

Designing and Optimization of Plasmonic Modulator Structure Based on the Active Materials of ITO and Graphene

Abbas Eslami, *Ph.D. Student*, Mojtaba Sadeghi, *Assistant Professor*, Zahra Adelpour, *Assistant Professor*

Department of Electrical Engineering- Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran
abbas2002@gmail.com, sadeghi@iaushiraz.ac.ir, adelpour@aut.ac.ir

Abstract

In the last decade, optical integrated circuits, including modulators, have made significant progress in optical communications, imaging, and sensors. Among the active materials used in modulators, graphene and indium tin oxide (ITO) are some of the suitable options among the active materials for modulation action due to their epsilon-near-zero (ENZ) characteristics, speed, and considerable response. In this paper, by applying direct coupling of light, the structure of plasmonic modulator in three-dimensional mode has been designed. And by changing the thickness of ITO, HfO₂ (hafnium oxide) layers and waveguide width, the structure is optimized. Optimization thickness of 3 nm for ITO, 5nm for HfO₂ and 280nm for waveguide width is achieved. The results of three-dimensional simulations of this paper with appropriate coupling show that the insertion loss (IL) of three-dimensional mode have not changed and the extinction ratio (ER) of the modulator has been slightly reduced in comparison with two-dimensional mode. On the other hand, appropriate and optimal coupling has no effect on energy consumption. Three-dimensional results show that the proposed plasmonic modulator can achieve an extinction ratio of 13.9 dB, an insertion loss of 2.9 dB, modulation speed of 140.9 GHz and a very low power consumption of 1.51 fJ/bit for a 1 μm length of the modulator, at 0.5 V voltage and a wavelength of 1.55 μm. Our design demonstrates a considerable reduction in energy consumption and improvement in extinction ratio compared to previous works. Also, for a 2 μm length of the modulator, an extinction ratio of 27.76 dB, an insertion loss of 5.68 dB, modulation speed of 70.14 GHz and power consumption of 2.88 fJ/bit is achieved.

Keywords: graphene, high extinction ratio, indium tin oxide, low energy consumption, plasmonic modulator, three-dimensional

Received: 16 November 2021

Revised: 25 December 2021

Accepted: 20 January 2022

Corresponding Author: Dr. Mojtaba Sadeghi

Citation: A. Eslami, M. Sadeghi, Z. Adelpour, "Designing and optimization of plasmonic modulator structure based on the active materials of ITO and graphene", Journal of Intelligent Procedures in Electrical Technology, vol. 14, no. 53, pp. 159-170, June 2023 (in Persian).

طراحی و بهینه‌سازی ساختار مدولاتور پلاسمونیک مبتنی بر ماده فعال ITO و گرافن

عباس اسلامی، دانشجوی دکتری، مجتبی صادقی، استادیار، زهرا عادل‌پور، استادیار

گروه مهندسی برق- واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
abbas2002@gmail.com, sadeghi@iaushiraz.ac.ir, adelpour@aut.ac.ir

چکیده: در یک دهه اخیر مدارهای مجتمع نوری مانند مدولاتورها، پیشرفت چشم‌گیری در زمینه‌های مختلف مانند مخابرات نوری، تصویربرداری و سنسور داشته‌اند. از میان مواد فعال مورد استفاده در مدولاتورها، گرافن و اکسید قلع آلیپده با ایندیم (ITO) به سبب ویژگی اپسیلون نزدیک به صفر (ENZ)، سرعت و پاسخ‌دهی قابل توجه که دارند، یکی از گزینه‌های مناسب در بین مواد فعال برای عمل مدولاسیون است. در این مقاله، با اعمال تزویج مستقیم نور به طراحی ساختار مدولاتور پلاسمونیک در حالت سه بعدی پرداخته شده است. با تغییرات ضخامت لایه‌های ITO، اکسید هافنیوم (HfO_2) و عرض موج‌بر ساختار بهینه شده که ضخامت‌های بهینه ۳ نانومتر برای لایه ITO، ۵ نانومتر برای HfO_2 و ۲۸۰ نانومتر برای عرض موج‌بر به دست آمده است. نتایج شبیه‌سازی‌های سه بعدی این مقاله همراه با تزویج مناسب نشان داده شده که تلفات الحاقی در حالت سه بعدی نسبت به دو بعدی تغییر پیدا نکرده و پارامتر نسبت خاموشی مدولاتور اندکی کاهش یافته است. از سویی تزویج مناسب و بهینه، تاثیری در انرژی مصرفی نداشته است. نتایج شبیه‌سازی‌های سه بعدی نشان دهنده این است که مدولاتور پلاسمونیک می‌تواند برای طول ۱ میکرومتر مدولاتور، در ولتاژ ۰/۵ ولت و طول موج ۱/۵۵ میکرومتر به نسبت تمایز ۱۳/۹ دسیبل، تلفات الحاقی ۲/۹ دسیبل، سرعت مدولاسیون ۱۴۰/۹ گیگاهرتز و مصرف انرژی بسیار کم ۱/۵ فمتو ژول بر بیت دست پیدا کند و نشان دهنده کاهش قابل توجه در مصرف انرژی و بهبود نسبت تمایز نسبت به مدولاتورهای مشابه پیشین است. همچنین در طول ۲ میکرومتر مدولاتور، نسبت تمایز ۲۷/۷۶ دسیبل، تلفات الحاقی ۵/۶۸ دسیبل، سرعت مدولاسیون ۷۰/۱۴ گیگاهرتز و مصرف انرژی برابر با ۲/۸۸ فمتو ژول بر بیت به دست آمده است.

کلمات کلیدی: اکسید قلع آلیپده با ایندیم، گرافن، سه بعدی، مصرف انرژی کم، مدولاتور پلاسمونیک، نسبت تمایز بالا

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۸/۲۵

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۰۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۳۰

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مجتبی صادقی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: کیلومتر ۵ شهر صدرا- پردیس دانشگاه آزاد اسلامی شیراز

۱- مقدمه

امروزه با توسعه روزافزون صنعت الکترونیک، برای دستیابی به سرعت بیشتر انتقال داده، امکان ادغام دو تکنولوژی الکترونیک و فوتونیک بر روی یک بستر فراهم شده است. چنین امکانی زمینه‌ساز تحولی عظیم در حوزه مخابرات و الکترونیک خواهد بود. با توجه به حضور تکنولوژی تکامل یافته^۱ (CMOS) که برای ساخت ادوات الکترونیکي به‌کار گرفته می‌شود، ادوات نوری که با ادوات الکترونیکي به‌صورت یکپارچه ساخته می‌شوند، باید با این تکنولوژی سازگار باشند [۱].

از طرفی در صنایع الکترونیک همواره میل به فشرده‌سازی ادوات، برای کاهش هزینه‌های ساخت و افزایش بازده خروجی، وجود داشته است. این در حالی است که به علت پدیده پراش نور، ادوات نوری ابعادی بسیار بزرگی داشته و از نظر اندازه با ادوات الکترونیکي امروزی که بسیار کوچک هستند، قابل مقایسه نیستند [۲]. اما حضور ساختارهای پلاسمونیکي، می‌تواند مشکل ابعاد ادوات نوری را حل کند. افزاره‌های پلاسمونی دو ویژگی عمده دارند: (۱) می‌تواند نور را در فضای بسیار کوچکی که کمتر از حد پراش است محدود کنند و (۲) امکان برهم کنش زیاد نور با محیط را فراهم می‌کنند. این دو ویژگی برای ساخت ادوات نوری بسیار مطلوب هستند [۳]. همان‌طور که ذکر شد، باید موادی که در ساخت ادوات نوری به‌کار گرفته می‌شوند، با تکنولوژی CMOS هماهنگی داشته باشند. اما مواد مرسوم که برای ساخت ادوات پلاسمونیکي استفاده شده‌اند، فلزات نجیب به خصوص طلا و نقره هستند که این فلزات با تکنولوژی CMOS هماهنگی نداشته و علاوه بر آن قابلیت تنظیم نیز ندارند. بنابراین بررسی مواد و ساختارهای پلاسمونیکي جدیدی که با تکنولوژی CMOS منطبق بوده و دارای عملکرد مطلوبی نیز باشند، ضروری به نظر می‌رسد [۴].

با ادغام الکترونیک و فوتونیک، اصلی‌ترین عنصری که امکان ایجاد ارتباط بین این دو حوزه را فراهم می‌آورد، مدولاتورهای نوری هستند که سیگنال‌های الکتریکی را بر پالس‌های نوری سوار می‌کنند. با توجه به افزایش روزافزون کاربردهای ترانزیتور و نیاز به انجام مدولاسیون در طول موج‌های مختلف، طراحی مدولاتورهای فشرده و با کارایی بالا که با تکنولوژی CMOS سازگار باشند، بسیار ضروری است [۵]. اخیراً در میان مواد فعال، موادی از قبیل گرافن و اکسیدهای شفاف فلزی^۲ (TCO) به سبب ویژگی‌های رسانایی الکتریکی خاص آن‌ها و قابلیت تنظیم‌پذیری گذردهی به روش‌های الکتریکی مورد توجه قرار گرفته و به‌عنوان مواد پلاسمونیکي، جایگزین فلزات نجیب برای تکنولوژی CMOS در مدولاتورها معرفی و به‌کار گرفته شده‌اند [۶]. در سال ۲۰۱۶ میلادی، مدولاتور الکترو جذبی با دو لایه تجمع حامل مبتنی بر ویژگی^۳ (ENZ) ماده^۴ ITO طراحی گردید. این مدولاتور از موج‌بر پلاسمونیک هیبرید که شامل لایه‌های فلز-دی الکتریک-ITO-دی الکتریک-سیلیکون است، تشکیل شده است. این دو لایه جمعی حامل، نسبت تمایز^۵ (ER) مدولاتور را به‌صورت قابل توجه بهبود می‌دهد. طول مدولاتور معرفی شده ۲ میکرومتر است و ولتاژ بایاس ۳/۴ ولت، مصرف انرژی ۵۰ فمتو ژول بر بیت و نسبت تمایز ۲۰ دسیبل بر میکرومتر به‌دست آمده است [۷].

در سال ۲۰۱۸، مدولاتور نوری مبتنی بر ITO با دیواره‌های زاویه‌دار براساس ساختار چند لایه سیلیکون-اکسید هافنیوم-اکسید قلع آلاینده با ایندیم-سیلیکون^۶ طراحی شد که در آن، تغییرات ضریب شکست موثر مد قابل توجه بوده و تلفات الحاقی^۷ (IL) کمی نیز داشته است. انرژی مصرفی این مدولاتور ۲۰ فمتو ژول بر بیت و ولتاژ کاری آن ۴/۴۵ ولت گزارش شده است. با این حال، در این طراحی علی‌رغم بهبود محدودیت نور و طول انتشار کم، ولتاژ کاری زیاد بوده و باعث افزایش انرژی مصرفی شده است [۸].

در سال ۲۰۱۹، یک مدولاتور الکترو جذبی مبتنی بر موج‌بر گرافن روی سیلیکون^۸ (GOS) پیشنهاد داده شده است. ساختار مدولاتور موج‌بری GOS پیشنهاد شده شامل سیلیکا، موج‌بر شکاف سیلیکونی و دو گرافن تعبیه شده در بالای موج‌بر است. در این مدولاتور برهم کنش نوری قوی‌تری بین لایه‌های گرافن و نور ایجاد شده و با اثر افزایش شدت نور در گرافن، کارایی مدولاتور بهبود یافته است. در این مدولاتور با طول ۱۲۰ میکرومتر، مصرف انرژی ۲۱۲ فمتو ژول بر بیت، نسبت خاموشی ۲۸ دسیبل و تلفات الحاقی ۱/۲۸ دسیبل به‌دست آمده است [۹].

در سال ۲۰۱۸، مدولاتور پلاسمونیک هیبرید مبتنی بر گرافن بر روی موج‌بر پلاریتون پلاسمون کانال^۹ (CPP) در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر معرفی شده است. در این ساختار مد نوری در شکاف (کانال)، محصور شدگی بالایی دارد و بیشترین شدت میدان

الکتریکی، نزدیک گرافن بوجود آمده است و گرافن جذب زیادی از خود نشان می‌دهد. برای مدولاتور پلاسمونیک پیشنهادی با طول ۷/۶۸ میکرومتر، مقدار نسبت تمایز به‌دست آمده ۰/۳۹۱ دسیبل بر میکرومتر گزارش شده است و تلفات الحاقی ۲/۱۶۹ دسیبل بوجود آمده است [۱۰].

همچنین در سال ۲۰۲۱ میلادی، با استفاده از موج‌بر سلیکونی مبتنی بر ماده فعال ITO و گرافن، که لایه‌های گرافن-اکسید هافنیوم-اکسید قلع آلیایده با ایندیم-اکسید هافنیوم-گرافن^{۱۰} در آن تعبیه شده است، مدولاتور پلاسمونیک با مصرف انرژی کاهش یافته و نسبت تمایز بالا با ابعاد کوچک‌تر نسبت به ساختارهای پیشین پیشنهاد شده است [۱۱].

در این مقاله با اعمال تزویج^{۱۱} مستقیم نور به طراحی ساختار مدولاتور پلاسمونیک پرداخته شده و نتایج در حالت سه بعدی، با روش عددی المان محدود^{۱۲} (FEM) بررسی شده است. با پیاده‌سازی ساختار به‌صورت سه بعدی و تزویج مناسب، نشان داده شده که تلفات الحاقی در حالت سه بعدی نسبت به کار پیشین دو بعدی این ساختار [۱۱] تغییر پیدا نکرده و پارامتر نسبت خاموشی مدولاتور اندکی کاهش یافته است. از سویی تزویج مناسب و بهینه‌سازی در انرژی مصرفی نداشته است. همچنین با تغییرات ضخامت لایه‌های ITO، اکسید هافنیوم^{۱۳} (HfO₂) و عرض موج‌بر، ساختار بهینه‌سازی شده است و نتایج سه بعدی در طول‌های یک میکرومتر و دو میکرومتر مدولاتور، مقایسه گردیده است.

۲- اصول کاری مدولاتور

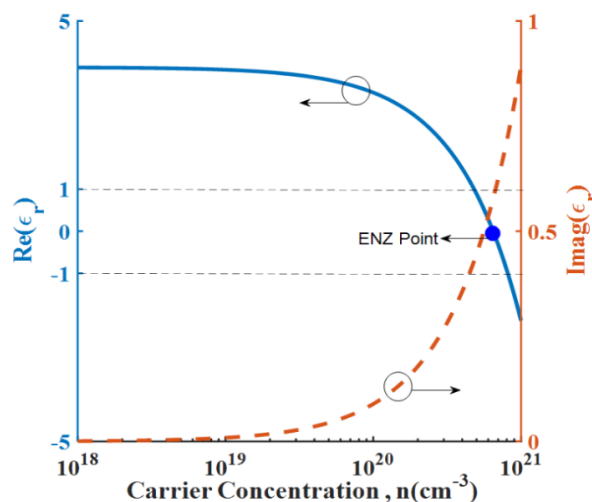
رابطه گذردهی الکتریکی ماده ITO به‌وسیله چگالی حامل‌های آن و بر اساس مدل درود^{۱۴} به‌صورت زیر بیان می‌شود [۱۲]:

$$\epsilon_r = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \gamma^2} + i \frac{\omega_p^2 \gamma}{(\omega^2 + \gamma^2)\omega} \quad (1)$$

که در آن ϵ_∞ ثابت دی الکتریک فرکانس بالای ITO است و برابر ۳/۹ است. γ برابر با $1/8 \times 10^{14}$ ، نرخ پراکندگی الکترون، ω فرکانس نور و ω_p فرکانس پلاسما است. فرکانس پلاسما وابسته به چگالی حامل‌های (الکترون) موجود در ITO است و از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۸]:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{ne^2}{\epsilon_0 m^*}} \quad (2)$$

که در آن $m^* = 0.35 m_0$ جرم موثر الکترون، e بار الکترون، ϵ_0 گذردهی فضای آزاد و m_0 جرم الکترون است. با استفاده از رابطه های (۱) و (۲)، قسمت حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی ماده ITO بر حسب تغییر چگالی حامل‌های آزاد موجود در آن برای طول موج ۱/۵۵ میکرومتر در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل (۱): تغییرات قسمت موهومی و حقیقی گذردهی الکتریکی ماده ITO بر حسب تغییرات چگالی حامل‌های آن
Figure (1): Calculated the real part and imaginary part of permittivity for ITO as a function of carrier concentration

همان‌طور که شکل (۱) نشان می‌دهد، بخش حقیقی گذردهی الکتریکی با افزایش غلظت حامل‌ها، کاهش می‌یابد که این امر سبب تبدیل خواص ITO از حالت دی‌الکتریکی به حالت فلزی می‌شود. در عین حال، بخش موهومی گذردهی الکتریکی افزایش یافته که منجر به تلفات بیشتر می‌شود. هنگامی که بخش گذردهی الکتریکی ITO نزدیک صفر باشد ($\text{Re}[\epsilon]$ بین -۱ و +۱ باشد) در ناحیه ENZ است. ضخامت لایه تجمعی بار در اکثر ساختارهای نیمه هادی-اکسید-فلز^{۱۵} (MOS) براساس رابطه توماس-فرمی^{۱۶} تقریباً یک نانومتر محاسبه شده است [۱۳]. چگالی حامل‌ها در لایه تجمعی بار در ماده ITO برحسب ولتاژ اعمالی V_g به وسیله رابطه (۳) تعریف می‌شود [۱۴]:

$$n_{\text{acc}} = n_0 + \frac{\epsilon_0 \cdot k_{\text{oxide}} \cdot V_g}{e \cdot t_{\text{oxide}} \cdot t_{\text{acc}}} \quad (۳)$$

که در آن n_0 چگالی حامل‌های اولیه ماده ITO بدون اعمال ولتاژ به آن است. t_{acc} ضخامت لایه تجمعی بار است که از رابطه توماس-فرمی برابر یک نانومتر به دست می‌آید. k_{oxide} و t_{oxide} به ترتیب برابر ضخامت اکسید و ثابت دی‌الکتریک است که در مجاورت لایه ITO قرار گرفته است. همان‌گونه که از رابطه (۳) مشخص است، تغییرات چگالی حامل‌ها با جنس دی‌الکتریک رابطه مستقیم و با ضخامت آن رابطه عکس دارد.

در ادامه به بررسی ویژگی‌های نوری قابل تنظیم در گرافن و روابط حاکم بر آن در ساختارهای مدولاتوری می‌پردازیم. یکی از مهمترین خواص گرافن این است که چگالی حامل گرافن با دوپینگ گرافن قابل تنظیم است و دوپینگ از طریق ولتاژ خارجی قابل دستیابی است. خصوصیات نوری قابل تنظیم گرافن تک لایه را می‌توان با هدایت الکتریکی یا رسانایی^{۱۷} آن توصیف کرد. رسانایی گرافن را می‌توان با معادله Kubo محاسبه کرد [۱۵]:

$$\sigma(\omega) = \frac{2ie^2 \kappa_B T}{\pi \hbar^2 (\omega + i\tau^{-1})} \ln \left[2 \cosh \left(\frac{\mu_c}{2\kappa_B T} \right) \right] + \frac{e^2}{4\hbar} \left\{ \frac{1}{2} + \frac{1}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{\hbar\omega - 2\mu_c}{2\kappa_B T} \right) - \frac{i}{2\pi} \ln \left[\frac{(\hbar\omega + 2\mu_c)^2}{(\hbar\omega - 2\mu_c)^2 + (2\kappa_B T)^2} \right] \right\} \quad (۴)$$

که در آن ω فرکانس زاویه‌ای، \hbar ثابت پلانک کاهش یافته، κ_B ثابت بولتزمن، e بار الکترون، T دما و τ زمان ذاتی آرامش حرکت است که ناشی از ناخالصی‌ها، نقص‌ها یا فرآیندهای پراکندگی است. این ثابت زمان ذاتی آرامش، تحرک حامل گرافن را تعیین می‌کند و تحرک حامل گرافن نشان دهنده کیفیت گرافن است.

پتانسیل شیمیایی (μ_c) یا سطح فرمی که مستقیماً به جذب نوری گرافن مرتبط است، را می‌توان به صورت دینامیکی توسط ولتاژ اعمال شده تنظیم کرد که این فرآیند، توانایی مدولاسیون در گرافن را نشان می‌دهد و از معادله زیر به دست می‌آید [۱۶]:

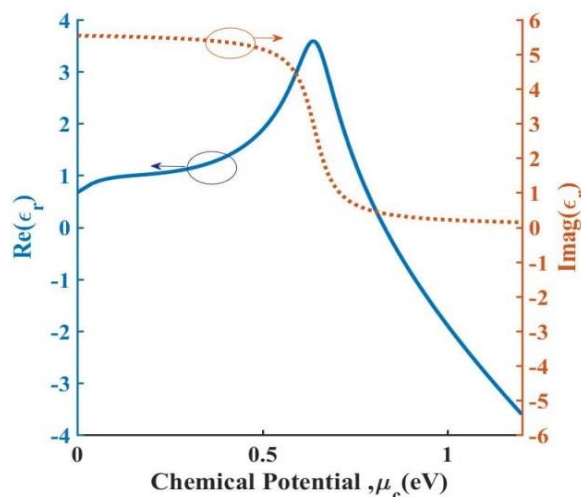
$$\mu_c = \hbar v_f (\pi n_0)^{1/2} = \hbar v_f \left(\pi \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{d_{\text{oxide}}} e (V_g - V_{\text{Dirac}}) \right)^{1/2} \quad (۵)$$

در این رابطه V_g ولتاژ اعمال شده، V_{Dirac} جبران ولتاژ ناشی از دوپینگ طبیعی، v_f سرعت فرمی (تقریباً برابر 10^6 متر بر ثانیه)، n_0 غلظت دوپینگ در گرافن و d_{oxide} ضخامت دی‌الکتریک است. همچنین ضریب گذردهی از رابطه زیر محاسبه می‌گردد [۱۶]:

$$\epsilon_r(\omega) = 1 + \frac{i\sigma(\omega)}{\epsilon_0 \omega d} \quad (۶)$$

که در آن ϵ_0 ضریب گذردهی در خلا و d ضخامت گرافن تک لایه است. با تغییر V_g ، می‌توان پتانسیل شیمیایی را تغییر داد و در نتیجه بخش حقیقی ضریب گذردهی تغییرات نسبتاً قابل توجه خواهد داشت.

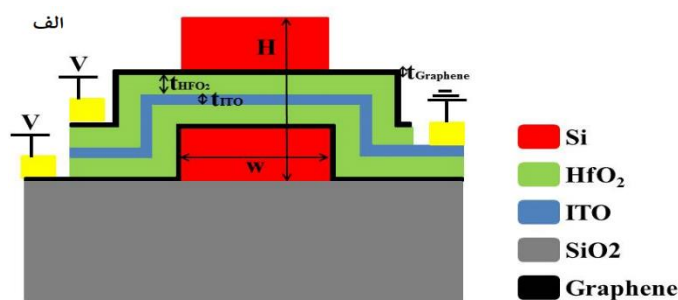
با استفاده از رابطه‌های (۴)، (۵) و (۶) منحنی تغییرات قسمت حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی ماده گرافن بر حسب پتانسیل شیمیایی در شکل (۲) نشان داده شده است. مطابق این شکل با تغییرات ولتاژ بایاس اعمالی به گرافن، پتانسیل شیمیایی گرافن تغییر کرده و منجر به تغییرات قابل توجهی در قسمت حقیقی گذردهی الکتریکی این ماده خواهد شد. بر این اساس برای پتانسیل شیمیایی مشخص (ولتاژ بایاس مشخص) گرافن به حالت ENZ رسیده و قسمت حقیقی گذردهی الکتریکی آن به صفر نزدیک شده است.



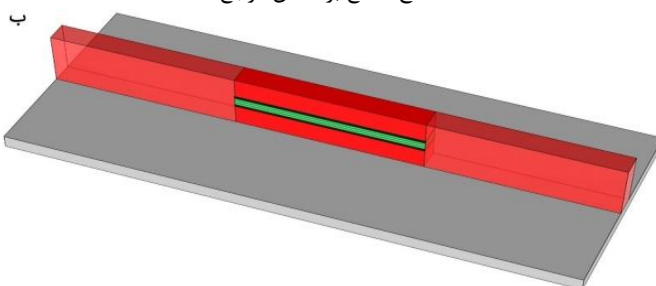
شکل (۲): تغییرات قسمت موهومی و حقیقی گذردهی الکتریکی ماده گرافن بر حسب ولتاژ اعمالی به آن
Figure (2): The real part and the imaginary part of permittivity for graphene versus chemical potential

۳- معرفی ساختار

در این بخش، ابتدا به معرفی ساختار مدولاتور پلاسمونیک ارائه شده مبتنی بر ماده فعال ITO و گرافن خواهیم پرداخت. شکل (۳-الف) و (۳-ب) به ترتیب سطح مقطع موج‌بر پیشنهادی [۱۱] و نمای سه بعدی برای طراحی مدولاتور پلاسمونیک مبتنی بر ماده ITO و گرافن ارائه شده است. در این ساختار بستری از جنس SiO_2 به ضخامت یک میکرومتر و موج‌بری سیلیکونی با عرض (W) ۲۸۰ نانومتر و ارتفاع (H) ۴۲۰ نانومتر که از مد TM پشتیبانی می‌کند در نظر گرفته شده است. در این موج‌بر سیلیکونی لایه‌های Graphene-HfO₂-ITO-HfO₂-Graphene تعبیه شده است که ضخامت لایه HfO₂ برابر با ۵ نانومتر و ضخامت لایه ITO برابر با ۳ نانومتر در نظر گرفته شده است. تشکیل ساختار خازنی MOS را می‌دهند که با اعمال ولتاژ بایاس مثبت به گرافن و ولتاژ صفر (زمین) به ماده فعال ITO چگالی حامل‌های ماده ITO و گرافن تغییر کرده و مدولاسیون انجام می‌شود.



(الف) سطح مقطع بر اساس مرجع [۱۱]



(ب) نمای سه بعدی ساختار مدولاتور پلاسمونیک پیشنهادی

شکل (۳): ساختار مدولاتور پلاسمونیک ارائه شده مبتنی بر ماده فعال ITO و گرافن

Figure (3): Schematic of the proposed plasmonic modulator based on ITO and Graphene (a) cross section and (b) 3D view

۳- نتایج شبیه‌سازی و بحث

در این قسمت به بررسی نتایج شبیه‌سازی مدولاتور پیشنهادی خواهیم پرداخت. در شبیه‌سازی‌ها، ضریب شکست SiO_2 ، Si ، HfO_2 از داده‌های تجربی موجود در مرجع‌های [۱۷] الی [۲۰]، استفاده شده است که در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر به صورت n_{Si} برابر ۳/۴۷، n_{SiO_2} برابر ۱/۴۴۴ و n_{HfO_2} برابر ۱/۹۸ در نظر گرفته می‌شود. همچنین ضریب شکست ماده ITO با استفاده از مدل دورود که پیش‌تر بیان شد، تعیین می‌شود. ضریب شکست ماده ITO برای ولتاژهای اعمالی در محدوده ۰-۱ ولت با استفاده از رابطه‌های (۱) الی (۳) که رابطه گذردهی الکتریکی ماده ITO به وسیله چگالی حامل‌های آن بر اساس مدل دورود است، محاسبه شده است. در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار کامسول که از روش عددی المان محدود (FEM) برای شبیه‌سازی استفاده می‌کند، به منظور طراحی، تحلیل و آنالیز ساختارهای پیشنهادی استفاده گردیده است. همچنین تمام شبیه‌سازی‌ها از شرایط مرزی لایه کاملاً جذب^{۱۸} (PML) برای تمام مرزها استفاده گردیده است. در ابتدا به بهینه‌سازی مدولاتور پلاسمونیکي پیشنهادی خواهیم پرداخت.

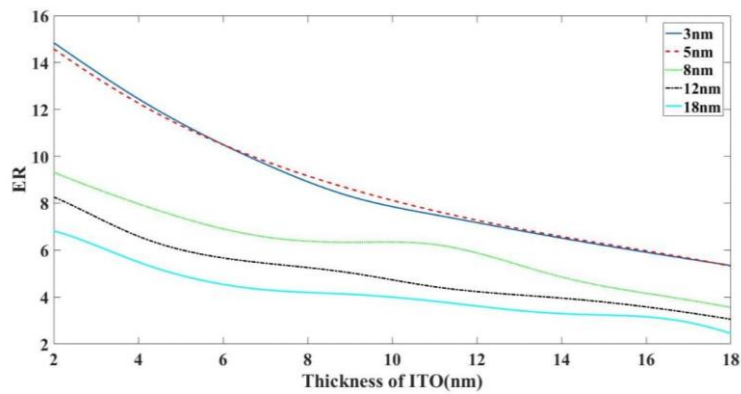
مواد ITO و گرافن دارای خاصیت ENZ بوده و با اعمال ولتاژ بایاس مشخصی، قسمت حقیقی گذردهی الکتریکی آن‌ها به سمت صفر میل می‌کند. با تغییر چگالی حامل‌های اولیه (دوپینگ اولیه) ITO، اختلاف ولتاژ مورد نیاز برای رسیدن به حالت ENZ تغییر می‌کند به صورتی که با افزایش چگالی حامل‌های اولیه، اختلاف ولتاژ مورد نیاز برای رسیدن به حالت ENZ کمتر شده و سبب کاهش مصرف انرژی مدولاتور پلاسمونیکي می‌شود. برای تطبیق حالت ENZ برای هر دو ماده در یک ولتاژ بایاس مشخص بر اساس مرجع [۱۱]، مقدار بهینه چگالی حامل‌های اولیه $5/0.3e^{20}$ (N_0) برای ماده ITO به دست آمده است.

در شکل (۴) تغییرات نسبت تمایز بر حسب تغییرات ضخامت لایه ITO و ضخامت‌های مختلف HfO_2 بررسی شده است. در این شبیه‌سازی ضخامت گرافن برابر با یک نانومتر و موج‌بر سیلیکونی با عرض ۲۸۰ نانومتر و ارتفاع ۴۲۰ نانومتر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، هر چه ضخامت لایه ITO و HfO_2 کمتر باشد مقدار نسبت تمایز بیشتر خواهد بود. دلیل این امر را می‌توان این‌گونه بیان کرد که عمده میدان الکتریکی در موج‌بر مدولاتور و در مواد ITO، گرافن و HfO_2 توزیع شده است. هر چه ضخامت لایه‌های ITO و HfO_2 کمتر باشد محدودیت^{۱۹} نور درون موج‌بر و این لایه‌ها بیشتر بوده و هم‌پوشانی مد نوری با ماده فعال بیشتر شده است. این امر سبب می‌شود که عمده میدان الکتریکی در نزدیکی مرز بین ITO و HfO_2 باشد. با اعمال میدان الکتریکی، لایه تجمعی از بار در مرز ITO- HfO_2 ایجاد خواهد شد که این لایه جذب بسیار زیادی از خود نشان می‌دهد. هر چه هم‌پوشانی مد نوری یا به عبارتی چگالی میدان الکتریکی با این ناحیه بیشتر باشد و قسمت عمده آن در نزدیکی این ناحیه قرار گرفته باشد، باعث تلفات بیشتری برای آن خواهد شد. در نتیجه در حالت خاموش مدولاتور، جذب بیشتر و در نتیجه نسبت تمایز بهتر و عملکرد مطلوب‌تری را از خود نشان دهد. به دلیل ملاحظات ساخت کمترین ضخامت لایه ITO را برابر ۳ نانومتر و ضخامت HfO_2 را به دلیل در نظر گرفتن پدیده شکست آن، ۵ نانومتر در نظر می‌گیریم.

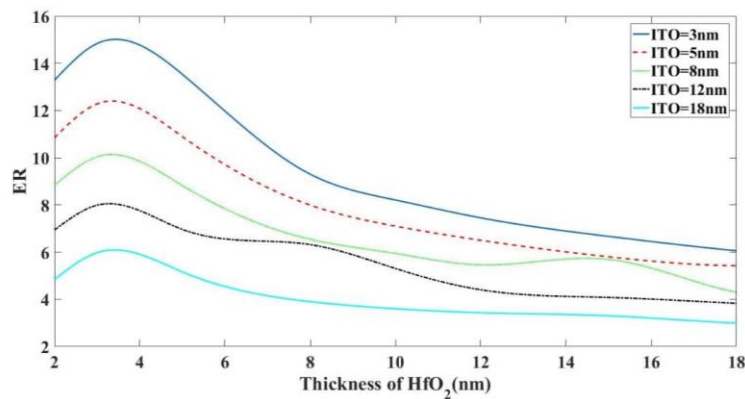
شکل (۵) تغییرات نسبت تمایز بر حسب تغییرات ضخامت لایه HfO_2 و ضخامت‌های مختلف ITO بررسی شده است. مطابق این شکل برای ضخامت ۳ نانومتر ماده ITO و در محدوده ضخامت ۵ نانومتر برای HfO_2 بیشترین نسبت تمایز به دست آمده است که توجیهی مشابه ITO برای آن بیان می‌شود.

از سویی با توجه به ولتاژ اعمالی برابر با ۰/۵ ولت و ضخامت ۵ نانومتر برای ماده HfO_2 ، میدان الکتریکی اعمالی به آن برابر با یک مگاولت بر سانتیمتر خواهد شد که این مقدار، از میدان الکتریکی ۵ مگاولت بر سانتیمتر که در آن شکست دی‌الکتریک برای ماده HfO_2 رخ می‌دهد کمتر است [۲۱].

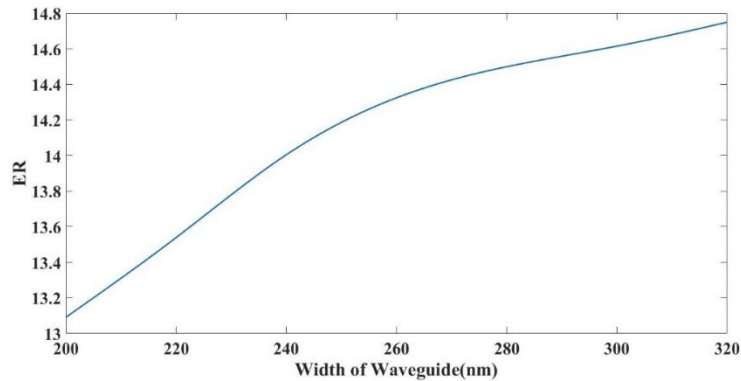
در شکل (۶) تغییرات نسبت تمایز بر حسب تغییرات عرض موج‌بر مدولاتور بررسی شده است. همان‌طور که از شکل مشخص است، از محدوده ۲۶۰ نانومتر تا ۳۲۰ نانومتر عرض موج‌بر، بیشترین نسبت تمایز به دست آمده است. با توجه به اینکه عرض موج‌بر در خازن ساختار و در نتیجه پهنای باند و مصرف توان مدولاتور تاثیر گذار است، مقدار ۲۸۰ نانومتر برای عرض مدولاتور انتخاب می‌گردد. ضریب شکست‌های هر ماده بر اساس آنچه پیش‌تر بیان شد در نرم‌افزار کامسول قرار داده شده است و ضریب شکست موثر موج‌بر برای هر ولتاژ محاسبه شده است. منحنی تغییرات قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست موثر موج‌بر بر حسب ولتاژهای اعمالی در شکل (۷) نشان داده شده است.



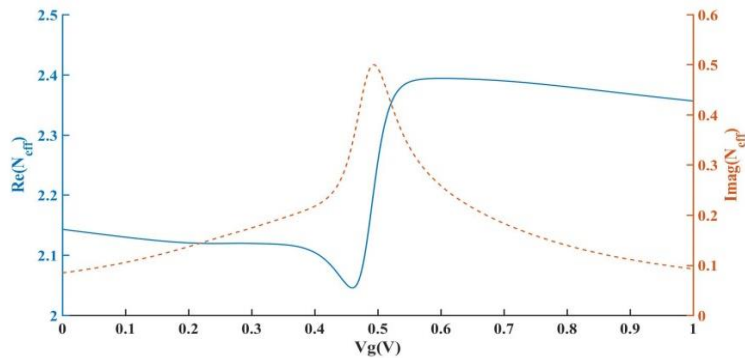
شکل (۴): تغییرات نسبت تمایز بر حسب تغییر ضخامت لایه ITO و ضخامت‌های مختلف HfO₂
 Figure (4): Extinction ratio versus changes of ITO and HfO₂ layers



شکل (۵): تغییرات نسبت تمایز بر حسب تغییر ضخامت لایه HfO₂ و ضخامت‌های مختلف لایه ITO
 Figure (5): Extinction ratio versus changes of HfO₂ and ITO layers



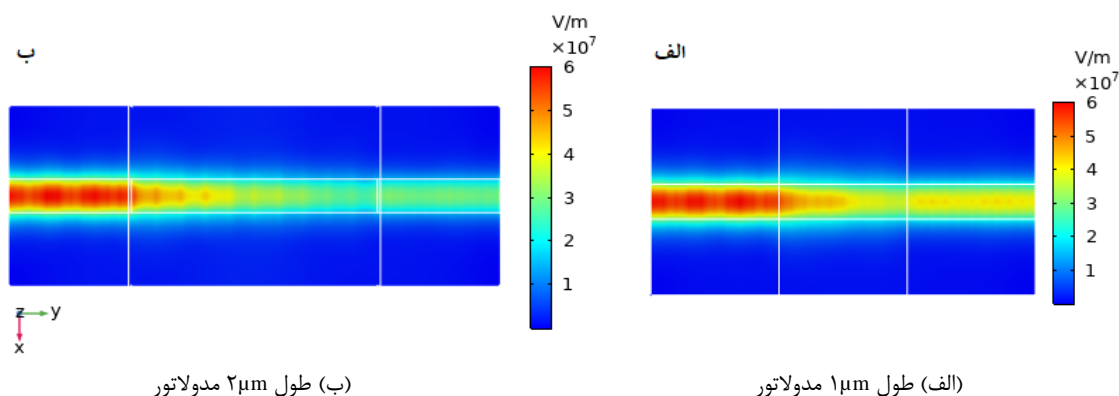
شکل (۶): تغییرات نسبت تمایز بر حسب تغییرات عرض موجبر مدولاتور
 Figure (6): Extinction ratio versus changes of width of waveguide



شکل (۷): تغییرات قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست موثر به ازای ولتاژهای اعمال شده
 Figure (7): The real part and the imaginary part of effective refractive index versus applied voltages

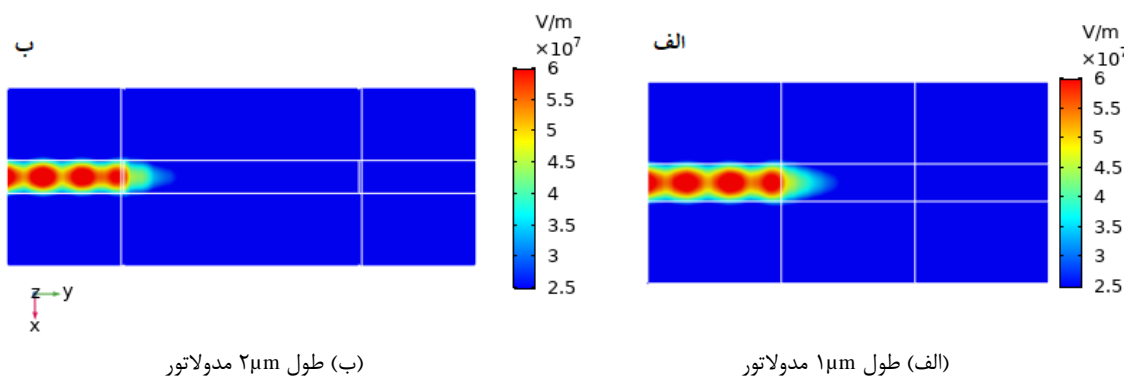
با توجه به شکل، کمترین مقدار موهومی ضریب شکست که متناسب با تلفات الحاقی موج‌بر است در ولتاژ صفر ولت و بیشترین مقدار موهومی ضریب شکست در ولتاژ ۰/۵ ولت به دست آمده است. در ولتاژ صفر ولت ضریب شکست موج‌بر برابر با $2/0 + 14/085i$ و در ولتاژ ۰/۵ ولت ضریب شکست موج‌بر برابر با $2/0 + 2/49i$ است. در نتیجه ولتاژ صفر ولت با کمترین تلفات را حالت روشن مدولاتور پلاسمونیکي و ولتاژ ۰/۵ ولت را با بیشترین تلفات نوری را حالت خاموش مدولاتور پلاسمونیکي در نظر می‌گیریم. در ولتاژ ۰/۵ ولت حالت ENZ برای ماده ITO و گرافن به طور همزمان رخ داده است که متناسب با بیشینه تلفات در این ولتاژ برای حالت خاموش مدولاتور پلاسمونیکي خواهد بود. در ادامه با استفاده از روش تزویج مستقیم، نور به موج‌بر مدولاتور پلاسمونیکي مبتنی بر ITO و گرافن اعمال شده و به بررسی مشخصه‌های آن در حالت سه بعدی با مقایسه دو طول مختلف مدولاتور خواهیم پرداخت. موج‌بر سیلیکونی ورودی و خروجی دارای عرض و ارتفاع برابر با موج‌بر معرفی شده برای مدولاتور پلاسمونیکي بوده و طول موج‌بر مدولاتور پلاسمونیکي برابر با طول‌های یک میکرومتر و دو میکرومتر در نظر گرفته شده است. و منبع نوری در بازه طول موجی ۱/۵ میکرومتر تا ۱/۶ میکرومتر به موج‌بر ورودی اعمال شده است.

در ابتدا عملکرد مدولاتور مبتنی بر ITO و گرافن در حالتی که ولتاژی به آن اعمال نشده است را مورد بررسی قرار می‌دهیم. شکل‌های (۸-الف) و (۸-ب)، پروفایل میدان الکتریکی در راستای انتشار برای مدولاتور پلاسمونیکي پیشنهادی در حالت روشن با طول‌های یک میکرومتر و دو میکرومتر مدولاتور را نشان می‌دهد. مطابق شکل، در این حالت نور ورودی با کمترین تلفات از موج‌بر مدولاتور پلاسمونیکي عبور کرده و با بیشترین توان در خروجی ظاهر شده است. تلفات الحاقی (IL) یا تلفات حالت روشن در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر برای طول یک میکرومتر مدولاتور برابر با ۲/۹ دسیبل و برای طول ۲ میکرومتر مدولاتور برابر با ۵/۶۸ دسیبل است. در ادامه حالت خاموش مدولاتور پلاسمونیکي مبتنی بر ITO و گرافن را در ولتاژ ۰/۵ ولت بررسی می‌کنیم. شکل‌های (۹-الف) و (۹-ب)، پروفایل میدان الکتریکی در راستای انتشار را برای مدولاتور پلاسمونیکي مبتنی بر ITO و گرافن در حالت خاموش با طول‌های یک و دو میکرومتر مدولاتور نشان می‌دهد. نور ورودی از موج‌بر ورودی با بیشترین توان به موج‌بر مدولاتور پلاسمونیکي تزریق شده است. در ناحیه فعال موج‌بر مدولاتور پلاسمونیکي، در اثر خاصیت ENZ برای هر دو ماده ITO و گرافن که به طور همزمان رخ داده است، نور عبوری با تلفات نوری قابل ملاحظه‌ای از این ناحیه عبور کرده و در نتیجه در موج‌بر خروجی با شدت توان بسیار کمی نمایان خواهد شد. تلفات حالت خاموش مدولاتور در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر برای طول یک میکرومتر مدولاتور برابر با ۱۶/۸ دسیبل و برای طول دو میکرومتر مدولاتور برابر با ۳۳/۴۴ دسیبل است. از اختلاف تلفات‌های حالت خاموش و روشن مدولاتور، مقدار نسبت تمایز (ER) برای طول یک میکرومتر مدولاتور برابر با ۱۳/۹ دسیبل و برای طول دو میکرومتر مدولاتور برابر با ۲۷/۷۶ دسیبل به دست خواهد آمد. در ادامه به بررسی مشخصه سرعت مدولاسیون (پهنای باند مدولاسیون ۳ دسیبل) و همچنین مصرف انرژی برای مدولاتور پلاسمونیکي ارائه شده مبتنی بر ITO و گرافن می‌پردازیم. تاخیر ناشی از لایه تجمعی MOS درون لایه فعال در حد فمتو ثانیه است و می‌توان گفت پهنای باند مدولاتور به واسطه این تاخیر ناشی از حامل‌ها محدود نمی‌شود [۲۲]. در گرافن هم مشابه ماده ITO، سرعت پاسخ دهی تغییر چگالی حامل‌ها بسیار سریع بوده و عامل محدودکننده سرعت مدولاسیون در مدولاتور پلاسمونیکي، خازن‌های پارازیتی و ثابت زمانی RC است.



شکل (۸): پروفایل میدان الکتریکی مدولاتور پیشنهادی در راستای انتشار برای حالت روشن (بدون اعمال ولتاژ)

Figure (8): Electric field profile of proposed modulator for on mode (without applied voltage), (a) modulator length of 1μm and (b) modulator length of 2μm



شکل (۹): پروفایل میدان الکتریکی مدولاتور پیشنهادی در راستای انتشار برای حالت خاموش (ولتاژ ۰/۵V)

Figure (9): Electric field profile of proposed modulator for off mode (0.5v voltage) (a) modulator length of 1μm and (b) modulator length of 2μm

خازن ناشی از ساختار، مربوط به ساختار Graphene-HfO₂-ITO است و با توجه به رابطه‌های (۷) و (۸)، سرعت مدولاسیون با طول یک میکرومتر مدولاتور طبق محاسبات زیر به دست می‌آید:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = 8.85e-12 \times 25 \times \frac{280e-9 \times 1e-6}{5e-9} = 12.39fF \quad (۷)$$

$$(۸) f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 91.15 \times 12.39fF} = 140.9GHz$$

مقاومت گرافن ناشی از دو مقاومت sheet (R_s) و مقاومت کنتاکت (R_c) آن است. که با لحاظ این دو مقاومت می‌توان مقاومت ۹۱/۱۵ اهم را برای ساختار در نظر گرفت [۱۰] و ضخامت HfO₂ برابر با ۵ نانومتر در نظر گرفته شده است. همچنین سرعت مدولاسیون با طول ۲ میکرومتر مدولاتور مطابق محاسبات زیر به دست می‌آید:

$$C = \epsilon_0 \epsilon_r \frac{A}{d} = 8.85e-12 \times 25 \times \frac{280e-9 \times 2e-6}{5e-9} = 24.78fF \quad (۹)$$

$$(۱۰) f_{3dB} = \frac{1}{2\pi RC} = \frac{1}{2\pi \times 91.15 \times 24.78fF} = 70.14GHz$$

برای محاسبه مصرف انرژی مدولاتور پلاسمونیک با استفاده از رابطه (۱۱)، برای طول یک میکرومتر مدولاتور طبق محاسبات خواهیم داشت [۱۴]:

$$E \left(\frac{f_j}{bit} \right) = \frac{C \Delta v^2}{4} = \frac{1}{4} \times 12.39fF \times 0.5^2 = 0.77 \frac{f_j}{bit} \quad (۱۱)$$

در رابطه (۱۱)، اختلاف ولتاژ حالت خاموش و روشن مدولاتور پلاسمونیک برابر با ۰/۵ ولت در نظر گرفته شده است. از آنجا که در این ساختار، دو خازن شکل گرفته، باید مصرف انرژی فوق به دست آمده در دو ضرب شود. در نتیجه مقدار انرژی مصرفی برای مدولاتور پلاسمونیک ارائه شده برابر با ۱/۵۱ فمتو ژول بر بیت به دست خواهد آمد. همچنین مصرف انرژی مدولاتور پلاسمونیک، برای طول دو میکرومتر مدولاتور خواهیم داشت:

$$E \left(\frac{f_j}{bit} \right) = \frac{1}{4} \times 24.78fF \times 0.5^2 = 1.44 \frac{f_j}{bit} \quad (۱۲)$$

و از آنجا که در این ساختار، دو خازن شکل گرفته، باید مصرف انرژی فوق به دست آمده در دو ضرب شود. در نتیجه مقدار انرژی مصرفی برای مدولاتور پلاسمونیک ارائه شده برابر با ۲/۸۸ فمتو ژول بر بیت به دست خواهد آمد. در جدول (۱) به مقایسه نتایج مدولاتور پلاسمونیک ارائه شده سه بعدی با کارهای ارائه شده می‌پردازیم. در این جدول نشانه‌های اختصاری ER, SPEED, L, E, IL به ترتیب عبارت‌اند از: نسبت تمایز، سرعت مدولاسیون، طول ناحیه فعال مدولاتور، مصرف انرژی و تلفات الحاقی.

Table (1): Comparison among performance achieved by recently reported modulators based on ITO or Graphene

جدول (۱): مقایسه مشخصات مدولاتور پلاسمونیکي مبتنی بر ITO و گرافن با تحقیقات مشابه پیشین

ماده فعال	Speed (GHz)	E (fj/bit)	L (μm)	ER (dB)	IL (dB)	سال	منابع
ITO	۸۸	۵۰	۲	۲۰	-	۲۰۱۶	[۷]
ITO	۱۴۰	۲۲/۷	۳۴	۱۱/۴۳	۱/۶۵	۲۰۱۸	[۲۳]
Graphene	۱۵۰	۶۰۰	۱	۰/۵۲۴	۰/۰۵	۲۰۱۹	[۲۴]
Graphene	۱۱۷	۲۱۲	۱۲۰	۲۸	۱/۲۸	۲۰۱۹	[۲۵]
ITO	۷/۷	۸۲۷	۸	۲۵/۴۴	۱/۹۲	۲۰۲۰	[۲۶]
ITO	۸/۸۴	۱۷۸	۱	۳/۰۷	۰/۰۲۵	۲۰۲۰	[۲۷]
ITO and Graphene	۱۴۰/۹	۱/۵۱	۱	۱۳/۹	۲/۹	۲۰۲۱	این مقاله
	۷۰/۱۴	۲/۸۸	۲	۲۷/۷۶	۵/۶۸		

با توجه به جدول (۱) مشاهده می‌شود که با اعمال تزویج مستقیم نور به ساختار مدولاتور پلاسمونیکي، تلفات الحاقی در حالت سه بعدی نسبت به کار پیشین دو بعدی این ساختار [۱۱] تغییر پیدا نکرده و پارامتر نسبت خاموشی مدولاتور اندکی کاهش یافته است. از سویی تزویج مناسب و بهینه تأثیری در انرژی مصرفی نداشته است. و نتایج سه بعدی در دو طول یک میکرومتر و دو میکرومتر مدولاتور، نشان دهنده این است که با دو برابر شدن طول مدولاتور، پارامترهای تلفات الحاقی، نسبت تمایز و مصرف توان مدولاتور تقریباً دو برابر گردیده و سرعت مدولاتور نصف گردیده است.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله با اعمال تزویج مستقیم نور به طراحی ساختار مدولاتوری پلاسمونیکي مبتنی بر دو ماده فعال ITO و گرافن در حالت سه بعدی پرداخته شده است. و با تغییرات ضخامت لایه‌های ITO، اکسید HfO_2 و عرض موجبر ساختار بهینه شده است. همچنین نتایج مدولاتور پلاسمونیکي برای دو طول یک و دو میکرومتر مدولاتور مقایسه گردید. نتایج شبیه‌سازی‌های سه بعدی این مقاله با تزویج مناسب نشان داده شده که تلفات الحاقی در حالت سه بعدی نسبت به دو بعدی تغییر پیدا نکرده و پارامتر نسبت خاموشی مدولاتور اندکی کاهش یافته است. از سویی تزویج مناسب و بهینه، تأثیری در انرژی مصرفی نداشته است. با تطبیق رخ دادن خاصیت ENZ برای هر دو ماده فعال ITO و گرافن در یک ولتاژ بایاس، مدولاتوری پلاسمونیکي با خاصیت مصرف انرژی پایین برابر با $1/51$ فمتو ژول بر بیت و نسبت تمایز قابل توجه $13/9$ دسیبل در طول واحد یک میکرومتر مدولاتور دست یافتیم. برای مدولاتور پلاسمونیکي ارائه شده در ولتاژ $0/5$ ولت برای طول موج $1/55$ میکرومتر، تلفات الحاقی $2/9$ دسیبل و سرعت مدولاسیون $140/9$ گیگاهرتز به دست آمده است. همچنین در طول دو میکرومتر مدولاتور، تلفات الحاقی $5/68$ دسیبل، مصرف انرژی $2/88$ فمتو ژول بر بیت و نسبت تمایز $27/76$ دسیبل با سرعت مدولاسیون $70/14$ گیگاهرتز به دست آمده است.

سپاسگزاری

این مقاله مستخرج از رساله دوره دکتری در دانشگاه آزاد اسلامی واحد شیراز است. نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب تشکر صمیمانه خود را از همکاران حوزه پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی و داوران محترم که ما را در انجام و ارتقای کیفی این مقاله یاری نموده‌اند، اعلام نمایند.

References

مراجع

- [1] R. Won, M. Paniccia, "Simply silicon", Nature Photonics, vol. 4, no. 8, pp. 491-491, Aug. 2010 (doi: 10.1038/nphoton.2010.190).
- [2] K. Liu, C.R. Ye, S. Khan, V.J. Sorger, "Review and perspective on ultrafast wavelength-size electro-optic modulators", Laser and Photonics Reviews, vol. 9, no. 2, pp. 172-194, Mar. 2015 (doi: 10.1002/lpor.201400-219).

- [3] D.K. Gramotnev, S.I. Bozhevolnyi, "Plasmonics beyond the diffraction limit", *Nature Photonics*, vol. 4, no. 2, pp. 83-91, Feb. 2010 (doi:10.1038/nphoton.2009.282).
- [4] P.R. West, S. Ishii, G.V. Naik, N.K. Emani, V.M. Shalaev, A. Boltasseva, "Searching for better plasmonic materials", *Laser and Photonics Reviews*, vol. 4, no. 6, pp. 795-808, Nov. 2010 (doi:10.1002/lpor.200900055).
- [5] G.T. Reed, G. Mashanovich, F.Y. Gardes, D.J. Thomson, "Silicon optical modulators", *Nature Photonics*, vol. 4, no. 8, pp. 518-526, Aug. 2010 (doi:10.1038/nphoton.2010.179).
- [6] Z. Ma, Z. Li, K. Liu, C. Ye, V.J. Sorger, "Indium-tin-oxide for high-performance electro-optic modulation", *Nanophotonics*, vol. 4, no. 2, pp. 198-213, 2015 (doi:10.1515/nanoph-2015-0006).
- [7] L. Jin, Q. Chen, W. Liu, S. Song, "Electro-absorption modulator with dual carrier accumulation layers based on epsilon-near-zero ITO", *Plasmonics*, vol. 11, no. 4, pp. 1087-1092, Aug. 2016 (doi:10.1007/s11468-015-0146-5).
- [8] M.K. Shah, R. Lu, Y. Liu, "Enhanced performance of ITO-assisted electro-absorption optical modulator using sidewall angled silicon waveguide", *IEEE Trans. on Nanotechnology*, vol. 17, no. 3, pp. 412-418, May 2018 (doi:10.1109/TNANO.2018.2804485).
- [9] L. Ji, D. Zhang, Y. Xu, Y. Gao, C. Wu, X. Wang, Z. Li, X. Sun, "Design of an electro-absorption modulator based on graphene-on-silicon slot waveguide", *IEEE Photonics Journal*, vol. 11, no. 3, pp. 1-11, June 2019 (doi:10.1109/JPHOT.2019.2918314).
- [10] P. Zheng, H. Yang, M. Fan, G. Hu, R. Zhang, B. Yun, Y. Cui, "A hybrid plasmonic modulator based on graphene on channel plasmonic polariton waveguide", *Plasmonics*, vol. 13, no. 6, pp. 2029-2035, Mar. 2018 (doi: 10.1007/s11468-018-0719-1).
- [11] A. Eslami, M. Sadeghi, Z. Adelpour, "Plasmonic modulator utilizing graphene-HfO₂-ITO stack embedded in the silicon waveguide", *Optik*, vol. 227, Article Number: 165608, 2021 (doi:10.1016/j.ijleo.2020.165608).
- [12] X. Qiu, X. Ruan, Y. Li, and F. Zhang, "Multi-layer MOS capacitor based polarization insensitive electro-optic intensity modulator", *Optics Express*, vol. 26, no. 11, pp. 13902-13914, May 2018 (doi: 10.1364/OE.26.013-902).
- [13] A. Melikyan, N. Lindenmann, S. Walheim, P.M. Leufke, S. Ulrich, J. Ye, P. Vincze, H. Hahn, T. Schimmel, C. Koos, W. Freude, J. Leuthold, "Surface plasmon polariton absorption modulator", *Optics Express*, vol. 19, no. 9, pp. 8855-8869, April 2011 (doi: 10.1364/OE.19.008855).
- [14] M.Y. Abdelatty, M.M. Badr, M.A. Swillam, "Compact silicon electro-optical modulator using hybrid ito tri-coupled waveguides", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 18, pp. 4198-4204, Sept. 2018 (doi: 10.1109/JLT.2018.2863571).
- [15] L.A. Falkovsky, "Optical properties of graphene", *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 129, Article Number: 012004, Dubna, Moscow Region, Russia, Oct. 2008 (doi:10.1088/1742-6596/129/1/012004).
- [16] F. Wang, Y. Zhang, C. Tian, C. Girit, A. Zettl, M. Crommie, Y. R. Shen, "Gate-variable optical transitions in graphene", *Science*, vol. 320, no. 5873, pp. 206-209, 2008 (doi:10.1126/science.1152793).
- [17] E. D. Palik, "Handbook of optical constants of solids", 1th Edition, vol. 2: Academic Press, Orlando, March 1991.
- [18] P.B. Johnson, R.W. Christy, "Optical constants of the noble metals", *Physical Review B*, vol. 6, no. 12, pp. 4370-4379, 1972 (doi:10.1103/PhysRevB.6.4370).
- [19] T. Siefke, S. Kroker, K. Pfeiffer, O. Puffky, K. Dietrich, D. Franta, I. Ohlídal, A. Szeghalmi, E.B. Kley, A. Tünnermann, "Materials pushing the application limits of wire grid polarizers further into the deep ultraviolet spectral range", *Advanced Optical Materials*, vol. 4, no. 11, pp. 1780-1786, 2016 (doi: 10.1002/adom.201600-250).
- [20] D. Franta, D. Nečas, I. Ohlídal, "Universal dispersion model for characterization of optical thin films over a wide spectral range: application to hafnia", *Applied Optics*, vol. 54, no. 31, pp. 9108-9119, Nov. 2015 (doi: 10.1364/ao.54.009108).
- [21] M. Nam, A. Kim, K. Kang, E. Choi, S.H. Kwon, S.J. Lee, S.G. Pyo, "Characterization of atomic layer deposited al₂O₃/hfo₂ and ta₂O₅/al₂O₃ combination stacks", *Science of Advanced Materials*, vol. 8, pp. 1958-1962, Oct. 2016 (doi:10.1166/sam.2016.2854).
- [22] V.J. Sorger, N.D. Lanzillotti-Kimura, R.M. Ma, X. Zhang, "Ultra-compact silicon nanophotonic modulator with broadband response", *Nanophotonics*, vol. 1, no. 1, pp. 17-22, 2012 (doi:10.1515/nanoph-2012-0009).
- [23] M.Y. Abdelatty, M.M. Badr, M.A. Swillam, "Compact silicon electro-optical modulator using hybrid ITO tri-coupled waveguides", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 18, pp. 4198-4204, 2018 (doi: 10.11-09/JLT.2018.2863571).
- [24] J. Luan, M. Fan, P. Zheng, H. Yang, G. Hu, B. Yun, Y. Cui, "Design and optimization of a graphene modulator based on hybrid plasmonic waveguide with double low-index slots", *Plasmonics*, vol. 14, no. 1, pp. 133-138, Feb. 2019 (doi:10.1007/s11468-018-0785-4).
- [25] A. Phatak, Z. Cheng, C. Qin, K. Goda, "Design of electro-optic modulators based on graphene-on-silicon slot waveguides", *Optics Letters*, vol. 41, no. 11, pp. 2501-2504, June 2016 (doi: 10.1364/OL.41.002501).

- [26] Y. Xu, F. Li, J. Yuan, Z. Kang, C. Mei, X. Zhang, P.K.A. Wai, "Highly-efficient, ultra-broadband and polarization insensitive graphene-silicon based electro-absorption modulator", Proceeding of the IEEE/CLEO, San Jose, California, USA, pp. 1-2, May 2018 (doi:10.1364/CLEO_AT.2018.JW2A.4)
- [27] H.R. Das, S.C. Arya, "Performance improvement of VO₂ and ITO based plasmonic electro-absorption modulators at 1550 nm application wavelength", Optics Communications, vol. 479, p. 126455, Jan. 2021 (doi: 10.1016/j.optcom.2020.126455).

زیر نویس ها

1. Complementary metal–oxide–semiconductor
2. Transparent conducting oxides
3. Epsilon-near-zero
4. Indium tin oxide
5. Extinction ratio
6. Silicon-HfO₂-ITO- silicon
7. Insertion loss
8. Graphene on silicon
9. Channel Plasmon Polariton
10. Graphene-HfO₂-ITO-HfO₂-graphene
11. Coupling
12. Finite element method
13. Hafnium oxide
14. Drude
15. Metal–oxide–semiconductor
16. Thomas-fermi screening
17. Conductivity
18. Perfectly match layer
19. Confinement