

طراحی فرامواد گرافینی با قابلیت تنظیم خواص اپتیکی

سید سجاد توسلمند^۱، مهدیه هاشمی^{*۲}

^۱دانشگاه پیام نور مرکز شیراز، شیراز شهرک گلستان، ایران

^۲گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه فسا، فسا، ایران

چکیده

گرافن ماده‌ای دو بعدی است که به واسطه قابل کنترل بودن رسانش الکتریکی آن، می‌تواند در طراحی فرامواد تنظیم پذیر به کار گرفته شود. در این مقاله، ساختار دو فراماده شامل آرایه‌ای از حلقه‌های شکافدار (SRR) و ساختار مکمل حلقه‌ها (CSRR) بر پایه گرافن را معرفی نموده و تغییرات پذیرفتاری الکتریکی مؤثر فراماده طراحی شده را با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن، تغییر ابعاد ساختار و قطبش نور فرودی بررسی می‌کنیم. نتایج حاصل از این مقاله نشان می‌دهد تغییر ابعاد ساختار نسبت به اثر اعمال ولتاژ خارجی، باعث تغییر بیشینه پذیرفتاری در بازه فرکانسی محدودتری می‌شود. با تنظیم پتانسیل شیمیایی گرافن از 0.3 eV تا 0.45 eV ، جابجایی فرکانس تشدید پذیرفتاری مؤثر به اندازه 16 THz نیز حاصل شد. تغییر قطبش تابش الکترومغناطیسی فرودی به ساختار، نحوه توزیع بارها و جریان‌های القایی را تغییر داده و بدین ترتیب بازه فرکانسی تغییر بیشینه پذیرفتاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ساختار طراحی شده در این مقاله گامی مؤثر در جهت کنترل امواج الکترومغناطیسی در بازه فرکانسی تراهرتز می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: فرامواد، گرافن، حلقه شکافدار، توزیع جریان، گذردهی مؤثر.

مقدمه

تفکیک بالا مورد توجه بسیاری از دانشمندان قرار گرفته اند [۳-۵]. فلزات به جهت قابلیت برانگیزش پلاسمون‌های سطحی، غالباً در طراحی فرامواد مورد استفاده قرار می‌گیرند [۶]. اخیراً، گرافن به واسطه خواص یکتای آن همچون تنظیم‌پذیری ضریب گذردهی الکتریکی آن با ولتاژ و تزریق ناخالصی [۷]، رسانش [۸] و استحکام مکانیکی بالا [۹] در طراحی فرامواد مورد توجه قرار گرفته است. استفاده از گرافن به عنوان یک ماده دویعدی، گامی مؤثر در جهت ساخت فرامواد فوق نازک می‌باشد. در این مقاله نشان می‌دهیم که چگونه با تغییر ابعاد ساختار، پتانسیل شیمیایی گرافن و چرخش قطبش نور تابیده شده به دو نمونه فراماده گرافینی شامل حلقه شکافدار (SRR) و ساختار مکمل

فرامواد، ساختارهایی مصنوعی و با سلول واحدایی در ابعاد کوچکتر از طول موج نور فرودی هستند. این ساختارها به جهت توانایی آنها در کنترل فاز، دامنه و قطبش امواج فرودی بسیار مورد توجه می‌باشند. در سال ۱۹۹۹ پندری با ساخت فراموادی شامل حلقه‌های شکافدار (SRR) توانست کنترل امواج الکترومغناطیسی را در بازه طول موجی میکروویو در دست گیرد [۱]. بعدها گستره کنترل امواج الکترومغناطیسی توسط فرامواد به بازه طول موجی فرورسرخ و اپتیکی نیز کشانده شد [۲]. فرامواد به واسطه کاربرد وسیع آنها در طراحی آنتن‌ها، بیوسنسورها، نامرئی سازی، جاذب‌ها و تصویربرداری‌های با توان

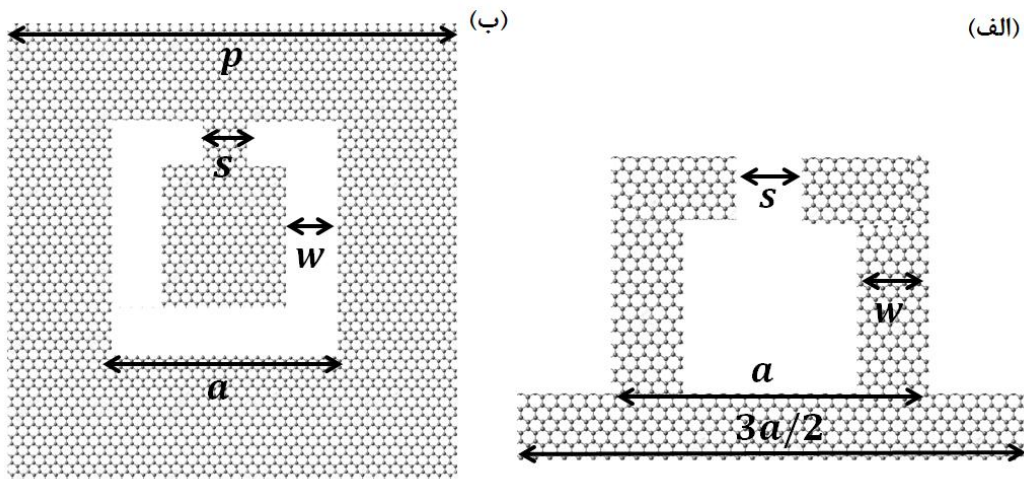
* نویسنده مسئول: mahdieh.hashemi@gmail.com

¹ Split Ring Resonator

² Complementary Split Ring Resonator

ماهیت تشدید پذیرفتاری را بررسی نموده و نحوه کنترل آن را بررسی می‌نماییم.

آن (CSRR)، می‌توان خواص اپتیکی آنها از جمله پذیرفتاری مؤثر را تنظیم نمود. در ادامه، با بررسی نحوه توزیع جریان در فرکانس‌های با پذیرفتاری مؤثر بیشینه،



شکل ۱. قسمت (الف) و (ب) به ترتیب سلول واحد یک ساختار حلقه ای شکافدار (SRR) و ساختار تکمیلی شکافدار (CSRR) از جنس گرافن را نشان می‌دهند.

ضریب گذردهی خلأ، ω فرکانس زاویه‌ای نور فرودی و ضخامت گرافن است که مقدار آن برابر با 0.34 nm است [۱۱].

شکل‌های (۱-الف) و (۱-ب) ساختار سلول واحد فراماده‌های ارائه شده در این مقاله را نشان می‌دهد. در این ساختارها مقادیر $p = 175 \text{ nm}$ ، $s = 12 \text{ nm}$ و $w = 11 \text{ nm}$ به صورت ثابت در نظر گرفته شده است. ساختار شکل (۱-الف) با طول و عرض $3a/2$ و ساختار شکل (۱-ب) با طول و عرض ثابت p در راستای x و y تکرار شده‌اند. شبیه‌سازی‌های انجام شده در این مقاله به روش المان محدود و با بسته نرم افزاری CST-Microwave Studio انجام شده است.

تنظیم پذیرفتاری الکتریکی فرامواد گرافینی با

استفاده از تغییر ابعاد

خواص گرافن و ساختار فرامواد ارائه شده

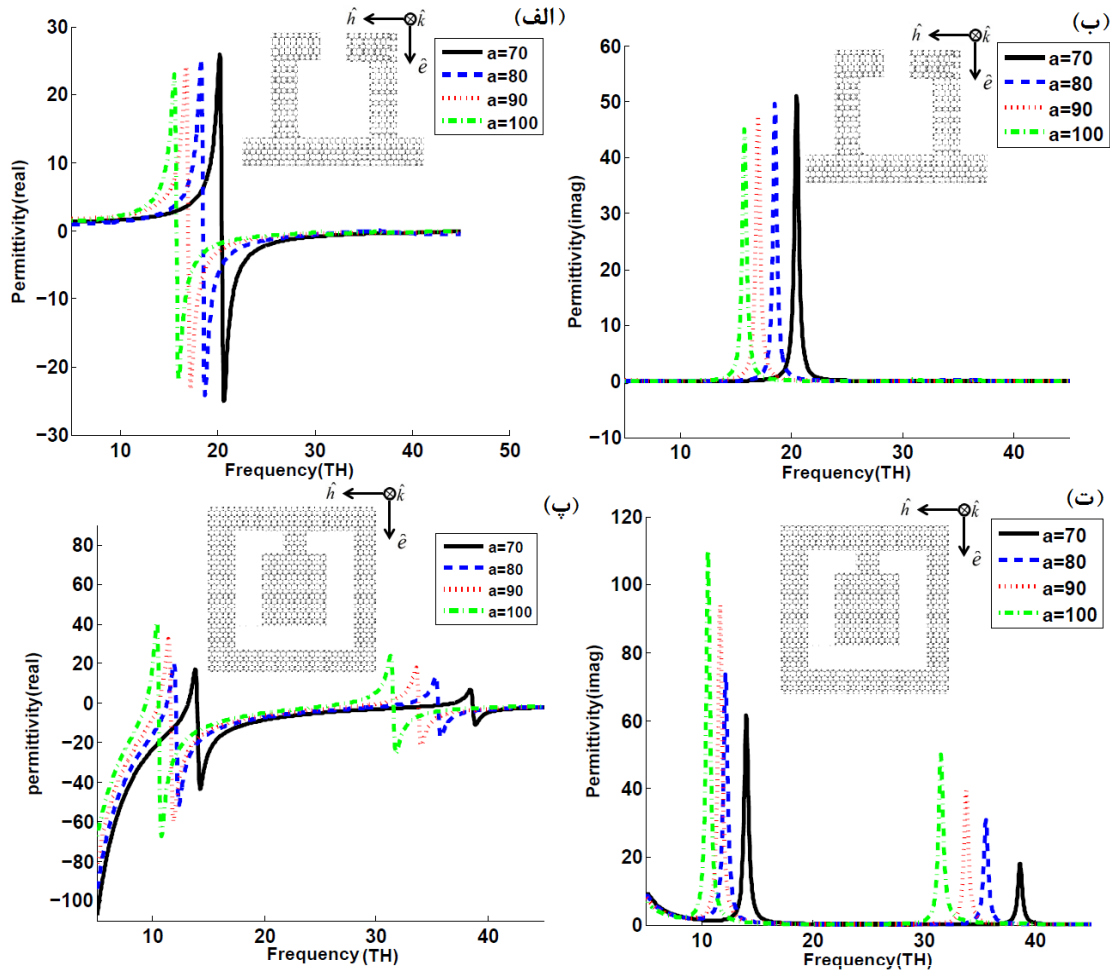
رسانش گرافن (σ) شامل دو جمله رسانش درون باندی (σ_{inter}) و رسانش بین باندی (σ_{intra}) است که با رابطه کوبو به ترتیب در جمله اول و دوم رابطه زیر بیان می‌شود [۱۰]:

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

در این رابطه، μ_c پتانسیل شیمیایی گرافن است که به ولتاژ اعمال شده به گرافن وابسته می‌باشد. Γ ، نرخ پراکندگی و T دمای گرافن است که مقدار آنها به ترتیب 0.1 eV و 300 K در نظر گرفته شده است. گذردهی گرافن به صورت تابعی از رسانندگی از رابطه $\varepsilon = 1 + i\sigma / (\varepsilon_0 \omega t_g)$ به دست می‌آید که در آن ε_0

نمودارهای (۲-ب) و (۲-ت) قسمت موهومی گذردهی الکتریکی ساختارهای SRR و CSRR، به‌ازای مقادیر مختلف $a = 70, 80, 90, 100 \text{ nm}$ می‌باشد.

یکی از عواملی که با استفاده از آن می‌توان پذیرفتاری الکتریکی فرامواد گرافینی را کنترل نمود، تغییر ابعاد سلول واحد فرامواد مورد نظر است. نمودارهای شکل (۲-الف) و (۲-پ) به ترتیب نشان‌دهنده قسمت حقیقی و



شکل ۲. (الف) و (ب) بخش حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی مؤثر ساختار SRR و (پ) و (ت) بخش حقیقی و موهومی گذردهی مؤثر ساختار تکمیلی را نشان می‌دهد. این نمودارها به‌ازای مقادیر مختلف a رسم شده است.

$$z = \pm \sqrt{\frac{(1+S_{11})^2 - S_{21}^2}{(1-S_{11})^2 - S_{21}^2}} \quad ۲$$

$$n = \frac{1}{k_0 d} [\ln(e^{-ink_0 d}) + 2m\pi - i \ln(e^{-ink_0 d})] \quad ۳$$

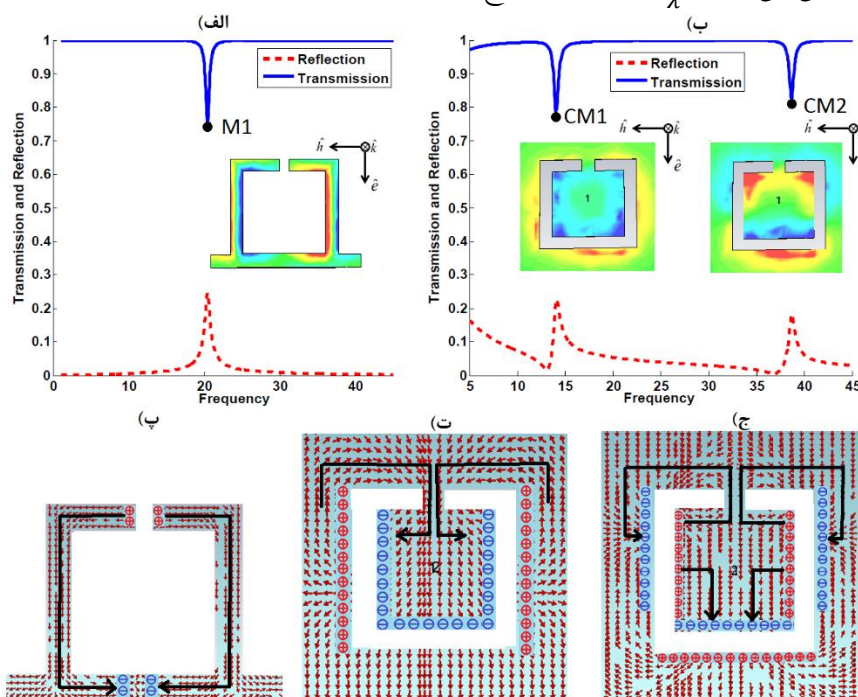
$$e^{-ink_0 d} = \frac{2S_{21}}{1 - S_{11} \frac{z-1}{z+1}} \quad ۴$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = n / z \quad ۵$$

نور فرودی عمود بر ساختار بوده و جهت میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی آن مطابق شکل ۲ می‌باشد. برای محاسبه پذیرفتاری مؤثر ساختار، از ضرایب بازتاب و عبور حاصل از شبیه‌سازی استفاده کرده و با جایگذاری در روابط ارائه شده در مراجع [۷، ۱۰ و ۱۱] پذیرفتاری مؤثر مطابق روابط زیر محاسبه شده است:

نور فرودی، z مقاومت مؤثر محیط و l ضریب شکست مؤثر محیط به ضخامت d می‌باشد.

در این روابط S_{11} و S_{21} عناصر مختلط ماتریس پراکندگی هستند که در آن $|S_{11}|^2$ و $|S_{21}|^2$ به ترتیب مقیاسی از توان انعکاسی و انتقالی می‌باشند. $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ عدد موج



شکل ۳. (الف) و (ب) به ترتیب نشان‌دهنده طیف بازتابی (خط چین قرمز) و عبوری (خط پر آبی) از ساختار SRR و CSRR. شکل‌های موجود در نمودار (الف) و (ب) و همچنین شکل‌های قسمت (پ) و (ت) و (ج) به ترتیب نشان‌دهنده توزیع میدان الکتریکی و توزیع جریان در سه تشدید M1 و CM1 و CM2 هستند.

با تغییر پارامتر l ، بیشینه پذیرفتاری الکتریکی مؤثر در فرکانس‌های متفاوتی اتفاق می‌افتد. مطابق شکل ۲ با تغییر پارامتر l از 70 nm به 100 nm فرکانس بیشینه پذیرفتاری در ساختار حلقه شکافدار SRR از 21 THz تا 17 THz و فرکانس بیشینه پذیرفتاری ایجاد شده در ساختار مکمل CSRR در دو بازه 14 THz تا 12 THz و از 39 THz تا 34 THz جابه‌جا می‌شود. شکل‌های (الف-۳) و (ب-۳) به ترتیب نمودار عبور (خط آبی رنگ توپر) و بازتاب (خط چین قرمز رنگ) از ساختار SRR و CSRR برای مقدار $a = 70\text{ nm}$ را نشان می‌دهد. با مقایسه نمودارهای مربوط به پذیرفتاری مؤثر شکل ۲ و نمودارهای مربوط به میزان عبور و بازتاب در شکل ۳، دیده می‌شود که فرکانس بیشینه پذیرفتاری با فرکانس

تشدید در عبور و بازتاب از ساختار مطابقت دارد. در شکل (الف-۳)، تشدید به وجود آمده در ساختار SRR فرکانس 21 THz را با M1 مشخص نموده‌ایم. برای ساختار CSRR در عبور و بازتاب دو تشدید دیده می‌شود که در شکل (ب-۳) با CM1 و CM2 در فرکانس‌های 12 THz و 34 THz مشخص شده‌اند. شکل (پ-۳) نشان‌دهنده نحوه توزیع جریان در ساختار SRR در نقطه تشدید M1 است. چنانکه از نحوه توزیع جریان برمی‌آید، میدان الکتریکی سبب القای بارهای مثبت و منفی در قسمت بالا و پایین حلقه شکافدار (SRR) شده و دو جریان موازی هم‌جهت در طرفین به وجود می‌آورد. نحوه توزیع جریان‌ها و بارهای مثبت و منفی القا شده سبب ایجاد یک تشدید دوقطبی خواهد شد.

$$\mu_c = \hbar v_f \sqrt{\frac{\pi \epsilon_r \epsilon_0 V}{q_e t}} \quad 6$$

در این رابطه ϵ_r و t به ترتیب گذردهی الکتریکی و ضخامت زیرلایه گرافن، V ولتاژ الکتریکی اعمال شده بر گرافن و v_f سرعت فرمی است که مقدار $10^6 m/s$ برای آن در نظر گرفته شده است [۱۲]. در شکل ۴ تأثیر اعمال ولتاژ به گرافن را بر روی پذیرفتاری مؤثر فراماده بررسی نموده‌ایم. بدین ترتیب که پارامتر l را ثابت و برابر $90nm$ در نظر گرفته و پتانسیل شیمیایی گرافن را با توجه به ولتاژ اعمال شده بر گرافن از $0.3eV$ تا $0.45eV$ تغییر داده‌ایم. مطابق شکل (۴-الف) و (۴-ب) با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن در ساختار حلقه شکافدار SRR، فرکانس بیشینه پذیرفتاری مؤثر از $17THz$ تا $21THz$ تغییر می‌کند. شکل (۴-پ) و (۴-ت) نشان می‌دهد با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن در ساختار مکمل CSRR فرکانس تشدید در دو بازه $12THz$ تا $14THz$ و $34THz$ تا $50THz$ قابل تنظیم خواهد بود. مقایسه توزیع میدان الکتریکی و بارهای القایی نشان می‌دهد با افزایش پتانسیل شیمیایی گرافن و افزایش حامل‌ها، بارهای القایی در ساختار افزایش یافته و دوقطبی و چهارقطبی‌های قویتری در ساختار ایجاد می‌شوند که مطابق شکل ۴ باعث جابجایی فرکانس بیشینه پذیرفتاری به سمت فرکانسهای بیشتر می‌شود.

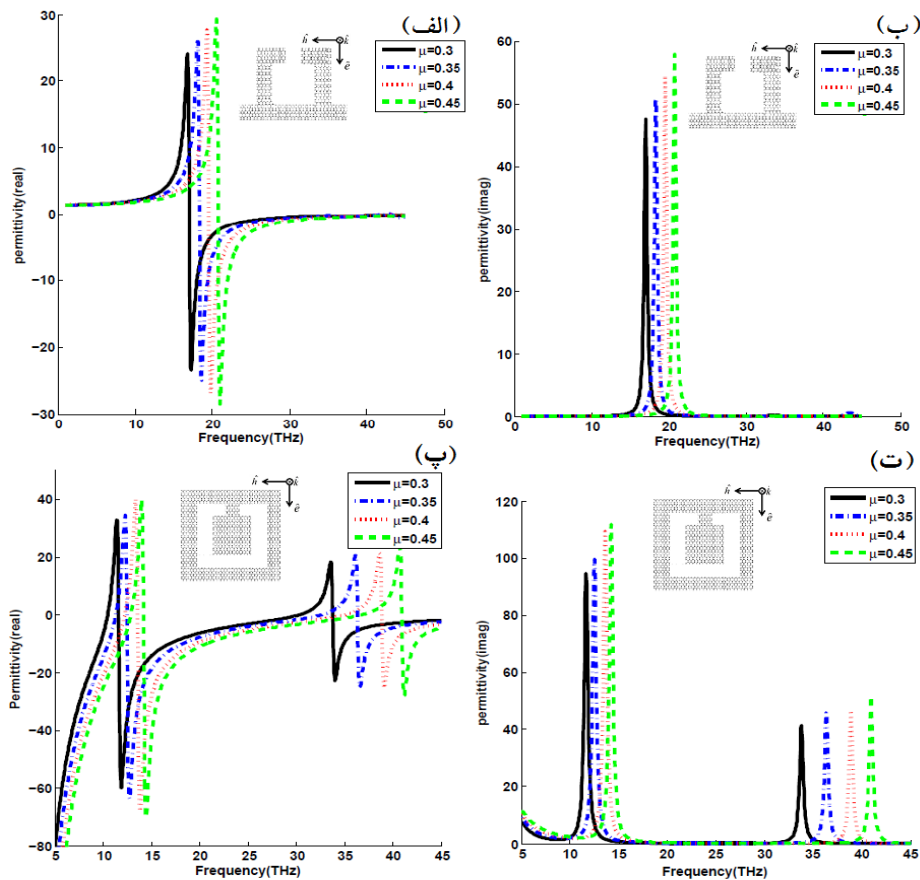
اثر تغییر قطبش بر پذیرفتاری الکتریکی ساختار مکمل CSRR

با تغییر قطبش، مطابق شکل ۵ ماهیت تشدید بوجود آمده در بازتاب و عبور نور از ساختار فرامواد تغییر می‌کند. همان‌طور که در شکل (۵-الف) و (۵-ب) دیده می‌شود، این تغییر همراه با مشاهده تنها یک تشدید در پذیرفتاری ساختار CSRR در مقایسه با دو حالت تشدید مشاهده شده در شکل‌های (۲-پ) و (۲-ت) می‌باشد.

با افزایش پارامتر a و فاصله گرفتن جریان‌ها و بارهای با علامت مخالف از یکدیگر، دوقطبی ایجاد شده تضعیف شده و در نتیجه آن، فرکانس تشدید به فرکانس‌های کمتر در نمودار پذیرفتاری شکل (۲-الف) جابه‌جا می‌شود. شکل (۳-ت) جریان القا شده در ساختار CSRR در نقطه CM1 را نشان می‌دهد. چنانچه از نحوه توزیع جریان برمی‌آید، تشدید در نقطه CM1 به دلیل ایجاد دو جریان مخالف هم در ساختار بوجود آمده که در شکل با خطوط سیاه رنگ توپیر نمایش داده شده است. دو قطبی‌های الکتریکی القایی ناشی از این نحوه توزیع جریان، به صورت تجمعی از بارهای مثبت و منفی در مجاورت یکدیگر در ساختار نشان داده شده‌است. بدین ترتیب اساس رفتار تشدید بوجود آمده در عبور، بازتاب و پذیرفتاری مؤثر، ایجاد دو قطبی در ساختار، در فرکانس تشدید است. شکل (۳-ج) توزیع جریان در فرکانس CM2 را نشان می‌دهد. با توجه به نحوه توزیع جریان که شامل چهار جریان دو به دو مختلف‌الجهت در ساختار سلول واحد است، می‌توان گفت که تشدید ایجاد شده در شکل (۳-ج) یک تشدید چهار قطبی است. با مقایسه دو تشدید به وجود آمده در ساختار CSRR در شکل‌های (۲-ب) و (۲-ت) ضعیف‌تر بودن تشدید چهار قطبی در فرکانس $34THz$ در مقایسه با تشدید دوقطبی در فرکانس $12THz$ واضح است.

تنظیم پذیرفتاری الکتریکی فرامواد گرافینی با استفاده از تغییر پتانسیل شیمیایی

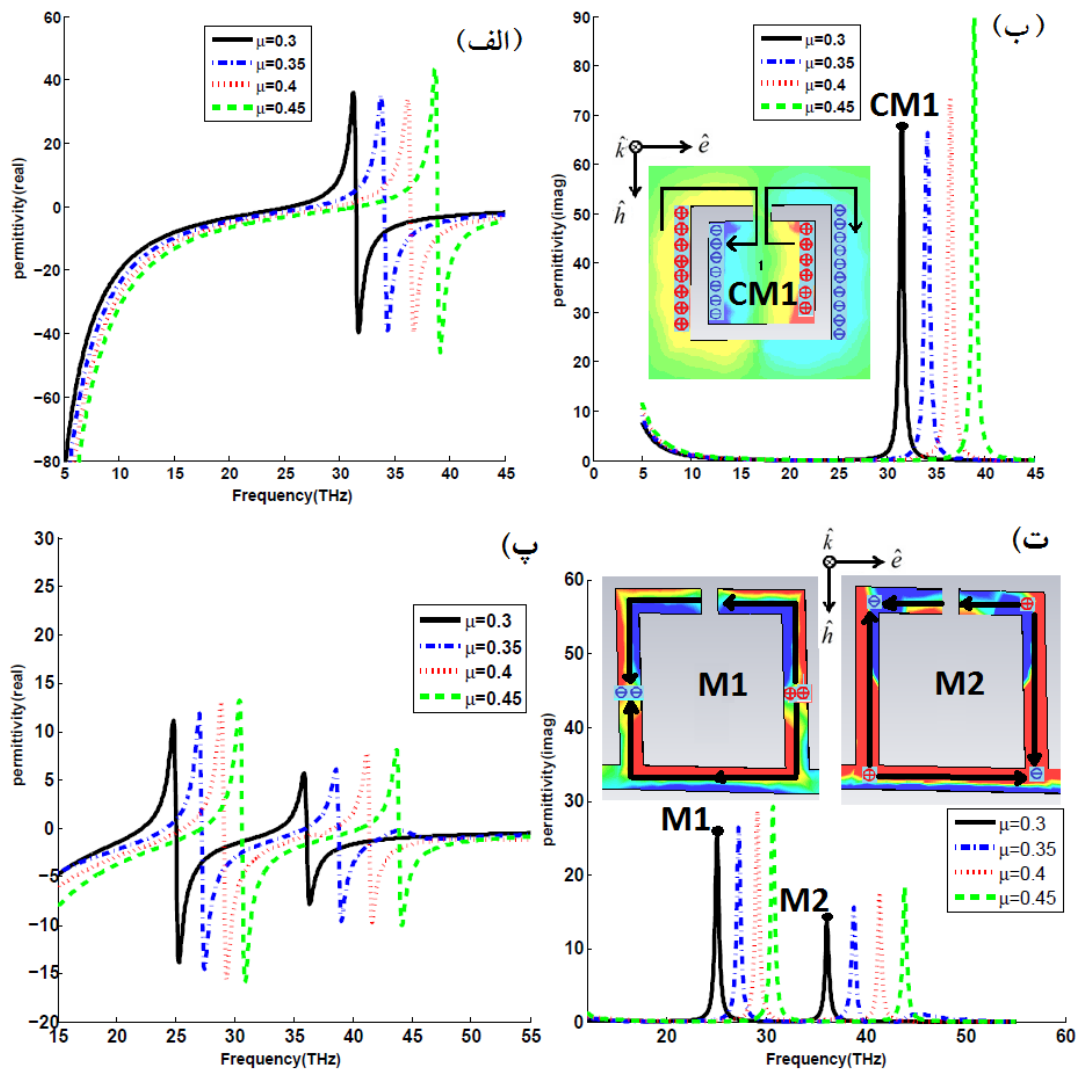
یکی از عواملی که می‌توان به وسیله آن خواص اپتیکی فرامواد گرافینی را کنترل نمود، پتانسیل شیمیایی گرافن است. در رابطه ۱ وابستگی رسانش گرافن به پتانسیل شیمیایی (μ_c) نشان داده شده است. پتانسیل شیمیایی گرافن با دو عامل افزودن ناخالصی و اعمال ولتاژ خارجی قابل تغییر است [۱۲]. پتانسیل شیمیایی گرافن به صورت تابعی از ولتاژ خارجی طبق رابطه زیر تغییر می‌کند:



شکل ۴. الف) و ب) قسمت حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی مؤثر حلقه شکافدار (SRR) تحت تابش عمودی با قطبش مشخص شده در شکل را نشان می‌دهد. قسمت پ) و ت) مقدار حقیقی و موهومی گذردهی ساختار تکمیلی می‌باشد.

می‌شوند که از دیدگاه الکتریکی، تشکیل دو خازن متوالی و یک القاگر مطابق جریان القا شده قابل تشخیص است که در اصطلاح به تشدید ایجاد شده تشدید مداری LC می‌گویند [۱۴ و ۱۳]. در این شرایط، همان‌طور که در شکل ۵ دیده می‌شود، با تغییر پتانسیل شیمیایی در ساختار CSRR از 0.3 eV تا 0.45 eV می‌توان فرکانس تشدید در پذیرفتاری الکتریکی را تنظیم نمود. با افزایش پتانسیل شیمیایی گرافن بارهای القایی در ساختار افزایش یافته و سبب تشدید مداری LC قویتری در ساختار شده که مطابق شکل ۵ باعث جابجایی فرکانس بیشینه پذیرفتاری به سمت فرکانس‌های بیشتر می‌شود.

برای ساختار SRR مطابق شکل (۵-پ) و (۵-ت) با میدان الکتریکی افقی دو تشدید در پذیرفتاری دیده می‌شود در حالی که در شکل (۲-الف) و (۲-ب) چنانکه دیده می‌شود با میدان الکتریکی عمودی تنها یک تشدید برای این ساختار دیده می‌شود. در ساختار CSRR شکل (۵-الف) و (۵-ب) فرکانس تشدید ایجاد شده در این ساختار از 34 THz تا 39 THz به‌ازای پتانسیل شیمیایی، متغیر است. نحوه توزیع بار و جریان در فرکانس تشدید به‌ازای پتانسیل شیمیایی 0.3 eV در شکل (۵-ب) نشان داده شده است. با توجه به جهت افقی میدان الکتریکی فرودی، بارهای مختلف علامه در دو سمت ساختار مطابق شکل جمع



شکل ۵. (الف) و (ب) قسمت حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی مؤثر ساختار CSRR و (پ) و (ت) قسمت حقیقی و موهومی گذردهی الکتریکی مؤثر ساختار SRR تحت تابش عمودی با میدان الکتریکی افقی است. توزیع میدان الکتریکی، بارها و جریان‌های القایی در فرکانس‌های با بیشینه پذیرفتاری در شکل‌ها آمده است.

نشان می‌دهد. برای این منظور، با مطالعه توزیع جریان و بار القا شده در ساختار، نشان دادیم بیشینه پذیرفتاری مؤثر ساختار وابسته به تحریک چندقطبی‌ها می‌باشد. نتایج حاصل از این مقاله نشان می‌دهد که با اعمال ولتاژ به ساختار و در نتیجه تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن از 0.3 eV تا 0.45 eV ، فرکانس بیشینه پذیرفتاری برای ساختار SRR از 17 THz تا 21 THz و در ساختار CSRR با دو بیشینه از 12 THz تا 14 THz

نتیجه‌گیری

در سال‌های اخیر، فرامواد، به جهت توانایی آنها در کنترل فاز، دامنه و قطبش امواج الکترومغناطیسی بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. در این مقاله ما فرامادی بر پایه گرافن در قالب دو ساختار SRR و CSRR را پیشنهاد دادیم که با تنظیم پتانسیل شیمیایی گرافن، هندسه ساختار و قطبش نور فرودی، خواص اپتیکی دلخواه را از خود

[7] L. Ju, B. Geng, J. Horng, C. Girit, M. Martin, Z. Hao, H.A. Bechtel, X. Liang, A. Zettl, Y.R. Shen, Graphene plasmonics for tunable terahertz metamaterials, *Nature Nanotechnol* 146 (2011) 630–634.

[8] K.R. Bolotin, K.J. Sikes, Z. Jiang, M. Klima, G. Fudenberg, J. Hone, P. Kim, H. Stormer, Ultrahigh electron mobility in suspended graphene *Solid State Commun, Solid State Communications* 146 (2008) 351-355.

[9] A. Roberts, D. Cormode, C. Reynolds, T. Newhouse-Illige, B.J. Leroy, A.S. Sandhu Response of graphene to femtosecond high-intensity laser irradiation, *Applied Physics Letters* 99 (2011) 051912.

[10] G.W. Hanson. Dyadic Green's functions and guided surface waves for a surface conductivity model of graphene, *Applied Physics Letters* 103 (2008) 064302.

[11] L. Zhaofeng, Koray. Aydin, Ekmel Ozbay, Determination of the effective constitutive parameters of bianisotropic metamaterials from reflection and transmission coefficients, *Physical Review E* 79 (2009) 026610.

[12] F. Chen, D. Yao, Y. Liu, Graphene-metal hybrid plasmonic switch, *Applied Physics. Express* 7 (2014) 082202.

[13] D. Schurig, J.J. Mock, B.J. Justice, S.A. Cummer, J.B. Pendry, A. F. Starr, D.R. Smith, Metamaterial electromagnetic cloak at microwave frequencies, *Science* 314 (2006) 977–980.

[14] H.T. Chen, J.F. O'Hara, A.J. Taylor, R.D. Averitt, C. Highstrete, M. Lee, W.J. Padilla. Complementary planar terahertz metamaterials, *Optics Express* 171 (2007) 1084–1095.

34THz تا 50THz جابجا می‌شود. در این مقاله نشان داده شد که تغییر ابعاد ساختار نسبت به اثر اعمال ولتاژ خارجی، باعث تغییر بیشینه پذیرفتاری در بازه فرکانسی محدودتری می‌شود. تغییر قطبش تابش الکترومغناطیسی فرودی به ساختار، نحوه توزیع بارها و جریان‌های القایی را تغییر داده و بدین ترتیب بازه فرکانسی تغییر بیشینه پذیرفتاری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. کاری که ما در این مقاله انجام داده‌ایم گامی مؤثر در جهت کنترل امواج الکترومغناطیسی در بازه فرکانسی تراهرتز می‌باشد.

منابع

[1] J.B. Pendry, A.J. Holden, D.J. Robbins, W.J. Stewart, Magnetism from conductors and enhanced nonlinear Phenomena", *RFID Virtual Journal, IEEE* 47 (1999) 2075-2084.

[2] W. Wu, E. Kim, E. Ponizovskkaya, Y. Liu, Z. Yu, N. Fang, Y.R. Shen, A.M. Bratkovy, W. Tong, C. Sun, X. Zhang, S.Y. Wang, R.S. Williams, Optical metamaterials at near and mid-IR range fabricated by nanoimprint lithography, *Applied Physics A* 87 (2007) 143-150.

[3] C. Cao, J. Zhang, X. Wen, S.L. Dodson, N.T. Dao, L.M. Wong, S. Wang, S. Li, A.T. Phan, Q. Xiong, Metamaterials-based label-free nanosensor for confirmation and affinity biosensing, *American Chemical Society Nano* 7 (2013) 7583–7591.

[4] M. Kim, J. Rho, Metamaterials and imaging, *Nano Convergence* 2 (2015) 22-38.

[5] C.M. Watts, X. Liu, and W.J. Padilla, Metamaterial electromagnetic wave absorber, *Advanced Optical Materials* 24 (2012) 98-120.

[6] J.T. Shen, Peter B. Catrysse, and Shanhui Fan, Mechanism for Designing Metallic Metamaterials with a High Index of Refraction, *Physical Review Letters* 94 (2005) 197401 .