

طراحی یک جاذب کامل فرامواد چند-باند گرافنی با قابلیت قطبش غیر حساس برای کاربردهای تراهرتز

محمد مهدی فخاریان^{۱*}

چکیده	اطلاعات مقاله
در این مقاله یک جاذب کامل فرامواد غیر حساس به قطبش بر پایه گرافن در محدوده فرکانس تراهرتز ارائه شده است. این جاذب از یک لایه الگوی گرافن در بالای ساختار، یک لایه جداکننده دی الکتریک و یک لایه طلا در پایین ساختار تشکیل شده است. در ساختار پیشنهادی، قابلیت جذب کامل با حذف کامل تابش و نور منعکس شده و اتلاف کامل انرژی تابشی بررسی شده است. در ابتدا، ساختار پیشنهادی و فرآیند طراحی آن مورد بررسی قرار گرفته و نشان داده که در سه باند، نتایج جذب کامل در فرکانس‌های ۲، ۲/۹۵ و ۳/۷۵ تراهرتز به ترتیب ۹۳/۵٪، ۹۹/۸٪ و ۹۸/۱٪ محقق شده است. همچنین، مکانیسم فیزیکی عملکرد ساختار توسط توزیع سطحی میدان الکتریکی و همچنین تغییرات هندسی ساختار بررسی شده است. علاوه بر این، طراحی ساختار پیشنهادی با سطح گرافن این مزیت را فراهم کرده تا بتوان فرکانس تشدید را بدون تغییر مجدد ساختار پیشنهادی، توسط تغییرات سطح انرژی فرمی و زمان واهلش گرافن تنظیم نمود. با بررسی انجام شده، مشخص شد که جاذب کامل پیشنهادی فرامواد به قطبش حساس نبوده و نسبت به زاویه تابش تحمل بیشتری دارد. بر این اساس، جاذب باند وسیع پیشنهادی در این مقاله، در فیلتر، شناسایی، تصویربرداری، ردیاب‌های خورشیدی و سایر کاربردها دارای پتانسیل بالقوه است.	دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۴/۲۷ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰
	واژگان کلیدی: جاذب کامل، فرامواد، گرافن، سه باند، قطبش، تراهرتز.

۱- مقدمه

فرامواد به طور کلی موادی با مهندسی مصنوعی و با سلول واحدی در ابعاد کوچکتر از طول موج نور فرودی هستند که دارای خواص الکترومغناطیسی (EM^2) بی نظیر بوده و در طبیعت یافت نمی‌شوند. در حالی که این خصوصیات منحصر به فرد فراموادها نقض قوانین فیزیک در آنها نیست. فرامواد با توجه به ملاحظات خود به چند دسته تقسیم می‌شوند. به عنوان مثال، موادی با μ و ϵ منفی که منجر به خصوصیتی مانند ضریب شکست منفی و انتشار موج چپ-گرد در محدوده مایکروویو می‌شوند. برای اولین بار، وسلاگو نظریه‌ای در مورد ماده‌ای با ضریب شکست منفی ارائه نمود. آنها مواد DNG^۳ نامیده می‌شوند. طبقه‌بندی

دیگری از مواد فرعی به نام EBG^۴ وجود دارد که ساختارهای متناوب فلزی، دی الکتریک و ترکیبی از هر دو است که از انتشار امواج الکترومغناطیسی در یک باند فرکانسی خاص برای هر زاویه تابش و هر شرایط قطبش جلوگیری می‌کنند. بنابراین فراموادها برای بهبود عملکرد آنتن‌ها، فیلترها و جاذب‌ها در باند مایکروویو می‌توانند استفاده شوند [۱، ۲ و ۳].

امروزه فراموادها در باندهای تراهرتز^۵ (THz)، مادون قرمز و مرئی توسعه داده شده‌اند و بسیاری از خصوصیات جالب را مانند ضریب شکست منفی، ضریب گذردهی الکتریکی منفی، نامرئی‌سازی، رفتار پوششی، اثرات معکوس داپلر، جذب کامل و غیره ارائه می‌دهند [۴ و ۵]. در این میان،

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: fakharian@fmgarmarsar.ac.ir

۱. استادیار گروه علوم مهندسی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گرمسار

² Electromagnetic

³ Double Negative

⁴ Electromagnetic Bandgap

⁵ Terahertz

میان آنها، جاذب‌های کامل چند باند، جذب کامل را در چندین فرکانس گسسته امکان پذیر می‌کنند و در کاربردهایی مانند سنجش چند-باند قابل استفاده هستند. به طور کلی، یک جاذب کامل چند-باند را می‌توان با دو روش طراحی و پیکربندی نمود. روش اول معمولاً به عنوان روش ساخت همسطح شناخته می‌شود، جایی که چندین تشدیدکننده در ابعاد مختلف به یک ساختار واحد تبدیل می‌شوند [۲۸ و ۲۹]. روش دوم شامل انباشته شدن عمودی ساختارهای چند لایه متناوب است [۳۰ و ۳۱]. اما هیچ یک از این روش‌ها برای ایجاد ساختاری که جذب چند-باند را فراهم سازد، ایده آل نیست. به عنوان مثال، روش ساخت همسطح منجر به گسترش ناگزیر اندازه ساختار واحد جاذب کامل می‌شود، در حالی که طرح لایه‌ای منجر به ضخامت زیاد و وزن سنگین ساختار می‌گردد. اخیراً، برخی از طرح‌های ساختاری ساده برای دستیابی به جذب چند باند ارائه شده اند [۳۲ و ۳۳]. با این حال، جذب در زاویه تابش گسترده با رفتار غیرحساس قطبش هنوز هم باید بهبود یابد. در این مقاله، یک جاذب کامل مناسب فرامواد سه باند، غیرحساس به قطبش، با بازه وسیعی از زاویه تابش و ابعاد فشرده بر اساس گرافن تک لایه در محدوده تراهرتز مطالعه و طراحی شده است. در این طرح، جذب کامل با توسعه الگوی گرافن در یک آرایه میکرو-حلقه ای مربع-شکل باز (تشدیدکننده حلقه شکافدار^۱ SRR) و یک میکرو-ستون مربعی در بالای یک بستر فلزی بازتابنده با یک زیرلایه نسبتاً ضخیم به دست آمده است. ساختار پیشنهادی بررسی و میزان جذب ساختار و فرآیند طراحی آن مشخص شده است. سپس، خصوصیات جذب جاذب‌های کامل فرامواد در سطوح مختلف انرژی فرمی و زمان واهلش مورد بررسی قرار گرفته است. سرانجام، برای امواج EM، عملکرد جاذب‌های کامل فرامواد نسبت به حساسیت زاویه تابش و قطبش بررسی شده و نشان داده می‌شود که جذب کاملی از سه باند در محدوده گسترده‌ای حاصل خواهد شد.

۲- طراحی و تئوری ساختار

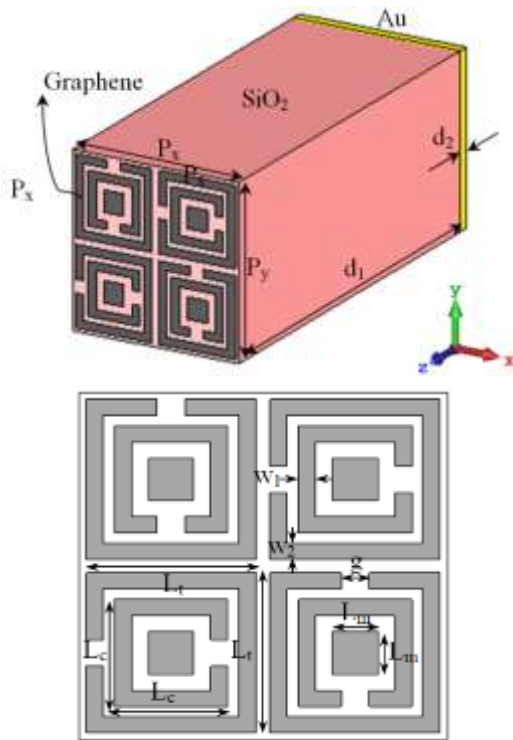
جاذب فرمواد پیشنهادی در این مقاله، همانطور که در شکل (۱) نشان داده شده، توسط سه لایه ایجاد شده است. لایه اول و بالا یک آرایه نازک با طرح گرافن است که از دو میکرو حلقه مربع-شکل SRR تودرتو و یک میکرو ستون

جاذب‌ها با کاربردهای بسیاری در طراحی سنسورها، مدولاتورها و سلول‌های خورشیدی مورد توجه قرار گرفته-اند. در فرکانس‌های THz، به واسطه تشدیدکننده‌های فلزی، تلفات ذاتی در فرامواد افزایش یافته و عملکرد آنها را کاهش می‌دهد. با توسعه سریع و کاربرد بسیار خوب در زمینه فیزیک پایه، می‌توان از گرافن به عنوان جایگزینی برای مواد فلزی سنتی و بستر مناسبی برای پلاسمون‌های سطحی و برای طراحی یک جاذب کامل فرامواد استفاده کرد. پلاسمون‌های سطحی گرافن می‌توانند محصورشدگی شدیدی از خود نشان دهند [۶، ۷ و ۸]. پلاسمون‌های گرافن، برخلاف پلاریتون‌های پلاسمون سطحی سنتی در نانوفلزهای گرانبها مانند نقره (Ag) و طلا (Au)، دارای محصوریت میدانی بسیار قوی و ویژگی‌های نوری با افت کم هستند، که می‌توانند نور را به نانو مقیاس‌های طول موج محدود کنند و در نتیجه جذب نور را افزایش دهند [۹]. علاوه بر این، در مقایسه با فلزهای سنتی مبتنی بر پلاریتون‌های پلاسمون سطحی، بارزترین مزیت پلاسمون گرافن استفاده از ولتاژ گیت خارجی برای تنظیم پویای پتانسیل شیمیایی (انرژی فرمی گرافن) است [۱۰ و ۱۱]. از آنجا که بردار موج پلاسمون گرافن مستقیماً به رسانایی سطح گرافن بستگی دارد و رسانایی وابسته به پتانسیل شیمیایی است، ولتاژ گیت خارجی می‌تواند به جای تغییر هندسی، عملکرد گرافن را در جاذب پلاسمون به صورت پویایی تنظیم نماید [۱۲ و ۱۳].

امروزه جاذب‌های فرامواد ارزش کاربردی زیادی در ارتباطات، امنیت، شناسایی و سایر زمینه‌ها به نمایش گذاشته‌اند و به طور فزاینده‌ای به یکی از نقاط مهم مطالعه در محدوده تراهرتز تبدیل شده‌اند [۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۸]. لندی و همکاران برای اولین بار یک جاذب فرامواد با مشخصات جذب کامل گزارش کردند [۱۹]. از آن زمان، جاذب‌های فرامواد مختلفی که در محدوده‌های متفاوت فرکانس کار می‌کنند، از مایکروویو تا مادون قرمز ارائه شده است [۲۰، ۲۱ و ۲۲]. در محدوده تراهرتز، تائو و همکاران، اولین جاذب باند باریک را ارائه نموده‌اند [۲۳]. محققان از روش‌های متفاوتی برای بدست آوردن جاذب‌های کامل فرامواد دو باند، چند باند و یا پهن باند مبتنی بر گرافن استفاده کرده‌اند [۲۴، ۲۵، ۲۶ و ۲۷]. در

^۱ Split Ring Resonator

$$H(\Omega) = \sinh[\hbar\Omega / K_B T] \left\{ \cosh\left[\frac{E_f}{K_B T}\right] + \cosh[\hbar\Omega / (K_B T)] \right\}. \quad (4)$$



شکل ۱ شماتیک ساختار جاذب فرامواد کامل پیشنهادی و پارامترهای مشخصه آن در یک سلول واحد. پارامترهای هندسی ساختار: $d_1=15 \mu\text{m}$, $P_x=P_y=3.25 \mu\text{m}$, $L_m=0.8 \mu\text{m}$, $L_c=2 \mu\text{m}$, $L_r=3 \mu\text{m}$, $d_2=0.4 \mu\text{m}$, $g=0.5 \mu\text{m}$, $w_2=0.25 \mu\text{m}$, $w_1=0.25 \mu\text{m}$

در این رابطه، E_f انرژی فرمی گرافن است که به ولتاژ خارجی اعمال شده به گرافن وابسته می باشد. τ ، زمان استراحت حامل‌های بار و T دمای گرافن است که در این مقاله مقدار آنها به ترتیب 0.1eV و 300°K در نظر گرفته شده است. همچنین e در فرمول فوق، بار الکترون، \hbar ثابت پلانک، k_B ثابت بولتزمن و ω فرکانس زاویه‌ای نور فرودی را نشان می‌دهند. همچنین گذردهی گرافن به صورت تابعی از رسانندگی از رابطه $\varepsilon = 1 + i\sigma / (\varepsilon_0 \omega)$ به دست می‌آید که در آن ε_0 ضریب گذردهی خلأ و t_g ضخامت گرافن است. در ناحیه تراهرتز و طبق اصل حذف پائولی، $E_f \gg K_B T$ است و رسانش بین بانندی مقدار ناچیزی می‌شود [۲۸]. بنابراین، معادله رسانش گرافن با توجه به مدل درود، به معادله تقریبی و ساده شده زیر تبدیل می‌شود:

مربعی در مرکز آنها تشکیل شده است.

در شبیه‌سازی عددی توسط نرم‌افزار CST Microwave Studio بر مبنای روش تفاضل محدود حوزه زمان^۱ (FDTD)، ضخامت گرافن تک لایه ساختار $t_g=1 \text{ nm}$ در نظر گرفته شده است. تناوب ساختار در جهت های x و y برابر با $P_x=P_y=3 \mu\text{m}$ میکرومتر است. لایه میانی، لایه دی الکتریک SiO_2 با ثابت دی الکتریک 2.25 و ضخامت $d_1=15 \mu\text{m}$ است. در شبیه‌سازی، شرایط مرزی متناوب در محورهای x و y تنظیم شده و از یک شرایط مرزی لایه تطبیق کامل PML^2 در امتداد محور z استفاده شده است و موج EM تابشی به صورت عمودی در امتداد محور z منفی منتشر می‌شود. همچنین در شبیه‌سازی، دقت مش در لایه گرافن در امتداد محورهای x ، y و z به ترتیب روی 50 نانومتر، 50 نانومتر و 0.5 نانومتر تنظیم شده است. لایه سوم لایه فلزی با ضخامت $d_2=0.4 \mu\text{m}$ در پایین ساختار است که از طلا با رسانایی $\sigma_{\text{Au}}=4.56 \times 10^7$ ساخته شده است. میزان جذب فرامواد را می‌توان با رابطه $A=1-T-R=1-|S_{12}|^2-|S_{11}|^2$ بیان نمود، که T میزان انتقال و R میزان بازتابندگی ساختار است [۳۴]. از آنجا که ضخامت لایه پیوسته طلا در انتهای ساختار بسیار بیشتر از عمق پوستی است، می‌توان میزان جذب را با رابطه $A=1-R$ نیز بدست آورد. در صورتی که $R=0$ یا نزدیک به صفر باشد، یک جاذب کامل ایجاد می‌گردد. سایر پارامترهای بهینه شده ساختار جاذب فرامواد پیشنهادی در شکل (۱) نشان داده شده است.

۲-۱- رسانش گرافن

رسانش گرافن (σ) شامل دو جمله رسانش درون بانندی (σ_{inter}) و رسانش بین بانندی (σ_{intra}) است که با رابطه کوبو به ترتیب در جمله اول و دوم رابطه زیر بیان میشود [۱۵]:

$$\sigma(\omega, E_f, \tau, T) = \sigma_{\text{intra}}(\omega, E_f, \tau, T) + \sigma_{\text{inter}}(\omega, E_f, \tau, T) \quad (1)$$

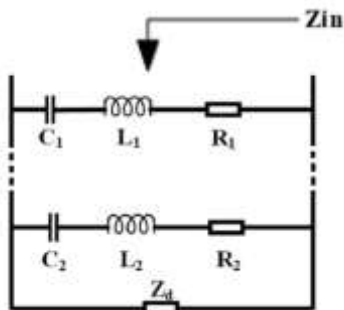
$$\sigma_{\text{intra}}(\omega, E_f, \tau, T) = \frac{2K_B e^2 T}{\pi \hbar^2} \ln \left[2 \cosh \left(\frac{E_f}{2K_B T} \right) \right] \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}} \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{inter}}(\omega, E_f, \tau, T) = \frac{e^2}{4\hbar} \left[H \left(\frac{\omega}{2} \right) + \frac{4i\omega}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{H(\Omega) - H \left(\frac{\omega}{2} \right)}{\omega^2 - 4\Omega^2} d\Omega \right] \quad (3)$$

² Perfect Matched Layer

¹ Finite-Difference Time-Domain

عنوان یک مدار معادل موازی که شامل مدارهای R-L-C سری است، مدل سازی نمود. بنابراین، بر اساس تئوری خط انتقال می توان اثر متقابل بین امواج ترانز و جاذبها را بررسی نمود.



شکل ۳ مدل مدار معادل R-L-C جاذب گرافن چند باند.

مقاومت R و القاگر L توسط ساختار طولی گرافنی SRR ایجاد می شود. در حالی که ظرفیت C به دلیل شکاف بین ساختارهای SRR به وجود می آید. امپدانس نرمالیزه شده مدل در معادلات (۶) - (۷) ذکر شده است [۳۸].

$$Z_d = j \frac{\omega \mu_0}{\sqrt{(\omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_s})^2 - k_0^2 \sin^2 \theta}} \times \tan \left(\sqrt{(\omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_s})^2 - k_0^2 \sin^2 \theta} t_g \right) \quad (۶)$$

$$\frac{1}{Z_{in}} = \frac{1}{Z_d} + \frac{1}{Z_m} \quad (۷)$$

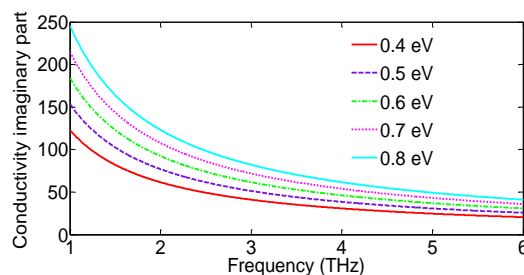
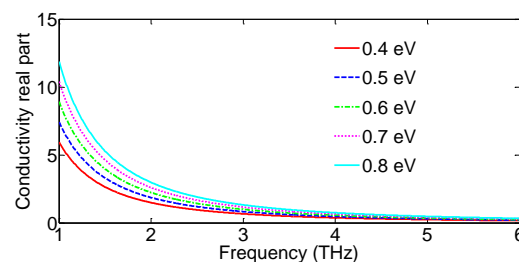
در معادلات فوق، Z_d امپدانس لایه SiO_2 و صفحه زمین طلا است که به عنوان یک خط انتقال اتصال کوتاه در نظر گرفته می شود. Z_m امپدانس ذاتی با قطبش TE^1 است، t_g ضخامت لایه SiO_2 ، ϵ_s ضریب دی الکتریک زیر لایه، K_0 عدد موج فضای آزاد، θ زاویه تابش و Z_0 امپدانس مشخصه هوا (Ω) است. [۳۷]

۳- بحث و نتایج شبیه سازی ساختار

تحت تابش فرودی نرمال، خواص جذب ساختار مورد بررسی قرار گرفته است. نمای فوقانی ساختار و همچنین طیف جذب مربوط به آن در شکل (۴) نشان داده شده است که در آن پارامترهای هندسی مطابق شکل (۱) است. ساختار پیشنهادی یک ساختار آرایه گرافن متناوب است که ترکیبی از چهار ساختار SRR تودرتو یکسان با یک میکرو-ستون مربعی در وسط آنها با ۹۰ درجه چرخش نسبت به مرکز است. طیف های جذب کامل مربوط به آن در فرکانس های ۲، ۲/۹۵ و ۳/۷۵ ترانز با نرخ جذب های ۹۳/۵، ۹۹/۸ و ۹۸/۱ درصد محقق شده است. به منظور

$$\sigma(\omega, E_f, \tau, T) \approx \frac{e^2 E_f}{\pi \hbar^2} \frac{i}{\omega + i\tau^{-1}} \quad (۵)$$

که در این رابطه، رسانش به طور مستقیم وابسته به انرژی فرمی است. همانطور که در شکل (۲-الف) و (۲-ب) نشان داده شده است، قسمت حقیقی و موهومی رسانایی گرافن برحسب فرکانس محاسبه شده است. وقتی سطح انرژی فرمی ثابت است، می توان به وضوح مشاهده کرد که قسمت های حقیقی و موهومی رسانایی گرافن وابسته به فرکانس هستند. از آنجا که جابجایی طیفی رزونانس توسط قسمت موهومی رسانش تعیین می شود و مدولاسیون دامنه رزونانس توسط قسمت حقیقی کنترل می شود [۳۵]، بنابراین می توان سطح انرژی فرمی گرافن را با اعمال ولتاژ خارجی یا ناخالص سازی شیمیایی تنظیم نمود تا میزان جذب فرامواد کنترل گردد.



شکل ۲ در سطوح مختلف انرژی فرمی گرافن، (الف) قسمت حقیقی و (ب) قسمت موهومی رسانایی گرافن برحسب فرکانس.

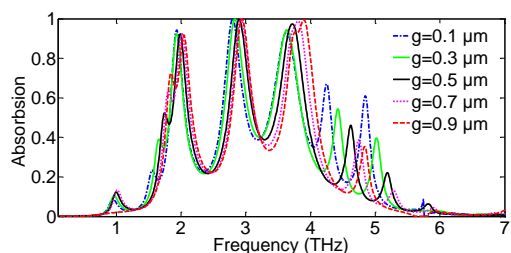
۲-۲- مدل مدار معادل R-L-C

از مدل مدار معادل می توان برای پیش بینی کیفی رفتار ساختار و مشخصات ساختارهای مختلف از جمله جاذب طراحی شده استفاده نمود [۳۶]. علاوه بر این، می توان تأثیر هندسه و ساختار تناوبی بر عملکرد جاذب را نیز تخمین زد. بنابراین، مدل مدار معادل برای طراحی کاربردهای جدید و فهم مکانیسم فیزیکی جاذبها سودمند است [۳۷].

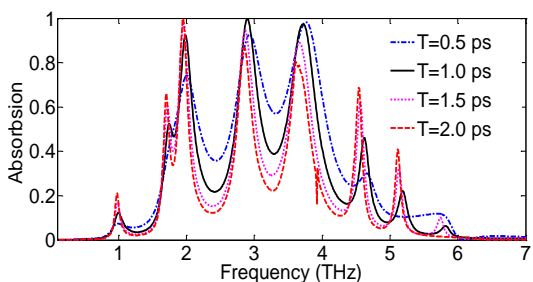
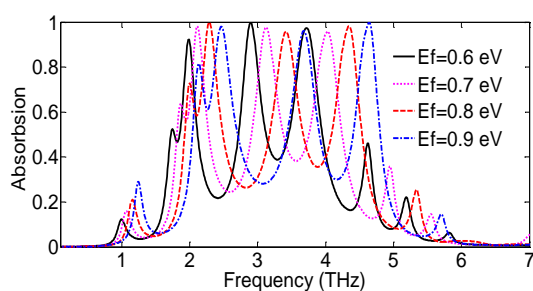
همانطور که در شکل (۳) نشان داده شده است، بر اساس مدل مدار معادل، جاذب فرامواد چند باند را می توان به

¹ Transverse Electric

فرکانس‌های ۲ و ۲/۹۵ تراهرتز، میدان الکتريکی اساساً در ساختار SRR بیرونی علی‌الخصوص در نواحی گوشه و شکاف ساختار توزیع شده است. بنابراین، پس از بررسی این مدل، می‌توان نتیجه گرفت که ظاهراً نوار حلقه SRR بیرونی تأثیر زیادی بر خصوصیات جذب ساختار گرافن پیشنهادی دارد. همچنین از شکل (۶) مشخص است که ساختار SRR داخلی بر روی فرکانس ۳/۷۵ تراهرتز موثر است.



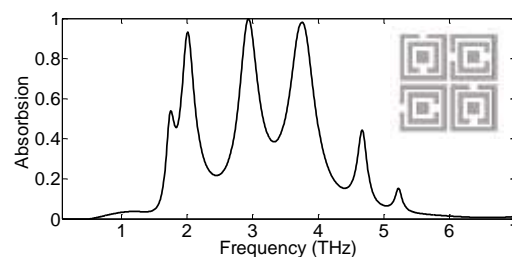
شکل ۷ طیف جذب ساختار فرامواد جاذب کامل پیشنهادی برای تغییر ابعاد مختلف g از ۰/۱ تا ۰/۹ میکرومتر.



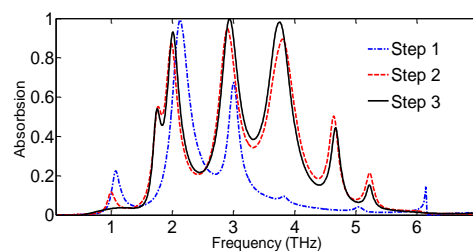
شکل ۸ طیف جذب ساختار فرامواد جاذب کامل پیشنهادی (الف) در سطوح مختلف فرمی (E_f) و (ب) در زمان‌های مختلف واهلش (τ).

در ادامه بررسی و مطالعه ساختار پیشنهادی، اثر تغییرات عرض شکاف میانی ساختار SRR (g) که یکی از تأثیرگذارترین پارامترهای هندسی بر خصوصیات جذب ساختار فرامواد پیشنهادی است، در شکل (۷) نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، با افزایش g ، فرکانس‌های تشدید برای هر سه باند فرکانسی جذب کامل، به سمت فرکانس‌های بالاتر سوق داده شده‌اند. علت این مسئله آن است که با افزایش g ، خاصیت معادل

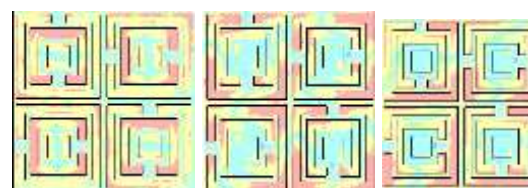
تسهیل توضیح دقیق جذب در ساختار پیشنهادی، طیف پاسخ برای قسمتهای مختلف ساختار تشدید و فرآیند طراحی آن در شکل (۵) ارائه شده است. همانطور که در شکل (۵) نشان داده شده است، هر عنصر منفرد در داخل لایه طرح، عامل ایجاد یا بهبود تشدید مجزایی است. در نتیجه، ترکیبی از این عناصر منجر به جذب کامل چند باند شده است.



شکل ۴ نمای فوقانی ساختار و طیف جذب آن در تابش فرودی نرمال، هنگامی که ابعاد هندسی مطابق شکل ۱ است.



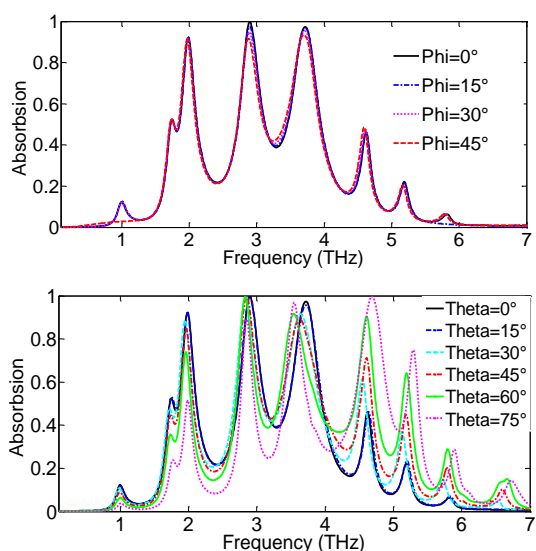
شکل ۵ سهم عناصر منفرد در جذب ساختار جاذب کامل پیشنهادی و فرآیند طراحی وابسته به آن.



شکل ۶ تحت تابش فرودی نرمال، توزیع میدان الکتريکی ساختار پیشنهادی در فرکانس‌های ۲ تراهرتز، ۲/۹۵ تراهرتز و ۳/۷۵ تراهرتز نشان داده شده است.

به منظور درک عمیق تر عملکرد فیزیکی جذب ساختار مدل پیشنهادی، توزیع میدان الکتريکی در راستای مولفه z (بخش حقیقی E_z) تحت تابش نرمال موج EM در فرکانس‌های سه گانه در شکل (۶) نشان داده شده است. برای

نیست. علاوه بر این، عملکرد جذب‌پذیری ساختار پیشنهادی در زوایای مورب تابش (θ) بررسی شده است. به عنوان مثال برای قطب بندی TE، همانطور که در شکل (۹-ب) نشان داده شده، نسبت به تغییرات شدت میدان الکتریکی ناشی از افزایش θ حساسیت کمی دارد. مزیت دیگر ساختار پیشنهادی ثابت فرکانس جذب است، همانطور که در شکل نشان داده شده است، در سه قله جذب مجزا، با افزایش θ علی‌الخصوص تا $\theta=60^\circ$ تغییر ناچیزی داشته و علاوه بر آن منجر به ایجاد یک قله جذب کامل در حوالی فرکانس ۴/۷ ترانزیتور شده است.



شکل ۹ الف) وابستگی طیف جذب ساختار پیشنهادی به زاویه قطبش تحت تابش نرمال موج EM. ب) طیف جذب تحت زوایای مختلف تابشی با قطب بندی TE.

اگرچه در این پژوهش فقط شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی ارائه شده، اما در اینجا به طور خلاصه امکان ساخت و اندازه‌گیری طرح و خطاهای احتمالی در فرآیند ساخت، شرح داده شده است. برای ساخت طرح می‌توان مراحل زیر را دنبال کرد. در مرحله اول، دی‌الکتریک با ضخامت $d_1=15 \mu\text{m}$ با پوشش طلا در یک طرف، می‌تواند توسط روش رسوب‌دهی بخار شیمیایی (CVD) انباشت شود. سپس می‌توان الگوهای گرافن را با بهره‌برداری از فرآیند لیتوگرافی استاندارد روی دی‌الکتریک ساخت [۴۱]. اندازه‌گیری طرح نیز می‌تواند توسط یک سیستم طیف‌سنجی دامنه زمانی THz انجام شود. در ادامه شکل (۱۰) وابستگی طیف جذب را به دی‌الکتریک نشان می‌دهد. با توجه به شکل (۱۰-الف)،

خازنی ساختار SRR کاهش یافته و در نتیجه فرکانس تشدید آن افزایش یافته است. اما، در مورد قله‌های جذب کامل، میتوان مشاهده کرد که در باندهای سه گانه تقریباً بدون تغییر باقی مانده است، که این میتواند یک روش مناسب برای تنظیم فرکانس‌های جذب کامل به صورت جداگانه باشد. در ادامه قابلیت تنظیم و جابجایی فرکانس که یک ویژگی‌های مهم و عملیاتی در مورد جاذب‌ها است، توسط تغییرات غیر هندسی سطح فرمی و زمان واهلش حامل‌های بار در ساختار گرافن بررسی شده است. همانطور که در شکل (۸-الف) نشان داده شده است، تحت تاثیر تابش فرودی نرمال، حداکثر جذب ساختار با تغییر سطح انرژی فرمی از ۰/۶ الکترون ولت به ۰/۶ الکترون ولت باعث تغییر فرکانس می‌شود. بنابراین، فرکانس جذب ساختار میتواند در یک محدوده وسیعی از تقریباً ۱/۹ ترانزیتور تا ۴/۷ ترانزیتور در مجموع باندهای سه گانه تنظیم شود. به منظور درک بهتر عملکرد سطح فرمی با توجه به رابطه $\lambda = 2\pi c \sqrt{LC}$ (سرعت نور، L اندوکتانس کل و C ظرفیت کل) [۳۹]، افزایش سطح فرمی منجر به کاهش L می‌شود [۴۰]. کاهش L نیز طبق فرمول ذکر شده منجر به کاهش λ شده و کاهش λ به معنای افزایش فرکانس است. در ادامه هنگامی که سطح فرمی در ۰/۶ الکترون ولت ثابت است، میزان جذب جاذب کامل پیشنهادی با زمان‌های مختلف واهلش τ مورد مطالعه قرار گرفته است. همانطور که در شکل (۸-ب) مشخص شده، با تغییر زمان واهلش الکترون، حداکثر جذب باندهای سه گانه، علی‌الخصوص در باندهای دوم و سوم، افزایش یافته و سپس کاهش یافته است. دلیل این پدیده این است که بهبود سهم حامل‌های بار در نوسان پلاسما به افزایش زمان واهلش بستگی دارد. اما وقتی زمان واهلش به اندازه کافی بزرگ می‌شود، حامل‌های بار اشباع شده و انرژی منعکس می‌شود و جذب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش زمان واهلش، پهنای جذب باریک می‌گردد.

شکل (۹-الف) طیف جذب جاذب فرامواد پیشنهادی را در زوایای مختلف قطبش $\varphi = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ نشان داده است. نتایج نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی وابستگی کمی به قطبش دارد و این مفهوم را بیان می‌کند که این ساختار در حالت تابش نرمال نسبت به قطبش حساس

¹ Chemical Vapor Deposition

است.

جدول ۱ مقایسه بین جاذب طراحی شده و نتایج گزارش شده قبلی.

مرجع	فرکانس (تراهرتز)	تعداد قله ها	ماکزیمیم جذب %	قطبش غیر حساس	زاویه تابش
[۱۴]	۳/۳۷، ۰/۸۵	۲	۹۵/۱۵	بله	۰-۸۰
[۱۵]	۰/۱۱۴، ۰/۱۸۱	۲	۹۸/۹۵	بله	۰-۴۵
[۴۳]	۰/۸۴، ۰/۵۳، ۰/۹۸	۳	۹۲/۷۳	بله	۰-۴۵
[۴۴]	۰/۴۵، ۱/۵۹، ۰/۴۱، ۳/۰۵، ۵/۱۱	۵	۹۷/۳۵	-	-
این کار	۰/۲۹۵، ۰/۳۷۵	۳	۹۹/۸	بله	۰-۶۰

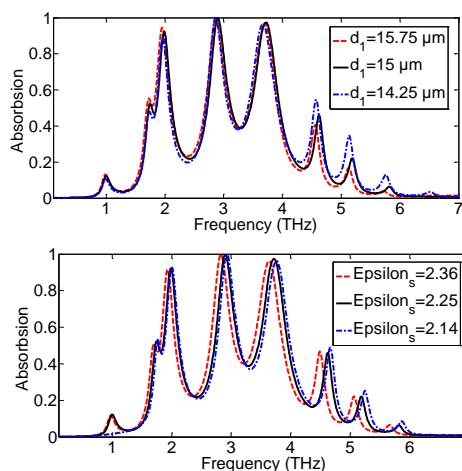
۴- نتیجه گیری

در این مقاله، یک ساختار جاذب کامل فرامواد سه باند مبتنی بر گرافن در محدوده فرکانس‌های تراهرتز طراحی شده است. برای این ساختار، جذب ۹۳/۵٪ در باند اول در محدوده فرکانس ۲ تراهرتز، جذب ۹۹/۸٪ در باند دوم در فرکانس ۲/۹۵ تراهرتز و باند سوم در فرکانس ۳/۷۵ تراهرتز با جذب بیش از ۹۸٪ محقق شده است. با تغییر پارامترهای هندسی ساختار، سطح انرژی فرمی و زمان واهلش گرافن، ویژگی‌های جذب سه باند بررسی شده است. علاوه بر این، جاذب پیشنهادی می‌تواند تحت تابش فرودی نرمال و تابش مورب (۰ تا ۶۰ درجه) در زیر قطبش TE جذب تقریباً کاملی داشته باشد و عدم حساسیت قطبی تا ۴۵ درجه را نشان دهد. به عبارت دیگر، جاذب پیشنهادی دارای زاویه دید گسترده و حساسیت ضعیف به قطبش است. به دلیل عملکرد خوب، این مدل ساختار می‌تواند از حساسیت و پاسخ بالاتری نسبت به فرامواد مبتنی بر فلز برخوردار باشد. همچنین این طراحی می‌تواند در بسیاری از کاربردها مانند فیلتر کردن، تشخیص، تصویربرداری و برداشت انرژی ارزشمند باشد. علاوه بر این، از آنجا که طراحی ساختار جاذب کامل چند باند یکی از موضوعات مهم برای کارهای آینده است، نتایج این مقاله تأثیر بسزایی در طراحی این نوع جاذب‌ها دارد.

تقدیر و تشکر

نویسنده مقاله مراتب تشکر و قدردانی خود را از دانشگاه گرمسار جهت حمایت از تحقیق حاضر ابراز می‌دارد. همچنین از داوران محترم که در بهبود این مقاله نقش به سزایی داشتند، سپاسگزاری می‌کند.

ساختار شبیه‌سازی شده در برابر تغییرات ضخامت دی‌الکتریک کاملاً مقاوم است. این می‌تواند به عنوان یک مزیت واقعی برای ساختار پیشنهادی در نظر گرفته شود زیرا عدم تطابق و خطاهای رایج ساخت بر عملکرد طرح تأثیر مخربی می‌گذارد. طبق شبیه‌سازی، تغییرات ۵ درصدی در d_1 انحراف ناچیزی را در باندهای جذب کامل نشان می‌دهد که برتری عملیاتی ساختار را در برابر تغییر ضخامت دی‌الکتریک تأیید می‌کند. همچنین در شکل ۱۰ (ب) وابستگی طیف‌های جذب به ثابت دی‌الکتریک مورد مطالعه قرار گرفته است. با تغییر ۵ درصدی ثابت دی‌الکتریک از ۲/۱۴ به ۲/۳۶، کمی جابجایی فرکانس به چپ رخ داده ولی تغییر در دامنه جذب بسیار ناچیز است. این را می‌توان به صورت زیر توضیح داد که با توجه به رابطه $\varphi = \frac{4d_1\sqrt{\epsilon_s - \sin^2\theta}}{\lambda}$ و همچنین مطابق با موج صفحه‌ای انتقال داده شده بر روی لایه محیطی همگن، تحت تأثیر تابش نرمال، θ و φ ثابت خواهند بود. در نتیجه، تغییر فرکانس به ϵ_s بستگی دارد.



شکل ۱۰ طیف جذب برای ساختار پیشنهادی در برابر تحمل تغییرات ۵ درصدی الف) d_1 به عنوان ضخامت و ب) ϵ_s به عنوان ثابت دی‌الکتریک لایه دی‌الکتریک.

در نهایت، به منظور اثبات برتری جاذب طراحی شده، عملکرد مقایسه‌ای جاذب پیشنهادی با برخی کارهای گزارش شده قبلی، در جدول ۱ نشان داده شده است. نتایج نشان می‌دهد که جاذب طراحی شده می‌تواند در سه باند، جذب قابل تنظیمی را فراهم کند که می‌تواند به طور گسترده‌ای در سیستم‌های باند تراهرتز استفاده شود. بعلاوه، از آنجا که در طراحی فقط یک لایه گرافن تک لایه به کار برده می‌شود، ساخت و تنظیم جاذب فرامواد آسان

مراجع

- [۱] محمد جهاندار لاشکی، پژمان رضائی، محمد مهدی فخاریان "ساختار تار عنکبوتی به عنوان سطوح امپدانس بالا"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۲، شماره ۳۸، پاییز ۱۳۹۳، صفحه ۷۵-۸۲.
- [۲] زهرا موسوی راضی، پژمان رضایی و نیلوفر بهادری "آنتن میکرواستریپ جهتدار با استفاده از رولایه سطوح انتخابگر فرکانسی در محفظه تشدید فبری پرو"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۳، شماره ۴۲، پاییز ۱۳۹۴، صفحه ۱۷-۲۵.
- [۳] علیرضا شریفی و جعفر خلیل پور "افزایش بهره و پهنای باند آنتن پیچ با به کارگیری رولایه فراماده"، نشریه الکترومغناطیس کاربردی، دوره ۳، شماره ۳، تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۳۹-۴۴.
- [4] D. Schurig, J. J. Mock, B. J. Justice, S. A. Cummer, J. B. Pendry, A. F. Starr, and D. R. Smith, "Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies", *Science*, Vol. 314, No. 5801, pp. 977–980, 2006.
- [5] S. A. Cummer, B.I. Popa, D. Schurig, D. R. Smith, and J. Pendry, "Full-wave simulations of electromagnetic cloaking structures", *Physical Review E*, Vol. 74, No. 3, 2006, pp. 036621.
- [6] L. Liu, J. Chen, Z. Zhou, Z. Yi, and X. Ye, "Tunable absorption enhancement in electric split-ring resonators-shaped graphene arrays", *Materials Research Express*, Vol. 5, No. 4, 2018, pp. 045802.
- [7] Y. Zeng, X. Chen, Z. Yi, Y. Yi, and X. Xu, "Fabrication of pn heterostructure ZnO/Si moth-eye structures: antireflection, enhanced charge separation and photocatalytic properties", *Applied Surface Science*, Vol. 441, 2018, pp. 40–48.
- [8] M. L. Huang, Y. Z. Cheng, Z. Z. Cheng, H. R. Chen, X. S. Mao, and R. Z. Gong, "Design of a broadband tunable terahertz metamaterial absorber based on complementary structural grapheme", *Materials*, Vol. 11, No. 4, 2018, pp. 540.
- [9] Z. Yi, X. Li, X. Xu, X. Chen, X. Ye, and Y. Yi, "Nanostrip-induced high tenability multipolar Fano resonances in a Au ring-strip nanosystem", *Nanomaterials*, Vol. 8:0568, 2018.
- [10] A. Vakil and N. Engheta, "Transformation optics using graphene", *Science*, Vol. 332, No. 6035, 2011, pp. 1291-1294.
- [11] A. Farmani, A. Mir, and Z. Sharifpour "Broadly tunable and bidirectional terahertz grapheme plasmonic switch based on enhanced Goos-Hanchen effect" *Applied Surface Science*, Vol. 453, 2018, pp. 358–364.
- [12] H. Li, J. Niu, and G. Wang "Dual-band, polarization-insensitive metamaterial perfect absorber based on monolayer graphene in the mid-infrared range" *Results in Physics*, Vol. 13, 2019, pp. 102313.
- [13] J. Huang, G. Niu, Z. Yi, X. Chen, Z. Zhou, and X. Ye, "High sensitivity refractive index sensing with good angle and polarization tolerance using elliptical nanodisk grapheme metamaterials", *Physica Scripta*, Vol. 94, No. 8, 2019, pp. 085805.
- [14] M. L. Huang, Y. Z. Cheng, Z. Z. Cheng, H. R. Chen, X. S. Mao, and R. Z. Gong, "Based on graphene tunable dual-band terahertz metamaterial absorber with wide-angle", *Optics Communications*, Vol. 415, 2018, pp. 194–201.
- [15] W. Li and Y. Cheng, "Dual-band tunable terahertz perfect metamaterial absorber based on strontium titanate (STO) resonator structure", *Optics Communications*. Vol. 462, 2020, pp. 125265.
- [16] H. Luo and Y. Cheng, "Thermally tunable terahertz metasurface absorber based on all dielectric indium antimonide resonator structure", *Optical Materials*, Vol. 102, 2020, pp. 109801.
- [17] F. Chen, Y. Cheng, and H. Luo, "A broadband tunable terahertz metamaterial absorber based on single-layer complementary gammadion-shaped grapheme", *Materials*. Vol. 13, 2020, pp. 860.
- [18] S. K. Ghosh, V. S. Yadav, S. Das, and S. Bhattacharyya, "Tunable graphene based metasurface for polarization-independent broadband absorption in lower mid infrared (MIR) range", *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. 62, pp. 346–354, 2020.
- [19] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, "Perfect metamaterial absorber", *Physical Review Letters*, Vol. 100, 2008, pp. 207402.
- [20] S. Bhattacharyya, S. Ghosh, D. Chaurasiya, and K. V. Srivastava, "Wide-angle broadband microwave metamaterial absorber with octave bandwidth", *IET Microw Antennas Propag*. Vol. 9, 2015, pp. 1160–1166.

- [21] D. X. Yan, and J. S. Li, "Tunable all-graphene-dielectric single-band terahertz wave absorber", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 52, 2019, pp. 275102.
- [22] J. A. Mason, G. Allen, V. A. Podolskiy, and D. Wasserman, "Strong coupling of molecular and mid-infrared perfect absorber resonances", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 24, 2012, pp. 31–33.
- [23] H. Tao, N. I. Landy, C. M. Bingham, X. Zhang, R. D. Averitt, and W. J. Padilla, "A metamaterial absorber for the terahertz regime: design, fabrication and characterization", *Optics Express*, Vol. 16, 2008, pp. 7181–7188.
- [24] P. Fang, X. Shi, C. Liu, X. Zhai, H. Li, and L. Wang, "Single-and dual-band convertible terahertz absorber based on bulk Dirac semimetal", *Optics Communications*, Vol. 462, 2020, pp. 125333.
- [25] M. Zhong, X. Jiang, X. Zhu, J. Chen, S. Wu, J. Zhang, J. Zhong, K. Yang, L. Zeng, S. Huang, Y. Chen, J. Zhang, L. Liang, Y. Xin, and H. Chen, "Design and measurement of a single-dual-band tunable metamaterial absorber in the terahertz band", *Physica E*, Vol. 124, 2020, pp. 114343.
- [26] J. Wu, X. Liu, and Z. Huang, "Broadband light absorption with doped silicon for the terahertz frequency", *Optics & Laser Technology*, Vol. 119, 2019, pp. 105657.
- [27] Z. Song, M. Jiang, Y. Deng, and A. Chen, "Wide-angle absorber with tunable intensity and bandwidth realized by a terahertz phase change material", *Optics Communications*, Vol. 464, 2020, pp. 125494.
- [28] J. P. Xu, J. Y. Wang, R. C. Yang, J. P. Tian, X. W. Chen, and W. M. Zhang, "Frequency-tunable metamaterial absorber with three bands", *Optik*, Vol. 172, 2018, pp. 1057–1063.
- [29] B. Ma, S. B. Liu, B. R. Bian, X. K. Kong, H. F. Zhang, Z. W. Mao, and B. Y. Wang, "Novel three-band microwave metamaterial absorber", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, Vol. 28, 2014, pp. 1478–1486.
- [30] F. R. Hu, L. Wang, B. G. Quan, X. L. Xu, Z. Li, Z. A. Wu, and X. C. Pan, "Design of a polarization insensitive multiband terahertz metamaterial absorber", *Journal of Physics D: Applied Physics*, Vol. 46, 2013, pp. 195103.
- [31] B. X. Wang, G. Z. Wang, T. Sang, and L. L. Wang, "Six-band terahertz metamaterial absorber based on the combination of multiple-order responses of metallic patches in a dual-layer stacked resonance structure", *Scientific Reports*, Vol. 7, 2017, pp. 41373.
- [32] K. D. Xu, J. X. Li, A. X. Zhang, and Q. Chen, "Tunable multi-band terahertz absorber using a single-layer square graphene ring structure with T-shaped graphene strips", *Optics Express*, Vol. 28, 2020, pp. 11482–11492.
- [33] P. Zamzam, P. Rezaei, and S. A. Khatami, "Quad-band polarization-insensitive metamaterial perfect absorber based on bilayer graphene metasurface", *Physica E*, Vol. 128, 2021, pp. 114621.
- [34] B. X. Wang, G. Z. Wang, L. L. Wang, and X. Zhai, "Design of a five-band terahertz absorber based on three nested split-ring resonators", *IEEE Photonics Technology Letters*, Vol. 28, No. 3, 2015, pp. 307–310.
- [35] Y. J. Kim, Y. J. Yoo, K. W. Kim, J. Y. Rhee, Y. H. Kim, and Y. P. Lee, "Dual broadband metamaterial absorber", *Optics Express*, Vol. 23, 2015, pp. 3861–3868.
- [۳۶] معین نوایی و پژمان رضائی "فیلتر فرایهین باند با استفاده از روش امیدانس پله ای با بهبود افت خارج باند"، نشریه مدل سازی در مهندسی، دوره ۱۸، شماره ۶۱، تابستان ۱۳۹۹، صفحه ۱۹-۱۳.
- [37] S. K. Patel, V. Sorathiya, Z. Sbeah, S. Lavadiya, T. K. Nguyen, and V. Dhasarathan, "Graphene-based tunable infrared multi band absorber", *Optics Communications*, Vol. 474, 2020, pp. 126109.
- [38] D. Yan, M. Meng, J. Li, and X. Li "Graphene-Assisted Narrow Bandwidth Dual-Band Tunable Terahertz Metamaterial Absorber", *Frontiers in Physics*, Vol. 8, 2020.
- [39] M. Zhong, "Design and measurement of a narrow band metamaterial absorber in terahertz range", *Optical Materials*, Vol. 100, 2020, pp. 109712.
- [40] C. Liu, W. Su, Q. Liu, X. Lu, F. Wang, T. Sun, and P. K. Chu, "Symmetrical dual D-shape photonic crystal fibers for surface plasmon resonance sensing", *Optics Express*, Vol. 26, No. 7, 2018, pp. 9039–9049.
- [41] T. Aghaee and A.A. Orouji, "Reconfigurable multi-band, graphene-based THz absorber: circuit model approach", *Results in Physics*, Vol. 16, 2020, 102855.

- [42] A. S. Arezoomand, F. B. Zarrabi, S. Heydari, and N. P. Gandgi, "Independent polarization and multi-band THz absorber base on Jerusalem cross", *Optics Communications*, Vol. 352, 2015, pp. 121–126.
- [43] B. X. Wang, Y. He, P. Lou, W. Q. Huang, and F. Pi, "Penta-band terahertz light absorber using five localized resonance responses of three patterned resonators", *Results in Physics*, Vol. 16, 2020, pp. 102930.