

جذب کننده پلاسمونی دو باندهی مبتنی بر گرافن برای کاربرد در ادوات مخابرات نوری

سمیه یوسفی^۱ مریم پورمحمی آبادی^۲ علی رستمی^۳
۱- دانشجوی دکتری- دانشکده فنی- دانشگاه شهید باهنر کرمان- کرمان- ایران
S.yousefi@eng.uk.ac.ir
۲- استادیار- دانشکده فنی- دانشگاه شهید باهنر کرمان- کرمان- ایران
Pourmahyabadi@uk.ac.ir
۳- استاد- دانشکده برق و کامپیوتر- دانشگاه تبریز- تبریز- ایران
Rostami@tabrizu.ac.ir

چکیده: ضریب جذب نوری یک پارامتر کلیدی در عملکرد موفقیت آمیز ادوات الکترونیک نوری نظیر آشکارسازها، سلولهای خورشیدی، مدولاتورها، فیلترها است. بدین منظور در این مقاله، یک جذب کننده دو باندهی متشکل از یک ساختار فلز- گرافن- دی الکتریک- فلز که در طول موج های مخابرات نوری کار می کند، ارائه شده است. جهت به دست آوردن مشخصه جذب ساختار پیشنهادی از روش تفاضل محدود در حوزه زمان استفاده شده است. همچنین، تأثیر ضخامت نانوساختار فلزی رویی، لایه های دی الکتریک و زیر لایه فلزی بر مشخصه جذب نور در ساختار مورد بررسی قرار گرفته است. استفاده از گرافن تک لایه همراه با ساختار پلاسمونی سبب بهبود برهم کنش نور و گرافن شده و در نتیجه باعث افزایش جذب نور در ساختار شده است. نتایج نشان می دهد که برای این ساختار، جذب نور ۹۵٪ در طول موج ۱۳۱۰nm و جذب نور ۹۷٪ در طول موج ۱۶۷۵nm به دست می آید. بنابراین، این جذب کننده قابلیت کار در دو باندهی مخابرات نوری (باند O و باند U) به طور همزمان را دارا است. همچنین مدار معادل فرکانسی جذب کننده پیشنهادی نیز ارائه شده است که نتایج خروجی آن تطابق بسیار خوبی با نتایج شبیه سازی دارد.

واژه های کلیدی: جذب کننده نوری پلاسمونی، گرافن، مدل مداری، ضریب جذب، باندهای مخابرات نوری.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.2.55

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۷/۲۶

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۹/۱۷

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۱۴

نام نویسنده ی مسئول: دکتر مریم پورمحمی آبادی

نشانی نویسنده ی مسئول: ایران- کرمان- دانشگاه شهید باهنر کرمان- دانشکده فنی

۱- مقدمه

با بروز علم پلاسمونیک، محدود کردن امواج الکترومغناطیس در ناحیه‌ای بسیار کوچکتر از طول موج فراهم شد و بدین ترتیب دریچه جدیدی به روی ساخت ادوات الکترونیک نوری گشوده شد. پلاسمون پلاریتون‌های سطحی (SPP) امواج الکترومغناطیسی هستند که در امتداد سطح رابط فلز-دی‌الکتریک حرکت می‌کنند [۲، ۱]. تشدید پلاسمون‌ها در نانو ساختارهای فلزی با توجه به تقویت میدان نزدیک و حبس زیاد نور در ساختار، باعث افزایش جذب نور می‌شود [۳]. برخی از خواص قابل توجه گرافن سبب معرفی آن به عنوان ماده پلاسمونی مکمل برای فلزهای نجیب شده است [۴]. تحرک بالای حامل‌ها در گرافن باعث شده که از آن به عنوان یک ماده پلاسمونی با تلفات کم استفاده شود. همچنین، گرافن یک ماده قابل تنظیم است که می‌توان سطح فرمی آن را از طریق آلاینش شیمیایی یا اعمال ولتاژ الکتریکی تنظیم کرد که منجر به مدولاسیون الکتریکی و مجتمع‌سازی درون تراشه می‌شود [۵-۸]. بنابراین، می‌توان از آن به عنوان یک مؤلفه ساختاری مهم در ادوات پلاسمونیک کنترل شده با ولتاژ استفاده کرد. علاوه بر این، تحدید پلاسمون‌ها در گرافن از فلز بیشتر است که به دلیل ماهیت دو بعدی تحریکات جمعی^۲ در گرافن است [۹، ۱۰].

گرافن، یک تک لایه از اتم‌های کربن است که به صورت یک شبکه شش ضلعی قرار گرفته‌اند و خواص الکتریکی و نوری بی‌نظیری از خود نشان داده است [۱۱]. شفافیت نوری زیاد، تحرک زیاد الکترون و هدایت کنترل شده با ولتاژ [۱۲]، از جمله ویژگی‌هایی است که گرافن را گزینه مناسبی برای کاربرد در ادوات الکترونیک نوری مانند آشکارسازهای پهن باند، جذب‌کننده‌های قابل تنظیم، لیزرهای فوق سریع، صفحه نمایش‌های لمسی، دیودهای انتشار دهنده نور ارگانیک (OLED) و سلول‌های خورشیدی کرده است [۱۳-۱۵].

گرافن تک لایه با ضخامت 0.335nm ، دارای ضریب جذب مستقل از طول موج، در حدود $2/3\%$ در محدوده طول موج‌های مرئی و مادون قرمز نزدیک^۵ است [۱۶، ۱۷]. این خاصیت برای کاربردهای جذب پهن باند مناسب است، اما جذب ضعیف در گرافن تک لایه، عملکرد ادوات الکترونیک نوری مبتنی بر گرافن را محدود می‌کند [۱۸، ۱۹]. بنابراین، به منظور افزایش جذب نور در ساختار، از روش‌هایی در محدوده امواج مرئی و مادون قرمز نزدیک استفاده شده است. در برخی از منابع تحقیقاتی، از کاواک فابری-پرو^۶ در آشکارسازهای مبتنی بر گرافن استفاده شده است تا جذب نور در ساختار را افزایش دهد. یک آشکارساز شاتکی گرافن - سیلیکون مبتنی بر کاواک فابری-پرو که در طول موج 1550nm کار می‌کند توسط کاسلینو ارائه شده است [۲۰]. در این طرح، لایه گرافن در وسط کاواک قرار دارد و وجود دو بازتابنده براگ (DBRs^۷) با بازتاب زیاد، باعث افزایش جذب در لایه گرافن و در نتیجه، باعث افزایش پاسخدهی آشکارساز می‌شود. در تحقیق دیگری، یک جذب‌کننده مادون قرمز متشکل از گرافن طرحدار که به یک کاواک نوری تزویج شده، به صورت تجربی توسط صفایی ارائه شده

است [۲۱]. در این طرح، اثرات استفاده از الگوهای مختلف لایه گرافن و زوایای برخورد متفاوت نور با قطبش‌های TM^A و TE^A بر روی طیف جذب بررسی شده است.

همچنین برخی محققان از کاواک کریستال نوری که به لایه گرافن تزویج شده است، جهت تقویت برهم‌کنش نور و گرافن استفاده کردند [۲۲-۲۴]. یک جذب‌کننده گرافنی کامل مبتنی بر موجبر-کاواک کریستال نوری^۱ (با پوشش لایه گرافن)- موجبر در طول موج 1550nm جهت تقویت جذب نور توسط زو ارائه شده است [۲۵]. شولر نیز به منظور افزایش برهم‌کنش نور و لایه گرافن و همچنین محدود کردن نور در یک باند باریک، طرح یک آشکارساز گرافنی مبتنی بر موجبر کریستال نوری را پیشنهاد داد [۲۶].

طرح یک جذب‌کننده مبتنی بر گرافن با استفاده از یک تشدیدگر شیاردار به شکل صلیب-دایره نیز در سال ۲۰۲۰ ارائه شد [۲۷]. در این طرح از تزویج مود هدایت شده به منظور افزایش جذب و کاهش عرض خطی طیفی در اطراف یک فرکانس خاص در محدوده مادون قرمز استفاده شده است. گان نیز از یک موجبر سیلیکونی که با یک لایه گرافن مجتمع‌سازی شده است استفاده کرد تا بازده آشکارساز نوری مبتنی بر گرافن را بهبود بخشد [۲۸].

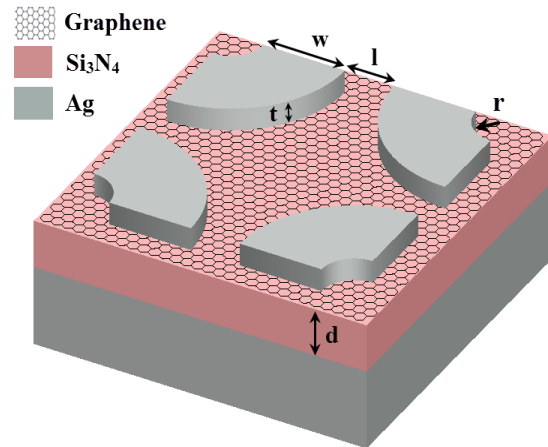
استفاده از نانو ذرات فلزی به منظور تقویت اثرات پلاسمونی در ساختار و بهره‌گیری از یک جفت مجزا برای ایجاد یک اتصال p-n در لایه گرافن در آشکارساز سبب افزایش جذب نور در گرافن و در نتیجه بهبود پاسخدهی در آشکارساز می‌شود [۲۹]. استفاده از شیارهای L شکل و حلقه‌ای برای بهبود جذب نور در ساختار پلاسمونی-گرافن توسط زارع مورد بررسی قرار گرفته است [۳۰]. یک آشکارساز مبتنی بر گرافن نیز توسط فنگ ارائه شده است که در آن یک آرایه خاص پلاسمونی بین دو لایه گرافن ساندویچ شده است [۳۱].

در این مقاله، یک ساختار فلز-گرافن-دی‌الکتریک-فلز (MGDM^{۱۱}) به عنوان جذب‌کننده کامل پلاسمونی در محدوده طول موج مادون قرمز نزدیک ارائه شده است. محدوده طول موج عملکردی ساختار پیشنهادی، در دو باند مخابرات نوری (باند O و باند U) قرار دارد. از این ساختار می‌توان برای ادوات نوری مانند آشکارسازها، سوئیچ‌های نوری، دمدولاتورهای نوری، حسگرهای نوری و غیره استفاده کرد.

۲- ساختار قطعه

شکل (۱) طرح سه‌بعدی جذب‌کننده پلاسمونی مبتنی بر گرافن را نشان می‌دهد. در این طرح، ساختار پلاسمونی از یک زیرلایه فلزی با ضخامت 150nm و یک نانو ساختار فلزی به شکل آرک با ضخامت (t) 10nm تشکیل شده است که در قسمت بالای جذب‌کننده قرار دارد. هر دو لایه از نقره (Ag) ساخته شده و یک لایه Si_3N_4 به عنوان لایه دی‌الکتریک با ضخامت (d) 50nm جدا کردن این لایه‌ها استفاده شده است. همچنین در زیر نانو ساختار فلزی رویی از تک لایه گرافن با

ضخامت 0.5 nm به عنوان کانال انتقال بار و تقویت کننده جذب نور استفاده شده است.



شکل (۱): ساختار سه بعدی جذب کننده

هدایت سطحی گرافن که خصوصیات نوری آن را تعیین می کند، بر اساس فرمول کوبو^{۳۲} به شرح زیر است [۳۲]:

$$\sigma(\omega, \Gamma, \mu_c, T) = \frac{je^2}{\pi \hbar (\omega - 2j\Gamma)} \int_0^\infty \epsilon \left[\frac{\partial f_d(\epsilon)}{\partial \epsilon} - \frac{\partial f_d(-\epsilon)}{\partial \epsilon} \right] d\epsilon - \quad (1)$$

$$\frac{je^2 (\omega - 2j\Gamma)}{\pi \hbar^2} \int_0^\infty \frac{f_d(-\epsilon) - f_d(\epsilon)}{(\omega - 2j\Gamma)^2 - 4(\epsilon/\hbar)^2} d\epsilon$$

که در آن، ω فرکانس زاویه ای، e بار الکترون، T دما بر حسب کلوین، μ_c پتانسیل شیمیایی، k_B ثابت بولتزمن، \hbar ثابت پلانک کاهش یافته، Γ نرخ پراکندگی و $f_d(\epsilon) = [e^{(\epsilon - \mu_c)/k_B T} + 1]^{-1}$ توزیع فرمی دیراک است. قابلیت هدایت سطحی گرافن را می توان به صورت جذب بین بانندی^{۳۳} و جذب درون بانندی^{۳۴} تعریف کرد. برای $k_B T \ll |\mu_c|$ هدایت سطحی لایه گرافن به صورت زیر تعریف می شود [۳۳، ۳۴]:

$$\sigma = \sigma_{inter} + \sigma_{intra} \quad (2)$$

$$\sigma_{inter} = -j \frac{e^2}{4\pi \hbar} \ln \left(\frac{2|\mu_c| - (\omega - j2\Gamma)\hbar}{2|\mu_c| + (\omega - j2\Gamma)\hbar} \right)$$

$$\sigma_{intra} = -j \frac{e^2 k_B T}{\pi \hbar^2 (\omega - j2\Gamma)} \times \left[\frac{\mu_c}{k_B T} + 2 \ln \left(e^{\mu_c/k_B T} + 1 \right) \right]$$

پتانسیل شیمیایی گرافن به صورت زیر تعریف می شود [۳۵]:

$$|\mu_c| = \hbar v_F \sqrt{\pi |a_0 (V_g - V_D)|} \quad (3)$$

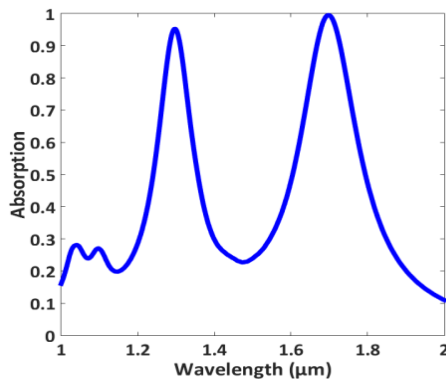
که در آن $v_F = 0.9 \times 10^6 \text{ m/s}$ سرعت فرمی، $V_D = 0.8 \text{ V}$ ولتاژ دیراک، $|V_g - V_D|$ به عنوان ولتاژ بایاس در نظر گرفته می شود و a_0 از مدل خازنی طبق رابطه (۴) به دست می آید [۳۶]:

$$a_0 = \epsilon_0 \epsilon_d / ed \quad (4)$$

که در آن e بار الکترون، ϵ_0 گذردهی خلأ، ϵ_d و d به ترتیب ثابت دی الکتریک و ضخامت لایه دی الکتریک هستند.

۳- بحث و نتایج

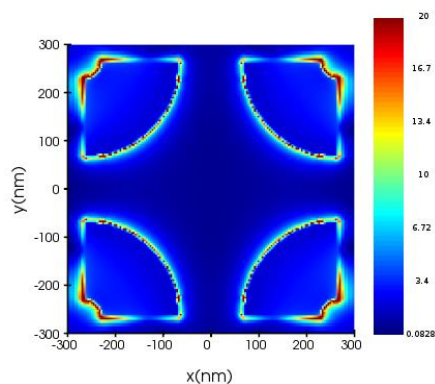
جهت انجام شبیه سازی طرح پیشنهادی، از روش تفاضل محدود در حوزه زمان (1d FDTD) سه بعدی استفاده شده است. شرط مرزی لایه تطبیق شده کامل (1d PML) در راستای z اعمال شده و شرایط مرزی نامتقارن و متقارن به ترتیب در جهت های x و y اعمال شده است.



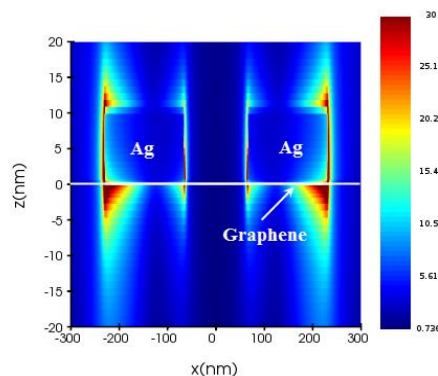
شکل (۲): مشخصه جذب نور در ساختار برای پتانسیل شیمیایی 0.2 eV

شکل (۲) طیف جذب نور این ساختار را برای پتانسیل شیمیایی 0.2 eV را نشان می دهد. طبق این شکل، جذب نور 95% و 97% به ترتیب در طول موج های 1310 nm و 1675 nm به دست آمده است. شکل (۳) توزیع میدان برای نور p -polarized به ترتیب در صفحه های x - y و x - z در طول موج های 1310 nm و 1675 nm را نشان می دهد. همانطور که در شکل (۳-الف) و (۳-ج) نشان داده شده است، شدت میدان نوری در لایه گرافن در نزدیکی لبه های نانوساختار فلزی رویی شدیداً تقویت شده است که به دلیل تشدید پلاسمون های سطحی است. این امر موجب بهبود برهم کنش نور و لایه گرافن می شود. بنابراین افزایش عرض نانوساختار فلزی رویی منجر به افزایش شدت میدان در نزدیکی لبه ها می شود که به نوبه خود منجر به افزایش جذب نور می شود. شکل (۴) مشخصه های جذب نور را نسبت به طول موج برای عرض های مختلف نانوساختار فلزی رویی (w) نشان می دهد. با این حال، جذب نور برای عرض های بزرگتر از 170 nm کاهش می یابد زیرا بخش بزرگی از لایه گرافن توسط نانوساختار فلزی رویی پوشانده می شود. از این رو، افزایش عرض باعث کاهش برهم کنش بین لایه گرافن و نور و در نتیجه کاهش جذب نور می شود. با افزایش عرض، طول موج تشدید به سمت طول موج های بلندتر منتقل می شود که به دلیل افزایش طول مسیر نوری بر اساس قانون براگ^{۳۷} است.

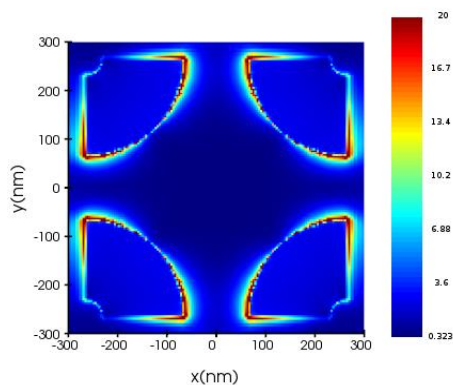
شکل (۵) مشخصه های جذب نور را برای ضخامت های مختلف نانوساختار فلزی رویی نشان می دهد. با افزایش ضخامت نانوساختار فلزی رویی میزان جذب افزایش می یابد، اما به ازای ضخامت بیشتر از 10 nm ، جذب نور کاهش می یابد که به دلیل افزایش پراش موج^{۳۸} در اطراف نانوساختار فلزی رویی است.



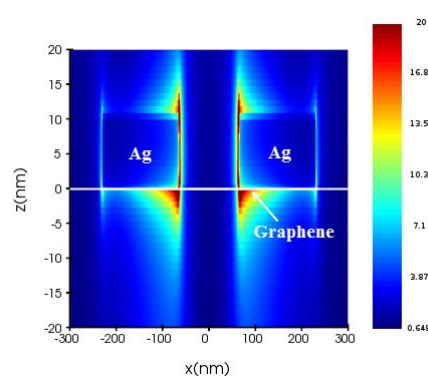
(ب)



(الف)

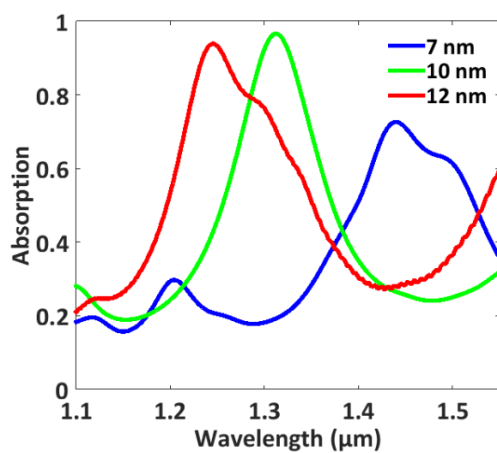


(د)

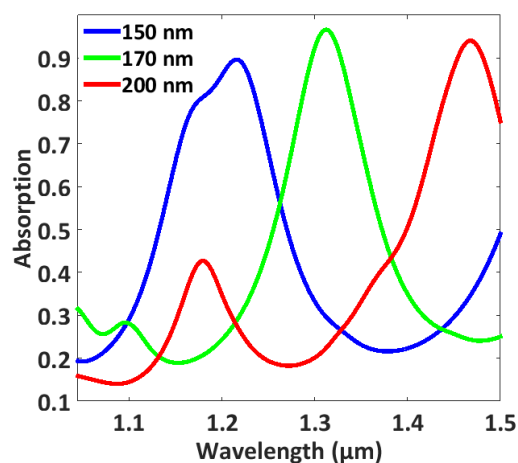


(ج)

شکل (۳): توزیع میدان برای نور p-polarized در صفحه‌های x-y و x-z (الف و ب) طول موج ۱۳۱۰ nm و (ج و د) طول موج ۱۶۷۵ nm. در اینجا $d=50\text{nm}$ و $t=10\text{nm}$ ، $l=110\text{nm}$ ، $w=170\text{nm}$



شکل (۵): مشخصه‌های جذب نور برای ضخامت‌های مختلف نانوساختار فلزی رویی برای $\mu_c=0.2\text{eV}$ ، $l=110\text{nm}$ و $w=170\text{nm}$ و $d=50\text{nm}$



شکل (۴): مشخصه‌های جذب نور برای عرض‌های مختلف نانوساختار فلزی رویی برای $\mu_c=0.2\text{eV}$ و $t=10\text{nm}$ و $d=50\text{nm}$

پارامتر مهم دیگر در ادوات نوری با باند دوگانه که می‌تواند برای توصیف عملکرد آنها مورد استفاده قرار گیرد، نسبت فرکانسی (f_h / f_l) است که f_l و f_h به ترتیب فرکانس‌های مرکزی باندهای بالاتر و پایین‌تر هستند. در تحقیق انجام شده توسط سو، جذب‌کننده دو بانندی بر اساس ساختار چند لایه graphene/MgF₂ ارائه شده است که نسبت فرکانسی آن در حدود ۱/۰۲ است [۳۷]. در تحقیق دیگر، یک جذب‌کننده دو بانندی مبتنی بر میکرو روبان‌های گرافن توسط گو ارائه شده است که نسبت فرکانسی حدود ۱/۰۴ را نشان می‌دهد [۳۸]. با این حال، نسبت فرکانسی جذب‌کننده پیشنهادی در مقایسه با این تحقیقات بیشتر است و در حدود ۱/۲۷۸ است.

۴- مدل مداری

مدل مداری ساختار پیشنهادی مطابق با نظریه خط انتقال در شکل (۸) نشان داده شده است. زیرلایه فلزی نقره که در پایین ساختار قرار گرفته است، ضخامت کافی برای به صفر رساندن انتقال از ساختار را دارد و مثل یک هادی الکتریکی کامل با امپدانس صفر عمل می‌کند و دلیل دیگر برای صفر در نظر گرفتن امپدانس زیرلایه نقره هدایت زیاد آن است. بنابراین به صورت اتصال کوتاه در شکل (۸) نشان داده شده است.

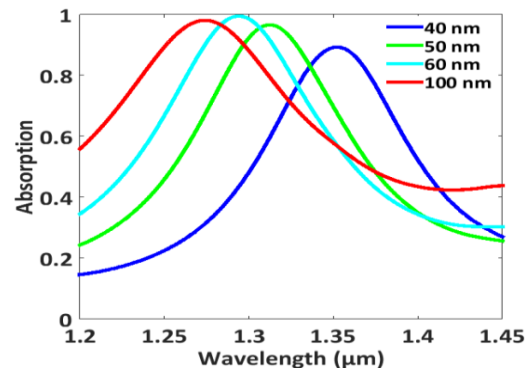
امپدانس لایه دی‌الکتریک (Z_d) به صورت $Z_d = Z_0 / \sqrt{\epsilon_r}$ تعریف می‌شود که Z_0 امپدانس فضای آزاد برابر با 120π (Ω) است. $\beta_d = 2\pi\sqrt{\epsilon_r}/\lambda_0$. ثابت انتشار در لایه دی‌الکتریک و $E = \beta_d \times d$ طول الکتریکی است. d و ϵ_r به ترتیب ضخامت و ضریب گذردهی نسبی لایه دی‌الکتریک Si₃N₄ هستند [۳۹].

در شکل (۸) ترکیب موازی دو شاخه مدار RLC، امپدانس نانو ساختار فلزی رویی (Z_r) را نشان می‌دهد. همچنین امپدانس لایه گرافن (Z_g) که یک مورد خاص از نانو روبان‌های گرافن تکرار شونده است، با در نظر گرفتن $W/D=1$ و D عرض و دوره تکرار نانو روبان‌های گرافن) به صورت تعداد نامحدود مدارهای RLC موازی مدل‌سازی شده است. مقاومت (R_n)، سلف (L_n) و خازن (C_n) برای حالت n ام طبق رابطه (۵) مدل‌سازی شده است [۳۴، ۴۰].

که در این رابطه \hbar ثابت پلانک کاهش یافته، e بار الکترون، τ زمان استراحت و E_f انرژی فرمی هستند. $\epsilon_{eff} = \epsilon_0(\epsilon_1 + \epsilon_2)/2$ که ϵ_0 ثابت دی‌الکتریک خلأ و ϵ_1 و ϵ_2 ثابت گذردهی لایه‌هایی که لایه گرافن را احاطه کرده‌اند، هستند. S_n انتگرال عملکردهای ویژه و $Q_n = q_n(\pi/W)$ مقدار ویژه معادله حاکم بر جریان سطح است. q_1 مقدار اولین مود برابر با ۰/۲۸ و S_1 برابر با ۰/۰۱۶ است [۱۸]. در شکل (۸)، فقط شاخه اول RLC (Z_g) به جای تعداد نامحدود مدارهای RLC موازی نشان داده شده است، اما نتایج نهایی بدون این فرض به دست آمده است.

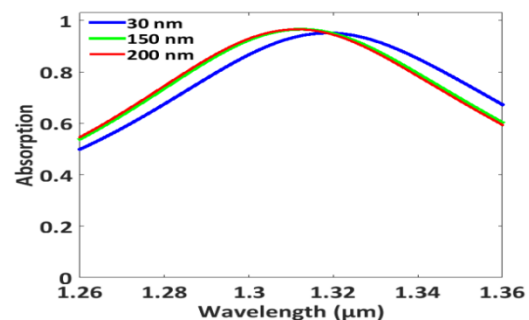
اثر تغییر ضخامت لایه دی‌الکتریک (d) بر مشخصه جذب نور در شکل (۶) نشان داده شده است. همانطور که این شکل نشان می‌دهد، با افزایش ضخامت لایه دی‌الکتریک، جذب نور در ساختار بهبود یافته است، اما برای ضخامت‌های بیشتر از ۶۰ nm جذب نور کاهش می‌یابد. این امر به دلیل افزایش بیش از حد فاصله بین نانو ساختار فلزی رویی و زیرلایه فلزی است. با این حال، ضخامت لایه دی‌الکتریک ۵۰ nm انتخاب شده است زیرا در این حالت، جذب نور در طول موج مرکزی باند O (۱۳۱۰ nm) خواهد بود.

استفاده از زیرلایه فلزی در جذب‌کننده‌های پلاسمونی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا بازتاب بیشتر نور از این لایه باعث جذب بیشتر نور در ساختار می‌شود. همانطور که در شکل (۷) نشان داده شده است، با افزایش ضخامت زیرلایه فلزی، جذب نور بیشتر می‌شود. با این حال، برای ضخامت‌های بیشتر از ۱۵۰ nm، زیرلایه فلزی بدون توجه به ضخامت آن، به عنوان یک بازتاب‌کننده عالی رفتار می‌کند.



شکل (۶): مشخصه‌های جذب نور برای ضخامت‌های مختلف لایه دی‌الکتریک برای $\mu_c = 0.2$ eV، $l = 110$ nm، $w = 170$ nm و $t = 10$ nm

$$\begin{aligned} R_n &= \frac{D}{S_n^2} \frac{\pi \hbar^2}{e^2 E_f \tau} \\ L_n &= \frac{D \pi \hbar}{S_n^2 e^2 E_f} \\ C_n &= \frac{S_n^2 \epsilon_{eff}}{D Q_n} \end{aligned} \quad (5)$$



شکل (۷): مشخصه‌های جذب نور برای ضخامت‌های مختلف زیرلایه فلزی برای $\mu_c = 0.2$ eV، $d = 50$ nm، $l = 110$ nm، $w = 170$ nm و $t = 10$ nm

جدول (۱): مقادیر المان‌های به کار رفته در مدل مداری شکل (۸)

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
R_{t1}	40Ω	L_{t2}	0.2 pH
L_{t1}	0.45 pH	C_{t2}	$1/95 \times 10^{-6} \text{ pF}$
C_{t1}	$1/46 \times 10^{-6} \text{ pF}$	Z_d	$137/66 \Omega$
R_{t2}	15Ω	E	$33/68^\circ$

در جدول ۲ مقایسه‌ای بین مشخصات جذب کننده پیشنهادی با طرح‌های موجود انجام شده است و از نظر میزان جذب نور، طول موج عملکرد و روش بهبود جذب استفاده شده در ساختار، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند.

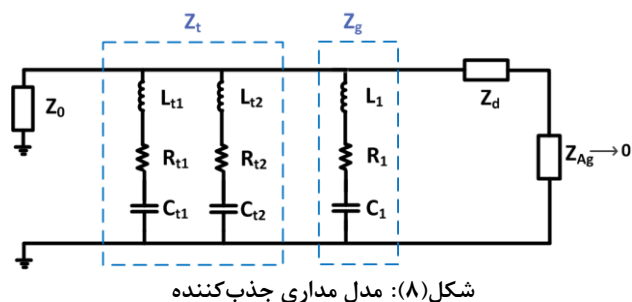
جدول (۲): مقایسه مشخصات جذب کننده پیشنهادی با طرح‌های گذشته

مرجع	میزان جذب	ساختار	روش بهبود جذب	طول موج
[۲۰]	۱	DBR/Si/Graphene/Si/DBR	کاوک فابری پرو	۱۵۵۰ nm
[۲۱]	۰/۹	Si/Al ₂ O ₃ /ITO/Graphene/SU-8/Al ₂ O ₃ /Gold	کاوک پلاسمونی	۹ μm
[۲۵]	۰/۹۷	Graphene/Si/SiO ₂	موجبر-کاوک کریستال نوری-موجبر	۱۵۵۰ nm
[۲۷]	۰/۹۹	Au/SiO ₂ /Graphene/PMMA	کاوک	۱۳۲۸ nm
	۰/۹۸			۱۵۹۵ nm
[۲۸]	-	Graphene/Si/SiO ₂	موجبر-گرافن	۱۵۵۰ nm
[۲]	۰/۹۸	SiO ₂ /Ag/SiO ₂ /Graphene	پلاسمونی	۱۵۱۰ nm
	۰/۹۷			۱۷۵۵ nm
[۲۹]	۰/۷۱	Al/Al ₂ O ₃ /Graphene/Al	پلاسمونی	۶۰۰ nm
[۳۰]	۰/۹۸	SiO ₂ /Ag/SiO ₂ /Graphene	پلاسمونی	۱۵۵۰ nm
[۴۱]	۰/۹۹	Ag/Al ₂ O ₃ /Graphene/Ag	پلاسمونی	۱۵۵۰ nm
	۰/۹۵	Ag/Si ₃ N ₄ /Graphene/Ag	پلاسمونی	۱۳۱۰ nm
	۰/۹۷		پلاسمونی	۱۶۷۵ nm

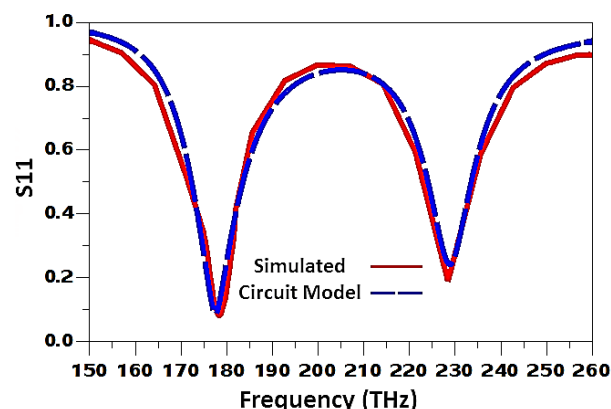
۵- فرایند ساخت

اگرچه، این مقاله به بررسی نتایج شبیه‌سازی طرح پیشنهادی پرداخته است، اما ارائه فرآیند ساخت این طرح نیز ارزشمند است که می‌توان به راحتی آن را با استفاده از فناوری مسطح متعارف^{۱۹} پیاده‌سازی کرد. برای این منظور از یک بستر Si/SiO₂ برای ساخت قطعه بر روی آن استفاده می‌شود. یک لایه تیتانیوم را با استفاده از روش کندوپاش^{۲۰} بر روی بستر Si/SiO₂ لایه‌نشانی کرده و بلافاصله لایه نقره را بر روی

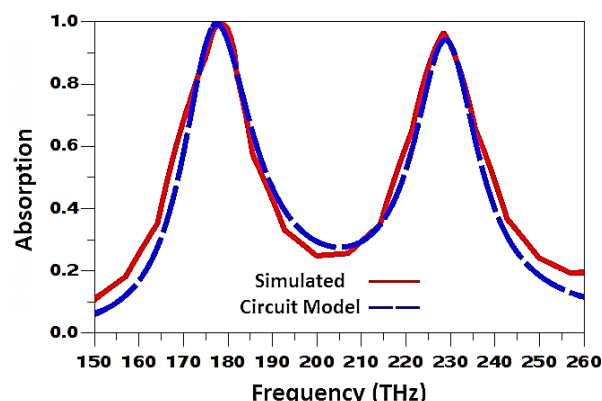
در شکل‌های (۹) و (۱۰) ضریب بازتاب و طیف جذب نور ساختار جذب کننده که از نتایج شبیه‌سازی در نرم‌افزار لومریکال و شبیه‌سازی مدل مداری در نرم افزار ADS به دست آمده، نشان داده شده است. با توجه به این شکل‌ها، نتایج شبیه‌سازی مدل مداری با نتایج شبیه‌سازی نوری مطابقت بسیار خوبی دارند. جدول ۱ مقادیر پارامترهای مدل مداری را نشان می‌دهد که با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک به دست آمده‌اند.



شکل (۸): مدل مداری جذب کننده



شکل (۹): ضریب بازتاب ساختار جذب کننده نسبت به فرکانس برای نتایج شبیه‌سازی نوری و مدل مداری



شکل (۱۰): مشخصه جذب نور ساختار جذب کننده نسبت به فرکانس برای نتایج شبیه‌سازی نوری و مدل مداری

- graphene," International Journal of Modern Physics B, vol. 27, no. 10, p. 1341001, 2013.
- [2] M. S. Zare, N. Nozhat, and R. Rashiditabar, "Tunable graphene based plasmonic absorber with grooved metal film in near infrared region," Optics Communications, vol. 398, pp. 56-61, 2017.
- [3] S. Thongrattanasiri, F. H. Koppens, and F. J. G. De Abajo, "Complete optical absorption in periodically patterned graphene," Physical review letters, vol. 108, no. 4, p. 047401, 2012.
- [4] M. Biabanifard, S. Asgari, S. Biabanifard, and M. S. Abrishamian, "Analytical design of tunable multi-band terahertz absorber composed of graphene disks," Optik, vol. 182, pp. 433-442, 2019.
- [5] Y. Zhang, Y. Feng, B. Zhu, J. Zhao, and T. Jiang, "Graphene based tunable metamaterial absorber and polarization modulation in terahertz frequency," Optics express, vol. 22, no. 19, pp. 22743-22752, 2014.
- [6] کریم خانی، واحد، "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"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۸، صفحات ۶۲-۵۷، تهران، ۱۴۰۰.
- [7] X. Wang and S. A. Tretyakov, "Toward Ultimate Control of Terahertz Wave Absorption in Graphene," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 67, no. 4, pp. 2452-2461, 2018.
- [8] S. Borzooei, E. Rezagholizadeh, and M. Biabanifard, "Graphene disks for frequency control of terahertz waves in broadband applications," Journal of Computational Electronics, pp. 1-14, 2020.
- [9] S. Huang, C. Song, G. Zhang, and H. Yan, "Graphene plasmonics: physics and potential applications," Nanophotonics, vol. 6, no. 6, pp. 1191-1204, 2016.
- [10] F. Chen, D. Yao, and Y. Liu, "Graphene-metal hybrid plasmonic switch," Applied Physics Express, vol. 7, no. 8, p. 082202, 2014.
- [11] J. Li, C. Zhao, B. Liu, C. You, F. Chu, N. Tian, Y. Chen, S. Li, B. An, and A. Cui, "Metamaterial grating-integrated graphene photodetector with broadband high responsivity," Applied Surface Science, vol. 473, pp. 633-640, 2019.
- [12] R. Gao, Z. Xu, C. Ding, L. Wu, and J. Yao, "Graphene metamaterial for multiband and broadband terahertz absorber," Optics Communications, vol. 356, pp. 400-404, 2015.
- [13] J. E. Muench, A. Ruocco, M. A. Giambra, V. Misiukis, D. Zhang, J. Wang, H. F. Watson, G. C. Park, S. Akhavan, and V. Soriano, "Waveguide-integrated, plasmonic enhanced graphene photodetectors," Nano letters, vol. 19, no. 11, pp. 7632-7644, 2019.
- [14] F. Tabatabaei, M. Biabanifard, and M. S. Abrishamian, "Terahertz polarization-insensitive and all-optical tunable filter using Kerr effect in graphene disks arrays," Optik, vol. 180, pp. 526-535, 2019.
- [۱۵] رستمی، مطمئن، باغبان، رسولی، "طراحی آشکارساز مادون قرمز-میانی چاه کوانتومی دو طول موج مبتنی بر ساختار آشناری"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۶، صفحات ۱۰-۱، تهران، ۱۳۸۸.
- [16] D. Periyagounder, P. Gnanasekar, P. Varadhan, J.-H. He, and J. Kulandaivel, "High performance, self-powered photodetectors based on a graphene/silicon Schottky junction diode," Journal of Materials Chemistry C, vol. 6, no. 35, pp. 9545-9551, 2018.

تیتانیوم لایه‌نشانی می‌کنیم. لایه تیتانیوم به منظور ایجاد چسبندگی بین لایه نقره و بستر Si/SiO_2 استفاده شده است. سپس لایه‌نشانی دی‌الکتریک (Si_3N_4) با استفاده از روش لایه‌نشانی بخار شیمیایی تقویت شده با پلاسما ($\text{PECVD}^{(۱)}$) انجام می‌شود [۴۲]. در این روش از واکنش‌دهنده‌های SiH_4 ، NH_3 و N_2 استفاده می‌شود تا لایه دی‌الکتریک Si_3N_4 تشکیل شود. از مس تک بلوری برای رشد لایه گرافن بر روی آن با تجزیه حرارتی اتیلن در یک محفظه خلأ استفاده می‌شود [۴۳]. از محلول نیترات آهن ($\text{Fe(NO}_3)_3$) برای زدایش مس در دمای اتاق استفاده می‌شود. از یک شیشه ساعت تمیز برای برداشتن لایه گرافن استفاده کرده و برای چند دقیقه گرافن را در آب دیونیزه^{۲۲} قرار می‌دهیم و دوباره با استفاده از یک شیشه ساعت تمیز گرافن را خارج کرده و در آب دیونیزه جدید قرار می‌دهیم تا مطمئن شویم که محلول زدایش مس به طور کامل از بین رفته است. لایه گرافن چندین بار با آب دیونیزه شسته می‌شود، پس از آن با وارد کردن ساختار Si/SiO_2 / $\text{Ti/Ag/Si}_3\text{N}_4$ در آب دیونیزه، لایه گرافن بر روی آن می‌نشیند و سپس آن را از آب خارج کرده و در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت قرار داده تا خشک شود. پس از آن، یک لایه نقره با استفاده از روش کندوپاش بر روی لایه گرافن ایجاد می‌شود و سپس، یک ماسک خاص با توجه به الگوی نانو ساختار فلزی رویی طراحی می‌شود. در نهایت با استفاده از روش فوتولیتوگرافی، نانو ساختار فلزی رویی شکل می‌گیرد [۴۴].

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک جذب‌کننده پلاسمونی مبتنی بر گرافن با ساختار MGDM که قابلیت کار به طور همزمان در دو باند مخابرات نوری (باند O و باند U) را دارد، ارائه شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که استفاده از ساختار پلاسمونی و تک لایه گرافن باعث افزایش بهره‌مکنش نور و گرافن شده و در نتیجه، جذب نور در ساختار افزایش می‌یابد. ضریب جذب نور در ساختار در طول موج ۱۳۱۰ nm و ۱۶۷۵nm به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۹۶ است. بنابراین، مزایای طرح پیشنهادی شامل راندمان جذب بالا و جذب نور در دو باند مجزا است. به منظور تایید نتایج شبیه‌سازی، مدل مداری ساختار پیشنهادی ارائه شده است که نتایج مدل مداری مطابقت بسیار خوبی با نتایج شبیه‌سازی دارد. علاوه بر این، تمام مواد و فرآیندهای مورد نیاز برای ساخت طرح پیشنهادی سازگار با فرآیند CMOS هستند. تمام مزایای ذکر شده در بالا نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی بسیار مناسب برای استفاده در ادوات نوری به‌خصوص دوربین‌ها، آشکارسازها و حسگرها است.

مراجع

- [1] Y. V. Bludov, A. Ferreira, N. M. Peres, and M. I. Vasilevskiy, "A primer on surface plasmon-polaritons in

- wavelengths," *Applied optics*, vol. 55, no. 34, pp. 9764-9768, 2016.
- [31] Z. Fang, Z. Liu, Y. Wang, P. M. Ajayan, P. Nordlander, and N. J. Halas, "Graphene-antenna sandwich photodetector," *Nano letters*, vol. 12, no. 7, pp. 3808-3813, 2012.
- [32] G. W. Hanson, "Erratum: "Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene" [J. Appl. Phys. 103, 064302 (2008)]," *Journal of Applied Physics*, vol. 113, no. 2, p. 029902, 2013.
- [33] D. Yi, X.-C. Wei, and Y.-L. Xu, "Tunable microwave absorber based on patterned graphene," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 65, no. 8, pp. 2819-2826, 2017.
- [34] M. Biabanifard and M. S. Abrishamian, "Circuit modeling of tunable terahertz graphene absorber," *Optik*, vol. 158, pp. 842-849, 2018.
- [35] S. Sa'don, M. Jamaluddin, M. Kamarudin, F. Ahmad, Y. Yamada, K. Kamardin, I. Idris, and N. Seman, "Characterisation of tunable graphene antenna," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, p. 153170, 2020.
- [36] W. Gao, J. Shu, C. Qiu, and Q. Xu, "Excitation of plasmonic waves in graphene by guided-mode resonances," *ACS nano*, vol. 6, no. 9, pp. 7806-7813, 2012.
- [37] Z. Su, J. Yin, and X. Zhao, "Terahertz dual-band metamaterial absorber based on graphene/MgF₂ multilayer structures," *Optics express*, vol. 23, no. 2, pp. 1679-1690, 2015.
- [38] M. Gu, B. Xiao, and S. Xiao, "Tunable THz perfect absorber with two absorption peaks based on graphene microribbons," *Micro & Nano Letters*, vol. 13, no. 5, pp. 631-635, 2018.
- [39] B.-z. Xu, C.-q. Gu, Z. Li, and Z.-y. Niu, "A novel structure for tunable terahertz absorber based on graphene," *Optics express*, vol. 21, no. 20, pp. 23803-23811, 2013.
- [40] M. Biabanifard and M. S. Abrishamian, "Multi-band circuit model of tunable THz absorber based on graphene sheet and ribbons," *AEU-International Journal of Electronics and Communications*, vol. 95, pp. 256-263, 2018.
- [41] S. Yousefi, M. Pourmahyabadi, and A. Rostami, "High performance plasmonically enhanced graphene photodetector for near-infrared wavelengths," *JOSA B*, vol. 38, no. 11, pp. 3474-3481, 2021.
- [42] F. Miao, J. Zhang, S. Xu, L. Wang, J. Chu, Z. Cao, and P. Zhan, "Fabrication of a reflective mirror within wide incidence angles for mid-infrared wavelength," in *2008 International Workshop on Metamaterials*, 2008, pp. 173-176: IEEE.
- [43] L. Gao, J. R. Guest, and N. P. Guisinger, "Epitaxial graphene on Cu (111)," *Nano letters*, vol. 10, no. 9, pp. 3512-3516, 2010.
- [44] Y. Ding, Z. Cheng, X. Zhu, K. Yvind, J. Dong, M. Galili, H. Hu, N. A. Mortensen, S. Xiao, and L. K. Oxenløwe, "Ultra-compact integrated graphene plasmonic photodetector with bandwidth above 110 GHz," *Nanophotonics*, vol. 9, no. 2, pp. 317-325, 2020.
- [17] S. Ogawa, M. Shimatani, S. Fukushima, S. Okuda, Y. Kanai, T. Ono, and K. Matsumoto, "Broadband photoresponse of graphene photodetector from visible to long-wavelength infrared wavelengths," *Optical Engineering*, vol. 58, no. 5, p. 057106, 2019.
- [18] A. Fardoost, F. G. Vanani, A. a. Amirhosseini, and R. Safian, "Design of a multilayer graphene-based ultrawideband terahertz absorber," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 16, no. 1, pp. 68-74, 2016.
- [19] F. Xiong, J. Zhang, Z. Zhu, X. Yuan, and S. Qin, "Ultrabroadband, more than one order absorption enhancement in graphene with plasmonic light trapping," *Scientific reports*, vol. 5, no. 1, pp. 1-8, 2015.
- [20] M. Casalino, T. Crisci, L. Moretti, M. Gioffrè, M. Iodice, G. Coppola, P. Maccagnani, R. Rizzoli, F. Bonafè, and C. Summonte, "Silicon Meet Graphene for a New Family of Near-Infrared Resonant Cavity Enhanced Photodetectors," in *2020 22nd International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON)*, 2020, pp. 1-4: IEEE.
- [21] A. Safaei, S. Chandra, M. N. Leuenberger, and D. Chanda, "Wide angle dynamically tunable enhanced infrared absorption on large-area nanopatterned graphene," *ACS nano*, vol. 13, no. 1, pp. 421-428, 2018.
- [22] X. Gan, K. F. Mak, Y. Gao, Y. You, F. Hatami, J. Hone, T. F. Heinz, and D. Englund, "Strong enhancement of light-matter interaction in graphene coupled to a photonic crystal nanocavity," *Nano letters*, vol. 12, no. 11, pp. 5626-5631, 2012.
- [23] Y. Liu, A. Chadha, D. Zhao, J. R. Piper, Y. Jia, Y. Shuai, L. Menon, H. Yang, Z. Ma, and S. Fan, "Approaching total absorption at near infrared in a large area monolayer graphene by critical coupling," *Applied Physics Letters*, vol. 105, no. 18, p. 181105, 2014.
- [24] R.-J. Shiue, X. Gan, Y. Gao, L. Li, X. Yao, A. Szep, D. Walker Jr, J. Hone, and D. Englund, "Enhanced photodetection in graphene-integrated photonic crystal cavity," *Applied Physics Letters*, vol. 103, no. 24, p. 241109, 2013.
- [25] W. Xu, Z. Zhu, K. Liu, J. Zhang, X. Yuan, Q. Lu, and S. Qin, "Chip-integrated nearly perfect absorber at telecom wavelengths by graphene coupled with nanobeam cavity," *Optics letters*, vol. 40, no. 14, pp. 3256-3259, 2015.
- [26] S. Schuler, D. Schall, D. Neumaier, B. Schwarz, K. Watanabe, T. Taniguchi, and T. Mueller, "Graphene photodetector integrated on a photonic crystal defect waveguide," *ACS Photonics*, vol. 5, no. 12, pp. 4758-4763, 2018.
- [27] P. Wu, Z. Chen, D. Xu, C. Zhang, and R. Jian, "A narrow dual-band monolayer unpatterned graphene-based perfect absorber with critical coupling in the near infrared," *Micromachines*, vol. 11, no. 1, p. 58, 2020.
- [28] X. Gan, R.-J. Shiue, Y. Gao, I. Meric, T. F. Heinz, K. Shepard, J. Hone, S. Assefa, and D. Englund, "Chip-integrated ultrafast graphene photodetector with high responsivity," *Nature Photonics*, vol. 7, no. 11, p. 883, 2013.
- [29] D. Wang, A. E. L. Allcca, T.-F. Chung, A. V. Kildishev, Y. P. Chen, A. Boltasseva, and V. M. Shalaev, "Enhancing the graphene photocurrent using surface plasmons and a pn junction," *Light: Science & Applications*, vol. 9, no. 1, pp. 1-10, 2020.
- [30] M. S. Zare, N. Nozhat, and R. Rashiditabar, "Improving the absorption of a plasmonic absorber using a single layer of graphene at telecommunication

- ¹ Surface plasmon polariton
- ² Fermi
- ³ Collective excitations
- ⁴ Organic Light Emitting Diodes
- ⁵ Near-infrared
- ⁶ Fabry- Perot
- ⁷ Distributed Bragg reflectors
- ⁸ Transverse Magnetic
- ⁹ Transverse Electric
- ¹⁰ Photonic crystal
- ¹¹ Metal-graphene-dielectric-metal
- ¹² Kubo's formula
- ¹³ Interband
- ¹⁴ Intraband
- ¹⁵ Finite Difference Time Domain
- ¹⁶ Perfectly matched layer
- ¹⁷ Bragg's law
- ¹⁸ Wave diffraction
- ¹⁹ Conventional planar technology
- ²⁰ Sputtering
- ²¹ Plasma-enhanced chemical vapor deposition
- ²² Deionized water