



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

Journal homepage: <https://modelling.semnan.ac.ir/>

ISSN: 2783-2538



Research Article

A Complete Multi-Band Terahertz Absorber Graphene Structure with Frequency Tunable and Polarization-Independent for Use in Biosensors

Yousef Rafiq Irani ^a, Javad Javidan ^{a,*} , Hamid Heidarzadeh ^a ^a Department of Electrical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-04-01

Revised: 2025-01-17

Accepted: 2025-02-16

Keywords:

Biosensor;
Graphen heterogeneous
structure;
Terahertz;
Metamaterial;
Refractive index.

ABSTRACT

In this paper, the heterogeneous structure of multi-band perfect absorbing graphene in the terahertz range is designed independent of polarization. The proposed structure consists of three layers of copper, silicon dioxide and heterogeneous graphene structure and analyte. By changing the dimensions of the sub-layers and the geometric shape of the graphene slices, the number of bands, the quality, and the amount of absorption can be changed. Also, by changing the chemical potential of graphene, the absorption frequencies can be adjusted to the required values. The application of this structure in biological sensors is to detect proteins, viruses, cancer cells, telecommunication waves and imaging. With the cuts made on graphene in geometric shapes at the frequencies 4.99 THz, 9.21 THz, 10.5 THz, and 11.7 THz, absorption values of 99.6, 99.3, 99.6 and 94.7% have been obtained, respectively. placing the analyte on the proposed structure causes the displacement of the absorption frequency values, which is due to the different values of the refractive index of different materials. This important property has been used for biosensor design. The highest sensitivity value in the third band is 994GHz/RIU, which due to the simple structure consisting of three layers and the use of copper instead of gold, and also by comparing the output values of this research with previous research, can be the best option for making a biosensor. One of the important features of this structure is that it is not sensitive to polarization. The simulations were done in computer simulation software (CST).

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.33666.2647>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

* Corresponding author.

E-mail address: Javidan@uma.ac.ir**How to cite this article:**

Y. Rafiqirani, J. Javidan and H. Heidarzadeh, "A complete multi-band terahertz absorber graphene structure with frequency tunable and polarization-independent for use in biosensors," Journal of Modeling in Engineering, 23 83 (2025): 1-10, doi: 10.22075/jme.2025.33666.2647

ساختار گرافن جاذب تراهرتز کامل چند بانندی با قابلیت تنظیم فرکانس و مستقل از قطبش قابل استفاده در حسگرهای زیستی

یوسف رفیق ایرانی^۱، جواد جاویدان^{۱*}، حمید حیدرزاده^{۱b}

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۱/۱۳ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۰/۲۸ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۱۱/۲۹	در این مقاله، یک ساختار ناهمگن از گرافن به عنوان جاذب کامل چند بانندی در محدوده تراهرتز و به صورت مستقل از پلاریزاسیون طراحی شده است. این ساختار شامل سه لایه مس، دی اکسید سیلیکون و گرافن ناهمگن به همراه آنالیت می باشد. با تغییر ابعاد لایه های زیرین و شکل هندسی برش های گرافن، می توان تعداد باندها، کیفیت و میزان جذب را تنظیم کرد. همچنین، با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن، امکان تنظیم فرکانس های جذب به مقادیر دلخواه وجود دارد. این ساختار می تواند در کاربردهای بیولوژیکی برای شناسایی پروتئین ها، ویروس ها و سلول های سرطانی، همچنین در کاربردهای مخابراتی و تصویربرداری مورد استفاده قرار گیرد. برش های هندسی گرافن در فرکانس های ۴.۹۹THz، ۹.۲۱THz، ۱۰.۵THz و ۱۱.۷THz به ترتیب جذب هایی معادل ۹۹.۶، ۹۹.۳، ۹۹.۶ و ۹۴.۷ درصد را به دست آورده اند. قرار دادن آنالیت بر روی ساختار پیشنهادی موجب تغییر در مقادیر فرکانس جذب می شود که این تغییر به دلیل تفاوت های ضریب شکست مواد مختلف است. از این ویژگی مهم در طراحی حسگرهای زیستی بهره برداری شده است. بالاترین میزان حساسیت در باند سوم ۹۹۴GHz / RIU مشاهده می شود که با توجه به ساختار ساده متشکل از سه لایه و استفاده از مس به جای طلا، و همچنین مقایسه نتایج این تحقیق با مطالعات قبلی، می تواند بهترین گزینه برای ساخت حسگر زیستی باشد. یکی از ویژگی های کلیدی این سازه این است که به قطبی شدن حساس نیست. شبیه سازی ها با استفاده از نرم افزار شبیه سازی کامپیوتری (CST) انجام شده است.
واژگان کلیدی: حسگر زیستی، ساختار ناهمگن گرافن، تراهرتز، فراماده، ضریب شکست.	

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.33666.2647>

© 2025 Published by Semnan University Press.

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

۱- مقدمه

با پیشرفت فناوری در زمینه های ارتباطات و پزشکی، نیاز به استفاده از محدوده فرکانسی تراهرتز و توسعه ابزار و دستگاه های تشخیصی در این حوزه به شدت احساس می شود. ماتریال ها یا فراماده ها این امکان را فراهم می آورند که دستگاه های اندازه گیری و تشخیص در محدوده تراهرتز ساخته شوند. فراماده به موادی اطلاق می شود که

به طور مهندسی طراحی شده اند و دارای خواص جدیدی هستند که به طور طبیعی در آن ها وجود ندارد [۱]. به همین دلیل، توجه بسیاری از پژوهشگران در حوزه الکترومغناطیس به فراماده ها جلب شده است [۲]. فرامواد دارای ویژگی های خاصی مانند ضریب شکست منفی [۳] هستند که در طراحی جاذب های انرژی خورشیدی [۴]، سوئیچ ها در محدوده تراهرتز [۵] و سنسورهای مبتنی بر

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Javidan@uma.ac.ir

۱. دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه محقق اردبیلی، اردبیل، ایران

استناد به این مقاله:

یوسف رفیق ایرانی، جواد جاویدان و حمید حیدرزاده، "ساختار گرافن جاذب تراهرتز کامل چند بانندی با قابلیت تنظیم فرکانس و مستقل از قطبش قابل استفاده در حسگرهای زیستی"، مدل سازی در مهندسی، ۲۳ (۱۴۰۴): ۱-۱۰، doi: 10.22075/jme.2025.33666.2647

انتقال یا جذب امواج THz هستند [۱۹ و ۲۰]. مطالعات گسترده‌ای برای شناسایی میکروارگانیزم‌ها انجام شده که منجر به توسعه طیف‌سنجی در محدوده THz به عنوان ابزاری امیدوارکننده برای تحقیقات پزشکی، از جمله تشخیص بیماری و کشف دارو، گردیده است [۲۱]. در این تحقیقات، میزان جذب فرامواد در فرکانس THz معمولاً برای شناسایی مواد به کار می‌رود. این جذب‌ها به‌ویژه در آزمایش‌های تشخیصی غیرتهاجمی مفید هستند، زیرا توانایی تشخیص مقادیر کوچک را دارند و کاربردهای بالقوه‌ای در تصویربرداری و غربالگری DNA و پزشکی ارائه می‌دهند [۲۱]. در این مقاله، از نرم‌افزار شبیه‌سازی کامپیوتری (CST) با تکنیک ادغام محدود (FIT) برای شبیه‌سازی استفاده شده و تمرکز بر روی ساختارهای پیشنهادی به منظور دستیابی به بالاترین میزان جذب و حساسیت در حسگرهای زیستی است.

۲- بحث نظری در مورد رسانایی گرافن

گرافن یک ماده دو بعدی با ویژگی‌های نیمه‌رسانایی است و می‌توان رسانایی آن در محدوده ترازتر را با استفاده از معادلات (۱) تا (۳) محاسبه کرد. معادله (۱) نشان‌دهنده رسانایی کل گرافن است که از جمع رسانایی درون باند و بین باند به دست می‌آید. معادله (۲) به محاسبه رسانایی بین باند می‌پردازد و از رابطه (۳) می‌توان رسانایی درون باند را استخراج کرد [۲۲].

$$\sigma(\omega, \tau, \mu_c, T) = \sigma_{inter}(\omega, \tau, \mu_c, T) + \sigma_{intera}(\omega, \tau, \mu_c, T) \quad (1)$$

$$\sigma_{inter}(\omega, \tau, \mu_c, T) = -j \frac{e^2}{4\pi\hbar} \ln \left(\frac{2\mu_c + (\omega - j\tau^{-1})\hbar}{2\mu_c - (\omega - j\tau^{-1})\hbar} \right) \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma_{intera}(\omega, \tau, \mu_c, T) \\ = -j \frac{e^2 K_B T}{\pi \hbar^2 (\omega - j\tau^{-1})} \left[\frac{\mu_c}{K_B T} \right. \\ \left. + 2 \ln \left(\exp \left(-\frac{\mu_c}{K_B T} \right) + 1 \right) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

در معادلات فوق ω ، فرکانس زاویه ای، τ ، زمان آرامش، μ پتانسیل شیمیایی گرافن، T ، دما بر حسب کلونین (در این مقاله مقدار $T=300\text{K}$)، ثابت بار الکتریکی بولتزمن، ثابت کاهش یافته پلانک تعریف شده است. با توجه به اصل طرد

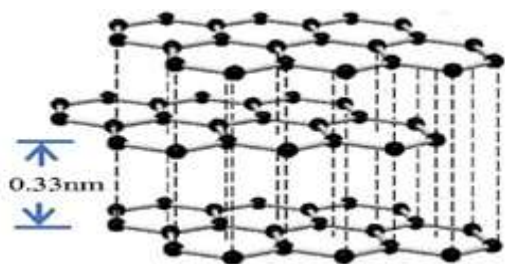
ضریب شکست [۶] کاربردهای گسترده‌ای دارند. یکی از مفیدترین متا مواد، گرافن است. گرافن یک فراماده است که از گرافیت تشکیل شده و گرافیت خود از ورقه‌های اتمی کربن ساخته می‌شود. این ورقه‌ها دارای شش ضلعی‌های منظم هستند که بین صفحات خود پیوندهای واندروالسی (پیوندهای شیمیایی نسبتاً ضعیف) دارند. با شکستن این پیوندها، همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده، به متاماده گرافن می‌رسیم که شامل یک لایه منفرد از اتم‌های کربن با ساختاری دو بعدی است [۲]. به دلیل ابعاد کوچک و خواص دو بعدی، همچنین رسانایی بالا و قابلیت تنظیم، گرافن در ساختارهای متنوبی مانند جاذب‌ها و حسگرهای الکترومغناطیسی به کار می‌رود [۷]. پتانسیل شیمیایی گرافن می‌تواند با استفاده از ولتاژ بایاس خارجی یا دوپینگ شیمیایی تنظیم شود و این امر به تنظیم فرکانس جذب آن نیز کمک می‌کند [۸]. متاماده‌ای با خواص جذب کامل برای اولین بار توسط لندی و همکارانش گزارش شد [۹]. با استفاده از روش‌ها و ساختارهای مختلف، محققان قادر به طراحی جاذب‌های کامل بر پایه متاماده گرافن چند باندی شدند [۱۰-۱۳]. طراحی جاذب‌های چند باندی به طور کلی از دو روش قابل انجام است. در روش اول، ساختاری طراحی می‌شود که به صورت پریودیک و مسطح در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند و یک ساختار واحد را تشکیل می‌دهند [۱۴ و ۱۵].

ساختار پیشنهادی در این مقاله بر اساس یک ایده خاص طراحی شده است. روش دوم شامل ساختارهای چند لایه متنوب است که به صورت عمودی روی هم قرار گرفته‌اند [۱۶ و ۱۷]. معمولاً تعداد لایه‌ها در روش اول به تعداد انگشتان دست محدود می‌شود، در حالی که در روش دوم این تعداد می‌تواند بسیار بیشتر باشد. هر یک از این روش‌ها دارای مزایا و معایب خاص خود هستند. روش اول از ضخامت و وزن کمتری برخوردار است، اما سطح بیشتری را اشغال می‌کند. در مقابل، روش دوم دارای سطح کوچکتری است اما ضخامت بیشتری دارد. یکی از مزایای روش پیشنهادی، عدم حساسیت به پلاریزاسیون و جذب کامل در فرکانس‌های مشخص است. حسگرهای زیستی طراحی شده با استفاده از فرمود، به ویژه در تشخیص ویروس‌ها بر اساس ضریب شکست، از سرعت بسیار بالایی برخوردارند [۱۸].

تحقیقات متعددی در چند دهه اخیر نشان داده‌اند که بسیاری از بیومواد، از جمله پروتئین‌ها و ویروس‌ها، قادر به

پاولی، $K_B T \gg \mu_c$ از آنجایی که در باند فروسرخ تراهرتز است، بخش بین باندی در گرافن را می توان نادیده گرفت

و رسانایی را می توان به صورت زیر خلاصه کرد:



شکل ۱- ساختار گرافن و پیوند کووالانسی بین لایه های گرافن نشان داده شده است.

دی الکتریک دی اکسید سیلیکون، $\epsilon_r = 3.9$ ضریب عبور [۲۵]، $\sigma_{cu} = 5.831 \times 10^7 S/m$ [۲۴] و برای لایه دی [۲۶]، و برای گرافن زمان استراحت $\tau = 1.6 ps$ ، دمای 300 کلوین در نظر گرفته شده است.

اولین ساختار شبیه سازی شده که در شکل ۲ (الف) نمایش داده شده، شامل یک ساختار ساندویچی استاندارد است. در این ساختار، نوارهای گرافنی به عنوان لایه بالایی، دی اکسید سیلیکون به عنوان لایه دی الکتریک میانی و یک صفحه مسی به عنوان لایه زیرین قرار گرفته اند. عرض نوار و ضخامت لایه های دی اکسید سیلیکون و مس به منظور دستیابی به حداکثر جذب، متفاوت انتخاب شده اند. هدف از این ساختار، دستیابی به فرکانس های جذب چندباندی است. این طراحی از سه بخش گرافن با پتانسیل های شیمیایی مختلف، شامل 800 میلی ولت، 600 میلی ولت و 400 میلی ولت استفاده می کند. این طرح به منظور تولید باندهای فرکانسی متمایز با اعمال پتانسیل های شیمیایی متفاوت در هر بخش گرافن طراحی شده است که در شکل ۲ (ب) به تصویر کشیده شده است. همچنین، لازم به ذکر است که تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن امکان جذب در فرکانس های مختلف را فراهم می آورد.

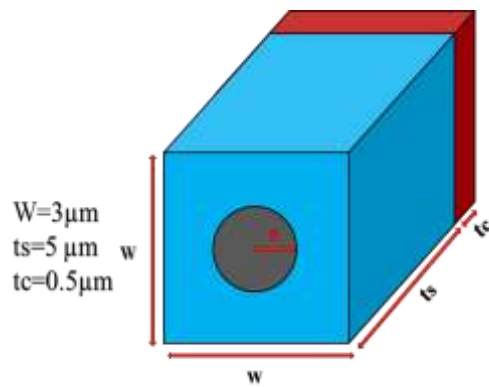
در دومین ساختار مورد بررسی که در شکل ۳ (الف) نمایش داده شده است، از گرافن به صورت دایره ای با یک پتانسیل شیمیایی خاص استفاده شده است. این ساختار با پتانسیل شیمیایی ثابت، امکان تولید باندهای فرکانسی مجزا را فراهم می آورد. برخی از این باندها دارای میزان جذب بالایی هستند، در حالی که باندهای دیگر این ویژگی را ندارند. با تغییر شعاع گرافن دایره ای در ناحیه مشخص شده، می توان به نتایج قابل توجهی دست یافت.

$$\sigma(\omega, \tau, \mu_c) = \frac{je^2 \mu_c}{\pi \hbar^2 (\omega + j\tau^{-1})} \quad (4)$$

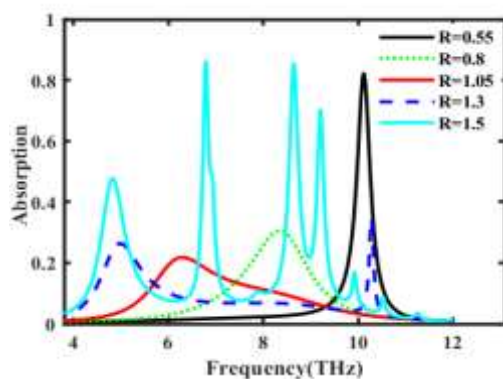
۳- بحث در مورد طراحی ساختار جاذب فرکانسی چند باندی

۳-۱- مراحل طراحی ساختار پیشنهادی

ساختار طراحی شده برای جاذب فرکانس در محدوده تراهرتز شامل سه لایه است: یک لایه رسانا، یک لایه دی الکتریک و یک لایه گرافن. به منظور استفاده به عنوان حسگر زیستی، یک لایه زیست سازگار در قسمت بالایی قرار می گیرد که دارای یک گیرنده زیستی برای جداسازی آنالیت می باشد. لایه آنالیت برای تشخیص می تواند شامل آنزیم ها، آنتی ژن ها، پروتئین ها، سموم یا ویروس ها باشد. مکانیسم جذب در این جاذب های چند لایه به گونه ای است که آخرین لایه به عنوان یک رسانا عمل کرده و از خروج تابش از ساختار جلوگیری می کند، در حالی که لایه دی الکتریک بین گرافن و هادی قرار دارد. این طراحی اطمینان می دهد که امواج منعکس شده از داخل ساختار با اختلاف فاز ایجاد شده یکدیگر را خنثی کرده و جذب کامل حاصل می شود. یکی از ویژگی های قابل توجه این ساختار، عدم حساسیت آن به قطبش است [۲۳]. برای دستیابی به ساختار نهایی، فرآیند کار به صورت مرحله ای از یک ساختار ساده آغاز می شود و شرایط مختلف از نظر ابعاد و پارامترها مورد بررسی قرار می گیرد تا ساختار پیچیده تری طراحی شود. هدف اصلی در تمامی طرح ها، دستیابی به حداکثر جذب، کیفیت بالا و حساسیت بالا است. طراحی و تحلیل با بهره گیری از نرم افزار شبیه سازی کامپیوتری (CST) انجام می شود و تمامی پارامترهای ابعادی بهینه انتخاب می گردند. در تمامی طرح ها مقدار رسانایی هادی (مس)



(الف)



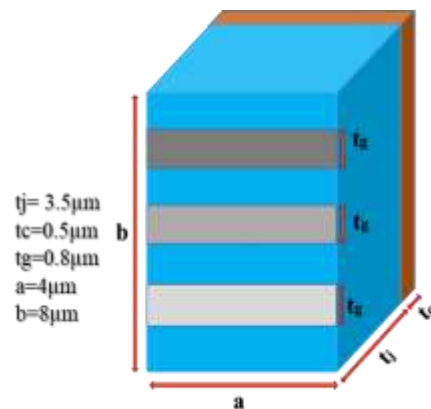
(ب)

شکل (۳-الف) - ساختار جاذب فرکانسی با گرافن دایره ای در مرکز

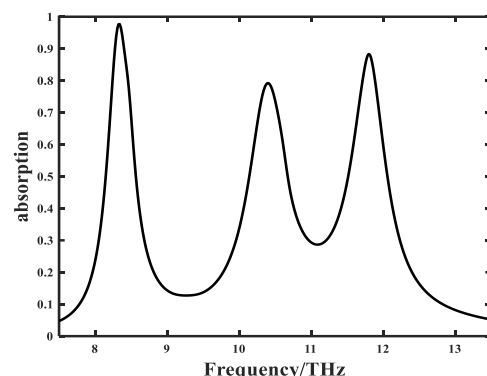
(ب) شکل موج جذب باتغییر شعاع دایره گرافن

در ساختار اولیه، مشاهده شد که می‌تواند دارای باندهای فرکانسی متفاوت با پتانسیل شیمیایی مختلفی باشد که به گرافن متصل است. با الهام از ساختارهای بررسی شده و ترکیب شکل دایره‌ای با گرافن نوار مانند، ساختار پیشنهادی در شکل (۴-الف) ارائه شده است. همچنین، ساختار کلی پررودیک به همراه مش‌بندی طرح پیشنهادی در شکل (۴-ب) نمایش داده شده است. ایجاد حفره دایره‌ای در مرکز گرافن دایره‌ای نیز بر میزان جذب و تعداد پیک‌های جذب تأثیر گذاشته است. شکل (۴-ج) میزان جذب را در مقادیر مختلف حفره ایجاد شده نشان می‌دهد که در ساختار پیشنهادی، بالاترین مقدار جذب و تعداد بیشتری از باندها حاصل شده است.

با توجه به شکل موج جذب ارائه شده در شکل (۴-ج)، حفره‌ای با شعاع ۰.۱ میکرومتر چهار باند فرکانس جذب با بالاترین میزان جذب را ایجاد کرده است که مقادیر خروجی این ساختار در جدول ۱ نمایش داده شده است. همان‌طور



(الف)



(ب)

شکل (۲-الف) - ساختار جاذب فرکانسی با سه نوار گرافنی با پتانسیل شیمیایی مختلف (ب) شکل موج جذب فرکانسی در سه باند

پارامترهای مشخص شده برای ابعاد مشابه ساختار اول تعیین می‌شوند و نتایج شبیه‌سازی در شکل ۳(ب) نمایش داده شده است. با الهام از طرح‌های قبلی، بررسی ساختار دوم این ایده را مطرح کرد که باندهای فرکانسی مختلف می‌توانند با استفاده از پتانسیل شیمیایی ثابت و شکل دایره‌ای به دست آیند. با این حال، این ساختار با چندین چالش اساسی مواجه است که باید در طراحی نهایی قابل اجرا مد نظر قرار گیرد. یکی از مشکلات اصلی در ساختار دوم، قرار دادن گرافن در مرکز ناحیه مورد نظر است که عملاً اتصال آن به منبع پتانسیل شیمیایی را دشوار می‌سازد. همچنین، نگرانی دیگری که وجود دارد، عدم کنترل بر تعداد باندهای فرکانسی است. از همه مهم‌تر، این ساختار در بسیاری از موارد جذب پایینی را نشان می‌دهد.

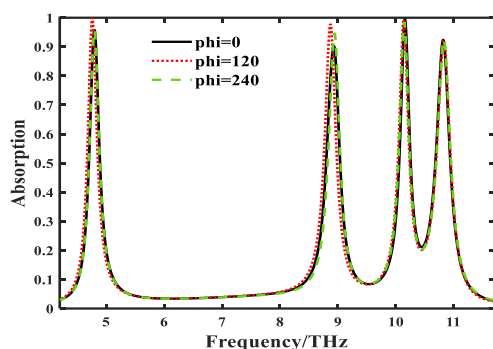
مقدار جذب بالا تنها در یکی از باندهای فرکانسی مشاهده می‌شود. برای دستیابی به ساختار نهایی با عملکرد بهبود یافته، غلبه بر این چالش‌ها و کنترل بر باندهای فرکانسی و ویژگی‌های جذب افزایش یافته بسیار حائز اهمیت است.

جدول ۱ - مقادیر فرکانس تشدید FWHM و ضریب کیفیت بدست آمده از ساختار پیشنهادی

ضریب کیفیت	FWHM (GHz)	جذب	فرکانس تشدید (THz)	باند فرکانسی
۲۷.۵	۱۸۱	۰.۹۹۶	۴.۹۹	باند اول
۴۸.۶	۱۸۹	۰.۹۹۳	۹.۲۱	باند دوم
۵۲.۵	۲۰۰	۰.۹۹۶	۱۰.۵	باند سوم
۴۴.۵	۲۵۱	۰.۹۴۷	۱۱.۱۷	باند چهارم

۳-۲- مستقل بودن ساختار از پلاریزاسیون

فرامواد، ساختارهای مهندسی شده‌ای هستند که دارای خواص منحصر به فردی بوده و در طبیعت وجود ندارند. این مواد امکان کنترل دقیق امواج الکترومغناطیسی را فراهم می‌آورند. در زمینه جاذب‌های تراهترز، دستیابی به استقلال قطبش برای کاربردهای عملی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این ویژگی عملکرد ثابت را بدون توجه به جهت تابش تراهترز ورودی تضمین می‌کند. این قابلیت به ویژه در سیستم‌های حسگری و ارتباطی که نیاز به حفظ یک پاسخ پایدار و قابل اعتماد به سیگنال‌های تراهترز دارند، بسیار ارزشمند است. در شکل (۵)، مشاهده می‌شود که با چرخش میدان الکتریکی E ، زاویه پلاریزاسیون در محدوده فرکانس تغییر نمی‌کند و پاسخ ساختار بدون تغییر باقی می‌ماند، که نشان‌دهنده عدم حساسیت به قطبش است. این ویژگی به تسهیل ساخت و افزایش کارایی سنسور کمک می‌کند.

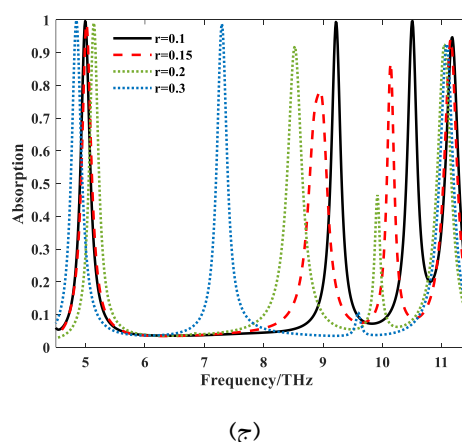
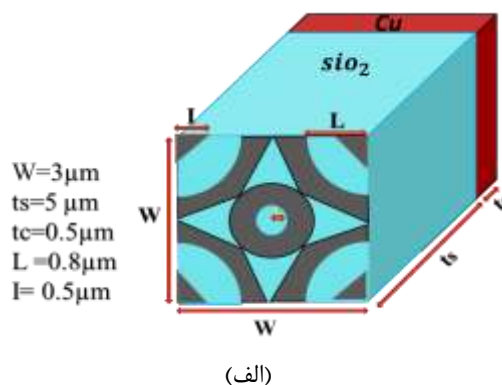


شکل ۵- موج جذب با تغییر زاویه قطبش از ۰، ۱۲۰، ۲۴۰ درجه

مراحل ساخت طرح پیشنهادی به این صورت است: در ابتدا، دی اکسید سیلیکون با نفوذپذیری ۳.۹ و ضخامت ۵ میکرومتر، با پوشش مسی به ضخامت ۰.۵ میکرومتر در یک سمت و گرافن در سمت دیگر قرار می‌گیرد. این ساختار با استفاده از روش رسوب بخار شیمیایی (CVD) ایجاد می‌شود. سپس، طراحی مورد نظر برای گرافن می‌تواند با استفاده از فرآیند لیتوگرافی استاندارد بر روی دی الکتریک

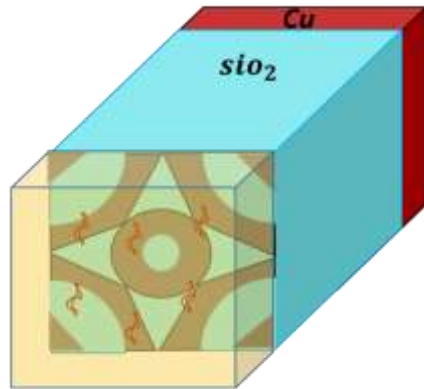
که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، میزان جذب ساختار در سه باند بیش از ۹۹ درصد است.

ضریب کیفیت و FWHM دارای مقادیر بالایی هستند که این ساختار را برای استفاده در کاربردهای مختلفی مانند جاذب فرکانسی در مخابرات و ساخت حسگرهای زیستی مناسب می‌سازد. در بخش بعد، نمونه‌ای از حسگر زیستی با استفاده از ساختار پیشنهادی طراحی شده و میزان حساسیت آن محاسبه خواهد شد.

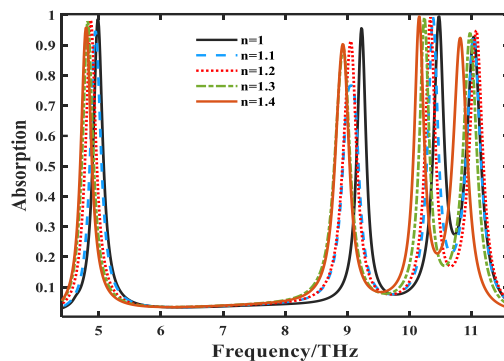


شکل (۴-الف) - ساختار پیشنهادی برای جاذب فرکانسی (ب) شکل کلی ساختار با مشخص بندی انجام شده. (ج) شکل موج جذب با تغییر اندازه شعاع حفره ایجاد شده در مرکز ساختار

مشابه، جدول ۳ ارائه شده است. در آینده، لازم است که برنامه‌ریزی‌هایی برای طراحی ساختارهایی با حساسیت بالاتر به منظور شناسایی انواع مختلف ویروس‌ها و سلول‌های سرطانی و غیره انجام شود.



(الف)



(ب)

شکل (۶-الف) - ساختار حسگر زیستی با استفاده از جاذب فرکانسی پیشنهادی. (ب) موج جذب در ضریب شکست‌های متفاوت

جدول ۲ - مقادیر حساسیت، FWHM، جذب و فرکانس تشدید باند اول و سوم استخراج شده از شکل موج جذب

حساسیت	FWHM	جذب	فرکانس تشدید (THz)
-	۱۸۶	۰.۹۸۳	۴.۹۹
باند اول	۴۸۹	۰.۹۴۴	۴.۹۴
	۵۹۴	۰.۹۸۳	۴.۸۷
	۵۶۲	۰.۹۷۹	۴.۸۲
	۴۹۳	۰.۹۵۶	۴.۷۹
باند سوم	۲۱۳	۰.۹۹۴	۱۰.۴۷
	۹۹۴	۰.۹۹۱	۱۰.۳۷
	۷۰۰	۰.۹۹۲	۱۰.۳۳
	۸۰۰	۰.۹۹۱	۱۰.۲۳
	۸۰۰	۰.۹۹۴	۱۰.۱۵

انجام شود. مقادیر جذب طرح پیشنهادی نیز می‌توانند با استفاده از یک سیستم طیف‌سنجی دامنه زمان در ناحیه THz اندازه‌گیری شوند.

۳-۳- پیشنهاد استفاده از ساختار به عنوان حسگر

زیستی

با توجه به شکل (۶-الف)، می‌توان از این ساختار به عنوان حسگر زیستی بهره برد. حساسیت یک سیگنال به توانایی آن در شناسایی و واکنش به تغییرات جزئی در کمیت فیزیکی که برای اندازه‌گیری آن طراحی شده، اشاره دارد. حساسیت سنسور یکی از ویژگی‌های کلیدی است، زیرا دقت و صحت اندازه‌گیری‌های آن را در مقادیر فیزیکی تعیین می‌کند. سنسوری که دارای حساسیت بالا باشد، به تغییرات کوچک در سیگنال ورودی، تغییرات قابل توجهی در خروجی خود نشان می‌دهد و این امر امکان اندازه‌گیری دقیق‌تر با حاشیه‌های خطای کمتر را فراهم می‌آورد. همچنین، در شکل (۶-ب)، شکل موج جذب در باندهای اول و سوم به صورت منظم و با افزایش ضریب شکست آنالیت به فاصله ۰.۰۵ میکرومتر بر روی ساختار جاذب پیشنهادی قرار داده شده است. ضریب شکست‌های مختلف شامل ۱.۳، ۱.۲، ۱.۱ و ۱.۴ برای تحلیل ماده در نظر گرفته شده‌اند. این ضریب شکست‌های متفاوت ناشی از غلظت‌های مختلف یک نوع آنالیت برای شناسایی است. معمولاً باندی که خروجی منظم‌تری با بالاترین حساسیت دارد، انتخاب می‌شود.

در ساختار پیشنهادی علاوه بر حساسیت بالای ساختار، ناهمپوشانی که بین موج‌های جذب وجود دارد در تشخیص بهتر آنالیت از مزیت‌های قابل توجه به حساب می‌آید. حساسیت از تغییر فرکانس تشدید ناشی از تغییر ضریب شکست آنالیتی و با رابطه $S = (\Delta F)/(\Delta n) \text{ GHz / RIU}$ تعریف می‌شود [۲۷].

ضریب کیفیت بالاتر نشان‌دهنده حداقل همپوشانی سیگنال جذب است و هرچه این همپوشانی کمتر باشد، دقت تشخیص افزایش می‌یابد و این ویژگی آن را به گزینه‌ای ایده‌آل برای اهداف بیولوژیکی تبدیل می‌کند. پارامترهای مهم در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

حداکثر حساسیت به دست آمده برابر با ۹۹۴ GHz/RIU بود که در مقایسه با سایر تحقیقات مرتبط، مقدار مناسبی برای کاربردهای حسگر محسوب می‌شود. برای مقایسه با کارهای

جدول ۳ - مقایسه خروجی ساختار پیشنهادی با کارهای قبلی

Refs	Ns	فرکانس (THz)	FWHM (GHz)	حساسیت (GHz/RIU)	ضریب کیفیت
[۲۷]	۱.۸	۰.۸۱	-	۲۴۰	۳.۴۵
[۲۸]	۱.۳۳	۱.۸۵	۱۴۰	۴۲۳	۱۳.۲
[۲۹]	۱.۶	۱.۹۴	۳۰۰	۳۰۰	۶.۴۶
[۳۰]	۱.۶	۱.۹۶۵	۹۰.۵۳	۸۳۶.۳۳	۲۱.۷۱
ساختار پیشنهادی	۱.۱	۱۰.۳۷	۲۰.۵	۹۹۴	۵۲.۵

جاذب، قابلیت عملی بودن این ساختار را افزایش می‌دهد و می‌تواند فرآیند ساخت سنسور را تسهیل کند. همچنین، با وجود تنوع در ابعاد انتخابی و پتانسیل شیمیایی، این طرح آزادی عمل بالایی برای انواع کاربردها فراهم می‌آورد که از ویژگی‌های منحصر به فرد آن به شمار می‌رود. با توجه به این مزایا، ساختار پیشنهادی می‌تواند به عنوان گزینه‌ای ایده‌آل برای حسگرهای زیستی در نظر گرفته شود.

تعارض منافع

نویسندگان مقاله تایید می‌کنند که هیچگونه تعارض منافع مالی، حرفه‌ای یا شخصی که بر نتایج یا تفسیر پژوهش تاثیر بگذارد، وجود ندارد.

تاییدیه اخلاقی

نویسندگان مقاله متعهد می‌شوند که این مقاله را در هیچ مجله دیگری به چاپ نرسانده اند.

مشارکت‌های نویسندگان

یوسف رفیق ایرانی: روش‌شناسی، جمع‌آوری داده‌ها، انجام شبیه سازی ها، تحلیل نتایج، نگارش و تهیه پیش‌نویس

جواد جاویدان: تعریف مسئله، راهنمایی علمی، ویرایش تخصصی و نگارشی مقاله، ارزیابی و تفسیر نتایج

حمید حیدرزاده: راهنمایی علمی، ویرایش تخصصی و نگارشی مقاله، اعتبارسنجی نتایج

منابع مالی

ندارد.

۴- نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، دقت در شناسایی مولکول‌ها، سلول‌ها، آنتی‌ژن‌ها و ... در تشخیص بیماری‌هایی نظیر سرطان و بیماری‌های ویروسی و باکتریایی از اهمیت بالایی برخوردار است. افزایش دقت روش‌های تشخیصی نه تنها زمان لازم را کاهش می‌دهد، بلکه ارزش آن‌ها را نیز افزایش می‌دهد، به ویژه زمانی که این دقت با هزینه مناسب و قابلیت حمل همراه باشد. در این مقاله، یک ساختار ناهمگن برای طراحی یک جاذب چند باند به عنوان حسگر زیستی در محدوده تراهترز پیشنهاد شده است که از استقلال قطبش بهره می‌برد. حساسیت به دست آمده در باند سوم برابر با $994 \text{ GHz} / \text{RIU}$ است که نسبت به کارهای قبلی گزارش شده، حساسیت بالاتری دارد. علاوه بر این، در شرایط مختلف، حداقل همپوشانی بین دو قله جذب نزدیک به هم مشاهده می‌شود. ساختار پیشنهادی دارای ضریب کیفیت بالایی در حدود ۵۲.۵ است و عدم حساسیت به قطبش

مراجع

- [1] Kshetrimayum, Rakshesh S. "A brief intro to metamaterials." IEEE potentials 23, no. 5 (2004): 44-46.
- [2] Norouzi-Razani, Amirhossein, and Pejman Rezaei. "Multiband polarization insensitive and tunable terahertz metamaterial perfect absorber based on the heterogeneous structure of graphene." Optical and Quantum Electronics 54, no. 7 (2022): 407.
- [3] Valentine, Jason, Shuang Zhang, Thomas Zentgraf, Erick Ulin-Avila, Dentcho A. Genov, Guy Bartal, and Xiang Zhang. "Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index." nature 455, no. 7211 (2008): 376-379.
- [4] Zhao, Fei, Jiangchuan Lin, Zhenhua Lei, Zao Yi, Feng Qin, Jianguo Zhang, Li Liu, Xianwen Wu, Wenxing Yang, and Pinghui Wu. "Realization of 18.97% theoretical efficiency of 0.9 μm thick c-Si/ZnO heterojunction ultrathin-film solar cells via surface plasmon resonance enhancement." Physical Chemistry Chemical Physics 24, no. 8 (2022): 4871-4880.
- [5] Zheng, Zhipeng, Ying Zheng, Yao Luo, Zao Yi, Jianguo Zhang, Zhimin Liu, Wenxing Yang, Yang Yu, Xianwen Wu, and Pinghui Wu. "A switchable terahertz device combining ultra-wideband absorption and ultra-wideband complete reflection." Physical chemistry chemical physics 24, no. 4 (2022): 2527-2533.

- [6] Wu, Xianglong, Ying Zheng, Yao Luo, Jianguo Zhang, Zao Yi, Xianwen Wu, Shubo Cheng, Wenxing Yang, Yang Yu, and Pinghui Wu. "A four-band and polarization-independent BDS-based tunable absorber with high refractive index sensitivity." *Physical Chemistry Chemical Physics* 23, no. 47 (2021): 26864-26873.
- [7] Ghods, Mohammad Mahdi, and Pejman Rezaei. "Graphene-based Fabry-Perot resonator for chemical sensing applications at mid-infrared frequencies." *IEEE Photonics Technology Letters* 30, no. 22 (2018): 1917-1920.
- [8] Zamzam, Pouria, Pejman Rezaei, and Seyed Amin Khatami. "Quad-band polarization-insensitive metamaterial perfect absorber based on bilayer graphene metasurface." *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 128 (2021): 114621.
- [9] Landy, Nathan I., Soji Sajuyigbe, Jack J. Mock, David R. Smith, and Willie J. Padilla. "Perfect metamaterial absorber." *Physical review letters* 100, no. 20 (2008): 207402.
- [10] Fang, Panpan, Xinwei Shi, Chang Liu, Xiang Zhai, Hongjian Li, and Lingling Wang. "Single-and dual-band convertible terahertz absorber based on bulk Dirac semimetal." *Optics Communications* 462 (2020): 125333.
- [11] Zhong, Min, Xiaoting Jiang, Xuliang Zhu, Jin'an Chen, Shunxin Wu, Jing Zhang, Jinglin Zhong et al. "Design and measurement of a single-dual-band tunable metamaterial absorber in the terahertz band." *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 124 (2020): 114343.
- [12] Wu, Jun, Xiayin Liu, and Zhe Huang. "Broadband light absorption with doped silicon for the terahertz frequency." *Optics & Laser Technology* 119 (2019): 105657.
- [13] Song, Zhengyong, Mingwei Jiang, Yide Deng, and Apeng Chen. "Wide-angle absorber with tunable intensity and bandwidth realized by a terahertz phase change material." *Optics Communications* 464 (2020): 125494.
- [14] Xu, Jianping, Jiayun Wang, Rongcao Yang, Jinping Tian, Xinwei Chen, and Wenmei Zhang. "Frequency-tunable metamaterial absorber with three bands." *Optik* 172 (2018): 1057-1063.
- [15] Ma, Ben, Shaobin Liu, Borui Bian, Xiangkun Kong, Haifeng Zhang, Zhiwen Mao, and Beiyin Wang. "Novel three-band microwave metamaterial absorber." *Journal of Electromagnetic Waves and Applications* 28, no. 12 (2014): 1478-1486.
- [16] Hu, Fangrong, Li Wang, Baogang Quan, Xinlong Xu, Zhi Li, Zhongan Wu, and Xuecong Pan. "Design of a polarization insensitive multiband terahertz metamaterial absorber." *Journal of Physics D: Applied Physics* 46, no. 19 (2013): 195103.
- [17] Wang, Ben-Xin, Gui-Zhen Wang, Tian Sang, and Ling-Ling 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* 7, no. 1 (2017): 41373.
- [18] Akter, Naznin, Muhammad Mahmudul Hasan, and Nezih Pala. "A review of THz technologies for rapid sensing and detection of viruses including SARS-CoV-2." *Biosensors* 11, no. 10 (2021): 349.
- [19] Hou, Xinfu, Xieyu Chen, Tianming Li, Yaoyao Li, Zhen Tian, and Mingwei Wang. "Highly sensitive terahertz metamaterial biosensor for bovine serum albumin (BSA) detection." *Optical Materials Express* 11, no. 7 (2021): 2268-2277.
- [20] Veeraselvam, Aruna, Gulam Nabi Alsath Mohammed, and Kirubaveni Savarimuthu. "A novel ultra-miniaturized highly sensitive refractive index-based terahertz biosensor." *Journal of Lightwave Technology* 39, no. 22 (2021): 7281-7287.
- [21] Park, S. J., S. H. Cha, G. A. Shin, and Y. H. Ahn. "Sensing viruses using terahertz nano-gap metamaterials." *Biomedical optics express* 8, no. 8 (2017): 3551-3558.
- [22] Ahmed, Kawsar, Fahad Ahmed, Subrata Roy, Bikash Kumar Paul, Mst Nargis Aktar, Dhasarathan Vigneswaran, and Md Saiful Islam. "Refractive index-based blood components sensing in terahertz spectrum." *IEEE Sensors Journal* 19, no. 9 (2019): 3368-3375.
- [23] Shalini, V. Baby. "A polarization insensitive miniaturized pentaband metamaterial THz absorber for material sensing applications." *Optical and Quantum Electronics* 53, no. 5 (2021): 213.
- [24] Tahseen, Muhammad M., and Ahmed A. Kishk. "Wideband textile-based conformal antennas for WLAN band using conductive thread." In *2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-5. IEEE, 2016.
- [25] Chen, Pai-Yen, and Andrea Alu. "Atomically thin surface cloak using graphene monolayers." *ACS nano* 5, no. 7 (2011): 5855-5863.

- [26] Deng, Xin-Hua, Jiang-Tao Liu, Jiren Yuan, Tong-Biao Wang, and Nian-Hua Liu. "Tunable THz absorption in graphene-based heterostructures." *Optics Express* 22, no. 24 (2014): 30177-30183.
- [27] Cheng, Ruijian, Ling Xu, Xin Yu, Liner Zou, Yun Shen, and Xiaohua Deng. "High-sensitivity biosensor for identification of protein based on terahertz Fano resonance metasurfaces." *Optics Communications* 473 (2020): 125850.
- [28] Veeraselvam, Aruna, Gulam Nabi Alsath Mohammed, Kirubaveni Savarimuthu, and Radha Sankararajan. "A novel multi-band biomedical sensor for THz regime." *Optical and Quantum Electronics* 53, no. 7 (2021): 354.
- [29] Nourinovin, Shohreh, and Akram Alomainy. "A terahertz electromagnetically induced transparency-like metamaterial for biosensing." In *2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*, pp. 1-5. IEEE, 2021.
- [30] El-Wasif, Zienab, Tawfik Ismail, and Omnia Hamdy. "Design and optimization of highly sensitive multi-band terahertz metamaterial biosensor for coronaviruses detection." *Optical and Quantum Electronics* 55, no. 7 (2023): 604.