

Research Paper

Design of a Symmetric Hybrid Graphene Plasmonic Waveguide with High Confinement and Efficiency¹

Mohammad Reza Jafari^{2,*}, Akbar Asadi³ and
Somayeh Karimi⁴

Received: 2024.11.08

Revised: 2025.04.15

Accepted: 2025.05.31

1. Introduction

The interaction between light and matter and the control of light at nanometric scales is one of the key advancements in nano-photonics, which has attracted extensive research today. Under specific conditions, applying light at the metal-dielectric interface generates collective oscillations of free electrons, known as surface plasmons. Moreover, their strong interaction with light leads to the formation of polaritons. Graphene, a two-dimensional material, has recently been utilized as a plasmonic material from the terahertz to the infrared spectral region. The excitation, propagation, and tunability of graphene surface plasmons (GSPs) have been experimentally observed in the mid-infrared frequency range. Compared to noble metals, graphene surface plasmons can confine electromagnetic fields at subwavelength scales in the mid-infrared spectral region. Due to these properties, graphene is considered a suitable candidate for waveguides operating from the mid-infrared to the terahertz regions. Graphene surface plasmon modes have been studied on graphene sheets, graphene nanoribbons, graphene-coated nanowires, and graphene groove/wedge structures. Graphene surface plasmons are recognized as optimal materials for waveguides due to their strong light-matter interactions, high field confinement, and tunable optical properties. With the rapid advancement of microfabrication technologies and computational tools, nano-photonics has been extensively explored for high-speed data transmission and optical sensor detection. Leveraging these features, graphene serves as a nanoscale waveguide in the infrared region. The

¹ <https://doi.org/10.22051/ijap.2025.48853.1435>

² PhD, Department of Condensed Matter Physics, Faculty of Physics, Alzahra University, Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: mo.jafari@alzahra.ac.ir

³ PhD, Department of Physics, Faculty of Basic Sciences, Imam Khomeini University of Maritime Science, Nowshahr, Iran. Email: akbar_asadi@yahoo.com

⁴ M.sc Student, Department of Condensed Matter Physics, Faculty of Physics, Alzahra University, Tehran, Iran. Email: smkarimi9701@gmail.com

<https://jap.alzahra.ac.ir>



integration of graphene with silicon-on-insulator waveguides enables the development of graphene-based photonic devices, including waveguides, sensors, filters, modulators, and other optical components. Recently, numerous studies have investigated the propagation properties of symmetric graphene-based plasmonic waveguides concerning dimensions, incident frequency, and graphene Fermi energy. Mr. D. Tang and his colleagues proposed a symmetric graphene plasmonic waveguide for optimal infrared mid-spectrum wavelength guidance. They observed a performance factor exceeding 400 and a normalized mode area of approximately (10^{-5}) within the graphene Fermi energy range of 0.4 to 0.6 eV and at a frequency of 30 THz. Furthermore, a hybrid graphene-based plasmonic nano-waveguide was recently introduced in the reference. The proposed structure consists of two symmetric, circular cylinders of radius (R) made of potassium chloride (KCl) surrounding a rectangular gallium arsenide (GaAs) substrate. The lateral surfaces of both cylinders are covered with a single-layer graphene coating, and the entire system is embedded in the silicon dioxide SiO_2 environment. Their findings indicate a propagation length exceeding 4600 nm, a normalized mode area of approximately (10^{-6}) , and a performance factor close to 500 for the proposed model.

2. Methodology

In this study, we aim to determine the propagation properties of modes, including propagation length, performance factor, normalized mode area, and the real part of the refractive index, using the COMSOL Multiphysics simulation program.

3. Results and Discussion

Comparisons show that the proposed elliptical waveguide has the longest propagation length and the smallest normalized mode area at a given frequency and Fermi Energy compared to a similar circular waveguide. These results indicate better performance and stronger light confinement in the elliptical waveguide. Furthermore, analysis of the cited articles' graphs suggests that increasing the minor axis effectively improves the waveguide parameters. Therefore, the enhancement of elliptical waveguide parameters is attributed to dimensional changes compared to a similar circular waveguide, meaning the closer the shape is to an ellipse, the better the results. The elliptical waveguide exhibits a longer propagation length compared to the circular waveguide, which not only reduces losses but also increases data transmission speed. Additionally, these waveguides have a smaller normalized mode area than their circular counterparts, leading to stronger light confinement and lower losses. Finally, based on simulation results, it was observed that increasing the coefficient b leads to an extended propagation length and a smaller normalized mode area. The EF graph demonstrates the longest propagation length, confirming superior performance compared to



circular waveguides. The Nr graphs indicate that the effective refractive index increases as the coefficient b decreases. Ultimately, examining the FOM graph for different values of g , H , and f reveals that at higher values of b , the FOM is greater than in the case of $b = a$, highlighting the significant impact of dimension changes in the elliptical direction on the proposed waveguide structure.

4. Conclusion

The simulation results showed that in the mid-infrared region, the propagation length exceeds 8000 nanometers, and the normalized mode area is on the order of $\sim 10^{-6}$. The waveguide structure consists of two symmetric elliptical cylinders covered with a single-layer graphene, with a high refractive index layer on both sides. Key plasmonic parameters of the proposed waveguide, including effective refractive index, propagation length, waveguide performance factor, and normalized mode area, were analyzed based on waveguide dimensions, incident wave frequency, and graphene Fermi energy using the finite element method in the COMSOL Multiphysics software within the frequency range of 20 to 40 terahertz. The results indicate that the proposed waveguide outperforms similar structures.

Keywords: *Plasmonic Waveguide, Graphene, COMSOL, Mid-infrared.*

References

- [1] Oulton, R.F., Sorger, V.J., Genov, D.A., Pile, D.F.P. and Zhang, X., "A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation", *nature photonics* 2(8), 496-500, 2008. <https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2008.131>
- [2] Cheben, P., Halir, R., Schmid, J. H., Atwater, H. A., and Smith, D. R., "Subwavelength integrated photonics", *Nature* 560, 565–572, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICTON59386.2023.10207450>
- [3] Shahmansouri, M., and Mahmodi Moghadam, M., "Quantum electrostatic surface waves in a hybrid plasma waveguide: Effect of nano-sized slab", *Physics of Plasmas* 24, 102107, 2017. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4986333>
- [4] Mahmodi Moghadam, M., Shahmansouri, M., "Theoretical study of surface waves in a magnetized conductor-gap-dielectric nano-structure", *Physica Scripta* 95(8), 085606, 2020. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab9ed5>
- [5] Yang, L., Li P., and Li, Z., "Plasmonic polarization beam splitting based on single silver nanowire", *Opt. Express* 27, 3851–3860, 2019. <https://doi.org/10.1364/OE.27.003851>

- [6] Huang, C. C., Chang, R. J., and Cheng, C. W., “Ultra-Low-Loss Mid-Infrared Plasmonic Waveguides Based on Multilayer Graphene Metamaterials”, *Nanomaterials* 11, 2981, 2021. <https://doi.org/10.3390/nano11112981>
- [7] Ye, L., Sui, K., Liu, Y., Zhang, M., and Liu, Q., “Graphene-based hybrid plasmonic waveguide for highly efficient broadband mid-infrared propagation and modulation”, *Optics Express* 26(12), 15935-15947, 2018. <https://doi.org/10.1364/OE.26.015935>
- [8] Zhang, L., Pan, C., Zeng, D., Yang, Y., Yang, Y., and Junxian, M., “A hybrid-plasmonic-waveguide-based polarization-independent directional coupler”, *IEEE Access* 8, 134268–134275, 2020. <https://doi.org/10.3390/nano11051281>
- [9] Xu, Y., Li, F., Kang, Z., Huang, D., Zhang, X., Tam, H.Y., and Wai, P. K. A., “Hybrid graphene-silicon based polarization-insensitive electro-absorption modulator with high-modulation efficiency and ultra-broad bandwidth”, *Nanomaterials* 9, 157, 2019. <https://doi.org/10.3390/nano9020157>
- [10] Tuniz, A., Bickerton, O., Diaz, F. J., Kasebier, T., Kley, E. B., Kroker, S., Palomba, S., de Sterke, C. M., “Modular nonlinear hybrid plasmonic circuit”, *Nat. Commun.* 11, 2413, 2020. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2024-0137>
- [11] Jafari, M. R., Asadi, A., and Shahmansouri, M., “Ultra-deep Subwavelength Confinement Palladium-Based Elliptical Cylinder Plasmonic Waveguide in the Near-Infrared Range”, *Plasmonics* 18, 1037-1045, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11468-023-01830-z>
- [12] Geim, A. K., “Graphene: status and prospects”, *Science* 324(5934), 1530–1534, 2009. <https://doi.org/10.1126/science.1158877>
- [13] Grigorenko, A. N., Polini, M., and Novoselov, K. S., “Graphene plasmonics”, *Nat. Photonics* 6(11), 749–758, 2012. <https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2012.262>
- [14] Rodrigo, D., Limaj, O., Janner, D., Etezadi, D., García de Abajo, F. J., Pruneri, V., and Altug, H., “Mid-infrared plasmonic biosensing with graphene”, *Science* 349(6244), 165–168, 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.06800>
- [15] Xu, W., Zhu, Z.H., Liu, K., Zhang, J.F., Yuan, X.D., Lu, Q.S., Qin, S.Q., “Dielectric loaded graphene plasmon waveguide”, *Opt. Express* 23, 5147–5153, 2015. <https://doi.org/10.1364/OE.23.005147>
- [16] Yang, Y., Lin, H., Zhang, B.Y., Zhang, Y., Zheng, X., Yu, A., Hong, M., Jia, B., “Graphene-based multilayered metamaterials with phototunable architecture for on-chip photonic devices”, *Acs Photonics* 6(4), 1033-1040, 2019. <https://doi.org/10.1021/acsphotonics.9b00060>
- [17] Asadi, A., Jafari, M. R., and Shahmansouri, M., “Simulation optimized design of graphene-based hybrid plasmonic waveguide”, *Indian J Phys.*, 97, 2515-2522, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12648-023-02601-6>



- [18] Asadi, A., Jafari, M. R., and Shahmansouri, M., "Characteristics of a Symmetric Mid- infrared Graphene Dielectric Hybrid Plasmonic Waveguide with Ultra-deep Subwavelength Confinement", *Plasmonics* 17, 1819-1829, 2022. <https://doi.org/10.22051/jitl.2023.42299.1077>
- [19] Yan, H., Low, T., Zhu, W., Wu, Y., Freitag, M., Li, X., Guinea, F., Avouris, P., Xia, F., "Damping pathways of mid-infrared plasmons in graphene nanostructures", *Nature Photonics* 7, 394-399, 2013. <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2013.57>
- [20] Strait, J. H., Nene, P., Chan, W.M., Manolatu, C., Tiwari, S., Rana, F., Kevek, J.W., McEuen, P.L., "Confined plasmons in graphene microstructures: Experiments and theory", *Physical Review B* 87, 241410, 2013. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.241410>
- [21] Gao, Y., Ren, G., Zhu, B., Liu, H., Lian, Jian, Y., S., "Analytical model for plasmon modes in graphene-coated nanowire", *Optics Express* 22, 24322-24331, 2014. <https://doi.org/10.1364/OE.22.024322>
- [22] Jabbarzadeh, F., and Habibzadeh-Sharif, A., "High performance dielectric loaded graphene plasmonic waveguide for refractive index sensing", *Opt. Commun.* 479, 126419, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126419>
- [23] Zhu, J., Jiang, F., and Yunbai, Q., "Sense of surface plasmon polarization waveguide of graphene", *Plasmonics* 14, 1903–1910, 2019. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11468-019-00984-z>
- [24] Jafari, M. R., Asadi, A., and Shahmansouri, M., "Design of Graphene Hybrid Dielectric Plasmonic Nano-waveguide with Ultralow Propagation Loss", *Journal of Electronic Materials* 52, 6483–6491, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11664-023-10640-2>
- [25] Wang, J., Xing, Z., Chen, X., Cheng, Z. Z., Li, X. J., Liu, T., "Recent progress in waveguide-integrated graphene photonic devices for sensing and communication applications", *Front. Phys.* 8, 37, 2020. <https://doi.org/10.3390/nano11051281>
- [26] Liao, B., Guo, X., Hu, H., Liu, N., Chen, K., Yang, X., Dai, Q., "Ultra-compact graphene plasmonic filter integrated in a waveguide", *Chin. Phys. B* 27, 094101, 2018. <https://doi.org/10.3390/nano11051281>
- [27] Teng, D., Cao, Q., Wang, K., "An extension of the generalized nonlocal theory for the mode analysis of plasmonic waveguides at telecommunication frequency", *Journal of Optics* 19, 055003, 2017. <https://doi.org/10.3390/nano11010210>
- [28] Asadi, A., Jafari, M. R., and Shahmansouri, M., "Design of symmetric hybrid nanowaveguide based on graphene with strong confinement and high efficiency in the mid-infrared spectrum region", *Marine Electrical Engineering* 1, Winter 1400. <https://doi.org/10.22034/meej.2022.533797.1019>
- [29] Jafari, M. R., and Asadi, A., "Modeling a high-performance broadband mid-infrared modulator using graphene-based hybrid plasmonic

- waveguide”, *Journal of interfaces thin films and low dimensional systems* 5, 505-515, 2022. <https://doi.org/10.22051/jitl.2023.42299.1077>
- [30] Teng, D., Wang, Y., Xu, T., Wang, H., Shao, Q., and Tang, Y., “Symmetric Graphene Dielectric Nano waveguides as Ultra-Compact Photonic Structures”, *Nanomaterials* 11(5), 1281, 2021. <https://doi.org/10.3390/nano11051281>
- [31] He, X., Ning, T., Lu, S., Zheng, J., Li, J., Li, R., Pei, L., “Ultralow loss graphene-based hybrid plasmonic waveguide with deep-subwavelength confinement”, *Optic Express* 26(8), 2018. <https://doi.org/10.1364/OE.26.010109>



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).



طراحی موجبر پلاسمونیک هیبرید گرافن متقارن با محصور شدگی و کارایی بالا^۱ محمدرضا جعفری^{۲*}، اکبر اسدی^۳ و سمیه کریمی^۴

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال پانزدهم، پیاپی ۴۱، تابستان ۱۴۰۴

صص ۹۷ - ۱۱۱

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۸/۱۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۰

چکیده:

پلاسمون‌های موجود در گرافن دارای ویژگی‌های غیرعادی هستند و چشم‌اندازهای امیدوارکننده‌ای را برای کاربردهای پلاسمونیک ارائه می‌دهند. این پلاسمون‌ها محدوده بسامدی گسترده‌ای، از تراهرتز تا طیف مرئی، را پوشش می‌دهند. تاکنون مطالعات زیادی در رابطه با مُدهای پلاسمون در گرافن صورت گرفته است. در این پژوهش، یک موجبر پلاسمونیک گرافن متقارن برای بهبود عملکرد هدایت موج در محدوده فرسرخ میانی پیشنهاد و ویژگی‌های پلاسمون گرافن با روش المان محدود با استفاده از نرم افزار کامسول بررسی شده است. ساختار این موجبر، به صورت دو نانو استوانه بیضوی پوشش داده شده با گرافن است که به صورت متقارن در هر طرف یک ورقه نازک Al_2O_3 قرار گرفته‌اند. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با تغییر کمیت‌های هندسی ساختار پیشنهادی و تغییر نوع مواد، طول انتشار مدها بیش از ۸ میکرومتر و ناحیه مُد بهنجار شده از مرتبه 10^{-6} بدست می‌آید. به همین دلیل، موجبر پیشنهادی، کاربردهای امیدوارکننده‌ای در اجزای مدارات مجتمع فوتونیک و سایر سامانه‌های در مقیاس نانو دارد.

واژگان کلیدی: موجبر پلاسمونیک، گرافن، کامسول، فرسرخ میانی.

^۱ <https://doi.org/10.22051/ijap.2025.48853.1435>

^۲ دانشیار، گروه فیزیک ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران. (نویسنده مسئول). Email: mo.jafari@alzahra.ac.ir

^۳ استادیار، گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی، نوشهر، ایران. Email: akbar_asadi@yahoo.com

^۴ دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه فیزیک ماده چگال، دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا، تهران، ایران. Email: smkarimi9701@gmail.com



۱. مقدمه

برهمکنش نور- ماده و کنترل نور در مقیاس‌های نانومتری یکی از پیشرفت‌های کلیدی در نانو فوتونیک است که امروزه مطالعات گسترده‌ای را در این حوزه به خود اختصاص داده است. از اعمال نور در شرایط ویژه بر مرز بین فلز- دی‌الکتریک نوسانات دسته‌جمعی الکترون‌های آزاد ایجاد می‌شود که این نوسانات را پلاسمون‌های سطحی می‌نامند. همچنین برهمکنش قوی آن‌ها با نور به تولید پلاریتون‌ها منجر می‌شود [۱-۴].

پلاسمون پلاریتون‌های سطحی (SPPs) مدهای الکترومغناطیسی هستند که در مرزهای بین فلز- دی‌الکتریک منتشر می‌شوند. به صورتی که تحریکات جمعی سطحی الکترون‌های آزاد در فلز با میدان‌های الکترومغناطیسی محوشونده در دی‌الکتریک ترکیب می‌شوند. مدهای مختلف SPPs می‌توانند در سطوح مسطح و منحنی، تک و چندگانه پشتیبانی شوند و ویژگی‌های برجسته‌ای مانند تمرکز میدان‌های الکترومغناطیسی در مقیاس نانو، فراتر از حد پراش، را ارائه دهند. این ویژگی‌ها همراه با نیاز روزافزون به کوچک‌سازی اجزا و مدارهای فوتونیک، توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است [۶-۸]. گرافن، یک لایه دو بعدی، به تازگی به عنوان ماده پلاسمونیک از ترائز تا ناحیه طیفی فروسرخ مورد استفاده قرار گرفته است. تحریک، انتشار و تنظیم‌پذیری پلاسمون‌های سطحی گرافن (GSPs) در بسامدهای فروسرخ میانی به صورت تجربی مشاهده شده است. در مقایسه با فلزات نجیب، پلاسمون‌های سطحی گرافن می‌توانند در مقیاس زیر طول موج در ناحیه طیفی فروسرخ میانی میدان الکترومغناطیسی مشاهده شوند. با توجه به این ویژگی‌ها، گرافن گزینه مناسبی برای استفاده در موجبر ناحیه فروسرخ میانی تا ترائز می‌باشد. مدهای پلاسمون‌های سطحی گرافن بر روی ورقه‌های گرافن، نانونوارهای گرافن، نانوسیم با پوشش گرافن و شیار/گوه گرافن مورد بررسی قرار گرفته‌اند [۱۶]. پلاسمون‌های سطحی گرافنی به دلیل مزایایی چون برهمکنش‌های قوی نور- ماده، محصور شدن میدان و ویژگی‌های نوری قابل تنظیم، به عنوان بهترین مواد برای موجبرها شناخته می‌شوند [۱۷ و ۱۸]. با پیشرفت سریع فناوری‌های ریزساخت و ابزارهای محاسباتی پیشرفته، علم نانوفوتونیک به منظور انتقال داده‌ها با سرعت بالا و تشخیص حسگرهای نوری به صورت گسترده مورد مطالعه قرار گرفته است. با بهره‌گیری از این ویژگی‌ها، گرافن به عنوان یک موجبر در مقیاس نانو در ناحیه فروسرخ عمل می‌کند. ترکیب گرافن و موجبرهای سیلیکونی روی عایق، امکان طراحی دستگاه‌های ادغام فوتونیک مبتنی بر گرافن از جمله موجبرها [۱۹]، حسگرها [۲۰]، فیلترها [۲۱]، مدولاتورها [۲۲ و ۲۳] و دیگر سامانه‌ها را فراهم می‌سازد.



به تازگی مطالعات بسیاری در رابطه با ویژگی‌های انتشاری موجبرهای پلاسمونیک مبتنی بر گرافن متقارن بر حسب ابعاد، بسامد فرودی و انرژی فرمی گرافن انجام شده است [۲۷-۳۰]. د. تنگ^۱ و همکاران، یک موجبر پلاسمونیک گرافن متقارن را برای دستیابی به بهترین هدایت طول موج طیف مادون قرمز میانی پیشنهاد دادند. آن‌ها در محدوده انرژی فرمی گرافن از ۰/۴ تا ۰/۶ الکترون ولت و بسامد ۳۰ تراهرتز، ضریب عملکرد بیش از ۴۰۰ و ناحیه مد بهنجار شده از مرتبه 10^{-5} را مشاهده کردند [۲۷]. به تازگی، یک نانو موجبر پلاسمونیک هیبرید بر پایه گرافن در مرجع [۲۸] پیشنهاد شده است که ساختار آن از دو استوانه متقارن دایروی با شعاع R و از جنس پتاسیم کلرید KCl که در اطراف یک زیر لایه مستطیل شکل از جنس گالیم آرسنید GaAs تشکیل شده است و سطح جانبی هر دو استوانه از تک لایه گرافن پوشیده شده است. همچنین استوانه‌ها و زیرلایه مستطیل شکل در یک محیط دی اکسید سیلیسم (SiO_2) قرار گرفته‌اند. نتایج آن‌ها نشان داد که طول انتشار بیش از ۴۶۰۰ نانومتر، ناحیه مد بهنجار شده از مرتبه 10^{-6} و ضریب عملکرد برای الگوی پیشنهاد شده نزدیک به ۵۰۰ است.

در این مقاله، یک نانو موجبر هیبرید پلاسمونیک متقارن بر پایه گرافن نانو استوانه بیضوی پیشنهاد شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در ناحیهی فروسرخ میانی، طول انتشار آن بیش از ۸۰۰۰ نانومتر و ناحیه مد بهنجار شده از مرتبه 10^{-6} است. ساختار موجبر از دو استوانه بیضوی متقارن پوشیده شده از تک لایه گرافن که در دو طرف آن، یک لایه با ضریب شکست بالا قرار دارد، طراحی شده است. کمیت‌های مهم پلاسمونی موجبر پیشنهادی، شامل ضریب شکست مؤثر، طول انتشار، ضریب عملکرد موجبر و ناحیه مد بهنجار شده بر حسب ابعاد موجبر، بسامد موج فرودی و انرژی فرمی گرافن با روش المان محدود^۲ و با استفاده از نرم‌افزار کامسول مولتی فیزیک^۳ در محدوده بسامدی ۲۰ تا ۴۰ تراهرتز، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که موجبر پیشنهادی نسبت به ساختارهای مشابه عملکرد بهتری دارد (مرجع [۲۸] را ببینید).

۲. ساختار موجبر و فرمول بندی ریاضی

شکل (۱) ساختار موجبر پلاسمونیک پیشنهادی را نشان می‌دهد که از دو نانو استوانه بیضوی متقارن پوشانده شده با گرافن و یک قطعه مستطیل شکل از جنس آلومینیوم اکسید Al_2O_3 تشکیل شده است. محور نیمه‌اصلی و محور نیمه‌فرعی نانوسیم بیضوی به ترتیب $a=30 \text{ nm}$ و b برابر با a و a برابر با a است.

¹ D. Teng

² Finite Element Method

³ COMSOL Multiphysics



و ۵a می‌باشند. طول مستطیل $W = 400 \text{ nm}$ و عرض آن برابر با $H = 20 \text{ nm}$ می‌باشد. همچنین g کمینه فاصله استوانه‌ها از زیرلایه مستطیل شکل اکسید آلومینیوم می‌باشد. ضریب نسبی دی‌الکتریک نانوسیم بیضوی از جنس MgF_2 با $\epsilon_1 = 1.7$ ، برای قطعه مستطیل از جنس Al_2O_3 با $\epsilon_2 = 8.9$ می‌باشد. استوانه‌ها و قطعه مستطیل شکل در محیط پتاسیم کلرید KCL با ضریب شکست $\epsilon_3 = 2.13$ قرار گرفته‌اند.

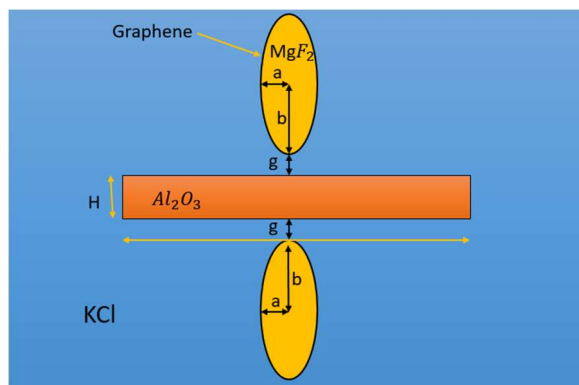


Fig. 1 Cross-section of a hybrid plasmonic waveguide based on two-dimensional elliptically symmetric graphene in a potassium chloride (KCL) medium with a constant and b variable.

شکل ۱ سطح مقطع موجبر پلاسمونیک هیبریدی بر پایه گرافن بیضوی متقارن دو بعدی در محیط پتاسیم کلرید KCL با a ثابت و b متغیر.

رسانایی سطحی گرافن $\sigma_g = \sigma_{\text{intra}} + \sigma_{\text{inter}}$ از فرمول کوبو^۱ یعنی رابطه (۱) بدست می‌آید که شامل گذارهای بین نواری و درون نواری می‌باشد [۷]،

$$\sigma_{\text{intra}}(\omega, \mu_c, \Gamma, T) = \frac{je^2}{\pi\hbar^2(\omega - j2\Gamma)} \int_0^\infty \left(\frac{\partial f_d(\xi, \mu_c, T)}{\partial \xi} - \frac{\partial f_d(-\xi, \mu_c, T)}{\partial \xi} \right) \xi d\xi \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{inter}}(-\xi, \mu_c, T) = \frac{-je^2(\omega - j2\Gamma)}{\pi\hbar^2} \int_0^\infty \left(\frac{f_d(-\xi, \mu_c, T) - f_d(\xi, \mu_c, T)}{(\omega - j2\Gamma)^2 - 4\left(\frac{\xi}{\hbar}\right)^2} \right) d\xi \quad (2)$$

f_d تابع توزیع فرمی-دیراک می‌باشد که در رابطه بالا به دو صورت نشان داده شده و به شکل زیر بیان می‌شود:

$$f_d(\xi, \mu_c, T) = \{\exp[(\xi - \mu_c)/k_B T + 1]\}^{-1} \quad (3)$$

¹ Kubo



که در آن، μ_c پتانسیل شیمیایی، E_F انرژی فرمی گرافن، ω بسامد زاویه‌ای، Γ نرخ پراکندگی و برابر با $\Gamma = 2/\tau$ است. زمان واهلش $\tau = 0.5$ s، دما $T = 300$ K، $e = 1.6 \times 10^{-19}$ بار الکترون، $\hbar = 6.63 \times 10^{-34}$ ثابت پلانک، ξ انرژی، $k_B = 6.022 \times 10^{23}$ ثابت بولتزمن است. بسامد $f = 30$ THz، انرژی فرمی گرافن $E_F = 0.5$ eV در نظر گرفته شده است. تابع دی-الکتریک گرافن را با $\epsilon_g = 1 + i\sigma_g\eta_0/k_0\Delta$ [۲۸-۳۱] که در آن η_0 امپدانس هوا، k_0 عدد موج در فضای آزاد و $\Delta = 1.5$ nm که ضخامت لایه گرافن است. ضریب شکست موثر (N_{eff}) در موجبر برابر است با [۷]:

$$N_{eff} = k/k_0 \quad (۴)$$

K ثابت انتشار است. ضریب عملکرد موجبر، یک معیار کلی برای ارزیابی کارایی و توانایی‌های موجبر در انتقال امواج که با رابطه $FOM = L_{spp}/(A_{eff}/\pi)^{1/2}$ بیان می‌شود و رابطه مستقیم با طول انتشار دارد [۷].

طول انتشار مدهای پلاسمونی (L_{spp}) یکی از مهم‌ترین کمیت‌ها در بهبود عملکرد موجبر می‌باشد. طول انتشار در موجبر به فاصله‌ای اشاره دارد که در آن امواج الکترومغناطیسی می‌توانند با کمینه تلفات و تغییرات در مشخصات خود (کیفیت) منتشر شوند. در طول انتشار، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی به صورت پیوسته حفظ می‌شوند و اتلاف انرژی به کمترین میزان ممکن کاهش می‌یابد. طول انتشار را با رابطه زیر بیان می‌شود [۲۸-۳۰]:

$$L_{spp} = \lambda_0/4\pi \text{Imag}(N_{eff}) \quad (۵)$$

λ_0 طول موج در فضای آزاد است. در نهایت، که A_N ناحیه مد بهنجار شده در موجبرها می‌باشد. افزایش ناحیه مد بهنجار شده در موجبر فرآیندی است که به تقویت و تثبیت انتقال امواج الکترومغناطیسی کمک می‌کند. این پدیده بیشتر به دلیل تغییرات در ابعاد موجبر و ویژگی‌های ماده داخلی آن رخ می‌دهد. هرچقدر ناحیه مد بهنجار شده بیشتر باشد، سرعت انتقال داده‌ها بیشتر بوده و اتلاف نیز کمتر خواهد بود. با استفاده از مواد ویژه و طراحی‌های پیشرفته، می‌توان ناحیه مد بهنجار شده را بهبود بخشید و کارایی موجبر را افزایش داد. در این پژوهش با افزایش محور فرعی بیضوی‌ها و همچنین تغییر مواد در ساختار نسبت به پژوهش‌های پیشین بهبود یافته است که با رابطه زیر تعریف می‌شود [۷-۲۸].

$$A_N = A_m/A_0 = \frac{1}{A_0} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} W(x,y) dx dy}{\max [W(x,y)]} \quad (۶)$$

$W(x, y)$ چگالی انرژی الکترومغناطیسی به صورت زیر نوشته می‌شود:



$$W(x, y) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} \left\{ \frac{d[\epsilon_0 \epsilon_r(x, y) \omega]}{d\omega} \right\} |E(x, y)|^2 + \frac{1}{2} \mu_0 |H(x, y)|^2 \quad (v)$$

A_m ناحیه مد موثر و A_0 ناحیه مد حد پراش در فضای آزاد و برابر با $A_0 = \lambda_0^2/4$ است. در رابطه بالا $E(x, y)$ و $H(x, y)$ هم به ترتیب میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌باشند و μ_0 نفوذپذیری مغناطیسی و ϵ_0 ثابت گذردهی الکتریکی در خلاء می‌باشند.

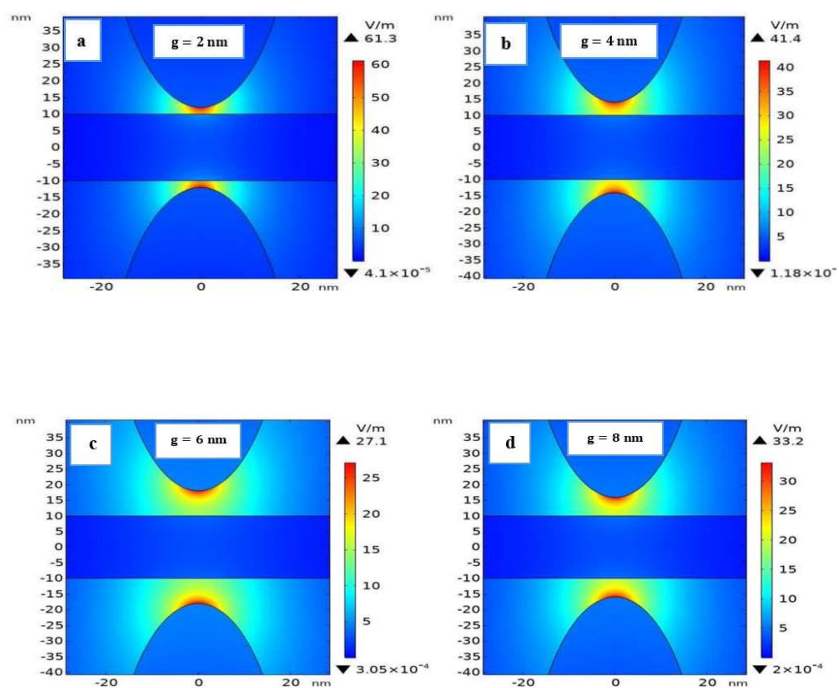


Fig. 2 Electric field distribution in terms of elliptical distances (a) $g=2\text{nm}$, (b) $g=4\text{nm}$, (c) $g=6\text{nm}$, And (d) $g=8\text{nm}$ to rectangular cube.

شکل ۲ توزیع میدان الکتریکی بر حسب فواصل بیضوی (الف) $g=2\text{nm}$ ، (ب) $g=4\text{nm}$ ، (ج) $g=6\text{nm}$ و (د) $g=8\text{nm}$ تا مکعب مستطیل.

۳. بحث و نتایج

شکل (۲) (الف تا د)، نمایش دو بعدی توزیع میدان الکتریکی را در فواصل مختلف از مکعب مستطیل را نشان می‌دهد. در اینجا انرژی فرمی و بسامد نور فرودی به موجبر به ترتیب با مقادیر EF 0.5 eV و $f = 30\text{ THz}$ در نظر گرفته شده است. مشاهده می‌شود که انرژی مدهای پلاسمونی



بیشتر بین نانوسیم و لایه Al_2O_3 متمرکز است. برای $g=2, 4, 6, 8$ nm، مقادیر چگالی انرژی به ترتیب شکل (الف تا د) ۶۱.۳، ۴۱.۴، ۳۳.۲، ۲۷.۱ ولت بر متر بدست آمده است. با افزایش g ، میدان محصور شده کاهش می‌یابد، به این معنا که اندازه میدان با فاصله g از محور، رابطه عکس دارد. این به دلیل کاهش جفت‌شدگی بین مدهای پلاسمونی گرافن و لایه محور است. برای افزایش محصور شدن میدان، شکاف (فاصله از قطعه مستطیل) باید در مقیاس طول موج عمیق باشد تا بتواند از تداخل بین سیگنال‌های نوری در مدارهای مجتمع فوتونیک جلوگیری کند.

نمودارهای رسم شده در شکل‌های (۳) تا (۶)، ابتدا در نرم افزار کامسول مولتی فیزیک در کمیت‌های مختلف از جمله؛ فاصله شکاف، عرض قطعه مستطیل شکل، بسامد و انرژی فرمی شبیه‌سازی شده، سپس با استفاده از نرم افزار متلب به صورت منسجم بازسازی شده‌اند.

در شکل (۳) (الف تا د)، تغییرات ضریب شکست مؤثر، طول انتشار، ضریب عملکرد و ناحیه مد بهنجار شده برای محور اصلی با $a=30$ نانومتر و محور فرعی با b برابر با a ، $3a$ و $5a$ ، بر حسب فاصله شکاف^۱ نمایش داده شده است. در شکل (۳-الف) مشاهده می‌شود که ضریب شکست مؤثر با افزایش فاصله شکاف (g) برای هر سه مقدار b به صورت خطی کاهش یافته است و هرچه ضریب شکست کمتر باشد، اتلاف نیز کمتر خواهد بود. در شکل (۳-ب)، وابستگی $LSpp$ به فاصله شکاف در مقادیر مختلف b نشان داده شده است. هر سه نمودار به صورت خطی با افزایش g افزایش یافته‌اند و مشخص است که افزایش b در بهبود طول انتشار مؤثر است. در شکل (۳-ج)، تغییرات ضریب عملکرد بر حسب فاصله شکاف نمایش داده شده است. برای نمودار $b=5a$ با افزایش g ، ضریب عملکرد افزایش بیشتری نسبت به مقادیر کمتر b داشته است به این معنی که افزایش فاصله g تا قطعه مستطیل شکل نشان‌دهنده کاهش محصور شدگی میدان و کاهش ضریب عملکرد موجبر می‌باشد و در موجبر بیضوی افزایش فاصله تاثیر زیادی بر عملکرد موجبر دارد. در نهایت، شکل (۳-د) نمودار تغییرات ناحیه مد بهنجار شده بر حسب فاصله شکاف را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش g برای $b=5a$ ، شیب افزایش AN نسبت به ضرایب دیگر b کمتر است که نشان‌دهنده محور شدگی قوی نور است.

^۱ Gap distance

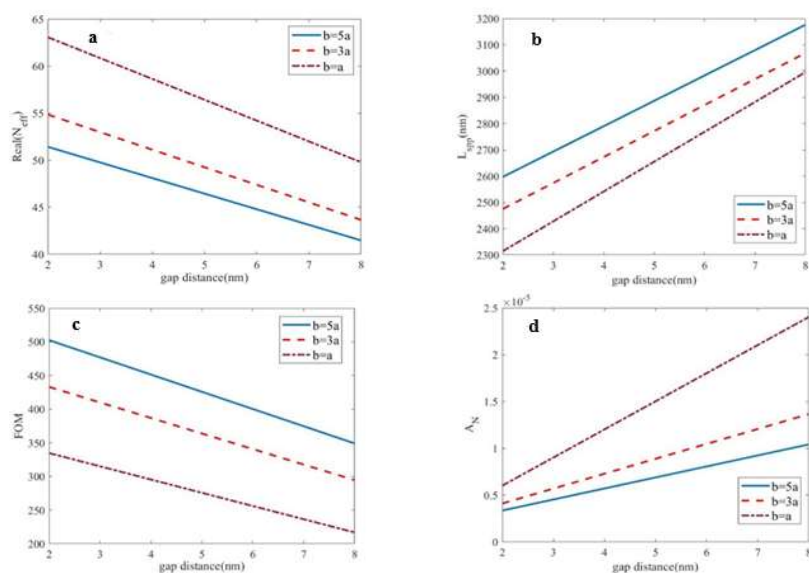


Fig. 3 Graph of changes in (a) the real part of the effective refractive index $Real(N_{eff})$, (b) the propagation length L_{sp} , (c) the performance factor FOM, and (d) the normalized mode area A_N as a function of g (slit distance) at $a=30\text{nm}$ and $b=a, 3a, 5a$.

شکل ۳ نمودار تغییرات (الف) بخش حقیقی ضریب شکست موثر $Real(N_{eff})$ ، (ب) طول انتشار L_{sp} ، (ج) ضریب عملکرد FOM و (د) ناحیه مد بهنجار شده A_N بر حسب g (فاصله شکاف) در $a=30\text{nm}$ و $b=a, 3a, 5a$.

در شکل (۴)، ویژگی‌های انتشاری مدهای پلاسمون بر حسب عرض قطعه مستطیل (H) با ضریب شکست بالا مورد بررسی قرار گرفته است. در شکل (۴-الف)، نمودار تغییرات ضریب شکست مؤثر بر حسب H نمایش داده شده است که با افزایش H ، هر سه نمودار کاهش یافته‌اند و در $b=a$ ، ضریب شکست مؤثر نسبت به دو مقدار دیگر b در کل نمودار بالاتر است یعنی اتلاف برای موجبر استوانه‌ای بیشتر است. در شکل (۴-ب)، تغییرات طول انتشار بر حسب H مشاهده می‌شود. هر سه مقدار b به صورت خطی با افزایش H ، افزایش یافته‌اند و در $b=5a$ ، شیب نمودار تندتر بوده و با افزایش H ، مقدار آن افزایش بیشتری داشته است. در شکل (۴-ج)، نمودار تغییرات ضریب عملکرد را نشان داده است که با افزایش H ، برای $b=5a$ نیز مقدار بیشتری را نشان می‌دهند. در شکل (۴-د)، تغییرات ناحیه مد بهنجار شده بر حسب H نشان داده شده است. با افزایش H ، هر سه نمودار به صورت خطی افزایش یافته‌اند و در اینجا نیز $b=a$ بیشترین مقدار را دارد.



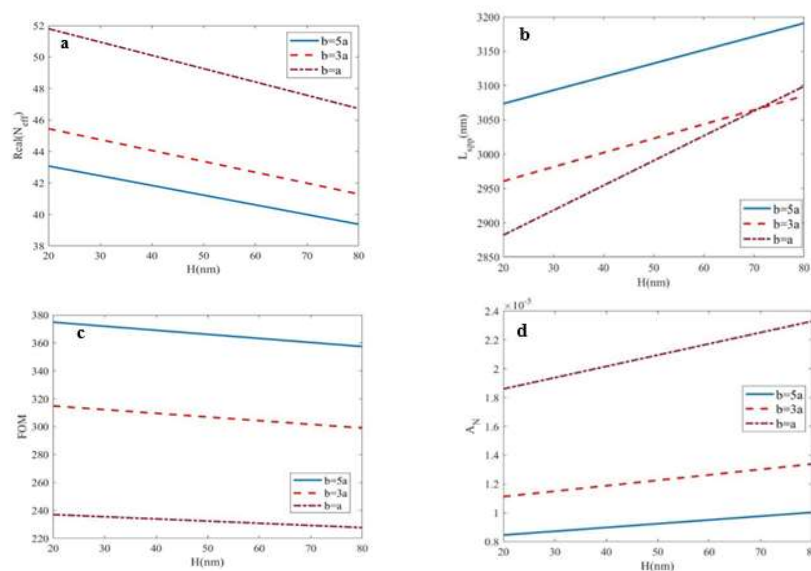


Fig. 4 Graph of changes in (a) the real part of the effective refractive index $Real(N_{eff})$, (b) the propagation length L_{spp} , (c) the performance coefficient FOM, and (d) the normalized mode area A_N as a function of H (width of the rectangular section) at $a = 30$ nm and $b = a, 3a, 5a$

شکل ۴ نمودار تغییرات (الف) بخش حقیقی ضریب شکست مؤثر $Real(N_{eff})$ ، (ب) طول انتشار L_{spp} ، (ج) ضریب عملکرد FOM و (د) ناحیه مد بهنجار شده A_N بر حسب H (عرض قطعه مستطیل) در $a=30$ nm و $b=a, 3a, 5a$.

در شکل (۵) (الف تا د)، نمودار تغییرات بخش حقیقی ضریب شکست مؤثر $Real(N_{eff})$ ، طول انتشار L_{spp} ، ضریب عملکرد (FOM) و ناحیه مد بهنجار شده (A_N) بر حسب فرکانس موج ورودی نمایش داده شده است. در قسمت (الف)، مشاهده می‌شود که ضریب شکست مؤثر با افزایش فرکانس برای $b=a$ نسبت به مقادیر دیگر b افزایش بیشتری داشته است که نتیجه اتلاف بیشتر است. شکل (۵) (ب) نمودار تغییرات طول انتشار را نشان می‌دهد که با افزایش فرکانس، هر سه نمودار کاهش یافته‌اند و این نشان می‌دهد که هرچه مقدار b بیشتر باشد، طول انتشار نیز بزرگتر است. در قسمت (ج) شکل (۵)، نمودارهای ضریب عملکرد نمایش داده شده‌اند که با افزایش فرکانس، هر سه مقدار b به صورت منحنی کاهش داشته و نشان می‌دهند که افزایش فرکانس، منجر به کاهش ضریب عملکرد موجبر می‌شود. در قسمت (د) شکل (۵)، تغییرات ناحیه مد بهنجار شده بر حسب فرکانس مشاهده می‌شود که با افزایش فرکانس افزایش یافته‌اند و می‌بینیم هرچقدر b

بزرگتر باشد، شیب نمودار ناحیه مد بهنجار شده نزولی بوده که برای بهبود کارایی موجبر مطلوب تر است.

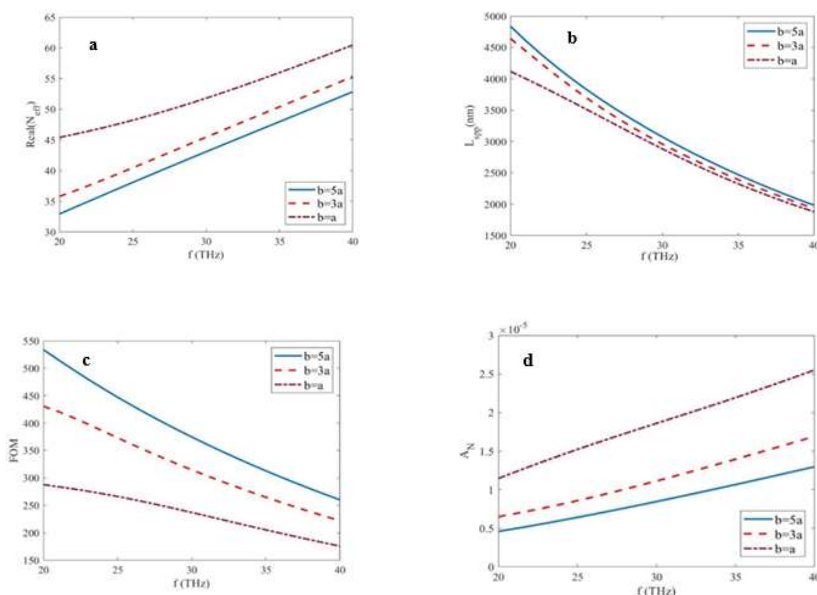


Fig. 5 Graph of changes in (a) real part of effective refractive index $Real(N_{eff})$, (b) propagation length L_{sp} , (c) performance factor FOM and (d) normalized mode area A_N as a function of f (frequency) at $a = 30 \text{ nm}$ and $b = a, 3a, 5a$.

شکل ۵ نمودار تغییرات (الف) بخش حقیقی ضریب شکست موثر $Real(N_{eff})$ ، (ب) طول انتشار L_{sp} ، (ج) ضریب عملکرد FOM و (د) ناحیه مد بهنجار شده A_N بر حسب f (بسامد) در $a=30\text{nm}$ و $b=a, 3a, 5a$.

در شکل (۶)، کمیت‌های $Real(N_{eff})$ ، L_{sp} ، FOM و A_N بر حسب انرژی فرمی بررسی شده‌اند. در قسمت (الف)، مشاهده می‌شود که با افزایش E_F ، ضریب شکست موثر کاهش می‌یابد. در قسمت (ب)، نمودار طول انتشار نشان می‌دهد که با افزایش E_F ، طول انتشار به صورت قابل توجهی افزایش یافته است و نشان‌دهنده آن است که هرچه مقدار b بیشتر باشد، طول انتشار نیز بزرگتر خواهد بود. در قسمت (ج)، نمودار FOM با افزایش انرژی فرمی، افزایش می‌یابد و برای $b=5a$ ، منحنی نمودار با افزایش انرژی فرمی، شیب تندتری داشته است و از دو مقدار دیگر پیشی می‌گیرد. در نهایت قسمت (د)، نمودار A_N نشان می‌دهد که با افزایش انرژی فرمی، مقدار A_N



افزایش می‌یابد و هرچه مقدار b بیشتر باشد، A_N کمتری خواهیم داشت که در بهبود عملکرد موجبر و محصور شدگی نور مؤثرتر خواهد بود.

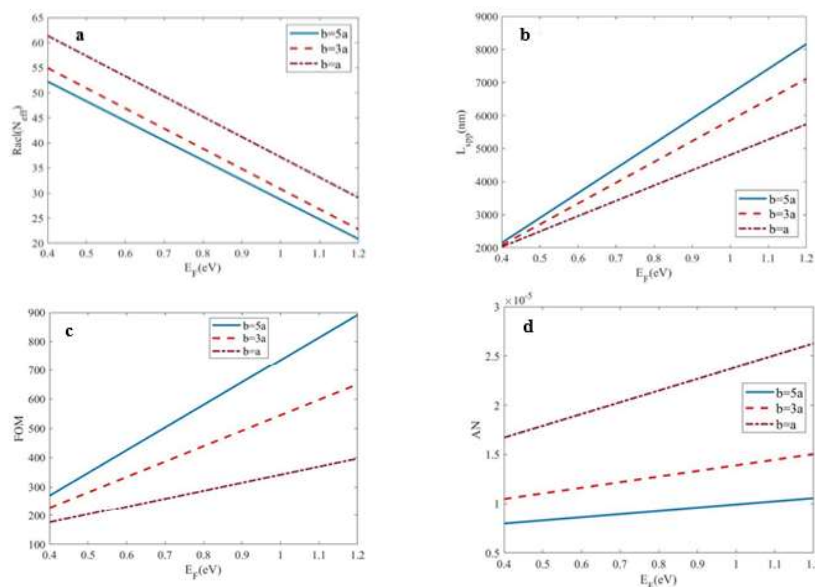


Fig. 6 Graph of changes in (a) the real part of the effective refractive index $Re(N_{eff})$, (b) the propagation length L_{sp} , (c) the performance coefficient FOM, and (d) the normalized mode area A_N in terms of E_F (Fermi energy) at $a = 30$ nm and $b = a, 3a, 5a$

شکل ۶ نمودار تغییرات (الف) بخش حقیقی ضریب شکست مؤثر $Re(N_{eff})$ ، (ب) طول انتشار L_{sp} ، (ج) ضریب عملکرد FOM و (د) ناحیه مد بهنجار شده A_N بر حسب E_F (انرژی فرمی) در $a=30$ nm و $b=a, 3a, 5a$.

در جدول زیر کمیت‌های طول انتشار و ناحیه مد بهنجار شده بر حسب بسامد و انرژی فرمی در مقاله‌ای با عنوان "طراحی نانوموجبر هیبرید پلاسمونیک متقارن بر پایه گرافن با محصور شدگی قوی و کارایی بالا در ناحیه طیف فروسرخ میانی" که توسط آقای اسدی و همکاران در سال ۱۴۰۰ منتشر شده است [۲۸]، با مقاله حاضر مقایسه می‌شوند.

جدول ۱ مقایسه بیشترین طول انتشار و کمترین ناحیه مد بهنجار شده بر حسب بسامد و انرژی فرمی در مقاله مشابه (موجبر دایروی) با پژوهش حاضر.

Table 1. Comparison of the maximum propagation length and minimum normalized mode area in terms of frequency and Fermi energy in a similar paper (circular waveguide) with the present study.

	Radius and major and minor axes	Frequency	The smallest area	Maximum propagation length
[28] Article	nm R=5	20THz	10^{-6}	nm 4600
Current research	nm, a=30 b=5a	20THz	10^{-6}	nm 4800
	Radius and major and minor axes	Fermi energy	The smallest area	Maximum propagation length
[28] Article	R=60-120 nm	0.4-1.6 eV	10^{-5}	nm 7000
Current research	nm, a=30 b=5a	0.4-1.2 eV	10^{-6}	nm 8000

مقایسه‌ها نشان می‌دهند که موجبر بیضوی پیشنهادی، در مقایسه با موجبر دایروی مشابه، دارای بیشترین طول انتشار و کمترین ناحیه مد بهنجار شده در بسامد و انرژی فرمی است. این نتایج نشان‌دهنده عملکرد بهتر و محصورشدگی قوی‌تر نور در موجبر بیضوی هستند. همچنین، بررسی نمودارهای مقالات یادشده نشان می‌دهد که افزایش محور فرعی برای بهبود کمیت‌های موجبر موثر است. پس دلیل بهبود کمیت‌های موجبر بیضوی، تغییر در ابعاد آن نسبت به موجبر دایروی مشابه است چرا که هرچه شکل به بیضوی نزدیک‌تر باشد نتایج بهتری خواهیم داشت. موجبر بیضوی در مقایسه با موجبر دایروی دارای طول انتشار بیشتر بوده که بلند بودن طول انتشار نه تنها کاهش اتلاف کمتری دارد بلکه سرعت انتقال داده نیز بیشتر خواهد بود. همچنین این موجبرها ناحیه مد بهنجار شده کوتاه‌تری نسبت به موجبرهای دایروی مشابه دارند که محور شدگی نور قوی و همچنین اتلاف پایین‌تری نیز دارند.

سرانجام، بر اساس نتایج شبیه‌سازی، مشاهده شد که با افزایش ضریب b ، طول انتشار موجبر افزایش یافته است و ناحیه مد بهنجار شده کوچک‌تر می‌شود. نمودار E_F نشان‌دهنده بیشترین طول انتشار است که در مقایسه با موجبرهای دایروی عملکرد بهتری دارد. نمودارهای N_T نیز حاکی از این هستند که با کاهش ضریب b ، ضریب شکست مؤثر افزایش می‌یابد. در نهایت بررسی نمودار



FOM برای مقادیر g ، H و f نشان می‌دهد که در ضریب‌های بزرگ‌تر b ، مقدار FOM بیشتر از حالت $b = a$ است که این امر نشان‌دهنده نقش مؤثر تغییر ابعاد در جهت بیضی در ساختار موجبر پیشنهادی می‌باشد.

۴. نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی نشان داد که در ناحیه مادون قرمز میانی، طول انتشار از ۸۰۰۰ نانومتر فراتر می‌رود و مساحت مد نرمال‌شده در حدود 10^{-6} است. ساختار موجبر شامل دو استوانه بیضوی متقارن است که با یک گرافن تک لایه پوشیده شده‌اند و یک لایه با ضریب شکست بالا در هر دو طرف آن قرار دارد. کمیت‌های پلاسمونیک کلیدی موجبر پیشنهادی، شامل ضریب شکست مؤثر، طول انتشار، ضریب عملکرد موجبر و مساحت مد نرمال‌شده، بر اساس ابعاد موجبر، بسامد موج فرودی و انرژی فرمی گرافن با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار COMSOL Multiphysics در محدوده بسامدی ۲۰ تا ۴۰ تراهرتز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند. نتایج نشان می‌دهد که موجبر پیشنهادی از ساختارهای مشابه عملکرد بهتری دارد.

منابع

- [1] Oulton, R.F., Sorger, V.J., Genov, D.A., Pile, D.F.P. and Zhang, X., "A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement and long-range propagation", *nature photonics* 2(8), 496-500, 2008. <https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2008.131>
- [2] Cheben, P., Halir, R., Schmid, J. H., Atwater, H. A., and Smith, D. R., "Subwavelength integrated photonics", *Nature* 560, 565-572, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICTON59386.2023.10207450>
- [3] Shahmansouri, M., and Mahmodi Moghadam, M., "Quantum electrostatic surface waves in a hybrid plasma waveguide: Effect of nano-sized slab", *Physics of Plasmas* 24, 102107, 2017. <http://dx.doi.org/10.1063/1.4986333>
- [4] Mahmodi Moghadam, M., Shahmansouri, M., "Theoretical study of surface waves in a magnetized conductor-gap-dielectric nano-structure", *Physica Scripta* 95(8), 085606, 2020. <https://doi.org/10.1088/1402-4896/ab9ed5>
- [5] Yang, L., Li P., and Li, Z., "Plasmonic polarization beam splitting based on single silver nanowire", *Opt. Express* 27, 3851-3860, 2019. <https://doi.org/10.1364/OE.27.003851>
- [6] Huang, C. C., Chang, R. J., and Cheng, C. W., "Ultra-Low-Loss Mid-Infrared Plasmonic Waveguides Based on Multilayer Graphene Metamaterials", *Nanomaterials* 11, 2981, 2021. <https://doi.org/10.3390/nano11112981>
- [7] Ye, L., Sui, K., Liu, Y., Zhang, M., and Liu, Q., "Graphene-based hybrid plasmonic waveguide for highly efficient broadband mid-infrared propagation and modulation", *Optics Express* 26(12), 15935-15947, 2018. <https://doi.org/10.1364/OE.26.015935>



- [8] Zhang, L., Pan, C., Zeng, D., Yang, Y., Yang, Y., and Junxian, M., "A hybrid-plasmonic-waveguide-based polarization-independent directional coupler", *IEEE Access* 8, 134268–134275, 2020. <https://doi.org/10.3390/nano11051281>
- [9] Xu, Y., Li, F., Kang, Z., Huang, D., Zhang, X., Tam, H.Y., and Wai, P. K. A., "Hybrid graphene-silicon based polarization-insensitive electro-absorption modulator with high-modulation efficiency and ultra-broad bandwidth", *Nanomaterials* 9, 157, 2019. <https://doi.org/10.3390/nano9020157>
- [10] Tuniz, A., Bickerton, O., Diaz, F. J., Kasebier, T., Kley, E. B., Kroker, S., Palomba, S., de Sterke, C. M., "Modular nonlinear hybrid plasmonic circuit", *Nat. Commun.* 11, 2413, 2020. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2024-0137>
- [11] Jafari, M. R., Asadi, A., and Shahmansouri, M., "Ultra-deep Subwavelength Confinement Palladium-Based Elliptical Cylinder Plasmonic Waveguide in the Near-Infrared Range", *Plasmonics* 18, 1037-1045, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11468-023-01830-z>
- [12] Geim, A. K., "Graphene: status and prospects", *Science* 324(5934), 1530–1534, 2009. <https://doi.org/10.1126/science.1158877>
- [13] Grigorenko, A. N., Polini, M., and Novoselov, K. S., "Graphene plasmonics", *Nat. Photonics* 6(11), 749–758, 2012. <https://doi.org/10.1038/NPHOTON.2012.262>
- [14] Rodrigo, D., Limaj, O., Janner, D., Etezadi, D., García de Abajo, F. J., Pruneri, V., and Altug, H., "Mid-infrared plasmonic biosensing with graphene", *Science* 349(6244), 165–168, 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1506.06800>
- [15] Xu, W., Zhu, Z.H., Liu, K., Zhang, J.F., Yuan, X.D., Lu, Q.S., Qin, S.Q., "Dielectric loaded graphene plasmon waveguide", *Opt. Express* 23, 5147–5153, 2015. <https://doi.org/10.1364/OE.23.005147>
- [16] Yang, Y., Lin, H., Zhang, B.Y., Zhang, Y., Zheng, X., Yu, A., Hong, M., Jia, B., "Graphene-based multilayered metamaterials with phototunable architecture for on-chip photonic devices", *Acs Photonics* 6(4), 1033-1040, 2019. <https://doi.org/10.1021/acsp Photonics.9b00060>
- [17] Asadi, A., Jafari, M. R., and Shahmansouri, M., "Simulation optimized design of graphene-based hybrid plasmonic waveguide", *Indian J Phys.*, 97, 2515-2522, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12648-023-02601-6>
- [18] Asadi, A., Jafari, M. R., and Shahmansouri, M., "Characteristics of a Symmetric Mid-infrared Graphene Dielectric Hybrid Plasmonic Waveguide with Ultra-deep Subwavelength Confinement", *Plasmonics* 17, 1819-1829, 2022. <https://doi.org/10.22051/jitl.2023.42299.1077>
- [19] Yan, H., Low, T., Zhu, W., Wu, Y., Freitag, M., Li, X., Guinea, F., Avouris, P., Xia, F., "Damping pathways of mid-infrared plasmons in graphene nanostructures", *Nature Photonics* 7, 394-399, 2013. <http://dx.doi.org/10.1038/nphoton.2013.57>
- [20] Strait, J. H., Nene, P., Chan, W.M., Manolatu, C., Tiwari, S., Rana, F., Kevek, J.W., McEuen, P.L., "Confined plasmons in graphene microstructures: Experiments and theory", *Physical Review B* 87, 241410, 2013. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.87.241410>
- [21] Gao, Y., Ren, G., Zhu, B., Liu, H., Lian, Jian, Y., S., "Analytical model for plasmon modes in graphene-coated nanowire", *Optics Express* 22, 24322-24331, 2014. <https://doi.org/10.1364/OE.22.024322>
- [22] Jabbarzadeh, F., and Habibzadeh-Sharif, A., "High performance dielectric loaded graphene plasmonic waveguide for refractive index sensing", *Opt. Commun.* 479, 126419, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2020.126419>
- [23] Zhu, J., Jiang, F., and Yunbai, Q., "Sense of surface plasmon polarization waveguide of graphene", *Plasmonics* 14, 1903–1910, 2019. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11468-019-00984-z>



- [24] Jafari, M. R., Asadi, A., and Shahmansouri, M., "Design of Graphene Hybrid Dielectric Plasmonic Nano-waveguide with Ultralow Propagation Loss", *Journal of Electronic Materials* 52, 6483–6491, 2023. <https://doi.org/10.1007/s11664-023-10640-2>
- [25] Wang, J., Xing, Z., Chen, X., Cheng, Z. Z., Li, X. J., Liu, T., "Recent progress in waveguide-integrated graphene photonic devices for sensing and communication applications", *Front. Phys.* 8, 37, 2020. <https://doi.org/10.3390/nano11051281>
- [26] Liao, B., Guo, X., Hu, H., Liu, N., Chen, K., Yang, X., Dai, Q., "Ultra-compact graphene plasmonic filter integrated in a waveguide", *Chin. Phys. B* 27, 094101, 2018. <https://doi.org/10.3390/nano11051281>
- [27] Teng, D., Cao, Q., Wang, K., "An extension of the generalized nonlocal theory for the mode analysis of plasmonic waveguides at telecommunication frequency", *Journal of Optics* 19, 055003, 2017. <https://doi.org/10.3390/nano11010210>
- [28] Asadi, A., Jafari, M. R., and Shahmansouri, M., "Design of symmetric hybrid nanowaveguide based on graphene with strong confinement and high efficiency in the mid-infrared spectrum region", *Marine Electrical Engineering* 1, Winter 1400. <https://doi.org/10.22034/meej.2022.533797.1019>
- [29] Jafari, M. R., and Asadi, A., "Modeling a high-performance broadband mid-infrared modulator using graphene-based hybrid plasmonic waveguide", *Journal of interfaces thin films and low dimensional systems* 5, 505-515, 2022. <https://doi.org/10.22051/jitl.2023.42299.1077>
- [30] Teng, D., Wang, Y., Xu, T., Wang, H., Shao, Q., and Tang, Y., "Symmetric Graphene Dielectric Nano waveguides as Ultra-Compact Photonic Structures", *Nanomaterials* 11(5), 1281, 2021. <https://doi.org/10.3390/nano11051281>
- [31] He, X., Ning, T., Lu, S., Zheng, J., Li, J., Li, R., Pei, L., "Ultralow loss graphene-based hybrid plasmonic waveguide with deep-subwavelength confinement", *Optic Express* 26(8), 2018. <https://doi.org/10.1364/OE.26.010109>



This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).