



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 Rafigirani ^a Hamid Heidarzadeh ^a

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

PAPER INFO

Paper history:

Received:
Revised:
Accepted:

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/>

© 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/>)

* Corresponding author.

E-mail address: Javidan@uma.ac.ir

How to cite this article:

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

علیرضا پيله رودی^۱، جواد جاویدان^{۲*}، یوسف رفیق ایرانی^۳، و حمید حیدرزاده^۴

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله:	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 ۴۸۲۰۰ nm / RIU 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/>

© 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/>)

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 [1]، 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 [2]. اثرات جالب سطح پلاسمون (SPR) توسط تحریک نور ایجاد می شود [3] 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 [4-7]. به دلیل نفوذپذیری و انرژی پایین در موج تراهرتز (بازه فرکانس ۰.۱ تراهرتز تا ۱۰

^۱ دانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه محقق اردبیلی^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه محقق اردبیلی^۳ دانشجو کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه محقق اردبیلی^۴ دانشیار، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه محقق اردبیلی* پست الکترونیک نویسنده مسئول: Javidan@uma.ac.ir

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 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 جاذب‌هایی با عملکردهای مختلف استفاده شده است. با وجود اینکه برخی از جاذب‌های چند بانندی 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 بانندی و بین بانندی به دست می‌آید. معادله (۲) رسانایی بین بانندی را محاسبه

تراهرتز، پتانسیل کاربردی بسیار بزرگی در حوزه‌های حسگری، ارتباطات، رادار و غیره دارد [8-11]. با کشف و شناسایی خواص متاموادها، پیشرفت در توسعه دستگاه‌هایی که در باند فرکانسی تراهرتز کار می‌کنند سرعت چند برابری پیدا کرد [13]، [12]. 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 [14-16]. 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 [17-19]. 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 جاذب 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

دما بر حسب کلونین (در این مقاله مقدار $T=300\text{K}$ ، μ 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 تراهرتز است، بخش بین بانده را می توان در گرافن حذف کرد و رسانایی را به صورت زیر خلاصه کرد:

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

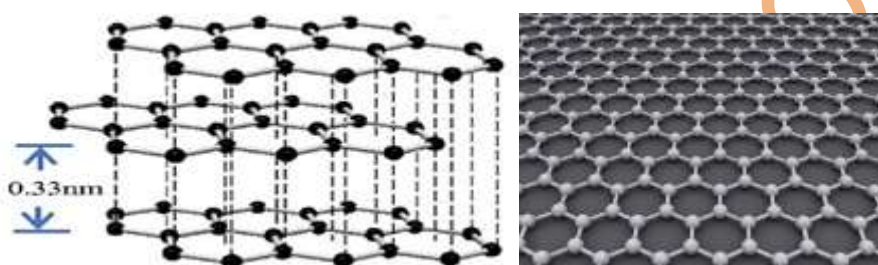
می کند و از معادله (۳) می توان رسانایی داخل بانده را به دست آورد [20].

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

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

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

در معادلات فوق τ ، زمان آرامش، ω ، فرکانس زاویه ای T ،



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

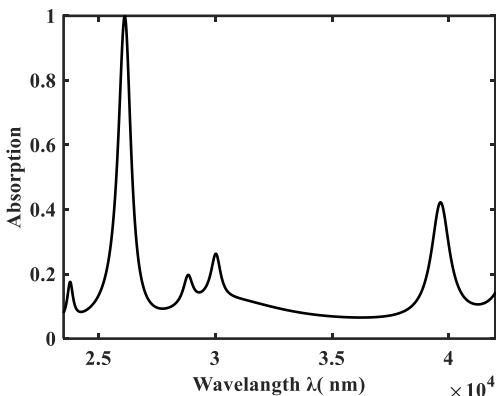
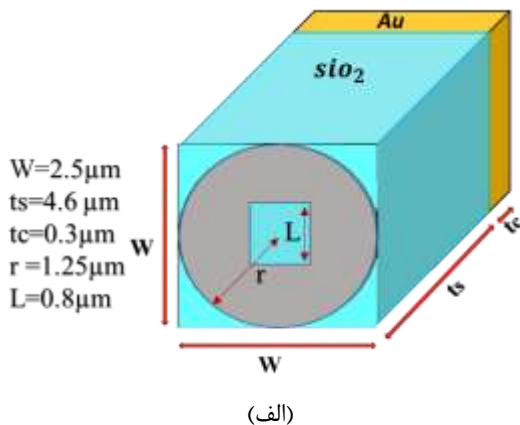
پارامترها به شرح زیر رسیدیم: ضخامت دی اکسید سیلیکون $t_{\text{SiO}_2} = 4.6 \mu\text{m}$ و ثابت دی الکتریک نسبی آن $\epsilon_r = 3.9$ ضخامت لایه طلا استفاده شده در لایه پایین $t_{\text{Au}} = 0.3 \mu\text{m}$ است. در این مقاله، با استفاده از روش دامنه زمان تفاضل مقدار ضریب جذب حل می شود که با فرمول $A = 1 - S_{21}^2 - S_{11}^2$ محاسبه می شود. از آنجا که لایه پایین ساختار از طلا تشکیل شده است، مانع بازگشت امواج الکترومغناطیس می شود، بنابراین موج وارد شده در حد امکان جذب می شود، به عبارت دقیق تر، S_{21} انتقال را می توان نادیده گرفت، و با عبارت $A = 1 - S_{11}^2$ تقریب زده می شود [23]. علاوه بر این، این مقاله شروط PML را در جهت z و شروط مرز دوره ای را در جهات x و y انتخاب کرده است.

یک ویژگی قابل توجه اضافی، عدم حساسیت ساختار به قطبش است [24]. برای به دست آوردن ساختار نهایی، از یک ساختار ساده شروع کرده و شرایط مختلف از نظر ابعاد و پارامترها بررسی شده و ساختار نهایی طراحی می شود. برای رسیدن به ساختار نهایی هدف دستیابی به حداکثر جذب و حساسیت بالا است. طراحی و تجزیه و تحلیل با نرم

۳- روش شبیه سازی و طراحی ساختار جاذب فرکانسی چند بانده

۳-۱- مراحل طراحی ساختار پیشنهادی

طراحی ساختار جاذب کامل دو بانده که ارائه شده است، از سه لایه تشکیل شده است. همانطور که از تصویر شکل 2 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 [21]. [22]. از طریق تعداد زیادی سعی و خطا، ما به بهترین



(ب)

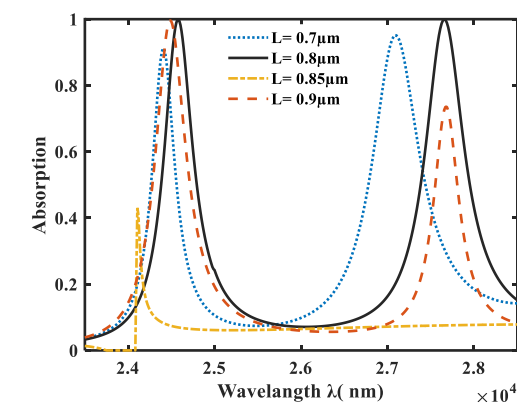
شکل ۲-الف) ساختار جاذب با گرافن دایره ای و حفره مربعی در مرکز (ب) شکل موج خروجی جاذب شده است که با توجه به منظم بودن و مقدار جذب بالا در $d=0.15 \mu\text{m}$ مقدار d را مشخص می‌گردد. شبیه سازی نشان می‌دهد مقدار جذب حساسیت زیادی نسبت به تغییرات مقدار d ندارد. از نظر جابجایی فرکانسی هم باند اول تغییرات کم داشته اما باند دوم فرکانسی نسبت به تغییرات d حساس می‌باشد. همچنین در شکل ۳(ب) تغییرات باندهای فرکانسی و میزان جذب با شعاع دایره بررسی می‌شود. 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 می‌شود. 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 می‌شود. از شکل واضح است که مقدار جذب و میزان تغییرات باند دوم فرکانسی

افزار شبیه سازی کامپیوتری (CST) انجام شده است و تمام پارامترهای ابعادی با سعی و خطا انتخاب می‌شوند. در تمامی طرح‌ها مقدار رسانایی هادی (طلا) $\sigma_{Au} = 4.7 \times 10^7 \text{ S/m}$ [25] و برای لایه دی الکتریک دی اکسید سیلیکون، $\epsilon_r = 3.9$ ضریب عبور [26]، و برای گرافن زمان استراحت $\tau = 1.6 \text{ ps}$ ، دمای ۳۰۰ کلوین و پتانسیل شیمیایی $\mu_c = 0.4 \text{ eV}$ در نظر گرفته شده است.

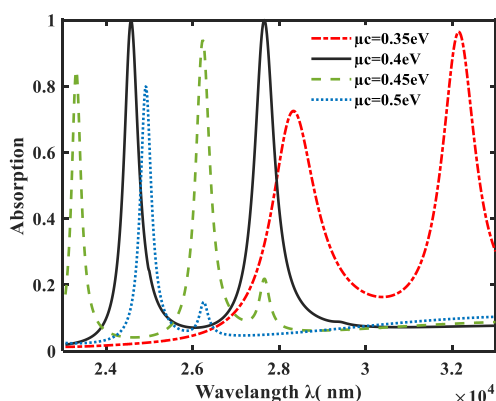
شرایط مرزی برای تمامی ساختارها در این شبیه سازی در راستای محورهای X و Y به صورت Periodic و در راستای محور Z به صورت $Z_{\text{min}} = \text{electric} (E_t=0)$ و $Z_{\text{max}} = \text{Open} (\text{add space})$ در نظر گرفته شده است. همچنین اندازه مش بندی ساختار برای طلا و SiO_2 به صورت اتوماتیک و برای گرافن برای افزایش دقت شبیه سازی ۱/۰ 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 برش‌ها در گرافن است، همانطور که در شکل ۲ (ب) نشان داده شده است. شایان ذکر است که تغییر شیمیایی گرافن، جذب در طول موج‌های مختلف را امکان پذیر می‌سازد. این ساختار در بسیاری از موارد جذب پایینی دارد و جذب بالا فقط در یکی از باندهای طول موج مشاهده می‌شود. برطرف کردن این چالش‌ها برای رسیدن به یک ساختار نهایی با عملکرد بهبود یافته، نیازمند تغییر در ساختار با ایجاد برش‌هایی جهت دست یابی به جذب بالا در طول موج‌های متعدد می‌باشد.

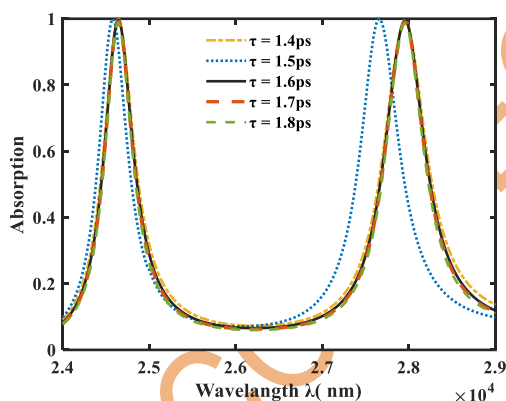
با الهام از ساختار بررسی شده و ایجاد برش‌هایی بر روی گرافن مانند، ساختار شکل ۳(الف) پیشنهاد شده است. برای رسیدن به شکل ایده آل ۴(الف) مقادیر متعددی برای اندازه d مقدار دهی شده است که در شکل ۳(الف) نشان داده



(ج)



(د)

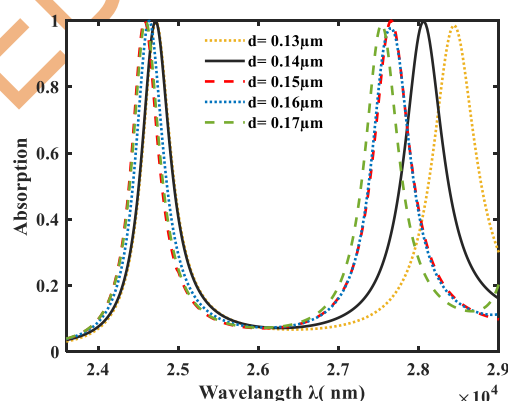


(ه)

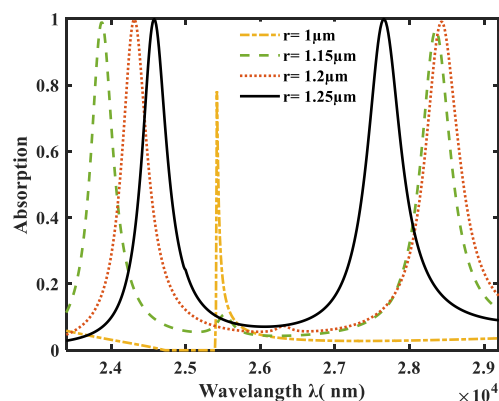
شکل ۳(الف) شکل طول موج خروجی برای مقادیر مختلف d (ب) شکل طول موج خروجی برای مقادیر مختلف Γ (ج) شکل طول موج خروجی برای مقادیر مختلف L (د) شکل طول موج خروجی برای مقادیر مختلف پتانسیل شیمیایی (ه) شکل طول موج خروجی برای مقادیر مختلف زمان استراحت

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.

نسبت به تغییرات L حساستر از باند اول فرکانسی می‌باشد. پارامترهای شیمیایی گرافن، مانند پتانسیل شیمیایی و زمان آرامش، تأثیر مستقیمی بر ویژگی‌های الکترومغناطیسی و عملکرد حسگرها دارند. پتانسیل شیمیایی با تنظیم سطح فرمی گرافن، باندهای جذب را به سمت طول موج‌های کوتاه‌تر جابه‌جا کرده و حساسیت حسگر را افزایش می‌دهد. همچنین، زمان آرامش که به میزان پراکندگی الکترون‌ها در گرافن مرتبط است، بر وضوح و کیفیت باندهای جذب تأثیر می‌گذارد؛ زمان آرامش بالاتر منجر به افزایش وضوح باندها و بهبود حساسیت حسگر می‌شود. تنظیم این دو پارامتر در حسگرهای دو بانده امکان بهبود عملکرد و دقت آن‌ها را فراهم می‌آورد. از شکل ۳(د) واضح است که بدست آوردن جذب بالا وابستگی زیادی به تنظیم پتانسیل شیمیایی دارد. و زمان استراحت وضوح باندهای جذب را بیشتر جابجا می‌کند.



(الف)



(ب)

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

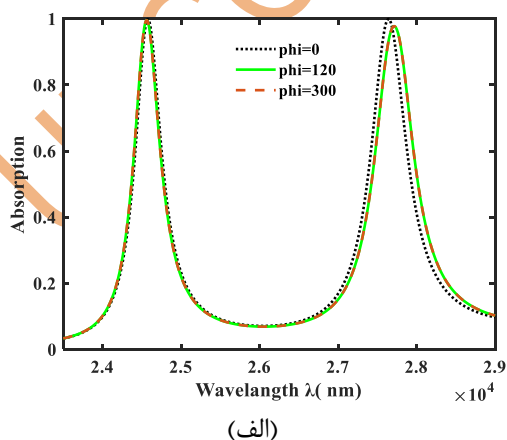
جدول ۱ - مقادیر فرکانس تشدید FWHM و ضریب کیفیت بدست آمده از ساختار پیشنهادی

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

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

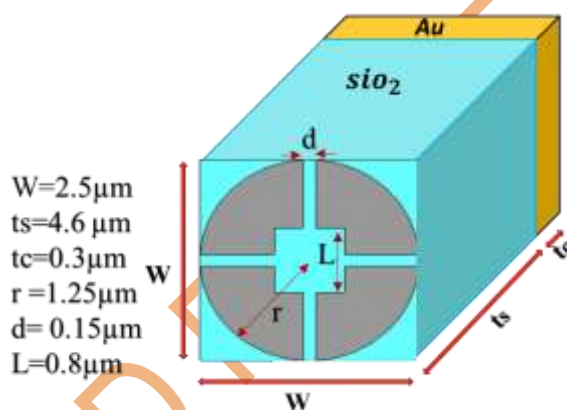
۳-۲- مستقل بودن ساختار از پلاریزاسیون

متمامود، 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 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 بی اثر می‌کند. این ویژگی ساختار و حسگر را کاربردی تر می‌کند.

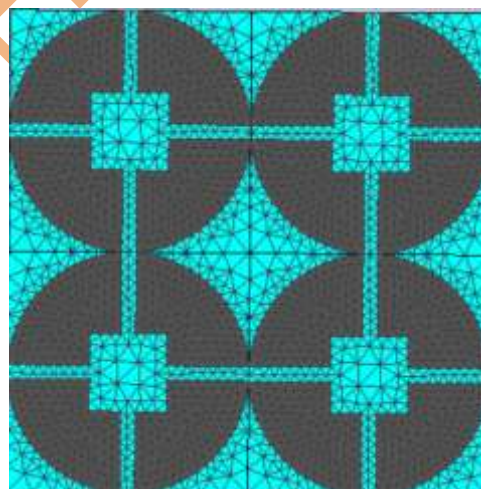


(الف)

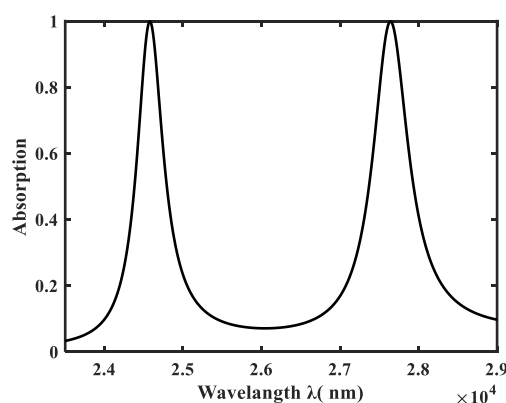
در جدول ۱ میزان جذب خروجی از ساختار پیشنهادی نشان داده شده است. همانطور که از جدول ۱ مشاهده می‌شود میزان جذب ساختار در دو باند بالاتر از ۹۹.۹ درصد می‌باشد که جذب کامل در این ساختار رخ می‌دهد. ضریب کیفیت و FWHM مقادیر بالایی را به خود اختصاص داده‌اند. که می‌توان از این ساختار در بسیاری از کاربردها مانند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



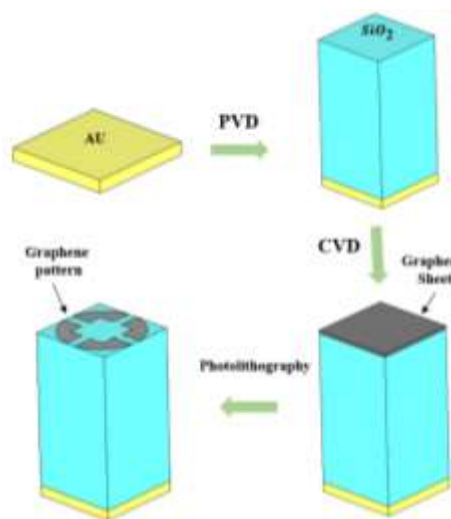
(الف)



(ب)



(ج)



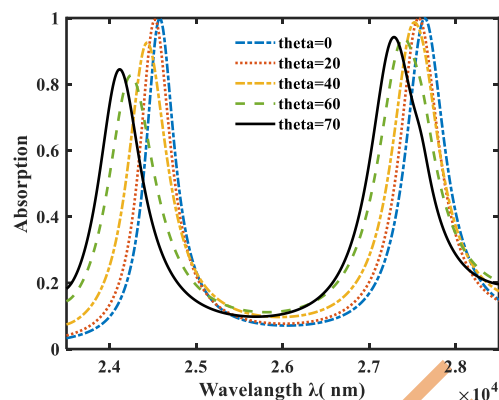
شکل ۶- فرآیند ساخت جاذب متامتریال پیشنهادی

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 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 تیموسی مشتق می‌شوند. این سلول‌ها نام خود را از جرکات 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 یک ابزار قدرتمند در تحقیقات بر روی بیماری‌ها باشد. از 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



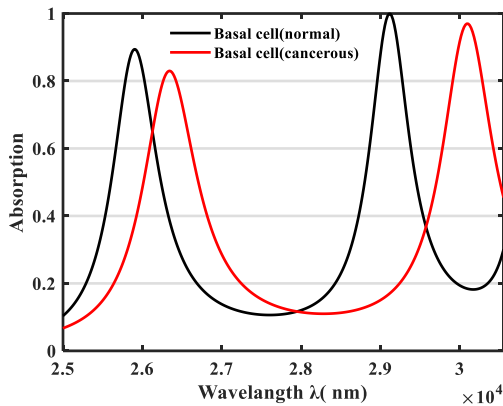
(ب)

شکل ۵- (الف) موج جذب با تغییر زاویه قطبش از ۰، ۲۰، ۳۰۰ درجه (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 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.

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

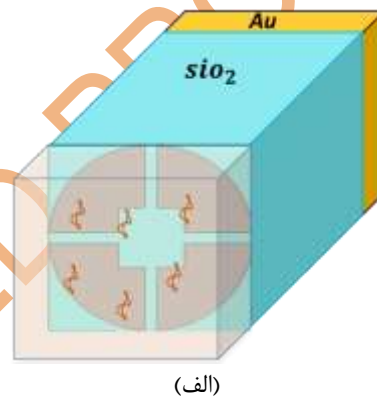


(د)

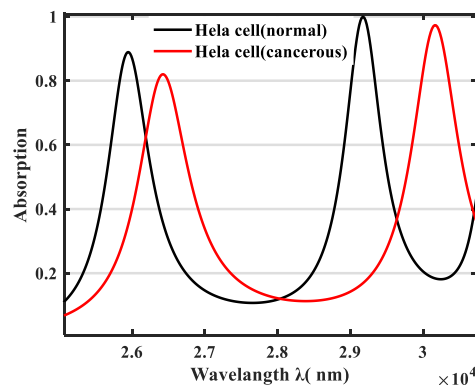
شکل ۷- (الف) ساختار حسگر زیستی با استفاده از جاذب پیشنهادی. (ب) موج جذب (HeLa cells) در ضریب شکست های متفاوت. (ج) موج جذب (Jurkat blood cells) در ضریب شکست های متفاوت. (د) موج جذب (Basal cells) در ضریب شکست های متفاوت

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 میشود دارای ضریب شکست ۱.۳۹۲ می شود که با توجه 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 میشود 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 میشود 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 میتوان این ساختار را برای طراحی بایوسنسور بسیار مناسب دانست. جدول ۲ نشان دهنده پارامترهای مهمی است. بیشینه حساسیت ۴۸.۲۰۰ nm/ RIU 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

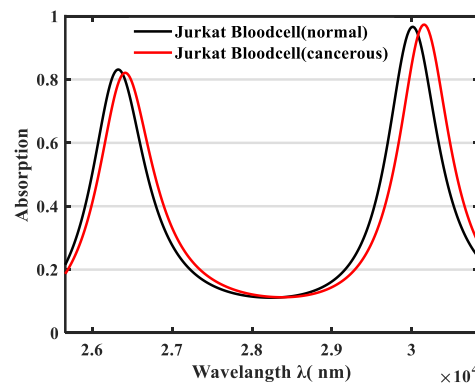
تقسیم و بازسازی مداوم لایه های بالایی پوست را بر عهده دارند. سلول های پایه نقش مهمی در بازسازی پوست و بهبود زخم دارند. هنگامی که سلول های بازال تحت رشد کنترل نشده ای قرار می گیرند، می تواند منجر به ایجاد کارسینوم سلول بازال شود که شایع ترین نوع سرطان پوست است. در ساختار پیشنهادی، علاوه بر حساسیت بالای این ساختار، عدم همپوشانی بین موجهای جذب به عنوان یک مزیت اساسی برای بهبود تشخیص آنالیت در نظر گرفته می شود. حساسیت توسط تغییر در اوج طول موج جذب تعریف می شود که توسط تغییر در شاخص شکست تحلیلی ایجاد می شود و توسط رابطه $S = (\Delta\lambda)(\Delta n)$ شکست توصیف می شود [27].



(الف)



(ب)



(ج)

بله	تا ۴۵ درجه	99/9-99/1-99/6	سه	۴۲۴	[33]
بله	تا ۷۰ درجه	99/9-99/9	دو	۴۸۲۰۰	ساختار پیشنهادی

۴- نتیجه گیری

به طور خلاصه، تشخیص دقیق مولکول ها، سلول ها، آنتی ژن ها و غیره نقش مهمی در تشخیص بیماری هایی مانند سرطان، بیماری های ویروسی و باکتریایی دارد. افزایش دقت روش های تشخیصی منجر به کاهش زمان می شود و از ویژگی های آن مقرون به صرفه بودن و قابل حمل بودن می باشد. در این مطالعه، یک ساختار ناهمگن برای طراحی جاذب دو باند بهینه به عنوان یک حسگر زیستی که از استقلال قطبش سود می برد، پیشنهاد شده است. مقدار حساسیت ۴۸۲۰۰ nm/RIU 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 جاذب مجاور در حالت های مختلف مشهود است. ساختار پیشنهادی و مقادیر فاکتور کیفیت دارای ضریب کیفیت بالایی در حدود ۵۹۰۶ است و عدم حساسیت به قطبش جاذب عملی بودن ساختار را افزایش می دهد و می تواند ساخت سنسور را ساده کند. علیرغم پارامترهای مختلف مربوط به ابعاد انتخاب شده و پتانسیل های شیمیایی مختلف، تطبیق پذیری بالا برای هر نوع کاربردی از ویژگی های بارز طرح پیشنهادی است. با توجه به این مزایا، ساختار پیشنهادی می تواند به عنوان یک مورد ایده آل برای حسگر زیستی در نظر گرفته شود

تعارض منافع

نویسنده اعلام می کند که در مورد انتشار این مقاله تعارض منافع وجود ندارد.

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

حساسیت nm / RIU	جذب	λ_r (nm)	RI	سلول تشخیصی
-	۰.۸۸۹	۲۵۹۴۷	۱.۳۶۸	Hela cell (normal)
۲۰۰۰۰	۰.۸۲	۲۶۴۲۷	۱.۳۹۲	Hela cell (cancerous)
-	۰.۸۳۱	۲۶۳۲۹	۱.۳۷۶	Jurkat Bloodcell (normal)
۶۰۰۰	۰.۸۳۱	۲۶۴۱۳	۱.۳۹۰	Jurkat Bloodcell (cancerous)
-	۰.۸۹۴	۲۵۹۰۶	۱.۳۶۰	Basal cell (normal)
۲۱۸۵۰	۰.۸۲۹	۲۶۳۴۳	۱.۳۸۰	Basal cell (cancerous)
-	۰.۹۹۹	۲۹۱۷۴	۱.۳۶۸	Hela cell (normal)
۴۱۰۸۳	۰.۹۷۲	۳۰۱۶۰	۱.۳۹۲	Hela cell (cancerous)
-	۰.۹۶۶	۳۰۰۱۵	۱.۳۷۶	Jurkat Bloodcell (normal)
۱۰۳۵۷	۰.۹۷۳	۳۰۱۶۰	۱.۳۹۰	Jurkat Bloodcell (cancerous)
-	۰.۹۹۱	۲۹۱۲۳	۱.۳۶۰	Basal cell (normal)
۴۸۲۰۰	۰.۹۶۹	۳۰۰۸۷	۱.۳۸۰	Basal cell (cancerous)

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 پلاریزاسیون
[28]	۱۷۰۰	دو	99/4-99/9	-	-
[29]	۱۵۰۰۶	دو	98-90/9	-	-
[30]	۱۱۵۰۰	دو	99/99-99/98	-	-
[31]	-	یک	<90	تا ۷۰ درجه	بله
[32]	۲۶۰۰۰	سه	99/4-99/3-99/1	تا ۵۰ درجه	بله

مراجع

- [1] Y. Zhang *et al.*, “Dual band visible metamaterial absorbers based on four identical ring patches,” *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostructures*, vol. 127, p. 114526, 2021.
- [2] X. Zhang *et al.*, “Polarization-sensitive triple plasmon-induced transparency with synchronous and asynchronous switching based on monolayer graphene metamaterials,” *Opt. Express*, vol. 28, no. 24, pp. 36771–36783, 2020.
- [3] M. Pan *et al.*, “A narrowband perfect absorber with high Q-factor and its application in sensing in the visible region,” *Results Phys.*, vol. 19, p. 103415, 2020.
- [4] Z. He *et al.*, “Graphene-based metasurface sensing applications in terahertz band,” *Results Phys.*, vol. 21, p. 103795, 2021.
- [5] T. Cheng *et al.*, “An excellent Z-scheme Ag₂MoO₄/Bi₄Ti₃O₁₂ heterojunction photocatalyst: construction strategy and application in environmental purification,” *Adv. Powder Technol.*, vol. 32, no. 3, pp. 951–962, 2021.
- [6] T. Cheng *et al.*, “Tert-butylamine/oleic acid-assisted morphology tailoring of hierarchical Bi₄Ti₃O₁₂ architectures and their application for photodegradation of simulated dye wastewater,” *Opt. Mater.*, vol. 112, p. 110781, 2021.
- [7] X. Li, X. Chen, Z. Yi, Z. Zhou, Y. Tang, and Y. Yi, “Fabrication of ZnO nanorods with strong UV absorption and different hydrophobicity on foamed nickel under different hydrothermal conditions,” *Micromachines*, vol. 10, no. 3, p. 164, 2019.
- [8] Y. Qi, B. Zhang, J. Ding, T. Zhang, X. Wang, and Z. Yi, “Efficient manipulation of terahertz waves by multi-bit coding metasurfaces and further applications of such metasurfaces,” *Chin. Phys. B*, vol. 30, no. 2, p. 024211, 2021.
- [9] B. Yao *et al.*, “Broadband gate-tunable terahertz plasmons in graphene heterostructures,” *Nat. Photonics*, vol. 12, no. 1, pp. 22–28, 2018.
- [10] X. Wang *et al.*, “A novel plasmonic refractive index sensor based on gold/silicon complementary grating structure,” *Chin. Phys. B*, vol. 30, no. 2, p. 024207, 2021.
- [11] Y. Zhang *et al.*, “Study on temperature adjustable terahertz metamaterial absorber based on vanadium dioxide,” *Ieee Access*, vol. 8, pp. 85154–85161, 2020.
- [12] C. Cen *et al.*, “A dual-band metamaterial absorber for graphene surface plasmon resonance at terahertz frequency,” *Phys. E Low-Dimens. Syst. Nanostructures*, vol. 117, p. 113840, 2020.
- [13] L. Jiang *et al.*, “Multi-band and high-sensitivity perfect absorber based on monolayer graphene metamaterial,” *Diam. Relat. Mater.*, vol. 111, p. 108227, 2021.
- [14] V. G. Veselago, “Reviews of Topical Problems: the Electrodynamics of Substances with Simultaneously Negative Values of backslashepsilon and μ ,” *Sov. Phys. Uspekhi*, vol. 10, no. 4, p. R04, 1968.
- [15] V. M. Shalaev, “Optical negative-index metamaterials,” *Nat. Photonics*, vol. 1, no. 1, pp. 41–48, 2007.
- [16] J. B. Pendry, “Negative Refraction Makes a Perfect Lens,” *Phys. Rev. Lett.*, vol. 85, no. 18, pp. 3966–3969, Oct. 2000, doi: 10.1103/PhysRevLett.85.3966.
- [17] Y. Wang, R. Li, X. Sun, T. Xian, Z. Yi, and H. Yang, “Photocatalytic Application of Ag-Decorated CuS/BaTiO₃ Composite Photocatalysts for Degrading RhB,” *J. Electron. Mater.*, vol. 50, no. 5, pp. 2674–2686, May 2021, doi: 10.1007/s11664-021-08787-x.
- [18] B. Appasani, P. Prince, R. K. Ranjan, N. Gupta, and V. K. Verma, “A Simple Multi-band Metamaterial Absorber with Combined Polarization Sensitive and Polarization Insensitive Characteristics for Terahertz Applications,” *Plasmonics*, vol. 14, no. 3, pp. 737–742, Jun. 2019, doi: 10.1007/s11468-018-0852-x.
- [19] Z. Yi *et al.*, “Broadband polarization-insensitive and wide-angle solar energy absorber based on tungsten ring-disc array,” *Nanoscale*, vol. 12, no. 45, pp. 23077–23083, 2020.

- [20] K. Ahmed *et al.*, "Refractive index-based blood components sensing in terahertz spectrum," *IEEE Sens. J.*, vol. 19, no. 9, pp. 3368–3375, 2019.
- [21] N. T. Tung, "Lithographic fabrication and spectroscopic characterization of a THz metamaterial absorber," *Vietnam J. Sci. Technol.*, vol. 59, no. 1, pp. 40–46, 2021.
- [22] X. Shen *et al.*, "Triple-band terahertz metamaterial absorber: Design, experiment, and physical interpretation," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 101, no. 15, 2012, Accessed: May 21, 2024. [Online]. Available: <https://pubs.aip.org/aip/apl/article/101/15/154102/150835>
- [23] S.-Y. Chiam, R. Singh, C. Rockstuhl, F. Lederer, W. Zhang, and A. A. Bettiol, "Analogue of electromagnetically induced transparency in a terahertz metamaterial," *Phys. Rev. B*, vol. 80, no. 15, p. 153103, Oct. 2009, doi: 10.1103/PhysRevB.80.153103.
- [24] V. B. Shalini, "A polarization insensitive miniaturized pentaband metamaterial THz absorber for material sensing applications," *Opt. Quantum Electron.*, vol. 53, no. 5, p. 213, May 2021, doi: 10.1007/s11082-021-02898-9.
- [25] J. Tian, R. Ke, R. Yang, and W. Pei, "Tunable quad-band perfect metamaterial absorber on the basis of monolayer graphene pattern and its sensing application," *Results Phys.*, vol. 26, p. 104447, 2021.
- [26] P.-Y. Chen and A. Alù, "Atomically Thin Surface Cloak Using Graphene Monolayers," *ACS Nano*, vol. 5, no. 7, pp. 5855–5863, Jul. 2011, doi: 10.1021/nm201622e.
- [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," *Opt. Commun.*, vol. 473, p. 125850, 2020.
- [28] Z. Yi *et al.*, "Dual-band plasmonic perfect absorber based on graphene metamaterials for refractive index sensing application," *Micromachines*, vol. 10, no. 7, p. 443, 2019.
- [29] Y. Zhang *et al.*, "Dual-band switchable terahertz metamaterial absorber based on metal nanostructure," *Results Phys.*, vol. 14, p. 102422, 2019.
- [30] J. Huang *et al.*, "High sensitivity refractive index sensing with good angle and polarization tolerance using elliptical nanodisk graphene metamaterials," *Phys. Scr.*, vol. 94, no. 8, p. 085805, 2019.
- [31] J. J. Tiang, N. F. Soliman, I. Khan, J. Choi, H. C. Chung, and D. Ø. Madsen, "Design and performance evaluation of a novel broadband THz modulator based on graphene metamaterial for emerging applications," *Frontiers in Materials*, vol. 10, p. 1305793, 2023.
- [32] R. Lai, P. Shi, Z. Yi, H. Li, and Y. Yi, "Triple-band surface plasmon resonance metamaterial absorber based on open-ended prohibited sign type monolayer graphene," *Micromachines*, vol. 14, no. 5, p. 953, 2023.
- [33] S. Hadipour and P. Rezaei, "RETRACTED ARTICLE: A graphene-based triple-band THz metamaterial absorber for cancer early detection," *Optics and Quantum Electronics*, vol. 55, p. 1122, 2023.