



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و  
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس  
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،  
دانشگاه شیراز،  
شیراز، ایران.  
۱۳۹۷ بهمن ۹-۱۱



## پیاده‌سازی هم‌زمان گیت‌های منطقی XOR و XNOR سه ورودی با استفاده از موجبرهای پلاسمونی مبتنی بر گرافن

میر حمید رضایی و عباس ظریفکار

دانشگاه شیراز، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، بخش مخابرات و الکترونیک

چکیده - در این مقاله، یک ساختار پلاسمونی مبتنی بر گرافن برای پیاده‌سازی هم‌زمان گیت‌های منطقی XOR و XNOR سه ورودی ارائه شده است. در این ساختار، پلاسمون پلاریتون‌های سطحی (SPPs) در مرز لایه‌های گرافن و دی‌الکتریک، تحریک شده و انتشار آنها توسط منبع ولتاژ خارجی کنترل می‌شود. در گیت‌های پیشنهادی، سیگنال‌های ورودی از نوع الکتریکی بوده و سیگنال خروجی، نوری می‌باشد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که نسبت تمایز (ER) برابر ۱۰/۳۳ دسی‌بل برای گیت‌های طراحی شده قابل حصول است. همچنین ابعاد ساختار پیشنهادی بسیار فشرده بوده و کمتر از ۱/۵ میکرومترمربع است. مطالعات صورت گرفته نشان می‌دهد که تاکنون ساختاری برای انجام هم‌زمان عملیات منطقی XOR و XNOR سه ورودی گزارش نشده است.

کلیدواژه- تراهرتز، گرافن، گیت منطقی سه ورودی، موجبرهای پلاسمونی، نسبت تمایز

## Simultaneous Implementation of Three-Input XOR and XNOR Logic Gates by Using Graphene-Based Plasmonic Waveguides

Mir Hamid Rezaei and Abbas Zarifkar

Department of Communications and Electronics, School of Electrical and Computer Engineering, Shiraz University

**Abstract-** In this paper, a graphene-based plasmonic structure is proposed for simultaneous implementation of three-input logical XOR and XNOR operations. In this structure, the surface plasmon polaritons (SPPs) are stimulated at the interface of graphene and dielectric layers and their transmission are controlled by an external voltage source. In the presented logic gates, the input signals are electrical and the output signal is optical. Simulation results demonstrate that the extinction ratio (ER) of 10.33 dB is achievable for the designed gates. Also, the footprint of the proposed structure is less than  $1.5 \mu\text{m}^2$ . Our studies have shown that a structure for simultaneous three-input logical XOR and XNOR operations has not been reported so far.

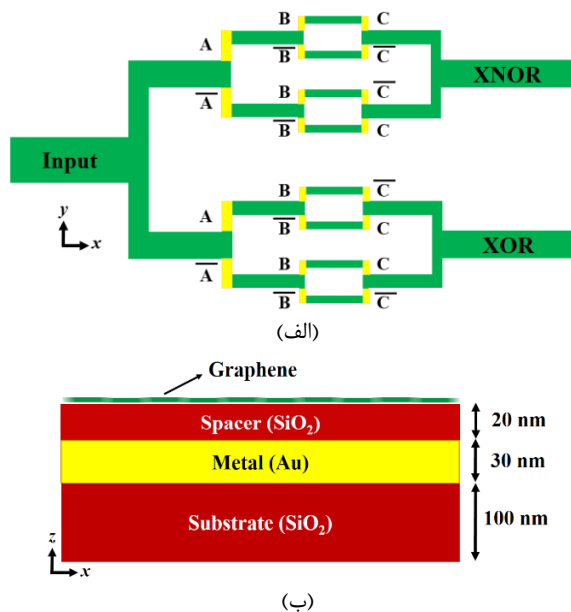
Keywords: Extinction Ratio, Graphene, Three-Input Logic Gate, Plasmonic Waveguides, THz

## ۱ - مقدمه

(XGM) [۱۱] اشاره نمود. هر سه ساختار فوق، دارای ابعاد بسیار بزرگی هستند. علاوه بر این، ساختارهای مبتنی بر PPLN نسبت به دما و قطبش حساس بوده و امکان تغییر قطبش به دلیل انعکاس در مسیر انتشار وجود دارد [۱۲]. گیت‌های منطقی مبتنی بر تقویت‌کننده‌های نوری نیمه‌هادی (SOA) نیز برای رسیدن به اثرات غیرخطی به پمپ‌هایی با توان بالا نیاز دارند؛ در نتیجه این نوع از گیت‌های منطقی نیز توان مصرفی بالایی دارند [۱۳]. در این مقاله، یک ساختار بسیار فشرده مبتنی بر موجبرهای گرافن-پلاسمونی برای پیاده‌سازی هم‌زمان گیت‌های XOR و XNOR سه ورودی ارائه شده است.

## ۲ - معرفی ساختار

طرحواره‌ی ساختار پیشنهادی برای گیت‌های منطقی XOR و XNOR در شکل ۱ مشاهده می‌شود.



شکل ۱: (الف) موجبرهای گرافنی در صفحه‌ی  $x-y$  (نمای بالا) و الکتروادهای فلزی برای اعمال سیگنال‌های ورودی و (ب) ترتیب چینش لایه‌های گرافن/دی‌الکتریک/فلز/زیرلایه.

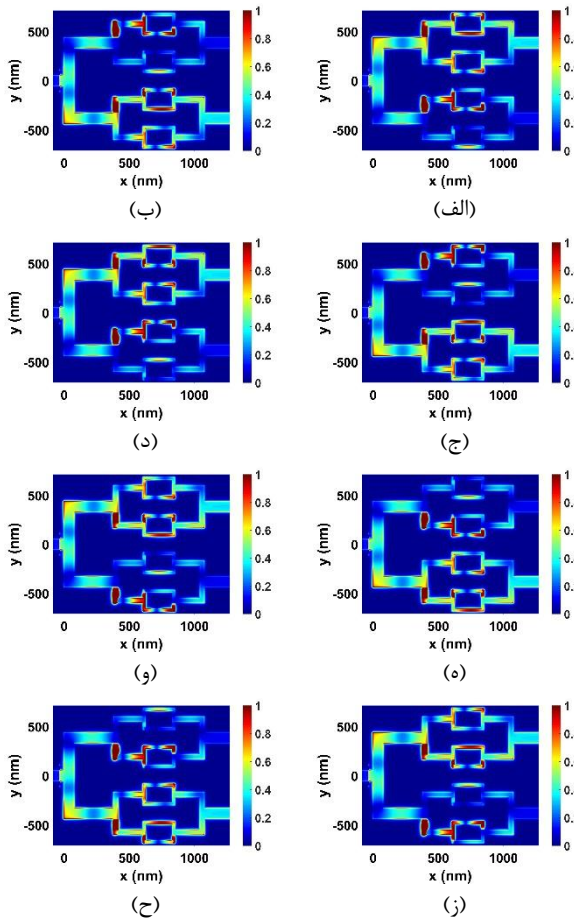
در این ساختار، موجبرهای گرافن بر روی یک لایه‌ی دی‌الکتریک ( $\text{SiO}_2$ ) به ضخامت ۲۰ نانومتر قرار گرفته‌اند. همچنین یک لایه‌ی فلزی (Au) به ضخامت ۳۰ نانومتر بین دی‌الکتریک و زیرلایه به ضخامت ۱۰۰ نانومتر قرار

افزایش سرعت در انجام محاسبات، انتقال اطلاعات و همچنین مجتمع‌سازی مدارات از ضروریات دنیای پیش روست [۱]. لذا با توجه به محدودیت‌های ذاتی حوزه‌ی الکترونیک و سرعت بالای انتشار نور، محققین به استفاده از مدارات مجتمع نوری (PIC) روی آورده‌اند [۲]. با توجه به محدودیت انکسار نور، مجتمع‌سازی ادوات نوری با چالش‌هایی روبرو است که استفاده از ساختارهای پلاسمونی می‌تواند این مشکلات را حل کند [۳]. برای تحریک پلاسمون پلاریتون‌های سطحی (SPPs) می‌توان از فلزات نجیب برای محدوده‌ی فرکانسی نور مرئی و مادون قرمز نزدیک استفاده کرد. با این حال، این مواد به دلیل تلفات بالا، برای فرکانس‌های مادون قرمز دور و تراهرتز مناسب نیستند. گرافن با ساختار اتمی دوبعدی و ویژگی‌های الکتریکی و نوری منحصربفردی که دارد، می‌تواند به عنوان یک ماده‌ی پلاسمونی در محدوده‌ی فرکانسی مادون قرمز دور و تراهرتز به کار گرفته شود [۴]. ادوات مختلفی با استفاده از موجبرهای پلاسمونی مبتنی بر گرافن طراحی شده‌اند که مدولاتور [۵]، سوئیچ [۶]، تزویج‌کننده [۷] و گیت منطقی [۸] از جمله این قطعات می‌باشند. در این میان، گیت‌های منطقی از اهمیت ویژه‌ی در پیاده‌سازی مدارات محاسباتی و منطقی برخوردار هستند. در حوزه‌ی فوتونیک، می‌توان از ساختارهایی که در آنها سیگنال‌های ورودی به صورت الکتریکی و سیگنال خروجی به صورت نوری است، در پیاده‌سازی گیت‌های منطقی با چندین ورودی استفاده کرد. در سال‌های اخیر ساختارهای مختلفی برای گیت‌های سه ورودی گزارش شده‌اند که از آن جمله می‌توان به گیت‌های AND و OR سه ورودی مبتنی بر بلورهای فوتونی (PhC) [۹]، گیت XOR مبتنی بر PPLN [۱۰] و گیت AND-NOR با استفاده از اثر غیرخطی مدولاسیون بهره‌ی متقابل

می‌باشند که ورودی‌های اصلی و مکمل متناظر  $A$  و  $\bar{A}$ ،  $B$  و  $\bar{B}$ ،  $C$  و  $\bar{C}$  توسط مدار معکوس‌کننده به ساختار اعمال می‌شوند. لذا، به هنگام روشن بودن ورودی اصلی، ورودی مکمل در حالت خاموش قرار دارد و بالعکس.

### ۳- نتایج شبیه‌سازی

شبیه‌سازی‌ها با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه‌ی زمان (FDTD) انجام شده‌اند. نمایه‌ی میدان الکتریکی به ازای هشت حالت مختلف سیگنال‌های ورودی در شکل ۲ نشان داده شده که نشانگر عملکرد گیت‌های XOR و XNOR است.



شکل ۲: نمایه‌ی میدان الکتریکی به ازای حالت‌های مختلف ورودی (الف)  $A=B=C=0$  (ب)  $A=1, B=C=0$  (ج)  $A=0, B=C=1$  (د)  $A=0, B=C=1$  (ه)  $A=1, B=C=0$  (و)  $A=C=1, B=0$  (ز)  $A=B=1, C=0$  (ح)  $A=B=C=1$

گرفته است. لایه‌ی فلز علاوه بر این که به عنوان الکترون عمل می‌کند، باعث افزایش حبس نور در لایه‌ی دی‌الکتریک بالایی نیز می‌شود. در این ساختار، موجبر خروجی عمل منطقی XNOR و موجبر خروجی پایینی، عمل منطقی XOR را انجام می‌دهند. رسانایی سطحی گرافن توسط رابطه‌ی Kubo بیان می‌شود [۴].

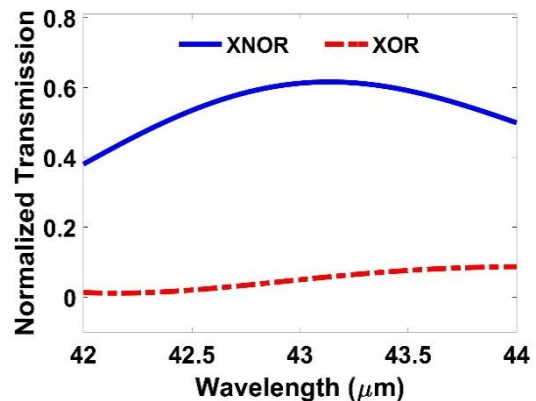
$$\sigma(\omega, \Gamma, \mu_c, T) = \frac{ie^2}{4\pi\hbar} \ln \frac{2|\mu_c| - (\omega + i2\Gamma)\hbar}{2|\mu_c| + (\omega + i2\Gamma)\hbar} + \frac{ie^2 k_B T}{\pi\hbar^2 (\omega + i2\Gamma)} \left[ \frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left( 1 + e^{-\frac{\mu_c}{k_B T}} \right) \right] \quad (1)$$

در این رابطه، پارامترهای  $\omega$ ،  $\Gamma$ ،  $\mu_c$  و  $T$  به ترتیب بیانگر فرکانس زاویه‌ای، نرخ پراکندگی، پتانسیل شیمیایی و دما هستند. همچنین  $e$  بار الکترون،  $\hbar$  ثابت کاهش‌یافته‌ی پلانک و  $k_B$  ثابت بولتزمن می‌باشند. پتانسیل شیمیایی گرافن به راحتی توسط افزودن ناخالصی یا اعمال ولتاژ خارجی تغییر می‌کند [۴]. در این ساختار، نور ورودی با فرکانس ۷ تراهرتز (طول موج ۴۲/۸۲ میکرومتر) باعث تحریک SPPs می‌شود. همچنین مقادیر دما و نرخ پراکندگی به ترتیب برابر ۳۰۰ درجه‌ی کلوین و ۰/۶۵۸۲ میلی‌الکترون‌ولت می‌باشند. با تغییر پتانسیل شیمیایی، رسانایی سطحی گرافن تغییر کرده و منجر به تغییر ضریب شکست مؤثر ساختار می‌شود. در نتیجه، می‌توان انتشار نور درون موجبر را کنترل نمود. در ساختار نشان داده شده در شکل ۱، سیگنال‌های ورودی از نوع الکتریکی هستند و پتانسیل شیمیایی قسمت‌های مختلف لایه‌ی گرافن را تغییر می‌دهند. به ازای پتانسیل شیمیایی گرافن برابر ۱ الکترون‌ولت، نور از موجبر عبور کرده و خروجی در حالت روشن قرار دارد. با تغییر پتانسیل شیمیایی به ۰/۱ الکترون‌ولت، نور اجازیه‌ی عبور نداشته و در نتیجه خروجی در حالت خاموش قرار می‌گیرد. سیگنال‌های  $A$ ،  $B$  و  $C$ ، ورودی‌های اصلی ساختار بوده و سیگنال‌های  $\bar{A}$ ،  $\bar{B}$  و  $\bar{C}$ ، ورودی‌های الکتریکی مکمل

## مراجع

- [1] T. Pan *et al.*, "Analysis of an electro-optic modulator based on a graphene-silicon hybrid 1D photonic crystal nanobeam cavity," *Optics express*, vol. 23, no. 18, pp. 23357-23364, 2015.
- [2] J. Chovan and F. Uherek, "Photonic Integrated Circuits for Communication Systems," *Radio Engineering*, vol. 27, no. 2, p. 357, 2018.
- [3] T. Birr, U. Zywietz, P. Chhantyal, B. N. Chichkov, and C. Reinhardt, "Ultrafast surface plasmon-polariton logic gates and half-adder," *Optics express*, vol. 23, no. 25, pp. 31755-31765, 2015.
- [4] M. H. Rezaei, A. Zarifkar, and M. Miri, "Ultra-compact electro-optical graphene-based plasmonic multi-logic gate with high extinction ratio," *Optical Materials*, vol. 84, pp. 572-578, 2018.
- [5] J. Gosciniaik and D. T. Tan, "Graphene-based waveguide integrated dielectric-loaded plasmonic electro-absorption modulators," *Nanotechnology*, vol. 24, no. 18, p. 185202, 2013.
- [6] R. Emadi, R. Safian, A. Z. Nezhad, and R. Emadi, "Analysis and design of graphene-based surface plasmon waveguide switch at long-wavelength infrared frequencies," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 23, no. 5, pp. 1-9, 2017.
- [7] Z. Qi *et al.*, "Electrically tuneable directional coupling and switching based on multimode interference effect in dielectric loaded graphene plasmon waveguides," *Journal of Optics*, vol. 18, no. 6, p. 065003, 2016.
- [8] K. J. Ooi, H. S. Chu, P. Bai, and L. K. Ang, "Electro-optical graphene plasmonic logic gates," *Optics letters*, vol. 39, no. 6, pp. 1629-1632, 2014.
- [9] F. Martins, J. Rodrigues, F. Neto, J. Nascimento, A. Coelho Jr, and W. Fraga, "Two and three-input all-optical logic gates on a planar three-core photonic crystal fiber," *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, vol. 154, pp. 516-523, 2018.
- [10] J. Wang, J. Sun, X. Zhang, D. Huang, and M. Fejer, "Ultrafast all-optical three-input Boolean XOR operation for differential phase-shift keying signals using periodically poled lithium niobate," *Optics letters*, vol. 33, no. 13, pp. 1419-1421, 2008.
- [11] A. Sharaiha, J. Topomondzo, and P. Morel, "All-optical logic AND-NOR gate with three inputs based on cross-gain modulation in a semiconductor optical amplifier," *Optics Communications*, vol. 265, no. 1, pp. 322-325, 2006.
- [12] S. Kaur, R.-S. Kaler, and T.-S. Kamal, "All-Optical Binary Full Adder Using Logic Operations Based on the Nonlinear Properties of a Semiconductor Optical Amplifier," *Journal of the Optical Society of Korea*, vol. 19, no. 3, pp. 222-227, 2015.
- [13] P. P. Baveja, Y. Xiao, S. Arora, G. P. Agrawal, and D. N. Maywar, "All-optical semiconductor optical amplifier-based wavelength converters with sub-mW pumping," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 25, no. 1, pp. 78-80, 2013.

طیف عبور دو موجبر خروجی XOR و XNOR به ازای سیگنال‌های ورودی برابر  $A=B=C=0$  در شکل ۳ رسم شده است. ملاحظه می‌شود که در این حالت، به ازای طول موج  $42/82$  میکرومتر، طیف عبور گیت‌های XNOR و XOR به ترتیب برابر  $0/615$  و  $0/057$  می‌باشند.



شکل ۳: طیف عبور موجبرهای خروجی به ازای سیگنال‌های ورودی برابر  $A=B=C=0$

نسبت تمایز (ER) طبق رابطه‌ی (۲) تعریف می‌شود [۴].

$$ER_{(dB)} = 10 \log \left( \frac{P_1}{P_0} \right) \quad (2)$$

در این رابطه، پارامترهای  $P_0$  و  $P_1$  به ترتیب بیانگر توان خروجی در حالت روشن و خاموش گیت منطقی می‌باشند. با توجه به این رابطه، نسبت تمایز برای ساختار معرفی شده برابر  $10/33$  دسی‌بل است. ابعاد کل ساختار نیز برابر  $1/5$  میکرومتر مربع است که حاکی از اندازه‌ی بسیار فشرده‌ی ساختار است.

## ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک ساختار پلاسمونی مبتنی بر گرافن برای پیاده‌سازی هم‌زمان گیت‌های منطقی XOR و XNOR سه ورودی ارائه شد. ساختار معرفی شده دارای نسبت تمایز برابر  $10/33$  دسی‌بل بوده و به دلیل ابعاد بسیار کوچک، گزینه‌ی مناسبی برای استفاده در مدارات مجتمع نوری می‌باشد.