

## تحلیل و طراحی سوئیچ پلاسمونیک با استفاده از نانونوارهای گرافنی

## در طول موج‌های مادون قرمز میانی

فاطمه مرادیانی<sup>1</sup>، محمد صیفوری<sup>1\*</sup>، کامبیز عابدی<sup>2</sup><sup>1</sup>گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران<sup>2</sup>دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاریخ دریافت: 1396/04/13 ویرایش نهایی: 1396/09/05 تاریخ پذیرش: 1396/10/09

## چکیده

در این مقاله عملکرد سوئیچ پلاسمونیک در طول موج‌های مادون قرمز میانی با استفاده از نانونوارهای گرافنی تک لایه و چند لایه تحلیل و طراحی شده است. از تغییر پتانسیل شیمیایی ( $\mu_c$ ) برای تغییر رسانایی سطحی در گرافن استفاده شده است. با تغییر جزئی در پتانسیل شیمیایی گرافن، جابه‌جایی عمده‌ای در فرکانس تشدید ( $\Delta\lambda$ ) و عمق مدولاسیون ( $MD$ ) حاصل شده است. شبیه‌سازی عددی با روش المان محدود نشان داده است که سوئیچ طراحی شده از بورن نیتريد شش وجهی (hBN) و آرایه متناوب از نانونوارهای گرافنی دارای عمق مدولاسیون 14dB، جابه‌جایی طول موج  $2.8\mu\text{m}$  با تعداد لایه‌های  $N=6$ ، با تغییر پتانسیل شیمیایی از 0.3eV تا 0.4eV می‌باشد. ساختار پیشنهادی می‌تواند در ادوات فوتونیک مجتمع و کوک‌پذیر در طول موج‌های مادون قرمز میانی برای تحقق سیستم‌های الکترونیک نوری CMOS روی تراشه استفاده شود.

**کلیدواژگان:** پتانسیل شیمیایی، نانونوارهای گرافنی، پلاسمونیک، عمق مدولاسیون، جابه‌جایی طول موج، سوئیچ

## مقدمه

تغییرات کم ضریب شکست با اعمال ولتاژ، نیروی مکانیکی و یا درجه حرارت، ادوات پلاسمونیک دارای معایبی همچون مصرف توان بالا، سرعت کلیدزنی کم و غیره هستند. گرافن دارای ویژگی‌های الکترونیک منحصر به فردی است که آن را ماده‌ای نویدبخش در ادوات پلاسمونیک برای محدوده وسیعی از طول موج، از مادون قرمز تا تراهرتز ساخته است. پلاسمونیک فعال به معنی دستکاری و کنترل نور تحدید شده در ساختار با ابعاد بسیار کوچکتر از طول موج مطلوب است. چگالی حامل‌های آزاد در نیم‌رساناها را می‌توان تا چند برابر دامنه آنها تنظیم کرد و در نتیجه تغییرات چشمگیری در مشخصه‌های ادوات پلاسمونیک ایجاد کرد. در دمای اتاق و با چگالی بالای حامل‌ها، قابلیت تحرک حامل‌ها در نیم‌رساناهای متداول برای پشتیبانی امواج

در سال‌های اخیر طیف مادون قرمز میانی  $2-20\mu\text{m}$  توجه بسیاری از محققان و دانشمندان را به خود جذب کرده است [1]. از کاربردهای این محدوده طیفی می‌توان به طیف‌نگاری، پردازش مواد [2]، حسگرهای شیمیایی و زیست مولکولی [3]، آشکارسازهای انفجاری با قابلیت کنترل از راه دور [4]، ادوات پلاسمونیک و سیستم‌های مخابراتی اشاره کرد [5]. همچنین محدوده طیفی مادون قرمز به دلیل قابلیت یکپارچگی با ادوات الکترونیک و امکان طراحی ادوات با کنترل فعال تشدید پلاسمون سطحی در فصل مشترک فلز-دی‌الکتریک، برای مطالعه ادوات پلاسمونیک بسیار مورد توجه بوده است. با این وجود، به دلیل

\* نویسنده مسئول: mahmood.seifouri@srutu.edu.

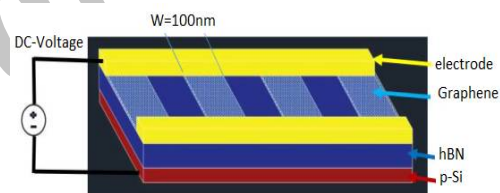
بستر بورون نیتريد شش وجهی (hBN) نشانده شده است. ضخامت و ضریب شکست این لایه به ترتیب برابر با 10nm و 1.98 است. hBN زیرلایه ای بسیار عالی برای گرافن است؛ زیرا از لحاظ ساختار اتمی دارای سطحی صاف است و خالی از باندهای معلق و تله های بار است. ثابت شبکه آن مشابه با گرافن است. ادوات گرافنی بر روی بستر hBN دارای قابلیت تحرک بالاتر و ناهمگونی حامل های بیشتری هستند [8]. نور تابشی به صورت موج تخت است که به صورت عمود به صفحه نانونوارهای گرافنی تابانده می شود. تشدید مد هدایتی، امواج نوری با تابش عمود را به امواج پلاسمونیکی انتشاری در صفحه تزویج می کنند. بنابراین، تغییرات شدیدی در گذار نوری در فرکانس تشدید ایجاد می شود. این نوع ساختار امکان اندازه گیری رابطه پاشندگی و خاصیت الکترواپتیک امواج پلاسمونیکی در گرافن را فراهم می کند.

برای ایجاد آلایش و در نتیجه تغییر غلظت حامل ها در گرافن از طریق پتانسیل الکتریکی، یک گیت سیلیکونی نوع p (p-Si) به عنوان گیت پایینی و دو لایه نازک فلزی به عنوان گیت های بالایی استفاده شده است. ولتاژ DC بین گیت های بالا و پایین برای اعمال تغییرات پتانسیل شیمیایی و در نتیجه تغییر میزان غلظت حامل ها در لایه گرافن استفاده شده است.

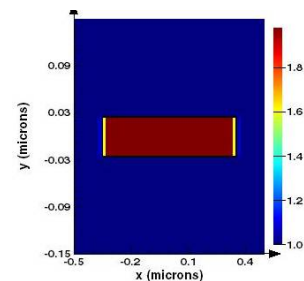
نور تابشی به صورت عمود عمود بر سطح نانونوارهای گرافنی قطبیده شده است که برای تحریک مد پلاسمون سطحی استفاده می شود. امواج پلاسمون در گرافن در نتیجه حرکت متناوب حامل ها در راستای امواج انتشاری است. در طول موج های مادون قرمز میانی، تلفات نوری ناشی از گذارهای بین باندهای و فونونی موجب پراکندگی می شود، این پراکندگی را می توان با آلایش مناسب لایه گرافن تقریباً حذف نمود. در دمای

پلاسمونیکی با طول انتشار مناسب بسیار کم است. در مقایسه با نیم رساناها، قابلیت تحرک حامل ها در گرافن در دمای اتاق و غلظت بالای حامل ها همچنان زیاد است، به طوری که امواج پلاسمونیکی تحدید شده می توانند طول انتشاری در حدود چند میکرومتر را در لایه نازک گرافن طی کنند [1]. چگالی حامل ها در گرافن را می توان از طریق پتانسیل شیمیایی یا آلایش الکتروستاتیکی تنظیم کرد [6]. امواج پلاسمونیکی در گرافن، تحدید میدان بسیار بزرگی ایجاد می کنند، یعنی دارای سرعت گروه کم ( $c/100$ ) بر روی طیف گسترده ای از طول موج هستند. بنابراین، اندرکنش بسیار قوی بین نور و ماده ایجاد می شود [7].

### ساختار سوئیچ پیشنهادی



(الف)



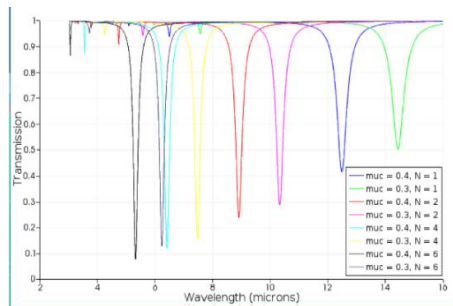
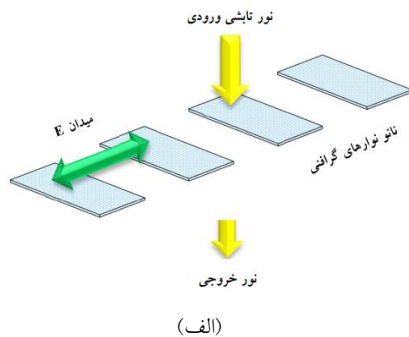
(ب)

شکل 1. الف: نمای طرحواره سوئیچ الکترواپتیک بر پایه نانونوارهای گرافنی در فرکانس های مادون قرمز ب: مش بندی ساختار

شکل 1 ساختار سوئیچ پیشنهادی را نشان می دهد. در این ساختار از توری های پراش برای ایجاد تشدید امواج هدایتی در آرایه متناوب نانونوارهای گرافنی استفاده شده است. عرض نوارهای گرافنی برابر با 100nm تنظیم شده است. نوارهای گرافنی بر روی

مقید در نانونوارهای گرافنی با استفاده از روش نیمه- ایستا تحلیل می‌شود. طول موج تشدید این نوسانات از رابطه 4 تعیین می‌شود [10]،

$$\lambda_0 = 2\pi c \sqrt{\frac{\hbar^2 \epsilon_0 (\epsilon_1 + \epsilon_2) W \eta}{e^2 \times E_f}} \quad 4$$



شکل 2 الف: نمایش نور تابشی که به صورت عمود بر صفحه نانونوارهای گرافنی تابانده شده است. ب: منحنی توان عبوری بر حسب طول موج برای مقادیر مختلف پتانسیل شیمیایی گرافن (0,3eV و 0,4eV)، تعداد لایه‌های 1, 2, 4, 6 و N=100nm و W=100nm و muc پتانسیل شیمیایی گرافن را نشان می‌دهد.

در رابطه 4،  $\epsilon_1$  و  $\epsilon_2$  گذردهی لایه‌های پایینی و بالایی گرافن و  $\eta$  عددی ثابت است که در شبیه‌سازی ما این مقدار برابر با 1/7 است.

پاسخ نوری ساختار شکل 1 با استفاده از روش FDTD با استفاده از نرم‌افزار لومریکال محاسبه شده است. همچنین وابستگی الکتریکی گرافن به ولتاژ DC اعمالی از طریق گیت‌ها برای ایجاد تغییر در سطح

اتاق T=300K و در طول موج‌های mid-IR رسانایی تک‌لایه گرافنی از رابطه شبه-درود تخمین زده

$$\sigma(\omega) = \frac{iD}{\pi(\omega + i\tau^{-1})} \quad 1$$

که  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $\tau$  زمان واهلش الکترون و  $D$  وزن درود نامیده می‌شود که به صورت 2 تعریف می‌شود،

$$D = \frac{v_f e^2}{\hbar} (n\pi)^{1/2} \quad 2$$

در رابطه 2،  $v_f$  سرعت فرمی،  $e$  بار الکترون،  $\hbar$  ثابت پلانک کاهش یافته و  $n$  چگالی حامل‌ها در گرافن است. رابطه سطح انرژی فرمی  $E_f$  با سرعت فرمی و چگالی حامل‌ها با رابطه 3 تعیین می‌شود،

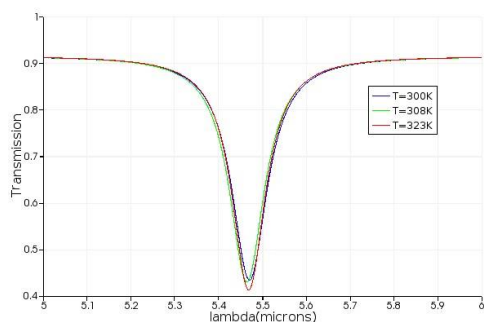
$$E_f = \hbar v_f (n\pi)^{1/2}. \quad 3$$

در شبیه‌سازی از دو مقدار 0,3eV و 0,4eV برای  $E_f$  استفاده شده است. با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن از 0,3eV به 0,4eV چگالی حامل‌ها از  $6,6 \times 10^{12}$  به  $11,7 \times 10^{12}$  افزایش می‌یابد. همچنین در شبیه‌سازی نشان داده شده است که افزایش  $E_f$  موجب جابه‌جایی طول موج تشدید به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر و همچنین افزایش میزان عبور در منحنی گذار می‌شود.

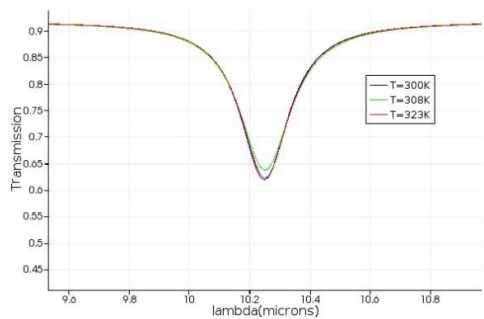
## نتایج شبیه‌سازی

برای موج تابشی عمود، وقتی دوره تناوب آرایه نانو نوار گرافنی با دوره تناوب موج پلاسمونیک یکسان باشد، تحریک تشدید موج هدایتی رخ می‌دهد. موج تابشی به صورت عمود بر نانونوارهای گرافنی تابیده می‌شود. در این حالت، موج تابشی عمود امواج پلاسمونیک در گرافن را تحریک می‌کند و انرژی نور تابشی به دلیل اتلاف اهمی در ساختار تلف شده در حالی که، امواج پلاسمونیک در لایه گرافنی منتشر می‌شوند. در نتیجه طیف عبور شکاف عمیقی را در طول موج تشدید نشان می‌دهد. نوسان الکترون‌های

در کاربردهای عملی، عملکرد سوئیچ تحت شرایط دمایی مختلف بسیار حائز اهمیت است. در واقع عدم جابه‌جایی فرکانس تشدید با تغییر دما قابلیت اطمینان افزاره را تعیین می‌کند. بدین منظور عملکرد دمایی سوئیچ در محدوده دمایی  $27^{\circ}\text{C}$  تا  $50^{\circ}\text{C}$  مورد بررسی قرار گرفت. شکل 4 نتایج این بررسی را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با تغییر دما تغییری در مکان طول موج تشدید رخ نداده است.



(الف)



(ب)

شکل 4. منحنی توان عبوری برحسب طول موج برای پتانسیل شیمیایی  $W=50\text{nm}$ ,  $0.3\text{eV}$  الف:  $N=4$  و ب:  $N=1$  در دماهای  $27^{\circ}\text{C}$ ،  $35^{\circ}\text{C}$  و  $50^{\circ}\text{C}$ .

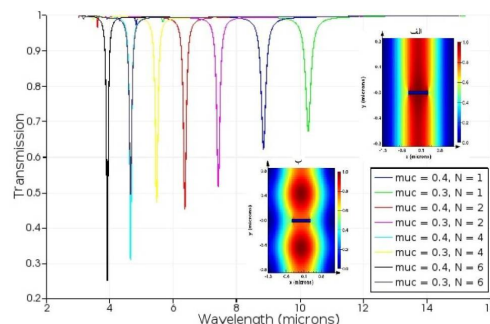
جدول 1 مقایسه بین ساختارهای مشابه و ساختار پیشنهاد شده در این مقاله را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نتایج حاصل شده در این مقاله به نسبت کارهای مشابه بهبود قابل ملاحظه‌ای را در جابه‌جایی طول موج و عمق مدولاسیون نشان داده است.

پتانسیل شیمیایی گرافن با استفاده از نرم‌افزار device از بسته تجاری لومریکال انجام شده است. همان‌طور که قبلاً نیز بیان شد، افزایش  $E_f$  موجب جابه‌جایی طول موج به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر می‌شود. بیشترین جابه‌جایی طول موج حدود  $2800\text{nm}$  با  $N=1$  حاصل شده است. همچنین رسانایی لایه گرافنی در حالت  $N>1$  برابر با  $N\sigma$  است. تشدیدهای عمیق‌تری در حالت گرافن چندلایه در مقایسه با گرافن یک‌لایه به چشم می‌خورد که این امر منجر به عمق مدولاسیون (MD) بیشتر می‌شود. عمق مدولاسیون به صورت زیر تعریف می‌شود [10]:

$$MD = \left| \frac{T_{on} - T_{off}}{T_{on}} \right| = |1 - T_R| \quad (5)$$

که  $T_{on}$  دامنه عبور در پتانسیل شیمیایی  $0.4\text{eV}$  و  $T_{off}$  دامنه عبور در حالت  $0.3\text{eV}$  را بیان می‌کند که با  $N=6$  عمق مدولاسیونی برابر با  $14\text{dB}$  حاصل شده است.

شکل 3 همین نتایج را برای نانونوارهای گرافنی با عرض  $50\text{nm}$  نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل پیداست، با کاهش عرض نانونوارها جابه‌جایی‌های عمده‌ای در طول موج با حرکت به سوی طول موج‌های کوتاه‌تر و ابتدای محدوده mid-IR وجود دارد. البته این حرکت به سوی طول موج‌های کوتاه‌تر با کاهش دامنه عبور و در نتیجه کاهش عمق مدولاسیون همراه است.



شکل 3. منحنی توان عبوری برحسب طول موج برای مقادیر مختلف پتانسیل شیمیایی گرافن ( $0.3\text{eV}$  و  $0.4\text{eV}$ )، تعداد لایه‌های  $N=1, 2, 4, 6$  و  $W=50\text{nm}$ . شکل‌های الف و ب در داخل ساختار مدهای مقدماتی و مرتبه دوم را در طول موج  $4.63\ \mu\text{m}$  نشان می‌دهد.

by mid-infrared active coherent laser spectrometry, *Optics Express* **912** (2015) 912-929.

[5] D. Wasserman, R.n Singh, T. Akalin, Special issue on mid-infrared and THz Photonics, *Journal of Optics* **16** (2014) 090201-090203.

[6] J.M. Marmolejo-Tejada, n.J. Velasco-Medina, Review on graphene nanoribbon devices for logic applications, *Microelectronics Journal* **48** (2016) 18–38.

[7] F.H.L. Koppens, D.E. Chang, F.J.G. de Abajo, Graphene Plasmonics: A Platform for Strong Light-Matter Interactions, *Nano Letters* **11** (2011) 3370–3377.

[8]. J.S. Shin, J.T. Kim, Broadband silicon optical modulator using a graphene-integrated hybrid plasmonic waveguide, *Nanotechnology* **26** (2015) 365201-365209.

[9] W. Gao, J. Shu, C. Qiu, Q. Xu, Excitation of Plasmonic Waves in Graphene by Guided-Mode Resonances, *American Chemical Society* **6** (2012) 7806–7813.

[10] H.S. Chu, Ch.H. Gan, Active plasmonic switching at mid-infrared wavelengths with graphene ribbon arrays, *Applied Physics Letters* **102** (2013) 231107-2311011.

[11] N. Li, L. Wang, X. Zhai, Tunable graphene-based mid infrared plasmonic wide-angle narrowband perfect absorber, *Nature Science report* **6** (2016) 36651-36658.

[12] H.J. Li, L.L. Wang, H. Zhang and et., Graphene-based mid-infrared, tunable, electrically controlled plasmonic filter, *Applied Physics Express* **7** (2014). 24301-24306.

جدول 1. مقایسه بین نتایج حاصل از ساختار پیشنهادی و کارهای مشابه

| W(nm) | $\Delta\lambda$ (nm) | MD(dB) | $E_f$ (eV) | مرجع            |
|-------|----------------------|--------|------------|-----------------|
| 100   | -                    | 10     | 0,64       | [9]             |
| 150   | 1500                 | 13     | 0,2-0,25   | [10]            |
| 100   | 2800                 | 14     | 0,3-0,4    | ساختار پیشنهادی |
| 50    | 1356                 | 12/5   | 0,3-0,4    | ساختار پیشنهادی |
| 150   | 1200                 | 13/5   | 0,3-0,5    | [11]            |
| 55    | 450                  | -      | 0,3-0,4    | [12]            |

## بحث و نتیجه گیری

در این مقاله سوئیچ پلاسمونیک با استفاده از نانونوارهای گرافنی در طول موج مادون قرمز میانی برای حالت گرافن یک‌لایه و چندلایه طراحی و تحلیل شد. نتایج شبیه‌سازی جابه‌جایی بزرگی در طول موج در حدود 2800nm و عمق مدولاسیونی حدود 14dB را نشان داده است. همچنین نشان داده شد که با کاهش عرض نانونوارهای گرافنی، طیف عبور به سمت طول‌موج‌های کوتاه‌تر جابه‌جا می‌شود. برای بررسی قابلیت اطمینان سوئیچ در کاربردهای عملی، عملکرد آن در محدوده دمایی 50-27 °C بررسی شد که عدم جابه‌جایی فرکانس شدید و در نتیجه پایداری سوئیچ طراحی شده را نشان می‌دهد.

## مرجع‌ها

[1] V.W. Brar, M.S. Jang, M. Sherrott, J.J. Lopez, H.A. Atwater, Highly Confined Tunable Mid-Infrared Plasmonics in Graphene Nanoresonators, *Nano Letters* **13** (2013), 2541–2547.

[2] S. Türker-Kaya, C.W. Huck, A Review of Mid-Infrared and Near-Infrared Imaging: Principles, Concepts and Applications in Plant Tissue Analysis, *Molecules* **22** (2017) 168-188.

[3] R. Shankar, M. Lončar, Silicon photonic devices for mid-infrared Applications, *Nanophotonics* **3** (2014) 329–341.

[4] N.A. Macleod, F. Molero, D. Weidmann, Broadband standoff detection of large molecules