



Semnan University

Journal of Modeling in Engineering

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

ISSN: 2783-2538



Research Article

Two-Band Graphene Based Polarization-Independent Full Absorber as a Biosensor

Alireza Pilehroudi ^a, Javad Javidan ^{a,*}, Yousef Rafiq Irani ^a, Hamid Heidarzadeh ^a

^a Department of Electrical Engineering, University of Mohaghegh Ardabili, Ardabil, Iran

PAPER INFO

Paper history:

Received: 2024-06-02

Revised: 2025-03-13

Accepted: 2025-04-06

Keywords:

Biosensor;
Graphene
heterogeneous;
Metamaterial;
Refractive index;
Terahertz.

ABSTRACT

In this paper, the cut structure of polarization-independent two-band perfect absorbing graphene is proposed. The proposed structure consists of three layers of gold, silicon dioxide and a cut graphene layer and analyte. By changing the size of the layers and the shape of the graphene slices, the number of bands can be changed, and by changing the values of the chemical potential and the relaxation time of the graphene, the quality and amount of absorption can be changed, while the absorption wavelength can be adjusted to the desired value with the mentioned parameters. This structure is very suitable as a biosensor for detecting viruses, proteins and cancer cells, imaging and filtering telecommunication waves according to the results of the proposed structure. According to the cuts made on graphene at wavelengths of 24581 nm and 27640 nm, absorption values of 99.9 and 99.9% were obtained, respectively. The presence of different refractive index of the elements with the placement of the analyte on the designed structure causes the displacement of the absorbed wavelength values and the type of the placed element can be recognized using the wavelength values, which is the basis of biosensor work. The highest sensitivity value is obtained in the second band of RIU48200/nm, which can be the best option for making a biosensor due to the simple structure consisting of three layers and by comparing the output values of this research with previous research. Another important feature of this structure is that it is not sensitive to polarization. The simulations have been done in computer simulation software (CST).

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.34256.2675>

© 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:

A. Pilaroodi, J. Javidan, Y. Rafiqirani and H. Heidarzadeh, "Two-band graphene-based polarization-independent full absorber as a biosensor," Journal of Modeling in Engineering, 23 83 (2025): 121-132, doi: 10.22075/jme.2025.34256.2675

ساختار جاذب کامل گرافنی دو بانندی مستقل از قطبش جهت استفاده در حسگرهای زیستی

علیرضا پیله رودی^۱، جواد جاویدان^{۱*}، یوسف رفیق ایرانی^۱، و حمید حیدرزاده^۱

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۳/۱۳ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۱۲/۲۳ پذیرش مقاله: ۱۴۰۴/۰۱/۱۷	در این مقاله، ساختار برش یافته گرافنی جاذب کامل دو بانندی مستقل از پلاریزاسیون پیشنهاد شده است. ساختار پیشنهادی از سه لایه طلا، دی اکسید سیلیکون و لایه گرافنی برش یافته و آنالیت تشکیل شده است. با تغییر اندازه لایه ها و شکل برش های گرافن تعداد مناسب باندها طراحی شده است. با تغییر در مقادیر پتانسیل شیمیایی و زمان استراحت گرافن، کیفیت و میزان جذب قابل تغییر است در ضمن طول موج جذب را می توان با پارامترهای مذکور به مقدار مورد نظر تنظیم کرد. این ساختار به عنوان حسگر زیستی برای تشخیص ویروس ها، پروتئین ها و سلول های سرطانی، تصویربرداری و فیلتر کردن امواج مخابراتی با توجه به نتایج ساختار پیشنهادی بسیار مناسب می باشد. با توجه به برش های انجام گرفته روی گرافن در طول موج ۲۴۵۸۱ nm و ۲۷۶۴۰ nm مقادیر جذب به ترتیب ۹۹.۹ و ۹۹.۹ درصد به دست آمده است. وجود ضریب شکست متفاوت عناصر با قرار گرفتن آنالیت روی ساختار طراحی شده موجب جابجایی مقادیر طول موج جذب شده و نوع عنصر قرار گرفته با استفاده از مقادیر طول موج قابل تشخیص است که این روش تشخیص اساس کار حسگر زیستی طراحی شده است. بیشترین مقدار حساسیت در باند دوم RIU / ۴۸۲۰ nm بدست آمده که با توجه به ساختار ساده متشکل از سه لایه و با مقایسه مقادیر خروجی این تحقیق با تحقیقات قبلی، می تواند بهترین گزینه برای ساخت حسگر زیستی باشد. از دیگر ویژگی مهم این ساختار حساس نبودن به قطبی شدن می باشد. شبیه سازی ها در نرم افزار شبیه سازی کامپیوتری (CST) انجام شده است.

واژگان کلیدی:

گیرنده زیستی،

حسگر زیستی،

ساختار ناهمگن گرافن،

تراهرتز،

فراماده،

ضریب شکست.

DOI: <https://doi.org/10.22075/jme.2025.34256.2675>

© 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

سطح پلاسمون (SP) برای اولین بار در قرن بیستم توسط رابرت دبلیو. وود در حین اندازه گیری بازتاب نوری روی یک توری فلزی مشاهده شد [۱]، اما او نتوانست این پدیده را در آن زمان توضیح دهد. تا سال ۱۹۵۶ که دیوید پاینز ویژگی های از دست دادن انرژی الکترون های سریع که به فلز نفوذ می کنند را به نوسان جمعی الکترون های آزاد در فلز نسبت داد و برای اولین بار این پدیده را به صورت نظری توضیح داد [۲]. اثرات جالب سطح پلاسمون (SPR) توسط

تحریک نور ایجاد می شود [۳] و نقش قابل توجهی در افزایش جذب نور، افزایش میدان مغناطیسی و نوسان تراهرتز بازی می کند، تحقیقات زیادی به ویژه در باند تراهرتز انجام شده است [۴-۷]. به دلیل نفوذپذیری و انرژی پایین در موج تراهرتز (بازه فرکانس ۰.۱ تراهرتز تا ۱۰ تراهرتز)، پتانسیل کاربردی بسیار بزرگی در حوزه های حسگری، ارتباطات، رادار و غیره دارد [۸-۱۱]. با کشف و شناسایی خواص متاموادها، پیشرفت در توسعه دستگاه هایی که در باند فرکانسی تراهرتز کار می کنند سرعت چند برابری

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

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

استناد به این مقاله:

علیرضا پیله رودی، جواد جاویدان، یوسف رفیق ایرانی و حمید حیدرزاده، "ساختار جاذب کامل گرافنی دو بانندی مستقل از قطبش جهت استفاده در حسگرهای زیستی"، مدل سازی در مهندسی، ۲۳ (۱۴۰۴): ۱۳۲-۱۲۱، doi: 10.22075/jme.2025.34256.2675

پویای فرکانس کاری جاذب‌ها بدون نیاز به ساختارهای مجدد را فراهم می‌کند. این نه تنها هزینه‌های تولید را کاهش می‌دهد بلکه کارایی را نیز بهبود می‌بخشد. پژوهشگران انواع مختلف جاذب‌های مبتنی بر گرافن را بررسی کرده‌اند، از جمله جذب گسترده و جذب دو باند، با استفاده از الگوهای ساده گرافن مانند طرح‌های متقاطع و مربع برای پیاده سازی جاذب هایی با عملکردهای مختلف استفاده شده است. با وجود اینکه برخی از جاذب‌های چند باندی در سال‌های اخیر پیشنهاد شده‌اند، به ویژه در باند فروسرخ، چالش‌های مربوط به حساسیت به زاویه قطبش و پیچیدگی ساختار و فرآیندهای تولید آن‌ها همچنان باقی است. فلذا تحقیقات دانشگاهی بیشتر برای پیشبرد توسعه جاذب‌های چند باند با طرح‌های ساده و ویژگی‌های بهبود یافته لازم است.

در این مورد، به منظور دستیابی به جذب کامل که حساسیتی نسبت به قطبش ندارد، این مقاله یک جاذب پلاسمایی دو باند قابل تنظیم بر اساس یک ساختار برش یافته گرافن پیشنهاد می‌دهد. با توجه به ویژگی‌های قابل تنظیم آن، اندازه ساختار فیزیکی مدل و ثابت دی‌الکتریک گرافن تغییر داده شده تا رابطه بین این پارامترها و جذب نور بررسی شود. علاوه بر این، تحقیقات زیادی در مورد حساسیت به زاویه قطبش، انتقال نور و ویژگی‌های جذب جاذب انجام شده است. در مقایسه با تحقیقات سنتی، ابتدا، این مقاله از گرافن برای دستیابی به افزایش جذب پلاسمایی استفاده می‌کند. می‌توان گفت که ساختار پیشنهادی، به جذب بالایی دست یافته و در نهایت، ویژگی‌های جذب متامواد می‌تواند به راحتی از طریق تجزیه و تحلیل نظری و عددی کنترل شود زیرا دوپینگ می‌تواند ثابت دی‌الکتریک گرافن را تغییر دهد، بنابراین تنظیم جذب کامل در دو باند ممکن است.

۲- بحث نظری در مورد رسانایی گرافن

رسانایی گرافن در محدوده تراهرتز با معادلات (۱) تا (۳) تعیین می‌شوند. معادله (۱) نشان می‌دهد که رسانایی گرافن، از جمع موارد رسانایی داخل باندی و بین باندی به دست می‌آید. معادله (۲) رسانایی بین باندی را محاسبه می‌کند و از معادله (۳) می‌توان رسانایی داخل باندی را به دست آورد [۲۰].

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

پیدا کرد [۱۲-۱۳]. متاموادها با ساختار فلزی دارای ویژگی‌های پوشش نامرئی، شاخص شکست منفی، خصوصیات نوری و الکتریکی عالی هستند که مواد سنتی در یکجا این خصوصیت را ندارند [۱۴-۱۶]. با توسعه تحقیقات متامواد، افراد به تدریج آن را به سطح کاربرد رسانده‌اند. در حال حاضر، متامواد به طور گسترده در ساخت انواع دستگاه‌های الکترومغناطیسی به خصوص در جذب‌کننده‌های کامل که نقش مهمی در دستیابی به جذب بالای نور ایفا می‌کنند بکار می‌روند [۱۷-۱۹]. جذب‌کننده کامل برای اولین بار در سال ۲۰۰۸ در فرکانس مایکروویو توسط لندی و همکارانش ساخته شد.

ساختار جاذب معمولی شبیه یک خازن ساختار سه لایه دارد که دو لایه فلزی توسط لایه ایزوله دی‌الکتریک از هم جدا می‌شوند و میزان جذب می‌تواند تا ۸۸ درصد باشد. طراحی جذب‌کننده‌های پهن‌بند و چندبند موضوع جذاب تحقیقاتی در این مورد است. اگرچه دانشمندان جاذب‌های کامل متامواد با قابلیت کاربرد در نور مادون قرمز و طول موج تراهرتز پیشنهاد داده‌اند، متأسفانه این جاذب‌ها مشکل مشترکی بر اساس جاذب‌ها بر پایه فلزات سنتی را نشان داده‌اند. پاسخ رزونانس ساختار نمی‌تواند به صورت دینامیک تنظیم شود. به عبارت دیگر، نمی‌توان با تغییر پارامترهای ساختاری متامواد، باند فرکانس کاری جذب‌کننده را به صورت انعطاف‌پذیر تنظیم کرد. این مشکل بدون شک توسعه جذب‌کننده متامواد در برنامه‌های عملی را به شدت محدود کرده بود که با ظهور گرافن این مشکل تا حد زیادی حل شد.

گرافن، یک نانومواد کربنی دو بعدی تک لایه است که ویژگی‌های بی‌نظیر نوری، الکتریکی، حرارتی و مکانیکی دارد که منجر به استفاده گسترده‌ای از آن در حوزه‌های مختلفی مانند نانوفوتونیک و دستگاه‌های الکترونیکی شده است. از طریق تحقیقات عمیق‌تر، مشخص شده است که گرافن قادر به پشتیبانی از رزونانس سطح پلاسمون در باندهای فروسرخ و تراهرتز است به دلیل گذارهای الکترونی در باند انرژی خود این ویژگی منحصر به فرد تعامل آن با نور را در باندهای خاص افزایش می‌دهد موجب افزایش نرخ جذب نور شده و امکان استفاده در مدولاتورها، دکتورها و سنسورها را فراهم می‌کند.

یکی دیگر از مزایای کلیدی گرافن، هدایت سطح قابل تنظیم آن از طریق دوپینگ شیمیایی است که امکان تنظیم

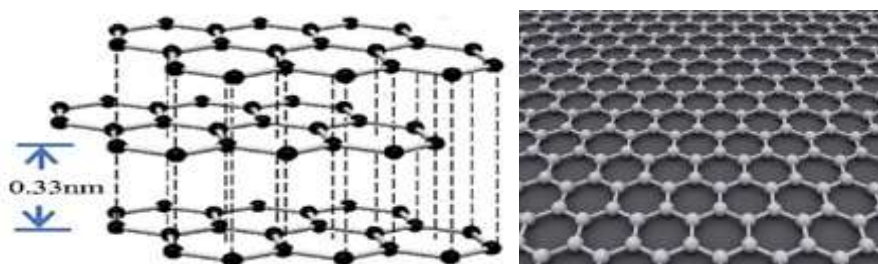
پتانسیل شیمیایی گرافن، e ، ثابت بار الکتریکی بولتزمن، ثابت کاهش یافته پلانک تعریف شده است. با توجه به اصل طرد پاولی، $\mu_c \gg K_B T$ در باند فروسرخ که ترازتر است، بخش بین باندهی را می توان در گرافن حذف کرد و رسانایی را به صورت زیر خلاصه کرد:

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

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

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

در معادلات فوق τ ، زمان آرامش، ω ، فرکانس زاویه ای T ، دما بر حسب کلونین (در این مقاله مقدار $T=300K$)، μ



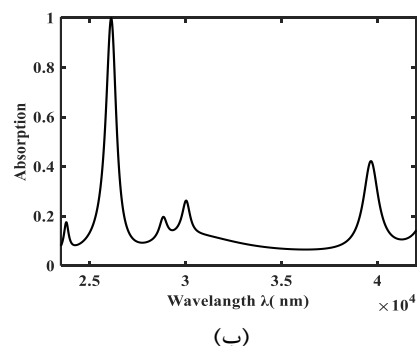
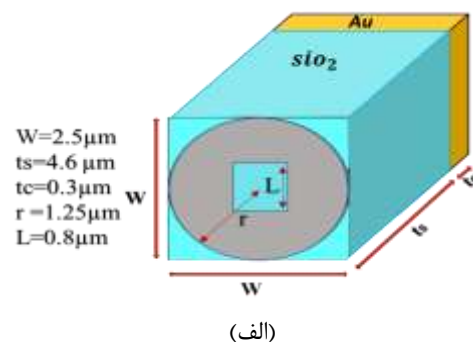
شکل ۱- ساختار گرافن و پیوند کووالانسی بین لایه های گرافن نشان داده شده است.

۳- روش شبیه سازی و طراحی ساختار جاذب
فرکانسی چند باندهی
۳-۱- مراحل طراحی ساختار پیشنهادی
طراحی ساختار جاذب کامل دو باندهی که ارائه شده است، از سه لایه تشکیل شده است. همانطور که از تصویر شکل ۲ مشخص است، جاذب از یک لایه گرافن به شکل حلقه مربعی، یک لایه طلا که بر روی لایه دی الکتریک اکسید سیلیکون قرار داده شده تشکیل شده است. لایه بالایی یک لایه گرافن با ضخامت ۱ نانومتر قرار داده شده است. در فرآیند تولید، ابتدا سیلیکون با هدف رسوب دهی بخار شیمیایی روی یک سمت و لایه طلا روی سمت دیگر ورق گرافن روی سمت دیگر پوشش داده می شود. لایه دی الکتریک می تواند در یک فرآیند پخت در یک محفظه خلاء رسوب شود. سپس می توان از یک فرآیند فتولیتوگرافی استاندارد برای دستیابی به الگوی بالای گرافن استفاده کرده و ساختار حلقه مربعی گرافن را پیاده سازی شود [۲۱-۲۲]. از طریق تعداد زیادی سعی و خطا، ما به بهترین پارامترها به شرح زیر رسیدیم: ضخامت دی اکسید سیلیکون $t_s = 4.6 \mu m$ و ثابت دی الکتریک نسبی آن $\epsilon_r = 3.9$ ضخامت لایه طلا استفاده شده در لایه پایین $t_c = 0.3 \mu m$ است. در این مقاله، با استفاده از روش دامنه زمان تفاضل مقدار ضریب جذب حل می شود که با فرمول

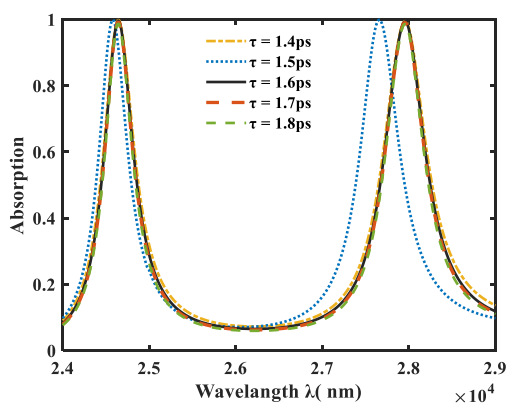
شرایط مرزی برای تمامی ساختارها در این شبیه سازی در راستای محورها X و Y به صورت Periodic و در راستای

با الهام از ساختار بررسی شده و ایجاد برش هایی بر روی گرافن مانند، ساختار شکل (۳-الف) پیشنهاد شده است. برای رسیدن به شکل ایده آل (۴-الف) مقادیر متعددی برای اندازه d مقدار دهی شده است که در شکل (۳-الف) نشان داده شده است که با توجه به منظم بودن و مقدار جذب بالا در $d=0.15 \mu\text{m}$ مقدار d را مشخص می گردد. شبیه سازی نشان می دهد مقدار جذب حساسیت زیادی نسبت به تغییرات مقدار d ندارد. از نظر جابجایی فرکانسی هم باند اول تغییرات کم داشته اما باند دوم فرکانسی نسبت به تغییرات d حساس می باشد. همچنین در شکل (۳-ب) تغییرات باندهای فرکانسی و میزان جذب با شعاع دایره بررسی می شود. میزان جذب در صورت وجود باند چندان تابع شعاع نبوده اما بر خلاف نتایج تغییرات d ، هر دو باند فرکانسی به تغییرات شعاع بسیار حساس است که در نهایت با توجه به شکل (۳-ب) $r=1.25 \mu\text{m}$ بالاترین مقدار جذب استخراج می شود. در ادامه نیز برای تعیین مقدار مناسب برای L نیز مشابه مراحل قبل و با توجه به شکل طول موج خروجی که در شکل (۳-ج) نشان داده شده مقدار $L=0.8 \mu\text{m}$ را به دلیل جذب بالا انتخاب می شود. از شکل واضح است که مقدار جذب و میزان تغییرات باند دوم فرکانسی نسبت به تغییرات L حساستر از باند اول فرکانسی می باشد. پارامترهای شیمیایی گرافن، مانند پتانسیل شیمیایی و زمان آرامش، تأثیر مستقیمی بر ویژگی های الکترومغناطیسی و عملکرد حسگرها دارند. پتانسیل شیمیایی با تنظیم سطح فرمی گرافن، باندهای جذب را به سمت طول موج های کوتاه تر جابه جا کرده و حساسیت حسگر را افزایش می دهد. همچنین، زمان آرامش که به میزان پراکندگی الکترون ها در گرافن مرتبط است، بر وضوح و کیفیت باندهای جذب تأثیر می گذارد؛ زمان آرامش بالاتر منجر به افزایش وضوح باندها و بهبود حساسیت حسگر می شود. تنظیم این دو پارامتر در حسگرهای دو باند امکان بهبود عملکرد و دقت آن ها را فراهم می آورد. از شکل (۳-د) واضح است که بدست آوردن جذب بالا وابستگی زیادی به تنظیم پتانسیل شیمیایی دارد. و زمان استراحت وضوح باند های جذب را بیشتر جابجا می کند.

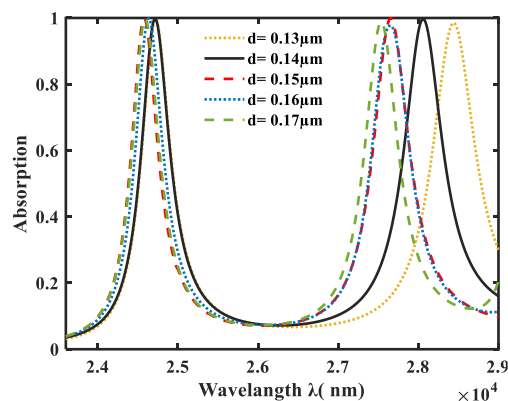
محور Z به صورت $Z_{\text{min}}=\text{electric}(E_t=0)$ و $Z_{\text{max}} = \text{Open}(\text{add space})$ در نظر گرفته شده است. همچنین اندازه مش بندی ساختار برای طلا و SiO_2 به صورت اتوماتیک و برای گرافن برای افزایش دقت شبیه سازی ۰/۱ در نظر گرفته شده است. ساختار شبیه سازی شده اول، که در شکل (۲-الف) نشان داده شده است، از یک ساختار ساندویچ استاندارد با گرافن به عنوان لایه بالایی، دی اکسید سیلیسیم به عنوان لایه دی الکتریک و یک ورق طلا به عنوان لایه پایین تشکیل شده است. هدف این ساختار به دست آوردن جذب چند باندهای متمایز با وارد کردن برش ها در گرافن است، همانطور که در شکل (۲-ب) نشان داده شده است. شایان ذکر است که تغییر شیمیایی گرافن، جذب در طول موج های مختلف را امکان پذیر می سازد. این ساختار در بسیاری از موارد جذب پایینی دارد و جذب بالا فقط در یکی از باندهای طول موج مشاهده می شود. برطرف کردن این چالش ها برای رسیدن به یک ساختار نهایی با عملکرد بهبود یافته، نیازمند تغییر در ساختار با ایجاد برش هایی جهت دست یابی به جذب بالا در طول موج های متعدد می باشد.



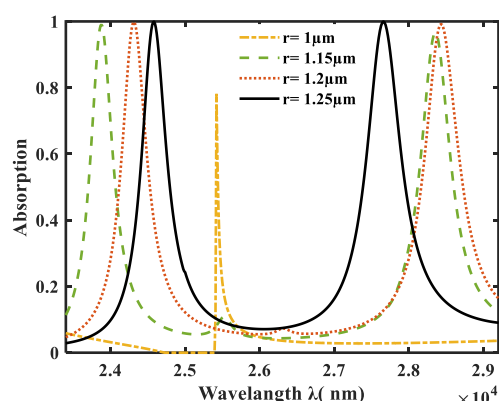
شکل ۲-الف)- ساختار جاذب با گرافن دایره ای و حفره مربعی در مرکز (ب) شکل موج خروجی جاذب



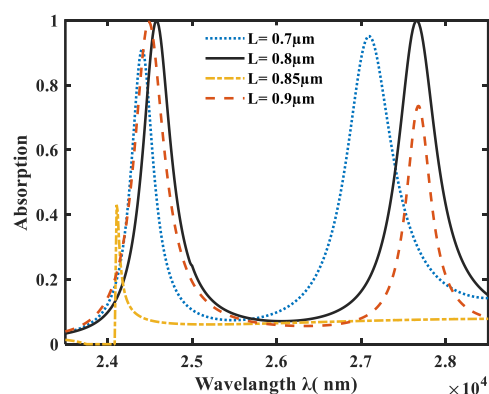
(ر)



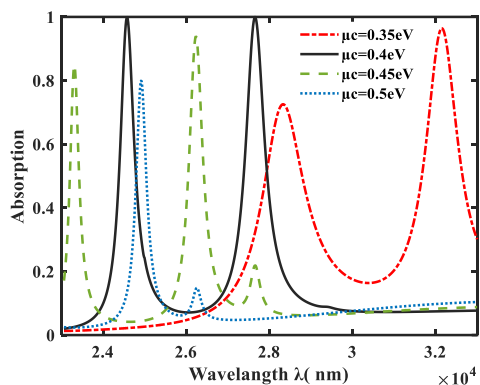
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۳- (الف) - شکل طول موج خروجی برای مقادیر مختلف d (ب) شکل طول موج خروجی برای مقادیر مختلف r (ج) شکل طول موج خروجی برای مقادیر مختلف L (د) شکل طول موج خروجی برای مقادیر مختلف پتانسیل شیمیایی (ر) شکل طول موج خروجی برای مقادیر مختلف زمان استراحت

همچنین ساختار کلی پریودیک به همراه مش بندی طرح پیشنهادی در شکل (۴-ب) نشان داده شده که با توجه به شکل (۴-ج) نشان می‌دهد که در ساختار پیشنهادی بالاترین مقدار جذب و تعداد باندهای بیشتری حاصل شده است.

در جدول ۱ میزان جذب خروجی از ساختار پیشنهادی نشان داده شده است. همانطور که از جدول ۱ مشاهده می‌شود میزان جذب ساختار در دو باند بالاتر از ۹۹.۹ درصد می‌باشد که جذب کامل در این ساختار رخ می‌دهد. ضریب کیفیت و FWHM مقادیر بالایی را به خود اختصاص داده‌اند. که می‌توان از این ساختار در بسیاری از کاربردها مانند جاذب فرکانسی در مخابرات و ساخت حسگرهای زیستی استفاده کرد.

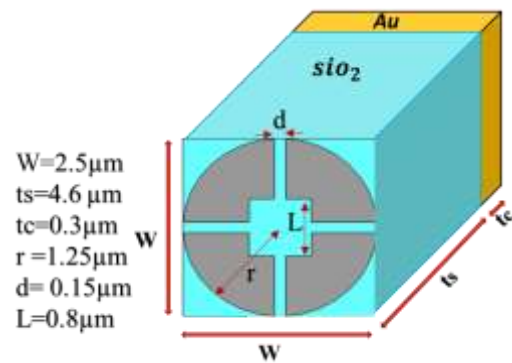
جدول ۱- مقادیر فرکانس تشدید و FWHM و ضریب کیفیت

بدست آمده از ساختار پیشنهادی

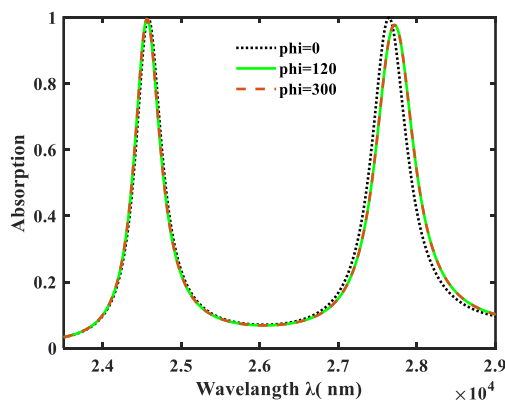
باند جذب	پیک طول موج (nm)	جذب	FWHM (nm)	ضریب کیفیت
باند اول	۲۴۵۸۱	۰.۹۹۹	۴۱۲	۵۹.۶۶
باند دوم	۲۷۶۴۰	۰.۹۹۹	۵۶۶	۴۸.۸

در بخش بعد نمونه حسگر زیستی با استفاده از ساختار پیشنهادی طراحی و میزان حساسیت ساختار بدست می‌آید.

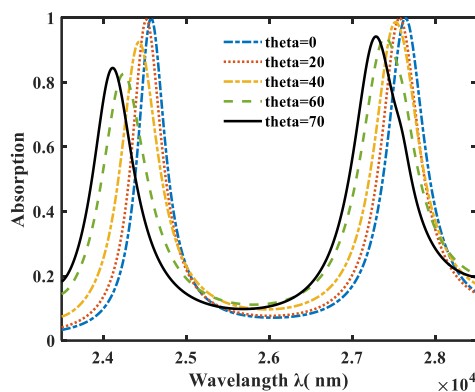
امر تضمین می‌کند که عملکرد پایدار با توجه به جهت تابش تراهرتز ورودی حفظ شود. این قابلیت به ویژه در انواع سیستم‌های حسگری و ارتباطی ارزشمند است جایی که حفظ پاسخ پایدار و قابل اعتماد به سیگنال‌های تراهرتز اهمیت دارد. هنگامی که میدان الکتریک E در شکل (۵) دوران می‌کند، زاویه قطبش در دامنه فرکانس ثابت می‌ماند و پاسخ ساختار تغییری نمی‌کند که این امر آن را در برابر قطبش بی‌اثر می‌کند. این ویژگی ساختار و حسگر را کاربردی‌تر می‌کند.



(الف)



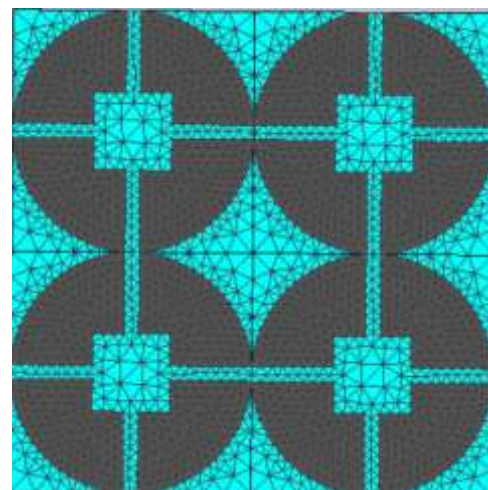
(الف)



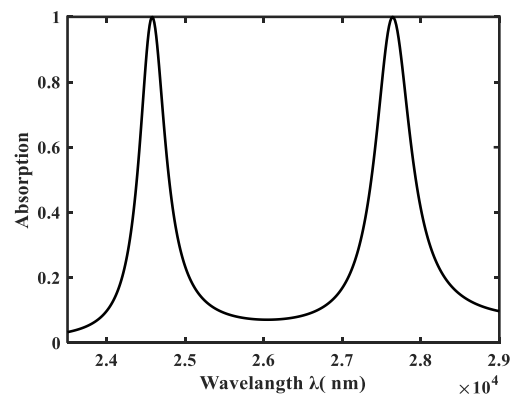
(ب)

شکل ۵- (الف) - موج جذب با تغییر زاویه قطبش از ۰ تا ۱۲۰ درجه ۳۰۰ (ب) شکل طول موج خروجی برای مقادیر مختلف زاویه تابش

فرآیند ساخت جاذب متامتریال پیشنهادی در شکل (۶) نشان داده شده است. در این فرآیند ساخت، گام اولیه شامل تمیز کردن زیرلایه سیلیکونی با استفاده از استون و الکل ایزوپروپانول است و پس از آن، خشک کردن آن با گاز نیتروژن فشرده با خلوص بالا انجام می‌شود. سپس، یک صفحه پایه طلا بر روی زیرلایه با استفاده از تبخیر پرتو الکترونی، یک تکنیک رسوب‌دهی بخار فیزیکی (PVD)، در دمای اتاق رسوب داده می‌شود. پس از آن، لایه SiO2 با



(ب)



(ج)

شکل ۴- (الف) - ساختار پیشنهادی برای جاذب (ب) شکل کلی ساختار با مش بندی انجام شده. (ج) شکل موج جذب ساختار نهایی شده.

۳-۲- مستقل بودن ساختار از پلاریزاسیون

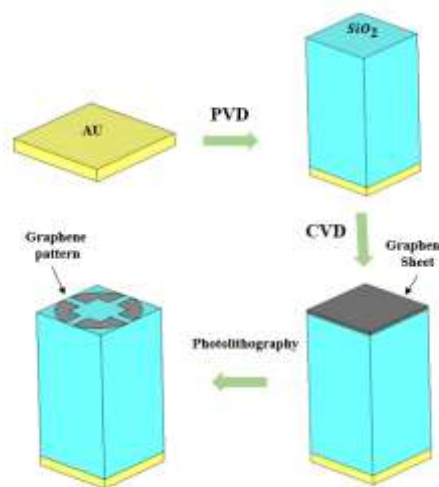
تمام مواد، ساختارهای مهندسی شده با خصوصیت‌های منحصر به فرد که به صورت طبیعی وجود ندارند و کنترل دقیق امواج الکترومغناطیسی را فراهم می‌کنند. در حوزه جاذب‌های امواج در محدوده تراهرتز، دستیابی به استقلال قطبش برای برنامه‌های عملی بسیار حیاتی است. زیرا این

بار این نوع سلول‌ها را برای تحقیقات در سال ۱۹۵۱ اهدا کرد، نام‌گذاری شده‌اند، یک رده سلولی انسانی است که معمولاً در تحقیقات علمی مورد استفاده قرار می‌گیرد. این سلول‌ها از تومور سرطان دهانه رحم خانم لاکس مشتق شده‌اند. سلول‌های هلا در زمینه‌های مختلف تحقیقاتی از جمله ویروس‌شناسی، ژنتیک، مطالعات سرطان و توسعه دارو نقش مهمی داشته‌اند.

سلول‌های Jurkat نیز یک رده سلولی انسانی معروف هستند که از لنفوم تیموس مشتق می‌شوند. این سلول‌ها نام خود را از حرکات اتخاذ کرده‌اند. سلول‌های Jurkat برای مطالعات ایمنی، التهاب و اختلالات خونی استفاده می‌شوند. این سلول‌ها از قابلیت تقسیم بی‌پایان در شرایط کشت آزمایشگاهی برخوردارند که این ویژگی باعث شده Jurkat سلول‌های Jurkat به طور خاص برای مطالعه مکانیسم‌های پاسخ سلولی و ایمنی بدن در برابر عفونت‌ها، تومورها و دیگر بیماری‌ها استفاده می‌شود. این سلول‌ها همچنین به عنوان مدل‌های مناسب برای ارزیابی اثرات داروها و ترکیبات شیمیایی بر روی خطوط سلولی سرطانی در تحقیقات داروسازی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

سلول‌های بازال (Basal cells): سلول‌های بازال نوعی سلول هستند که در عمیق‌ترین لایه اپیدرم، که خارجی‌ترین لایه پوست است، یافت می‌شوند. این سلول‌ها وظیفه تقسیم و بازسازی مداوم لایه‌های بالایی پوست را بر عهده دارند. سلول‌های پایه نقش مهمی در بازسازی پوست و بهبود زخم دارند. هنگامی که سلول‌های بازال تحت رشد کنترل نشده‌ای قرار می‌گیرند، می‌تواند منجر به ایجاد کارسینوم سلول بازال شود که شایع‌ترین نوع سرطان پوست است. در ساختار پیشنهادی، علاوه بر حساسیت بالای این ساختار، عدم همپوشانی بین موجهای جذب به عنوان یک مزیت اساسی برای بهبود تشخیص آنالیت در نظر گرفته می‌شود. حساسیت توسط تغییر در اوج طول موج جذب تعریف می‌شود که توسط تغییر در شاخص شکست تحلیلی ایجاد می‌شود و توسط رابطه $S = (\Delta n) / (\Delta \lambda)$ nm/RIU شکست توصیف می‌شود [۲۷].

استفاده از تکنیک اسپین‌کوئینگ روی صفحه پایه طلا اعمال می‌شود، که ضخامت آن با استفاده از پروفیلومتر استایلس (Dektak XT—Bruker)، بیلرکای ایالات متحده) به دقت اندازه‌گیری و تنظیم می‌شود تا مشخصات مورد نیاز به دست آید. مرحله نهایی فرآیند شامل رشد لایه گرافن روی کاتالیزور مس از طریق رسوبدهی بخار شیمیایی (CVD) است. پس از رشد موفقیت‌آمیز لایه گرافن، فتولیتوگرافی برای الگوی‌دهی به گرافن و ایجاد ساختار مورد نظر استفاده می‌شود.



شکل ۶- فرآیند ساخت جاذب متامتریال پیشنهادی

۳-۳- پیشنهاد استفاده از ساختار به عنوان حسگر

زیستی

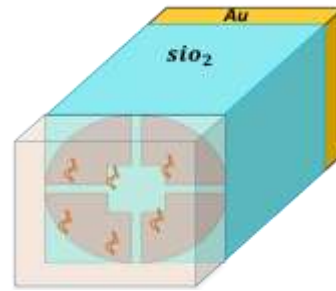
مانند آنچه در شکل (۷-الف) نشان داده شده است، این طرح می‌تواند برای کاربردهای سنجش بیولوژیکی مفید باشد. یک حسگر بسیار حساس برای اندازه‌گیری و نظارت دقیق تغییرات در سیستم‌های بیولوژیکی بسیار مهم است و داده‌های ارزشمندی را در اختیار محققان و متخصصان پزشکی قرار می‌دهد که می‌تواند منجر به بهبود نتایج تشخیص و درمان شود. توانایی سنسور برای تشخیص تغییرات ظریف در سیگنال‌ها می‌تواند نقش مهمی در افزایش دقت و قابلیت اطمینان اندازه‌گیری‌ها در تنظیمات بیولوژیکی داشته باشد.

سلول‌های هلا (HeLa cells)، به نام هنریتا لاکس که اولین

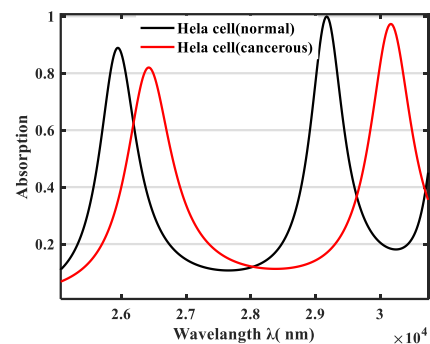
به جدول ۲ مقدار حساسیت بدست آمده در باند اول ۲۰۰۰ و در باند دوم ۴۱۰۸۳ می باشد و در شکل (۶-ج) شکل موج جذب Jurkat Bloodcell در باند های اول و دوم وقتی سلول به صورت نرمال می باشد دارای ضریب شکست ۱.۳۷۶ هست و وقتی سلول سرطانی می شود دارای ضریب شکست ۱.۳۹۰ می شود که با توجه به جدول ۲ مقدار حساسیت بدست آمده برای در باند اول ۶۰۰۰ و در باند دوم ۱۰۳۵۷ می باشد. در شکل (۶-د) شکل موج جذب Basal cell در باند های اول و دوم وقتی سلول به صورت نرمال می باشد دارای ضریب شکست ۱.۳۶۰ هست و وقتی سلول سرطانی می شود دارای ضریب شکست ۱.۳۸۰ می شود که با توجه به جدول ۲ مقدار حساسیت بدست آمده در باند اول ۲۱۸۵۰ و در باند دوم ۴۸۲۰۰ می باشد. با توجه به مقادیر به دست آمده و مقایسه با کارهای پیشین می توان این ساختار را برای طراحی بایوسنسور بسیار مناسب دانست. جدول ۲ نشان دهنده پارامترهای مهمی است. پیشینه حساسیت RIU/ λ_r ۴۸.۲۰۰ nm بود که نسبت به کارهای مرتبط دیگر مقدار مناسبی برای کاربردهای سنسور است. جدول ۳ برای مقایسه با کارهای مشابه استفاده می شود. کارهای آینده باید برنامه ریزی شود تا ساختارهایی با حساسیت بالاتر برای شناسایی انواع مختلف ویروس ها و سلول های سرطانی و غیره طراحی شود.

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

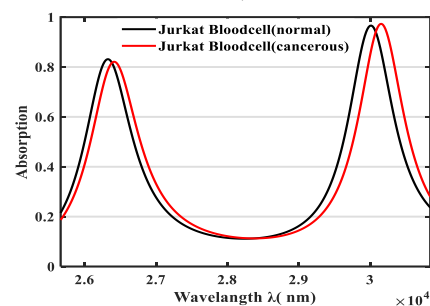
	سلول تشخیصی	RI	λ_r (nm)	جذب	حساسیت nm / RIU
باند اول	Hela cell (normal)	۱.۳۶۸	۲۵۹۴۷	۰.۸۸۹	-
	Hela cell (cancerous)	۱.۳۹۲	۲۶۴۲۷	۰.۸۲	۲۰۰۰
	Jurkat Bloodcell (normal)	۱.۳۷۶	۲۶۳۲۹	۰.۸۳۱	-
	Jurkat Bloodcell (cancerous)	۱.۳۹۰	۲۶۴۱۳	۰.۸۲۱	۶۰۰۰
	Basal cell (normal)	۱.۳۶۰	۲۵۹۰۶	۰.۸۹۴	-
	Basal cell (cancerous)	۱.۳۸۰	۲۶۳۴۳	۰.۸۲۹	۲۱۸۵۰
باند دوم	Hela cell (normal)	۱.۳۶۸	۲۹۱۷۴	۰.۹۹۹	-
	Hela cell (cancerous)	۱.۳۹۲	۳۰۱۶۰	۰.۹۷۲	۴۱۰۸۳
	Jurkat Bloodcell (normal)	۱.۳۷۶	۳۰۰۱۵	۰.۹۶۶	-
	Jurkat Bloodcell (cancerous)	۱.۳۹۰	۳۰۱۶۰	۰.۹۷۳	۱۰۳۵۷
	Basal cell (normal)	۱.۳۶۰	۲۹۱۲۳	۰.۹۹۱	-
	Basal cell (cancerous)	۱.۳۸۰	۳۰۰۸۷	۰.۹۶۹	۴۸۲۰۰



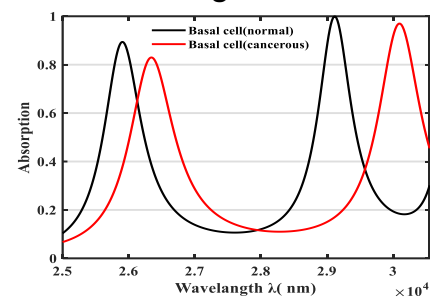
(الف)



(ب)



(ج)



(د)

شکل ۷- (الف) ساختار حسگر زیستی با استفاده از جاذب پیشنهادی. (ب) موج جذب (HeLa cells) در ضریب شکست های متفاوت. (ج) موج جذب (Jurkat blood cells) در ضریب شکست های متفاوت. (د) موج جذب (Basal cells) در ضریب شکست های متفاوت

توجه به شکل (۷-ب) شکل موج جذب HeLa cells در باند های اول و دوم وقتی سلول به صورت نرمال می باشد دارای ضریب شکست ۱.۳۶۸ هست و وقتی سلول سرطانی می شود دارای ضریب شکست ۱.۳۹۲ می شود که با توجه

حالت‌های مختلف مشهود است. ساختار پیشنهادی و مقادیر فاکتور کیفیت دارای ضریب کیفیت بالایی در حدود ۵۹.۶ است و عدم حساسیت به قطبش جاذب عملی بودن ساختار را افزایش می‌دهد و می‌تواند ساخت سنسور را ساده کند. علیرغم پارامترهای مختلف مربوط به ابعاد انتخاب شده و پتانسیل‌های شیمیایی مختلف، تطبیق پذیری بالا برای هر نوع کاربردی از ویژگی‌های بارز طرح پیشنهادی است. با توجه به این مزایا، ساختار پیشنهادی می‌تواند به عنوان یک مورد ایده آل برای حسگر 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

علیرضا پیله رودی: روش‌شناسی، جمع‌آوری داده‌ها، انجام شبیه‌سازی‌ها، تحلیل نتایج، نگارش و تهیه پیش‌نویس **جواد جاویدان:** تعریف مسئله، راهنمایی علمی، ویرایش تخصصی و نگارشی مقاله، ارزیابی و تفسیر نتایج **یوسف رفیق ایرانی:** روش‌شناسی، جمع‌آوری داده‌ها، انجام شبیه‌سازی‌ها، تحلیل نتایج، نگارش و تهیه پیش‌نویس **حمید حیدرزاده:** راهنمایی علمی، ویرایش تخصصی و نگارشی مقاله، اعتبارسنجی نتایج

منابع مالی

ندارد.

جدول ۳ - مقایسه خروجی ساختار پیشنهادی با کارهای قبلی

مراجع	حساسیت (nm/RIU)	تعداد باند جذب	میزان جذب (درصد)	پایداری در مقابل تغییر زاویه تابش پلاریزاسیون	پایداری در مقابل تغییر زاویه تابش پلاریزاسیون
[۲۸]	۱۷۰۰	دو	99/4-99/9	-	-
[۲۹]	۱۵۰۰۶	دو	98-90/9	-	-
[۳۰]	۱۱۵۰۰	دو	99/99-99/98	-	-
[۳۱]	-	یک	<90	تا ۷۰ درجه	بله
[۳۲]	۲۶۰۰۰	سه	99/4-99/3-99/1	تا ۵۰ درجه	بله
[۳۳]	۴۲۴	سه	99/9-99/1-99/6	تا ۴۵ درجه	بله
ساختار پیشنهادی	۴۸۲۰۰	دو	99/9-99/9	تا ۷۰ درجه	بله

۴- نتیجه‌گیری

به طور خلاصه، تشخیص دقیق مولکول‌ها، سلول‌ها، آنتی ژن‌ها و غیره نقش مهمی در تشخیص بیماری‌هایی مانند سرطان، بیماری‌های ویروسی و باکتریایی دارد. افزایش دقت روش‌های تشخیصی منجر به کاهش زمان می‌شود و از ویژگی‌های آن مقرون به صرفه بودن و قابل حمل بودن می‌باشد. در این مطالعه، یک ساختار ناهمگن برای طراحی جاذب دو بانده بهینه به عنوان یک حسگر زیستی که از استقلال قطبش سود می‌برد، پیشنهاد شده است. مقدار حساسیت nm/RIU ۴۸۲۰۰ در باند دوم در ضریب شکست سلول Basal cell به دست آمده است. در مقایسه با کارهای گزارش شده قبلی، حساسیت بالاتری دارد. علاوه بر این، حداقل همپوشانی بین دو پیک جذب مجاور در

مراجع

- [1] Zhang, Yubin, Zao Yi, Xinyue Wang, Peixin Chu, Weitang Yao, Zigang Zhou, Shubo Cheng, Zhimin Liu, Pinghui Wu, Miao Pan, and Yougen Yi. "Dual band visible metamaterial absorbers based on four identical ring patches." Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostructures 127 (2021): 114526.
- [2] Zhang, Xiao, Zhimin Liu, Zhenbin Zhang, Enduo Gao, Xin Luo, Fengqi Zhou, Hongjian Li, and Zao Yi. "Polarization-sensitive triple plasmon-induced transparency with synchronous and asynchronous switching based on monolayer graphene metamaterials." Optics Express 28, no. 24 (2020): 36771-36783.
- [3] Pan, Miao, Zhicong Su, Zhenfang Yu, Pinghui Wu, Huge Jile, Zao Yi, and Zeqiang Chen. "A narrowband perfect absorber with high Q-factor and its application in sensing in the visible region." Results in Physics 19 (2020): 103415.
- [4] He, Zhihui, Lingqiao Li, Huqiang Ma, Lihui Pu, Hui Xu, Zao Yi, Xinliang Cao, and Wei Cui. "Graphene-based metasurface sensing applications in terahertz band." Results in Physics 21 (2021): 103795.

- [5] Cheng, Tingting, Huajing Gao, Xiaofeng Sun, Tao Xian, Shifa Wang, Zao Yi, Guorong Liu, Xiangxian Wang, and Hua Yang. "An excellent Z-scheme $\text{Ag}_2\text{MoO}_4/\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ heterojunction photocatalyst: Construction strategy and application in environmental purification." *Advanced Powder Technology* 32, no. 3 (2021): 951-962.
- [6] Cheng, Tingting, Xiaofeng Sun, Tao Xian, Zao Yi, Ruishan Li, Xiangxian Wang, and Hua Yang. "Tert-butylamine/oleic acid-assisted morphology tailoring of hierarchical $\text{Bi}_4\text{Ti}_3\text{O}_{12}$ architectures and their application for photodegradation of simulated dye wastewater." *Optical Materials* 112 (2021): 110781.
- [7] Li, Xin, Xifang Chen, Zao Yi, Zigang Zhou, Yongjian Tang, and Yougen Yi. "Fabrication of ZnO nanorods with strong UV absorption and different hydrophobicity on foamed nickel under different hydrothermal conditions." *Micromachines* 10, no. 3 (2019): 164.
- [8] Qi, Yunping, Baohe Zhang, Jinghui Ding, Ting Zhang, Xiangxian Wang, and Zao Yi. "Efficient manipulation of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces and further applications of such metasurfaces." *Chinese Physics B* 30, no. 2 (2021): 024211.
- [9] Yao, Baicheng, Yuan Liu, Shu-Wei Huang, Chanyeol Choi, Zhenda Xie, Jaime Flor Flores, Yu Wu et al. "Broadband gate-tunable terahertz plasmons in graphene heterostructures." *Nature Photonics* 12, no. 1 (2018): 22-28.
- [10] Wang, Xiangxian, Jiankai Zhu, Yueqi Xu, Yunping Qi, Liping Zhang, Hua Yang, and Zao Yi. "A novel plasmonic refractive index sensor based on gold/silicon complementary grating structure." *Chinese Physics B* 30, no. 2 (2021): 024207.
- [11] Zhang, Yubing, Pinghui Wu, Zigang Zhou, Xifang Chen, Zao Yi, Jiayi Zhu, Tiansheng Zhang, and Huge Jile. "Study on temperature adjustable terahertz metamaterial absorber based on vanadium dioxide." *IEEE Access* 8 (2020): 85154-85161.
- [12] Cen, Chunlian, Yubin Zhang, Xifang Chen, Hua Yang, Zao Yi, Weitang Yao, Yongjian Tang, Yougen Yi, Junqiao Wang, and Pinghui Wu. "A dual-band metamaterial absorber for graphene surface plasmon resonance at terahertz frequency." *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 117 (2020): 113840.
- [13] Jiang, Liying, Chuang Yuan, Zhiyou Li, Ju Su, Zao Yi, Weitang Yao, Pinghui Wu, Zhimin Liu, Shubo Cheng, and Miao Pan. "Multi-band and high-sensitivity perfect absorber based on monolayer graphene metamaterial." *Diam. Relat. Mater.* 111 (2021): 108227.
- [14] Veselago, Viktor G. "The electrodynamics of substances with simultaneously negative values of ϵ and μ ." *Physics-Uspekhi* 10, no. 4 (1968): 509-514.
- [15] Shalaev, Vladimir M. "Optical negative-index metamaterials." *Nature photonics* 1, no. 1 (2007): 41-48.
- [16] Pendry, John Brian. "Negative refraction makes a perfect lens." *Physical review letters* 85, no. 18 (2000): 3966.
- [17] Wang, Yanping, Li Ruishan, Xiaofeng Sun, Xian Tao, Yi Zao, and Hua Yang. "Photocatalytic application of Ag-decorated $\text{CuS}/\text{BaTiO}_3$ composite photocatalysts for degrading RhB." *Journal of Electronic Materials* 50, no. 5 (2021): 2674-2686. doi:10.1007/s11664-021-08787-x.
- [18] Appasani, Bhargav, Pallav Prince, Rajeev Kumar Ranjan, Nisha Gupta, and Vijay Kumar Verma. "A simple multi-band metamaterial absorber with combined polarization sensitive and polarization insensitive characteristics for terahertz applications." *Plasmonics* 14, no. 3 (2019): 737-742. doi:10.1007/s11468-018-0852-x.
- [19] Li, Jiakun, Jiangchuan Lin, Feng Qin, Xifang Chen, Weitang Yao, Zhimin Liu, Shubo Cheng, Pinghui Wu, and Hailiang Li. "Broadband polarization-insensitive and wide-angle solar energy absorber based on tungsten ring-disc array." *Nanoscale* 12, no. 45 (2020): 23077-23083.
- [20] 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.
- [21] Tung, Nguyen Thanh. "Lithographic fabrication and spectroscopic characterization of a THz metamaterial absorber." *Vietnam Journal of Science and Technology* 59, no. 1 (2021): 40-46.
- [22] Shen, Xiaopeng, Yan Yang, Yuanzhang Zang, Jianqiang Gu, Jiaguang Han, Weili Zhang, and Tie Jun Cui. "Triple-band terahertz metamaterial absorber: Design, experiment, and physical interpretation." *Appl. Phys. Lett.* 101, no. 15 (2012). Available online: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article/101/15/154102/150835>.

- [23] Chiam, Sher-Yi, Ranjan Singh, Carsten Rockstuhl, Falk Lederer, Weili Zhang, and Andrew A. Bettiol. "Analogue of electromagnetically induced transparency in a terahertz metamaterial." *Physical Review B—Condensed Matter and Materials Physics* 80, no. 15 (2009): 153103. doi:10.1103/PhysRevB.80.153103.
- [24] Shalini, V. Baby. "A polarization insensitive miniaturized pentaband metamaterial THz absorber for material sensing applications." *Optical and Quantum Electronics* 53, no. 5 (2021): 213. doi:10.1007/s11082-021-02898-9.
- [25] Tian, Jinping, Rujiao Ke, Rongcao Yang, and Weihua Pei. "Tunable quad-band perfect metamaterial absorber on the basis of monolayer graphene pattern and its sensing application." *Results in Physics* 26 (2021): 104447.
- [26] Chen, Pai-Yen, and Andrea Alu. "Atomically thin surface cloak using graphene monolayers." *ACS nano* 5, no. 7 (2011): 5855-5863. doi:10.1021/nn201622e.
- [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] Yi, Zao, Cuiping Liang, Xifang Chen, Zigang Zhou, Yongjian Tang, Xin Ye, Yougen Yi, Junqiao Wang, and Pinghui Wu. "Dual-band plasmonic perfect absorber based on graphene metamaterials for refractive index sensing application." *Micromachines* 10, no. 7 (2019): 443.
- [29] Zhang, Yubin, Chunlian Cen, Cuiping Liang, Zao Yi, Xifang Chen, Meiwen Li, Zigang Zhou, Yongjian Tang, Yougen Yi, and Guangfu Zhang. "Dual-band switchable terahertz metamaterial absorber based on metal nanostructure." *Results in Physics* 14 (2019): 102422.
- [30] Huang, Jing, Gao Niu, Zao Yi, Xifang Chen, Zigang Zhou, Xin Ye, Yongjian Tang, Yong Yi, Tao Duan, and Yougen Yi. "High sensitivity refractive index sensing with good angle and polarization tolerance using elliptical nanodisk graphene metamaterials." *Physica Scripta* 94, no. 8 (2019): 085805.
- [31] Tiang, Jun Jiat, Naglaa F. Soliman, Imran Khan, Jaeyoung Choi, Hee Chan Chung, and Dag Øivind Madsen. "Design and performance evaluation of a novel broadband THz modulator based on graphene metamaterial for emerging applications." *Frontiers in Materials* 10 (2023): 1305793.
- [32] Lai, Runing, Pengcheng Shi, Zao Yi, Hailiang Li, and Yougen Yi. "Triple-band surface plasmon resonance metamaterial absorber based on open-ended prohibited sign type monolayer graphene." *Micromachines* 14, no. 5 (2023): 953.
- [33] Hadipour, Soheil, and Pejman Rezaei. "Retracted article: A graphene-based triple-band THz metamaterial absorber for cancer early detection." *Optical and Quantum Electronics* 55, no. 13 (2023): 1122.