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

معرفی یک مدولاتور جدید الکتروجذبی پربازده و غیرحساس به قطبش بر پایه گرافن

محمد نجفی حاجی‌ور، محمود حسینی فرزاد

بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

چکیده – در این مقاله یک ساختار جدید برای از بین بردن حساسیت عملکرد مدولاتورهای گرافنی به قطبش نور فرودی معرفی شده است. این ساختار شامل یک موجبر مدفون شده با مقطع مربعی می‌باشد. هر کدام از دیواره‌های عمودی موجبر با یک لایه گرافن پوشیده شده است و در کف موجبر هم دو لایه گرافن وجود دارد. مدهای قطبشی مختلف برهم‌کنش یکسانی با لایه‌های گرافن دارند و بنابراین عملکرد مدولاتور برای هر دو مد تقریبا یکسان است. نتایج شبیه‌سازی برای عمق مدولاسیون برای دو مد TE و TM و اختلاف آنها به صورت تابعی از ابعاد موجبر آورده شده‌اند و نیز اتلاف ساختار برای دو مد، که می‌توان آن را بخشی از اتلاف ورودی مدولاتور در نظر گرفت، بر حسب ابعاد مورد بررسی قرار گرفته است. به علاوه عمق مدولاسیون میانگین و نیز اتلاف میانگین نیز بررسی شده‌اند که نتایج حاصل نشان می‌دهند ساختار پیشنهادی نشان دهنده یک مدولاتور غیر حساس به قطبش قابل توجه بر پایه گرافن می‌باشد.

کلید واژه‌ها: اتلاف، غیر حساس به قطبش، عمق مدولاسیون، مدولاتور گرافنی، موجبر مدفون شده

Introducing a new high-performance, polarization insensitive graphene-based modulator

Mohamad Najafi Hajivar*[1] and Mahmood Hosseini- Farzad[1]**

[1] Department of Physics, College of Science, Shiraz University

* m.najafi984@gmail.com
** hosseinif@shirazu.ac.ir

Abstract- In this paper, a new structure is proposed in order to eliminate the sensitivity of the graphene modulators to the incident light polarization. This structure consists of a square cross section buried waveguide. Each vertical wall of the waveguide is covered by a graphene layer and there are two graphene layers underneath the waveguide. Different polarization modes have the same interaction with graphene layers and so the modulator performance is almost the same for both modes. The simulation results for modulation depth of TE and TM modes and their differences, as a function of waveguide's dimension are presented, also, loss of the structure for two modes (which can be considered as a part of the insertion loss of the modulator) with respect to dimensions is investigated. Also, the average modulation depth and also average loss are also studied. The results show that the proposed structure demonstrate a remarkable polarization independent graphene-based modulator.

Keywords: Buried waveguide, Graphene modulator, Loss, Polarization insensitive, Modulation depth,

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

مقدمه

مدولاتورهای گرافنی معرفی شده علی رغم داشتن مزایایی چون سرعت بالا، توان مصرفی کم، سایز کوچک و عمق مدولاسیون زیاد، دارای یک نقص بسیار مهم هستند و آن وابستگی عملکرد این مدولاتورها به قطبش نور فرودی می‌باشد. بدین معنی که بسته به نوع قطبش نور فرودی، عمق مدولاسیون دستخوش تغییر می‌شود[۱]. از طرفی اتلاف ذاتی خود موجبر، که می توان آن را بخشی از اتلاف ورودی مدولاتور در نظر گرفت، نیز به قطبش نور بستگی دارد و مقدار آن برای دو قطبش عمود بر هم کاملا با هم متفاوت است[۲]. نتیجه وابستگی اخیر این است که با فرض یکسان بودن سهم دو قطبش در نور فرودی، به دلیل اتلاف متفاوت برای دو مد قطبش، سهم دو قطبش در نور مدوله شده یکسان نخواهد بود، و نور خروجی دارای قطبشی متفاوت از نور فرودی خواهد بود. علاوه بر این اتلاف بیشتر برای یک مولفه قطبش باعث می‌شود که اگر این مدولاتورهای رایج در یک ساختار اپتیک مجتمع به کار گرفته شوند، برای آشکارسازی مولفه با اتلاف بیشتر، باید توان بیشتری از آن را وارد مدولاتور کرد و این خود به معنی افزایش توان مصرفی کل می‌باشد. ساختار مدولاتورهای گرافنی رایج از یک موجبر مستطیلی تشکیل شده است که یک یا چند لایه گرافن بر روی یا زیر آن قرار گرفته است. با اتصال گرافن به الکترودهای فلزی مانند طلا، سیگنال الکتریکی از طریق این الکترودها به گرافن اعمال می‌شود[۳]. سیگنال الکتریکی اعمال شده به گرافن باعث تغییر چگالی حامل‌های بار در گرافن و در نتیجه تغییر پتانسیل شیمیایی آن می‌شود. با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن قسمت حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی گرافن تغییر می‌کند. از آنجا موضوع اصلی این مقاله مدولاتور الکتروجذبی است، تغییرات قسمت موهومی گذردهی الکتریکی گرافن از اهمیت بیشتری برخوردار است. اگر پتانسیل شیمیایی گرافن را طوری تغییر دهیم که از نصف انرژی فوتون نور فرودی عبور کند، پدیده‌ای به نام انسداد پاولی رخ می‌دهد و باعث می‌شود که الکترون‌های موجود در نوار ظرفیت نتوانند فوتون‌های نور فرودی را جذب نمایند، که این به معنای کاهش جذب به میزان قابل توجهی و بنابراین کوک‌پذیری گرافن است[۳]. یکی از ویژگی‌های اصلی گرافن ناهمسانگرد بودن آن است به طوری که گذردهی الکتریکی آن در صفحه گرافن کاملا با همسان خود در جهت عمود بر صفحه گرافن تفاوت دارد[۴].

گذردهی الکتریکی گرافن

گذردهی در راستای صفحه را با $\varepsilon_{\parallel}$ و مولفه آن در راستای عمود بر صفحه را با $\varepsilon_{\perp}$ نمایش می‌دهیم[۴].

$$\varepsilon_{\parallel}(E_p,E_f)=\varepsilon'(E_p,E_f)+i\varepsilon''(E_p,E_f) \qquad (۱)$$

$$\varepsilon'(E_p,E_f)=1+\frac{e^2}{8\pi E_p\varepsilon_0 d}ln\left[\frac{(E_p+2|E_f|)^2+\Gamma^2}{(E_p-2|E_f|)^2+\Gamma^2}\right]-\frac{e^2}{\pi\varepsilon_0 d}\frac{|E_f|}{E_p^2+(1/\tau)^2} \qquad (۲)$$

$$\varepsilon''(E_p,E_f)=\frac{e^2}{84E_p\varepsilon_0 d}\left(1+\frac{1}{\tau}\left[tan^{-1}\left(\frac{E_p-2|E_f|}{\Gamma}\right)-tan{-}1Ep{+}2EfΓ{+}e2\pi\tau Ep\varepsilon 0\,d\,EfEp2{+}1\tau 2\right.\right. \qquad (۳)$$

همان‌طور که مشخص است، ε' قسمت حقیقی و ε'' قسمت موهومی گذردهی می‌باشند که با رهیافت کرامرز-کرونیگ به دست آمده‌اند که در آن‌ها E_p انرژی فوتون فرودی، E_f انرژی فرمی یا همان پتانسیل شیمیایی، d ضخامت لایه گرافن که معمولا آن را در عمل برابر $1\,nm$ اختیار می‌کنند، Γ پهن‌شدگی گذار بین نواری در طیف بازتابی گرافن است که مقدار آن برابر 110 mev (۱۱۰ میلی‌الکترون‌ولت) می‌باشد و $(1/\tau)$ نرخ پراکندگی حامل‌ها است که به خاطر تاثیر ناچیز آن روی ثابت دی‌الکتریک غالبا مقدار آن را برابر صفر قرار می‌دهند. لازم به ذکر است که در روابط بالا هم سهم گذارهای بین-نواری هم سهم گذارهای درون-نواری به حساب آمده است. معمولا مقدار $\varepsilon_{\perp}$ را برابر 2.5 در نظر می‌گیرند[۴].

موجبر مدفون شده با دو لایه گرافن در کف و یک لایه روی هر کدام ازدیواره‌های جانبی

در این مقاله یک ساختار جدید به منظور از کاهش حساسیت عملکرد مدولاتورهای گرافنی به قطبش معرفی شده است. در این ساختار یک موجبر مدفون شده با مقطع مربعی از جنس سیلیکون، که لایه‌های گرافن بر روی دیواره‌های جانبی و کف آن قرار داده شده‌اند، به عنوان مدولاتور مورد استفاده قرار

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

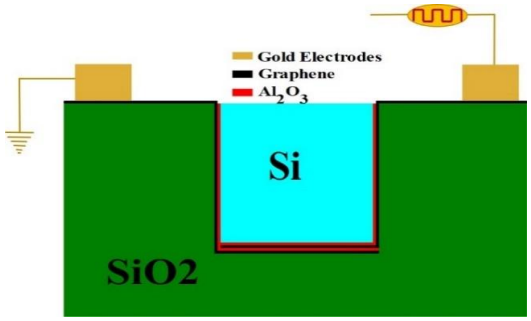
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

گرفته شده است. در عمل این ساختار بدین صورت ساخته می‌شود: ابتدا یک شیار مربعی با سایز مورد نظر در بستره، که در اینجا شیشه است، ایجاد می‌شود، سپس یک لایه گرافن بر روی کف و یکی از دیواره‌های جانبی نشانده می‌شود. در مرحله بعد یک لایه نازک با ضخامت چند نانومتر از یک ماده دی‌الکتریک مانند اکسید آلومینیوم بر روی گرافن نشانده می‌شود. مرحله بعدی شامل لایه‌نشانی گرافن بر روی کف شیار و دیواره جانبی دیگر آن و نیز نشاندن لایه نازک اکسید آلومینیوم بر روی آن می‌باشد. بنابراین بر روی هر یک از دیواره‌های جانبی یک لایه گرافن و بر روی کف شیار دو لایه گرافن قرار داده شده است. در نهایت شیار توسط یک ماده با ضریب شکست بیشتر از بستره پر می‌شود. می‌توان با قرار دادن دو الکترود بر روی لایه‌های گرافن، سیگنال الکتریکی مورد نظر را به گرافن اعمال کرد (شکل ۱). ساختار متقارن است و دو لایه گرافن عمودی و دو لایه گرافن افقی، موجبر را احاطه کرده‌اند (شکل ۱)، که مد قطبش TM با دو لایه گرافن برهم‌کنش می‌کند و مد قطبش TE نیز با دو لایه گرافن برهم‌کنش دارد. توجه داشته باشید که در شکل ۱، راستای انتشار، که عمود بر صفحه است، محور z اختیار شده است. تانسور دی‌الکتریک برای لایه‌های گرافن افقی به این صورت است[۵]:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\parallel} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\perp} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\parallel} \end{pmatrix} \qquad (۴)$$

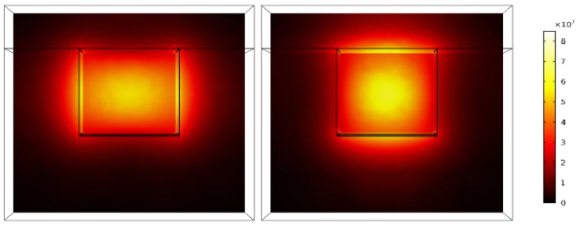
همچنین تانسور دی‌الکتریک برای لایه‌های گرافن عمودی به این شکل است[۵]:

$$\varepsilon = \begin{pmatrix} \varepsilon_{\perp} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{\parallel} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{\parallel} \end{pmatrix} \qquad (۵)$$

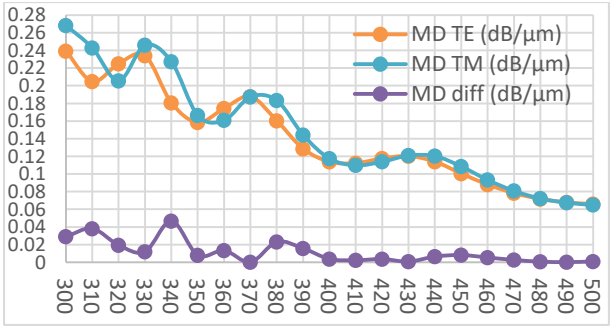


شکل ۱-نمای عرضی ساختار موجبر مدفون شده با لایه‌های گرافن بر روی دیواره‌های جانبی و کف آن به عنوان مدولاتور غیر حساس به قطبش

در شکل ۲ توزیع میدان را برای دو مد قطبشی TM و TE می توان مشاهده کرد. در این شکل می‌توان دید که شدت میدان برای مد TM بر روی کف موجبر تقریبا با شدت میدان برای مد TE بر روی دیواره‌های جانبی یکسان است.



شکل ۲- توزیع میدان در موجبر، مد TE سمت چپ و مد TM سمت راست (واحد میدان دلخواه است.)



شکل ۳- نمودار عمق مدولاسیون برای دو قطبش مختلف بر حسب طول ضلع مقطع مربعی موجبر

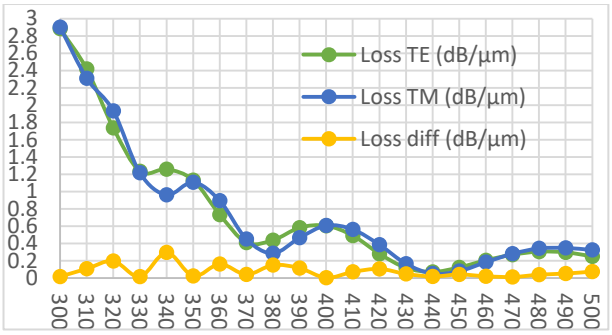
نتایج شبیه‌سازی

نتایج شبیه‌سازی برای این ساختار در شکل‌های ۳ تا ۶ آمده است. در شکل ۳ عمق مدولاسیون برای دو مد قطبش و اختلاف آن‌ها بر حسب طول ضلع مقطع مربعی موجبر آمده است. در این نمودار مشاهده می‌شود که عمق مدولاسیون برای هر دو مد قطبشی اختلاف چندانی با هم ندارند. در شکل ۴ نمودار اتلاف برای دو مد قطبش نور فرودی و اختلاف آن‌ها آورده شده است. این نمودار نشان‌دهنده آن است که اتلاف ذاتی موجبر نیز برای دو مد اختلاف کمی با هم دارند. در شکل ۵ اختلاف عمق مدولاسیون و اختلاف اتلاف به طور همزمان آورده شده است. نمودار شکل ۵ نشان می‌دهد که این ساختار کاملا با هدف این مقاله تناسب دارد، زیرا کمینه‌های نسبی هر دو کمیت به طرز جالبی کاملا بر هم منطبق شده‌اند. باید بین اتلاف میانگین و عمق مدولاسیون میانگین یک سازش برقرار کنیم، بدیهی است که ترجیح بر آن است که اولی باید کم باشد

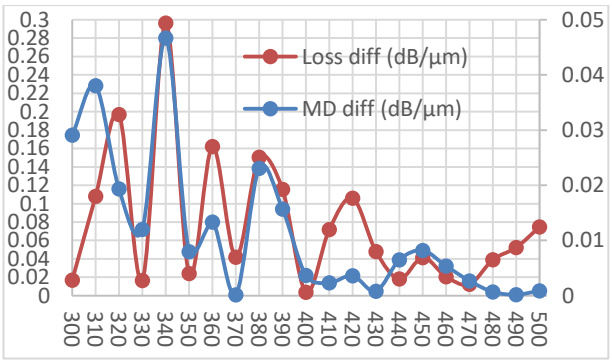
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]

و دومی باید زیاد باشد، تا توان مصرفی مدولاتور کمتر شود و همچنین سایز کلی مدولاتور نیز کوچک شود.

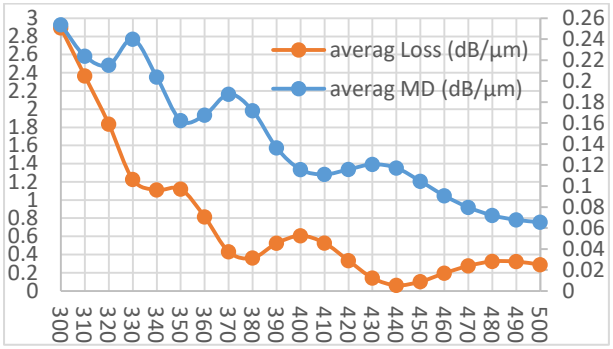


شکل ۴- نمودار اتلاف برای هر دو مد قطبش و اختلاف آن‌ها برحسب طول ضلع مقطع مربعی موجبر



شکل ۵- اختلاف عمق مدولاسیون و اختلاف اتلاف بر حسب طول ضلع موجبر مربعی، محور سمت راست مربوط به اختلاف اتلاف و محور سمت راست مربوط به اختلاف عمق مدولاسیون می باشد.

با رجوع به شکل ۵ می‌توان دید که این نقطه برای هر دو کمیت، یعنی اختلاف عمق مدولاسیون و اختلاف اتلاف، کمینه است، که به نظر می‌رسد که اختلاف عمق مدولاسیون به کمترین مقدار خود در بازه ۳۰۰ تا ۵۰۰ نانومتر برای طول ضلع موجبر رسیده است و اختلاف اتلاف نیز در این نقطه یک کمینه موضعی با در نمودار شکل ۶ میانگین اتلاف دو مد و میانگین عمق مدولاسیون دو مد قطبش به صورت همزمان آورده شده‌اند. این نمودار نشان می‌دهد که بیشینه‌های موضعی عمق مدولاسیون میانگین تقریبا با کمینه‌های موضعی اتلاف میانگین تلاقی دارند، با توجه به این نمودار انتخاب طول ضلع موجبر برابر با ۳۷۰ نانومتر به نظر می‌رسد انتخاب مناسبی باشد زیرا که هم عمق مدولاسیون میانگین بیشینه موضعی است و هم اتلاف تقریبا کمینه موضعی است. مقدار مناسب است. نکته مهم دیگری که می‌توان از نمودار شکل ۶ استخراج کرد این است که عمق مدولاسیون میانگین مقدار مناسبی دارد، به طوری که مثلا برای موجبری با طول ضلع ۳۷۰ نانومتر، این کمیت برابر $0.187\ dB/\mu m$ می‌باشد، که می‌توان در طول $16\ \mu m$ از موجبر به عمق مدولاسیون 3 dB دست پیدا کرد.



شکل ۶- اتلاف میانگین و عمق مدولاسیون میانگین به صورت تابعی از طول ضلع مقطع مربعی موجبر، محور سمت چپ مربوط به میانگین اتلاف و محور سمت راست مربوط به عمق مدولاسیون می باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی در این مقاله نشان می‌دهند که ساختار پیشنهادی حاضر یک گزینه بسیار مناسب برای طراحی و ساخت مدولاتورهای گرافنی غیرحساس به قطبش می‌باشد. به علاوه نتایج فوق نشان می‌دهند که با انتخاب سایز مناسب برای موجبر، می‌توان به عمق مدولاسیون نسبتا بالایی دست پیدا کرد که این خود باعث کاهش طول مدولاسیون به میزان قابل توجهی خواهد شد.

مرجع‌ها

[1] Hu, Xiao, and Jian Wang. "Design of graphene-based polarization-insensitive optical modulator." *Nanophononics* 7, no. 3 (2018): 651-658.

[2] Iizuka, Norio, Kei Kaneko, and Nobuo Suzuki. "Polarization dependent loss in III-nitride optical waveguides for telecommunication devices." *Journal of applied physics* 99, no. 9 (2006): 093107.

[3] Liu, Ming, Xiaobo Yin, Erick Ulin-Avila, Baisong Geng, Thomas Zentgraf, Long Ju, Feng Wang, and Xiang Zhang. "A graphene-based broadband optical modulator." *Nature* 474, no. 7349 (2011): 64.

[4] Kim, Jonghwan, Hyungmok Son, David J. Cho, Baisong Geng, Will Regan, Sufei Shi, Kwanpyo Kim, Alex Zettl, Yuen-Ron Shen, and Feng Wang. "Electrical control of optical plasmon resonance with graphene." *Nano letters* 12, no. 11 (2012): 5598-5602.

[5] Amin, Rubab, Zhizhen Ma, Rishi Maiti, Sikandar Khan, Jacob B. Khurgin, Hamed Dalir, and Volker J. Sorger. "Attojoule-efficient graphene optical modulators." *Applied Optics* 57, no. 18 (2018): D130-D140.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-10-31]