

## Journal of Modeling in Engineering

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

ISSN: 2783-2538



#### Type of Article (e.g. Research Article)

# A complete multi-band terahertz absorber graphene structure

## with frequency tunable and polarization-independent for use in

## biosensors

Yousef Rafigirani 🐿, Javad Javidan 🅬 Hamid Heidarzadeh 🍋

<sup>a</sup> Department of Electrical Engineering,, University of Mohaghegh Ardabili

#### PAPER INFO

#### ABSTRACT

#### Paper history:

Received: 2022-03-13 Revised: 2022-05-12 Accepted: 2022-10-19

#### Keywords:

Type your keywords here in separate lines Biosensor; Graphen heterogeneous structure; Terahertz; Metamaterial; refractive index 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/

© 2024 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/)

<sup>\*</sup> Corresponding author.

E-mail address: email of correponding author

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

	<b>J</b>
چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مقاله، یک ساختار ناهمگن از گرافن به عنوان جاذب کامل چند باندی 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 میباشد. با تغییر ابعاد لایههای زیرین و شکل هندسی برشهای گرافن، میتوان تعداد باندها، کیفیت و میزان جذب را تنظیم کرد. همچنین، با تغییر پتانسیل شیمیایی گرافن، امکان تنظیم فرکانسهای جذب به مقادیر دلخواه وجود دارد. این ساختار میتواند در حسگرهای بیولوژیکی برای شناسایی پروتئینها، ویروسها و سلولهای سرطانی، همچنین در گاربردهای مخابراتی و تصویربرداری مورد استفاده قرار گیرد. برشهای هندسی گرافن در فرکانسهای ۲۰۹۲ تر ۲۰۲۲ استاده و میزان جذب به مقادیر دلخواه منطانی، همچنین در گاربردهای مخابراتی و تصویربرداری مورد استفاده قرار گیرد. برشهای منطانی، همچنین در گاربردهای مخابراتی و معیربرداری مورد استفاده قرار گیرد. برشهای مناختار میتواند در حسگرهای بیولوژیکی برای شناسایی پروتئینها، ویروسها و سلولهای منطانی، همچنین در گاربردهای مخابراتی و تصویربرداری مورد استفاده قرار گیرد. برشهای مندسی گرافن در فرکانسهای ۲۰۹۲ ۲۲ مراد به دست آوردهاند. قرار دادن آنالیت بر روی مدرب شکتار پیشنهادی موجب تغییر در مقادیر فرکانس جذب میشود که این تغییر به دلیل تفاوتهای ضریب شکست مواد مختلف است. از این ویژگی مهم در طراحی حسگرهای زیستی بهرمبرداری شده است. بالاترین میزان حساسیت در باند سوم ۹۲۱۲ ای میگرهای زیستی بهرمبرداری شده است. بالاترین میزان حساسیت در باند سوم ۹۲۲ الا می به جای طلا، و همچنین مقایسه نتایج این به ساختار ساده متشکل از سه لایه و استفاده از مین به جای طلا، و همچنین مقایسه نتایج این به ساختار ساده متشکل از سه لایه و استفاده از مین به جای طلا، و همچنین مقایسه نتایج این ویژگیهای کلیدی این سازه این است که به قطبی شدن حساس نیست. شبیهسازیها با استفاده ویژگیهای کلیدی این سازه این است که به قطبی شدن حساس نیست. شبیهسازیها با استفاده از نرمافزار شبیهسازی کامپیوتری (CST) انجام شده است.	دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۳/۲۰ بازنگری مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۵ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۱۵ واژگان کلیدی: حسگر زیستی، ساختار ناهمگن گرافن، تراهرتز، فراماده، ضریب شکست

## یوسف رفیق ایرانی<sup>۱</sup>، جواد جاویدان<sup>۲</sup>\* و حمید حیدرزاده<sup>۳</sup>

DOI: https://doi.org/

© 2024 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/)

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 پژوه شگران در حوزه الکترومغناطیس به فراماده ها جلب شده است [۲]. فرامواد دارای ویژگی های خاصی مانند ضریب شکست منفی

#### ۱–مقدمه

با پیشرفت فناوری در زمینههای ارتباطات و پزشکی، نیاز به استفاده از محدوده فرکانسی تراهرتز و توسعه ابزار و دستگاههای تشخیصی در این حوزه به شدت احساس میشود. متامتریالها یا فرامادهها این امکان را فراهم میآورند که دستگاههای اندازه گیری و تشخیص در محدوده

<sup>\*</sup> پست الكترونيك نويسنده مسئول: Javidan@uma.ac.ir

۱. دانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه محقق اردبیلی

۲. دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه محقق اردبیلی

۳. دانشیار ، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه محقق اردبیلی

**استناد به این مقاله**: نحوه استناد فارسی در اینجا درج گردد.

[۳]هستند که در طراحی جاذبهای انرژی خورشیدی[۴]، سوئیچها در محدوده تراهرتز[۵] و سنسورهای مبتنی بر 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 اتمى كربن ساخته مىشود. اين ورقهها داراى شش ضلعىهاى منظم هستند كه بين صفحات خود پيوندهاى واندروالسی (پیوندهای شیمیایی نسبتاً ضعیف) دارند. با شکستن این پیوندها، همان طور 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 كوچك و خواص دو بعدى، همچنين رسانايي بالا و قابلیت تنظیم، گرافن در ساختارهای متناوبی 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 می کند [۸]. متاماده ای 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 می گیرند و یک ساختار واحد را تشکیل میدهند [۱۴]، [۱۵].

ساختار پیشنهادی در این مقاله بر اساس یک ایده خاص طراحی شده است. روش دوم شامل ساختارهای چند لایه متناوب است که به صورت عمودی روی هم قرار گرفتهاند [۱۶]، [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 فرمواد، به ویژه در تشخیص ویروسها بر اساس

تحقیقات متعددی در چند دهه اخیر نشان دادهاند که بسیاری از بیومواد، از جمله پروتئینها و ویروسها، قادر به انتقال يا جذب امواج THz هستند [19]، [70]. مطالعات گستردهای برای شناسایی میکروارگانیسمها 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

 $\sigma_{\text{intere}}(\omega, \tau, \mu_c, T) = -j \frac{e^2}{\pi \hbar^2 (\omega - j \tau^{-1})} \ln\left(\frac{2\mu_c}{K_B T}\right) + \sigma_{\text{inter}}(\omega, \tau, \mu_c, T) + \sigma_{\text{inter}}(\omega, \tau, \mu_c, T)$   $(\gamma)$   $\sigma_{\text{inter}}(\omega, \tau, \mu_c, T) = -j \frac{e^2 K_B T}{\pi \hbar^2 (\omega - j \tau^{-1})} \left(\frac{\mu_c}{K_B T} + 2\ln\left(\exp\left(-\frac{\mu_c}{K_B T}\right) + 1\right)\right)$ 

در معادلات فوق ۵۵، فرکانس زاویه ای، ۲۰ زمان آرآمش،  $\mu$ پتانسیل شیمیایی گرافن، T، دما بر حسب کلوین (در این مقاله مقدار CT=300k، ثابت بار الکتریکی بولتزمن، ثابت کاهش یافته پلانک تعریف شده است. با توجه به اصل طرد پاولی،  $K_BT \gg K_B$ از آنجایی که در باند فروسرخ تراهرتز

0.142nm

است، بخش بین باندی در گرافن را می توان نادیده گرفت





شکل۱- ساختار گرافن وپیوند کووالانسی بین لایه های گرافن نشان داده شده است.

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

۳- بحث در مورد طراحی ساختار جاذب

فركانسي چند باندي 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 زیستسازگار در قسمت بالایی قرار می گیرد که دارای یک گیرنده زیستی برای جداسازی آنالیت میباشد. لایه آنالیت برای تشخیص میتواند شامل آنزیمها، آنتیژنها، پروتئینها، سموم یا ویروسها باشد. مکانیسم جذب در این جاذبهای چندلایه به گونهای است که آخرین لایه به عنوان یک رسانا عمل کرده و از خروج تابش از ساختار جلوگیری میکند، در حالی که لایه دی الكتريك بين گرافن و هادي قرار دارد. اين طراحي اطمينان میدهد که امواج منعکس شده از داخل ساختار با اختلاف فاز ایجاد شده یکدیگر را خنثی کرده و جذب کامل حاصل می شود. یکی از ویژگیهای قابل توجه این ساختار، عدم حساسیت آن به قطبش است [۲۳]. برای دستیابی به ساختار نهایی، فرآیند کار به صورت مرحلهای از یک ساختار ساده آغاز می شود و شرایط مختلف از نظر ابعاد و پارامترها مورد بررسی قرار می گیرد تا ساختار پیچیدهتری طراحی شود. هدف اصلی در تمامی طرحها، دستیابی به حداکثر جذب، کیفیت بالا و حساسیت بالا است. طراحی و تحلیل

با بهره گیری از نرمافزار شبیه سازی کامپیوتری (CST) انجام می شود و تمامی پارامترهای ابعادی بهینه انتخاب می گردند. در تمامی طرح ها مقدار رسانایی هادی (مس) می گردند. در تمامی طرح ها مقدار رسانایی هادی (مس) ایک S / m[75] و برای لایه دی الکتریک دی اکسید سیلیکون،3.9 = r ضریب عبور [76]، الکتریک دی اکسید سیلیکون،3.9 = r ضریب عبور [70]، 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، دیاکسید سیلیکون به عنوان لایه دیالکتریک میانی و یک صفحه مسى به عنوان لايه زيرين قرار گرفتهاند. عرض نوار و ضخامت لایه های دی کسید سیلیکون و مس به منظور دستیابی به حداکثر جذب، متفاوت انتخاب شدهاند. هدف از این ساختار، دستیابی به فرکانسهای جذب چندباندی است. این طراحی از سه بخش گرافن با پتانسیلهای شیمیایی مختلف، شامل ۸۰۰ میلیولت، ۶۰۰ میلیولت و ۴۰۰ میلیولت استفاده می کند. این طرح به منظور تولید باندهای فرکانسی متمایز با اعمال پتانسیلهای 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 فرکانسهای مختلف را فراهم میآورد.

در دومین ساختار مورد بررسی که در شکل ۳(الف) نمایش داده شده است، از گرافن به صورت دایرهای با یک پتانسیل شیمیایی خاص استفاده شده است. این ساختار با پتانسیل شیمیایی ثابت، امکان تولید باندهای فرکانسی مجزا را فراهم میآورد. برخی از این باندها دارای میزان جذب بالایی هستند، در حالی که باندهای دیگر این ویژگی را ندارند. با

۵

تغییر شعاع گرافن دایرهای در ناحیه مشخص شده، میتوان



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.





(الف)

شکل۳(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 پریودیک به همراه مش بندی طرح پیشنهادی 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 می دهد که در ساختار پیشنهادی، بالاترین مقدار جذب و تعداد بیشتری از باندها شکل۲-(الف)ساختار جاذب فرکانی باسه 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 شبیه سازی 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 می سازد. 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 می دهد.



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

کيفيت	ضريب	FWHM و	فركانس تشديد	۱ — مقادیر	جدول
		منشنماده	ت آمده از ساختا		

بناسف المنادار ساحفار پيستهادي				
باند فرکانسی	فرکانس تشدید (THz)	جذب	FWHM (GHz)	ضريب كيفيت
باند اول	4.99	0.996	١٨١	۲۷.۵
باند دوم	9.21	0.993	١٨٩	41.9
باند سوم	10.5	0.996	۲۰۰	۵۲.۵
باند چهارم	11.17	0.947	101	۴۴.۵
-	•	-		

۲-۲-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 تراهرتز، دستیابی به استقلال قطبش برای کاربردهای عملی از اهمیت بالایی برخوردار است، زیرا این ویژگی عملکرد ثابت را بدون توجه به جهت تابش تراهرتز ورودی تضمین میکند. این قابلیت به ویژه در پایدار و قابل اعتماد به سیگنالهای تراهرتز 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. مقاله

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. همان طور که در جدول ۱ مشاهده می شود، 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 می سازد در بخش بعد، نمونهای از حسگر زیستی با استفاده از ساختار پیشنهادی طراحی شده و میزان حساسیت آن محاسبه خواهد شد.



(الف)



(ب)



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 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 انجام شود. مقادیر جذب طرح پیشنهادی نیز میتوانند با استفاده از یک سیستم طیفسنجی دامنه زمان در ناحیه THz اندازه گیری 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 اندازه گیری آن طراحی شده، اشاره دارد. حساسیت سنسور یکی از ویژگیهای کلیدی است، زیرا دقت و صحت اندازه گیریهای آن را در مقادیر فیزیکی تعیین میکند. سنسوری که دارای حساسیت بالا باشد، به تعییرات کوچک در سیگنال ورودی، تغییرات قابل توجهی تغییرات کوچک در سیگنال ورودی، تغییرات قابل توجهی در خروجی خود نشان میدهد و این امر امکان اندازه گیری دقیق تر 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 ۲۰۰۵ میکرومتر بر روی ساختار جاذب پیشنهادی

قرار داده شده است. ضریب شکستهای مختلف شامل ۱.۳، قرار داده شده است. ضریب شکستهای مختلف شامل ۱.۳، نام ۱.۴ 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 منظم تری با بالاترین حساسیت دارد، انتخاب می شود. در ساختار پیشنهادی علاوه بر حساسیت بالای ساختار، ناهمپوشانی که بین موج های جذب وجود دارد در تشخیص ناهمپوشانی که بین موج های جذب وجود دارد در تشخیص بهتر آنالیت از مزیت های قابل توجه به حساب می آید. حساسیت از تغییر فرکانس تشدید ناشی از تغییر ضریب شکست آنالیتی و با رابطه GHz / RIU ( $\Delta$ ) ( $\Delta$ ) = 3



شکل۶-(الف) ساختار حسگر زیستی با استفاده از جاذب فرکانسی پیشنهادی.(ب) موج جذب در ضریب شکست های متفاوت

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 بهدستآمده برابر با۹۹۴ GHz/RIU بود که در مقایسه با سایر تحقیقات مرتبط، مقدار مناسبی برای کاربردهای سایر تحقیقات مرتبط، مقدار مناسبی برای کاربردهای حسگر محسوب میشود. برای مقایسه با کارهای 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.

جدول ۳ – مقایسه خروجی ساختار پیشنهادی با کارهای قبلی

-			-		
Refs	Ns	فركانس	FWHM	حساسيت	ضريب
iters	115	(THz)	(GHz)	(GHz/RIU)	كيفيت
[27]	1.8	0.81	-	240	3.45
[28]	1.33	1.85	140	423	13.2
[29]	1.6	1.94	300	300	6.46
[30]	1.6	1.965	90.53	836.33	21.71
ساختار پیشنهادی	1.1	10.37	205	994	52.5

#### ۴-نتیجه گیری

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 بانده به عنوان حسگر زیستی در محدوده

#### مراجع

R. S. Kshetrimayum, "A brief intro to metamaterials," *IEEE potentials*, vol. 23, no. 5, pp. 44–46, 2004.
A. Norouzi-Razani and P. Rezaei, "Multiband polarization insensitive and tunable terahertz metamaterial perfect absorber based on the heterogeneous structure of graphene," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 54, no. 7, p. 407, 2022.

[3] J. Valentine *et al.*, "Three-dimensional optical metamaterial with a negative refractive index," *nature*, vol. 455, no. 7211, pp. 376–379, 2008.

[4] F. Zhao *et al.*, "Realization of 18.97% theoretical efficiency of 0.9 μm thick c-Si/ZnO heterojunction ultrathinfilm solar cells via surface plasmon resonance enhancement," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 24, no. 8, pp. 4871–4880, 2022.

ت،FWHM،جذب و فرکانس تشدید باند	جدول۲-مقادیر حساسین
--------------------------------	---------------------

اول و سوم استخراج شده از شکل موج جذب				
	فركانس تشديد	جذب	FWHM	حساسيت
	(THz)			
	4.99	0.983	۱۸۶	-
باند	4.94	0.944	204	489
اول	4.87	0.983	198	594
	4.82	0.979	199	562
	4.79	0.956	203	493
	10.47	0.994	212	-
باند سوم	10.37	0.991	205	994
	10.33	0.992	198	700
	10.23	0.991	194	800
	10.15	0.994	199	800

تراهرتز پیشنهاد شده است که از استقلال قطبش بهره می برد. حساسیت به دست آمده در باند سوم برابر با ۹۹۴GHz / 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 می شود. ساختار پیشنهادی دارای ضریب کیفیت بالایی در حدود ۵۲.۵ است و عدم حساسیت به قطبش جاذب، قابلیت عملی بودن این ساختار را افزایش میدهد و می تواند 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 می تواند به عنوان گزینهای ایدهآل برای حسگرهای زیستی در نظر گرفته شود. تعارض منافع نویسنده اعلام می کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

[5] Z. Zheng *et al.*, "A switchable terahertz device combining ultra-wideband absorption and ultra-wideband complete reflection," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 24, no. 4, pp. 2527–2533, 2022.

[6] X. Wu *et al.*, "A four-band and polarization-independent BDS-based tunable absorber with high refractive index sensitivity," *Physical Chemistry Chemical Physics*, vol. 23, no. 47, pp. 26864–26873, 2021.

[7] M. M. Ghods and P. Rezaei, "Graphene-based Fabry-Perot resonator for chemical sensing applications at midinfrared frequencies," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 30, no. 22, pp. 1917–1920, 2018.

[8] P. Zamzam, P. Rezaei, and S. A. Khatami, "Quad-band polarization-insensitive metamaterial perfect absorber based on bilayer graphene metasurface," *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*, vol. 128, p. 114621, 2021.

[9] N. I. Landy, S. Sajuyigbe, J. J. Mock, D. R. Smith, and W. J. Padilla, "Perfect metamaterial absorber," *Physical review letters*, vol. 100, no. 20, p. 207402, 2008.

[10] 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, p. 125333, 2020.

[11] M. 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*, vol. 124, p. 114343, 2020.

[12] J. Wu, X. Liu, and Z. Huang, "Broadband light absorption with doped silicon for the terahertz frequency," *Optics & Laser Technology*, vol. 119, p. 105657, 2019.

[13] 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, p. 125494, 2020.

[14] J. Xu, J. Wang, R. Yang, J. Tian, X. Chen, and W. Zhang, "Frequency-tunable metamaterial absorber with three bands," *Optik*, vol. 172, pp. 1057–1063, 2018.

[15] B. Ma *et al.*, "Novel three-band microwave metamaterial absorber," *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 28, no. 12, pp. 1478–1486, 2014.

[16] F. Hu *et al.*, "Design of a polarization insensitive multiband terahertz metamaterial absorber," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 46, no. 19, p. 195103, 2013.

[17] 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, no. 1, p. 41373, 2017.

[18] N. Akter, M. M. Hasan, and N. Pala, "A review of THz technologies for rapid sensing and detection of viruses including SARS-CoV-2," *Biosensors*, vol. 11, no. 10, p. 349, 2021.

[19] X. Hou, X. Chen, T. Li, Y. Li, Z. Tian, and M. Wang, "Highly sensitive terahertz metamaterial biosensor for bovine serum albumin (BSA) detection," *Optical Materials Express*, vol. 11, no. 7, pp. 2268–2277, 2021.

[20] A. Veeraselvam, G. N. A. Mohammed, and K. Savarimuthu, "A novel ultra-miniaturized highly sensitive refractive index-based terahertz biosensor," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 39, no. 22, pp. 7281–7287, 2021.

[21] S. J. Park, S. H. Cha, G. A. Shin, and Y. H. Ahn, "Sensing viruses using terahertz nano-gap metamaterials," *Biomedical optics express*, vol. 8, no. 8, pp. 3551–3558, 2017.

[22] K. Ahmed *et al.*, "Refractive index-based blood components sensing in terahertz spectrum," *IEEE Sensors Journal*, vol. 19, no. 9, pp. 3368–3375, 2019.

[23] V. B. Shalini, "A polarization insensitive miniaturized pentaband metamaterial THz absorber for material sensing applications," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 53, pp. 1–14, 2021.

[24] M. M. Tahseen and A. A. Kishk, "Wideband textile-based conformal antennas for WLAN band using conductive thread," in 2016 10th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), IEEE, 2016, pp. 1–5.

[25] P.-Y. Chen and A. Alu, "Atomically thin surface cloak using graphene monolayers," ACS nano, vol. 5, no., 2011.

[26] X.-H. Deng, J.-T. Liu, J. Yuan, T.-B. Wang, and N.-H. Liu, "Tunable THz absorption in graphene-based heterostructures," *Optics Express*, vol. 22, no. 24, pp. 30177–30183, 2014.

[27] R. Cheng, L. Xu, X. Yu, L. Zou, Y. Shen, and X. Deng, "High-sensitivity biosensor for identification of protein based on terahertz Fano resonance metasurfaces," *Optics Communications*, vol. 473, p. 125850, 2020.

[28] A. Veeraselvam, G. N. A. Mohammed, K. Savarimuthu, and R. Sankararajan, "A novel multi-band biomedical sensor for THz regime," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 53, pp. 1–20, 2021.

[29] S. Nourinovin and A. Alomainy, "A terahertz electromagnetically induced transparency-like metamaterial for biosensing," in 2021 15th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), IEEE, 2021, pp. 1–5.

[30] Z. El-Wasif, T. Ismail, and O. Hamdy, "Design and optimization of highly sensitive multi-band terahertz metamaterial biosensor for coronaviruses detection," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 55, no. 7, p. 604, 2023.