE



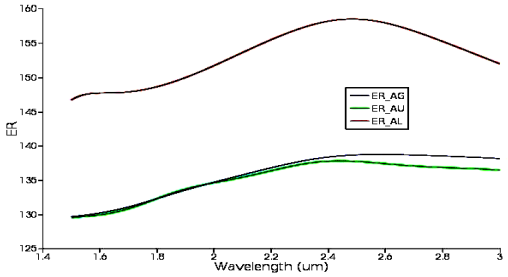
شکل۳: توزیع میدان در طول‌موج تشدید برای مودTM



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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]

(الف)



(ب)

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

برای دست یافتن به میزان قطبی‌شدگی بالا، انتظار می‌رود میزان عبور مد TE به صفر برسد. اما معمولا بخش کوچکی از این مد نیز از ساختار عبور می‌کند. وجود گرافن در سطح مشترک فلز و گرافن میزان تلفات در مد TE را افزایش می‌دهد [۱۲] و درنتیجه باعث کاهش انتقال مد TE می-شود. شکل ۴ میزان قطبی‌شدگی قطبشگر پیشنهادی به ازای سه فلز مختلف نقره، طلا و آلومینیم را با حضور گرافن و بدون آن نشان می‌دهد. می‌بینیم که با استفاده از فلز آلومینیوم بیشترین میزان قطبی‌شدگی به‌دست می‌آید و با استفاده از لایه گرافن میزان قطبی‌شدگی ۱۵۸ dB در طول موج ۲۴۰۰nm به‌دست می‌آید، اما این مقدار بدون استفاده از گرافن ۱۴۶ dB است. همانطور که مشاهده می‌شود با استفاده از گرافن میزان قطبی‌شدگی به صورت چشمگیری افزایش یافته است. پارامترهای مربوط به سه نوع قطبشگر در جدول (۱) مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که میزان قطبی شدگی به اندازه ٦٢٪ نسبت به قطبشگرهای پیشین، افزایش یافته است.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تأثیر لایه های گرافن و همچنین استفاده از فلزات مختلف در میزان قطبش مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که به ازای استفاده از فلز آلومینیم و ۳ لایه گرافن، میزان قطبی‌شدگی ۱۵۸ dB در طول موج ۲۴۰۰nm به‌دست می‌آید 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 مادون‌قرمز، فیلترها و جداکننده‌های مودها هستند.

جدول۱: مقایسه قطبشگر پیشنهادی با طرحهای دیگر

قطبشگر	ER	λ
قطبشگر پهن‌باند شبکه سیمی[۸]	۸۰ dB	۳۰۰۰ nm
قطبشگر پهن باند با استفاده از دو لایه فلز[۹]	۸۰ dB	۳۰۰۰ 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. "Graphenealuminium 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.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-01]