

Vol. 12/ No. 45/Autumn 2022

Research Article

Analysis of an Electro-Optic Modulator Based Photonic Crystal Nanobeam Cavity Coupled to Alternating Structure of Graphene on Aluminum Oxide

Mozafaredin FerdosianTehrani, Ph.D. Student¹  | Rahim Ghayour, Professor²  | Maryam Mohitpour, Assistant Professor³ 

¹Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, m.ferdosian@gmail.com

²Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, rghayour@shirazu.ac.ir

³Department of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, mohitpour@gmail.com

Correspondence

Rahim Ghayour, Professor of Electrical Engineering, Shiraz Branch, Islamic Azad University, Shiraz, Iran, rghayour@shirazu.ac.ir

Received: 10 April 2022

Revised: 10 June 2022

Accepted: 14 June 2022

Abstract

In this paper, we present an electro-optical modulator based on graphene absorption. In this structure, graphene is placed on aluminum oxide, the structure of which is repeated alternately. This alternating structure of graphene on aluminum oxide is located inside a semi-cylindrical cavity in a 1-dimensional photonic crystal nanobeam cavity. Unlike previous articles, which consisted of cylinder holes and different areas in the nanobeam cavity are formed by changing the radius of the holes, in this structure, semi-cylinder holes have been used and, different areas are formed by rotating these semi-cylinders. This type of crystal photonics has a high-quality factor. Also, this type of modulator requires little space after construction, In this paper, the three-dimensional finite-difference time-domain method is used for analysis. In this modulator, it is observed that by changing the bias voltage, the amount of absorption peak and also its resonance wavelength are changed. As a result of these changes, we achieve a modulation depth of about 7dB.

Keywords: Aluminum Oxide, Photonic Crystal Nanobeam Cavity, Modulator, Graphene.

Highlights

- Semi-cylindrical holes are used in this structure.
- Different areas are formed by rotating semi-cylinders holes in this photonic crystal nanobeam cavity.
- This type of crystal photonics has a high-quality factor.

Citation: M. FerdosianTehrani, R. Ghayour, and M. Mohitpour, "Analysis of an electro-optic modulator based Photonic Crystal Nanobeam Cavity Coupled to Alternating Structure of Graphene on Aluminum Oxide," *Journal of Southern Communication Engineering*, vol. 12, no. 45, pp. 61–74, 2022, doi:10.30495/jce.2022.691828, (in Persian).

مقاله پژوهشی

تحلیل یک مدولاتور الکترواپتیک بر پایه کاواک نانو پرتو بلور فوتونی تک بعدی همراه با ساختار متناوب گرافن بر اکسید آلومینیوم

مظفرالدین فردوسیان طهرانی ^۱ | رحیم غیور ^{۲*} | مریم محیط پور ^۳ ID

چکیده:

در این مقاله، ما یک مدولاتور الکترواپتیک بر اساس جذب گرافن ارائه می‌کنیم. در این ساختار، گرافن بر روی اکسید آلومینیوم قرار گرفته که ساختار به صورت متناوب تکرار می‌شود. این ساختار متناوب گرافن بر اکسید آلومینیوم در داخل یک حفره نیم‌استوانه‌ای، درون یک کاواک نانو پرتو بلور فوتونی یک بعدی قرار گرفته است. برخلاف مقالات قبلی که کاواک نانو پرتو بلور فوتونی یک بعدی شامل حفره‌های استوانه‌ای بوده و نواحی مختلف با تغییر شعاع این حفره‌ها ایجاد می‌شد، در این ساختار از حفره‌های نیمه استوانه‌ای استفاده شده و با چرخش این نیم‌استوانه‌ها، نواحی مختلف ساختار کاواک نانو پرتو بلور فوتونی ایجاد می‌شود. این نوع بلور فوتونی دارای ضریب کیفیت بالایی است. همچنین این نوع مدولاتورها پس از ساخت به فضای کمی نیاز دارند. در این مقاله از روش دامنه محدود در حوزه زمان - سه بعدی برای تحلیل استفاده شده است. در این مدولاتور مشاهده می‌شود که با تغییر ولتاژ بایاس میزان پیک جذب و همچنین طول موج رزونانس آن تغییر می‌کند. در نتیجه این تغییرات، به عمق مدولاسیونی در حدود ۷ دسی بل دست می‌یابیم.

کلیدواژه‌ها: اکسید آلومینیوم، کاواک نانو پرتو بلور فوتونی، گرافن، مدولاتور.

^۱ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
m.ferdosian@gmail.com

^۲ استاد گروه برق، دانشکده مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
rghayour@shirazu.ac.ir

^۳ استادیار گروه برق، دانشکده مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
mohitpour@gmail.com

نویسنده مسئول

* رحیم غیور، استاد، دانشکده مهندسی برق، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران
rghayour@shirazu.ac.ir

تاریخ دریافت: ۲۱ فروردین ۱۴۰۱

تاریخ بازنگری: ۲۰ خرداد ۱۴۰۱

تاریخ پذیرش: ۲۴ خرداد ۱۴۰۱

<https://doi.org/10.30495/jce.2022.691828>

۱- مقدمه

مدولاتورهای الکترو-اپتیک (EO) در مخابرات شبکه‌های مخابرات امروزی و اتصالات به کاررفته در آن نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند [۱، ۲]. مدولاتورهای مختلفی بر ساختارهای مختلف از قبیل مدولاتورهای مبتنی بر موج بر [۳-۴]، مدولاتورهای تداخل سنج ماخ زندر [۵، ۶]، مدولاتورهای مبتنی بر رزونانس پلاسمون سطحی [۷، ۸]، مدولاتورهای میکروکاواک [۹-۱۹] ارائه و در هر کدام پیشرفت‌هایی حاصل شده است. باید در نظر داشت که مدولاتورهایی که بر اساس تشدیدکننده عمل می‌کند از لحاظ ابعاد و مصرف انرژی بهبود قابل توجهی یافته‌اند؛ بنابراین این نوع مدولاتورها به عنوان گزینه مناسب در مدارات مجتمع نوری در نظر گرفته می‌شود که می‌توان بازدهی انرژی این نوع مدولاتورها را به وسیله افزایش فاکتور پرسل بهبود داد [۹]. میکرو کاواک‌ها به علت اینکه دارای ضریب کیفیت بالا هستند به علت محدود کردن مدهای نوری بسیار مورد توجه هستند [۱۰]. انواع مختلفی از میکرو کاواک‌ها موجود است. از جمله می‌توان کاواک‌های میکرو دیسک [۱۱]، پیست مسابقه [۱۲]، حلقوی [۱۳]، فابری پرو [۱۴] و کریستال فوتونی [۱۵-۱۹] را نام برد. در این میان مدولاتورهای مبتنی بر کریستال فوتونی دوبعدی [۱۵، ۱۶]

و یک‌بعدی [۱۹-۱۷] به دلیل ضریب کیفیت بالا و سایز کم بسیار مورد توجه هستند. میان این دو نوع مدولاتور حالت یک‌بعدی با توجه به حجم کمتر، سرعت مدولاسیون بالا در مدارات مجتمع بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۲۰]. یکی از مهم‌ترین ساختارهای یک‌بعدی مورد استفاده، کاواک نانو پرتو بلور فوتونی (PCNC) است [۲۱]. قسمت دیگر ساختار ارائه شده در این مقاله گرافن است. گرافن یک ساختار دوبعدی به صورت لانه زنبوری هست که در تکنولوژی الکترونیک و مخابرات امروزی به علت خواص الکتریکی، نوری و گرمایی منحصربه‌فرد آن بسیار مورد توجه قرار گرفته است. از مهم‌ترین مزایای آن، قابلیت تحرک الکترون بسیار بالا و قابلیت تنظیم خواص جذب را می‌توان نام برد [۲۲]. می‌توان رسانایی سطحی ناشی از الکترون‌ها را به وسیله میدان الکتریکی اعمال شده به آن تنظیم کرد، این خاصیت به خصوص در محدوده نزدیک - مادون قرمز که در کاربردهای مخابراتی مورد استفاده قرار می‌گیرد، مورد توجه قرار گرفته است [۲۳]. در مقالات قبل روش‌هایی برای مدولاتور نوری ارائه شده است که در آن PCNC مورد استفاده قرار گرفته و روی PCNC یک لایه گرافن تک‌لایه پوشیده شده و به وسیله اعمال ولتاژ به آن می‌توان مقدار طول موج تشدید را مدوله کرد [۲۴]. گرافن تک‌لایه به علت اینکه بسیار نازک است غالباً برای حفظ فرکانس تشدید با مشکل مواجه می‌شود، بنابراین این مدولاتورهای نوری معمولاً در محدوده کمی از تغییرات طول موج درست عمل می‌کنند [۲۵، ۲۶]. همچنین در این مدولاتورهای نوری اهمیت ساخت تک‌لایه گرافن بیشتر می‌شود زیرا وجود نقص در لایه گرافن بر حرکت الکترون‌های سطحی به شدت تأثیرگذار است و این تأثیر به شدت عملکرد مدولاتور را مورد تأثیر قرار می‌دهد [۲۷، ۲۸]. یکی از روش‌هایی که می‌توان این تأثیرات را کم کرد، استفاده از گرافن به صورت چندلایه است که بین آن‌ها لایه‌ای متفاوت قرار گیرد. یکی از ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم است [۲۹]. این ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم در سوراخ مرکزی کاواک قرار گرفته است که از آن برای جذب نور استفاده می‌شود. در ساختارهای ذکر شده در مقالات گذشته PCNC بر اساس حفره‌های استوانه‌ای شکل است [۲۱] که به وسیله تغییر شعاع این استوانه‌ها، قسمت‌های مختلف PCNC شکل می‌گیرند ولی در این مقاله برخلاف کارهای قبل در این حوزه و برای اولین بار در مقوله مدولاتورهای نوری، در PCNC به کاررفته از حفره‌های نیم استوانه استفاده شده است که اساس کار برای تفکیک نواحی مختلف PCNC از چرخش حفره‌ها استفاده شده است که این کار باعث افزایش در ضریب کیفیت خواهد شد [۳۰]. در این کار، جذب نوری در ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم هنگام تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن قابل تنظیم است و با ولتاژ الکتریکی، می‌توانیم پتانسیل شیمیایی را تغییر دهیم و به صورت خلاصه به وسیله تغییر ولتاژ می‌توان پتانسیل شیمیایی را تغییر داد که این تغییر در پتانسیل شیمیایی باعث تغییر در جذب نور در ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم می‌شود و این تغییر جذب نور باعث تغییر در انتقال نور از PCNC می‌شود؛ بنابراین به وسیله ولتاژ می‌توان نور را کنترل کرد.

۲- طراحی و بررسی کلی ساختار

در ابتدا مدولاتور ارائه شده بر پایه اثر نوری گرافن را از لحاظ قابلیت تنظیم ضریب گذردهی ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم بررسی می‌کنیم. به طور کلی، گرافن تک‌لایه در بررسی هدایت الکتریکی، یا به عنوان یک لایه بی‌نهایت نازک دوبعدی با رسانایی سطحی γ_g^1 یا به عنوان یک محیط واقعی سه‌بعدی با بررسی ضریب گذردهی ϵ_g^2 مدل می‌شود. در حالت سه‌بعدی توسط رابطه $\epsilon_g = 1 + j\gamma_g/\omega\epsilon_0 h_g$ بررسی می‌شود، که ω فرکانس زاویه‌ای نور ورودی، ϵ_0 ضریب گذردهی خلأ است، h_g ضخامت گرافن تک‌لایه است. از نظر رسانایی، γ_g را می‌توان به صورت $\gamma_g = \gamma_{intra}(\omega) + \gamma_{inter}(\omega)$ در نظر گرفت، که شامل دو بخش است [۳۲-۳۴]: $\gamma_{intra}(\omega)$ ناشی از جذب فوتون و انتقال الکترون بین باندهای انرژی است، در حالی که $\gamma_{inter}(\omega)$ ناشی از فرآیند انتقال الکترون درون باندی ایجاد می‌شود [۳۵].

$$\gamma_{intra}(\omega) = j \frac{e^2}{\pi \hbar (\hbar\omega + j\Gamma_c)} \left[\mu_c + 2k_B T \ln \left(e^{-\mu_c/k_B T} + 1 \right) \right] \quad (1)$$

¹ surface conductivity

² permittivity

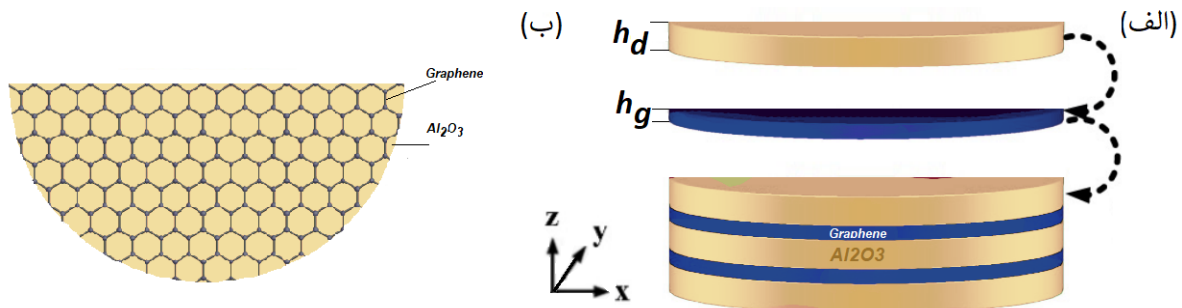
$$\gamma_{inter}(\omega) = j \frac{e^2}{4\pi\hbar} \ln \left[\frac{2|\mu_c| - (\hbar\omega + j\Gamma)}{2|\mu_c| + (\hbar\omega + j\Gamma)} \right] \quad (2)$$

که در آن q بار الکترون است، \hbar ثابت پلانک^۱، k_B ثابت بولتزمن^۲، μ_c پتانسیل شیمیایی^۳ گرافن و Γ_c ثابت میرایی است. از معادله (۱) و (۲) به وضوح دیده می‌شود که رسانایی گرافن تک‌لایه با پتانسیل شیمیایی آن ارتباط دارد. همان‌طور که در شکل (۱-الف) نشان داده شده است، می‌توان ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم را با رسوب لایه گرافن و لایه دی‌اکتریک Al_2O_3 به صورت متناوب با اشکال مطلوب مانند استوانه، نیم‌استوانه یا مکعب ساخت. در شکل (۱-الف)، لایه‌های گرافن توسط لایه‌های Al_2O_3 با ضخامت h_d (۱۰۰ nm) و ضریب گذردهی نسبی ϵ_A (۴/۹) جدا شده‌اند. علاوه بر این، h_d به اندازه کافی ضخیم است تا از فعل و انفعالات بین لایه‌های گرافن مجاور (به‌عنوان مثال، انتقال بین لایه‌ای) جلوگیری کند. شکل (۱-ب) نمای بالایی ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم را نشان می‌دهد. با این فرض، خصوصیات ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم را می‌توان از طریق تئوری محیط مؤثر^۴ مورد استفاده قرار داد. با توجه به اینکه لایه‌های گرافن دارای ضخامت ناچیزی هستند، ضریب گذردهی ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم را به صورت زیر بیان کرد [۳۶]:

$$\epsilon_{\parallel} = \epsilon_A + \frac{i\gamma_g(\omega)}{\omega\epsilon_0 h_d} \quad (3)$$

$$\epsilon_{\perp} = \epsilon_A$$

که در آن ϵ_{\parallel} و ϵ_{\perp} به ترتیب اجزا موازی و عمود بر صفحه افقی ضریب گذردهی هستند. در این حالت، می‌توان دریافت که ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم، یک ماده ناهمسانگرد تک محوره^۵ است. بر اساس معادله (۱) تا (۳)، ϵ_{\parallel} را می‌توان با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن مستقیماً کنترل کرد، در حالی که ϵ_{\perp} فقط به ضریب گذردهی Al_2O_3 وابسته است.



شکل ۱: ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم (الف) نمای از جلو ساختار. (ب) نمای از بالا ساختار.

با توجه به اینکه این مدولاتور به وسیله ولتاژ گیت بایاس می‌شود، باید میزان اثر بخشی این ولتاژ را بر روی میزان پتانسیل شیمیایی بررسی کرد. رابطه (۴) ارتباط آن‌ها را نشان می‌دهد [۳۷].

$$\mu_c = \hbar v_F \sqrt{\pi \left(n_s + \frac{C|V_{gl}|}{q} \right)} \quad (4)$$

¹ Planck constant

² Boltzmann constant

³ chemical potential

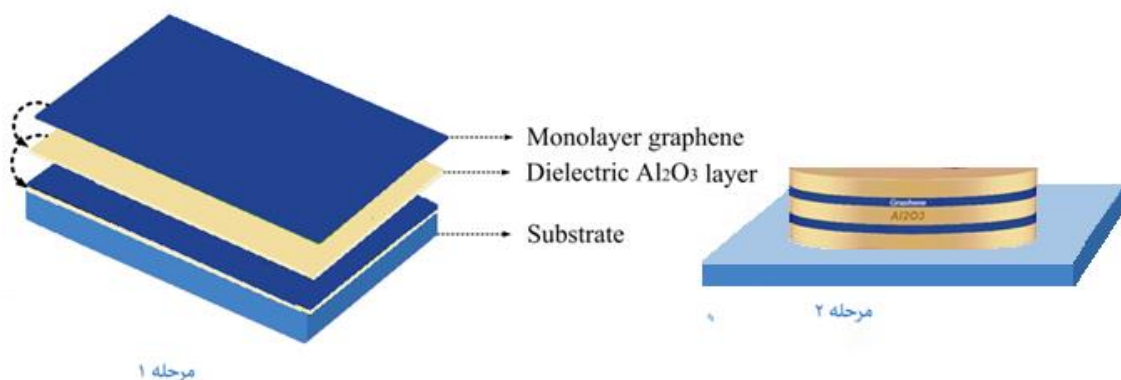
⁴ effective medium theory

⁵ uniaxial anisotropic

جایی که v_F سرعت فرمی برای گرافن، C ظرفیت خازنی مؤثر در واحد سطح، V_g ولتاژ بایاس، n_s چگالی حامل‌های ذاتی^۱ است. از معادله (۴) می‌توان گفت که افزایش ولتاژ گیت می‌تواند منجر به بزرگ شدن μ_c شود. بدین ترتیب، از مشتقات فرمول فوق می‌توان دریافت که قابلیت رسانایی ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم می‌تواند به راحتی از طریق ولتاژ اعمال شده تغییر کند، که این فرایند باعث می‌شود از آن‌ها به عنوان یک گزینه مناسب جهت مدولاتورهای مبتنی بر گرافن نام برد.

در این مقاله گرچه تمرکز بر روی روش تئوری و شبیه‌سازی بوده است. یک روش به عنوان نمونه در زیر ارائه شده و در مقاله اضافه شده است:

در مرحله اول قرار دادن لایه دی‌الکتریک Al_2O_3 و گرافن به صورت متناوب بر روی زیر لایه بدون الگو و در مرحله دوم: الگوبرداری از آن در آرایه پشت‌های گرافن مطلوب است [۳۸]. برای این کار ابتدا با روش لیتوگرافی پرتو الکترونی (EBL^2) و سپس با اسپینگ پلاسمای جفت القایی (ICP^3) نیم استوانه‌های مورد نظر را شکل می‌دهیم این مراحل در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲: مراحل ساخت . ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم

شماتیک PCNC مورد بررسی به وسیله ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم به صورت شکل (۳-الف) است که شامل PCNC، ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم و بستر SiO_2 است. ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم در حفره هوای مرکزی PCNC تعبیه شده است. شکل (۳-ب) نمای بالایی PCNC را نشان می‌دهد که متشکل از حفره‌های نیم‌استوانه ای در یک نوار موج‌بر سیلیکون است که کل آن‌ها بر روی عایق قرار دارد. در PCNC، شعاع هر حفره به طور یکسان به عنوان r و فاصله بین حفره‌های مجاور به عنوان a تعریف شده است. شکل (۳-ج) نمای جلو مدولاتور مورد استفاده ما را نشان می‌دهد، جایی که ضخامت زیرلایه برابر h_1 است و ارتفاع موج‌بر و PCNC، یکسان و برابر h_2 است. عرض PCNC با w نشان داده می‌شود. شعاع ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم برابر با r_g است، باید در نظر داشت که این شعاع کمی کمتر از شعاع حفره‌های نیم‌استوانه‌ها طراحی شده است (به دیواره‌های آن‌ها متصل نیست) تا در عملکرد خللی وارد نشود.

در این مقاله ابعاد کلی ساختار با توجه به روش ارائه شده در مقالات قبل و همچنین خصوصیتی که در عمل موجود است مانند محدودیت‌های ساخت ویفر به دست آمده است. [۳۹]

$$a = 460 \text{ nm}, r = 210 \text{ nm}, r_g = 190 \text{ nm}, w = 900 \text{ nm}, h_1 = 300 \text{ nm}, h_2 = 180 \text{ nm}, h_3 = 50 \text{ nm}$$

همچنین برای داشتن طول موج تشدید در محدوده 1550 nm تعداد سوراخ‌های کاواک برابر با ۱۰ در نظر گرفته می‌شود.

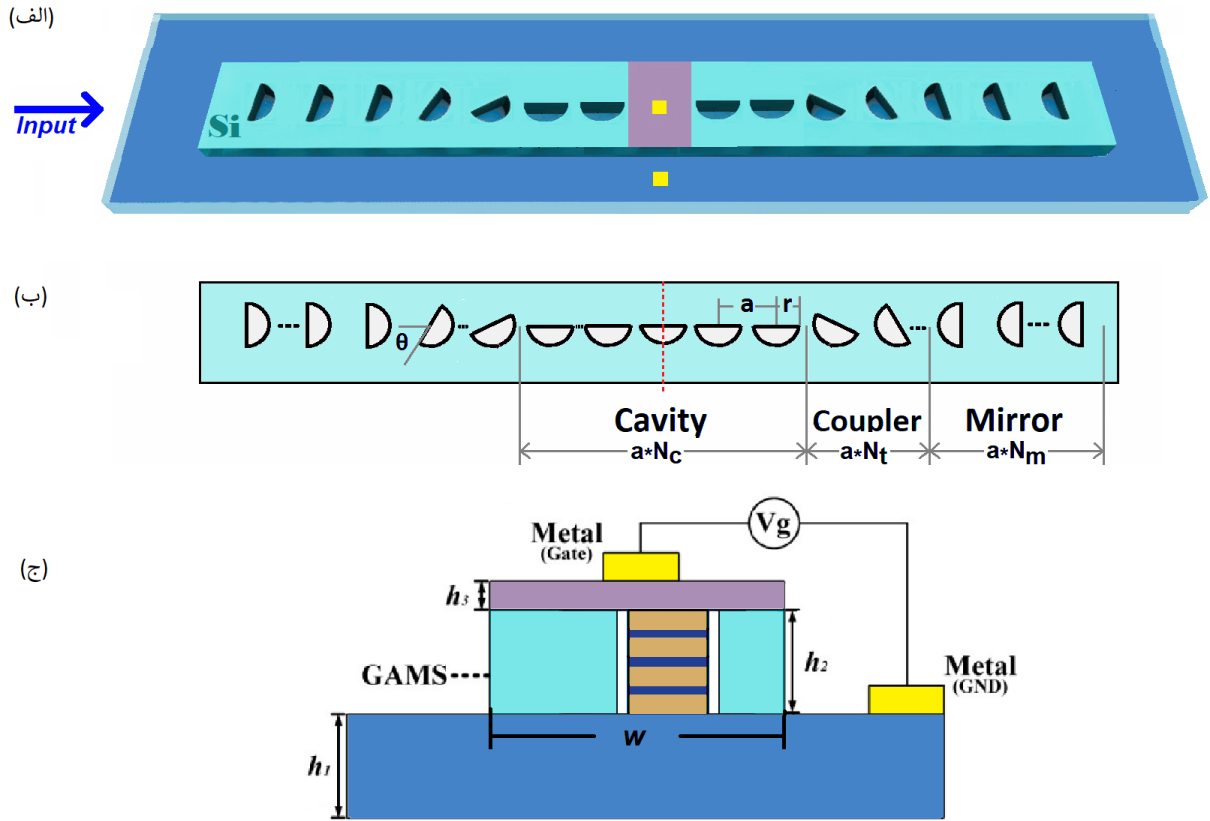
همچنین برای داشتن یک ضریب کیفیت نسبتاً بالا تعداد $N_l = 5, N_m = 9$ در نظر گرفته می‌شود. [۳۰]

$$a = 460 \text{ nm}, r = 210 \text{ nm}, r_g = 190 \text{ nm}, w = 900 \text{ nm}, h_1 = 300 \text{ nm}, h_2 = 180 \text{ nm}, h_3 = 50 \text{ nm}, N_l = 5, N_c = 10, N_m = 9.$$

¹ intrinsic carrier

² Electron beam lithography

³ Inductive coupling plasma



شکل ۳: شماتیک کلی مدولاتور به وسیله ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم. (الف) شماتیک PCNC مورد بررسی (ب) نمای بالایی PCNC مورد استفاده. (ج) نمای از جلو ساختار مدولاتور در صورتی که ساختار را از خط تقارن قرمز نشان داده شده در شکل (۳-ب) برش زد

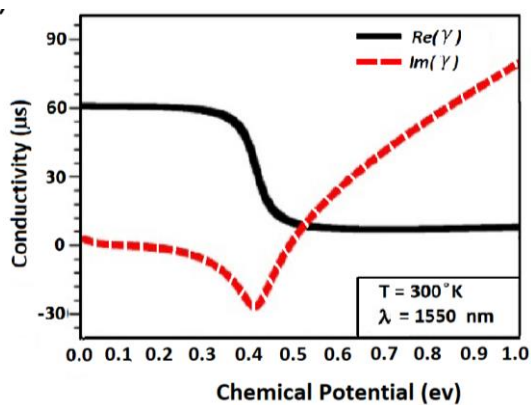
یک صفحه سیلیکونی دوپ شده با ضخامت h_3 و عرض w_2 و طول d در بالای ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم و بدون هیچ فاصله‌ای قرار گرفته است، دو الکترومدولاتور به ترتیب بر روی صفحه سیلیکون دوپ شده و زیر لایه SiO_2 قرار گرفته است. در این حالت، پتانسیل شیمیایی ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم می‌تواند از طریق میدان الکتریکی اعمال شده توسط این الکترودها تنظیم شود. علاوه بر این، جدول (۱) رابطه بین ضخامت لایه‌های Al_2O_3 و تعداد لایه‌های گرافن را در ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مجموع ضخامت‌های Al_2O_3 و گرافن باید برابر با h_2 باشد، مشخص است با افزایش تعداد لایه‌های گرافن (با Al_2O_3)، ضخامت لایه‌های Al_2O_3 کاهش می‌یابد. باید در نظر داشت که لایه اول و آخر در این ساختار متناوب، Al_2O_3 است، بنابراین تعداد لایه‌های گرافن همیشه یکی از Al_2O_3 کمتر است.

شکل (۴-الف و ب) قابلیت رسانایی تک‌لایه گرافن γ_g و ضریب گذردهی $\epsilon_{||}$ را برای ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم در پتانسیل‌های شیمیایی مختلف در طول موج 1550 nm و دمای 300 K نشان می‌دهد. در شکل (۴-الف)، بخش‌های حقیقی و موهومی رسانایی گرافن تک‌لایه برحسب پتانسیل شیمیایی محاسبه شده مطابق معادلات (۱) و (۲) نشان می‌دهیم افزایش پتانسیل شیمیایی، قسمت حقیقی γ_g به تدریج کاهش می‌یابد (هنگامی که حدود 0.4 eV ، این سرعت کاهش قسمت حقیقی γ_g افزایش می‌یابد).

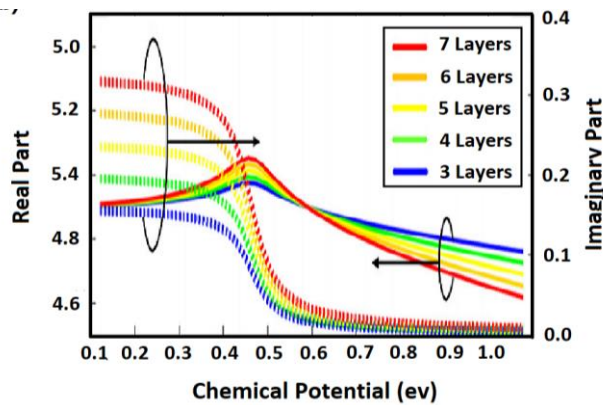
جدول ۱: رابطه بین ضخامت لایه‌های Al_2O_3 و تعداد لایه‌های گرافن در ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم

ارتفاع کلی ۲۲۰ nm	ضخامت لایه گرافن: ۱ nm
تعداد لایه‌های گرافن	ضخامت لایه دی‌الکتریک (h_d)
۳	۵۴/۲۵ nm
۴	۴۳/۲۰ nm
۵	۳۵/۸۳ nm
۶	۳۰/۵۷ nm
۷	۲۶/۶۳ nm

قسمت موهمی γ_g برخلاف قسمت حقیقی، ابتدا کاهش می‌یابد و پس از $eV \sim 0.4$ شروع به افزایش می‌کند [۴۰]. باید توجه داشت که نزدیک به پتانسیل شیمیایی $eV \sim 0.4$ ، تغییرات قابل توجهی در رسانایی سطح رخ می‌دهد. در پتانسیل‌های شیمیایی کمتر از این مقدار، رسانایی گرافن تقریباً مقداری حقیقی است، در حالی که برای پتانسیل‌های شیمیایی بزرگ‌تر از $eV \sim 0.5$ رسانایی گرافن تقریباً مقداری موهمی است. به عبارت دیگر در پتانسیل شیمیایی $eV \sim 0.5$ دو نمودار حقیقی و موهمی با یکدیگر برخورد کرده خواص فلزی به خواص دی‌الکتریک تبدیل می‌شود. این تغییر رسانایی به وسیله پتانسیل شیمیایی، گرافن را به عنوان یک گزینه کاربردی برای مدولاتور پیشنهادی ما مطرح می‌کند.



(الف)



(ب)

شکل ۴: قابلیت رسانایی تک‌لایه گرافن γ_g و ضریب گذردهی $\epsilon_{||}$ را برای ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم در پتانسیل‌های شیمیایی مختلف در طول موج 1550 nm و دمای 300 K : (الف) بخش حقیقی و موهمی رسانایی گرافن تک‌لایه [۳۸]. (ب) بخش حقیقی و موهمی گذردهی $\epsilon_{||}$ ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم با تعداد لایه‌های مختلف گرافن.

شکل (۴-ب)، با توجه به مقادیر حقیقی و موهمی رسانایی تک‌لایه گرافن γ_g در شکل (۴-الف) و با جایگذاری مقادیر ضخامت لایه دی‌الکتریک (h_d) در رابطه (۳) به دست آمده است. همان‌گونه که از رابطه (۳) مشخص است بخش‌های حقیقی و موهمی رسانایی گرافن به ترتیب قسمت‌های موهمی و حقیقی گذردهی نسبی را تعیین می‌کنند بخش حقیقی میرایی و طول موج و بخش موهمی بر روی مقدار جذب نور تأثیر می‌گذارد. در این شکل مشخص است که با افزایش پتانسیل شیمیایی، قسمت حقیقی $\epsilon_{||}$ ابتدا با μ_c افزایش و پس از $eV \sim 0.5$ کاهش می‌یابد، در حالی که در قسمت موهمی $\epsilon_{||}$ ، هنگامی که پتانسیل شیمیایی در ناحیه $eV \sim 0.4 < \mu_c < 0.6 eV$ است به سرعت کاهش و در مناطق دیگر به آرامی تغییر می‌کند. محدوده

مدولاسیون (اختلاف بین بیشترین و کمترین مقدار) قسمت موهومی در شکل (۴-ب)، وقتی که تعداد لایه‌های گرافن در ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم از سه‌به‌هفت افزایش پیدا می‌کند، تقریباً ۳ برابر افزایش می‌یابد

۳- بررسی نظری ساختار

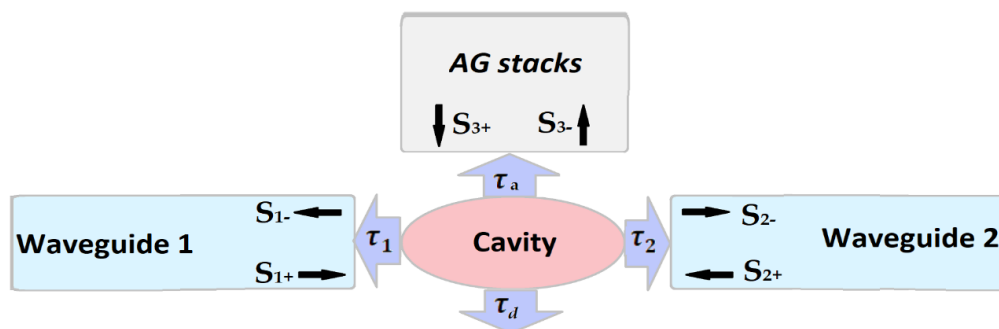
این ساختار را می‌توان به صورت یک موج‌بر - کاواک - موج‌بر همان‌گونه که در شکل (۵) نشان داده شده است، در نظر گرفت. تئوری مدهای تزویج شده زمانی^۱ را می‌توان برای بررسی رفتار ساختار به صورت نظری با معادلات زیر استفاده کرد [۳۰، ۴۰]:

$$-i\omega A = -i\omega_0 A - \frac{A}{\tau_1} - \frac{A}{\tau_2} - \frac{A}{\tau_d} - \frac{A}{\tau_a} + \sqrt{\frac{2}{\tau_1}} S_{1+} + \sqrt{\frac{2}{\tau_2}} S_{2+} + \sqrt{\frac{2}{\tau_a}} S_{3+} \quad (5)$$

$$S_{1-} = -S_{1+} + \sqrt{\frac{2}{\tau_1}} A \quad (6)$$

$$S_{2-} = \sqrt{\frac{2}{\tau_2}} A \quad (7)$$

$$S_{3-} = \sqrt{\frac{2}{\tau_a}} A \quad (8)$$



شکل ۵: ساختار موج‌بر - کاواک - موج‌بر برای بررسی یک PCNC که درون آن ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم قرار گرفته است.

که در آن S_{i+} دامنه مد^۲ از موج‌بر i و S_{i-} یا ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم به سوی کاواک، S_{i-} ($i = 1, 2, 3$) دامنه مد از کاواک به سوی موج‌بر i یا ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم، دامنه میدان^۳ $(1/\tau_i)$ به ازاء نرخ محو شدن^۴ $(1/\tau_a)$ نرخ جذب^۵ در ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم است. با فرض اینکه هیچ منبعی در موج‌بر ۲ و ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم وجود ندارد، می‌توانیم بنویسیم $S_{3+} = S_{2+} = 0$. بنابراین، با توجه به روابط (۵) و (۷)، ضریب انتقال در فرکانس تشدید (ω_0) به صورت زیر داده می‌شود [۳۰]:

$$T(\omega_0) = \frac{|S_{2-}|^2}{|S_{1+}|^2} \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{4}{\tau_1 \tau_2 \left(\frac{1}{\tau_d} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_a} \right)^2} \quad (9)$$

¹ temporal coupled-mode theory

² amplitude of the mode

³ field Domain

⁴ decay rates

⁵ absorption rate

بازتاب نور مطابق رابطه (۵) و (۶) در فرکانس تشدید (ω_0) به صورت زیر است [۳۰]

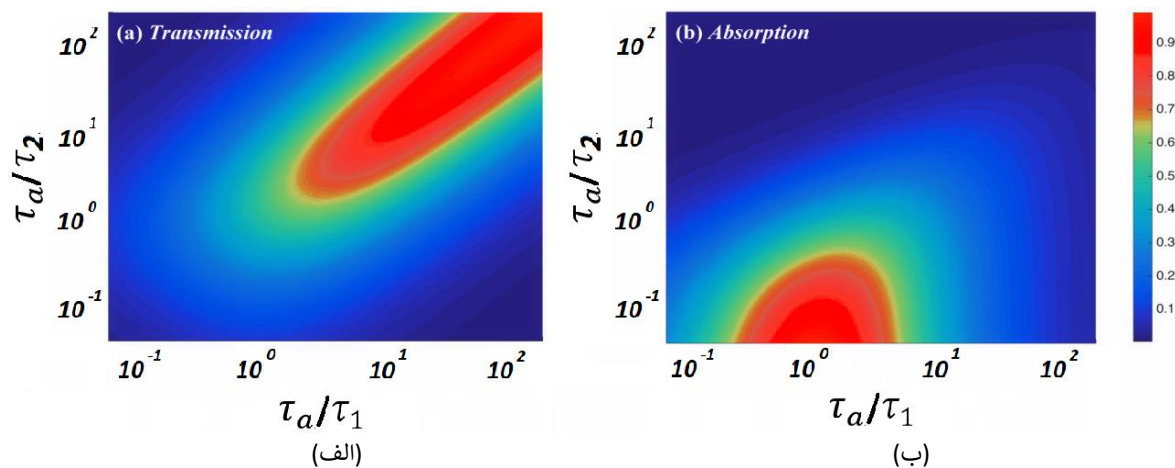
$$R(\omega_0) = \frac{|S_{1-}|^2}{|S_{1+}|^2} \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{\left(\frac{1}{\tau_1} - \frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_d} - \frac{1}{\tau_a}\right)^2}{\left(\frac{1}{\tau_d} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_a}\right)^2} \quad (10)$$

و میزان جذب توسط ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم در فرکانس تشدید (ω_0) از رابطه زیر به دست می آید [۳۰].

$$A_b(\omega_0) = \frac{|S_{3-}|^2}{|S_{1+}|^2} \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{\frac{4}{\tau_1 \tau_a}}{\left(\frac{1}{\tau_d} + \frac{1}{\tau_1} + \frac{1}{\tau_2} + \frac{1}{\tau_a}\right)^2} \quad (11)$$

از معادله (۹) و (۱۱) مشخص است که جذب و انتقال در مدولاتور ارائه شده ما، به طور قابل توجهی به مقدار نرخ جذب در ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم وابسته است. در شرایط ایده آل، میزان افت تابش به اندازه کافی پایین است که نادیده گرفته شود ($1/\tau_d=0$). هم اکنون در مورد انتقال و جذب در این مدولاتور مبتنی بر گرافن بر اساس فاکتورهای τ_a/τ_2 و τ_a/τ_1 بررسی می کنیم. شکل (۶-الف) میزان انتقال را نشان می دهد، همان گونه که از شکل مشخص است، میزان انتقال با کاهش میزان τ_1 و τ_2 (افزایش فاکتورهای τ_a/τ_2 و τ_a/τ_1)، افزایش می یابد، ولی متأسفانه این مقادیر در فرکانس تشدید چندان کم نیست

از طرف دیگر، همان طور که در شکل (۶-ب) نشان داده شده است، میزان جذب می تواند مقادیر بالا باشد. هنگامی که $\tau_1 = \tau_a$ و $\tau_2 \gg \tau_a$ که آن یک شرایط ایده آل اتصال است و به آن شرایط اتصال بحرانی^۱ گویند [۴۱]. به وسیله تجزیه و تحلیل نظری فوق، خاصیت مدولاسیون در ساختار ارائه شده ما می تواند از طریق تغییر در میزان جذب ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم به صورت الکتریکی تنظیم شود. در مقالات قبل تأیید شده است که برای تضمین قابلیت تنظیم مؤثر میزان جذب در ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم به وسیله الکتریسیته، تعداد لایه های گرافن (یا تعداد Al_2O_3) در ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم باید حداقل سه باشد [۴۲].



شکل ۶: انتقال و جذب اساس فاکتورهای τ_a/τ_1 و τ_a/τ_2 (الف): انتقال. (ب) جذب.

از آنجا که ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم فقط با میدان الکتریکی مماسی واکنش نشان می دهد، جذب در لایه های گرافن به نوع قطبش حساس است و در این مقاله فقط قطبش^۲ شبه - میدان الکتریکی عرضی^۳ در نظر گرفته شده است. اگر فرض کنیم که رسانایی گرافن در $T=300\text{ K}$ و $\Gamma=1/3\text{ meV}$ ، γ_g است، می توان نمودار انتقال را به ازاء طول موج های مختلف

¹ critical connection condition

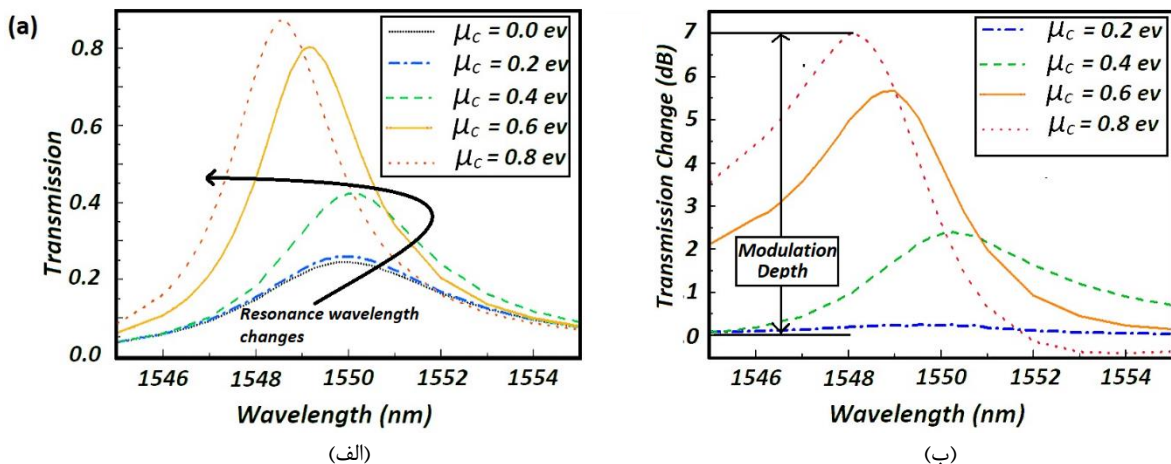
² polarization

³ Transverse Electric

مانند شکل (۷) رسم کرد. این مقادیر برای پتانسیل‌های شیمیایی مختلف رسم شده است. روش استفاده شده برای رسم این نمودارها روش دامنه محدود در حوزه زمان - سه‌بعدی^۱ (3D-FDTD) است.

تعبیرات انتقال برحسب طول موج به ازاء پتانسیل‌های شیمیایی مختلف در شکل (۷-الف) رسم شده است. با افزایش دادن μ_c همان‌گونه که در شکل (۷-الف) مشخص است، مقدار ماکزیمم انتقال در فرکانس تشدید افزایش می‌یابد. ماکزیمم انتقال برای پتانسیل‌های شیمیایی مختلف برای $\mu_c < 0.4$ ، تغییرات کمی دارند و پس از آن با افزایش بیشتر در مقدار μ_c این افزایش در مقدار ماکزیمم انتقال مشهودتر می‌شود و سپس برای $\mu_c > 0.6$ این افزایش در مقدار ماکزیمم دوباره کاهش پیدا می‌کند. این تغییرات به دلیل تغییرات قسمت موهومی $\epsilon_{||}$ نشان داده در شکل (۴-ب) است [۴۳]. قسمت موهومی $\epsilon_{||}$ در آن شکل ابتدا با افزایش μ_c از 0 eV تا 0.4 eV به آرامی کاهش می‌یابد ولی در محدوده 0.4 eV تا 0.6 eV کاهش قسمت موهومی $\epsilon_{||}$ سریع‌تر و برای پتانسیل‌های شیمیایی بزرگ‌تر کاهش قسمت موهومی $\epsilon_{||}$ ملایم‌تر می‌شود.

در شکل (۷-ب) تفاضل هر کدام از طیف‌های انتقال نسبت به حالتی که $\mu_c = 0$ است، ترسیم شده است. تغییرات انتقال به صورت $\log_{10}(T/T_0)$ تعریف می‌شود. جایی که T_0 انتقال هنگامی که $\mu_c = 0$ eV، در شکل (۷-الف) است. از روی شکل (۷-ب) می‌توان دریافت که عمق مدولاسیون برابر ۷dB در طول موج ۱۵۴۸ nm است که این عمق مدولاسیون هنگامی که پتانسیل شیمیایی گرافن از 0 eV به 0.8 eV تغییر می‌کند، اتفاق می‌افتد. این عمق مدولاسیون برای مدولاتور ارائه شده مناسب است.



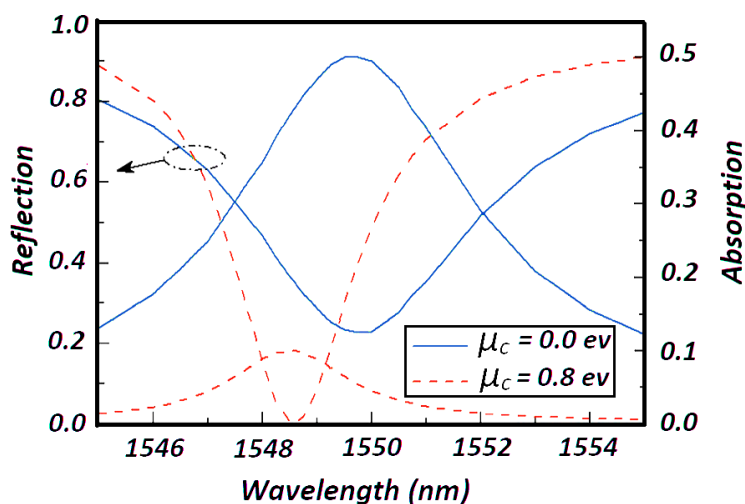
شکل ۷: (الف) طیف انتقال PCNC برای پتانسیل‌های شیمیایی مختلف. (ب) تفاوت بین هر یک از طیف‌های انتقال در مقایسه با طیف‌های انتقال زمانی که $\mu_c = 0$ eV است.

یکی از دلایل این عمق مدولاسیون نسبتاً مناسب این است که مطابق شکل (۴-ب) هنگامی که μ_c افزایش می‌یابد، قسمت موهومی $\epsilon_{||}$ کاهش پیدا می‌کند. بنابراین با افزایش مقدار پتانسیل شیمیایی مقدار جذب گرافن کاهش پیدا می‌کند. اگر μ_c از مقدار 0 eV به 0.8 eV افزایش پیدا کند، مقدار ماکزیمم جذب در طول موج تشدید مطابق شکل (۸) از مقدار حدود ۵۰٪ به مقدار تقریبی ۱۰٪ کاهش پیدا می‌کند. این کاهش جذب باعث افزایش انتقال می‌شود. دلیل دوم برای عمق مدولاسیون بالا را می‌توان در طیف انعکاس ارائه شده در شکل (۸) جستجو کرد. همان‌گونه که از شکل (۸) مشخص است با افزایش μ_c مقدار بازتاب کاهش پیدا می‌کند. مشخص است که هنگامی که μ_c از مقدار 0 eV به 0.8 eV افزایش پیدا کند، مقدار انعکاس در طول موج تشدید از مقدار ۰/۲ به تقریباً صفر کاهش پیدا می‌کند. اگر انعکاس کاهش پیدا کند، انتقال افزایش می‌یابد. درون شکل (۴-ب) مشخص است که قسمت موهومی $\epsilon_{||}$ با افزایش μ_c به صورت ملایمی کاهش پیدا می‌کند. از کارهای قبل میدانیم که توانایی جذب ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم و پیرو آن مقدار پیک جذب در طول موج تشدید به طور قابل توجهی

¹ three-dimensional finite-difference time-domain

به صورت مستقیم با قسمت موهومی $\epsilon_{||}$ ارتباط دارد. بنابراین با افزایش μ_c می توان گفت که مقدار جذب در فرکانس تشدید مطابق شکل (۸) کاهش پیدا می کند [۴۵،۴۴].

دلیل سوم برای عمق مدولاسیون بالا این است که همان گونه که شکل (۷-الف) و (۸) مشخص است با تغییرات پتانسیل شیمیایی مقدار طول موج تشدید نیز تغییر می کند. این تغییر در طول موج تشدید می تواند باعث تغییر در عمق مدولاسیون شود و آن در حدود ۱۰٪ بهبود دهد. برای توضیح تغییر در طول موج رزونانس در شکل (۷-الف) و (۸) باید گفت که با افزایش پتانسیل شیمیایی μ_c در شکل (۴-ب)، قسمت حقیقی $\epsilon_{||}$ ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می کند، که می توان گفت متناظر آن طول موج تشدید ابتدا افزایش و سپس کاهش پیدا می کند و تغییر طول موج درون PCNC تقریباً با این طول موج متناسب است. بنابراین همان گونه که از روی شکل (۷-الف) مشخص است طول موج تشدید ابتدا کمی افزایش و سپس کاهش پیدا می کند [۴۵،۴۴].



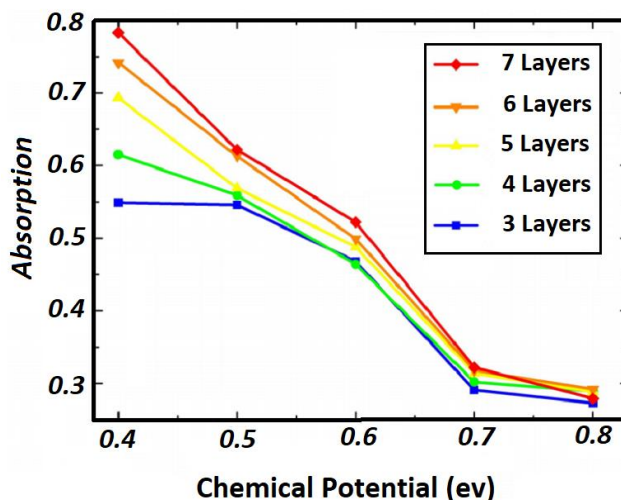
شکل ۸: طیف انعکاس و جذب PCNC برای پتانسیل های شیمیایی مختلف.

شکل (۹) رابطه تغییرات جذب بر اساس تعداد لایه های ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم برای پتانسیل های شیمیایی مختلف، درون این مدولاتور را نشان می دهد. همان گونه که از روی شکل (۹) مشخص است، تعداد لایه ها نقش بالایی در مقدار جذب دارند. با توجه به اینکه در محدوده $0.18 eV < \mu_c < 0.4 eV$ تغییرات جذب شدیدتری در طول موج تشدید داریم، فقط این قسمت ترسیم شده است. همان گونه که مشاهده می شود هرچقدر تعداد لایه ها افزایش یابد، مقدار جذب در طول موج تشدید نیز افزایش می یابد. این افزایش مقدار جذب به خصوص وقتی $0.16 eV < \mu_c < 0.4 eV$ است. این افزایش بیشتر در این محدوده ناشی از تغییرات سریع تر در قسمت موهومی $\epsilon_{||}$ نشان داده شده در شکل (۴-ب) است.

در آخر ولتاژهای کاربردی برای این مدولاتور را بررسی می کنیم. برای این کار رابطه ولتاژ گیت را با پتانسیل شیمیایی به دست می آوریم. در معادله (۴) ارتباط ولتاژ گیت و پتانسیل شیمیایی آورده شده بود که در آن مقدار $n_s = 1/17 \times 10^{17} m^{-3}$ در نظر گرفته شده بود. البته باید در حالت کلی برای ساختارهایی با چند لایه گرافن n_s را متغیر در نظر گرفت که به وسیله ولتاژ گیت به صورت زیر تغییر می کند [۳۷]:

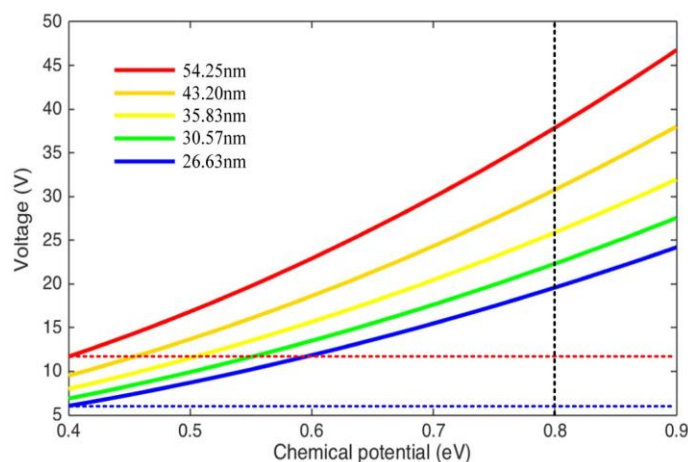
$$n_s = \frac{\epsilon_0 \epsilon_d}{q h_d} (V_g + V_0) \quad (12)$$

جایی که $\epsilon_0 (8.854 \times 10^{-12} F/m)$ ضریب گذردهی خلأ، $\epsilon_d (4/9)$ ضریب گذردهی نسبی Al_2O_3 ، V_0 ولتاژ آفست ناشی از دوپینگ است. برای به کار بردن معادلات (۴) و (۱۲) باید لایه های گرافن را به ولتاژ گیت متصل کرد. همچنین باید دقت کرد که با افزایش تعداد لایه های گرافن ضخامت لایه های Al_2O_3 مطابق جدول (۱) کاهش پیدا می کند. اگر فرض کنیم که گرافن درون پشته ها بدون دوپینگ است. ولتاژهای مورد نیاز را بر اساس ضخامت های مختلف Al_2O_3 می توان به صورت شکل (۱۰) در نظر گرفت.



شکل ۹: رابطه بین مقدار پیک جذب مدولاتور پیشنهادی ما و پتانسیل شیمیایی ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم برای تعداد مختلف لایه‌های گرافن.

با توجه به شکل (۱۰) مشخص است که ولتاژ مورد نیاز برای لایه‌های بیشتر (متناظر آن ضخامت لایه‌های کمتر)، به مراتب کمتر است. مثلاً همان‌گونه که در شکل نشان داده شده است، برای آنکه پتانسیل شیمیایی 0.18eV باشد، هنگامی که تعداد لایه‌ها از ۳ به ۷ افزایش پیدا می‌کند ولتاژ کاربردی از حدود ۳۷ به ۱۸ کاهش پیدا می‌کند. البته باید در نظر داشت که این مقادیر ولتاژ مقادیر بالایی برای کاربردی کردن مدولاتور مورد بحث است. برای کم کردن ولتاژ گیت می‌توان از دوپینگ گرافن و اضافه کردن V_0 استفاده کرد.



شکل ۱۰: ولتاژ بایاس مورد نیاز بر روی ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم برای تعداد مختلف لایه‌های گرافن.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ما یک مدولاتور الکترو-پتیک مبتنی بر گرافن را ارائه کردیم. در این مدولاتور از لایه‌های متناوب گرافن با Al_2O_3 استفاده شد که به‌عنوان یک ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم در حفره مرکزی و نیمه استوانه‌ای یک ساختار PCNC قرار گرفت. ما این ساختار را به‌صورت تئوری بررسی کردیم. با اعمال ولتاژ بایاس به مدولاتور، میزان جذب در ساختار متناوب گرافن و اکسید آلومینیوم را بررسی کردیم. ما متوجه شدیم که به‌ویژه در فرکانس‌های نزدیک مادون قرمز، طول موج تشدید جذب و مقدار جذب در آن طول موج تغییرات پتانسیل شیمیایی تغییر می‌کند. این تغییر همچنین باعث تغییر در انتقال شد که منجر به ایجاد عمق مدولاسیون مناسب در حدود ۷ dB شد. ما همچنین دیدیم که هر چه تعداد لایه‌های گرافن

بیشتر باشد، ولتاژ بایاس کمتری برای اصلاح پتانسیل شیمیایی لازم است. این مدولاتور به دلیل عمق مدولاسیون بالا، سرعت مدولاسیون مناسب و حجم اشغال کم، گزینه بسیار مناسبی برای مدارهای مجتمع نوری به‌ویژه در طول موج‌های حدود ۱۵۵۰ نانومتر است.

مراجع

- [1] J. Liu, G. Xu, F. Liu, I. Kityk, X. Liu, and Z. Zhen, "Recent advances in polymer electro-optic modulators," *Rsc. Adv.*, vol. 5, no. 21, pp. 15784–15794, 2015, doi: 10.1039/C4RA13250E.
- [2] Boes, B. Corcoran, L. Chang, J. Bowers, and A. Mitchell, "Status and potential of lithium niobate on insulator (LNOI) for photonic integrated circuits," *Laser Photon. Rev.*, vol. 12, no. 4, Art. no. 1700256, 2018, doi: 10.1002/lpor.201700256.
- [3] Y. Sha, J. Wu, Z. T. Xie, H. Y. Fu, Q. Li "Comparison study of multi-slot designs in epsilon-near-zero waveguide-based electro-optical modulators," *IEEE Photonic J.*, vol.13, no.3, 2021, doi: 10.1109/JPHOT.2021.3084943.
- [4] M. G. Wood et al., "Gigahertz speed operation of epsilon-near-zero silicon photonic modulators", *Optica*, vol. 5, no. 3, pp. 233-236, 2018, doi: 10.1364/OPTICA.5.000233.
- [5] M. Li, L. Wang, X. Li, X. Xiao, and S. Yu, "Silicon intensity Mach-Zehnder modulator for single lane 100 Gb/s applications," *Photon. Res.*, vol. 6, no. 2, pp. 109–116, 2018, doi: 10.1364/PRJ.6.000109.
- [6] S. Sun, M. Xu, M. He, S. Gao, X. Zhang, L. Zhou and L. Liu "Folded Heterogeneous Silicon and Lithium Niobate Mach-Zehnder Modulators with Low Drive Voltage," *Micromachines*, vol. 12, no. 7, 2021, doi: 10.3390/mi12070823.
- [7] C. Haffner et al., "Low-loss plasmon-assisted electro-optic modulator," *Nature*, vol. 556, no. 7702, Art. no. 483, 2018, doi: 10.1038/s41586-018-0031-4.
- [8] A. Moazami, M. Hashemi and N. Cheraghi Shirazi "High Efficiency Tunable graphene-based plasmonic filter in the THz frequency range," *Plasmonics*, vol.14, pp.359–363. 2019, doi:10.1007/s11468-018-0812-5.
- [9] D. A. B. Miller, "Attojoule Optoelectronics for Low-Energy Information Processing and Communications," *J. Light. Technol.*, vol. 35, no. 3, pp. 346–396, 2017, doi: 10.1109/JLT.2017.2647779.
- [10] D. Yang, A. Wang, J. H. Chen, X. C. Yu, C. Lan, Y. Ji and Y. F. Xiao., "Real-time monitoring of hydrogel phase transition in an ultrahigh Q microbubble resonator," *Photon. Res.*, vol. 8, no. 4, pp. 497–502, 2020, doi: 10.1364/PRJ.380238.
- [11] J. Wang et al., "High-Q lithium niobate microdisk resonators on a chip for efficient electro-optic modulation," *Opt. Express*, vol. 23, no. 18, pp. 23072–23078, 2015, doi: 10.1364/OE.23.023072.
- [12] C. Wang, M. Zhang, B. Stern, M. Lipson, and M. Loncar, "Nanophotonic lithium niobate electro-optic modulators," *Opt. Express*, vol. 26, no. 2, pp. 1547–1555, 2018, doi: 10.1364/OE.26.001547.
- [13] K. Alexander et al., "Nanophotonic Pockels modulators on a silicon nitride platform," *Nat. Commun*, vol. 9, Art. no. 3444, 2018, doi:10.1038/s41467-018-05846-6.
- [14] J. Li, Z. Li, J. Yang, Y. Zhang and C. Ren "Microfiber Fabry-Perot interferometer used as a temperature sensor and an optical modulator," *Optics & Laser Technology*, 2020, doi: 10.1016/j.optlastec.2020.106296.
- [15] C. Y. Lin et al., "Electro-optic polymer infiltrated silicon photonic crystal slot waveguide modulator with 23 dB slow light enhancement," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 97, no. 9, Art. no. 194. 2010, doi: 10.1117/1.JNP.13.036005.
- [16] S. Jain, S. Rajput, V. Kaushik and M. Kumar "High speed optical modulator based on silicon slotted-rib waveguide," *Optics Communications*, 2019, doi: 10.1016/j.optcom.2018.10.028.
- [17] H. Liu, P. Liu, L. Bian, C. Liu and Q. H. Zhou, "Electro-optic modulator side-coupled with a photonic crystal nanobeam loaded graphene/Al₂O₃ multilayer stack," *Opt. Mater. Express*, vol. 8, no. 4, pp. 761–774, 2018, doi:10.1364/OME.8.000761.

- [18] D. Witmer, J. T. Hill, and A. H. Safavi-Naeini, "Design of nanobeam photonic crystal resonators for a silicon-onlithium-niobate platform," *Opt. Express*, vol. 24, no. 6, pp. 5876–5885, 2016, doi: 10.1364/OE.24.005876.
- [19] J. D. Witmer, J. A. Valery, and P. Arrangoiz-Arriola, "High-Q photonic resonators and electro-optic coupling using silicon-on-lithium-niobate," *Sci. Rep.*, vol. 7, Art. no. 46313, 2017, doi:10.1038/srep46313.
- [20] D. Yang, H. Tian, Y. Ji, and Q. Quan, "Design of simultaneous high-Q and high-sensitivity photonic crystal refractive index sensors," *JOSA B*, vol. 30, no. 8, pp. 2027–2031. 2013, doi: 10.1364/JOSAB.30.002027.
- [21] W. S. Fegadolli, J. E. Oliveira, V. R. Almeida, and A. Scherer, "Compact and low power consumption tunable photonic crystal nanobeam cavity," *Opt. Express*, vol.21, no.3, pp.3861–3871, 2013, doi: 10.1364/OE.21.003861.
- [22] L. A. Bian, P. G. Liu, Z. Z. Han, G. S. Li, J. Mao, and Z. Lu, "Near-unity absorption in a graphene-embedded defective photonic crystals array," *Superlattices Microstruct.*, vol.104, pp.461–469, 2017, doi: 10.1016/j.spmi.2017.03.008.
- [23] W. Fan and X. Chen, "Polarization-insensitive tunable multiple electromagnetically induced transparencies analogue in terahertz graphene metamaterial," *Opt. Mater. Express*, vol.6, no.8, pp.2607–2615, 2016, doi: 10.1364/OME.6.002607.
- [24] T. Pan, C. Qiu, J. Wu, X. Jiang, B. Liu, Y. Yang, H. Zhou, R. Soref, and Y. Su, "Analysis of an electro-optic modulator based on a graphene-silicon hybrid 1D photonic crystal nanobeam cavity," *Opt. Express*, vol.23, no.18, pp.23357–23364, 2015, doi: 10.1364/OE.23.023357.
- [25] X. Yin, T. Zhang, L. Chen, and X. Li, "Ultra-compact TE-pass polarizer with graphene multilayer embedded in a silicon slot waveguide," *Opt. Lett.* vol.40, no.8, pp.1733–1736, 2015, doi: 10.1364/OL.40.001733.
- [26] B. Kuzmenko, L. Benfatto, E. Cappelluti, I. Crassee, D. van der Marel, P. Blake, K. S. Novoselov, and A. K. Geim, "Gate tunable infrared phonon anomalies in bilayer graphene," *Phys. Rev. Lett.*, vol.103, no.11, p.116804, 2009, doi: 10.1103/PhysRevLett.103.116804.
- [27] M. Tamagnone, J. S. Gomez-Diaz, J. R. Mosig, and J. Perruisseau-Carrier, "Reconfigurable THz plasmonic antenna concept using a graphene stack," *Appl. Phys. Lett.*, vol.101, no.21, p.214102, 2012, doi: 10.1364/OE.21.015490.
- [28] J. S. Gomez-Diaz, C. Moldovan, S. Capdevila, J. Romeu, L. S. Bernard, A. Magrez, A. M. Ionescu, and J. Perruisseau-Carrier, "Self-biased reconfigurable graphene stacks for terahertz plasmonics," *Nat. Commun.*, vol.6, no.1, p. 6334, 2015, doi:10.1038/ncomms7334.
- [29] H. Yan, X. Li, B. Chandra, G. Tulevski, Y. Wu, M. Freitag, W. Zhu, P. Avouris, and F. Xia, "Tunable infrared plasmonic devices using graphene/insulator stacks," *Nat. Nanotechnol.*, vol.7, no.5, pp.330–334, 2012, doi: 10.1038/nnano.2012.59.
- [30] M. F. Tehrani, R. Ghayour, M. Mohitpour "High-Q and high-absorption photonic crystal nanobeam cavity based on semi-cylinders of air coupled with graphene" *Appl. Phys. A.*, vol.128, no.1, 2022, doi: 10.1007/s00339-021-05088-2.
- [31] S. Chen, Q. Wu, C. Mishra, J. Kang, H. Zhang, K. Cho, W. Cai, A. A. Balandin, and R. S. Ruoff, "Thermal conductivity of isotopically modified graphene," *Nat. Mater.*, vol.11, no.3, pp.203–207, 2012, doi: 10.1038/nmat3207.
- [32] M Berahman A.R Malahzadeh, "The Numerical Modeling for Electrical Behavior of Graphene Nanoribbon in the Present of Optical Detector," *Journal of Communication Engineering*, vol.7, no.25, 2017 (in Persian),
- [33] M. Farhat, C. Rockstuhl, and H. Bağcı, "A 3D tunable and multi-frequency graphene plasmonic cloak," *Opt. Express*, vol.21, no.10, pp.12592–12603, 2013, doi: 10.1364/OE.21.012592.
- [34] J. A. Crosse, X. Xu, M. S. Sherwin, and R. B. Liu, "Theory of low-power ultra-broadband terahertz sideband generation in bi-layer graphene," *Nat. Commun.*, vol.5, no.1, p.4854, 2014, doi: 10.1038/ncomms5854.
- [35] K. S. Novoselov, V. I. Fal'ko, L. Colombo, P. R. Gellert, M. G. Schwab, and K. Kim, "A roadmap for graphene," *Nature*, vol.490, pp.192–200, 2012, doi: 10.1038/nature11458.
- [36] Z. Su, J. Yin, and X. Zhao, "Terahertz dual-band metamaterial absorber based on graphene/MgF2 multilayer structures," *Opt. Express*, vol.23, no.2, pp.1679–1690, 2015, doi: 10.1364/OE.23.001679.

- [37] A. Majumdar, J. Kim, J. Vuckovic, and F. Wang, "Electrical control of silicon photonic crystal cavity by graphene," *Nano Lett.*, vol.13, no.2, pp.515–518, 2013, doi: 10.1021/nl3039212.
- [38] H. Yan, X. Li, B. Chandra, G. Tulevski, Y. Wu, M. Freitag, W. Zhu, P. Avouris and F. Xia, "Tunable infrared plasmonic devices using graphene/insulator stacks." *Nature Nanotechnology*, vol.7, pp.330–334. 2012, doi:10.1038/nnano.2012.59.
- [39] Q. Quan and M. Loncar, "Deterministic design of wavelength scale, ultra-high Q photonic crystal nanobeam cavities," *Optics Express*, vol. 19, no. 19, pp. 18529-18542, 2011, doi:10.1364/OE.19.018529.
- [40] M. Fan, H. Yang, P. Zheng, G. Hu, B. Yun, and Y. Cui, "Multilayer graphene electro-absorption optical modulator based on double-stripe silicon nitride waveguide" *Optics Express*, vol. 25, no. 18, pp. 21619-21629, 2017, doi: 10.1364/OE.25.021619.
- [41] J. D. Joannopoulos, S. G. Johnson, J. N. Winn, R. D. Meade, *Photonic Crystals Molding the Flow of Light*, Princeton University, 198–210, 2008.
- [42] J. R. Piper and S. H. Fan, "Total absorption in a graphene monolayer in the optical regime by critical coupling with a photonic crystal guided resonance," *ACS Photonics*, vol.1, no.4, pp.347–353, 2014, doi: 10.1021/ph400090p.
- [43] M. A. K. Othman, C. Guclu, and F. Capolino, "Graphene-based tunable hyperbolic metamaterials and enhanced near-field absorption," *Opt. Express*, vol.21, no.6, pp.7614–7632, 2013, doi: 10.1364/OE.21.007614.
- [44] X. Gan et al., "High-contrast electrooptic modulation of a photonic crystal nanocavity by electrical gating of graphene," *Nano Lett.*, vol. 13, no. 2, pp. 691–696, 2013, doi: 10.1021/nl304357u.
- [45] N. K. Emani, T. F. Chung, A. V. Kildishev, V. M. Shalaev, Y. P. Chen, and A. Boltasseva, "Electrical modulation of fano resonance in plasmonic nanostructures using graphene," *Nano Lett.*, vol.14, no.1, pp.78–82, 2014, doi: 10.1021/nl403253c.