

حسگر ضریب شکست بر پایه جاذب الکترومغناطیس فراماده باند باریک در فرکانس‌های مایکروویو و تراهرتز

سعیده برزگرپاریزی^۱

۱- استادیار - دانشکده مهندسی برق - دانشگاه صنعتی سیرجان - سیرجان - ایران

barzegarparizi@sirjantech.ac.ir

چکیده: در این مقاله، یک جاذب الکترومغناطیس کامل فراماده با یک طراحی ساده در فرکانس مایکروویو و تراهرتز ارائه شده است. جاذب طراحی شده، از یک لایه دی الکتریک مصنوعی شامل آرایه‌های دو بعدی از حفره‌های مستطیل شکل متقاطع ضخیم که بر روی یک لایه دی الکتریک ختم شده به یک لایه هادی قرار گرفته است، تشکیل می‌شود. با طراحی مناسب ابعاد ساختار می‌توان به رزونانس با دامنه جذب کامل هم در فرکانس مایکروویو و هم تراهرتز دست یافت. به عنوان یک کاربرد برای ساختار پیشنهاد شده، این ساختار به عنوان یک حسگر برای تشخیص ضریب شکست مواد متفاوت به کار گرفته می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی را می‌توان برای تشخیص میزان گلوکز در آب با حساسیت $10/83$ گیگاهرتز بر واحد ضریب شکست (GHZ/RIU) و ضریب شایستگی (FOM)، $43/4$ (1/RIU) به کار گرفت. به هر حال ساختار پیشنهادی، قابلیت به کارگیری در تشخیص سایر ویژگی‌های زیست پزشکی را دارد.

واژه‌های کلیدی: جاذب الکترومغناطیس، فرامواد، سنسور ضریب شکست

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.20.3.89

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۰/۵/۱۸

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۱/۱۰/۱۰

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۲۵

نام نویسنده‌ی مسئول: سعیده برزگرپاریزی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - سیرجان - کیلومتر ۱ جاده بافت - دانشگاه صنعتی سیرجان - دانشکده‌ی مهندسی برق

۱- مقدمه

امواج مایکروویو و تراهرتز همواره توجه محققان را به خود جلب کرده است. محققان ادوات زیادی را در فرکانس‌های مایکروویو و تراهرتز جهت ارتباط، طیف سنجی، تصویربرداری و سنجش مورد مطالعه و تحقیق قرار داده‌اند. فرامواد^۱ ساختارهایی مصنوعی هستند که در طبیعت یافت نشده و خواص الکتریکی و مغناطیسی غیر معمول که در مواد طبیعی یافت نمی‌شوند را ایجاد می‌کنند و به عنوان یکی از اجزا اصلی در ساخت ادوات الکترومغناطیس به کار گرفته می‌شوند. ساختارهای فرامواد به طور معمول شامل آرایه‌هایی از المان‌های فلزی با ابعاد بسیار کوچک‌تر از طول موج بر روی یک بستر دی‌الکتریک هستند که خواص الکترومغناطیسی آن را می‌توان با تغییر هندسه و ویژگی‌های مواد تغییر داد [۱-۱۰]. در مقایسه با مواد طبیعی، فرامواد دارای ویژگی‌های غیر معمول مانند ضریب شکست منفی یا صفر [۵]، پراش زیر طول موج، نامرئی سازی الکترومغناطیسی [۶]، جذب کامل [۷] و لنز کامل [۸] نام برد. استفاده از فرامواد یک پنجره جدیدی را برای محققان در حوزه ادوات الکترومغناطیس از فرکانس مایکروویو تا مادون قرمز باز کرده است.

امروزه جاذب‌های الکترومغناطیس^۲ بر پایه فرامواد بسیار مورد توجه قرار گرفته‌اند. اولین جاذب الکترومغناطیس بر پایه فرامواد توسط لندی و همکاران [۷] در سال ۲۰۰۸ مورد مطالعه و تحقیق قرار گرفت. جاذب‌های الکترومغناطیس سهم قابل توجهی در ادواتی مانند سیستم‌های فتولتائیک، آشکارسازها، سنسورها، تشعشع‌کننده‌های گرمایی و مدولاتورها دارند [۱۱-۱۵]. با توجه به کاربرد، جاذب‌های باند باریک و یا پهن‌بند زیادی تاکنون مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته‌اند [۱۶-۲۶]. برای مثال، برای کاربردهای سنسورها و پیاده سازی میکروبولومتر برای سیستم‌های تصویربرداری، جاذب‌های باند باریک حائز اهمیت هستند [۲۱-۲۴] در حالی که در زمینه سلول‌های خورشیدی و سیستم‌های فتولتائیک حرارتی جاذب‌های پهن‌بند ترجیح داده می‌شوند [۱۱]. همانطور که گفته شد جاذب‌های باند باریک و حساس، گزینه مناسبی برای کاربردهای سنسورها هستند. بنابراین، همواره طراحی یک جاذب باند باریک با ضریب کیفیت بالا و با پاسخ فرکانسی پایدار نسبت به زاویه برخوردی و غیرحساس به پلاریزاسیون همواره چالش بوده است. تشخیص نانوذرات جذب شده روی یک سطح، باکتری‌ها، پروتئین‌ها و ویروس‌ها و ... را می‌توان با سنسورهای پلاسمونیک در فرکانس مادون قرمز و تراهرتز که افزایش میدان قوی و متمرکز سازی نور در نانو ساختارها را ایجاد می‌کنند، انجام داد. بعلاوه، سنسورهای مایکروویو نیز در بسیاری از اندازه‌گیری‌ها مانند کاربردهای زیست پزشکی، ویژگی‌های دی‌الکتریک‌های جامد و اندازه‌گیری ضریب دی‌الکتریک مواد شیمیایی مایع مورد توجه قرار گرفته‌اند [۲۷-۳۷]. مهمترین مزیت سنسورهای مایکروویو نسبت به ادوات نوری و میکرو

الکترومکانیکی این هست که به علت پسیو بودن، هزینه کمتری را تحمیل می‌کنند.

اخیراً، سنسورهای ضریب شکست^۳ بسیار زیادی بر پایه ساختارهای فرامواد توسط محققان در فرکانس‌های مایکروویو، تراهرتز و مادون قرمز ارائه شده‌اند [۳۸-۴۹]. در [۴۳-۴۶] جاذب‌هایی بر پایه ساختارهای حفره‌های متقاطع فلزی و دی‌الکتریک برای تحقق سنسورهای ضریب شکست در فرکانس‌های تراهرتز و مادون قرمز ارائه شده‌اند. در [۴۷]، یک جاذب دو بانده برای تحقق سنسور ضریب شکست در فرکانس مایکروویو ارائه شده است ساختار پیشنهادی منجر به حساسیت^۴ (GHz/RIU) ۲/۳۵ و معیار شایستگی (1/RIU) ۴/۵ شد. یک سنسور ضریب شکست بر پایه سطوح انتخاب کننده فرکانس در فرکانس ۸/۹۷ گیگاهرتز با حساسیت (GHz/RIU) ۱/۳۱ و معیار شایستگی^۵ (FOM) (1/RIU) ۷/۲۷ در [۴۸] پیشنهاد شد. بعلاوه ساختارهای زیادی بر پایه رزوناتورهای حلقه شکاف دار برای تحقق سنسور ضریب شکست در ادبیات ارائه شده‌اند [۳۴-۳۷، ۴۹]. ساختار پیشنهادی در [۴۹] منجر به حساسیت (GHz/RIU) ۰/۴ و معیار شایستگی (1/RIU) ۸/۱۴ شد.

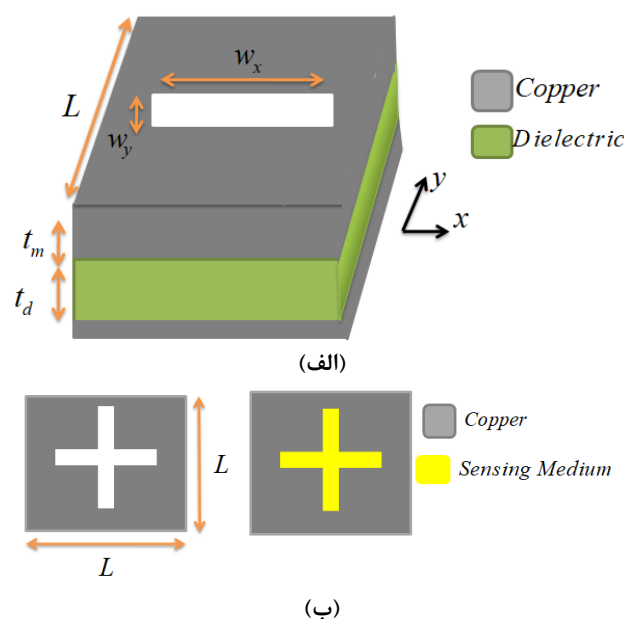
در این مقاله ابتدا به طراحی یک جاذب باند باریک با استفاده از حفره‌های مستطیل شکل متقاطع که در یک لایه فلز ضخیم حفر شده‌اند در فرکانس مایکروویو پرداخته شده است. این جاذب با توجه به پهنای باند بسیار باریک برای کاربرد حسگر بسیار مناسب است. بنابراین در قسمت دوم به عنوان یک کاربرد، یک حسگر ضریب شکست بسیار حساس بر اساس جاذب پیشنهادی مورد مطالعه قرار گرفته است. ضریب حساسیت ساختار پیشنهادی با توجه به شیف‌ت فرکانسی متناظر با تغییر ضریب شکست محیط تست برابر با (GHz/RIU) ۹/۷ و مقدار FOM برابر با (1/RIU) ۳۹ می‌باشد.

این حسگر برای تشخیص میزان گلوکز در آب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که این ساختار منجر به شیف‌ت فرکانسی ۰/۷۸ GHz، وقتی که محیط تست از آب خالص با ضریب شکست ۱/۳۱۲ به آب با ۴۵ درصد گلوکز حل شده با ضریب شکست ۱/۳۸۴ تغییر می‌کند، می‌شود. به هر حال این سنسور می‌تواند برای کاربردهای پزشکی نیز مورد استفاده قرار گیرد. در انتها عملکرد سنسور پیشنهادی با سایر سنسورهای ارائه شده در ادبیات به لحاظ حساسیت و ضریب شایستگی مقایسه شده است.

در بخش دوم این مقاله، ساختار هندسی جاذب ارائه شده است و رفتار جذب با تغییر زاویه قطبش و زاویه برخورد مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش سوم، به عنوان یک کاربرد، جاذب پیشنهاد شده به عنوان یک سنسور ضریب شکست مورد بررسی قرار گرفته است. ضریب حساسیت و ضریب کیفیت ساختار مورد مطالعه قرار گرفته است. در انتهای این بخش با تغییر پارامترهای هندسی ساختار، یک جاذب در فرکانس تراهرتز طراحی شده است. در بخش چهارم نتیجه‌گیری ارائه شده است.

۲- جاذب باند باریک

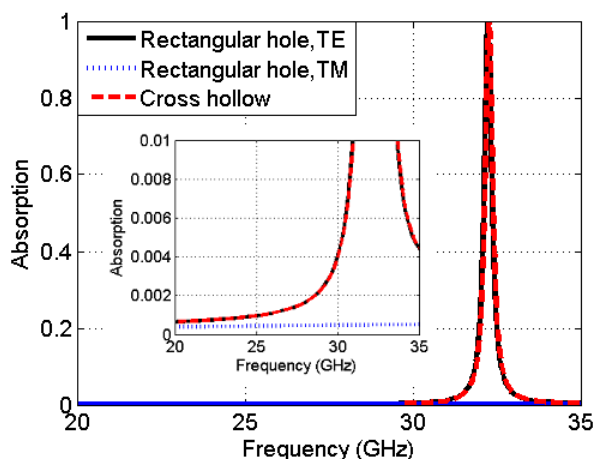
در این بخش به طراحی یک جاذب باند باریک پرداخته شده است. شکل (۱.الف) نمای یک سلول واحد از ساختار جاذب را که شامل سه لایه به صورت: لایه فوقانی فراماده تشکیل شده از آرایه‌هایی از حفره‌های مستطیل شکل ضخیم که داخل یک لایه فلز با ضخامت t_m حفر شده‌اند، لایه میانی یک لایه دی الکتریک با ضخامت t_d و لایه پائین یک لایه فلز که به عنوان یک منعکس کننده عمل می‌کند را نشان می‌دهد. لایه‌های فلزی از مس و ماده دی الکتریک با ضریب نفوذپذیری $3.66(1-j0.0037)$ در نظر گرفته شده‌اند [۳۷]. ابعاد حفره‌های مستطیل شکل $w_x \times w_y$ و طول تناوب ساختار L می‌باشد. ضریب جذب از رابطه $A(\omega) = 1 - R(\omega) - T(\omega)$ محاسبه می‌شود که در آن $R(\omega) = |S_{11}|^2$ و $T(\omega) = |S_{21}|^2$ به ترتیب ضرایب انتقال و انعکاس ساختار می‌باشد. اگر ضخامت لایه فلز به اندازه کافی بزرگ در نظر گرفته شود لایه پائین مانند یک صفحه زمین عمل می‌کند بنابراین ضریب انتقال در ساختار صفر خواهد شد و ضریب جذب به صورت $A(\omega) = 1 - R(\omega)$ محاسبه می‌شود.



شکل (۱): (الف) ساختار جاذب شامل آرایه‌های مستطیل شکل حفر شده داخل یک لایه فلزی ضخیم قرار گرفته بر روی زیر لایه دی الکتریک زمین شده (ب) نمای از بالا لایه دی الکتریک مصنوعی شامل ساختار آرایه تشکیل شده از دو حفره مستطیل شکل متقاطع

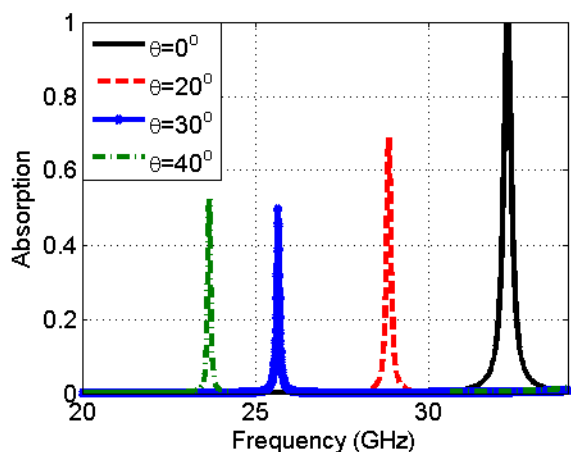
شکل (۲)، نمودار طیف جذب را برای ساختار ارائه شده در شکل (۱.الف) با ابعاد حفره $w_x = 3.5\text{mm}$ ، $w_y = 0.15\text{mm}$ ، طول تناوب $L = 4.5\text{mm}$ و ضخامت لایه فلزی و لایه دی الکتریک به ترتیب $t_m = 1\text{mm}$ و $t_d = 1\text{mm}$ را نشان می‌دهد. نتایج برای موج برخوردی با قطبش میدان الکتریکی عرضی^۶ (TE) (منحنی مشکی) و قطبش میدان مغناطیسی عرضی^۷ (TM) (منحنی آبی) رسم شده-اند. همانطور که مشاهده می‌شود ساختار حفره‌های مستطیل شکل

منجر به ایجاد یک رزونانس با پیک جذب کامل برای قطبش TE می‌شود در حالی که در قطبش TM ضریب جذب نزدیک صفر هست. در واقع در این ساختار با چرخش میدان الکتریکی از جذب صفر به جذب کامل می‌توان دست یافت. واضح هست که با چرخش ۹۰ درجه حفره های مستطیلی شکل این نتایج برعکس شود یعنی برای قطبش TM ضریب جذب کامل دست خواهیم یافت. برای رسیدن به ساختاری که به قطبش موج برخوردی وابسته نباشد می‌توان از دو حفره مستطیل متعامد همانطور که در شکل (۱.ب) سمت چپ نشان داده شده است استفاده کرد. نتایج ضریب جذب این ساختار در شکل ۲ (منحنی قرمز) نشان داده شده است. چون ساختار متقارن است طیف جذب برای برخورد نرمال به قطبش موج برخوردی وابسته نمی‌باشد. همانطور که نتیجه نشان می‌دهد، ساختار ارائه شده، یک دامنه جذب کامل در فرکانس $32/27\text{ GHz}$ ایجاد می‌کند. ضریب کیفیت این جاذب با توجه به رابطه $Q = f_0 / FWHM$ که در آن f_0 فرکانس رزونانس و $FWHM$ پهنای باند ضریب جذب $0/5$ می‌باشند، برابر با ۱۳۰ است.



شکل (۲): طیف جذب برای ساختار ارائه شده در شکل (۱) وقتی که لایه دی الکتریک مصنوعی شامل حفره های مستطیل شکل است و وقتی که با دو مستطیل شکل حفره متقاطع جایگزین می‌شود (منحنی قرمز رنگ)

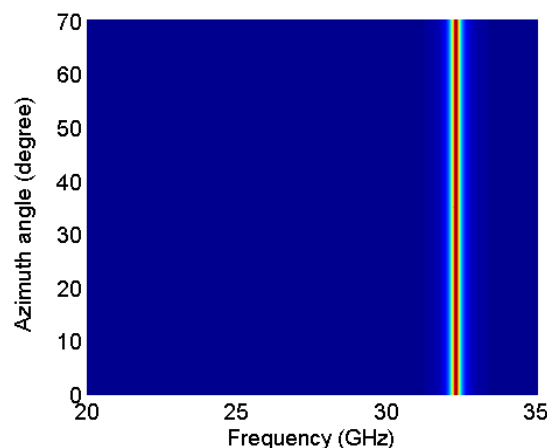
حال وابستگی طیف جذب ساختار ارائه شده را به زاویه افقی (زاویه قطبش) و زاویه برخورد مورد بررسی قرار می‌دهیم. شکل (۳.الف) و (۳.ب) وابستگی طیف جذب به زاویه افقی (زاویه قطبش) را برای دو قطبش TE و TM برای زاویه برخورد نرمال نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رفت با توجه به تقارن ساختار، نمودار طیف جذب مستقل از زاویه افقی (زاویه قطبش) می‌باشد. در شکل (۴.الف) و (۴.ب) به ترتیب وابستگی ضریب جذب به زاویه برخورد را برای دو قطبش TE و TM برای زاوایای مختلف را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود طیف جذب برای قطبش TE همچنان دارای پیک جذب کامل برای زوایای برخورد زیر ۶۰ درجه می‌باشد به هر حال افزایش زاویه برخورد منجر به شیفت فرکانسی فرکانس رزونانس به سمت فرکانس



(ب)

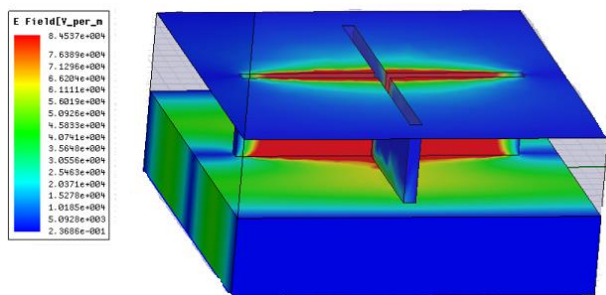
شکل (۴): نمودار جذب برای ساختار مستطیل های متقاطع برای زاویه برخورد متفاوت در دو قطبش (الف) TE (ب) TM

های بالاتر می شود. برای قطبش TM با افزایش فرکانس هر دو دامنه جذب و فرکانس رزونانس کاهش می یابند.

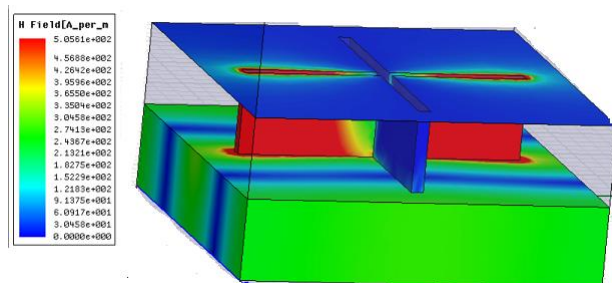


(الف)

شکل (۵. الف) و (۵. ب) توزیع میدان الکتریکی را برای قطبش TE ساختار ارائه شده را نشان می دهد. همانطور که نشان داده شده و انتظار می رفت توزیع میدان الکتریکی و مغناطیسی اطراف حفره مستطیلی شکل افقی (در جهت X) متمرکز هستند به همین دلیل برای ساختار شکل (۱. الف) تنها برای قطبش TE ضریب جذب بالا اتفاق افتاد. به هر حال با چرخش قطبش به حالت TM انتظار می رود این تمرکز اطراف حفره مستطیلی شکل عمودی اتفاق بیافتد. همانطور که مشاهده می شود برای توزیع میدان الکتریکی این تمرکز در وسط حفره است در حالی که برای توزیع میدان مغناطیسی تمرکز در لب های سمت راست و چپ اتفاق می افتد.



(الف)

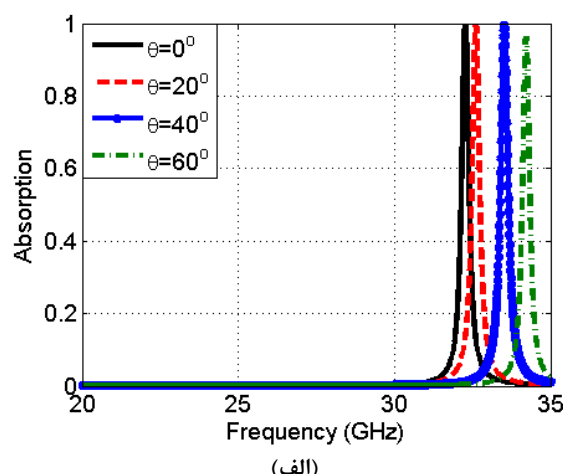


(ب)

شکل (۵): توزیع میدان (الف) الکتریکی (ب) مغناطیسی بر روی سطوح ساختار جاذب

شکل (۳): طیف جذب برای ساختار مستطیل های متقاطع برای زاویه

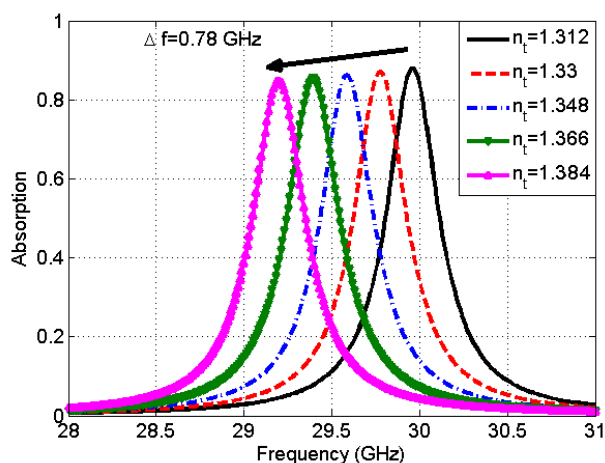
قطبش مختلف در دو قطبش (الف) TE (ب) TM



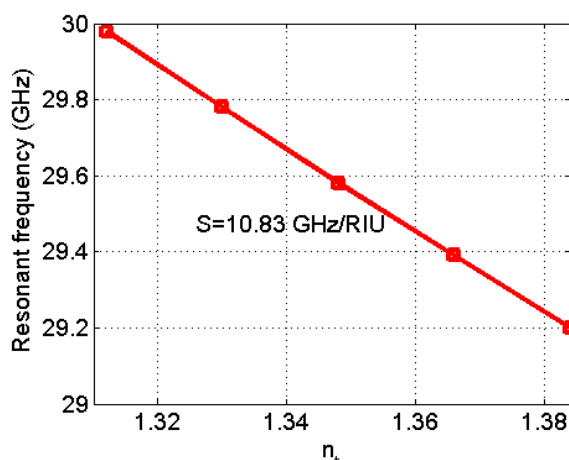
(الف)

۳- سنسور ضریب شکست

در این بخش ما به عنوان یک کاربرد، جاذب الکترومغناطیس ارائه شده را برای تشخیص ضریب شکست مواد مختلف به عنوان یک حسگر مورد مطالعه قرار می‌دهیم. همانطور که شکل (ا. ب) سمت راست نشان داده شده است محیط تست را می‌توان داخل حفره‌ها در نظر گرفت. البته می‌توان علاوه بر حفره‌ها یک لایه دی الکتریک با ضخامت بسیار باریک روی لایه بالایی ساختار را نیز به عنوان محیط تست لحاظ کرد. با توجه به انتقال فرکانسی طیف جذب با تغییر ضریب شکست محیط تست می‌توان به یک حسگر ضریب شکست دست یافت. دو پارامتر مهم برای بررسی عملکرد حسگرها، ضریب حساسیت و معیار شایستگی می‌باشند. ضریب حساسیت از رابطه $S = \Delta f / \Delta n$ (Δf شیفت فرکانسی ناشی از تغییر ضریب شکست محیط تست از n_1 به n_2 می‌باشد و $\Delta n = n_2 - n_1$) بدست می‌آید. هر چه انتقال فرکانسی متناسب با تغییر ضریب شکست محیط تست بیشتر باشد حساسیت ساختار بیشتر خواهد شد و ساختار عملکرد بهتری خواهد داشت. شکل (۶. الف) تغییرات ضریب جذب را برای ضریب شکست مختلف محیط تست بین ۱ تا ۲ را نشان می‌دهد.



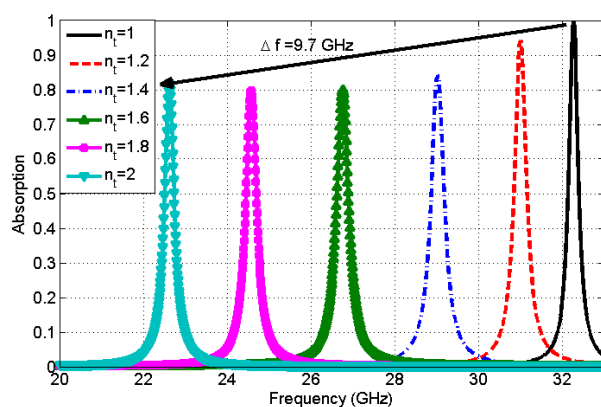
(الف)



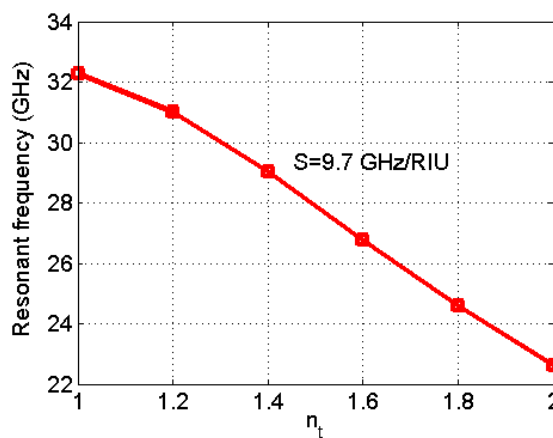
(ب)

شکل (۷): (الف) طیف جذب برای ساختار با محیط تست آب خالص با ضریب شکست ۱/۳۱۲ و آب با ۴۵ درصد گلوکز حل شده با ضریب شکست ۱/۳۸۴ (ب) فرکانس رزونانس تابعی از ضریب شکست

به عنوان یک کاربرد عملی، حسگر پیشنهادی را می‌توان برای تعیین میزان گلوکز محلول در آب استفاده کرد. شکل (۷) تغییرات ضریب جذب برای وقتی که محیط تست آب خالص با ضریب شکست ۱/۳۱۲ و آب با ۴۵ درصد گلوکز حل شده با ضریب شکست ۱/۳۸۴ در نظر گرفته می‌شود، را نشان می‌دهد [۴۳]. متناظر با انتقال فرکانس ایجاد شده با تغییر ضریب شکست محیط تست، این ساختار با حساسیت



(الف)

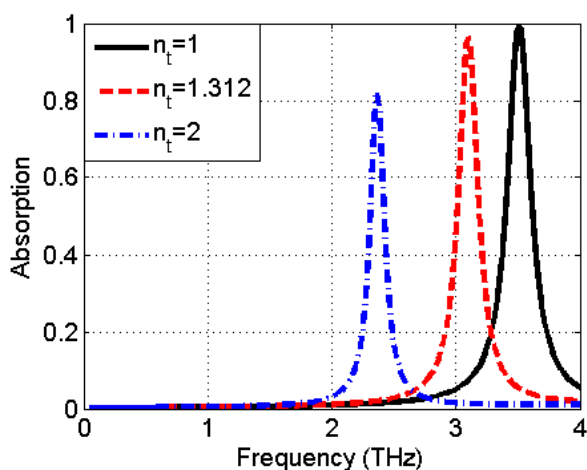


(ب)

شکل (۶): (الف) طیف جذب با تغییر ضریب شکست محیط تست (ب) فرکانس رزونانس تابعی از ضریب شکست

۴- نتیجه گیری

در این مقاله یک جاذب باند باریک غیر حساس به قطبش موج برخوردی برای زاویه برخورد عمودی، بر اساس ساختارهای فراماده شامل آرایه‌ایی از حفره‌های مستطیل شکل متقاطع حفر شده داخل یک لایه فلزی ضخیم مورد بررسی قرار گرفت. با طراحی مناسب ابعاد ساختار، یک جاذب باند باریک با ضریب جذب ۱۰۰٪ در فرکانس ۳۲/۲۷ GHz با ضریب کیفیت برابر با ۱۳۰ طراحی شد. این ساختار به عنوان یک حسگر برای تعیین ضریب شکست مواد مختلف مورد بررسی و تحقیق قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد که ضریب حساسیت و معیار شایستگی ساختار پیشنهادی با توجه به شیف‌ت فرکانسی متناسب با تغییرات ضریب شکست محیط تست بین ۱ تا ۲، به ترتیب برابر با ۹/۷ (GHz/RIU) و ۳۹ (1/RIU) است. همچنین نتایج بدست آمده، قابلیت سنسور پیشنهادی را برای تعیین میزان گلوکز محلول در آب با حساسیت خوب (۱۰/۸۳ GHz/RIU) و معیار شایستگی بالا برابر با ۴۳/۴ (1/RIU) را نشان داد. بعلاوه، با تغییر پارامترهای هندسی ساختار، ساختار پیشنهادی برای فرکانس‌های تراهرتز با فرکانس رزونانس ۳/۵ تراهرتز طراحی شد. همانطور که نتایج نشان داد با توجه به شیف‌ت فرکانسی ایجاد شده با تغییر ضریب شکست محیط تست، این ساختار منجر به ضریب حساسیت ۱۲۰۰ (GHz/RIU) گردید. ساختار پیشنهادی یک کاندید مناسب برای سایر کاربردهای زیست پزشکی می باشد.



شکل (۸): طیف جذب برای ساختار ارائه شده با پارامترهای $t_m = 5\mu m$, $L = 40\mu m$, $w_y = 1\mu m$, $w_x = 35\mu m$ و $t_d = 5\mu m$.

مراجع

- [1] Simovski, C. R., Belov, P. A., Atrashchenko, A. V., and Kivshar Y. S., "Wire metamaterials: physics and applications," Adv. Mater., vol. 24, pp. 4229-4248, 2012.
- [2] Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J., and Stewart, W. J. "Metamaterials with negative parameters, theory, design and microwave applications," Phys. Rev Lett., vol.76, p. 57, 1996.

(GHz/RIU) ۱۰/۸۳ معیار شایستگی برابر با (1/RIU) ۴۳/۴، می-توان در تشخیص میزان گلوکز در آب به کار گرفته شود. به هر حال می‌توان از این ساختار برای تشخیص سایر موارد زیست پزشکی و .. استفاده کرد.

حال ساختار پیشنهادی را با سایر جاذب‌ها و حسگرهای موجود در فرکانس مایکروویو به لحاظ ضریب کیفیت، حساسیت و معیار شایستگی مقایسه می‌کنیم. اگر چه تاکنون ساختارهای زیادی برای تحقق سنسورهای ضریب شکست از فرکانس مایکروویو تا فرکانس‌های نوری ارائه شده اند [۲۷-۴۹] اما برای مقایسه ساختار پیشنهادی با سایر ساختارهای ارائه شده، فقط به سنسورهای ارائه شده در فرکانس مایکروویو پرداخته شده است. جدول (۱) مقایسه بین ساختار پیشنهادی با سایر ساختارهای موجود به لحاظ ضریب کیفیت، حساسیت و معیار شایستگی را نشان می‌دهد. ساختارهای پیشنهادی در اینجا و ساختارهای ارائه شده در [۴۷-۴۸] بر پایه جاذب‌های تشکیل شده از فراماده فلزی هستند و ساختار پیشنهادی در [۴۹] بر اساس رزوناتور حلقه شکاف دار می‌باشد. همانطور که نتایج جدول (۱) نشان می‌دهد ساختار پیشنهادی در این مقاله با توجه به مقادیر ضریب کیفیت، حساسیت و معیار شایستگی عملکرد بهتری را ارائه می‌کند.

جدول (۱): مقایسه بین ساختار پیشنهادی و سایر ساختارها ارائه شده

مرجع	فرکانس رزونانس (GHz)	ضریب کیفیت	حساسیت (GHz/RIU)	FOM (1/RIU)
[۴۷]	۹/۳	۱۹/۳	۲/۳۵	۴/۹
[۴۸]	۸/۹۷	۹۹	۱/۳۱	۷/۲۷
[۴۹]	۱/۵۳	N.A	۰/۴	۸/۱۴
این مقاله	۳۲/۲۷	۱۳۰	۹/۷	۳۹

اگر چه این ساختار در فرکانس مایکروویو طراحی شده است به هر حال با تغییر پارامترهای هندسی ساختار می‌توان این حسگر را برای فرکانس‌های تراهرتز نیز طراحی کرد. فرض کنید ابعاد ساختار به صورت $L = 40\mu m$ ، طول تناوب $w_y = 1\mu m$ ، $w_x = 35\mu m$ و ضخامت لایه فلزی و لایه دی الکتریک به ترتیب $t_m = 5\mu m$ و $t_d = 5\mu m$ باشند. شکل (۸) ضریب جذب برای ساختار با پارامترهای داده شده را نشان می‌دهد. منحنی مشکی رنگ نتیجه برای محیط تست هوا، منحنی قرمز رنگ برای محیط تست آب خالص و منحنی آبی برای محیط با ضریب شکست ۲ را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود فرکانس رزونانس برای ماده هوا در فرکانس ۳/۵ THz رخ می‌دهد. با توجه به شیف‌ت فرکانسی ایجاد شده، این ساختار منجر به ضریب حساسیت ۱۲۰۰ (GHz/RIU) می‌شود.

نانوکامپوزیت های پلیمری" نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران دوره ۱۸، شماره ۴، ۱۰۷-۱۱۷، ۱۴۰۰.

[۲۰] جعفر خلیل پور، حمیدرضا دلیلی اسکویی و سید علی تقوی "طراحی، شبیه سازی و ساخت جاذب امواج الکترومغناطیسی پهن باند با ابعاد بهینه مبتنی بر فراماده" نشریه الکترومغناطیس کاربردی، دوره ۹، شماره ۱، ۵۵-۶۱، اردیبهشت ۱۴۰۰.

[21] Wu, D., Li, R., Liu, Y., Yu, Zh., Yu, L., Chen, L., Liu, Ch., Ma, R., and Ye, H. "Ultra-narrow band perfect absorber and its application as plasmonic sensor in the visible region," *Nanoscale Research Letters*, vol. 12, p. 427, 2017.

[22] Nejat, M., and Nozhat, N. "Ultrasensitive THz refractive index sensor based on a controllable perfect MTM absorber," *IEEE Sensor Journal*, vol. 19, no. 22, pp. 10490-10497, 2019.

[23] Barzegar-Parizi, S., and Ebrahimi, A. "Ultrathin, polarization-insensitive multi-band absorbers based on Graphene metasurface with THz sensing application," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 37, no. 8, pp. 2372-2381, 2020.

[24] Yahiaoui, R., Tan, S., Cong, L., Singh, R., Yan, F., and Zhang, W. "Multispectral terahertz sensing with highly flexible ultrathin metamaterial absorber," *J. Appl. Phys.*, vol. 118, no. 8, pp. 083103-1-6, 2015.

[25] Barzegar-Parizi, S. "Graphene-based tunable dual-band absorbers by ribbon/disk array," *Opt. Quant. Electron*, vol. 51, p. 167, 2018.

[26] Barzegar-Parizi, S., Ebrahimi, A., and Ghorbani, K., "High-Q dual-band graphene absorbers by selective excitation of graphene plasmon polaritons: circuit model analysis," *Optics and Laser Technology*, vol. 132, p. 106483, 2020.

[27] Withayachumnankul, W., Jaruwongrunsee, K., Tuantranont, A., Fumeaux, C. and Abbott, D. "Metamaterial-based microfluidic sensor for dielectric characterization," *Sens. Actuators A, Phys.*, vol. 189, pp. 233-237, 2013.

[28] Chretiennot, T., Dubuc, D., and Grenier, K., "A microwave and microfluidic planar resonator for efficient and accurate complex permittivity characterization of aqueous solutions," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 61, no. 2, pp. 972-978, 2013.

[29] Ebrahimi, A., Withayachumnankul, W., Al-Sarawi, S. F., and Abbott, D. "Metamaterial-inspired rotation sensor with wide dynamic range," *IEEE Sensors J.*, vol. 14, no. 8, pp. 2609-2614, 2014.

[30] Choi, H. Naylor, J., Luzzio, S., Beutler, J., Birchall, J., Martin, Ch., and Porch A., "Design and in vitro interference test of microwave noninvasive blood glucose monitoring sensor," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 63, no. 10, pp. 3016-3025, 2015.

[31] Zarifi, M. H. and Daneshmand, M., "Liquid sensing in aquatic environment using high quality planar microwave resonator," *Sens. Actuators B, Chem.*, vol. 225, pp. 517-521, 2016.

[32] Salim A., and Lim, S. "Complementary split-ring resonator-loaded microfluidic ethanol chemical sensor," *Sensors*, vol. 16, no. 11, Art. no. 1802, 2016.

[33] Ebrahimi, A., Scott, J., and Ghorbani, K. "Differential sensors using microstrip lines loaded with two split-ring resonators," *IEEE Sensors J.*, vol. 18, no. 14, pp. 5786-5793, 2018.

[34] Ebrahimi, A., Scott, J., and Ghorbani, K., "Transmission lines terminated with LC resonators for differential

[3] Estakhri, N. M., Edwards, B., Engheta, N., "Inverse-designed metastructures that solve equations," *Sci.*, vol. 363, pp. 1333-1338, 2019.

[4] Spada, L. L., Spooner, C., Haq, S., and Hao. Y., "Curvilinear metasurfaces for surface wave manipulation," *Sci. Rep.*, vol. 9, pp. 1-10, 2019.

[5] Spada, L. L., Vegni, L. "Near-zero-index wires," *Opt. Express*, vol. 25, pp. 23699-23708, 2017.

[6] Alitalo, P. and Tretyakov S. "Electromagnetic cloaking with metamaterials," *Mater. today*, vol. 12, pp. 22-29, 2009.

[7] Landy, N. I., Sajuyigbe, S., Mock, J. J., Smith, D. R. and Padilla, W. J. "Perfect metamaterial absorber," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, p. 207402, 2008.

[8] Zhang, X., and Liu, Z. "Superlenses to overcome the diffraction limit," *Nat. mater.*, vol. 7, pp. 435-441, 2008.

[۹] نوشین واثقی و محمدصادق ایریشمیان "طراحی و بهینه سازی نوع جدید از مواد جاذب راداری در پهنای باند وسیع و پلاریزاسیون دلخواه به کمک الگوریتم ژنتیک"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۷، شماره ۱، ۷-۱۳، ۱۳۸۹.

[۱۰] سعید علیایی و احمد محب زاده بهابادی "طراحی حسگر زیستی کریستال فوتونی مبتنی بر نانوتشدیدگر"، نشریه مهندسی برق و الکترونیک ایران، دوره ۱۳، شماره ۴، ۸۱-۸۸، ۱۳۹۵.

[11] Pala, R. A., White, J., Barnard, E., Liu, J., and Brongersma, M. L. "Design of plasmonic thin-film solar cells with broadband absorption enhancements" *Advance Material*, vol. 21, pp. 3504-3509, 2009.

[12] Liu, X., Tyler, T., Starr, T., Starr, A. F., Jokerst, N. M., and Padilla, W. J. "Taming the blackbody with infrared metamaterials as selective thermal emitters," *Physical Review Letters*, vol. 107, no. 4, p. 045901, 2011.

[13] Wang, J., Gou, J., and Li, W.. "Preparation of room temperature terahertz detector with lithium tantalate crystal and thin film," *AIP Adv.*, vol. 4, no. 2, pp. 027106-1-7, 2014.

[14] Savo, S., Shrekenhamer, D., and Padilla, W. J., "Liquid crystal metamaterial absorber spatial light modulator for THz applications," *Adv. Opt. Mater.*, vol. 2, no. 3, pp. 275-279, 2014.

[15] Diem, M., Koschny, T., and Soukoulis, C. M. "Wide-angle perfect absorber/thermal emitter in the terahertz regime," *Phys. Rev. B*, vol. 79, no. 3, pp. 033101-1-4, 2009.

[۱۶] سپیده فلاح زاده، کیوان فرورقی و زهرا اطلس باف، "تحلیل و طراحی جاذب های میکروویو با استفاده از ساختارهای متامتریال"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ۱۳۹۰.

[۱۷] مهدی نوروزی، ساغر جارجی و محسن غفاری میاب "طراحی و شبیه سازی جاذب الکترومغناطیسی فراماده پهن باند غیرحساس به قطبش با زاویه تابش وسیع در باند میکروویو بر پایه ی فیلم های نازک گرافیتی" اولین کنفرانس ملی میکرو نانو فناوری - دانشگاه بین المللی امام خمینی (ره)، قزوین، اردیبهشت ۱۳۹۷.

[۱۸] مجتبی بصراوری، ذاکر حسین فیروزه و محسن مداح علی "طراحی و شبیه سازی ساختار جاذب پهن باند مبتنی بر FSS با مقاومت های فشرده" علوم و فناوری دریا دوره ۲۰، شماره ۷۷، ۷۰-۷۳، بهار ۱۳۹۵.

[۱۹] علی رشیدی، غلامرضا کیانی و رحیمه نصرتی، "مروری بر مکانیسم و عملکرد جاذب های امواج الکترومغناطیس ساخته شده از

Theory and Techniques, vol. 60, no. 10, pp. 3013-3022, 2012.

زیر نویس ها

¹ Metamaterial

² Electromagnetic Absorber

³ Refractive Index Sensor

⁴ Sensitivity

⁵ Figure of Merit

⁶ Transverse Electric Polarization

⁷ Transverse Magnetic Polarization

- permittivity sensing," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 28, no. 12, pp. 1149-1151, 2018.
- [35] Albishi, A. M., and Ramahi, O. M., "Highly sensitive microwaves sensors for fluid concentration measurements," IEEE Microw. Wireless Compon. Lett., vol. 28, no. 4, pp. 287-289, 2018.
- [36] Velez, P., Grenier, K., Mata-Contreras, J., Dubuc, D., and Martín, F. "Highly-sensitive microwave sensors based on open complementary split ring resonators (OCSRRs) for dielectric characterization and solute concentration measurement in liquids," IEEE Access, vol. 6, pp. 48324-48338, 2018.
- [37] Ebrahimi, A., Scott, J., Ghorbani, K. "Microwave reflective biosensor for glucose level detection in aqueous solutions," Sensors and Actuators A: Physical, vol. 301, p. 111662, 2020.
- [38] جعفر خلیل پور، حمیدرضا دلیلی اسکویی و سید علی تقوی "طراحی، شبیه سازی و ساخت جاذب امواج الکترومغناطیسی پهن باند با ابعاد بهینه مبتنی بر فراماده" نشریه الکترومغناطیس کاربردی، دوره ۹، شماره ۱، ۵۵-۶۱، اردیبهشت ۱۴۰۰.
- [39] Barzegar-Parizi, S., Ebrahimi, A., "Terahertz All Metallic Perfect Absorber for Refractive Index Sensing and Glucose Concentration Detection," Physics Scripta., vol. 98, pp. 015504, 2023
- [40] Hamouleh-Alipour, A., Forouzeshefard, M., Baghbani R., and Vafapour, Z., "Blood Hemoglobin Concentration Sensing by Optical Nano Biosensor-Based Plasmonic Metasurface: A Feasibility Study," IEEE Transactions on Nanotechnology., vol. 21, pp. 620-628, 2022.
- [41] Banerjee, S., Dutta, P., Jha, A. V., Appasani, B., and Khan, M. S., "A Biomedical Sensor for Detection of Cancer Cells Based on Terahertz Metamaterial Absorber," IEEE Sensors Letters., vol. 6, pp. 1-4, 2022.
- [42] Yu, J., Lang, T., and Chen, H., "All-metal terahertz Metamaterial absorber and refractive index sensing performance," Photonics., vol. 8, p. 164, 2021.
- [43] Cheng, F., Yang, X., and Gao, J., "Enhancing intensity and refractive index sensing capability with infrared plasmonic perfect absorbers," Optics Letter., vol. 39, 2014.
- [44] Yan, Zh., Tang, Ch., Wu G., Tang, Y., Gu, P., Chen, J., Liu, Zh., and Huang, Zh. "Perfect absorption and refractive-index sensing by metasurfaces composed of cross-shaped hole arrays in metal substrate," Nanomaterials., vol. 11, p. 63, 2021.
- [45] Chen, S., Chen, Zh., Liu, J., Cheng, J., Zhou, Y., Xiao, L. and Chen, K. "Ultra-narrow band mid-infrared perfect absorber based on hybrid dielectric metasurface," Nanomaterials., vol. 9, p. 1350, 2019.
- [46] Yu, H., Zhao, Z., Qian, Q., Xu, J., Gou, P., Zou, Y., Cao, J., Yang, L., Qian, J., and An, Zh "Metamaterial perfect absorbers with solid and inverse periodic cross structures for optoelectronic applications," Optics Express, vol. 25, pp. 8288-8295, 2017.
- [47] Hu, S., and Liu, D., "Dual-band microwave resonators based on cross hollow structures for refractive index sensing," Physica Scripta, vol. 95, p. 085504, 2020.
- [48] W. Zhang, J. Li, J. Xie and R. Xu, "High sensitivity refractive index sensor based on frequency selective surfaces absorber," IEEE Sensors Letters, vol. 2, pp. 1-4, Art no. 3501804, 2018.
- [49] Meng, F., Wu, Q., Ermi, D., Wu, K. and Lee, J. "Polarization-independent metamaterial analog of electromagnetically induced transparency for a refractive-index-based sensor," IEEE Transactions on Microwave

