طراحی ساختار جاذب و حسگر ضریب شکستی مبتنی بر فرامواد گرافنی در فرکانس تراهرتز

مهدی اصلی نژاد[۱] مهدی خواجوی[۲] میثم بیات[۳]

۱- استادیار- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری- تهران- ایران
M.aslinezhad@ssau.ac.ir
۲- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری- تهران- ایران
Mehdi khajaviiiiii@gmail.com
۳- دانشیار- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری- تهران- ایران
Meysam.bayat302@gmail.com

چکیده: در این مقاله جاذب و حسگر ضریب‌شکستی مبتنی بر پایه فرامواد گرافنی در محدوده تراهرتز ارائه گردیده است. در بسیاری از مطالعات وابستگی حسگر به زاویه تابش و نوع قطبش مورد بررسی قرار نگرفته است و معمولا از ساختارهای پیچیده‌ای استفاده شده است که علت این پیچیدگی عدم استفاده از یک روش سیستماتیک می باشد و خواننده از دلایل هندسه ساختار در باند فرکانسی مورد نظر قانع نمی‌گردد. در این مقاله از تئوری خط انتقال پیشرفته جهت بررسی ساختار هندسی و کارایی حسگرهای تراهرتز استفاده گردیده است. حسگر طراحی شده دارای آرایش متناوب از دیسک‌های گرافنی بر روی یک ماده دی‌الکتریک و یک صفحه یکپارچه طلا در طرف دیگر آن می‌باشد که در مقایسه با مراجع دیگر دارای دقت بالایی در انتخاب پارامترها می‌باشد و هندسه ساختار آن بدون استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی محاسبه گردیده است. مقادیر بیشینه معیار شایستگی (FOM) (1/RIU) 24.5، فاکتور کیفیت (Q-Factor) 80 و حساسیت $1.57\ ^{THz}/_{RIU}$ بدست آمده است که در مقایسه با کارهای پیشین به طور محسوسی بهبود داشته است. همچنین سادگی ساختار، کاهش زمان محاسبات و حافظه، حساسیت بالاتر و پایداری بهتر از مزایای این طراحی نسبت به روش‌های پیشین می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: جاذب و حسگر ضریب شکستی، فرامواد، گرافن، آرایش متناوب

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.61186/jiaeee.21.3.17

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۰۴
تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۵
تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۱۱

نام نویسنده‌ی مسئول: مهدی اصلی‌نژاد
نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران- تهران- دانشگاه علوم و فنون هوایی شهید ستاری – دانشکده مهندسی برق

۱- مقدمه

در دهه گذشته تلاش‌های زیادی در زمینه‌های مختلفی به منظور توسعه تکنولوژی ساخت حسگرهای نوری انجام شده است. تکنولوژی‌های ساخت در ابعاد میکرو و نانو و مدارات مجتمع، تولید حسگرها را به سمت طراحی و ساخت ادوات کوچک‌تر، سریع‌تر و با توان بالاتر سوق داده است. در هر طرحی برای حسگرها، هدف نهایی دستیابی به مکانیزمی ساده، قابل اطمینان و با حساسیت بالا است که منجر به محصولی کم‌هزینه و قابل حمل نیز گردد. روش‌های رایج امروزی در طراحی حسگرها نیز بر اساس فلورسانس و رزونانس پلاسمون‌های سطحی است[۱]. ولی همچنان این روش‌ها با محدودیت‌های زیادی مواجه است. به عنوان مثال راندمان این روش پایین است و برحسب نوع مولکول مورد تجزیه، سلول حسگر فلورسانس بایستی عوض شود. روش مبتنی بر رزونانس پلاسمون‌های سطحی، بر بسیاری از مشکلات فائق آمده و کاربردهای شگرفی در زمینه‌های تشخیص سلامت غذایی، تشخیص‌های مولکولی، ژنی و دارویی دارد.

علی‌رغم پیشرفت‌های زیادی که در سال‌های اخیر در زمینه آشکارسازی بر اساس روش‌های نوری انجام شده است، حسگرهایی که در ناحیه IR کار می‌کنند تقریباً نایاب هستند. اخیراً روش‌های مبتنی بر تکنولوژی تراهرتز در زمینه آشکارسازی مواد بیولوژیکی با مقادیر بسیار کم مورد توجه قرار گرفته است[۲]. سیستم‌های طیف‌سنج تراهرتز، تشعشع تراهرتز را برای استخراج اطلاعات طیف مولکولی به کار برده‌اند که در سایر طیف‌های فرکانسی امکان‌پذیر نیست چرا که مدهای چرخشی، ارتعاشی و انتقالی مولکول‌ها در محدوده تراهرتز تحریک می‌گردد. برخلاف سایر تکنیک‌های طیف‌سنجی، ابزارهای تراهرتز میدان الکتریکی لحظه‌ای را اندازه‌گیری می‌کند که می‌تواند با کمک تبدیل فوریه فاز و دامنه پالس تراهرتز را بدست آورده و با این نوع سنسورها نیز می‌توان هم ضریب شکست و هم ضریب جذب را به دست آورد[۳]. حسگرهای تراهرتز نقش کلیدی در کاربردهای پزشکی در تشخیص مواد بیولوژیکی و شیمیایی، نظیر آشکارسازی پروتئین یا قند خون انسان با استفاده از تغییرات ضریب شکست دارند[۴].

به طور کلی می‌توان گفت در حسگرهای تراهرتز بر اساس فراسطوح (متاسرفیس‌ها) عموما از تغییر فرکانس تشدید برای تشخیص نوع یک ماده استفاده می‌شود. این حسگرها براساس میزان جذب در فرکانس‌های تشدید در یک محدوده باند فرکانسی خاص عمل می‌نمایند به طوری که در یک فرکانس تشدید هر چه میزان جذب، حساسیت و فاکتور کیفیت (Q-factor) و معیار شایستگی (FOM) افزایش یابد نشان دهنده دقت بالای حسگر مورد نظر می‌باشد. ضریب حساسیت برابر $s = \frac{\Delta f}{\Delta n}$ که Δf شیفت فرکانسی ناشی از تغییر ضریب شکست محیط تست از n_1 به n_2 می‌باشد و مقدار ضریب کیفیت برابر $Q(f) = \frac{f_0}{\Delta f}$، که Δf و f_0 به ترتیب پهنای باند در نصف توان ماکزیمم و فرکانس مرکزی می‌باشند، همچنین معیار شایستگی برابر $FOM = S/FWHM$ که FWHM پهنای باند ضریب جذب می‌باشد.

۲- روش معرفی شده

در این بخش یک حسگر ضریب شکستی که با آرایش متناوب از دیسک‌های گرافنی بر روی یک ماده دی‌الکتریک و یک صفحه یکپارچه از جنس طلا که در طرف دیگر آن قرار دارد ارائه خواهد شد. این طراحی در مقایسه با کارهای اخیر دارای یک دقت فراگیر و جامع در انتخاب پارامترها می‌باشد که ابعاد آن بدون استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی محاسبه گردیده است.

مواد هدفی که قصد شناسایی آن‌ها را داریم در بالای ساختار سنسوری قرار می‌گیرند و با تغییر جنس ماده، فرکانس تشدید نیز تغییر می‌کند و با مقایسه شیفت فرکانس‌های تشدید با جدولی که از قبل فراهم شده است مواد به صورت دقیق شناسایی و تشخیص داده می‌شوند. از ویژگی‌های منحصر به فرد این ساختار انتخاب فرکانس تشدید دلخواه می‌باشد. کارایی این حسگر از طریق تئوری خط انتقال، قابل پیش‌بینی می‌باشد[۵-۷]. همچنین ساختار طراحی شده دارای پیک جذب تک-فرکانس و جذب بالای ۹۹/۵ درصد بوده و به نوع قطبش و زاویه تابش غیر حساس می‌باشد. در واقع در این مقاله ۲ جاذب باند باریک با کاربرد حسگری در فرکانس‌های مرکزی ۳ و ۶ تراهرتز طراحی شده است که با دو روش مجزا از هم جدا شده‌اند.

۲-۱- ساختار و مدل خط انتقال حسگر طراحی شده

شکل (۱) الف هندسه ساختار جاذب فراموادی تراهرتزی را نشان می‌دهد که سلول واحد آن از یک آرایشی از دیسک‌های گرافنی ($PAGD_s$) که به وسیله یک دی‌الکتریک از یک لایه طلا جدا شده است. ضریب هدایت طلا برابر $\sigma = 4.56 \times 10^7\ {}^{S}/_{m}$ می‌باشد. ضخامت لایه پایینی طلا طوری طراحی شده است که از عمق پوستی امواج تراهرتز بیشتر باشد و این ضخامت ۵۰۰ نانومتر در نظر گرفته شده است در ساختارهای حسگری انتخاب لایه دی‌الکتریک بسیار مهم می‌باشد، زیرا این لایه با لایه بالایی اثر متقابل داشته و سبب تغییرات در کارایی حسگر می‌شود. در این طراحی ما از یک کوپلیمر بی‌نظم به نام Cyclic Olefin Copolymer استفاده کرده‌ایم که دارای انعطاف حرارتی بالایی می‌باشد و دارای ویژگی الکتریکی جهت کاربردهای الکترونیکی پیشرفته بوده و دارای ساختار ساده می‌باشد و در برابر بسیاری از اسیدها و حلال‌ها مقاوم است و دارای ضریب شکست ۱/۵۳ می‌باشد ($n_p = 1.53$).

شعاع دیسک گرافن برابر a و پریود ساختار برابر L می‌باشد. در شکل ۱ (ب) حسگر ضریب شکست با ماده نمونه تحت تست (Analyte) که به صورت جذب سطحی در بالای ساختار قرار دارد نشان داده شده است. هر تغییری در مواد نمونه تحت آزمایش باعث تغییر در فرکانس تشدید ساختار خواهد شد. لایه گرافن به صورت عددی از طریق

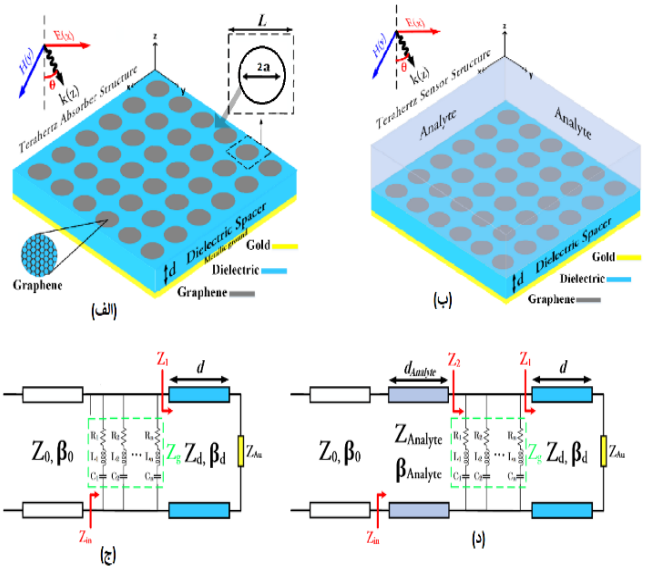
ضخامت $\Delta = 1\ nm$ مدل می‌شود و گذردهی الکتریکی آن به صورت رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\varepsilon_{GR} = \varepsilon_0 - \frac{j\sigma_{GR}}{\omega\Delta} \quad (۱)$$

که σ_{GR} ضریب هدایت سطحی گرافن بوده و از طریق فرمول کوبو (Kubo) بدست می‌آید[۸]. ضریب هدایتی سطحی گرافن شامل دو بخش داخل باند و بین دو باند می‌باشد و از آنجاییکه رابطه $\omega_0 \ll 2\mu_c$ در محدوده تراهرتز برقرار است گذر بین‌باندی الکترون‌ها بسیار ناچیز بوده و گذر داخل باند به تنهایی جهت ضریب هدایت الکتریکی گرافن در نظر گرفته می‌شود.

$$\sigma_{GR}(\omega,\mu_c,\tau,T) = -j\frac{e^2 k_B T}{\pi\hbar(\omega - j\tau^{-1})} \times \left(\frac{\mu_c}{k_B T} + 2ln\left[exp\left(-\frac{\mu_c}{k_B T}\right)\right] + 1\right) \quad (۲)$$

e بار الکترون، k_B ثابت بولتزمن، T=300K، ثابت پلانک نرمالیزه شده، τ زمان استراحت و μ_c پتانسیل شیمیایی می‌باشد. لازم به ذکر است پریود الگوی گرافن نمی‌تواند بزرگتر از قطر باشد، یعنی $\frac{2a}{L} < 1$.



شکل (۱): طرح ارائه شده برای (الف) جاذب (ب) حسگر ضریب شکست (ج) مدل خط انتقال جاذب (د) مدل خط انتقال حسگر ضریب شکست

جهت دستیابی به مدل مداری دقیق برای این ساختار روش خط انتقال پیشرفته به کار گرفته شده است. در شکل۱ (الف) از آنجایی که ضخامت صفحه فلزی در پایین ساختار در مقایسه با طول موج امواج تراهرتز ضخیم‌تر است با یک تقریب مناسب و دقیق می‌توان آن را اتصال کوتاه در نظر گرفت ($Z_{Au} = 0$)[۵]. همچنین از آنجایی‌که ضخامت مطلوب مورد نظر جهت بدست آوردن جذب تقریبی ۱ میکرومتر می‌باشد امواج تراهرتز قادر به نفوذ به داخل آن نمی‌باشند و انتقال در این ناحیه صفر می‌شود.

خصوصیات لایه میانی که لایه دی‌الکتریک در آن قرار دارد همانند یک خط انتقال ایده‌آل بوده و اندوکتانس و ظرفیت خازنی آن به ضخامت لایه بستگی دارد. در لایه بالایی با توجه به اینکه ضخامت گرافن نسبت به امواج تراهرتز بسیار کوچک می‌باشد می‌توان آن را به صورت یک بار نقطه‌ای در نظر گرفت[۹]. واضح است که امپدانس دیسک‌های گرافن (Z_g) شامل یک تعداد مدار R-L-C بوده که با هم موازی می‌باشند. نمای کلی از مدل خط انتقال ساختار جاذب و حسگر تراهرتز در شکل ۱ (ج) و ۱ (د) نشان داده شده است. همچنین در شکل۱ (ج) و ۱ (د) مقدار Z_g برای هر دو مود نشان داده شده است که این حالات مودهای تشدید Fabry-Perot پلاسمون‌های سطحی گرافن هستند که در یک حلقه بینهایت از دیسک‌های گرافن به دام افتاده‌اند[۱۰]. در این شکل Z_0 و β_0 مربوط به مدل خط انتقال فضای آزاد، Z_d و β_d مربوط به مدل خط انتقال لایه دی‌الکتریک و $Z_{Analyte}$ و $\beta_{Analyte}$ مربوط به مدل خط انتقال ماده تحت آزمایش برای شناسایی یا Analyte می‌باشند[۲و۶].

$$Z_g = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1} + j\omega L_1 \quad (۳)$$

که R_1 ، L_1 و C_1 به صورت زیر محاسبه می‌گردند:

$$R_1 = \frac{K_1 L^2}{\pi {S_1}^2} \times \frac{\hbar^2}{e^3 \mu_c \tau} \quad (۴)$$

$$L_1 = \frac{K_1 L^2}{\pi {S_1}^2} \times \frac{\hbar^2}{e^3 \mu_c} \quad (۵)$$

$$C_1 = \frac{\pi^2 {S_1}^2}{L^2 K_1} \times \frac{\varepsilon_{eff}}{q_{11}} \quad (۶)$$

که ε_{eff} ثابت گذردهی الکتریکی متوسط مواد دی‌الکتریکی است که در اطراف گرافن قرار دارند. q_{11} جریان سطحی بر روی دیسک‌های گرافن است که مقدار آن به ازای $\frac{2a}{L}$ های مختلف در جدول (۱) آمده است. همچنین $S_1 = 0.6087a$ و $K_1 = 1.2937$ می‌باشند.

جدول(۱): مقادیر ویژه $q_{11}a$ به ازای $\frac{2a}{L}$های مختلف

$\frac{2a}{L}$	0.1	0.5	0.9
$q_{11}a$	0.539	0.527	0.417

جهت دستیابی به مدل مداری تمام عناصر مدار معادل می‌بایست محاسبه گردند. از آنجایی‌که پاسخ‌های الکترومغناطیسی به جهت تقارن ساختار مورد نظر برای هر دو قطبش TE و TM یکسان است، روابط امپدانس معادل برای بخش‌های مختلف صرفا برای تابش‌های عمودی و مایل به صورت زیر می‌باشد.

$$Z_1 = Z_d \frac{Z_{Au} + jZ_d.tan(\beta_{d,z}.d)}{Z_d + jZ_{Au}.tan(\beta_{d,z}.d)} \quad (۷)$$

$$Z_2 = \frac{Z_1.Z_g}{Z_1 + Z_g} \quad (۸)$$

$$Z_{in} = Z_{Analyte} \frac{Z_2 + jZ_{Analyte}.tan(\beta_{Analyte,z}.d_{Analyte})}{Z_{Analyte} + jZ_2.tan(\beta_{Analyte,z}.d_{Analyte})} \quad (۹)$$

همچنین امپدانس لایه میانی در قطبش TM به صورت $Z_d = \left(\frac{Z_0}{n_p}\right).\cos(\theta)$ و برای قطبش TE برابر $Z_d = \left(\frac{Z_0}{n_p}\right)/\cos(\theta)$

می‌باشد، که $Z_0 = 120\pi$ و $\beta_{d,z} = \beta_d cos(\theta)$ ثابت انتشار امواج الکترومغناطیسی تراهرتز در مواد دی‌الکتریک در راستای z بوده و $\beta_d = (\omega/c).n_p$ می‌باشد، همچنین c سرعت نور در فضای آزاد می‌باشد. برای قطبش TM، $Z_{Analyte} = \left(Z_0/n_{Analyte}\right).cos(\theta)$ و برای قطبش TE مقدار آن برابر $Z_{Analyte} = \left(Z_0/n_{Analyte}\right)/cos(\theta)$ نیز می‌باشد.

همانند $\beta_{d,z}$، $\beta_{Analyte,z}$ ثابت انتشار امواج باند تراهرتز در مواد Analyte در راستای z و $\beta_{Analyte} = (\omega/c).n_{Analyte}$ و $\beta_{Analyte,z} = \beta_{Analyte} cos(\theta)$ می‌باشند.

با استفاده از روابط بالا امپدانس ورودی ساختار(Z_{in}) به سهولت قابل محاسبه و دستیابی می‌باشد.

۲-۲- مدل مداری بر اساس طرح جاذب و شیوه طراحی

به علت حضور صفحه فلزی یکپارچه از جنس طلا در پایین ساختار انتقال موج تابشی یا جذب می‌شود و یا انعکاس پیدا می‌کند و طیف جذب نیز از طریق رابطه $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ بدست می‌آید که $R(\omega) = |S_{11}|^2$ و در نتیجه برای دستیابی به حداکثر جذب ($A(\omega) = 1$) می‌بایست مقدار $R(\omega)$ را نیز به صفر برسانیم. با بررسی این ساختار از طریق تئوری خط انتقال جهت بدست آوردن یک جاذب خوب امپدانس ورودی ساختار باید با امپدانس فضای آزاد تطبیق یابد، یعنی ($Z_{in} = Z_0$)[۱۱-۱۳].

طبق شکل۱ (ج) و (د) و با در نظر گرفتن $\beta_{d,z}.d = 90^\circ$ مقدار $d = \frac{c}{4n_p f_0}$ بدست می‌آید (تابش نرمال). واضح است که Z_1 بینهایت می‌باشد، بنابراین رابطه امپدانس ورودی برای تابش نرمال به صورت $Z_{in} = Z_g \parallel Z_1$ خواهد شد و در نتیجه $Z_{in} = Z_g \parallel Z_1$. در این روش یک سری مدار R-L-C وجود دارد که باید با فضای آزاد تطبیق امپدانس داشته باشند ($Z_g = Z_0$) بنابراین:

$$R_1 = Z_0 \quad , \quad L_1 = \frac{1}{C_1 {\omega_0}^2} \qquad (۱۰)$$

برای دستیابی به شرایط مطلوب مورد نظر نیاز به جاذب در باند تراهرتز داریم ولی هیچ اطلاعاتی درخصوص پهنای باند در اختیار نداریم. برای دستیابی به یک پاسخ مناسب باند باریک و رسیدن به شرایط لازم و ضروری، تطبیق امپدانس فقط در فرکانس‌های تشدید و نه در دیگر فرکانس‌ها حیاتی است، در نتیجه شرایط زیر را در نظر گرفتیم:

$$\frac{d}{df}\left(Im(Z_{in})\right)|f \neq f_0 = 2\pi L_1 + \frac{1}{2\pi f^2 C_1} \qquad (۱۱)$$

طبق رابطه بالا و با در نظر گرفتن $L_1 = \frac{1}{C_1 {\omega_0}^2}$ جهت رسیدن به جاذب باند باریک، مقادیر بالای مولفه‌های سلفی و مقادیر پایین مولفه‌های خازنی در ساختار فوق مورد نیاز است. پس ابتدا باید مقادیر R_1 ، L_1 ، C_1 و d را بدست بیاوریم که شامل مراحل زیر است:

- محاسبه $d = \frac{c}{4n_p f_0}$ که f_0 فرکانس مرکزی جاذب می‌باشد.
- تنظیم $R_1 = 120\pi\ \Omega$
- محاسبه $L_1 = R_1\tau$ از طریق رابطه (۴)
- بدست آوردن مقدار C_1 از طریق رابطه $C_1 = \frac{1}{L_1 {\omega_0}^2}$

پس از محاسبه مقادیر بالا نوبت به بدست آوردن مقدار عملی چهار پارامتر L ، a ، τ و μ_c می‌رسد که پارامترهای هندسی ساختار و گرافن می‌باشند که در این بخش به انجام این کار نیز خواهیم پرداخت. البته موضوعی که باید مورد توجه قرار گیرد محدودیت‌هایی است که در مقادیر پیشنهادی این پارامترها وجود دارد که عبارتند از:

- نسبت $\frac{2a}{L}$ می‌بایست کمتر از ۱ باشد
- اندازه ساختار بایستی ضریبی از طول موج باشد تا مدل مداری را تضمین نماید
- زمان استراحت (τ) و انرژی فرمی یا پتانسیل شیمیایی گرافن (E_F یا μ_c) باید به ترتیب در بازه‌های $\tau = 0.01 - 6\ ps$ و $\mu_c = 0 - 1\ ev$ انتخاب گردد [۱۳-۱۶].

زمان استراحت از طریق دستکاری در انرژی فرمی با روش دوپینگ الکتریکی و شیمیایی تنظیم می‌گردد که رابطه $\tau = {\mu E_F}/{eV_f^2}$ وابستگی τ به $\mu_c(E_F)$ را نشان می‌دهد. $V_F = 10^6\ {m}/{s}$ سرعت فرمی گرافن می‌باشد و μ پویایی الکترون‌های گرافن بوده که بر روی یک زیرلایه از مقدار $0.1\frac{m^2}{V_s}$ تا $6\frac{m^2}{V_s}$ متغیر می‌باشد که بستگی به روش ساخت دارد و تحت تاثیر مواد زیرلایه می‌باشد [۱۷و۱۸].

در ادامه به شرح مقدار مولفه‌های مقاومتی، سلفی و خازنی در رنج‌های عملی برای جاذب تراهرتز می‌پردازیم.

در مرحله اول مقدار $\frac{2a}{L}$ را به صورت اختیاری انتخاب می‌کنیم ($\frac{2a}{L}$ را fill factor یا FF می‌گویند). مقدار بالای FF سبب افزایش ماهیت خازنی در دیسک‌های گرافن می‌گردد و برعکس با کاهش مقدار FF ماهیت خازنی در دیسک‌های گرافن کمتر خواهد شد. البته با فرض بر اینکه پاسخ جذب در جاذب‌های باند باریک نسبت به باند پهن میل دارد به سمت ظرفیت خازنی کمتر حرکت کند یک فرض مناسب و منطقی باشد ($\frac{2a}{L} < 0.35$). با در نظر گرفتن این فرض و با توجه به رابطه (۶) مقدار پریود ساختار (L) به صورت رابطه زیر مشخص می گردد.

$$L = \sqrt{\frac{\pi^2 {S_1}^2 \varepsilon_{eff}}{C_1 K_1 q_{11}}} \qquad (۱۲)$$

سپس شعاع دیسک (a) با استفاده از رابطه $a = L \times {FF}/{2}$ بدست می آید که FF مقدار fill factor می‌باشد. همچنین با توجه به روابط (۶) پتانسیل شیمیایی گرافن از رابطه (۱۳) بدست خواهد آمد:

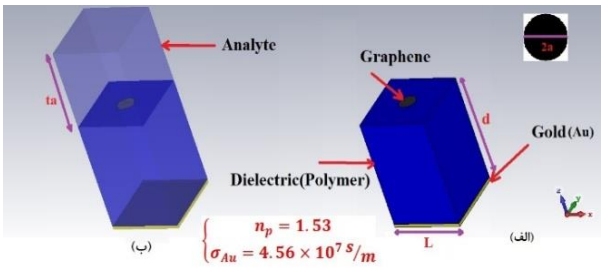
$$\mu_c = \frac{K_1 L^2}{\pi {S_1}^2} \cdot \frac{\hbar^2}{e^3 L_1} \qquad (۱۳)$$

بنابراین همه پارامترهای مورد نیاز محاسبه شده و مقدار مقاومت نیز طبق بخش قبلی با امپدانس فضای آزاد برابر می‌باشد. طبق مواردی که

تاکنون توضیح داده شد ۲ جاذب باند باریک که پارامترهای آن در جدول (۲) آمده است طراحی کرده‌ایم.

جدول(۲): پارامترهای محاسبه شده برای جاذب های ۱ و ۲

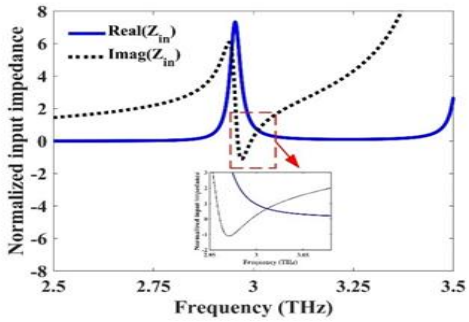
parameters	L (μm)	a (μm)	d (μm)	μ_c (ev)	τ (ps)	f_0 (THz)	BW/f_0 %
Absorber1	10.87	1.2164	16.34	0.113	4.5	3.03	0.79
Absorber2	5.4350	0.5346	8.1667	0.183	4.5	6.03	0.44



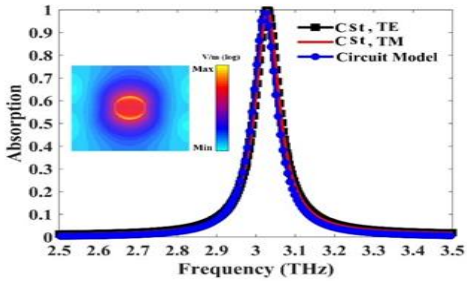
شکل(۲): ساختار و پارامترهای هندسی سلول واحد (الف) جاذب(ب) سنسور

۳- نتایج طراحی

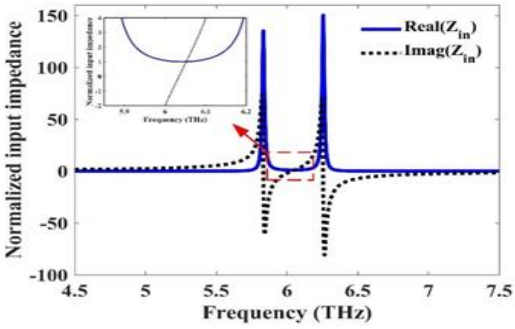
امپدانس ورودی نرمالیزه شده در دو حالت حقیقی و موهومی در دو فرکانس ۳ و ۶ تراهرتز در شکل ۳ (الف) و ۳ (ج) رسم شده است. در این شکل نشان داده شده است که امپدانس ساختار در فرکانس ۳ و ۶ تراهرتز با امپدانس فضای آزاد کاملا تطبیق یافته است. همچنین پاسخ الکترومغناطیسی ساختار طراحی شده در نرم افزار CST در مود TE و TM و مدل مداری در دو فرکانس ۳ و ۶ تراهرتز در شکل‌های ۳ تا ۵ نشان داده شده است. شکل۳ (ب) و ۳ (د) توزیع میدان الکتریکی را نیز نشان می‌دهند.



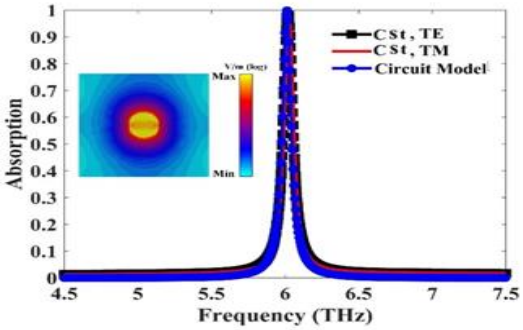
الف



ب

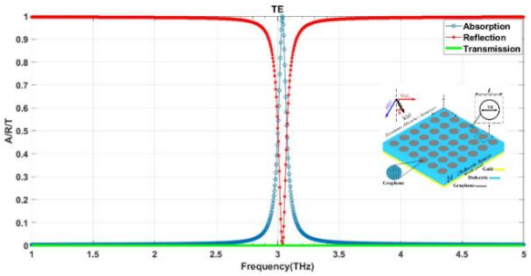


ج

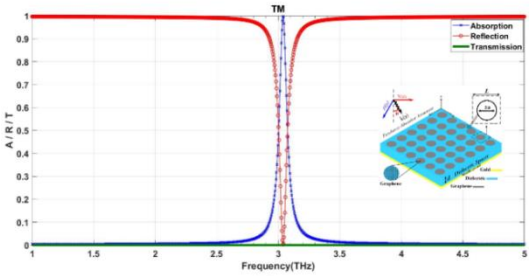


د

شکل (۳): امپدانس ورودی نرمالیزه و طیف جذب در (الف و ج) $f_0 = 3\ THz$ و (ج و د) $f_0 = 6\ THz$

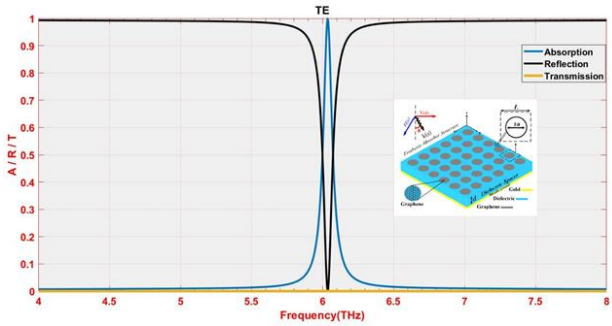


(الف)

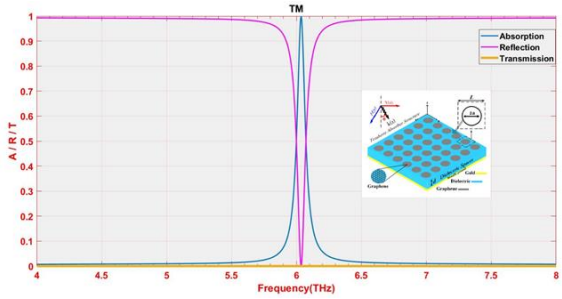


(ب)

شکل (۴): منحنی جذب، انعکاس و انتقال در $f_0 = 3$ THz (الف) TE (ب) TM



الف

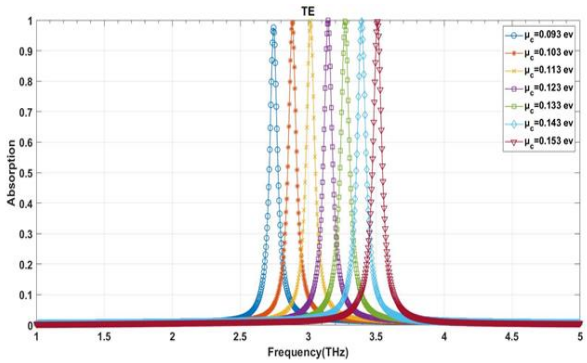


ب

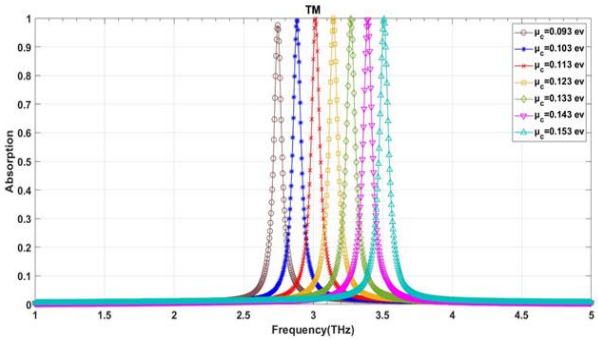
شکل(۵): منحنی جذب، انعکاس، انتقال در $f_0 = 6$ THz (الف) TE (ب) TM

همانطور که در شکل‌های (۴) و (۵) مشاهده می‌شود در فرکانس‌های مورد نظر میزان جذب بالای ۹۹ درصد رسیده و میزان انعکاس و انتقال نزدیک به صفر می‌باشد.

در شکل‌های (۶) و (۷) منحنی فرکانس‌های تشدید جاذب‌ها در فرکانس‌های مرکزی ۳ و ۶ تراهرتز به ازای پتانسیل‌های شیمیایی مختلف در دو قطبش TE و TM رسم گردیده است. همانطور که مشخص است این فرکانس‌ها با تغییرات پتانسیل شیمیایی قابل تنظیم می‌باشند. مطابق با شکل ۶ در جاذب ۱ $(f_0 = 3THz)$ با افزایش مقدار پتانسیل شیمیایی از ۰/۰۹۳ تا ۰/۱۵۳ موقعیت فرکانس تشدید از ۲/۷ تا ۳/۵ تراهرتز جابجا می‌شود. در شکل ۷ نیز همین اتفاق برای جاذب ۲ افتاده است و با تغییر μ_c از ۰/۱۶۳ تا ۰/۳۲۳ فرکانس تشدید از ۵/۶ الی ۷/۸ شیفت پیدا نموده است. این نتایج نشان می‌دهند که مقدار پتانسیل شیمیایی عاملی تعیین کننده در فرکانس تشدید می‌باشد. نکته دیگر این است که پاسخ‌ها در هر دو قطبش TE و TM برای هر دو جاذب یکسان می‌باشد.

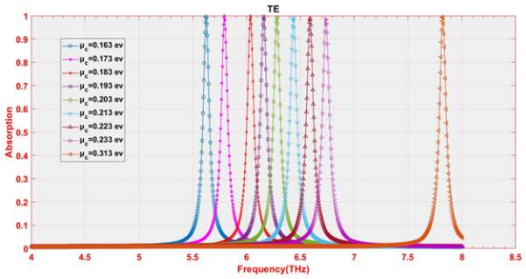


الف

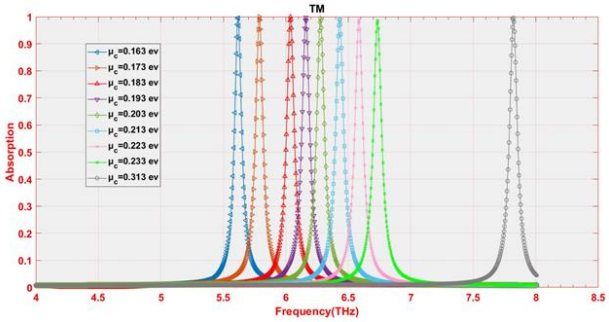


ب

شکل (۶): قابلیت تنظیم فرکانس تشدید با تغییر در پتانسیل شیمیایی گرافن در فرکانس مرکزی ۳ تراهرتز (الف) TE (ب) TM



الف

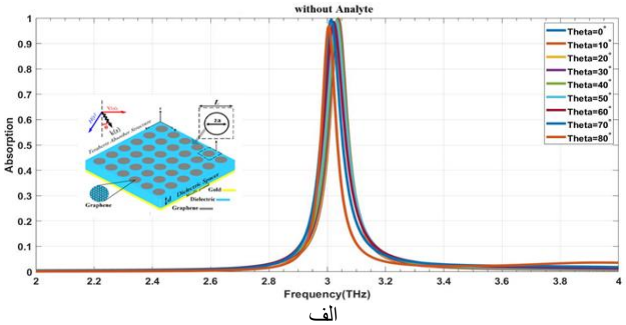


ب

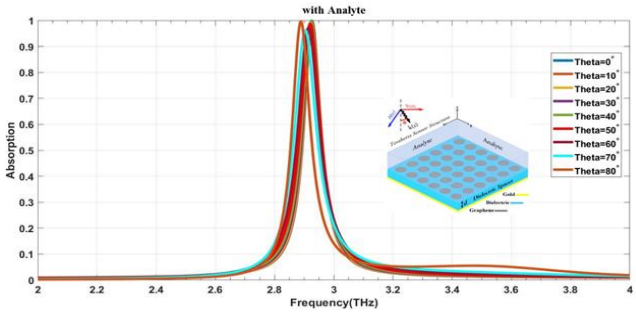
شکل(۷): قابلیت تنظیم فرکانس‌های تشدید با تغییرات در پتانسیل شیمیایی گرافن در فرکانس مرکزی ۶ تراهرتز (الف) TE (ب) TM

۳-۱- بررسی کارایی حسگری ساختار

بررسی کارایی حسگری جاذب‌ها مبتنی بر زاویه تابش در هر دو قطبش TEو TM بدون مواد تحت آزمایش (Analyte) و با Analyte برای ساختار ۱ و ۲ به ترتیب با ضخامت ۱۲ و ۶ میکرومتر در شکل‌های (۸) و (۹) و (۱۰) بررسی گردیده است که نشان از این دارد که ساختار مورد نظر در زوایای تابش مختلف در هر دو قطبش، کارایی و پایداری خود را حفظ نموده و در تمام این زوایا پاسخ فرکانسی ثابت بوده و مقدار جذب نزدیک به ۱۰۰ درصد می‌باشد.

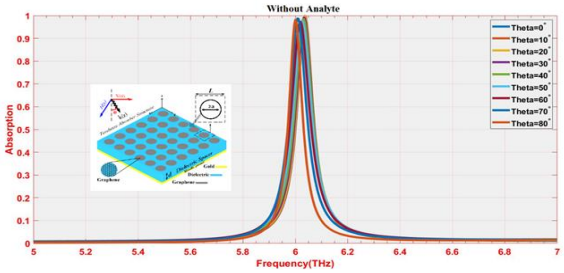


الف

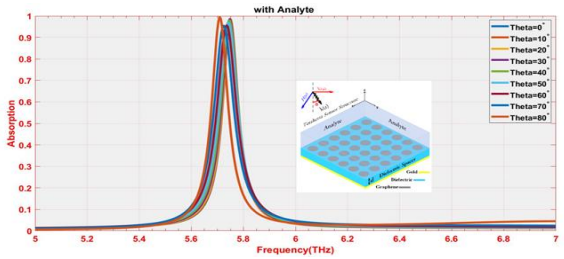


ب

شکل (۸): منحنی های پاسخ فرکانسی به ازای زوایای تابش مختلف برای جاذب ۱ (الف) بدون Analyte و (ب) با Analyte($12\mu m$)

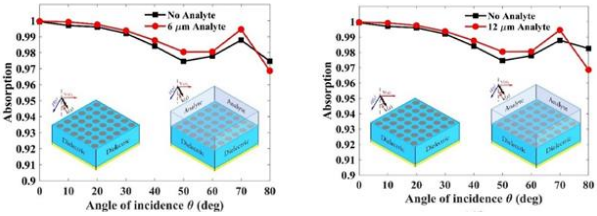


الف



ب

شکل (۹): منحنی‌های پاسخ فرکانسی به ازای زوایای تابش مختلف برای جاذب ۲ (الف) بدون Analyte و (ب) با Analyte(12μm)

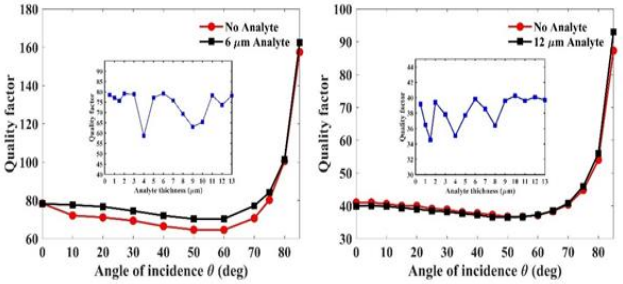


شکل(۱۰): مقایسه مقدار جذب به ازای زوایای تابش مختلف (الف) ساختار ۱ (ب) ساختار ۲

این ساختار طبق پیکربندی خاصی که دارد به اصطلاحWide angle می‌باشد و در تمام زوایا مقدار جذب بالایی دارد. حال می‌خواهیم بیشتر به خواص حسگری طرح پرداخته و مشخصات آن را استخراج نماییم.

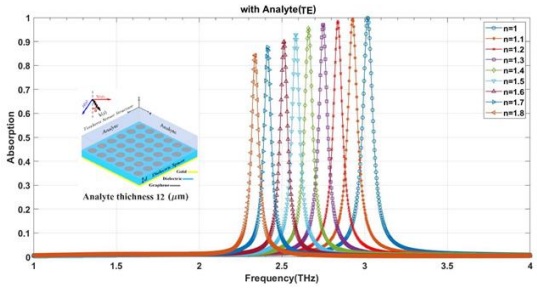
فاکتور کیفیت (Q-factor) کمیتی است که از رابطه $Q(f) = \frac{f_0}{\Delta f}$ بدست می‌آید که Δf و f_0 به ترتیب پهنای باند در نصف توان ماکزیمم و فرکانس مرکزی می‌باشند.

فاکتور کیفیت بر حسب زاویه تابش در شکل (۱۱) نشان داده شده است. این پارامتر با شیب کمی در بازه $\theta = 0^\circ$ تا $\theta = 50^\circ$ کاهش پیدا کرده و در زوایای بالاتر از 50 به صورت نمایی افزایش پیدا می‌کند که علت این افزایش به خاطر طیف جذب باریکتر در زوایای بالاتر می‌باشد.

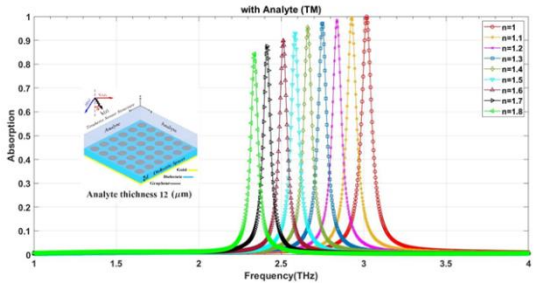


شکل (۱۱): فاکتور کیفیت بر حسب زاویه تابش (الف) ساختار ۱ (ب) ساختار ۲

همچنین وابستگی Q-factor به ضخامت Analyte نیز در شکل (۱۱) نشان داده شده است و طبق آن ضخامت بهینه و مناسب برای مواد Analyte در ساختار ۱ و ۲ به ترتیب ۱۲ و ۶ میکرومتر بدست آمده است. Q-factor های مختلف بدست آمده در این بخش گواه این نکته است که طراحی مورد نظر دارای حسن انتخاب قوی در بسیاری از پارامترها در فرکانس‌های ۳ و ۶ تراهرتز بوده و یک بهبود همه جانبه نسبت به ساختارهایی که در گذشته مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند را دارا می‌باشند [۱۹-۲۳]. قرار دادن مواد Analyte با ضرایب شکست متفاوت در بالای ساختار باعث تغییر در توزیع میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی می‌گردد و این کار منجر به پاسخ‌های مختلف فرکانسی در دامنه و فرکانس می‌شود و اثبات این ادعا با استفاده از محاسبات عددی با نرم افزار CST و روش مدل مداری که شامل پاسخ‌های حسگر برای جاذب‌های ۱ و ۲ می‌باشد در شکل (۱۲) و (۱۳) آمده است.

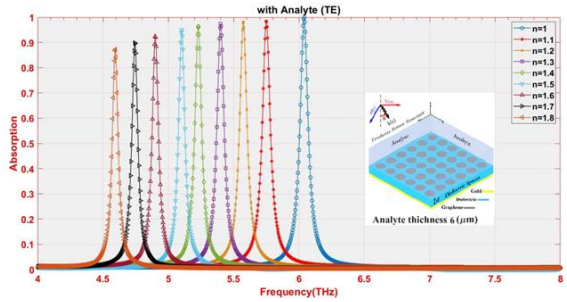


الف

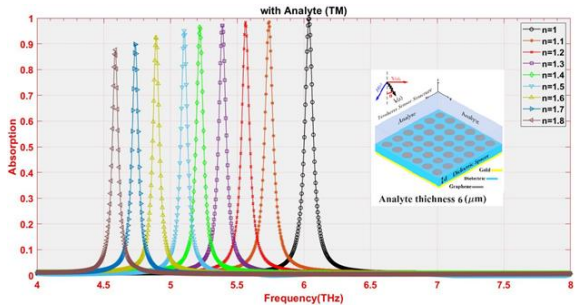


ب

شکل(۱۲): منحنی جذب با قرار دادن مواد Analyte با ضخامت 12μm در بالای ساختار با اعمال تغییرات در ضریب شکست برای $f_0 = 3THz$ در (الف) قطبش TE (ب) قطبش TM



الف



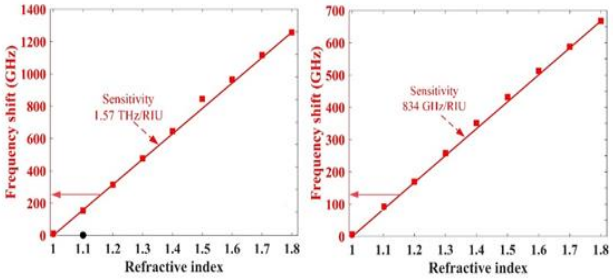
ب

شکل(۱۳): منحنی جذب با قرار دادن مواد Analyte با ضخامت 6μm در بالای ساختار با اعمال تغییرات در ضریب شکست برای $f_0 = 6THz$ در (الف) قطبش TE (ب) قطبش TM

در دو شکل فوق طیف جذب به ازای ضرایب شکست مختلف مواد Analyte با ضخامت ۱۲ میکرومتر برای ساختار اولی و ضخامت ۶ میکرومتر برای ساختار بعدی نشان داده شده است و مشخص می‌باشد که برای ضریب شکست مواد مختلف پاسخ‌های الکترومغناطیسی نیز متفاوت خواهد بود که این نکته از ویژگی‌های مهم حسگرها می‌باشد.

در ساختار با فرکانس مرکزی ۳ تراهرتز نیز فرکانس تشدید از ۲/۳۳ الی ۳ تراهرتز جابجا شده است و مقداری در حدود ۶۷۰ گیگاهرتز جابجایی فرکانس در این حسگر مشاهده می‌شود و زمانی که ضریب شکست از ۱ الی ۱/۸ تغییر می‌یابد دامنه جذب از ۹۹/۵٪ تا ۸۵٪ متغیر می‌باشد.

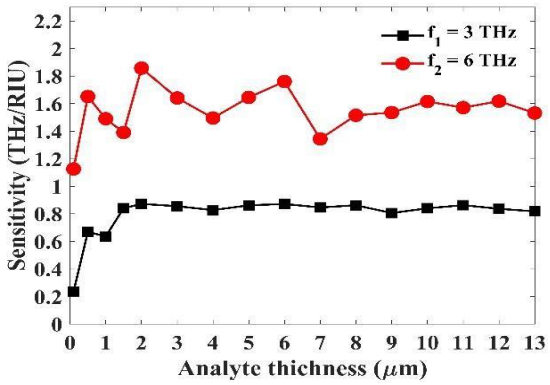
ساختار بعدی با فرکانس مرکزی ۶ تراهرتز شبیه بالایی می‌باشد و به ازای مقادیر ضریب شکست در بازه ۱/۸-۱ فرکانس تشدید بین ۴/۷ تا ۶ تراهرتز و دامنه جذب از ۹۹/۹٪ الی ۸۷/۵٪ خواهد بود. همچنین مقدار جابجایی فرکانس تشدید ۱/۳ تراهرتز می‌باشد. در شکل (۱۴) شیفت فرکانسی برای هر دو ساختار به ازای ضرایب شکست مختلف بررسی شده است که این ما را در جهت بدست آوردن حساسیت مطلوب حسگر یاری می‌رساند. حساسیت برای حسگر۱ $0.834\ {}^{THz}/_{RUI}$ و برای حسگر ۲ مقدار $1.57\ {}^{THz}/_{RUI}$ بدست آمد.



ب الف

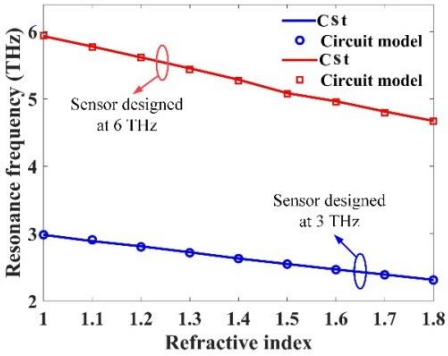
شکل(۱۴): شیفت فرکانسی در اثر تغییرات ضریب شکست (الف) در ساختار ۱ با ضخامت 12μm (ب) ساختار ۲ با ضخامت 6μm

جهت تجزیه و تحلیل نهایی این ساختارها مقدار ضریب شکست را از ۱ تا ۱/۸ تغییر دادیم. وابستگی حساسیت حسگر به ضخامت Analyte که به صورت جذب سطحی در بالای آن قرار می‌گیرد در شکل (۱۵) نشان داده شده است. طبق نمودار رسم شده به ازای مقادیر کوچک ضخامت Analyte کمیتِ حساسیت، رفتاری پر نوسان از خود نشان می‌دهد و با افزایش ضخامت حساسیت به مقدار ثابت و پایداری می‌رسد.



شکل(۱۵): حساسیت حسگر ۱ ($f_1 = 3\ THz$) و حسگر ۲ ($f_2 = 6\ THz$) بر حسب ضخامت Analyte

همچنین شکل(۱۶) رابطه خطی میان فرکانس‌های تشدید و و ضریب شکست مواد Analyte برای حسگرهای طراحی شده را نشان می‌دهد. با افزایش ضریب شکست از مقدار ۱ تا ۱/۸ فرکانس تشدید به سمت فرکانس‌های کمتر حرکت خواهد کرد و کاهش فرکانس تشدید در حسگرهای ۱ و ۲ به ترتیب ٪۲۲/۳۳ و ٪۲۱ می‌باشد.



شکل(۱۶): رابطه خطی میان فرکانس رزونانس و ضریب شکست مواد Analyte برای جاذب ۱ و ۲

۳-۲- مقایسه با کارهای پیشین انجام شده

بهینه‌سازی و میزان کارایی ساختارهای طراحی شده در این مقاله در مقایسه با ساختارهای پیشین ارائه شده در جدول (۳) بیان گردیده است که شامل مشخصه‌های اساسی حسگرهای ضریب شکست مثل FOM ، Q-factor و sensitivity می‌باشد.FOM و Q-factor نسبت به مراجع دیگر افزایش قابل ملاحضه‌ای داشته است و مقدار حساسیت نسبت به مرجع [۲۰] روند کاهشی داشته است ولی باز هم این مشخصه در این مقاله در مقایسه با دیگر مراجع مقدار قابل قبولی می‌باشد که این نتیجه استفاده از یک روش طراحی و تحلیلی مناسب جهت استفاده از پارامترهای بهینه و فرامادە گرافن می‌باشد.

جدول(۳): مقایسه حسگرهای این مقاله و کارهای گذشته

مراجع	مکانیزم	ساختار	حساسیت (THz/RIU)	Q-factor	مقدار بیشینه FOM($S/FWHM$)
[۱۹]	Tamma Plasmon	DBR+Graphene	0.747	15.71	10.33
[۲۰]	Fano Resonance	Metamaterial	1.444	41.02	6.566
[۲۱]	Plasminic waveguide	Waveguide + Corrugations	0.13	41.23	16.75
[۲۲]	Plasmonic structure	Metamaterial	0.139	15	3
[۲۳]	Metamaterial Absorber	Metamaterial	3.03	36.58	12.02
این مقاله	**Metamaterial Absorber**	**Metamaterial**	**0.843**	**40.01**	**11.75**
	Metamaterial Absorber	**Metamaterial**	**1.57**	**80**	**24.5**

۴- نتیجه‌گیری

ایده و روشی که در این مقاله جهت طراحی حسگرهای ضریب شکست مورد بررسی قرار گرفت دارای ویژگی‌هایی از قبیل کاهش هزینه طراحی، زمان محاسبات و حافظه‌های ذخیره‌ای می‌باشد و این ساختار در مقایسه با مطالعات و کارهای گذشته مزایایی نظیر حساسیت بالاتر، پایداری بالا و ساختار ساده می‌باشد. همچنین با توجه به پایداری بالای گرافن در دماهای بالاتر این طراحی در برابر تغییرات دمایی اثرات نامطلوب از خود نشان نمی‌دهد. همچنین ضریب شکست مواد مختلف بستگی به برخی پارامترهای فیزیکی مثل دما دارد که با تغییرات دما چگالیِ مواد را می‌توان از طریق تغییرات ضریب شکست آن‌ها اندازه-گیری نمود. از آنجایی‌که ساختار ارائه شده شامل فقط یک لایه گرافن و ساختار ساده نیز می‌باشد، می‌تواند به عنوان الگویی جهت استفاده در ساختارهای مختلف مطرح گردد.

۵- مراجع

[1] InfiterTathfif, Md. Farhad Hassan, KaziSharmeen Rashid, Ahmad. AzuadYaseer, RakibulHasanSagor. “A highly sensitive plasmonic refractive index sensor based on concentric triple ring resonator for cancer biomarker and chemical concentration detection”, Optics Communications, Volume 519, (2022).

[2] Ruijian Cheng, Ling Xu, Xin Yu, Liner Zou, Yun Shen, Xiaohua Deng. “High-sensitivity biosensor for identification of protein based on terahertz Fano resonance metasurfaces”, Optics Communications, Volume 473, August 2021.

[۳] برزگرپاریزی، سعیده."حسگر ضریب شکست بر پایه جاذب الکترومغناطیس فرامادە باند باریک در فرکانس های مایکروویو و تراهرتز"، نشریه مهندسین برق و الکترونیک ایران، دوره ۲، شماره۳،۸۹-۹۶، ۱۴۰۲

[4] M. Aslinezhad, “High sensitivity refractive index and temperature sensor based on semiconductor metamaterial perfect absorber in the terahertz band”, Optics Communications, Volume 463 ,Pages: 125411,(2020)

[5] Mohammad. Biabanifard, and Mohammad. SadeghAbrishamian, “Circuit Modeling of Tunable Terahertz Graphene Absorber”. Optik-International Journal for Light and Electron Optics. (2017).

[6] Sahar. Borzooei, Ehsan. Rezagholizadeh, and Mohammad. Biabanifard, “Graphene disks for frequency control of terahertz waves in broadband applications”. Journal of Computational Electronics ,1-14, (2020).

[7] Mohammad. Biabanifard, SomayyehAsgari. SadeghBiabanifard, and Mohammad. SadeghAbrishamian, “Analytical design of tunable multi-band terahertz absorber composed of graphene disks”. Optik 182,433-442, (2019).

[8] George W. Hanson, “Dyadic Green’s functions and guided surface waves for a surface conductivity model of grapheme”. Journal of Applied Physics 103, no. 6 , 064302, (2008).

[9] Arash. Arsanjani, Mohammad. Biabanifard, and Mohammad. SadeghAbrishamian, “A novel analytical method for designing a multi-band, polarization-insensitive and wide angle graphene-based THz

absorber". Superlattices and Microstructures 128 , 157-169, (2019).

[10] Saeedeh. Barzegar-Parizi, Behzad. Rejaei, and Amin. Khavasi, "Analytical circuit model for periodic arrays of graphene disks". IEEE Journal of Quantum Electronics 51, no. 9 ,1-7, (2015).

[۱۱] واثقی، نوشین. محمدصادق ابریشمیان، محمدصادق. "طراحی و بهینه سازی نوعی جدید از مواد جاذب راداری در پهنای باند وسیع و پلاریزاسیون دلخواه به کمک الگوریتم ژنتیک"، نشریه مهندسین برق و الکترونیک ایران،دوره ۷، شماره۱، ۷-۱، ۱۳۸۹

[12] M. Trushin, & J. Schliemann, "Anisotropic photoconductivity in grapheme", EPL (Europhysics Letters), 96(3), 37006, (2011)..

[13] P. A. George, J. Strait, J. Dawlaty, S. Shivaraman, M. Chandrashekhar, F. Rana, & M. G. Spencer, "Ultrafast optical-pump terahertz-probe spectroscopy of the carrier relaxation and recombination dynamics in epitaxial grapheme", Nano letters, 8(12), 4248-4251, (2008).

[14] J. Hu, X. Ruan, & Y. P. Chen, "Thermal conductivity and thermal rectification in graphenenanoribbons: a molecular dynamics study", Nano letters, 9(7), 2730-2735, (2009).

[15] V. Ryzhii, M. Ryzhii, & T. Otsuji, "Negative dynamic conductivity of graphene with optical pumping", Journal of Applied Physics, 101(8), 083114, (2007).

[16] H. R. Taghvaee, F. Zarrinkhat, & M. S. Abrishamian, "Terahertz Kerr nonlinearity analysis of a microribbongraphene array using the harmonic balance method. Journal of Physics D:", Applied Physics, 50(25), 255104, (2017).

[17] L. Ju, B. Geng, J. Horng, C. Girit, M. Martin, Z. Hao, & F. Wang, "Grapheneplasmonics for tunable terahertz metamaterials", Nature nanotechnology, 6(10), 630, (2011).

[18] C. R. Dean, A. F. Young, I. Meric, C. Lee, L. Wang, S. Sorgenfrei, & J. Hone, "Boron nitride substrates for high-quality graphene electronics", Nature nanotechnology, 5(10), 722, (2010).

[19] M. Keshavarz, Mehdi and Abbas. Alighanbari. "Terahertz refractive index sensor based on Tamm plasmon-polaritons with grapheme", Applied optics 58, no. 13 3604-3612, (2019).

[20] Zhang, Yuping, Tongtong Li, BeibeiZeng, Huiyun Zhang, HuanhuanLv, Xiaoyan Huang, Weili Zhang, and Abul K. Azad. "A graphene based tunable terahertz sensor with double Fano resonances:, Nanoscale 7, no. 29 12682-12688, (2015).

[21] Islam, Maidul, Dibakar Roy Chowdhury, Amir Ahmad, and Gagan Kumar. "Terahertz plasmonic waveguide based thin film sensor", Journal of Lightwave Technology 35, no. 23 , 5215-5221,(2017).

[22] Yahiaoui, Riad, Andrew C. Strikwerda, and Peter UhdJepsen. "Terahertz plasmonic structure with enhanced sensing capabilities", IEEE Sensors Journal 16, no. 8 2484-2488,(2016)

[23] NEJAT,Mohamad; NOZHAT, Najmeh. "Ultrasensitive THz refractive index sensor based on a controllable perfect MTM absorber", IEEE sensors journal, 19.22: 10490-10497, 2019.