

تحلیل عددی یک مدولاتور نوری پهن باند مبتنی بر جفت لایه گرافن و h-BN در محدوده طول موجی ۱۳۰۰ تا ۱۸۰۰ نانومتر با ضریب خاموشی بالا

حسین کریم خانی^۱ حمید واحد^۲

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران

hosein.karimkhani96@ms.tabrizu.ac.ir

۲- استادیار- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران

vahed@tabrizu.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک مدولاتور نوری پهن باند حاوی دو جفت لایه گرافن و h-BN طراحی و تحلیل شده است. تک لایه‌های گرافنی با ضخامت زیر طول موجی و میزان جذب تنظیم‌پذیر به عنصر کلیدی در طراحی ادوات نوری تبدیل شده است. برای حفظ خواص تک لایه گرافنی در ساختارهای شامل دو یا چند لایه گرافنی از لایه دی‌الکتریک h-BN استفاده شده است. در این مقاله، ساختار مدولاتور نوری پیشنهادی شامل دو جفت لایه گرافن و h-BN است که اعمال ولتاژ به لایه‌های گرافنی سبب تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن شده و از این طریق، با کنترل میزان جذب گرافن، مدولاسیون نور خروجی فراهم شده است. از طریق روش FDTD، با محاسبه مشخصه‌های عملکردی مدولاتور، ساختار پیشنهادی بهینه برای مدولاتور بیان شده است. مدولاتور پیشنهادی علاوه بر عملکرد مناسب در محدوده طول موجی ۱۳۰۰-۱۸۰۰ نانومتر، در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر، عمق مدولاسیون $0.06 \text{ dB}/\mu\text{m}$ با اتلافات الحاقی $0.16 \text{ dB}/\mu\text{m}$ و ضریب خاموشی بالای ۱۲ دسی بل را نشان می‌دهد.

واژه‌های کلیدی: مدولاتور، گرافن، پلاسمونیک، h-BN، تلفات، عمق مدولاسیون

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.29252/jiaeee.18.4.59

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۱۰/۰۳

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۱۷

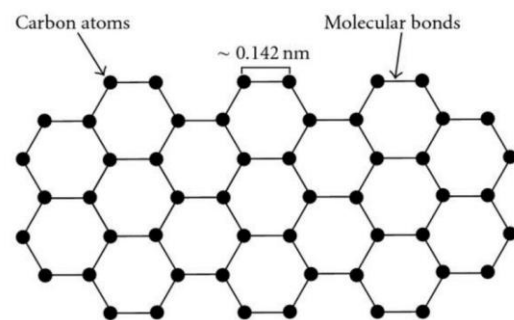
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۶/۲۹

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر حمید واحد

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تبریز - بلوار ۲۹ بهمن - دانشگاه تبریز - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

۱- مقدمه

در صنعت مخابرات، عناصر و ادوات مختلفی کاربرد دارند، که از مهمترین آن‌ها می‌توان به مدولاتورها اشاره کرد. با پیشرفت‌های اخیر در حوزه نور، حوزه مخابرات نوری نیز بشدت مورد توجه قرار گرفته است و تلاش می‌شود تا ادوات نوری موردنیاز این حوزه همچون مدولاتورهای نوری [۱] و سوئیچهای نوری [۲] طراحی و ساخته شوند. مدولاتورهای نوری سیگنال‌های الکتریکی را در طول موج‌های مختلف به اطلاعات نوری تبدیل می‌کنند. با پیشرفت روزافزون صنعت مخابرات، استفاده از ادوات اپتوالکتریکی مجتمع در ابعاد کوچک بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از این رو محققین در تلاش هستند تا مواد اپتیکی جدیدی در ساختارها استفاده کنند و ویژگی‌های این عناصر را بهبود بخشند. گرافن به دلیل ساختار منحصر بفرد و همچنین ویژگی‌های خاص اپتیکی که دارد بسیار مورد توجه قرار گرفته است. گرافن به صورت آرایش شش ضلعی از اتم‌های کربن تشکیل شده است و جذب بسیار بالایی دارد به طوری که می‌تواند ۲/۳٪ از میزان کل نور را جذب کند و جذب گرافن با اعمال ولتاژ و تغییر تراز فرمی آن قابل کنترل است [۳]. در این راستا در چند سال اخیر، انواع ادوات نوری مبتنی بر گرافن همچون مدولاتورها [۴-۸]، گیت‌های منطقی [۹]، فیلترها [۱۰] و سوئیچهای نوری [۱۱] طراحی و ساخته شده است. ساختار لایه گرافنی به صورتی است که اندرکنش میان نور و ماده را افزایش داده است. مدولاتورهای نوری مبتنی بر گرافن به دلیل ابعاد کوچک زیر طول موجی، قابلیت کاربرد در مدارات مجتمع نوری را دارند. این



شکل (۱): ساختار اتمی گرافن

نوع مدولاتورها معمولاً طوری طراحی شده‌اند که لایه گرافنی در ناحیه با توزیع شدت میدان بیشینه قرار گیرد تا از قابلیت اندرکنش قوی بین گرافن و نور بیشترین استفاده صورت گیرد. هگزاگونال بور نیتريد (h-BN) که به آن گرافن سفید نیز گویند، بخاطر خواص فیزیکی و شیمیایی منحصر بفردش در طراحی ساختارهای فتونیکی بشدت مورد توجه قرار گرفته است. این ماده از لحاظ ساختار شباهت زیادی به گرافن دارد ولی به دلیل داشتن گاف باند نسبتاً بزرگ ۵/۲۵ الکترون

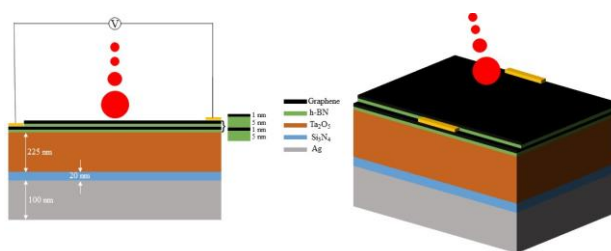
ولت، بعنوان ماده عایق رفتار می‌کند که این سبب شده است که در طراحی انواع ادوات نوری مبتنی بر گرافن بعنوان زیرلایه گرافن از آن استفاده شود [۱۲]. استفاده از h-BN بعنوان زیرلایه گرافن در ساختارهای حاوی گرافن چند لایه سبب می‌شود که لایه‌های گرافنی خواص تک لایه‌ای خود را حفظ کنند. همچنین، مقدار تحرک پذیری الکترون‌ها در گرافن در حضور زیرلایه h-BN نسبت به زیرلایه‌های مرسوم بهبود یافته است.

با در نظرگیری خواص نوری و الکترونیکی گرافن، مدولاتورهای نوری زیادی مبتنی بر گرافن چند لایه در سالهای اخیر طراحی و تحلیل شده است. لانگ فو و همکارانش، یک مدولاتور نوری مبتنی بر گرافن دولایه طراحی کردند که بین لایه‌های گرافن از ماده Al_2O_3 استفاده شده بود و توانستند عملکرد پهن باند مدولاتور را نشان دهند [۱۳]. یوان ژو و همکاران، یک مدولاتور نوری هیبریدی شامل یک موجبر سیلیکونی و دو موجبر نقره‌ای مبتنی بر گرافن طراحی کردند که از لایه Al_2O_3 بین دو لایه گرافنی استفاده شده بود و مدولاتور طراحی شده دارای اتلافات انتشاری پایین ۰/۸۵ دسی بل بود [۱۴]. بعد از سنتز لایه دو بعدی از h-BN و نمایش خواص حرارتی منحصر بفرد و پایداری شیمیایی آن، استفاده از این لایه دوبعدی در طراحی انواع ادوات نوری بویژه مدولاتورهای نوری بشدت مورد توجه قرار گرفته است. لانتینگ جی و همکارانش، یک مدولاتور الکترومغناطیسی مبتنی بر گرافن طراحی کردند که حاوی دو لایه گرافنی با یک لایه h-BN بود و ساختار شامل دو موجبر سیلیکونی در کنار هم بود که توانستند با این طراحی، کارایی مدولاسیون ساختار را بهبود ببخشند [۱۵]. در کار قبلی، ما یک مدولاتور نوری با موجبر پلاسمونیکی هیبریدی و با ساختار خاص مبتنی بر گرافن چند لایه، طراحی کردیم که مشخصات عملکردی خوبی را در محدوده طول موجی مخابراتی نشان می‌داد [۸].

در این مقاله، یک مدولاتور نوری حاوی دو جفت لایه گرافن و h-BN پیشنهاد شده است که نور ورودی به مدولاتور عمود بر این جفت لایه‌ها تابیده شده است و یک لایه نقره به عنوان یک لایه انعکاس دهنده در انتهای ساختار تعبیه شده است. با اعمال ولتاژ به لایه‌های گرافنی، تغییرات لازم در پتانسیل شیمیایی گرافن ایجاد شده و از این طریق میزان جذب آن کنترل شده است و بنابراین، میزان تغییرات ضریب شکست موثر و عمق مدولاسیون بر حسب پتانسیل شیمیایی و طول موج مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. از روش FDTD با شرایط مرزی لایه‌های کاملاً منطبق (PML) بعنوان شرایط مرزی برای تحلیل ساختار و تعیین مشخصات عملکردی مدولاتور پیشنهادی استفاده شده است. در این مقاله، ابتدا در بخش ۲، به معرفی ساختار مدولاتور پیشنهادی خواهیم پرداخت. در بخش ۳، روی نتایج حاصله در مورد مشخصه‌های فیزیکی و عملکردی مدولاتور بحث شده است و نهایتاً در بخش ۴، در مورد مدولاتور پیشنهادی نتیجه‌گیری صورت گرفته است.

۲- ساختار مدولاتور پیشنهادی

ساختار شماتیک برای مدولاتور نوری پیشنهادی در این مقاله و ترتیب قرارگیری لایه‌ها در شکل (۲) نشان داده شده است. ساختار ارایه شده از یک لایه نقره به ضخامت ۱۰۰ نانومتر و یک لایه Si_3N_4 و یک لایه Ta_2O_5 به ترتیب با ضخامت‌های ۲۰ نانومتر و ۲۲۵ نانومتر تشکیل شده است. جفت لایه گرافن و h-BN بصورت دو جفت لایه بر روی Ta_2O_5 تعبیه شده است که ضخامت لایه گرافن و لایه h-BN به ترتیب ۱ نانومتر و ۵ نانومتر در نظر گرفته شده است. لایه‌های h-BN بین لایه‌های گرافنی قرار گرفته‌اند و به عنوان لایه دی‌الکتریک عمل می‌کنند و باعث می‌شوند تا لایه‌های گرافنی خاصیت تک لایه خود را حفظ کنند. ساختار ارایه شده در این مطالعه در بازه طول موجی ۱۳۰۰ نانومتر تا ۱۸۰۰ نانومتر، که محدوده طول موج مخابراتی است، مورد بررسی قرار گرفته است. ضرایب شکست نقره، لایه Ta_2O_5 و لایه Si_3N_4 در طول موج مخابراتی ۱۵۵۰ نانومتر به ترتیب برابر $10/\lambda i + 0.51$ ، $2/1$ و $1/8$ در نظر گرفته شده است [۱۶].



شکل (۲): تصویر شماتیک از ساختار مدولاتور نوری پیشنهادی

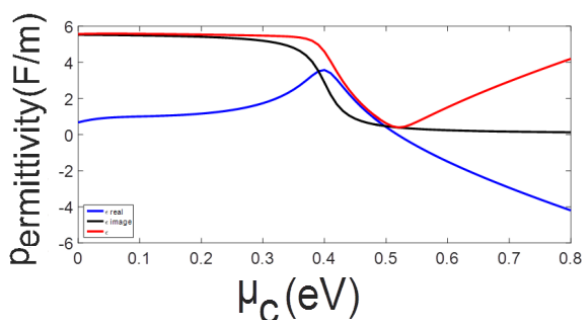
استفاده از Ta_2O_5 باعث شده ولتاژ اعمالی نسبت به حالتی که سیلیکون در ساختار استفاده شده است بسیار کمتر باشد که این بخاطر تفاوت ثابت دی‌الکتریک دو ماده است. مقدار ضریب شکست h-BN از طریق معادله Sellmeier، $n^2(\lambda) = 1 + \frac{A\lambda^2}{\lambda^2 - B}$ محاسبه است که A و B به ترتیب برابر با ۳/۳۳۶۱ و ۲۶۳۳۲ نانومتر است [۱۷]. گرافن یک فرآورده از کربن است و یک ساختار دو بعدی دارد. گرافن دارای خواص نوری منحصر به فردی است که آن را از دیگر مواد مجزا کرده و از این رو، برای تولید ادوات الکترونیکی می‌تواند جایگزین بسیار مناسبی برای دیگر مواد مرسوم باشد، و می‌توان نسل جدیدی از مواد الکترونیکی با خواص و ویژگی‌های مهم و قابلیت‌های بالا را تولید کرد و نسل جدید از ادوات و قطعات الکترونیکی و نوری را به مرحله تولید رساند. تغییرات انرژی فرمی در گرافن بصورت زیر است [۱۸]:

$$E_f \propto \sqrt{\frac{\epsilon}{a}} |V + \text{Const.}| \quad (1)$$

که در این رابطه E_f انرژی فرمی، ϵ ثابت دی‌الکتریک، d ضخامت لایه و V ولتاژ اعمالی است. ولتاژ اعمالی سبب تغییر انرژی فرمی گرافن شده و این موجب تغییر در میزان گذارهای بین باندی می‌شود و نهایتاً منجر به تغییر جذب گرافن خواهد شد و بنابراین این جذب متغیر کنترل‌پذیر باعث مدولاسیون نور با ولتاژ اعمالی خواهد شد. جذب بین باندی گرافن از طریق رابطه (۲) یعنی میزان هدایت پذیری آن تعیین می‌گردد که [۱۹]

$$\sigma = \frac{e^2}{8h} \left[\tanh\left(\frac{\hbar\omega + 2E_f}{4K_B T}\right) + \tanh\left(\frac{\hbar\omega - 2E_f}{4K_B T}\right) \right] \quad (2)$$

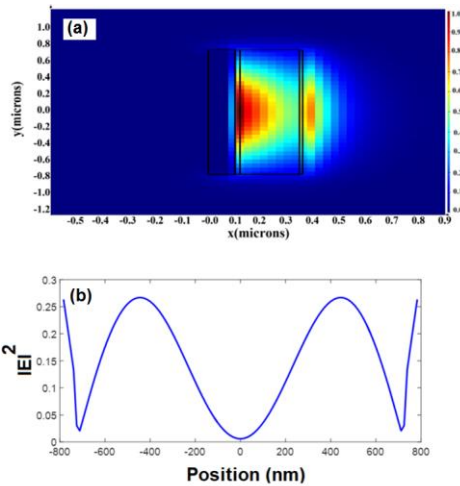
که e ، بار الکترون، \hbar ، ثابت پلانک کاهشده، T ، دمای مطلق، K_B ، ثابت بولتزمن و E_f انرژی فرمی است. توان اپتیکی جذب شده توسط گرافن تقریباً متناسب با هدایت پذیری الکترونیکی آن است. گذردهی الکترونیکی گرافن برحسب تابعی از پتانسیل شیمیایی آن در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر در شکل (۳) رسم شده است. با توجه به شکل (۳)، مقدار گذردهی الکترونیکی در پتانسیل شیمیایی ۰/۵۲ الکترون ولت تقریباً برابر صفر می‌شود بنابراین در پتانسیل‌های شیمیایی کمتر از ۰/۵۲ الکترون ولت، گرافن مانند یک ماده دی-الکتریک عمل خواهد کرد که قسمت موهومی و حقیقی گذردهی الکترونیکی، هر دو با توجه به شکل مثبت هستند و در پتانسیل‌های شیمیایی بالاتر از ۰/۵۲ الکترون ولت، گرافن خواص فلزی را از خود نشان داده است، که با توجه به شکل مولفه حقیقی گذردهی الکترونیکی منفی است.



شکل (۳): منحنی قسمت‌های حقیقی و موهومی گذردهی الکترونیکی گرافن بر حسب پتانسیل شیمیایی در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر

۳- نتایج و بحث

با توجه به ساختار مدولاتور پیشنهادی که در شکل (۲) نشان داده شده است، لایه‌های گرافن و h-BN بصورت متناوب در کنار یکدیگر قرار گرفته‌اند. در ساختار پیشنهادی از نقره، لایه Ta_2O_5 و لایه Si_3N_4 استفاده شده است. یکی از پارامترهای مهم در طراحی و تحلیل



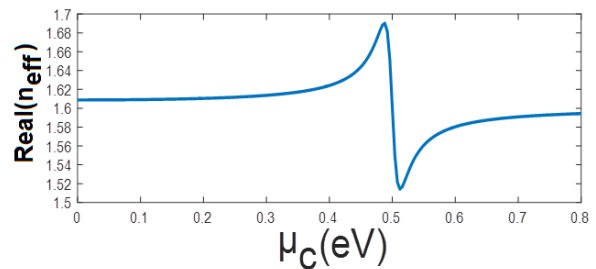
شکل (۶): (a) توزیع میدان الکتریکی مد انتشاری در ساختار مدولاتور پیشنهادی در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر (b) توزیع مجذور میدان الکتریکی در ساختار مدولاتور پیشنهادی در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر و در طول ساختار

در ساختار پیشنهادی، یک ولتاژ بایاس بر لایه‌های گرافن اعمال می‌شود این ولتاژ اعمالی سبب تغییر انرژی فرمی گرافن خواهد شد. انرژی فرمی سرعت امواج پلاسمونی سطحی را در گرافن کنترل می‌کند. بنابراین، از طریق انرژی فرمی میتوان اندرکنش مدهای انتشاری با لایه گرافنی را افزایش داد که این میتواند منجر به افزایش جذب نور توسط گرافن و نهایتاً منجر به افزایش قدرت مدولاسیون مدولاتور پیشنهادی گردد (شکل ۶b). نتایج ما نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی دارای اتلافات پایین است و می‌تواند بعنوان مدولاتور نوری عملکرد مناسبی را از خود نشان دهد. اتلافات ساختار از طریق ضریب مدی موثر بصورت زیر تعریف میشود که [۲۰]:

$$Loss = \frac{10 \text{Im}(n_{eff}) 4\pi}{\lambda_0 L n 10} \quad (3)$$

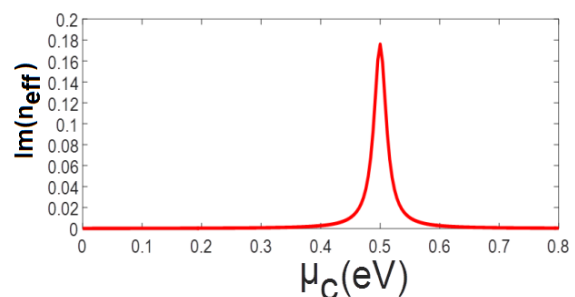
که λ_0 نشانگر طول موج است. چون اتلافات متناسب با قسمت موهومی n_{eff} است، بنابراین، اتلافات ساختار برحسب پتانسیل شیمیایی گرافن در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر رفتاری همچون رفتار قسمت موهومی n_{eff} در شکل (۵) خواهد داشت. مدولاتور پتانسیل شیمیایی ۰/۵۲ الکترون ولت بیشترین اتلافات را خواهد داشت که میتوان این نقطه را بعنوان حالت یک یا حالت on مدولاتور در نظر گرفت. همچنین در پتانسیل شیمیایی حدود ۰/۴ الکترون ولت، مدولاتور کمترین اتلاف را خواهد داشت که آن هم بعنوان حالت صفر یا حالت off مدولاتور در نظر گرفته می‌شود. میزان نسبت خاموشی بین مقدار ۱۲ تا ۱۲/۹ دسی‌بل تغییر می‌کند که بنابراین به ازای

ساختار مدولاتور پیشنهادی، که تأثیری مستقیمی در عملکرد مدولاتور دارد میزان تغییرات ضریب مدی موثر (EMI) است. ضریب مدی موثر با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن تغییر خواهد کرد. در شکل‌های (۴) و (۵)، به ترتیب تغییرات قسمت حقیقی و موهومی ضریب مدی موثر با پتانسیل شیمیایی گرافن در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر بررسی شده است. هر دو منحنی قسمت حقیقی و موهومی ضریب مدی موثر، حول نقطه $\mu = 0.52$ یک تقارن زوج و فردی را نشان می‌دهند.



شکل (۴): تغییرات قسمت حقیقی ضریب مدی موثر بر حسب پتانسیل شیمیایی گرافن در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر

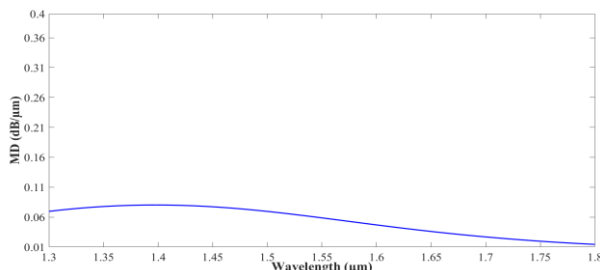
در طراحی ساختار مدولاتور پیشنهادی باید لایه‌های گرافنی در جایی از ساختار قرار داده شود که ماکزیم شدت میدان ناشی از موج ایستای شکل گرفته در آنجا باشد. این موج ایستا از برهم نهی موج نوری ورودی و موج برگشتی انعکاس یافته از لایه نقره شکل می‌گیرد. بدین منظور لازم است که ضخامت لایه Ta_2O_5 مقدار مناسب و بهینه-ای انتخاب گردد تا این قرارگیری لایه‌های گرافنی در محل توزیع شدت ماکزیم فراهم گردد تا اندرکنش بیشینه بین لایه‌های گرافنی و مد انتشاری صورت گیرد. در این مقاله، مقدار ضخامت لایه Ta_2O_5 برابر ۲۲۵ نانومتر انتخاب شده است.



شکل (۵): تغییرات قسمت موهومی ضریب مدی موثر بر حسب پتانسیل شیمیایی گرافن در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر

توزیع میدان الکتریکی مد انتشاری برای ساختار پیشنهادی در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر در شکل ۶ نشان داده شده است. که میدان الکتریکی در مد انتشاری مورد مطالعه در قسمت میانی ساختار متمرکز شده است

طول موج ۱۸۰۰ نانومتر رسیده است که در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر مقداری برابر $0.06 \text{ dB}/\mu\text{m}$ مشاهده شده است. بنابراین، مدولاتور پیشنهادی در محدوده طول موجی ۱۳۰۰ تا ۱۸۰۰ نانومتر ضریب مدولاسیون مناسب و تقریباً یکسانی نشان می‌دهد که نشانگر قابلیت باند پهنی در عملکرد مدولاتور است.



شکل (۹): تغییرات ضریب مدولاسیون مدولاتور پیشنهادی بر حسب طول موج در بازه ۱۳۰۰ تا ۱۸۰۰ نانومتر

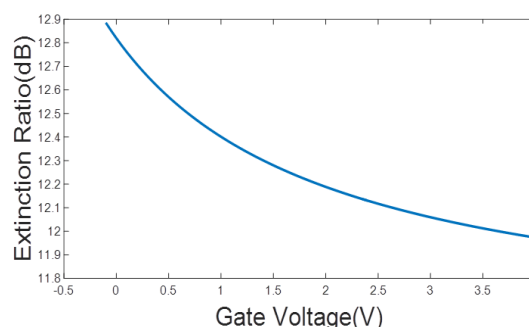
۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، طراحی و تحلیل یک مدولاتور نوری الکترواپتیکی پهن باند مبتنی بر دو جفت لایه گرافن و h-BN انجام گرفت. با توجه به خواص منحصر بفرد گرافن و با تعبیه لایه دی‌الکتریک h-BN بین لایه‌های گرافنی و انتخاب مناسب ضخامت و جنس بقیه لایه‌های ساختار پیشنهادی، کارکرد بهینه مدولاتور پیشنهادی در بازه ۱۳۰۰ تا ۱۸۰۰ نانومتر نشان داده شد. همچنین در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر، مدولاتور پیشنهادی، عمق مدولاسیون $0.06 \text{ dB}/\mu\text{m}$ ، اتلافات الحاقی $0.16 \text{ dB}/\mu\text{m}$ و مقدار ER برابر با ۱۲ دسی‌بل را نشان داد.

مراجع

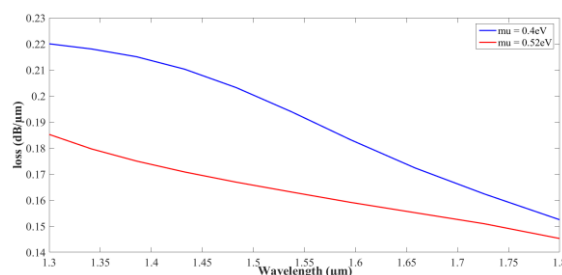
- [1] Rahmani, A., A. Rostami, H. Rasooli Saghay, and M. K. Moravvej-Farshi. "Ultrafast GaN/AlN modulator based on quantum dot for terabit all-optical communication." *Optik* 125, no. 15 (2014): 3844-3851.
- [2] حسین خیری فام، کریم عباسیان، کاوه افتخاری. "طراحی سوئیچ تمام نوری با استفاده از خاصیت غیر خطی Kerr و DIT با نانو کریستال چهار ترازه". *مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران*، دوره ۱۲، شماره ۲، صفحات ۳۲-۲۵، تهران، ۱۳۹۴.
- [3] A. H. C. Neto, F. Guinea, N. M. R. Peres, K. S. Novoselov and A. K. Geim, "The electronic properties of graphene," *Reviews of modern physics*, vol. 81, no. 1, p. 109, 2009.
- [4] Shin, Jin-Soo, and Jin Tae Kim. "Broadband silicon optical modulator using a graphene-integrated hybrid plasmonic waveguide." *Nanotechnology* 26, no. 36 (2015): 365201.
- [5] C.-C. Lee, S. Suzuki, W. Xie and T. R. Schibli, "Broadband graphene electro-optic modulators with sub-wavelength thickness," *Optics express*, vol. 20,

محدوده ولتاژ اعمالی، ساختار پیشنهادی ما، مقدار ER مناسب و نسبتاً بالای ۱۲ دسی‌بل را نشان می‌دهد که این مقدار بالا و تقریباً ثابت از محاسن ساختار پیشنهادی است.



شکل (۷): میزان تغییرات نرخ خاموشی بر حسب ولتاژ گیت اعمال شده برای ساختار پیشنهادی

در ادامه، برای بررسی رفتار پهن باند مدولاتور پیشنهادی، مشخصه‌های مدولاتور پیشنهادی در محدوده طول موجی ۱۳۰۰ نانومتر تا ۱۸۰۰ نانومتر محاسبه و تحلیل شده است. در شکل (۸)، اتلافات ساختار برای دو پتانسیل شیمیایی 0.52 eV الکترون ولت و 0.4 eV الکترون ولت بر حسب طول موج در بازه ۱۳۰۰ تا ۱۸۰۰ نانومتر رسم شده است که نشان می‌دهد برای پتانسیل شیمیایی 0.52 eV الکترون ولت، که حالت on مدولاتور است میزان اتلافات از مقدار $0.185 \text{ dB}/\mu\text{m}$ در طول موج ۱۳۰۰ نانومتر به مقدار حدود $0.147 \text{ dB}/\mu\text{m}$ در طول موج ۱۸۰۰ نانومتر کاهش می‌یابد. میزان کاهش با شیب مشابهی برای پتانسیل شیمیایی 0.4 eV الکترون ولت نیز مشاهده شده است. بنابراین، میزان اتلافات با افزایش طول موج کاهش جزئی نشان می‌دهد که میتوان نتیجه گرفت در این محدوده طول موجی ۱۳۰۰ تا ۱۸۰۰ نانومتر رفتار تقریباً یکسانی دارد.



شکل (۸): تغییرات اتلافات ساختار بر حسب طول موج برای دو پتانسیل شیمیایی 0.52 eV و 0.4 eV الکترون ولت

در شکل (۹)، مقدار ضریب مدولاسیون برای مدولاتور پیشنهادی در بازه طول موجی ۱۳۰۰ تا ۱۸۰۰ نانومتر محاسبه و رسم شده است. ضریب مدولاسیون در این بازه طول موجی از مقدار تقریباً $0.07 \text{ dB}/\mu\text{m}$ در طول موج ۱۳۰۰ نانومتر به مقدار $0.02 \text{ dB}/\mu\text{m}$ در

- properties of graphene and IV–VI semiconductors." *Physics-Uspekhi* 51, no. 9 (2008): 887.
- [20] X. Chen, Y. Wang, Y. Xiang, G. Jiang, L. Wang, Q. Bao, H. Zhang, Y. Liu, S. Wen and D. Fan, "A broadband optical modulator based on a graphene hybrid plasmonic waveguide," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, no. 21, pp. 4948-4953, 2016.
- [21] Hao, Ran, Jiamin Jin, Xinchang Wei, Xiaofeng Jin, Xianmin Zhang, and Erping Li. "Recent developments in graphene-based optical modulators." *Frontiers of Optoelectronics* 7, no. 3 (2014): 277-292.
- no. 5, pp. 5264-5269, 2012.
- [6] H. Vahed and S. S. Ahmadi, "Graphene-based plasmonic electro-optic modulator with sub-wavelength thickness and improved modulation depth," *Applied Physics B*, vol. 123, no. 11, p. 265, 2017.
- [7] S. Luo, Y. Wang, X. Tong, and Z. Wang, "Graphene-Based Optical Modulators", *Nanoscale research letters*, 10, 199, 2015.
- [8] Vahed, Hamid, and Sahar Soltan Ahmadi. "Hybrid plasmonic optical modulator based on multi-layer graphene." *Optical and Quantum Electronics* 52, no. 1 (2020): 2.
- [9] Sadeghi, Tannaz, Saeed Golmohammadi, Ali Farmani, and Hamed Baghban. "Improving the performance of nanostructure multifunctional graphene plasmonic logic gates utilizing coupled-mode theory." *Applied Physics B* 125, no. 10 (2019): 189.
- [۱۰] غلامرضا مرادی، امین قهرمانی، رضا صراف شیرازی. "فیلترهای مبتنی بر گرافین پهن باند قابل تنظیم در باند فرکانسی تراهرتز". *مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران*، دوره ۱۶، شماره ۲، صفحات ۳۶-۳۱، تهران، ۱۳۹۸.
- [11] Farmani, Ali, Abbas Zarifkar, Mohammad H. Sheikhi, and Mehdi Miri. "Design of a tunable graphene plasmonic-on-white graphene switch at infrared range." *Superlattices and Microstructures* 112 (2017): 404-414.
- [12] Rezaei, Mir Hamid, Rahim Boroumandi, Abbas Zarifkar, and Ali Farmani. "Nano-scale multifunctional logic gate based on graphene/hexagonal boron nitride plasmonic waveguides." *IET Optoelectronics* 14, no. 1 (2019): 37-43.
- [13] Ye, Longfang, Kehan Sui, Yong Zhang, and Qing Huo Liu. "Broadband optical waveguide modulators based on strongly coupled hybrid graphene and metal nanoribbons for near-infrared applications." *Nanoscale* 11, no. 7 (2019): 3229-3239.
- [14] Zhu, Yuan, Chunyu Deng, Lei Huang, Guohua Hu, Binfeng Yun, Ruohu Zhang, and Yiping Cui. "Hybrid plasmonic graphene modulator with buried silicon waveguide." *Optics Communications* 456 (2020): 124559.
- [15] Ji, Lanting, Daming Zhang, Yan Xu, Yang Gao, Chi Wu, Xibin Wang, Zhiyong Li, and Xiaoqiang Sun. "Design of an electro-absorption modulator based on graphene-on-silicon slot waveguide." *IEEE Photonics Journal* 11, no. 3 (2019): 1-11.
- [16] Lee, C-C., S. Suzuki, W. Xie, and T. R. Schibli. "Broadband graphene electro-optic modulators with sub-wavelength thickness." *Optics express* 20, no. 5 (2012): 5264-5269.
- [17] Rah, Yoonhyuk, Yeonghoon Jin, Sejeong Kim, and Kyoungsik Yu. "Optical analysis of the refractive index and birefringence of hexagonal boron nitride from the visible to near-infrared." *Optics letters* 44, no. 15 (2019): 3797-3800.
- [18] Hao, Ran, Wei Du, Hongsheng Chen, Xiaofeng Jin, Longzhi Yang, and Erping Li. "Ultra-compact optical modulator by graphene induced electro-refraction effect." *Applied Physics Letters* 103, no. 6 (2013): 061116.
- [19] Falkovsky, Leonid Aleksandrovich. "Optical

