طراحی و شبیه‌سازی یک مدولاتور الکترواپتیکی غیر حساس به قطبش برپایه گرافن تک‌لایه

محمد نجفی حاجی‌ور، محمود حسینی فرزاد

بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

چکیده –در این مقاله یک ساختار جدید برای بهبود عملکرد مدولاتورهای گرافنی پیشنهاد شده است. عملکرد مدولاتورهای گرافنی ساخته شده تاکنون، به قطبش نور فرودی وابسته است؛ به طوری که این مدولاتورها قطبش *TM* را بهتر از قطبش *TE* مدوله‌سازی می‌کنند. مسئول این اختلاف عملکرد ناهمسانگردی گرافن است، که باعث شده است که عملکرد مدولاتورهای رایج شدیدا به قطبش وابسته باشد. در این مقاله با افزودن یک لایه گرافن به دیواره موجبر، علاوه بر گرافن موجود در سقف موجبر، وابستگی عملکرد مدولاتور به قطبش تا حد زیادی از بین رفته است. نتایج شبیه‌سازی حاکی از آن است که علاوه بر از بین رفتن حساسیت مدولاتور به قطبش نور، عملکرد کلی مدولاتور نیز تا حد قابل ملاحظه‌ای بهبود یافته است.

کلید واژه- گرافن، مدولاتور گرافنی، حساس به قطبش، گذردهی الکتریکی ناهمسانگرد

Designing and Simulation of a Polarization Insensitive Electro-optic Modulator based on Monolayer Graphene

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

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

Abstract- In this paper, a new structure is proposed to improve the performance of graphene modulators. The performance of the graphene modulators has generated so far depends on the polarization of incident light, so that these modulators modulate TM polarization better than the TE polarization. Responsible for this performance difference is the anisotropy of graphene, which has caused the performance of the common modulators is strongly dependent on polarization. In this paper by adding a graphene layer to the waveguide side-wall, in addition to graphene existing in the top of waveguide, Performance dependency of the modulator to polarization has greatly disappeared. The simulation results indicate that, in addition to eliminating the sensitivity of the modulator to the polarization of light, the overall performance of the modulator has also been significantly improved.

Keywords: graphene, graphene modulator, polarization sensitive, anisotropic electric permittivity

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

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

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر مواد دوبعدی مورد توجه بسیاری از محققان حوزه الکترواپتیک قرار گرفته‌اند، از آن جمله می‌توان به گرافن، چالکوجناید و فسفر سیاه اشاره کرد. این مواد برای دستیابی به ابزارهای نوری با ویژگی‌های منحصربه‌فرد، بسیار نویدبخش هستند. در بین این مواد، گرافن برای طراحی و ساخت مدولاتورهای الکترواپتیکی با ویژگی‌هایی نظیر سرعت بالا، توان مصرفی بسیار کم و ... مناسب به نظر می‌رسد [۱]. ویژگی‌های منحصربه‌فرد گرافن که آن را به گزینه‌ای بسیار جذاب برای کاربردهای الکترواپتیکی تبدیل کرده است، به طور خلاصه بدین شرح است: ۱- کوک‌پذیری؛ بدین معنی که با تغییر چگالی حامل‌های گرافن می‌توان قسمت حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی آن را به طور قابل ملاحظه‌ای تغییر داد. چگالی حامل‌های گرافن را می‌توان با اعما ولتاژ یا یا تاباندن نور تغییر داد. ۲- سرعت بالای پاسخ گرافن، ۳- طیف پهن ویژگی‌های گرافن، مثلا جذب آن در پهنای طیفی وسیعی یکسان است. ۴- سازگاری با ساختارهای CMOS [۳-۵].

علی‌رغم همه ویژگی‌های مطلوب مذکور، مدولاتورهای ساخته شده برپایه گرافن تاکنون، یک عیب بسیار مهم دارند و آن این است که این مدولاتورها شدیدا به قطبش نور حساس هستند. به عبارت ساده‌تر مدولاتورهای ساخته شده بر پایه گرافن، دو قطبش TE و TM را مانند هم مدوله‌سازی نمی‌کنند و عملکرد آن‌ها برای این دو نوع قطبش تفاوت آشکاری دارد[۳و۴].

مسئول مستقیم این اختلاف عملکرد، ناهمسانگردی گرافن است. به طور کلی گرافن یک ماده ناهسانگرد است و این ناهمسانگردی یک ویژگی ذاتی گرافن است. گرافن یک آرایه دوبعدی از اتم‌های کربن است که در یک ساختار لانه زنبوری در کنار هم قرار گرفته‌اند. هر اتم کربن با سه اتم کربن پیوند دارد و یک الکترون آزاد دارد. الکترون‌های آزاد گرافن در صفحه گرافن دارای تحرک‌پذیری بسیار زیاد و در راستای عمود بر صفحه گرافن، دارای تحرک‌پذیری بسیار کم هستند. بنابراین ویژگی‌های گرافن مثلا گذردهی الکتریکی آن در صفحه گرافن، با همتای خود در جهت عمود بر صفحه گرافن تفاوت بسیار زیادی دارند. در جهت صفحه، گرافن مانند یک فلز، البته با ویژگی جالب کوک‌پذیری، رفتار می‌کند، این در حالی است که در راستای عمود بر صفحه، گرافن مانند یک دی‌الکتریکی عمل می‌کند[۱].

از آن‌جا که ناهمسانگردی یاد شده یک ویژگی ذاتی گرافن است و نمی‌توان آن را از بین برد و یا تغییر داد، ما در این مقاله یک ساختار جدید برای بهبود عملکرد مدولاتورهای گرافنی و کاهش اختلاف عملکرد این مدولاتورها در دو مد TE و TM معرفی کرده‌ایم که منجر به نتایج بسیار امیدوارکننده‌ای نیز شده است.

۲- گذردهی الکتریکی گرافن

در ابتدا به طور مختصر به بررسی گذردهی الکتریکی گرافن می‌پردازیم. همان‌طور که بیان شد گذردهی گرافن در راستای صفحه آن با همتای خود در راستای عمود بر صحه گرافن کاملا متفاوت است. گذردهی در راستای صفحه را با $\varepsilon_{\parallel}$ و مولفه آن در راستای عمود بر صفحه را با $\varepsilon_{\perp}$ نمایش می‌دهیم[۲].

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

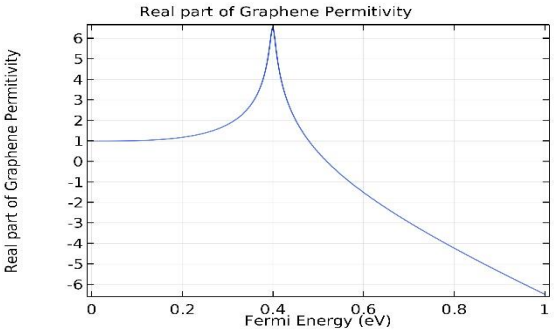
$$\varepsilon'(E_p,E_f)=1+\frac{e^2}{8\pi E_p\varepsilon_0 d}ln\left[\frac{(E_p+2|E_f|)^2+\Gamma^2}{(E_p-2|E_f|)^2+\Gamma^2}\right]- \quad (۲)$$
$$\frac{e^2}{\pi\varepsilon_0 d}\frac{|E_f|}{E_p^2+(1/\tau)^2}$$

$$\varepsilon''(E_p,E_f)=\frac{e^2}{84E_p\varepsilon_0 d}\Big(1+ \quad (۳)$$
$$\frac{1}{\tau}\left[tan^{-1}\left(\frac{E_p-2|E_f|}{\Gamma}\right)-tan^{-1}\left(\frac{E_p+2|E_f|}{\Gamma}\right)\right]\Big)+$$
$$\left(\frac{e^2}{\pi\tau E_p\varepsilon_0 d}\frac{|E_f|}{E_p^2+(1/\tau)^2}\right)$$

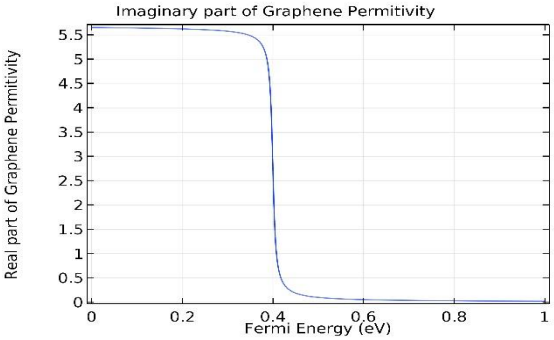
همان‌طور که مشخص است، ε' قسمت حقیقی و ε'' قسمت موهومی گذردهی می‌باشند که با رهیافت کرامرز-کرونیگ به دست آمده‌اند که در آن‌ها E_p انرژی فوتون فرودی، E_f انرژی فرمی یا همان پتانسیل شیمیایی، d ضخامت لایه گرافن که معمولا آن را در عمل برابر $1\,nm$ اختیار می‌کنند، Γ پهن‌شدگی گذار بین نواری در طیف بازتابی 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 مربوط به گذارهای بین-نواری هم سهم گذارهای درون-نواری به حساب آمده است. معمولا مقدار $\varepsilon_{\perp}$ را برابر 2.5 در نظر می‌گیرند[۲]. در شکل‌های ۱ و ۲ به ترتیب قسمت حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی گرافن برحسب پتانسیل شیمیایی یا همان انرژی فرمی ترسیم شده‌اند.

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

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



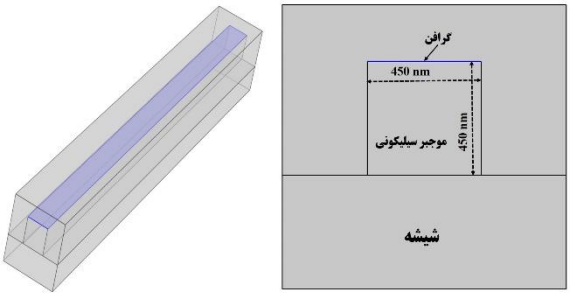
شکل ۱- قسمت حقیقی گذردهی الکتریکی موازی گرافن بر حسب انرژی فرمی در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر



شکل ۲- قسمت موهومی گذردهی الکتریکی موازی گرافن بر حسب انرژی فرمی در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر

۱-۲- ساختار رایج مدولاتورهای گرافنی

در شکل ۳ ساختار یک مدولاتور گرافنی را به طور شماتیک می‌توان مشاهده کرد. در اینگونه ساختارها گرافن معمولا تنها در بالای یک موجبر سیلیکونی قرار می‌گیرد و با اتصال الکترودهای الکتریکی از جنس‌های مختلف می‌توان سیگنال الکتریکی را به گرافن اعمال کرد[۳].

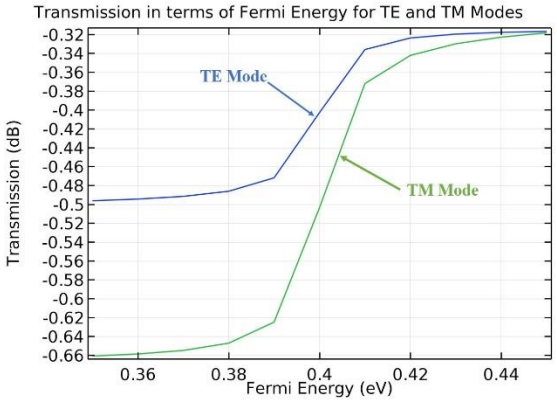


شکل ۳- سمت راست: نمای عرضی از یک نمونه مدولاتور گرافنی که به قطبش حساس است. سمت چپ: ساختار مدولاتور به صورت کلی (راستای انتشار x می‌باشد).

با اعمال سیگنال الکتریکی به گرافن، چگالی حامل‌های آن و در نتیجه انرژی فرمی آن تغییر می‌کند. با تغییر انرژی فرمی گذردهی موازی گرافن دچار تغییر می‌شود که منحنی تغییرات قسمت‌های حقیقی و موهومی آن به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ نمایش داده شده است. نکته بسیار مهمی که باید حتما به آن توجه شود این است که گذردهی عمودی گرافن با تغییر انرژی فرمی تقریبا هیچ تغییری نمی‌کند، که همان‌طور که بیان شد، این پدیده به دلیل ناهمسانگردی گرافن است. تانسور گذردهی الکتریکی گرافن برای ساختار موجود در شکل ۳ بدین شکل است[۵]:

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

که در آن $\varepsilon_{\parallel}$ از روابط ۱ تا ۳ به دست می‌آید و $\varepsilon_{\perp}$ هم معمولا برابر 2.5 فرض می‌شود. ساختار موجود در شکل ۳ با استفاده از نرم‌افزار کامسول طراحی شد و رفتار آن با تغییر انرژی فرمی برای هر دو مد TE و TM شبیه‌سازی شد. طول ساختار برابر با ۱۰ میکرومتر اختیار شد. با تغییر انرژی فرمی در بازه ۰/۳۵ تا ۰/۴۵ الکترون ولت، مشاهده می‌شود که مدولاسیون هر دو مد انجام می‌شود، بدین معنی که اختلاف قابل ملاحظه‌ای در میزان عبور هر دو مد به وجود می‌آید (شکل ۴). برای درک بهتر حالت ۰/۴۵ الکترون‌ولت را حالت روشن و حالت ۰/۳۵ الکترون‌ولت را حالت خاموش می‌نامیم. اما به وضوح از شکل ۴ پیدا است که عمق مدولاسیون معیاری از میزان مدوله‌سازی است و در اینجا برابر با اختلاف بین دو حالت روشن وخاموش است، برای دو مد تفاوت آشکاری دارد و این یعنی اینکه این ساختار، که یک ساختار رایج در مدولاتورهای گرافنی است، به قطبش حساس است و عملکرد آن برای دو مد قطبش TE و TM کاملا متفاوت است و این یک نقص بزرگ محسوب می‌شود.



شکل ۴- نمودار میزان عبور (بر حسب دسی‌بل) به صورت تابعی از انرژی فرمی برای دو مد قطبش TE و TM

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

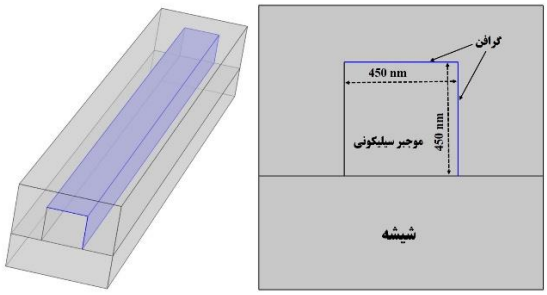
[Downloaded from opsi.ir on 2026-10-31]

۲-۲- ساختار پیشنهادی برای از بین بردن حساسیت به قطبش

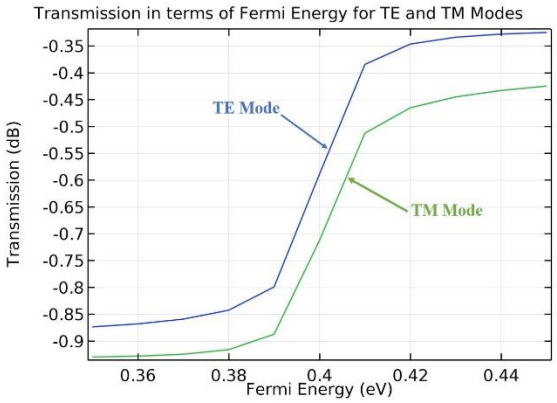
در این مقاله ما یک ساختار جدید برای از بین بردن وابستگی عملکرد مدولاتورهای گرافنی به قطبش پیشنهاد کرده‌ایم. در عمل با قرار دادن یک لایه گرافن اضافی بر روی دیواره گرافن می‌توان این نقص را تا حد زیادی اصلاح کرد. در شکل ۵ نمای عرضی و نمای شماتیک ساختار پیشنهادی نمایش داده شده است. در واقع با برهم زدن تقارن ساختار اختلاف عملکرد آن برای دو مد قطبش کاهش یافته است. تانسور گذردهی الکتریکی برای لایه گرافنی که برروی سقف موجبر قرار گرفته است، همان رابطه ۴ است، اما این تانسور برای لایه گرافنی که روی دیواره قرار دارد از رابطه زیر به دست می‌آید:

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

لازم به ذکر است که این مقاله راستای انتشار موج در موجبر را جهت مثبت x فرض کرده‌ایم. بنابراین جهت عمود بر گرافن روی سقف، محور z و جهت عمود بر گرافن دیواره، محور y می‌باشد. ساختار پیشنهادی باز هم با استفاده از نرم‌افزار کامسول شبیه‌سازی و عملکرد آن برای دو قطبش TE و TM بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی در شکل ۶ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل پیدا است، اختلاف عملکرد برای دو قطبش TE و TM تا حد بسیار خوبی کاهش یافته است. در واقع عمق مدولاسیون برای ساختار قبل (ساختار شکل ۳) برای مد TM حدود $0.034\,dB/\mu m$ و برای مد TE حدود $0.018\,dB/\mu m$ بوده است. معنی این اختلاف این است که ساختارهای رایج مد TM را تقریبا دو برابر مد TE مدوله‌سازی می‌کنند.



شکل ۵- سمت راست: نمای عرضی از مدولاتور گرافنی پیشنهادی که به قطبش حساس نمی‌باشد. سمت چپ: ساختار مدولاتور به صورت کلی، که علاوه بر یک لایه گرافن بالای (سقف) موجبر، یک لایه گرافن هم بر روی دیواره موجبر پیشنهاد شده است.



شکل ۶ نمودار میزان عبور (بر حسب دسی‌بل) به صورت تابعی از انرژی فرمی برای دو مد قطبش TE و TM

در ساختار پیشنهادی ما هر دو قطبش تقریبا به یک اندازه مدوله‌سازی می‌شوند. در ساختار پیشنهادی عمق مدولاسیون برای مد TE حدود $0.055\,dB/\mu m$ و برای مد TM حدود $0.051\,dB/\mu m$ به دست آمد، که به وضوح بهبود عملکرد ساختار پیشنهادی را نشان می‌دهد. بنابراین اضافه کردن یک لایه گرافن به دیواره موجبر، حساسیت به قطبش را برای ساختارهای رایج مدولاتورهای گرافنی تا حد زیادی از بین می‌برد. نکته بسیار مهم دیگر این است که افزودن این تک‌لایه گرافن به دیواره موجبر، عملکرد کلی مدولاتور نیز بهبود چشمگیری یافته است، به طوری که عمق مدولاسیون از حدود $0.034\,dB/\mu m$ به حدود $0.051\,dB/\mu m$ افزایش یافته است.

۳- نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که افزودن یک لایه گرافن به دیواره موجبر، علاوه بر گرافن موجود در سقف موجبر، نه تنها وابستگی عملکرد مدولاتور را به قطبش تا حد زیادی از بین می‌برد، بلکه عملکرد کلی آن را تا حد قابل ملاحظه‌ای بهبود می‌بخشد.

مراجع

[1] Ye, Sheng-Wei, et al. "Polarization-Independent Modulator by Partly Tilted Graphene-Induced Electro-Absorption Effect." *IEEE Photonics Technology Letters* 29, no. 1 (2017): 23-26.

[2] Kim, Jonghwan, et al. "Electrical control of optical plasmon resonance with graphene." Nano letters 12.11 (2012): 5598-5602.

[3] Liu, Ming, et al. "A graphene-based broadband optical modulator." Nature474.7349 (2011): 64-67.

[4] Koester, Steven J., et al. "High-speed waveguide-coupled graphene-on-graphene optical modulators." *Applied Physics Letters* 100, no. 17 (2012): 171107.

[5] Hao, Ran, et al. "Graphene Assisted TE/TM-Independent Polarizer Based on Mach–Zehnder Interferometer." *IEEE Photonics Technology Letters* 27, no. 10 (2015)

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

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