بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۱۱-۹ بهمن ۱۳۹۷

مدولاتور الکترواپتیکی چند بانده مبتنی برگرافن در بازه تراهرتز

بهنام جعفری[۱]، هادی صوفی[۱]، حمید واحد[۱]، علی اکبر شوقی[۱]

[۱]دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تبریز، تبریز ۵۱۶۶۶۱۶۴۷۱، ایران

چکیده - در این مقاله یک مدولاتور الکترواپتیکی چندبانده مبتنی بر گرافن تک‌لایه طراحی و مدلسازی شده است که در ساختار آن، نانو آنتن‌های فلزی برای افزایش جذب و بهبود مشخصات مدولاتور قرار گرفته است . با یکپارچه کردن گرافن با ساختار ساندویچی فلز/دی‌الکتریک/گرافن امواج پلاسمونی شدیدا حبس شده در سطح گرافن در داخل ساختار MDG تحریک شده و با انتشار در جهت متضاد آنها در سطح گرافن باعث ایجاد رزونانس فابری_پرو شده که باعث افزایش جذب مولتی باند در گرافن می‌شود. با اعمال ولتاژ بایاس طیف عبور مدولاتور شیفت پیدا می‌کند و بیشینه مقدار عبور از سیستم دستخوش تغییرات زیادی می‌شود. در طول موج ۳۱/۷μm می توان به عمق مدولاسیون در حدود ۱۸dB دست یافت. برخلاف دیگر مدولاتورهای مبتنی برگرافن که اساس مدولاسیون از طریق اعمال تغییرات در جذب آن صورت می‌گیرد در این ساختار عمل مدولاسیون از طریق شیفت یافتن فرکانس پیک‌های عبور فابری-پرو اتفاق می‌افتد.

کلید واژه- مدولاتورهای الکترواپتیکی، گرافن پلاسمونیک، رزونانس فابری پرو.

Graphene based multiband THz electro-optic modulator

Behnam jafari[1], Hadi soofi[1], Hamid Vahed[1], Ali Akbar Shoghi[1]

[1]School of Engineering- Emerging Technologies, University of Tabriz, Tabriz 5166616471, Iran

Abstract- In this article a multiband electro-optic modulator based on single layer graphene is designed and numerically investigated. The designed modulator incorporates metallic Nano-antennas to enhance the absorption and hence the modulator parameters. Due to integrating graphene into a metal-dielectric-graphene (MDG) sandwich structure, highly confined graphene plasmons (GPs) are excited in the MDG structure and multiple order Fabry-Perot (FP) resonances are formed by interference of oppositely propagating GPs waves that account for the multiband absorption enhancement. The applied bias voltage shifts the transmission spectra which in turn shifts the maximum transmission through the structure. At 31.7μm, the modulation depth is as high as 18dB. Unlike other graphene-based modulators that modulation is based on changes in graphene absorption, in this case modulation is based on frequency shifting of FP resonances.

Keywords: Electro optical modulator, Graphene plasmonic, Fabry-Perot resonance.

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

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

مقدمه

بدلیل کاربردهای فراوان و روبه گسترش مدولاتورهای نوری مانند لیزرهای مدرن، مخابرات نوری و ارتباطات تراهرتز تحقیقات و پژوهش‌های مختلفی بر روی آنها انجام شده است[۱]. به لطف پیشرفت های اخیر و چشمگیر در علم نانو، تکنولوژی و دانش مواد، موادی با کاربردها و خصوصیات ویژه بصورت گسترده در ساخت و طراحی مدولاتورهایی با کاربردهای جدید و پارامترهای بهبود یافته، مورد استفاده قرار گرفته‌اند. به عنوان مثال مواد گروه III-V [۲]، ژرمانیوم[۳]، پلیمرها و گرافن[۴] جای مناسبی در مدولاتورهای مبتنی بر سیلیکون برای بهبود پارامترهای کلیدی مانند عمق مدولاسیون، سرعت مدولاسیون، کاهش دادن اندازه‌ی مدولاتور، بهبود بازه‌ی طول‌موجی و دیگر پارامترهای مهم مدولاتورها کسب کرده‌اند. یکی از معایب مدولاتورهای ابتدایی مبتنی بر سیلیکون کم بودن عمق مدولاسیون در آنها بود برای غلبه بر این مشکل این مدولاتورها در اندازه بزرگی طراحی و ساخته می‌شدند و دلیل آن نسبتا ضعیف بودن اثر الکترو_اپتیک آنها است. در مقابل استفاده از گرافن در مدولاتورهای نوری می‌تواند به محدودیتهای سرعت، اندازه و عمق مدولاسیون غلبه کند. از ویژگی‌های منحصر بفرد گرافن می‌توان به دینامیک بسیار سریع حامل‌ها ، جذب مستقل از طول موج[۵]، مشخصات نوری قابل تنظیم با استفاده از دوپینگ الکترواستاتیکی ، نرخ تلفات کم، قابلیت تحرک بالا و توانایی حبس انرژی الکترومغناطیسی در حجم بسیار کوچک[۶] اشاره کرد. از طرف دیگر، میزان جذب نوری گرافن تک لایه برای یک موج الکترومغناطیسی که به صورت عمود بر آن بتابد، تقریبا مستقل از فرکانس نور و برابر با $\alpha\pi = 2.3\%$ است. یکی از روش‌های نوین پیشنهاد شده در سالیان اخیر برای افزایش اندرکنش موج الکترومغناطیسی با گرافن، استفاده از نانوساختارهای‌های فلزی و استفاده از اثرات پلاسمونیک است. در پژوهش حاضر با استفاده گرفتن از مزایای گرافن، تحریک امواج پلاسمونی در آن و تداخل فابری پرو بین امواج پلاسمونی قطبیده شده توانستیم به طیف عبور 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. اساس مدولاسیون در این ساختار شیفت طیف عبوری از سیستم است برای مثال با اعمال پالس الکتریکی با ولتاژ پایین ۰/۷ ولت و ولتاژ بالای ۱/۵ ولت در طول موج ۳۱ میکرومتر عمل مدولاسیون با بیشترین عمق مدولاسیون اتفاق می‌افتد بطوریکه طیف عبور سیستم در حدود ۷۰ درصد تغییر می‌کند. با افزایش ولتاژ گیت طول‌موج عملیاتی مدولاتور به سمت طول موج‌های پایین شیفت پیدا می‌کند در حالیکه عمق مدولاسیون بیشترین مقدار خود را خواهد داشت.

طراحی مدولاتور

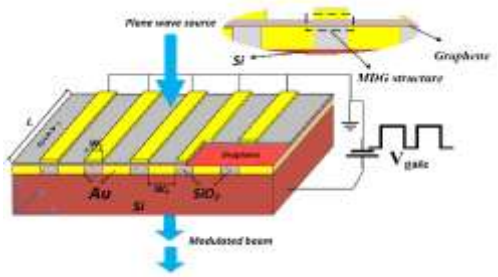
شکل۱ ساختار مدولاتور پیشنهادی در سه و دو بعد را نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود نانو آنتن‌ها در هر دو طرف بالا و پایین گرافن قرار داده شده‌اند. نانو آنتن‌های بالایی توسط دی‌الکتریکی با ضخامت $5nm$ از گرافن جدا شده‌اند. عرض هریک از نانو آنتن ها ($W_t=W_b=1\mu m$) است و فرض شده است که طول آنها L در مقابل عرضشان به اندازه‌ی کافی بزرگ باشد. بستر سیلیکونی به ضخامت ۳ میکرومتر که به عنوان گیت برای کنترل پتانسیل الکتروشیمیایی گرافن عمل عمل می کند بطور مستقیم به نانو آنتن های پایینی متصل شده است. یک موج تخت با قطبش عمود بر نانوآنتن‌ها در راستای $z-$ و واقع در نقطه‌ی $z=4\mu m$ به سیستم تابانیده می‌شود با گذر از مدولاتور موج نوری مدوله شده از پایین ساختار خارج می‌شود.

تحلیل نوری ساختار به روش FDTD انجام شده است که در آن طلا به عنوان ماده‌ای از جنس فلز با قابلیت گذردهی

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

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

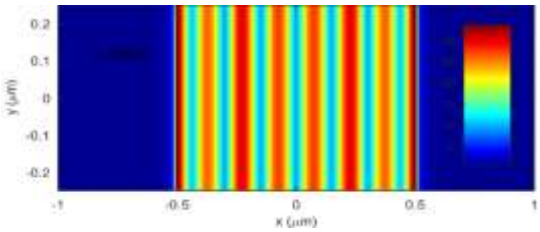
بدست آمده از آزمایشات تجربی مدل شده است. گرافن بصورت ماده‌ی دو بعدی با استفاده از هدایت سطحی آن مدلسازی شده است. معادلات هدایت سطحی گرافن از دو قسمت هدایت نوری مربوط به گذارهای بین باندی و هدایت نوری متناسب با گذارهای درون باندی تشکیل شده است. در بازه‌ی تراهرتز هدایت نوری گرافن بطور عمده توسط گذارهای درون باندی آن مشخص می‌شود لذا می‌توان هدایت نوری گرافن را بصورت مدل شبه درود برای گذارهای درون باندی بصورت رابطه ۱ بازنویسی کرد:



شکل ۱: ساختار مدولاتور. ناحیه‌ی مستطیلی مشخص شده در برش عرضی محدوده ی رزوناتور فابری-پرو را نشان می دهد.

$$\sigma(\omega)=\sigma_{dc}(E_f)/(1+\omega^2\tau^2) \qquad (۱)$$

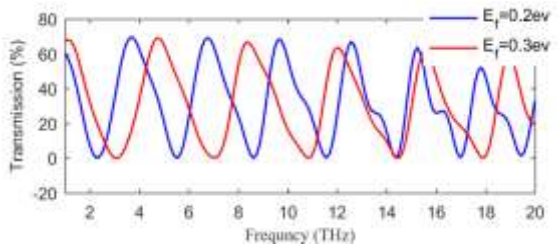
در معادله‌ی بالا $\sigma_{dc}(E_f)$ بیانگر هدایت الکتریکی dc گرافن است که وابسته به موقعیت تراز فرمی است. همانطوری که از معادله پیدا است، در این بازه جذب تراهرتزی گرافن می‌تواند بوسیله‌ی تنظیم تراز فرمی یا به عبارت دیگر دوپینگ گرافن مدوله شود. شکل ۲ توزیع میدان الکتریکی در سطح گرافن در فرکانس ۱۰THz را نشان می‌دهد. بدلیل تقارن ساختار امواج پلاسمونی در هردو سمت کانال گرافنی تحریک می شوند. این امواج پلاسمونی در سطح گرافن در جهت مخالف شروع به حرکت می کنند به عبارت دیگر گوشه های نانوآنتن طلا بصورت دو قطبی عمل می‌کند. با حرکت امواج پلاسمونی در سطح گرافن و تداخل آنها با یکدیگر باعث ایجاد تداخل فابری پرو در ساختار فلز/دی الکتریک/گرافن می شود. در فرکانس هایی که در آن تداخل امواج پلاسمونی باهم سازگار هستند طیف عبور از سیستم بیشترین مقدار خود را خواهد داشت و در فرکانس هایی که امواج پلاسمونی رونده در سطح گرافن تداخل ناسازگار دارند، مولفه‌ی میدان الکتریکی نور در سطح گرافن تلف می شود یا به عبارت دیگر در این فرکانس ها جذب گرافن بیشترین مقدار را خواهد داشت.



شکل ۲: توزیع میدان الکتریکی در سطح گرافن در فرکانس ۱۰ تراهرتز، رزونانس فابری پرو امواج پلاسمونی در سطح گرافن به وضوح قابل مشاهده است. مرتبه ب رزونانس در این فرکانس ۷ است.

نتایج و بحث

طیف عبوری از مدولاتور در شکل ۳ برای دو مقدار تراز فرمی نشان داده شده است. تعداد نقاط روشن و تاریک در توزیع میدان الکتریکی نشان داده شده است. لازم به ذکر است که بدلیل متقارن بودن ساختار مرتبه‌ی رزونانس فابری پرو همواره فرد خواهد بود. اگر M مرتبه ی رزونانس باشد در آنصورت طول موج امواج پلاسمونی از رابطه‌ی $\lambda_{GP}=2W/M$ محاسبه می‌شود، که در آن W عرض نانوآنتن‌ها است. با افزایش فرکانس نور فرودی مرتبه‌ی رزونانس افزایش پیدا میکند.



شکل ۳: طیف عبوری مدولاتور برحسب فرکانس. دیده می شود که با تغییر اندک در تراز فرمی مقدار عبور در بعضی از فرکانس ها به مقدار قابل توجهی تغییر می کند.

تغییرات تراز فرمی گرافن بر حسب غلظت حامل‌ها در آن از رابطه‌ی $E_f=\hbar\upsilon_f\sqrt{\pi n}$ مشخص می‌شود و ولتاژ گیت

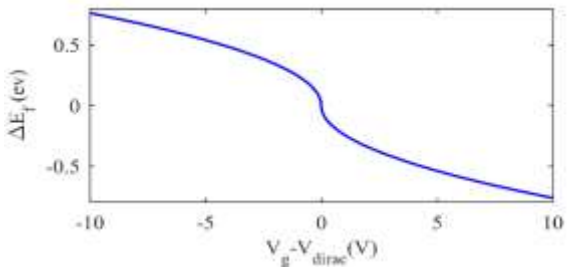
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

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

طبق رابطه‌ی $n=\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r V_g}{d_{ox}}$ باعث تغییر غلظت حامل‌ها در گرافن می‌شود. بنابراین طبق مدل صفحات خازنی:

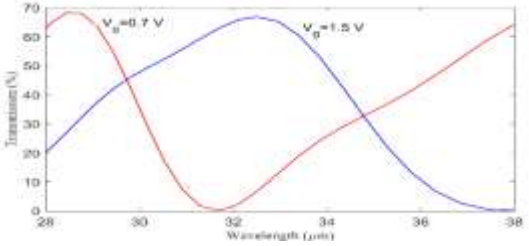
$$\left|\Delta E_f\right| = \hbar v_f \sqrt{\frac{\pi}{e}\frac{\varepsilon_0\varepsilon_r}{d_{ox}}\left|V_g - V_{dirac}\right|} \qquad (۲)$$

در رابطه ی بالا ε_0 ضریب گذردهی خلاء، ε_r ضریب گذردهی دی الکتریک، d_{ox} ضخامت دی‌الکتریک و $v_f \approx 10^6 \frac{m}{s}$ سرعت فرمی گرافن است. در شکل ۴ تغییرات تراز فرمی بر اثر اعمال ولتاژ بایاس نشان داده شده است.

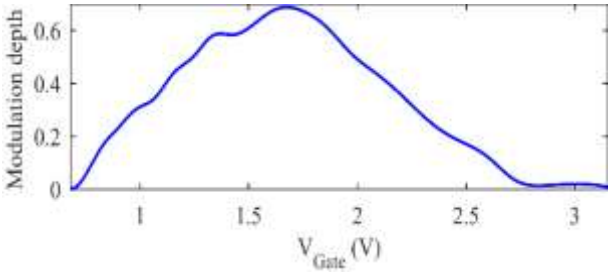


شکل ۴: تغییرات سطح فرمی برحسب ولتاژ بایاس

برای یک بازه‌ی طول‌موجی محدودتر طیف عبور مدولاتور در شکل ۵ آورده شده است. وقتی که سطح پایین پالس اعمالی به گیتV_{g1}=۰/۷V باشد، کمترین مقدار عبور در طول موج ۳۱/۷μm اتفاق می افتد. با افزایش ولتاژ گیت عمق مدولاسیون بتدریج افزایش پیدا می‌کند و سپس بتدریج کاهش پیدا می‌کند. نمودار عمق مدولاسیون برحسب ولتاژ اعمالی در شکل ۶ آورده شده است. در ولتاژ V_g=۱/۶۷ V بیشترین عمق مدولاسیون برای طول موج ۳۱/۷μm بدست می آید که برابر با ۷۰٪ (۱۸dB) است.



شکل ۵: طیف عبوری مدولاتور به ازای ولتاژ گیت اعمالی مختلف



شکل ۶: نمودار عمق مدولاسیون برحسب ولتاژ گیت اعمالی. عمق مدولاسیون در ۱/۶۷ ولت بیشترین مقدار را دارد.

نتیجه‌گیری

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 مثال در طول موج ۳۱/۷μm برای داشتن عمق مدولاسیون ۷۰٪ تنها نیاز به تغییر ولتاژ اعمالی به گرافن به اندازه ۰/۶۷ V است.

مرجع‌ها

[1] L. Siyuan, W. Yanan, T. Xin, “Graphene-based optical modulators”, Nanoscale research letters, Vol. 10, p. 199, 2015.

[2] T. Yongbo, P. Jonathan, “Over 67 GHz bandwidth hybrid silicon electroabsorption modulator with asymmetric segmented electrode for 1.3μm transmission”, Optics express, Vol. 20, pp. 11529-11535, 2012

[3] C. Papichaya, M. Delphine, “23 GHz Ge/SiGe multiple quantum well electro-absorption modulator”, Optics Express, Vol. 20, pp. 3219-3224, 2012.

[4] L. Ming, Y. Xiaobo, “A graphene-based broadband optical modulator”, Nature, Vol. 474, p. 64, 2011.

[5] J. Dawlaty, S. Shivaraman, et al., “Measurement of the optical absorption spectra of epitaxial graphene from terahertz to visible”, Applied Physics Letters, vol. 93, p. 131905, 2008.

[6] A. Grigorenko, M. Polini K. Novoselov, “Graphene plasmonics”, Nature Photonics, vol. 6, pp. 749-758, 2012.

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

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