طراحی و شبیه سازی گیت‌های منطقی گرافن پلازمونیکی مادون قرمز با زیرلایه نیترید بور شش گوشه

رحیم برومندی، عبّـاس 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 گیت‌های گرافن پلازمونیکی *AND* و *OR* با زیرلایه نیترید بور شش گوشه پرداخته شده است. در این گیت‌ها پلازمون پلازیتون‌های 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 نیترید بور شش گوشه به جای دی اکسید سیلیکون به عنوان زیرلایه، تلفات کمتر پلازمون پلاریتون‌های سطحی را نتیجه می‌کند. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهند 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* می‌باشد در حالی که نسبت تمایز گیت های *AND* و*OR* پیشنهادی با زیرلایه نیترید 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 گیتهای منطقی مورد نظر است.

کلید واژه- گرافن، پلازمونیک، گیت‌های منطقی نوری، نیترید 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

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

۱- مقدمه

پلازمونیک به عنوان روشی جهت کارکردن در ابعاد کسری از طول موج و غلبه بر محدودیت تفرق نور[۱] شناخته شده است. اساس ادوات پلازمونیکی انتشار پلازمون پلاریتون های سطحی[۲] بین سطح دی‌الکتریک 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[2]-[1].

از طرفی با کارگیری گرافن که دارای ویژگی‌های بارزی از جمله تلفات کمتر، محبوس‌شدگی بیشتر پلازمون پلاریتون‌های سطحی گرافن[۳] 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 تنظیم‌پذیری مدهای سطحی‌گرافن ناشی از مقدار موهومی رسانایی گرافن است، که این مقدار موهومی به فرکانس کاری، زمان استراحت حامل و پتانسیل شیمیایی بستگی دارد[5]-[3]. اغلب ویژگی‌های مطلوب گرافن از جمله محبوس‌شدگی بیشتر مدهای سطحی گرافن در ادوات پلازمونیکی در صورتی به دست می آیند که لایه گرافن تک لایه مورد استفاده در ادوات پلازمونیکی، بسیار خالص باشد. درعین حال زیرلایه ی گرافن نقش مهمی در کیفیت ادوات پلازمونیکی دارد. در سال‌های اخیر به جای استفاده از دی اکسید سیلیکون(SiO_2) که دارای سطحی ناهموار است از عایقی جدید به نام نیترید بور شش گوشه (h-BN[۴]) ، به عنوان زیرلایه ی گرافن در ادوات گرافن پلازمونیکی استفاده می‌شود. 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 بایاس‌الکتریکی یا آلایش[۵] تغییر می کند، بر طبق فرمول کوبو می تواند به عنوان عایق یا رسانا عمل کند [7]. برای انتشار مد TM، پتانسیل شیمیایی گرافن(u_c) باید از مقدار آستانه $\frac{\bar{h}w}{2}$ بیشتر باشد که در آن w فرکانس زاویه‌ای و $\bar{h}$ ثابت پلانک کاهش یافته است [7].

در مرجع [8] گیت گرافن پلازمونیکی با زیرلایه دی اکسید سیلیکون شبیه سازی شده است که فرکانسی کاری آن در ناحیه تراهرتز (6THz) می باشد. برخلاف زیر لایه‌های متداولی چون دی‌اکسید سیلیکون برای گرافن که از سطح ناهمواری برخوردار می باشد، نیترید بور شش گوشه دارای سطحی صاف و هموار است. برخلاف مواد سه‌بعدی متداول همانند دی‌اکسید سیلیکون، نیترید بور شش گوشه همانند گرافن ماده‌ای دوبعدی است. خصوصیت دوبعدی بودن نیترید بور شش گوشه به همراه سطح صاف و هموار،[۶] سبب کاهش نرخ پراکندگی حامل‌ها، افزایش تحرک حامل‌ها و خواص نوری بهتر در ادوات گرافنی می‌شود[9]. بنابراین، در این مقاله، گیت‌های گرافن پلازمونیکی در فرکانس کاری مادون قرمز(40THz) با زیرلایه نیترید بور شش گوشه طراحی و شبیه سازی شده و مشخصات آن با گیت‌های گرافن پلازمونیکی با زیرلایه ی دی اکسید سیلیکون مقایسه می شود.

۳- طراحی و شبیه‌سازی

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 برروی آن دو پنجره‌کنترلی با الکترودهایی از جنس طلا قرار داده شده، تشکیل شده است. عرض نوار گرافن و پنجره‌های کنترلی W=150nm، طول نوار گرافنی L_1 =1200nm، طول پنجره‌های کنترلی L_2=250nm و ضخامت زیرلایه نیترید بور شش گوشه 0.3nm است. با اعمال ولتاژ مناسب

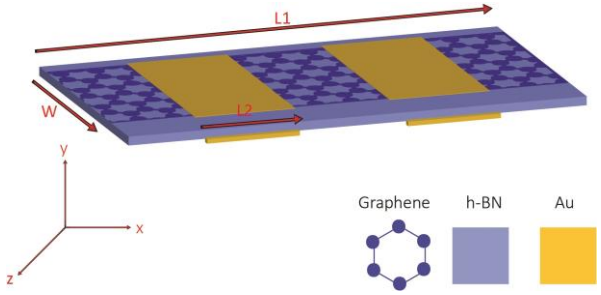
---

[۱] Light diffraction
[۲] Surface plasmon polaritons
[۳] Graphene surface plasmon polaritons
[۴] Hexagonal Boron nitride
[۵] Dopping
[۶] Scattering rate

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

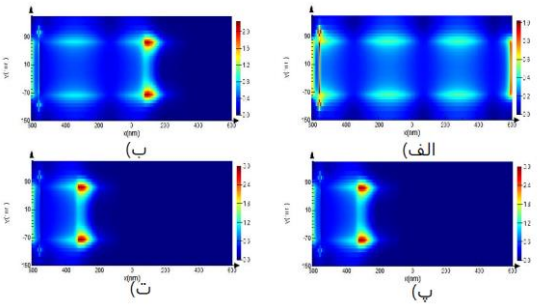
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

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



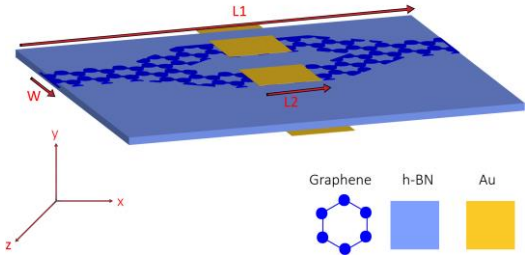
شکل۱: گیت AND با زیرلایه نیترید بور شش گوشه، با اعمال ولتاژ از طریق الکترودهای طلا و تغییر پتانسیل شیمیایی انتشار مدهای سطحی گرافن کنترل شده و گیت منطق AND حاصل شده است.

شبیه سازی، با روش تفاضل محدود در حوزه ی زمان[۷] انجام شده است. پروفایل میدان الکتریکی در حالات منطقی مختلف برای گیت AND در شکل ۲ نشان داده شده است.



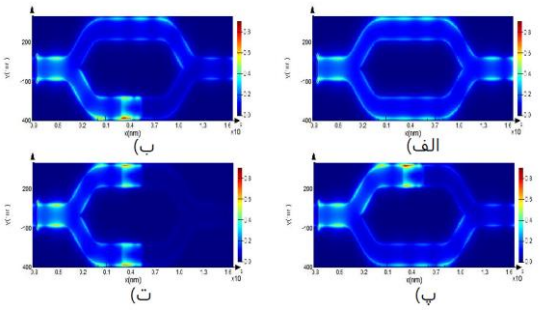
شکل ۲: پروفایل میدان الکتریکی در حالت‌های منطقی مختلف گیت AND الف) پروفایل میدان گیت در حالت (1,1) ب) پروفایل میدان گیت در حالت (1,0) پ) پروفایل میدان گیت در حالت (0,1) ت) پروفایل میدان گیت در حالت (0,0).

ساختار گیت OR پیشنهادی درشکل۳ دیده می شود. ساختار گیت OR در واقع مشابه یک تداخلگر ماخ-زندر می‌باشد که با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن از طریق پنجره‌های کنترلی قادر به کنترل انتشار مدهای سطحی خواهیم بود. در واقع اعمال بایاس الکتریکی به منزله‌ی منطق یک و عدم بایاس الکتریکی بیانگر منطق صفر می باشد. عرض نوار گرافنی و پنجره های کنترلی W=150nm، طول ماخ-زندر L_1=2600nm ، طول پنجره-های کنترلی L_2=250nm و ضخامت زیرلایه نیترید بور شش گوشه 0.3nm می‌باشد. پتانسیل شیمیایی گرافن برای حالت انتشار 0.2ev و برای حالت قطع 0.03ev تنظیم شده است. برای حالتی که زیرلایه دی اکسید سیلیکون انتخاب شود، با کاهش ضخامت زیرلایه به زیر200nm، با افزایش شدید تلفات و عدم انتشار مدهای سطحی مواجه خواهیم بود و لذا ضخامت برابر با 200nm انتخاب‌شده‌است.



شکل۳: گیت OR با زیرلایه نیترید بور شش گوشه، پنجره‌های کنترلی در دو بازوی ماخ-زندر با تغییر پتانسیل شیمیایی نقش کنترل انتشار مدهای سطحی و پیاده سازی منطق OR را ایفا می‌کند.

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



شکل۴: پروفایل میدان الکتریکی در حالت‌های 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 گیتهای AND و OR طراحی شده برای دوحالتی که دی اکسید سیلیکون و نیترید بور

[۷] Finite-Difference Time-Domain

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]

شش گوشه به عنوان زیرلایه انتخاب شوند، نتایج شبیه سازی برای نسبت تمایز[۸](نسبت توان خروجی گیت‌های منطقی در حالت ارزش منطقی یک به توان خروجی در حالت ارزش منطقی صفر برحسب واحد دسیبل[۹])، تلفات الحاقی[۱۰](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.

جدول۱: مقایسه بین گیت‌های منطقی با زیرلایه‌های مختلف

نوع گیت	زیرلایه	نسبت تمایز	تلفات الحاقی	تلفات مد پایه
AND	SiO_2	28dB	14dB	10534dB/cm
OR	SiO_2	25dB	21dB	14165dB/cm
AND	h-BN	34dB	9.7dB	10204dB/cm
OR	h-BN	29dB	4.3dB	13960dB/cm

همان طور که در این جدول مشاهده می‌شود، استفاده از نیترید بور شش گوشه باعث کاهش تلفات الحاقی و بهبود قابل توجه نسبت تمایز شده است که دلیل آن را می توان خواص نوری بهتر نیترید 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 نمی توان کمتر از 200nm انتخاب کرد زیرا تلفات مدهای سطحی بسیار زیاد شده و طول انتشار آنها بسیار کاهش می یابد تا جایی که مد پلازمونیکی در گیت‌ها منتشر نخواهد گشت. اما با انتخاب نیترید بور شش گوشه به عنوان زیرلایه ، با ضخامت 0.3nm ، تلفات کمی برای مدهای سطحی حاصل می شود.

۴- جمع بندی

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

[۸] Extinction ratio
[۹] Decibel
[۱۰] Insertion loss

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-04]