بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک
ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و
فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۵-۱۶ بهمن ۱۳۹۸

مدولاتور الکترواپتیکی چند بانده مبتنی بر گرافن در بازه مادون قرمز میانی

ابوالفضل صنعتی[۱]،بهنام جعفری[۱] ، هادی صوفی[۱]

[۱]دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تبریز، تبریز ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱، ایران

چکیده_در این مقاله یک مدولاتور نوری مولتی باند در بازه طول موجی مادون قرمز میانی مبتنی بر گرافن تک لایه طراحی و مدل‌سازی شده است که در آن نانو آنتن‌های فلزی برای جذب و بهبود مشخصات مدولاتور قرار گرفته است. بیشتر مدولاتورهای الکترواپتیکی مبتنی بر گرافن بر مبنای تغییر در مقدار جذب توسط دوپینگ الکترواستاتیکی از طریق الکترود گیت هستند که به دلیل کم بودن مقدار جذب مطلق گرافن، برای عملکرد مناسب عموماً نیاز به ولتاژ عملکرد بالا داشته و پاسخ دهی آن‌ها برای ولتاژهای پایین بسیار کم است. در این مقاله یک مدولاتور الکترواپتیکی مبتنی بر گرافن طراحی شده است که عمل مدولاسیون بر اساس تداخل فابری_پرو بین امواج پلاسمونی رونده و برگشتی گرافن در یک ساختار فلز- دی الکتریک- گرافن-فلز بوده و با اعمال کوچکترین ولتاژ عمق مدولاسیون تقریباً ۱۰۰٪ به دست می‌آید. برای دو طول موج μm ۷,۵ و ۶ عمق مدولاسیون بترتیب ۷۰ و۸۵ درصد و تلفات الحاقی آنها بترتیب dB ۲,۲۱ و ۰,۸ بدست آمده است. در این مدولاتور، ماده‌ی گرافن نه به عنوان یک ماده‌ی جاذب بلکه برای شیفت فرکانس رزونانس ساختار فابری-پرو استفاده می‌شود. در این پژوهش نور انعکاسی از سیستم به عنوان نور مدوله شده در نظر گرفته شده است.

کلید واژه- مدولاتورهای الکترواپتیکی، گرافن، پلاسمونیک، رزونانس فابری پرو، فروسرخ میانی

Multiband Electro Optic modulator Based on Graphene in the Mid-IR wavelength range

Abolfazl Sanati[1], Behnam Jafari[1], Hadi Soofi[1]

Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Abstract- In this article a multiband optical modulator based on single layer graphene in the mid-IR wavelength range is designed and simulated. In this modulator metallic nano antennas are utilized to enhance absorption and modulator characteristics. Most of the graphene based electro-optic modulators function according to the modification of absorption with electrostatic doping through gate electrode. Such modulators often require high voltage and have low responsivity **for** lower voltages due to the low absorption of single layer graphene. In this article, an electro-optic modulator based on graphene is designed at which the modulation principle is Fabry-Perot interference between counter propagating graphene plasmon waves in a metal-dielectric-graphen**e-metal** structure and reaches a modulation depth of nearly 100% with a very small applied voltage. For wavelengths of 6 and 7.5um, modulation depth of 70 and 85 % are obtained. For these wavelengths insertion loss is 0.8 and 2.21 dB respectively. In this modulator, graphene is employed for absorption, but instead to shift the resonance wavelength of the Fabry-Perot structure. In this article, the reflected wave is considered as the modulated signal.

Keywords: Electro-optic modulators, Fabry-Perot interferometer, Graphene, Mid-IR, Plasmonic.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

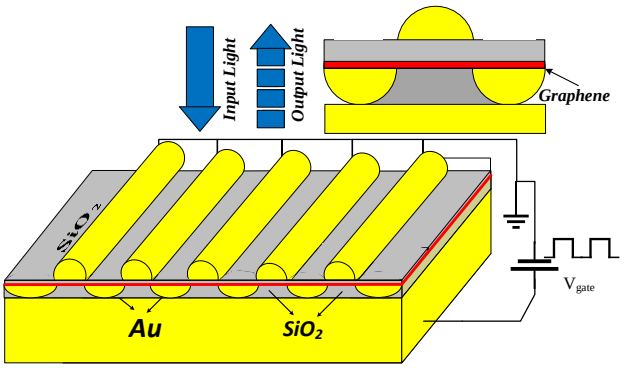
مقدمه

امروزه مدولاتورهای متنوعی در حال گسترش و در سالیان اخیر استفاده از گرافن در مدولاتورهای نوری به دلیل ویژگیهای منحصربفرد نوری و الکترونیکی که دارد[۱] بیشتر شده و باعث بهبود پارامترهای ساختارهای مختلف می‌شود. جذب نوری ۲,۳٪ برای گرافن تک لایه یکی دیگر از خواص منحصربفرد آن است ولی مقدار کلی آن برای ادوات الکترواپتیکی همچون مدولاتور کم بوده بنابراین با توجه به اینکه گرافن در طیف انرژی مادون قرمز میانی از خود پاسخ پلاسمونیکی قوی نشان می‌دهد، از آن برای ساختن ادوات الکترواپتیکی متعددی همچون آشکارساز و مدولاتور در این طیف انرژی استفاده می‌شود[۲].از ساختارهای ساندویچی فلز/ دی‌الکتریک/گرافن ادوات الکترواپتیکی متعددی چون جاذب‌های نوری و آشکارسازها [۳] ساخته شده‌اند.

در پژوهش حاضر با استفاده از مزایای گرافن، تحریک امواج پلاسمونی در آن و تداخل فابری پرو بین امواج پلاسمونی قطبیده شده توانستیم با بکارگیری یک لایه‌ی فلزی منعکس کننده در پایین ساختار که به عنوان الکترود نیز عمل می‌کند به طیف نور بازگشتی چند بانده دست بیابیم بطوریکه با تنظیم ولتاژ گیت اعمالی به مدولاتور در هر طول موج دلخواه عمل مدولاسیون با بیشینه عمق مدولاسیون اتفاق می‌افتد. در این مدولاتور با اعمال ولتاژ بایاس گیت به میزان خیلی کم طیف نور برگشتی از سیستم در حدود بالای ۹۰ درصد تغییر می‌کند. همچنین مدولاتور طراحی شده دارای سرعت و پهنای باند بالایی بوده (۲/۵THz) و توان مصرفی بسیار کمی خواهد داشت.

طراحی و مدلسازی مدولاتور

نمای دو و سه بعدی از ساختار در شکل ۱ آورده شده است که متشکل از ساختارهای ساندویچی فلز/دی‌الکتریک/گرافن/فلز است. نانو آنتن‌های فلزی در هر دو طرف ساختار بالا و پایین گرافن قرار گرفته‌اند. یک دی‌الکتریک با ضخامت 5nm بین گرافن و نانو آنتن‌های بالایی قرار گرفته، شعاع نانو آنتن‌ها 400nm است و نانو آنتن‌های پایینی در دی الکتریک SiO_2 به ضخامت ۱۰۰ نانومتر دفن شده‌اند. گیت فلزی (طلا) به عنوان بازتابنده در زیر ساختار (بستر) به منظور افزایش اندرکنش بین گرافن و نور قرار داده شده است.



شکل ۱: شماتیک ۳بعدی و ۲ بعدی از مدولاتور الکترواپتیکی مبتنی برگرافن بهبود داده شده با نانو آنتن های فلزی با ساختار ساندویچی فلز/دی الکتریک/گرافن/فلز بهینه شده.

یک موج تخت با قطبش عمود بر جهت نانوآنتن‌ها (در جهت x) و جهت انتشار در راستای z- به مدولاتور تابانده می‌شود. در این مقاله تحلیل نوری ساختار از طریق روش FDTD انجام شده که در آن گرافن به عنوان یک ماده‌ی دو بعدی با هدایت سطحی آن متشکل از گذارهای بین باندی و درون باندی با استفاده از فرمول کوبو [۱] مدلسازی شده است. با اعمال نور فرودی به مدولاتور بدلیل متقارن بودن ساختار، امواج پلاسمونی گرافن در دو طرف نانو آنتن‌ها تحریک شده و در حضور مولفه‌ی میدان الکتریکی موج الکترومغناطیسی فرودی، این امواج پلاسمونی در جهت x و به سمت هم حرکت می‌کنند، این عمل باعث تداخل فابری پرو شده و نور برگشتی دارای پیک‌های متوالی می‌شود. با اعمال ولتاژ بایاس از طریق الکترود گیت و دوپینگ الکترواستاتیکی گرافن می‌توان پیک‌های طیف بازگشتی را شیفت داد، به طوریکه با اعمال مقدار مناسب و تنظیم شده‌ی ولتاژ کمینه و بیشینه مقدار در یک فرکانس اتفاق بیفتند که باعث بیشینه شدن عمق مدولاسیون می‌شود. برای مدلسازی الکترواستاتیکی گرافن از معادله‌ی زیر استفاده شده است.

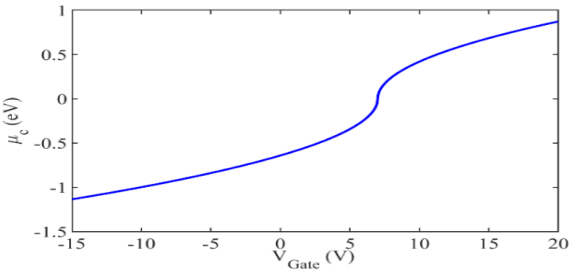
$$\left|\Delta E_f\right| = \hbar v_f \sqrt{\frac{\pi}{e}\frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{d_{ox}}\left|V_g - V_{dirac}\right|} \qquad (۱)$$

در معادله‌ی بالا $\varepsilon_r = 3.9$ ضریب گذردهی الکتریکی دی الکتریک گیت و ε_0 ضریب گذردهی خلاء می‌باشد. مقدار پتانسیل شیمیایی اولیه گرافن سنتز شده به روش CVD بدلیل واکنش با مولکول‌های اکسیژن هوا به عنوان گیرنده الکترون عموما صفر

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

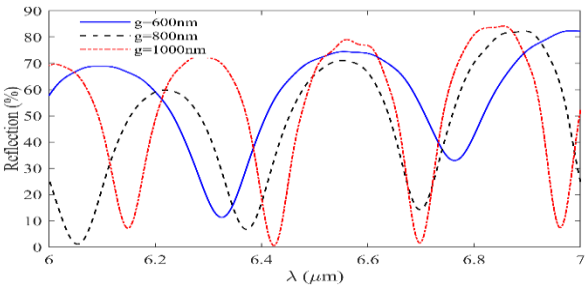
نبوده و مقداری حفره‌ی اضافی دارد[۴]. به همین دلیل در این مقاله مقدار اولیه سطح فرمی برابر با $|\mu_c| = 0.64eV$ فرض شده است، بنابراین با این فرض و با در نظر گرفتن ضخامت دی الکتریک ساختار پیشنهادی که برابر با ۵nm است مقدار ولتاژی که لازم است تا سطح فرمی به نقطه‌ی دیراک منتقل شود برابر با V_{dirac}=۷v است. همانطور که در ادامه خواهیم دید برای داشتن بیشینه مقدار عمق مدولاسیون لازم نیست تا سطح فرمی در نقطه‌ی دیراک واقع شود. نمودار سطح فرمی بر حسب ولتاژ بایاس گیت به صورت زیر است:



شکل۲: تغیرات پتانسیل شیمیایی گرافن برحسب ولتاژ گیت.

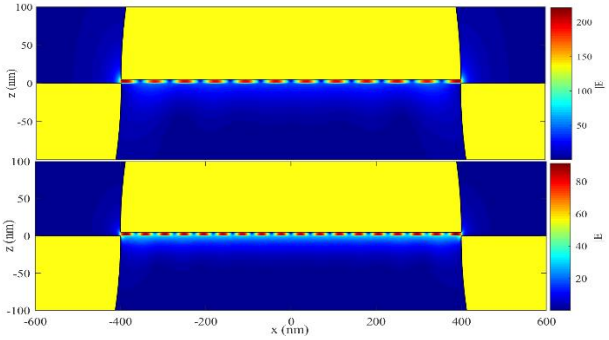
نتایج و بحث

اعمال ولتاژ بایاس باعث شیفت یافتن پیک‌های نور بازگشتی از ساختار می‌شود قابل ذکر است، که همانطور که در ادامه خواهیم دید، شیفت پیک‌های تداخل فابری پرو تعیین کننده‌ی حساسیت مدولاسیون است به عبارت دیگر هرچقدر با تغییر ولتاژ گیت شیفت پیک‌ها زیاد باشد حساسیت مدولاتور پیشنهادی نیز زیاد خواهد بود. طیف نور بازگشتی از ساختار در بخشی از بازه‌ی مادون قرمز میانی (۶/۵-۷ میکرومتر) وقتی که d_{ox}=۵nm و ولتاژ گیت اعمالی صفر (E_F=۰/۶۴eV) است برای طول شکاف‌های مختلف در شکل (۳) نشان داده شده است.



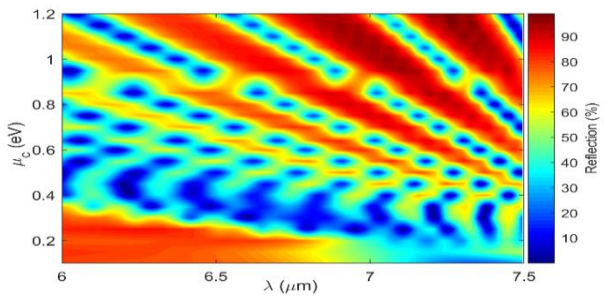
شکل۳: طیف بازگشتی از مدولاتور در بایاس صفر برای طول شکاف‌های مختلف.

با افزایش طول شکاف، تعداد پیک‌های نور بازگشتی به دلیل افزایش مرتبه‌ی رزونانس امواج پلاسمونی گرافن، افزایش پیدا می‌کند. اگر m مرتبه‌ی رزونانس باشد $\lambda_{GP} = 2W/m$ طول موج امواج پلاسمونی تحریک شده در سطح گرافن خواهد بود که با افزایش مرتبه‌ی رزونانس کاهش می‌یابد. توزیع میدان الکتریکی در ساختار ساندویچی فلز/دی الکتریک/ گرافن/فلز بهبود یافته در شکل۴ برای دو طول موج متفاوت آورده شده است. با افزایش فرکانس نور فرودی مرتبه‌ی رزونانس افزایش یافته و نحوه‌ی شکل گیری امواج ایستا در اثر تداخل فابری پرو مشاهده می‌شود.



شکل۴: توزیع میدان الکتریکی در ساختار پیشنهادی. شکل بالایی توزیع میدان در فرکانس ۴۱تراهرتز است که دارای مرتبه‌ی رزونانس ۱۱ است و متناظر با پیک نور بازگشتی است. شکل پایین توزیع میدان در فرکانس ۴۸/۲۳ تراهرتز است که دارای مرتبه‌ی رزونانس ۱۸ بوده و متناظر با دره‌ی طیف نور بازگشتی است

طیف نور بازگشتی برحسب پتانسیل شیمیایی گرافن و طول موج نور فرودی برای طول شکاف ۸۰۰nm در شکل (۵) آورده شده که در آن شیفت پیک‌های رزونانس به وضوح قابل مشاهده است. با افزایش پتانسیل شیمیایی گرافن مرتبه‌ی رزونانس و به دنبال آن تعداد پیک‌های عبور کمتر می‌شود.

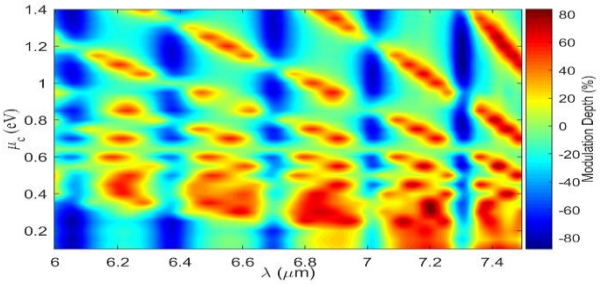


شکل۵: طیف نور بازگشتی از مدولاتور بر حسب طول موج نور فرودی و سطح پتانسیل شیمیایی گرافن (ولتاژ گیت).

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

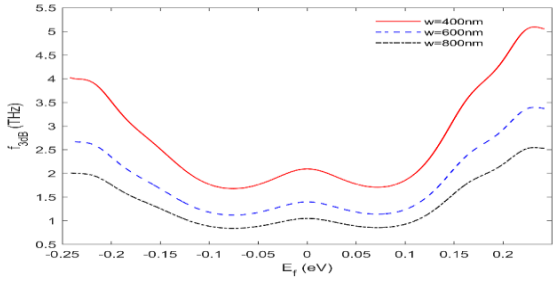
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]

عمق مدولاسیون ساختار در شکل۶ آورده شده است در حالتی که با اعمال بایاس مرتبه‌ی رزونانس از یک عدد زوج به فرد تبدیل شود عمق مدولاسیون بیشترین مقدار خواهد بود. علامت منفی (نواحی آبی رنگ) در این شکل بیانگر اینست که با اعمال ولتاژ گیت مقدار نور بازگشتی بیشتر از مقدار اولیه‌ی آن (در ولتاژ بایاس صفر) است. همانطور که دیده می‌شود با انتخاب و تنظیم مناسب دامنه‌ی سیگنال اعمالی به مدولاتور می‌توان آنرا برای هر فرکانس دلخواهی با بیشترین عمق مدولاسیون سوار کرد. برای مثال در طول موج $6\ \mu m$ با اعمال ولتاژ بایاس کوچکی به اندازه‌ی ۱,۴Vعمق مدولاسیون به بیش از ۷۰ ٪ و تلفات الحاقی ۲,۲۱dB می‌رسد. در حالیکه با اعمال ولتاژ ۱,۸V در طول موج $7{,}5\mu m$ عمق مدولاسیون به بیش از ۸۵٪ رسیده و تلفات الحاقی آن به مقدار خیلی کوچک ۰,۸dB می‌رسد. با توجه به مقدار میدان بحرانی یا (break_down field) دی‌الکتریک استفاده شده در طراحی مدولاتور که برابر با $1\ V/nm$ است و مقدار ولتاژ بایاس کمی که برای رسیدن به بیشنیه عمق مدولاسیون و تلفات الحاقی کم مورد نیاز است، بنابراین مقدار ولتاژ اعمالی به الکترود گیت خیلی کمتر از ولتاژ شکشت دی الکتریک SiO_2 می‌باشد. (برای دی الکتریک استفاده شده با ضخامت 5nm مقدار ولتاژ شکست آن برابر با 5V می‌باشد)



شکل۶: عمق مدولاسیون مدولاتور بر حسب طول موج نور فرودی و سطح پتانسیل شیمیایی گرافن.

پهنای باند 3dB از طریق تحلیل مدل مداری و با در نظر گرفتن مقاومت‌ها و خازن گیت و خازن کوانتومی گرافن برای طول شکاف‌های مختلف بصورت زیر در می‌آید: با افزایش سطح فرمی سرعت مدولاسیون نیز زیاد شده بطوریکه در شکاف ۸۰۰nm سرعت مدولاسیون به بیشتر از ۲/۵ تراهرتز می‌رسد.



شکل۷: فرکانس قطع ۳dB مدولاتور برحسب سطح فرمی برای طول شکاف‌های مختلف.

نتیجه گیری

در این مقاله، یک مدولاتور تراهرتز مبتنی بر گرافن مورد طراحی و مدل سازی قرار گرفت. بر خلاف مدولاتورهای گرافنی مرسوم، در این ساختار از شیفت در فرکانس‌های رزونانس در ساختار فابری-پیرو در اثر تغییر در هدایت سطحی گرافن برای عمل مدولاسیون استفاده شده است. مدولاتور طراحی شده، دارای عمق مدولاسیون بسیار زیاد و ولتاژی عملکرد بسیار پایین است. برای دو طول موج $7{,}5\mu m$و۶ عمق مدولاسیون بترتیب ۷۰ و۸۵ درصد و تلفات الحاقی آنها بترتیب ۲,۲۱ dB و ۰,۸ است. سرعت و پهنای باند مدولاسیون با تحلیل مدار معادل الکتریکی ساختار مورد بررسی قرار گرفته و با کنترل و انتخاب مناسب ابعاد و بهینه کردن آنها سرعت مدولاسیون به بیشتر از ۲/۵THz رسیده است.

مرجع‌ها

[۱] A. Grigorenko, M. Polini, and K. Novoselov, "Graphene plasmonics," *Nature photonics*, vol. 6, p. 749, 2012.

[۲] N. Jiang, X. Zhuo, and J. Wang, "Active plasmonics: principles, structures, and applications," *Chemical reviews*, vol. 118, pp. 3054-3099, 20.۱۷

[۳] B. Jafari and H. Soofi, "High bandwidth and responsivity mid-infrared graphene photodetector based on a modified metal–dielectric–graphene architecture," *Applied Optics*, vol. 58, pp. 6280-6287, 2019.

[۴] H. Liu, Y. Liu, and D. Zhu, "Chemical doping of graphene," *Journal of materials chemistry*, vol. 21, pp. 3335-3345, 2011.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-19]