

حسگر دما بر اساس موجبر شکافی پلاسمونی تراهرتز تزویج شده به تشدیدگر

علیرضا دولت‌آبادی

چکیده: در این مقاله، عملکرد یک حسگر دما بر اساس ساختار پلاسمونی شامل یک موجبر شکافی تزویج شده به یک تشدیدگر بررسی شده است. نتایج بر اساس وابستگی معادله پاشندگی ساختار و در نتیجه فرکانس تشدید تشدیدگر به ضریب گذردهی الکتریکی ماده سازنده ساختار یعنی ایندیم آنتیموناید به دست آمده که ضریب گذردهی یادشده هم به دمای محیط وابسته است. طراحی ساختار برای بخشی از فرکانس‌های طیف تراهرتز انجام شده و نتایج شبیه‌سازی، بیانگر رابطه‌ای تقریباً خطی بین فرکانس‌های تشدید و دمای محیط در بازه دمایی ۲۶۰ تا ۳۵۰ درجه کلون است. همچنین معیاری برای بررسی حساسیت و بازه دمایی عملکردی حسگر ارائه شده بیان گردیده است. حساسیت این حسگر در بازه دمایی ذکرشده به میزان $10^{-1} \times 1$ درجه کلون بر هرتز محاسبه شده و حد تفکیک اندازه‌گیری دمای آن به حد تفکیک اندازه‌گیری فرکانس سامانه آشکارساز وابسته است. این حسگر با ساختار ساده خود می‌تواند در سامانه‌های متعدد شیمیایی و زیستی به کار گرفته شود.

کلیدواژه: ایندیم آنتیموناید، پلاسمونی، تراهرتز، تشدیدگر، حسگر دما.

۱- مقدمه

استفاده از ساختارهای الکترومغناطیس در طیف‌های فرکانسی مختلف و در کاربردهای گوناگون از نیازهای روبه‌رشد حوزه‌های صنعتی، تجاری، و پژوهشی است. به‌کارگیری طیف فرکانسی تراهرتز که نسبت به طیف‌های مجاور خود (یعنی مایکروویو و فرسرخ) کمتر اشغال شده، طی سال‌های اخیر توجه بسیاری از پژوهش‌ها را به خود جلب کرده است [۱]. این باند فرکانسی، قابلیت‌هایی را شبیه هر دو طیف مذکور ارائه می‌دهد و از طرفی به دلیل ویژگی‌های جذابی مانند انتشار غیریونیزان و غیرتخریبی برخط مستقیم [۲]، قابلیت به‌کارگیری در کاربردهای متنوع طیف‌سنجی [۳]، حسگری [۴]، تشخیص پزشکی [۵] و مخابراتی [۶] را داراست. با رشد سریع منابع و آشکارسازهای تراهرتز، تقاضای فراوانی برای سایر ادوات و قطعات تراهرتز مانند موجبرها [۷]، فیلترها [۸] و مقسم‌های توان [۹] صورت گرفته است. حسگرها نیز از دیگر قطعات پرتقاضا به‌شمار می‌آیند. استفاده از حسگرهای تراهرتز که کمیت فیزیکی مورد اندازه‌گیری را به یکی از ویژگی‌های موج تراهرتز تبدیل می‌کنند، می‌تواند رهیافتی مناسب برای تحقق ابزارهای پرسرعت و دقیق اندازه‌گیری کمیت‌های مختلف باشد [۱۰]. تاکنون حسگرهای متعددی برای اندازه‌گیری ضریب شکست [۱۱]، دما [۱۲] و اندازه شدت میدان‌های الکتریکی [۱۳] و

این مقاله در تاریخ ۳۰ فروردین ماه ۱۴۰۲ دریافت و در تاریخ ۳ آذر ماه ۱۴۰۲ بازنگری شد.

علیرضا دولت‌آبادی (نویسنده مسئول)، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آیت‌الله بروجردی، بروجرد، ایران، (email: alireza.dolatabady@abru.ac.ir).

مغناطیسی [۱۴] در طیف تراهرتز بررسی شده‌اند. حسگرهای دما یکی از انواع پرکاربرد حسگرها برای اندازه‌گیری دقیق تغییرات سیالات در سامانه‌های صنعتی، واکنش‌دهنده‌های شیمیایی و حسگرهای زیستی هستند [۱۵]. تاکنون ایده‌های مختلفی برای پیاده‌سازی حسگرهای دما بر اساس ساختارهای الکترومغناطیس با بهره‌مندی از امواج تراهرتز به کار گرفته شده‌اند که از آن جمله می‌توان به موجبر پراشه متناوب [۱۶]، تداخل‌سنج ماخ-زندر [۱۷] و آرایه‌ای از حلقه‌های فلزی [۱۸] اشاره نمود. از دیگر سو، یکی از نیازهای سامانه‌های الکترومغناطیس، دستیابی به ادوات و حسگرهایی در ابعاد زیر طول موج است [۱۹]. این نیاز به دلیل تقاضای روبه‌رشد برای تحقق ادوات قابل انطباق با مدارهای مجتمع است که کاربردهایی در سامانه‌های زیستی قابل کاشت در بدن موجودات زنده نیز دارند [۲۰]. با این حال، برآورده‌سازی این نیاز بر اساس ساختارهای معمول موجبری توسط حد پراش محدود شده است. با به‌کارگیری ساختارهای پلاسمونی، ساختارهایی مبتنی بر انتشار امواج پلاسمون سطحی مقید به فصل مشترک رسانا-عایق می‌توان بر چنین محدودیتی غلبه کرد. انتشار امواج پلاسمونی بر فصل مشترک یادشده به صورت موجی طولی و میراثونده در راستای عمود بر آن صورت می‌گیرد [۲۱]. تاکنون مطالعات بسیاری پیرامون این ساختارها که نامزدی مطلوب برای پیاده‌سازی مدارهای مجتمع به‌شمار می‌روند، در طیف‌های مختلف فرکانس نوری، فرسرخ و تراهرتز صورت گرفته است [۲۲]. همچنین بر این اساس، حسگرهای تشدید پلاسمونی گوناگونی برای اندازه‌گیری کمیت‌های فیزیکی مختلف ارائه شده‌اند [۱۵].

در این مقاله، یک حسگر دمای پلاسمونی در طیف فرکانسی تراهرتز ارائه می‌شود. ایده حسگری بر پایه اندازه‌گیری فرکانس تشدید ساختار طراحی نهفته است. پیشتر حسگرهای پلاسمونی گوناگونی برای اندازه‌گیری تغییرات دما [۲۳] و [۲۴] و همچنین حسگرهای متنوعی بر پایه ساختارهای مبتنی بر فیبر نوری برای اندازه‌گیری تغییرات دما بررسی شده‌اند. در برخی از این ساختارها از مفهوم تداخل امواج در کاواک فابری-پرو و وابستگی تداخل حاصل به دمای محیط برای آشکارسازی تغییرات دما استفاده شده است [۲۵]. در برخی از چنین حسگرهایی با افزودن مواد خاص به درون فیبر، بازه عملکردی حسگر مورد نظر افزایش یافته [۲۶] و نیز با به‌کارگیری ساختار با هندسه‌ای خاص، ابعاد آن کاهش و پایداری عملکردی آن بهبود یافته است [۲۷]. از سویی، بهره‌مندی از ساختارهای بلور نوری، شامل عناصر فلزی و اثرات تشدید پلاسمون سطحی [۲۸] تا [۳۰] بر پایه ساختارهای متنوع از جمله فیبر بلور نوری D شکل [۳۱] از دیگر رهیافت‌ها به این هدف بوده است. ایده دیگری که برای پیاده‌سازی حسگرهای دما پیشنهاد شده است، استفاده از برخی مواد مانند اتانول [۳۲]، سیلیکون، ژرمانیوم [۳۳] و کوارتز [۳۴] با بهره‌گیری از

جدول ۱: مقایسه چند حسگر دما.

مرجع	ساختار	ایده حسگری	ماده حساس به دما	طیف فرکانسی عملکرد	بیشینه حساسیت (درجه کلونین)
[۱۲]	جاذب فراماده نیمه‌هادی	تشدید جذبی ساختار	ایندیوم آنتیموناید	تراهرتز	۷۱۴۴ نانومتر تغییر طول موج تشدید
[۱۵]	موجبر فلز- عایق پلاسمونی	اثر دما بر تشدید پلاسمون‌های سطحی	نقره یا طلا	نوری	-
[۱۶]	موجبر ندانه‌دار متناوب از جنس طلا	تشدید محلی در شکاف‌های برگ ایجادشده	طلا	تراهرتز	۱۱٫۵ مگاهرتز تغییر فرکانس تشدید
[۱۷]	تداخل سنج ماخ-زندر	تغییر رابطه پاشندگی مد پلاسمون سطحی منتشرشونده با دما	ایندیوم آنتیموناید	تراهرتز	۸٫۹ گیگاهرتز تغییر فرکانس تشدید
[۱۸]	آرایه‌ای از حلقه‌های فلزی بر زیرلایه کوارتز	تغییر در فرکانس تشدید ساختار	طلا	تراهرتز	۷٫۱۴ مگاهرتز تغییر فرکانس تشدید
[۲۳]	فراسطح گرافین بر زیرلایه SiO ₂	تغییر فرکانس تشدید جاذب گرافینی	گرافین	تراهرتز (فروسرخ دور)	۱۱٫۷ گیگاهرتز تغییر فرکانس تشدید
[۲۴]	موجبر پلاسمونی دایروی	تغییر فرکانس تشدید کاواک دایروی	ماده داخل کاواک Bi ₂ TeO ₈	نوری	-
[۲۵]	کاواک فبری- پرو سیلیکونی فیبر نوری	ضریب انبساط دمایی سیلیکون	سیلیکون	نوری	۸۴٫۶ پیکومتر تغییر طول موج تشدید
[۲۷]	تداخل سنج فبری- پرو فیبر نوری	الگوی تداخلی وابسته به دما	پلی‌وینیل الکل در نوک فیبر نوری	نوری	۱۷۳٫۵ پیکومتر تغییر طول موج تشدید
[۲۸]	فیبر بلور نوری پرشده با نقره	تشدید پلاسمون سطحی	نقره	نوری	۲٫۷ نانومتر تغییر طول موج تشدید
[۲۹]	فیبر بلور نوری پرشده با مایع با ضریب ترمو-اپتیک بالا	تشدید پلاسمون سطحی	مایع با ضریب ترمو-اپتیک بالا	نوری	۷۲۰ پیکومتر تغییر طول موج تشدید
-	حسگر پیشنهادی	تغییر در فرکانس تشدید ساختار	ایندیوم آنتیموناید	تراهرتز	۹٫۵ گیگاهرتز تغییر فرکانس تشدید

جدول، مقادیر متناظر با حسگر پیشنهادی در این مقاله آمده است. ساختار پیشنهادی برای تحقق حسگر دما بر اساس ساختار نشان‌داده شده در شکل‌های ۱-الف و ۱-ب، شامل یک موجبر شکافی در بستر ایندیوم آنتیموناید و تزویج‌شده از بغل با یک تشدیدگر است. پهنای موجبر و تشدیدگر با w و طول تشدیدگر با L_r نشان داده شده‌اند. رابطه پاشندگی مد اصلی منتشرشونده پلاسمون سطحی در موجبر شکافی توسط رابطه زیر داده می‌شود [۸]

$$\tanh \sqrt{n_{eff}^2 - \frac{\epsilon_d k_w}{2}} = \frac{-\epsilon_d \sqrt{n_{eff}^2 - \epsilon_{InSb}(\omega)}}{\epsilon_{InSb}(\omega) \sqrt{n_{eff}^2 - \epsilon_d}} \quad (1)$$

که در آن n_{eff} ضریب شکست مؤثر موج منتشرشونده پلاسمون سطحی در موجبر و $k_w = 2\pi/\lambda$ عدد موج در فضای آزاد هستند که λ طول موج تابشی در فضای آزاد را نشان می‌دهد. ϵ_d و ϵ_{InSb} به ترتیب نشانگر ضرایب گذردهی الکتریکی ماده زمینه ساختار، یعنی ایندیوم آنتیموناید و عایق داخل موجبر و تشدیدگر هستند. ضریب گذردهی الکتریکی ایندیوم آنتیموناید به‌طور تقریبی با مدل ساده درود زیر قابل بیان است [۳۶]

$$\epsilon_{InSb}(\omega) = \epsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\gamma)} \quad (2)$$

که ϵ_∞ ، ω و γ به ترتیب بیانگر ضریب گذردهی در فرکانس‌های بسیار بالا، فرکانس زاویه‌ای و ثابت میرایی هستند. ω_p فرکانس پلاسماست که مطابق رابطه $\omega_p = \sqrt{Ne^2/\epsilon_0 m^*}$ به چگالی حامل‌های ذاتی N ، بار الکترون e ، ضریب گذردهی الکتریکی ϵ و جرم مؤثر حامل‌های آزاد m^* وابسته است. برای ایندیوم آنتیموناید، چگالی حامل‌های ذاتی مطابق رابطه زیر با افزایش دما (T) افزایش می‌یابد [۳۶]

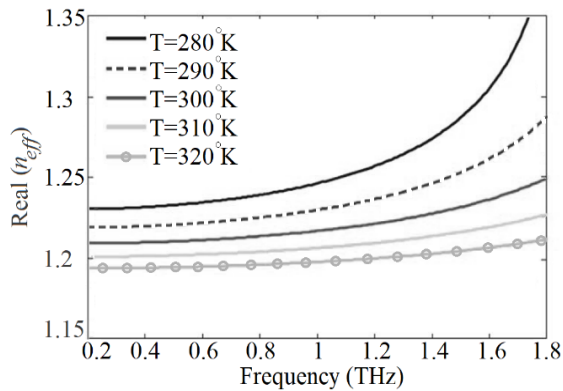
$$N = 5.76 \times 10^{20} T^{3/5} \exp\left(-\frac{0.26}{2k_B T}\right) \quad (3)$$

ضرایب گذردهی الکتریکی و یا شکست نوری وابسته به دمای آنها بوده و در این بین تفاوتی که وجود دارد، نوع وابستگی این ضرایب به دماست. چنین ساختارهایی، بیشتر شامل تشدیدگرهایی پرشده با مواد حساس به دما هستند. ماده پُرکننده تشدیدگر می‌تواند سیال و یا گاز نیز باشد که این مطلب، دشواری ساخت عملی حسگر و کالیبراسیون آن را به‌همراه دارد. تفاوت بارز حسگر پیشنهادی ما، استفاده از وابستگی ماده زمینه سازنده ساختار یعنی ایندیوم آنتیموناید به دماست که نیاز به به‌کارگیری سایر مواد حساس به دما در ساختار را برطرف می‌نماید. ضریب گذردهی الکتریکی ایندیوم آنتیموناید در طیف فرکانسی تراهرتز از مدل شبه‌درود برای فلزات در فرکانس‌های نوری تبعیت می‌کند [۳۵]. پیشتر در [۳۶]، مطالعه‌ای بر رفتار وابسته به دمای تشدیدگری از جنس ایندیوم آنتیموناید صورت گرفته که در آنجا هدف، پیاده‌سازی یک فیلتر تنظیم‌پذیر با دما بوده است. در مطالعه حاضر، حسگر دما با مقادیر حساسیت و بازه دمایی عملکردی مشخص معرفی می‌شود. همچنین در مطالعه ارائه‌شده در [۳۶]، بیشینه طیف عبور و در مطالعه حاضر، کمینه طیف عبور اندازه‌گیری می‌شوند که هر یک می‌توانند سهولت اندازه‌گیری خاص خود را فراهم آورند.

در این مقاله ابتدا در بخش ۲، ساختار موجبر پیشنهادی معرفی و عملکرد آن که رفتاری مانند فیلترهای الکترومغناطیسی دارد، به‌صورت تحلیلی بررسی می‌شود. سپس در بخش ۳ نتایج شبیه‌سازی، صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی بر اساس مدل معادل خط انتقال و نکاتی در پیاده‌سازی عملی ساختار مورد بررسی ارائه می‌گردند. نهایتاً در بخش ۴، مقاله با بیان نتیجه‌گیری خاتمه می‌یابد.

۲- ساختار پیشنهادی و عملکرد پایه آن

جدول ۱، چند حسگر دمای نام‌برده شده در بخش اول را از منظر ساختار، ایده حسگری، ماده حساس به دمای اصلی به‌کاررفته، طیف فرکانسی عملکرد و بیشینه حساسیت مقایسه می‌کند. در سطر آخر این



شکل ۲: طیف بخش حقیقی ضریب شکست مؤثر موجبر شکافی از جنس ایندیوم آنتیموناید با پهنای ۵۰ میکرومتر برای دماهای مختلف و بر اساس (۱).

۳- نتایج شبیه‌سازی حسگر دما، صحت‌سنجی نتایج و ملاحظات عملی

شبیه‌سازی ساختار معرفی‌شده بر اساس روش تفاضل متناهی در حوزه زمان اجرا شده و شرایط مرزی اعمال‌شده، لایه‌های جاذب تطبیق‌شده کامل است [۳۹] و [۴۰]. برای صرفه‌جویی در زمان اجرای شبیه‌سازی و نیز میزان حافظه مورد نیاز، ساختار مورد نظر برای شبیه‌سازی، دوطبقی در نظر گرفته شده است. این مطلب با فرض طول‌گرفتن بعد سوم ساختار (که در شکل ۱- الف نشان داده نشده است) نسبت به دو بعد دیگر، صورت می‌گیرد و از دقت خوبی برخوردار است. برای پیاده‌سازی این الگوریتم، کدی در محیط نرم‌افزار متلب نوشته شده و ابعاد مش‌بندی به صورت $\Delta x = \Delta y = 1 \mu\text{m}$ انتخاب گردیده است. منبع تحریک گاوسی در محل مشخص‌شده با S_{in} در شکل ۱- الف اعمال شده است. در پایان از محاسبه نسبت توان خروجی به توان ورودی در حوزه فرکانس در محل‌های مشخص‌شده در شکل ۱- الف، طیف انتقال توان کل ساختار به‌دست می‌آید.

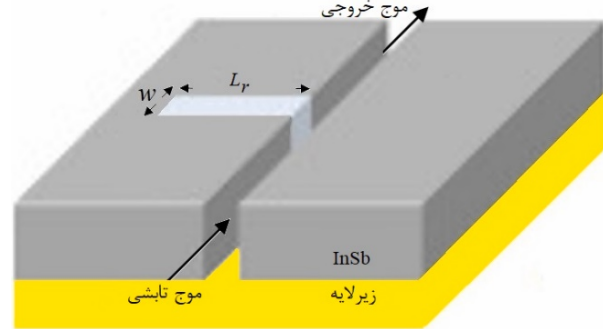
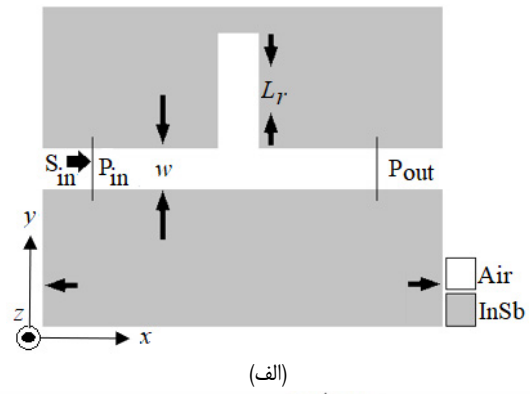
برای طراحی ساختار پیشنهادی و عمل در فرکانس مرکزی ۱ تراهرتز، گام‌های زیر دنبال می‌شوند:

(۱) با توجه به ساختار شکل ۱، ماده پایه ایندیوم آنتیموناید برای موجبر و تشدیدگر، در نظر گرفتن هوا در بخش‌های عایقی ($\epsilon_d = 1$) با مقدار پذیرفته‌شده ۵۰ میکرومتر برای پهنای موجبر شکافی و تشدیدگر (w)، دمای اولیه (T) ۲۸۰ درجه کلوین، معادله مشخصه (۱) و مدل درود برای ایندیوم آنتیموناید، ضریب شکست مؤثر موجبر شکافی محاسبه می‌شود. پارامترهای لازم در مدل معرفی‌کننده ایندیوم آنتیموناید به صورت $\epsilon_\infty = 15.6$ ، $\gamma = 0.1\pi \text{ THz}$ و $m^* = 0.015m_e$ هستند که جرم الکترون را نشان می‌دهد [۳۶].

(۲) در مرحله بعد با توجه به هدف طراحی در فرکانس مشخص بالا برای تشدید در مد دوم، طول تشدیدگر (L_r) از (۴) به‌میزان ۳۰۰ میکرومتر محاسبه می‌گردد.

(۳) سپس شبیه‌سازی عملکرد ساختار انجام می‌شود. نتیجه طیف انتقال توان در شکل ۳- الف مشاهده می‌گردد که اختلافی جزئی نسبت به هدف طراحی، یعنی تشدید در فرکانس ۱ تراهرتز دارد.

(۴) نهایتاً از مدل معادل خط انتقال برای صحت‌سنجی نتایج برگرفته از شبیه‌سازی استفاده می‌شود که مبانی نظری آن در همین بخش معرفی می‌گردد.



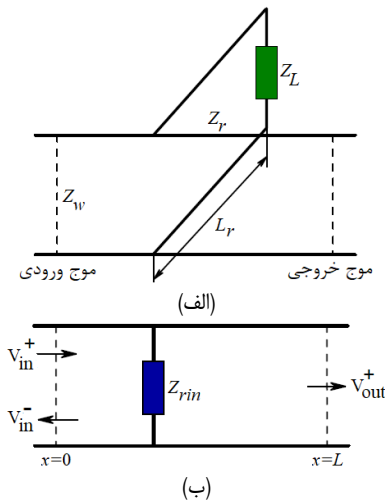
شکل ۱: نمای شماتیک ساختار پایه شامل موجبر شکافی تزویج‌شده از بغل به یک تشدیدگر. ماده زمینه ساختار ایندیوم آنتیموناید و بخش عایقی، هوا در نظر گرفته شده است. پهنای موجبر و تشدیدگر با w و طول تشدیدگر با L_r نشان داده شده‌اند. P_{in} ، S_{in} و P_{out} به ترتیب نمایانگر محل اندازه‌گیری توان‌های ورودی و خروجی و محل اعمال منبع تابشی ورودی هستند. (الف) نمای دوطبقی و (ب) نمای سه‌بعدی.

که در آن k_B ثابت بولتزمن را نشان می‌دهد. این رابطه بیانگر وابستگی فرکانس پلاسما و ضریب گذردهی ایندیوم آنتیموناید و در نتیجه، ضریب شکست مؤثر و ثابت انتشار امواج پلاسماون سطحی ($\beta = k.n_{eff}$) منتشرشونده در موجبر شکافی به دما است. در ساختار ارائه‌شده در شکل‌های ۱- الف و ۱- ب، ضمن تابش موج از منبع و انتشار در موجبر شکافی، بخشی از آن در طیف فرکانسی متناظر با فرکانس تشدید تشدیدگر جانی به تشدیدگر تزویج می‌شود. فرکانس تشدید به‌صورت زیر به طول تشدیدگر، ضریب شکست مؤثر ماده داخل آن و در نتیجه به دما وابسته است [۸]

$$f_m = \frac{[(2m+1)]c}{4n_{eff}L_r} \quad (4)$$

که m مرتبه مد تشدید و c سرعت نور در فضای آزاد را نشان می‌دهد. بخشی از موج با فرکانس تزویج‌شده به تشدیدگر از راهیابی به موجبر خروجی بازمی‌ماند و ساختار مانند یک فیلتر میان‌گذر رفتار می‌کند. با مشاهده طیف خروجی این ساختار و بررسی چگونگی تغییرات فرکانس حذف‌شده در خروجی می‌توان تغییرات دما را به شرط ثابت‌بودن سایر عوامل مؤثر اندازه گرفت.

مطابق (۱) تا (۳)، رابطه پاشندگی مد اصلی در موجبر شکافی به دما وابسته است که این وابستگی را می‌توان در شکل ۲ با نمایش طیف بخش حقیقی ضریب شکست مؤثر برای دماهای مختلف مشاهده کرد. پیشتر، ساختارهای متنوعی با ویژگی فرکانس‌گزینی شامل تشدیدگرها با شکل‌های هندسی مختلف معرفی شده‌اند. همچنین ساختارهای متنوع الکترومغناطیسی بر اساس ایندیوم آنتیموناید بررسی و ارائه شده‌اند [۳۶] تا [۳۸].



شکل ۴: (الف) مدل خط انتقال معادل برای ساختار شکل ۱- الف و نمایش جزئیات در مدل یادشده به‌طوری که Z_r و Z_w به‌ترتیب مقادیر امپدانس مشخصه خطوط انتقال معادل متناظر با موجبر شکافی و تشدیدگر هستند. Z_L بازتاب امواج پلاسمون سطحی از انتهای تشدیدگر را بیان می‌کند و Z_{rim} امپدانس مؤثر تشدیدگر است [۴۲].

با امپدانس مشخصه Z_r (جایگزین تشدیدگر) مختوم به بار Z_L تشکیل می‌شود. امپدانس Z_L تغییر فاز و تضعیف ایجادشده را در اثر بازتاب موج پلاسمون سطحی از انتهای تشدیدگر به‌حساب می‌آورد. امپدانس‌های یادشده در بالا برحسب پارامترهای موجبری بیان می‌شوند. با استفاده از مشابهت در این مدل، بین میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی عرضی در امواج پلاسمون سطحی با به‌ترتیب ولتاژ و جریان در یک خط انتقال، امپدانس مشخصه خطوط انتقال در شکل ۴ به‌صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [۴۲]

$$Z_w = Z_r \approx \frac{E_{\parallel y} w}{H_{\parallel z}} = \frac{w\beta}{\omega \epsilon_r \epsilon_d} \quad (5)$$

که در آن β پس از جاگذاری مقدار w در (۱) به‌دست می‌آید. رابطه (۵) با این فرض است که بخش عمده انرژی امواج پلاسمون سطحی درون عایق موجبر متمرکز شده است؛ در حالی که توزیع میدان الکترومغناطیسی عرضی در طول محور y به‌طور تقریبی یکنواخت است. از طرفی برای به‌دست‌آوردن مقدار Z_L لازم است تا دامنه بازتاب یکسانی برای موج الکترومغناطیسی پلاسمون سطحی با مُد مغناطیسی عرضی (TM) در انتهای تشدیدگر و مدل خط انتقال در نظر گرفته شود. با فرض بازتاب عمودی از انتهای تشدیدگر و مساوی قراردادن دامنه بازتاب که از نظریه فرنل نتیجه می‌شود با مقدار محاسبه‌شده از تحلیل مداری، رابطه زیر به‌دست می‌آید [۴۲]

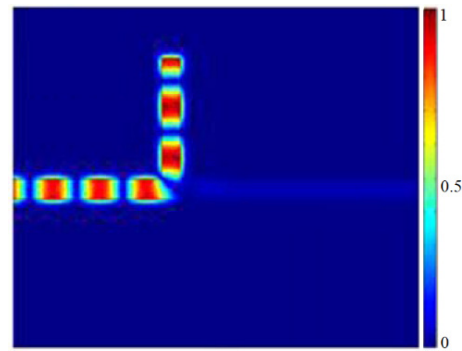
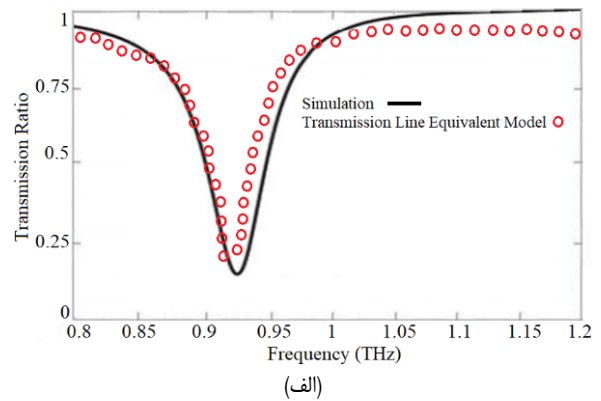
$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_r}{Z_L + Z_r} = \frac{\sqrt{\epsilon_r} - \sqrt{\epsilon_d}}{\sqrt{\epsilon_r} + \sqrt{\epsilon_d}} \quad (6)$$

و در نتیجه

$$Z_L = \sqrt{\frac{\epsilon_r}{\epsilon_d}} Z_r \quad (7)$$

روابط (۵) تا (۷)، روابط معادل‌سازی موجبر شکافی شکل ۱ را با مدل خط انتقال شکل ۴ بیان می‌کند. طبق شکل ۴- ب می‌توان امپدانس ورودی معادل Z_{rim} را به‌صورت زیر در نظر گرفت

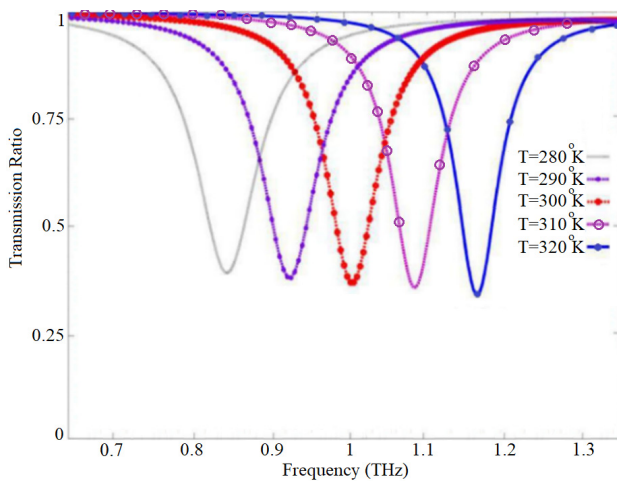
$$Z_{rim} = Z_r \frac{Z_L + jZ_r \tan(\beta L_r)}{Z_r + jZ_L \tan(\beta L_r)} \quad (8)$$



شکل ۳: (الف) طیف انتقال توان ساختار ارائه‌شده در شکل ۱ بر اساس شبیه‌سازی و مدل خط انتقال و (ب) توزیع میدان مغناطیسی عرضی به‌هنگار شده حاصل از شبیه‌سازی برای انتشار موج در ساختار شکل ۱- الف در دمای ۲۸۰ درجه کلوین و فرکانس تحریک ۰٫۹۲۸ تراهرتز.

مطابق شکل ۳- الف، حسگر در فرکانس‌های اطراف ۱ تراهرتز عمل می‌نماید. کمینه عبور توان در حوالی فرکانس ۰٫۹۲۸ تراهرتز دیده می‌شود که متناظر با یکی از مُدهای تشدید تشدیدگر است. این مُد بر اساس (۴) و استفاده از فرکانس طراحی و ضریب شکست مؤثر محاسبه‌شده از (۱)، مُد مرتبه دوم است. در این مُد که توزیع میدان الکتریکی H_z متناظرش در شکل ۳- ب مشاهده می‌شود، موج تابشی به تشدیدگر تزویج می‌شود و به خروجی راه پیدا نمی‌کند. با توجه به حد پراش می‌توان گفت که امکان هدایت موج در موجبری با ابعاد کمتر از طول موج فراهم نیست؛ بنابراین مطابق این شکل، هدایت امواج، حاکی از تحریک و انتشار امواج پلاسمون سطحی است.

برای صحت‌سنجی نتایج حاصل از شبیه‌سازی شکل ۳- الف می‌توان از روش‌های تحلیلی و شبه‌تحلیلی مختلفی از جمله نظریه مُدهای تزویج‌شده [۴۱] و مدل‌سازی بر اساس خط انتقال [۴۲] استفاده نمود. در اینجا از مدل خط انتقال برای این امر استفاده می‌شود و مدل شکل ۴ برای این تحلیل به‌کار رفته است. ویژگی رفتاری موجبر شکافی را می‌توان با در نظر گرفتن ثابت انتشار آن (β) و برگرفته از (۱) بررسی کرد. در شرایطی که عرض موجبر شکافی کمتر از طول موج انتشاری باشد ($w \ll \lambda$) (تقریب شبه‌ایستا) می‌توان مدل مداری معادل شکل ۴ را برای ساختار شکل ۱، یعنی موجبر شکافی تک‌مُد همراه با تشدیدگر تزویج‌شده با آن در نظر گرفت. همچنین از اثرات مربوط به میدان‌های نشتی و تحریک مُدهای مرتبه بالاتر میرا در نزدیک محل انشعاب تشدیدگر از موجبر شکافی چشم‌پوشی می‌شود. بر اساس شکل ۱ و ۴ می‌توان نسبت انتقال توان را در خروجی ($x=L$) به ورودی ساختار ($x=0$) به‌دست آورد. این مدار توسط اتصالات موازی از یک خط انتقال نامتناهی با امپدانس مشخصه Z_w (جایگزین موجبر شکافی) و یک خط انتقال متناهی

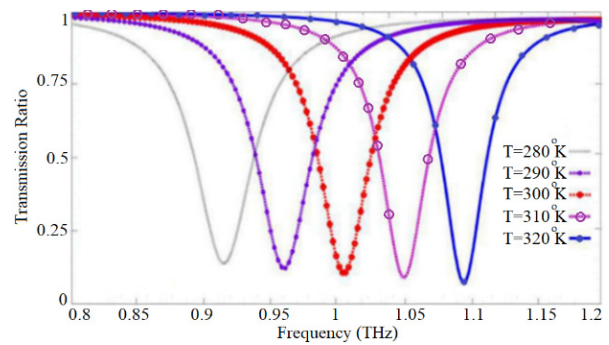


شکل ۷: طیف انتقال توان حاصل از شبیه‌سازی ساختار ارائه‌شده در شکل ۱ به‌ازای تغییر در دما برای مُد اول تشدید.

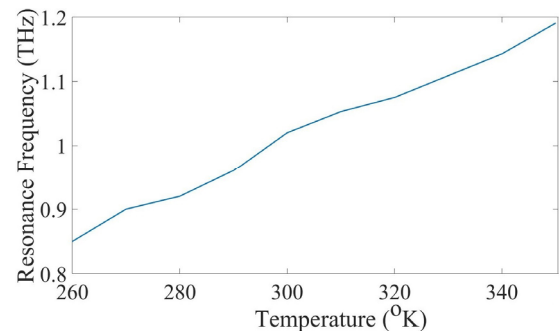
برای صحت عملکرد خطی حسگر پیشنهادی بر اساس نتایج شبیه‌سازی را ۱۵۰ درجه کلون در نظر گرفت [۳۵]. حد بالای عملکردی حسگر نیز با توجه به دمای قابل تحمل ایندیوم آنتیموناید تعیین می‌شود که بنا بر گزارش [۴۴]، دمای گذار به شکنندگی این ماده تقریباً ۱۵۰ درجه سلسیوس است.

اگرچه در بیان نتایج این مقاله، ماده عایق درون موجبرهای شکافی، هوا فرض شده است، اما می‌تواند هر عایق دیگری نیز باشد که در این صورت لازم است تا مطابق (۱)، وابستگی معادله مشخصه موجبرها به ضریب گذردهی این عایق در نظر گرفته شود. در این حالت برای اطمینان از اعتبار نتایج شبیه‌سازی و رابطه خطی دما و فرکانس تشدید ساختار، بهتر است ضریب گذردهی عایق در نظر گرفته شده مستقل از دما باشد. همچنین این عایق نباید دارای ویژگی‌های خوردگی و یا میل ترکیبی با ماده اصلی ساختار باشد. عملکرد حسگر پیشنهادی بر اساس وابستگی فرکانس تشدید تشدیدگر موجود در ساختار به دماست که در (۱) تا (۴) نیز به آن اشاره شده است. برای به‌کارگیری این ساختار به‌عنوان یک حسگر، لازم است تا نوعی کالیبراسیون صورت گیرد. این امر می‌تواند با استفاده از مقایسه تطبیقی نتایج با یک حسگر دمای آزمون و تهیه یک منحنی کالیبراسیون انجام شود.

در مقایسه بین ساختار پیشنهادی و دو ساختار ارائه‌شده در [۱۷] و [۲۳] مطابق جدول ۱، حساسیت ساختار ارائه‌شده در آنها بیشتر از ساختار پیشنهادی در این مقاله است. با این حال ساختار ارائه‌شده در این مقاله، طول کوچک‌تری در بخش تشدید در مقایسه با [۱۷] دارد (۳۰۰ میکرومتر در مقابل ۱۰۰۰ میکرومتر که البته میزان حساسیت هم به میزان یک‌سوم است). در مورد [۲۳]، علی‌رغم این که ساختار بسیار کوچک است با این حال با توجه به سطح مؤثر بسیار کم، تبادل حرارتی کمی دارد که به‌کارگیری آن را در کاربردهایی با سرعت عملکرد بالا محدود می‌کند. برای افزایش حساسیت ساختار پیشنهادی با حفظ آرایش فعلی آن به نظر می‌رسد استفاده از تغییرات مُد مرتبه اول تشدید بتواند حساسیت بالاتری را فراهم آورد. بر اساس ساختار شکل ۱ و با استفاده (۴) با همان پارامترهای ساختاری پیشین و برای عمل در فرکانس مرکزی ۱ تراهرتز، طول تشدیدگر (L_r) به میزان ۱۸۰ میکرومتر محاسبه می‌شود. نتایج شبیه‌سازی برای طیف انتقال توان به‌ازای تغییر در دما برای ساختار حسگر در مُد اول تشدید در شکل ۷ مشاهده می‌شود. همانند نتایج مربوط به مُد دوم تشدید، مشاهده می‌شود که فرکانس تشدید با افزایش دما به سمت



شکل ۵: طیف انتقال توان حاصل از شبیه‌سازی ساختار ارائه‌شده در شکل ۱ به‌ازای تغییر در دما برای مُد دوم تشدید.



شکل ۶: نمایش تغییرات فرکانس تشدید تشدیدگر ساختار برحسب دما بر اساس نتایج شبیه‌سازی برای مُد دوم تشدید.

برای به‌دست‌آوردن نسبت توان خروجی به ورودی، مطابق تعریف شکل ۴- ب در نظر گرفتن ولتاژهای معادل خط ورودی و خروجی به‌ترتیب V_m و V_{out} و روال ارائه‌شده در [۴۲] خواهیم داشت

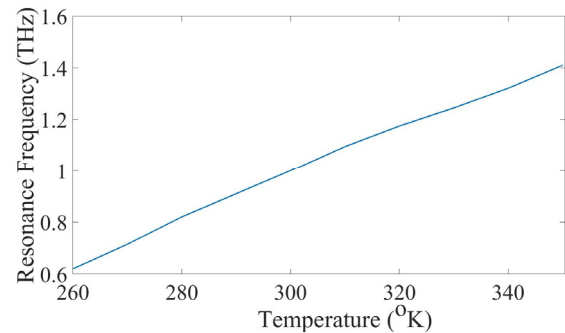
$$T = \left| 1 + \frac{Z_w}{\sqrt{Z_{rin}}} \right|^{-2} \exp\left(-\frac{L}{L_{SPP}}\right) \quad (9)$$

که $L_{SPP} = (\text{Im}(\beta))^{-1}$ طول انتشار موج پلاسمون سطحی است. شکل ۵، تغییرات طیف انتقال توان را به‌ازای تغییر در دمای محیط نشان می‌دهد. مطابق بحث بخش قبل، فرکانس تشدید (متناظر با کمینه عبور موج) وابسته به دماست. همان‌طور که در شکل ۶ دیده می‌شود، فرکانس تشدید با افزایش دما به سمت فرکانس‌های بیشتر منتقل می‌شود. در محدوده‌ای از دما به‌طور تقریبی بین ۲۶۰ تا ۳۵۰ درجه کلون (و حتی بالاتر)، این تغییرات به‌صورت تقریباً خطی است؛ اما در دماهای پایین‌تر (به‌ویژه کمتر از ۲۴۰ درجه کلون)، تغییرات گفته‌شده از رفتار خطی خارج می‌گردد. بنابراین برای استفاده از حسگر پیشنهادی در خارج از بازه خطی گفته‌شده، لازم است تا یک جدول جستجو تهیه شود.

به‌عنوان معیاری برای بررسی عملکرد این حسگر می‌توان حساسیت را به‌صورت $SS = (dT/df_m) \Delta f$ تعریف نمود که در آن Δf میزان حد تفکیک فرکانسی طیف‌سنج همراه با حسگر را بیان می‌کند. بنابراین حساسیت عملکرد این حسگر به سامانه آشکارساز طیف‌سنج وابسته است. ضریب dT/df_m بر اساس منحنی شکل ۶ و در محدوده خطی آن، تقریباً برابر با $2 \times 10^{-11} \text{ K/Hz}$ محاسبه می‌شود. با استفاده از یک سامانه طیف‌سنج مدرن با قدرت تفکیک ۲ مگاهرتز که در [۴۳] نیز گزارش شده است می‌توان به حد تفکیک دمای 0.10004 کلون دست یافت.

از سویی، (۳) که از روابط پایه حاکم بر تحلیل ساختار و اثرگذار بر رفتار حسگر به‌شمار می‌آید در دماهای بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ درجه کلون از بیشترین میزان دقت برخوردار است. بر این اساس می‌توان حد کمینه دما

- [8] J. Tao, B. Hu, X. Y. He, and Q. J. Wang, "Tunable subwavelength terahertz plasmonic stub waveguide filters," *IEEE Trans. Nanotechnol.*, vol. 12, no. 6, pp. 1191-1197, Nov. 2013.
- [9] J. R. Hu and J. S. Li, "Ultra-compact 1×8 channel terahertz wave power splitter," *J. Infrared Millim. THz Wave*, vol. 37, pp. 729-736, Aug. 2016.
- [10] A. K. Sharma and D. Gupta, "Influence of temperature on the sensitivity and signal-to-noise ratio of a fiber-optic surface-plasmon resonance sensor," *Appl. Opt.*, vol. 45, pp. 151-161, Jan. 2006.
- [11] E. A. Velichko, "Evaluation of a graphene-covered dielectric microtube as a refractive-index sensor in the terahertz range," *J. Opt.*, vol. 18, Article ID: 035008, Feb. 2016.
- [12] M. Aslnezhad, "High sensitivity refractive index and temperature sensor based on semiconductor metamaterial perfect absorber in the terahertz band," *Opt. Commun.*, vol. 463, Article ID: 125411, May 2020.
- [13] L. L. Xu, Y. Gong, Y. X. Fan, and Z. Y. Tao, "A high-resolution terahertz electric field sensor using a corrugated liquid crystal waveguide," *Crystals*, vol. 9, Article ID: 302, 2019.
- [14] A. Dolatabady and N. Granpayeh, "Plasmonic magnetic sensor based on graphene mounted on a magneto-optic grating," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, no. 2, pp. 1-5, Feb. 2018.
- [15] S. K. Ozdemir and G. T. Sayan, "Temperature effects on surface plasmon resonance: design considerations for an optical temperature sensor," *J. of Lightwave Technol.*, vol. 21, no. 3, pp. 805-814, Mar. 2003.
- [16] J. L. Xue, L. L. Xu, T. T. Wang, Y. X. Fan, and Z. Y. Tao, "Terahertz thermal sensing by using a defect-containing periodically corrugated gold waveguide," *Appl. Sci.*, vol. 10, Article ID: 4365, Jun. 2020.
- [17] Y. Ma, *et al.*, "Mach-Zehnder interferometer-based integrated terahertz temperature sensor," *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, vol. 23, no. 4, Article ID: 4601607, Jul./Aug. 2017.
- [18] G. Wang, T. Lang, and Z. Hong, "Metallic metamaterial terahertz sensors for simultaneous measurement of temperature and refractive index," *Appl. Opt.*, vol. 59, no. 18, pp. 5385-5390, 2020.
- [19] T. Huang, *et al.*, "Design of highly sensitive interferometric sensors based on subwavelength grating waveguides operating at the dispersion turning point," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 38, pp. 2680-2686, Sept. 2021.
- [20] J. Feng, C. Chen, X. Sun, and H. Peng, "Implantable fiber biosensors based on carbon nanotubes," *Acc. Mater. Res.*, vol. 2, no. 3, pp. 138-146, Jan. 2021.
- [21] H. Lu, X. Liu, D. Mao, L. Wang, and Y. Gong, "Tunable band-pass plasmonic waveguide filters with nanodisk resonators," *Opt. Express*, vol. 18, no. 17, pp. 17922-12927, 2010.
- [22] X. Zhang, "Terahertz surface plasmonic waves: a review," *Adv. Photon.*, vol. 2, Article ID: 014001, Jan. 2020.
- [23] A. Hamouleh-Alipour, A. Mir, and A. Farmani, "Analytical modeling and design of a graphene metasurface sensor for thermo-optical detection of terahertz plasmons," *IEEE Sens.*, vol. 21, no. 4, pp. 4525-4532, 15 Feb. 2021.
- [24] A. Dolatabady and N. Granpayeh, "Nanoscale temperature sensor based on plasmonic waveguides with nanocavity resonator," in *Proc. 2nd Iranian Conf. of Electromagnetic Engineering*, pp. 663-667, Tehran, Iran, 8-9 Jan. 2014.
- [25] G. Liu, M. Han, and W. Hou, "High-resolution and fast-response fiber-optic temperature sensor using silicon Fabry-Pérot cavity," *Opt. Express*, vol. 23, no. 6, pp. 7237-7247, Mar. 2015.
- [26] J. L. Kennedy and N. Djeu, "Operation of Yb: YAG fiber-optic temperature sensor up to 1600 °C," *Sens. Actuators A: Phys.*, vol. 100, no. ???, pp. 187-191, Sep. 2002.
- [27] Q. Rong, *et al.*, "A miniature fiber-optic temperature sensor based on a Fabry-Perot interferometer," *J. Opt.*, vol. 14, Article ID: 045002, Apr. 2012.
- [28] Y. Lu, M. T. Wang, C. J. Hao, Z. Q. Zhao, and J. Q. Yao, "Temperature sensing using photonic crystal fiber filled with silver nanowires and liquid," *IEEE Photonics J.*, vol. 6, Article ID: 6801307, Jun. 2014.
- [29] Y. Peng, J. Hou, Z. Huang, and Q. Lu, "Temperature sensor based on surface plasmon resonance within selectively coated photonic crystal fiber," *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 26, pp. 6361-6367, 2012.
- [30] Q. Liu, S. Li, H. Chen, J. Li, and Z. Fan, "High-sensitivity plasmonic temperature sensor based on photonic crystal fiber coated with nanoscale gold film," *Appl. Phys. Express*, vol. 8, Article ID: 046701, Mar. 2015.
- [31] M. Aslam Mollah, S. M. Riazul Islam, M. Yousufali, L. F. Abdulrazak, M. Biplob Hossain, and I. S. Amiri, "Plasmonic temperature sensor using D-shaped photonic crystal fiber," *Results Phys.*, vol. 16, Article ID: 102966, Mar. 2020.



شکل ۸: نمایش تغییرات فرکانس تشدید تشدیدگر ساختار برحسب دما بر اساس نتایج شبیه‌سازی برای مدل تشدید.

فرکانس‌های بیشتر منتقل می‌گردد. این تغییرات که در شکل ۸ نیز مشاهده می‌شوند در بازه دمایی انتخابی ۲۶۰ تا ۳۵۰ درجه کلین، رفتاری تقریباً خطی دارند و در مقایسه با نتایج شکل ۶ شیب بیشتری دارند که خود، بیانگر افزایش حساسیت حسگر ارائه‌شده در صورت استفاده از فرکانس‌های منطبق بر مدل تشدید است. با این حال، همان گونه که در شکل ۷ مشاهده می‌شود این افزایش حساسیت در ازای کاهش میزان حذف موج در ساختار فیلترگونه حسگر ارائه شده است. ضریب dT/df_m بر اساس منحنی شکل ۸ تقریباً برابر با 1×10^{-11} °K/Hz محاسبه می‌شود که بهبودی تقریباً ۱۰۰ درصدی نسبت به حالت استفاده از مدل دوم تشدید دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک حسگر پلاسمونی دمایی ساده بر بستر فیلتری موجبری از جنس ایندیوم آنتیموناید معرفی گردید. این ساختار شامل موجبری شکافی و تزویج‌یافته به تشدیدگر جانبی منشعب‌شده از آن است. این تزویج در فرکانس‌های متناظر با تشدید این تشدیدگر رخ می‌دهد. با توجه به وابستگی ضریب گذردهی ماده ایندیوم آنتیموناید و در نتیجه، معادله مشخصه ساختار به دما، فرکانس تشدید یادشده نیز به دما وابسته است. بنابراین عملکرد حسگری مورد نظر به آشکارسازی تغییرات فرکانس‌های تشدید تشدیدگر موجود در ساختار حسگر وابسته است. این ساختار می‌تواند کاربردهای گسترده‌ای در فناوری و صنایع مختلف به‌ویژه در زیست‌حسگرها داشته باشد.

مراجع

- [1] P. Tassin, T. Koschny, and C. M. Soukoulis, "Graphene for terahertz applications," *Science*, vol. 341, no. 6146, pp. 620-621, Aug. 2013.
- [2] A. Dolatabady, N. Granpayeh, and M. Abedini, "Frequency-tunable logic gates in graphene nano-waveguides," *Phot. Netw. Commun.*, vol. 39, no. 3, pp. 187-194, Jun. 2020.
- [3] J. Kitagawa, Y. Kadoya, M. Tsubota, F. Iga, and T. Takabatake, "Terahertz time-domain spectroscopy of photo-induced carriers in YTiO₃," *J. Magn. Magn. Mater.*, vol. 310, no. 2, pt 1, pp. 913-915, Mar. 2007.
- [4] H. Yoshida, *et al.*, "Terahertz sensing method for protein detection using a thin metallic mesh," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 91, Article ID: 253901, Dec. 2007.
- [5] M. Naftaly, J. F. Molloy, G. V. Lanskie, K. A. Kokh, and Y. M. Andreev, "Terahertz time domain spectroscopy for textile identification," *Appl. Opt.*, vol. 52, no. 19, pp. 4433-4437, Jun. 2013.
- [6] T. Kleine-Ostmann and T. Nagatsuma, "A review on terahertz communications research," *J. Infrared Millim. THz Wave*, vol. 32, pp. 143-171, Feb. 2011.
- [7] A. Dolatabady, N. Granpayeh, and M. Salehi, "Ferrite loaded graphene based plasmonic waveguide," *Opt. Quant. Electron.*, vol. 50, Article ID: 345, 11 pp., Sept. 2018.

- [40] A. Dolatabady and N. Granpayeh, "Tunable far-infrared plasmonically induced transparency in graphene based nano-structures," *J. Opt.*, vol. 20, Article ID: 075001, Jun. 2018.
- [41] C. Manolatou, M. J. Khan, and S. Fan, "Coupling of modes analysis of resonant channel add-drop filters," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 35, no. 9, pp. 1322-1331, Sept. 1999.
- [42] A. Pannipitiya, I. D. Rukhlenko, M. Premaratne, H. T. Hattori, and G. P. Agrawal, "Improved transmission model for metal-dielectric-metal plasmonic waveguides with stub structure," *Opt. Express*, vol. 18, no. 6, pp. 6191-6204, 2010.
- [43] H. W. Huber, H. Richter, and M. Wienold, "High-resolution terahertz spectroscopy with quantum-cascade lasers," *J. Appl. Phys.*, vol. 125, Article ID: 151401, Jun. 2019.
- [44] J. M. Wheeler, *et al.*, "The plasticity of indium antimonide: insights from variable temperature, strain rate jump micro-compression testing," *Acta Materialia*, vol. 106, pp. 283-289, Mar. 2016.
- [32] J. Zhu and G. Jin, "Detecting the temperature of ethanol based on Fano resonance spectra obtained using a metal-insulator-metal waveguide with SiO₂ branches," *Opt. Mater. Express*, vol. 11, no. 9, pp. 2787-2799, 2021.
- [33] J. F. Bradley, D. B. Leviton, and T. J. Madison, "Temperature-dependent refractive index of silicon and germanium," *Proc. of the SPIE 6273, Optomechanical Technologies for Astronomy*, 62732J, 2006.
- [34] C. L. Davies, J. B. Patel, C. Q. Xia, L. M. Herz, and M. B. Johnston, "Temperature-dependent refractive index of quartz at terahertz frequencies," *J. Infrared Millim. Terahertz Waves*, vol. 39, no. 12, pp. 1236-1248, Dec. 2018.
- [35] M. Oszwalldowski and M. Zimpel, "Temperature-dependence of intrinsic carrier concentration and density of states effective mass of heavy holes in InSb," *J. Phys. Chem. Solids*, vol. 49, no. 10, pp. 1179-1185, 1988.
- [36] X. Dai, Y. Xiang, and S. Wen, "Thermally tunable and omnidirectional terahertz photonic bandgap in the one-dimensional photonic crystals containing semiconductor InSb," *J. Appl. Phys.*, vol. 109, Article ID: 053104, Mar. 2011.
- [37] H. Liu, G. Ren, Y. Gao, B. Zhu, B. Wu, H. Li, and S. Jian, "Tunable terahertz plasmonic perfect absorber based on T-shaped InSb array," *Plasmonics*, vol. 11, no. 2, pp. 411-417, 2016.
- [38] X. Luo, X. Zhai, L. Wang, Q. Lin, and J. Liu, "Tunable terahertz narrow-band plasmonic filter based on optical Tamm plasmon in dual-section InSb slot waveguide," *Plasmonics*, vol. 12, no. 2, pp. 509-514, Jun. 2016.
- [39] F. Taflove and S. C. Hagness, *Computational Electrodynamics: The Finite-difference Time-Domain Method*, 3rd Ed. Artech House, Boston, MA, USA, 2005.

علیرضا دولت‌آبادی در سال ۱۳۸۸ مدرک کارشناسی مهندسی برق- الکترونیک خود را از دانشگاه علم و صنعت ایران و در سال‌های ۱۳۹۰ و ۱۳۹۷، مدارک به‌ترتیب کارشناسی ارشد و دکترای مهندسی برق- مخابرات میدان و موج خود را از دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی دریافت نمود. همچنین دوره کوتاه مدت فرصت مطالعاتی را در دانشگاه صنعتی آینده‌ون- هلند گذرانده است. وی از سال ۱۳۹۹ به‌عنوان استادیار دانشگاه آیت‌الله بروجردی مشغول به کار است. زمینه‌های پژوهشی مورد علاقه وی الکترومغناطیس، مخابرات نوری، فوتونیک و نانوفوتونیک است.