تحلیل و طراحی سوئیچ پلاسمونیکی با استفاده از نانونوارهای گرافنی در طول موجهای مادون قرمز میانی

فاطمه مرادیانی¹، محمد صیفوری^{1.*}، کامبیز عابدی²

¹گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران، ایران 2 دانشکده برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

تاريخ دريافت: 1396/04/13 ويرايش نهايي:1396/09/05 تاريخ پذيرش: 1396/10/09

چکیدہ

در این مقاله عملکرد سوئیچ پلاسمونیکی در طول موجهای مادون قرمز میانی با استفاده از نانونوارهای گرافنی تکالیه و چندلایه تحلیل و طراحی شده است. از تغییر پتانسیل شیمیایی (μ_c) برای تغییر رسانایی سطحی در گرافن استفاده شده است. با تغییر جزئی در پتانسیل شیمیایی گرافن، جابهجایی عمدهای در فرکانس تشدید (ΔΔ) و عمق مدولاسیون (*MD*) حاصل شده است. شبیه سازی عددی با روش المان محدود نشان داده است که سوئیچ طراحی شده از بورن نیترید شش وجهی (hBN) و آرایه متناوب از نانونوارهای گرافنی دارای عمق مدولاسیون (14B، جابهجایی طول موج سواکیچ با تعداد لایه های های و N=b با تغییر پتانسیل شیمیایی از V3/۵۰ تا V4ev می باشد. ساختار پیشنهادی می تواند در ادوات فوتونیکی مجتمع و کوکپذیر در طول موجهای مادون قرمز میانی برای تحقق سیستمهای الکترونیک نوری CMOS روی تراشه استفاده شود.

كليدواژگان: پتانسيل شيميايي، نانونوارهاي گرافني، پلاسمونيكي، عمق مدولاسيون، جابهجايي طولموج، سوئيچ

مقدمه

در سالهای اخیر طیف مادون قرمز میانی m 2-20 توجه بسیاری از محققان و دانشمندان را به خود جذب کرده است [1]. از کاربردهای این محدودهٔ طیفی می توان به طیف نگاری ، پردازش مواد [2]، حسگرهای شیمیایی و زیست مولکولی [3]، آشکارسازهای انفجاری با قابلیت کنترل از راه دور [4]، ادوات پااسمونیکی و سیستمهای مخابراتی اشاره کرد [5]. محمچنین محدودهٔ طیفی مادون قرمز به دلیل قابلیت یکپارچگی با ادوات الکترونیکی و امکان طراحی ادوات با کنترل فعال تشدرک یا کنترک و سیستمهای مادون قرمز به دلیل قابلیت با کنترل فعال تراه دوات پااسمونیکی و امکان طراحی ادوات با کنترل فعال تشدیک یا مطابعه ادوات پااسمونیکی بسیار مورد توجه بوده است. با این وجود، به دلیل

تغییرات کم ضریب شکست با اعمال ولتاژ، نیروی مکانیکی و یا درجه حرارت، ادوات پلاسمونیکی دارای معایبی همچون مصرف توان بالا، سرعت کلیدزنی کم و غیره هستند. گرافن دارای ویژگی های الکترونیکی منحصر بهفردی است که آن را ماده ای نوید بخش در ادوات پلاسمونیکی برای محدودهٔ وسیعی از طول موج، از مادون قرمز تا تراهر تز ساخته است. پلاسمونیکی فعال به معنی دستکاری و کنترل نور تحدید شده در ساختار با ابعاد بسیار کوچکتر از طول موج مطلوب است. چگالی دامنهٔ آنها تنظیم کرد و در نتیجه تغییرات چشمگیری در مشخصه های ادوات پلاسمونیکی ایجاد کرد. در دمای مشخصه های ادوات پلاسمونیکی ایجاد کرد. در دمای اتاق و با چگالی بالای حامل ها، قابلیت تحرک حامل ها در نیم رساناهای متداول برای پشتیبانی امواج

^{*} نویسنده مسئول: .mahmood.seifouri@srttu.edu

پلاسمونیکی با طول انتشار مناسب بسیار کم است. در مقایسه با نیمرساناها، قابلیت تحرک حامل ها در گرافن در دمای اتاق و غلظت بالای حامل ها همچنان زیاد است، بهطوریکه امواج پلاسمونیکی تحدیدشده میتوانند طول انتشاری در حدود چند میکرومتر را در لایه نازک گرافن طی کنند [1]. چگالی حامل ها در گرافن را میتوان از طریق پتانسیل شیمیایی یا آلایش الکتروستاتیکی تنظیم کرد [6]. امواج پلاسمونیکی در گرافن، تحدید میدان بسیار بزرگی ایجاد میکنند، یعنی دارای سرعت گروه کم (100/ی) بر روی طیف گستردهای از طول موج هستند. بنابراین، اندرکنش بسیار قوی بین نور و ماده ایجاد میشود [7].

ساختار سوئيچ پيشنهادي





شکل1. الف: نمای طرحواره سوئیچ الکترواپتیک برپایه نانونوارهای گرافنی در فرکانسهای مادونقرمز ب: مشیندی ساختار

شکل 1 ساختار سوئیچ پیشنهادی را نشان میدهد. در این ساختار از توریهای 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

بستر بورون نیترید شش وجهی (hBN) نشانده شده است. ضخامت و ضریب شکست این لایه به تر تیب برابر با 10nm و 1/98 است. hBN زیرلایهای بسیار عالی برای گرافن است؛ زیرا از لحاظ ساختار اتمی دارای سطحی صاف است و خالی از باندهای معلق و تلههای 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 بهصورت موج تخت است که بهصورت عمد به صفحه نانونوارهای گرافنی تابانده میشود. تشدید مد هدایتی، امواج نوری با تابش عمود را به امواج پلاسمونیکی انتشاری در صفحه تزویج میکنند. 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 میکند.

برای ایجاد آلایش و در نتیجه تغییر غلظت حامل ها در گرافن از طریق پتانسیل الکتریکی، یک گیت سیلیکونی نوع q (p-Si) بهعنوان گیت پایینی و دو لایهٔ نازک فلزی بهعنوان 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 عمد بر سطح نانونوارهای گرافنی قطبیده شده است که برای تحریک مد پلاسمون سطحی استفاده می شود. امواج پلاسمون در گرافن در نتیجهٔ حرکت متناوب حامل ها در راستای امواج انتشاری است. در طول موجهای مادون قرمز میانی، تلفات نوری ناشی از گذارهای بین باندی و فونونی موجب پراکندگی می شود، این پراکندگی را می توان با آلایش مناسب لایهٔ گرافن تقریباً حذف نمد. در دمای

اتاقT=300K و در طولموجهای mid-IR رسانایی تکالیه گرافنی از رابطهٔ شبه-درود تخمین زده

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

که ۵ فرکانس زاویهای، ۲ زمان واهلش الکترون و D وزن درود نامیده میشود که بهصورت2 تعریف میشود،

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

در رابطهٔ2، v_r سرعت فرمی، e بار الکترون، \hbar ثابت پلانک کاهشیافته و n چگالی حاملها در گرافن است. رابطهٔ سطح انرژی فرمی E_f با سرعت فرمی و چگالی حاملها با رابطهٔ3 تعیین میشود، $E_f = \hbar v_f (n\pi)^{1/2}$.

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 10¹² ×6/6 به 10/2×10¹² افزایش مییابد. همچنین در شبیهسازی نشان داده شده است که افزایش E_f موجب جابهجایی طولموج تشدید بهسمت طولموجهای کوتاهتر و همیچنین افزایش میزان عبور در منحنی گذار می شود.

نتايج شبيهسازى

برای موج تابشی عمود، وقتی دورهٔ تناوب آرایهٔ نانو نوار گرافنی با دورهٔ تناوب موج پلاسمونیکی یکسان باشد، تحریک تشدید موج هدایتی رخ می دهد. موج تابشی به صورت عمد بر نانونوارهای گرافنی تابیده می شود. در این حالت، موج تابشی عمود امواج پلاسمونیکی در گرافن را تحریک می کند و انرژی نور تابشی به دلیل اتلاف اهمی در ساختار تلف شده در حالی که، امواج پلاسمونیکی در لایهٔ گرافنی منتشر می شوند. در نتیجه طیف عبور شکاف عمیقی را در طول موج تشدید نشان می دهد. نوسان الکترون های

مقید در نانونوارهای گرافنی با استفاده از روش نیمه-ایستا تحلیل میشود. طولموج تشدید این نوسانات از رابطهٔ4 تعیین میشود [10]،





شکل2. الف: نمایش نور تابشی که بهصورت عمد بر صفحهٔ نانونوارهای گرافنی تابانده شده است. ب: منحنی توان عبوری برحسب طولموج برای مقادیر مختلف پتانسیل شیمیایی گرافن (0,4eV و 0,3eV)، تعداد لایههای N=۱،۲،٤،۲ و Muc). W=100nm پتانسیل شیمیایی گرافن را نشان می دهد.)

در رابطهٔ 4، ₂ و ₂ 2 گذردهی لایههای پایینی و بالایی گرافن و η عددی ثابت است که در شبیهسازی ما این مقدار برابر با 1/7 است.

پاسخ نوری ساختار شکل1 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

device پتانسیل شیمیایی گرافن با استفاده از نرم افزار device از بسته تجاری لومریکال انجام شده است. همان طور که قبلاً نیز بیان شد، افزایش F_f موجب جابه جایی طول موج های کوتاه تر می شود. بیشترین جابه جایی طول موج های کوتاه تر می شود. حاصل شده است. همچنین رسانایی لایهٔ گرافنی در حالت I < N برابر با $N\sigma$ است. تشدیدهای عمیق تری در حالت گرافن چندلایه در مقایسه با گرافن یکایه به چشم می خورد که این امر منجر به عمق مدولاسیون (MD) بیشتر می شود. عمق مدولاسیون به صورت زیر تعریف می شود [01]،

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

که Ton دامنه عبور در پتاسیل شیمایی 0/4eV، و Toff دامنه عبور در حالت 0/3eV را بیان می کند که با N=6 عمق مدولاسیونی برابر با 14dB حاصل شده است. شکل 3 همین نتایج را برای نانونوارهای گرافنی با عرض 50nm نشان می دهد. همان طور که از شکل پیداست، با کاهش عرض نانونوارها جابه جایی های عمده ای در طول موج با حرکت به سوی طول موج های کو تاه تر و ابتدای محدوده IIT وجود دارد. البته این حرکت به سوی طول موج های کو تاه تر با کاهش دامنه عبور و در نتیجه کاهش عمق مدولاسیون همراه است.



شکل3. منحنی توان عبوری برحسب طول موج برای مقادیر مختلف پتانسیل شیمیایی گرافن (0/3eV و 0/4eV)، تعداد لایه های N=۱،۲،٤،٦ و W=50nm. شکل های الف و ب در داخل ساختار مدهای مقدماتی و مرتبهٔ دوم را در طول موج μμ 4/63 نشان می دهند.

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. بدینمنظور عملکرد دمایی سوئیچ در محدودهٔ دمایی 2°27 تا 2°50 مورد بررسی قرار گرفت. شکل 4 نتایج این بررسی را نشان میدهد. همان طور که مشاهده می شود با تغییر دما تغییری در مکان طول موج تشدید رخ نداده است.



شکل4. منحنی توان عبوری برحسب طولموج برای پتانسیل شیمیایی 0/3eVو W=50nm الف: N=4 و ب: N=1 در دماهای 2°25، 2°56 و 50°C.

جدول 1 مقایسه بین ساختارهای مشابه و ساختار پیشنهاد شده در این مقاله را نشان می دهد. همان طور که مشاهده می شود، نتایج حاصل شده در این مقاله به نسبت کارهای مشابه بهبود قابل ملاحظه ای را در جابه جایی طول موج و عمق مدولاسیون نشان داده است. 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 graphenebased 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.

جدول1. 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 سندهادي
50	105/	10/5		يسهدى
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 پلاسمونیکی با استفاده از نانونوارهای گرافنی در طولموج مادون قرمز میانی برای حالت گرافن یکلایه و چندلایه طراحی و تحلیل شد. نتایج شبیهسازی جابهجایی بزرگی در طولموج در حدود 2800nm و عمق مدولاسیونی حدود 4Bb را نشان داده است. همچنین نشان داده شد که با کاهش عرض نانونوارهای گرافنی، طیف عبور بهسمت طولموجهای کوتاهتر جابهجا میشود. برای بررسی قابلیت اطمینان سوئیچ در کاربردهای عملی، عملکرد آن در محدودهٔ دمایی C^o 27-05 بررسی شد که عدم جابهجایی فرکانس تشدید 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

105