

## طراحی و شبیه سازی گیت های منطقی گرافن پلازمونیک مادون قرمز با زیرلایه

### نیتريد بور شش گوشه

رحيم برومندی، عباس ظریفکار و مهدی میری

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

چکیده - در این مقاله به طراحی و شبیه سازی گیت های گرافن پلازمونیک  $AND$  و  $OR$  با زیرلایه نیتريد بور شش گوشه پرداخته شده است. در این گیت ها پلازمون پلازیتون های سطحی به وسیله موج ورودی با فرکانس  $40THz$  با پلاریزاسیون  $TM$  در حالتی که پتانسیل شیمیایی نوارهای گرافنی در موجبر حدود  $0.3eV$  تنظیم شده است، تحریک شده اند. استفاده از نیتريد بور شش گوشه به جای دی اکسید سیلیکون به عنوان زیرلایه، تلفات کمتر پلازمون پلازیتون های سطحی را نتیجه می کند. نتایج شبیه سازی نشان می دهند که نسبت تمایز برای گیت های  $AND$  و  $OR$  با زیرلایه دی اکسید سیلیکون به ترتیب برابر  $28dB$  و  $25dB$  و تلفات الحاقی برابر  $14dB$  و  $21dB$  می باشد در حالی که نسبت تمایز گیت های  $AND$  و  $OR$  پیشنهادی با زیرلایه نیتريد بور شش گوشه به ترتیب برابر  $34dB$  و  $29dB$  و تلفات الحاقی برابر  $9.7dB$  و  $4.3dB$  است. نتایج بدست آمده حاکی از بهبود نسبت تمایز و تلفات الحاقی و در عین حال ابعاد کوچکتر برای گیت های منطقی مورد نظر است.

کلید واژه- گرافن، پلازمونیک، گیت های منطقی نوری، نیتريد بور شش گوشه

## Design and Simulation of Graphene-Based Plasmonic Infrared Logic Gates with Hexagonal Boron Nitride Substrate

Rahim Borumandi, Abbas Zarifkar and Mehdi Miri

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

Abstract- In this paper, design and simulation of  $AND$  and  $OR$  graphene plasmonic gates with hexagonal boron nitride substrate is presented. In these gates, surface plasmon polaritons are excited by a  $40THz$  incoming wave with  $TM$  polarization while the chemical potential of graphene strips is tuned about  $0.3eV$ . Utilizing of thin layers of hexagonal boron nitride instead of silicon dioxide as substrate allows less propagation loss of surface plasmon polaritons. Simulation results show that the extinction ratios for  $AND$  and  $OR$  gates with silicon dioxide substrate are  $28dB$  and  $25dB$  and the insertion losses are  $14dB$  and  $21dB$ , respectively, while the extinction ratios of the proposed  $AND$  and  $OR$  gates with hexagonal boron nitride substrate are  $34dB$  and  $29dB$  and the insertion losses are  $9.7dB$  and  $4.3dB$ , respectively. Our numerical results show considerable improvement in extinction ratio and insertion loss of the presented logic gates along with the advantage of smaller dimensions.

Keywords: Graphene, plasmonic, optical logic gates, hexagonal boron nitride

## ۱- مقدمه

پلازمونیک به عنوان روشی جهت کارکردن در ابعاد کسری از طول موج و غلبه بر محدودیت تفرق نور<sup>۱</sup> شناخته شده است. اساس ادوات پلازمونیک انتشار پلازمون پلاریتون های سطحی<sup>۲</sup> بین سطح دی الکتریک و فلز می باشد. مدهای سطحی ایجاد شده به وسیله فلزات نجیب مانند طلا و نقره در محدوده نور مرئی قرار دارند. برای ایجاد مدهای سطحی با فرکانس کمتر، فلزات نجیب دارای تلفات زیادی می باشند [1]-[2].

از طرفی با کارگیری گرافن که دارای ویژگی های بارزی از جمله تلفات کمتر، محبوس شدگی بیشتر پلازمون پلاریتون های سطحی گرافن<sup>۳</sup> و تنظیم پذیری می باشد، امکان ایجاد مدهای سطحی گرافنی با فرکانس کمتر و کیفیت مورد قبول فراهم می شود. تلفات کمتر در گرافن از سرعت بالای حامل ها در آن ناشی می شود. همچنین تنظیم پذیری مدهای سطحی گرافن ناشی از مقدار موهمی رسانایی گرافن است، که این مقدار موهمی به فرکانس کاری، زمان استراحت حامل و پتانسیل شیمیایی بستگی دارد [3]-[5]. اغلب ویژگی های مطلوب گرافن از جمله محبوس شدگی بیشتر مدهای سطحی گرافن در ادوات پلازمونیک در صورتی به دست می آیند که لایه گرافن تک لایه مورد استفاده در ادوات پلازمونیک، بسیار خالص باشد. درعین حال زیرلایه ی گرافن نقش مهمی در کیفیت ادوات پلازمونیک دارد. در سال های اخیر به جای استفاده از دی اکسید سیلیکون (SiO<sub>2</sub>) که دارای سطحی ناهموار است از عایقی جدید به نام نیتريد بور شش گوشه (h-BN)<sup>۴</sup>، به عنوان زیرلایه ی گرافن در ادوات گرافن پلازمونیک استفاده می شود. این عایق جدید همانند گرافن دارای ساختار دوبعدی است و از طرفی این عایق خواص نوری بهتری نسبت به دی اکسید سیلیکون دارد [6].

## ۲- تئوری کار

گرافن برحسب مقدار پتانسیل شیمیایی اش که از طریق بایاس الکتریکی یا آلایش<sup>۵</sup> تغییر می کند، بر طبق فرمول کوپو می تواند به عنوان عایق یا رسانا عمل کند [7]. برای انتشار مد TM، پتانسیل شیمیایی گرافن (u<sub>c</sub>) باید از مقدار آستانه  $\frac{\hbar w}{2}$  بیشتر باشد که در آن w فرکانس زاویه ای و  $\hbar$  ثابت پلانک کاهش یافته است [7].

در مرجع [8] گیت گرافن پلازمونیک با زیرلایه دی اکسید سیلیکون شبیه سازی شده است که فرکانسی کاری آن در ناحیه تراهرتز (6THz) می باشد. برخلاف زیر لایه های متداولی چون دی اکسید سیلیکون برای گرافن که از سطح ناهمواری برخوردار می باشد، نیتريد بور شش گوشه دارای سطحی صاف و هموار است. برخلاف مواد سه بعدی متداول همانند دی اکسید سیلیکون، نیتريد بور شش گوشه همانند گرافن ماده ای دوبعدی است. خصوصیت دوبعدی بودن نیتريد بور شش گوشه به همراه سطح صاف و هموار<sup>۶</sup> سبب کاهش نرخ پراکندگی حامل ها، افزایش تحرک حامل ها و خواص نوری بهتر در ادوات گرافنی می شود [9]. بنابراین، در این مقاله، گیت های گرافن پلازمونیک در فرکانس کاری مادون قرمز (40THz) با زیرلایه نیتريد بور شش گوشه طراحی و شبیه سازی شده و مشخصات آن با گیت های گرافن پلازمونیک با زیرلایه ی دی اکسید سیلیکون مقایسه می شود.

## ۳- طراحی و شبیه سازی

ساختار گیت AND پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل دیده می شود، گیت AND از یک نوار گرافنی مستطیل شکل که بر روی آن دو پنجره کنترلی با الکترودهایی از جنس طلا قرار داده شده، تشکیل شده است. عرض نوار گرافن و پنجره های کنترلی W=150nm، طول نوار گرافنی L<sub>1</sub>=1200nm، طول پنجره های کنترلی L<sub>2</sub>=250nm و ضخامت زیرلایه نیتريد بور شش گوشه 0.3nm است. با اعمال ولتاژ مناسب

<sup>۱</sup>Light diffraction

<sup>۲</sup>Surface plasmon polaritons

<sup>۳</sup>Graphene surface plasmon polaritons

<sup>۴</sup>Hexagonal Boron nitride

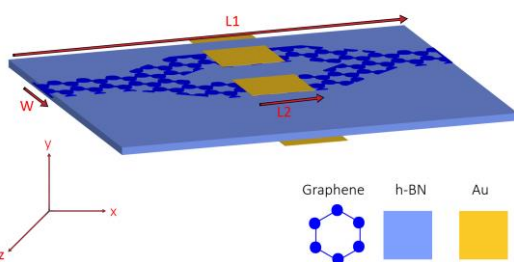
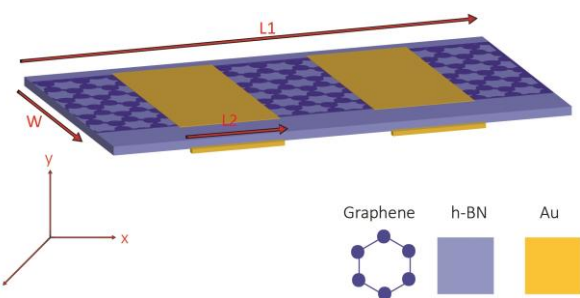
<sup>۵</sup>Dopping

<sup>۶</sup>Scattering rate

به الکترودها، پتانسیل شیمیایی گرافن برای حالت انتشار 0.35ev و برای حالت قطع 0.03ev تنظیم شده است.

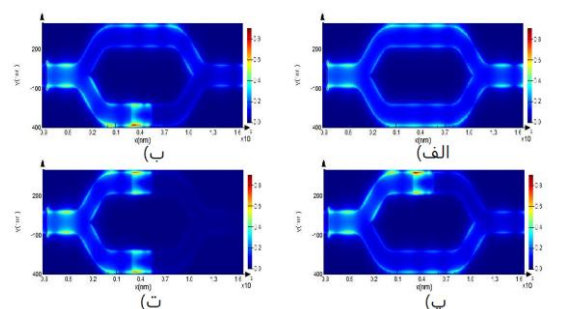
شکل ۱: گیت AND با زیرلایه نیتريد بور شش گوشه، با اعمال ولتاژ از طریق الکترودهای طلا و تغییر پتانسیل شیمیایی انتشار مدهای سطحی گرافن کنترل شده و گیت منطق AND حاصل شده است.

شبه سازی، با روش تفاضل محدود در حوزه ی زمان<sup>۷</sup> انجام شده است. پروفایل میدان الکتریکی در حالات منطقی مختلف برای گیت AND در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۳: گیت OR با زیرلایه نیتريد بور شش گوشه، پنجره های کنترلی در دو بازوی ماخ-زندر با تغییر پتانسیل شیمیایی نقش کنترل انتشار مدهای سطحی و پیاده سازی منطق OR را ایفا می کند.

نتایج شبه سازی برای پروفایل میدان در گیت OR پیشنهادی، در شکل ۴ آمده است.

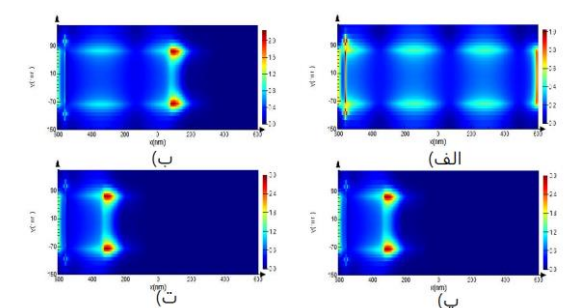


شکل ۴: پروفایل میدان الکتریکی در حالت های منطقی مختلف گیت OR (الف) پروفایل میدان گیت در حالت (1,1) (ب) پروفایل میدان گیت در حالت (1,0) (پ) پروفایل میدان گیت در حالت (0,1) (ت) پروفایل میدان گیت در حالت (0,0).

به منظور مقایسه مشخصات گیت های AND و OR طراحی شده برای دوحالتی که دی اکسید سیلیکون و نیتريد بور

شکل ۲: پروفایل میدان الکتریکی در حالت های منطقی مختلف گیت AND (الف) پروفایل میدان گیت در حالت (1,1) (ب) پروفایل میدان گیت در حالت (1,0) (پ) پروفایل میدان گیت در حالت (0,1) (ت) پروفایل میدان گیت در حالت (0,0).

ساختار گیت OR پیشنهادی در شکل ۳ دیده می شود. ساختار گیت OR در واقع مشابه یک تداخلگر ماخ-زندر می باشد که با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن از طریق پنجره های کنترلی قادر به کنترل انتشار مدهای سطحی خواهیم بود. در واقع اعمال بایاس الکتریکی به منزله ی منطق یک و عدم بایاس الکتریکی بیانگر منطق صفر می باشد. عرض نوار گرافنی و پنجره های کنترلی



شکل ۲: پروفایل میدان الکتریکی در حالت های منطقی مختلف گیت AND (الف) پروفایل میدان گیت در حالت (1,1) (ب) پروفایل میدان گیت در حالت (1,0) (پ) پروفایل میدان گیت در حالت (0,1) (ت) پروفایل میدان گیت در حالت (0,0).

ساختار گیت OR پیشنهادی در شکل ۳ دیده می شود. ساختار گیت OR در واقع مشابه یک تداخلگر ماخ-زندر می باشد که با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن از طریق پنجره های کنترلی قادر به کنترل انتشار مدهای سطحی خواهیم بود. در واقع اعمال بایاس الکتریکی به منزله ی منطق یک و عدم بایاس الکتریکی بیانگر منطق صفر می باشد. عرض نوار گرافنی و پنجره های کنترلی

<sup>۷</sup> Finite-Difference Time-Domain

#### ۴- جمع بندی

بنابراین، استفاده از نیتريد بور شش گوشه نه تنها تلفات کمتر و نسبت تمایز بهتری را رقم می‌زند بلکه به دلیل ابعاد کوچکتر، از نظر فشرده‌سازی ادوات پلازمونیک بسیار مناسبتر خواهد بود، تا جایی که می‌توان گیت‌های منطقی طراحی شده را در زمره گیت‌های گرافن پلازمونیک دوبعدی در نظر گرفت.

#### مراجع

- [1] J.-S. Gómez-Díaz and J. Perruisseau-Carrier, "Graphene based plasmonic switches at nearinfrared frequencies," *Optics express*, vol. 21, pp. 15490-15504, 2013.
- [2] C.-H. Hsieh, K.-P. Lin, and K.-C. Leou, "Design of a Compact High-Performance ElectroOptic Plasmonic Switch," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 27, pp. 2473-2476, 2015.
- [3] Q. Bao and K. P. Loh, "Graphene photonics, plasmonics, and broadband optoelectronic devices," *ACS nano*, vol. 6, pp. 3677-3694, 2012.
- [4] A. Farmani, M. Miri, and M. H. Sheikhi, "Tunable resonant Goos-Hänchen and Imbert-Fedorov shifts in total reflection of terahertz beams from graphene plasmonic metasurfaces," *JOSA B*, vol. 34, pp. 1097-1106, 2017.
- [5] K. Jamalpoor, A. Zarifkar, and M. Miri, "Application of graphene second-order nonlinearity in THz plasmons excitation," *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, 2017.
- [6] K. S. Novoselov, V. Fal, L. Colombo, P. Gellert, M. Schwab, and K. Kim, "A roadmap for graphene," *nature*, vol. 490, pp. 192-200, 2012.
- [7] D. A. Kuzmin, I. V. Bychkov, V. G. Shavrov, and L. N. Kotov, "Transverse-electric plasmonic modes of cylindrical graphene-based waveguide at near-infrared and visible frequencies," *Scientific Reports*, vol. 6, no. 1, 2016.
- [8] M. Yarahmadi, M. K. Moravvej-Farshi, and L. Yousefi, "Subwavelength graphene-based plasmonic THz switches and logic gates," *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*, vol. 5, pp. 725-731, 2015.
- [9] E. Kan, H. Ren, F. Wu, Z. Li, R. Lu, C. Xiao, et al., "Why the band gap of graphene is tunable on hexagonal boron nitride," *The Journal of Physical Chemistry C*, vol. 116, pp. 3142-3146, 2012.

شش گوشه به عنوان زیرلایه انتخاب شوند، نتایج شبیه سازی برای نسبت تمایز<sup>۸</sup> (نسبت توان خروجی گیت‌های منطقی در حالت ارزش منطقی یک به توان خروجی در حالت ارزش منطقی صفر برحسب واحد دسیبل<sup>۹</sup>)، تلفات الحاقی<sup>۱۰</sup> (کاهش توان سیگنال نوری ورودی کوپل شده در عبور از گیت‌های منطقی برحسب واحد دسیبل) و تلفات مد پایه (تلفات مدهای حل شده برحسب واحد دسیبل بر سانتی متر در نرم افزار لومریکال) در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: مقایسه بین گیت‌های منطقی با زیرلایه‌های مختلف

| تلفات مد پایه | تلفات الحاقی | نسبت تمایز | زیرلایه          | نوع گیت |
|---------------|--------------|------------|------------------|---------|
| 10534dB/cm    | 14dB         | 28dB       | SiO <sub>2</sub> | AND     |
| 14165dB/cm    | 21dB         | 25dB       | SiO <sub>2</sub> | OR      |
| 10204dB/cm    | 9.7dB        | 34dB       | h-BN             | AND     |
| 13960dB/cm    | 4.3dB        | 29dB       | h-BN             | OR      |

همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود، استفاده از نیتريد بور شش گوشه باعث کاهش تلفات الحاقی و بهبود قابل توجه نسبت تمایز شده است که دلیل آن را می‌توان خواص نوری بهتر نیتريد بور شش گوشه نسبت به دی-اکسید سیلیکون دانست. از سوی دیگر، برای حالتی که دی اکسید سیلیکون به عنوان زیرلایه انتخاب شده است، ضخامت زیرلایه را نمی‌توان کمتر از 200nm انتخاب کرد زیرا تلفات مدهای سطحی بسیار زیاد شده و طول انتشار آنها بسیار کاهش می‌یابد تا جایی که مد پلازمونیک در گیت‌ها منتشر نخواهد گشت. اما با انتخاب نیتريد بور شش گوشه به عنوان زیرلایه، با ضخامت 0.3nm، تلفات کمی برای مدهای سطحی حاصل می‌شود.

<sup>۸</sup>Extinction ratio

<sup>۹</sup>Decibel

<sup>۱۰</sup>Insertion loss