بیست و هشتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و چهاردهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شهید چمران اهواز، خوزستان، ایران.
۱۴-۱۲ بهمن ۱۴۰۰

افزایش حساسیت در حسگرهای فراماده مبتنی بر ضریب شکست در ناحیه فروسرخ

زهرا فرخی. حسن پاکارزاده و مهدی عسکری

zahrafarrokhi.۱۹۹۶@gmail.com , pakarzadeh@sutech.ac.ir , mehdiaskari@kazerunsfu.ac.ir

چکیده- در این مقاله با تغییر هندسه و طرح کلی سلول واحد ساختار حسگر بدون تغییر مقادیر پارامترها، میزان حساسیت در حسگر فراماده مبتنی بر ضریب شکست معرفی شده در ناحیه فروسرخ افزایش یافته‌است. حسگرهای فروسرخ مبتنی برفراماده به دلیل سهولت ساخت و کاربردهای مختلف توجه زیادی را به خود جلب کرده‌اند. با مطالعه عملکرد حسگرهای فراماده نشان داده شده است که حساسیت حسگرها را می‌توان با استفاده از فراموا تا حد زیادی افزایش داد. در طراحی حسگر از ساختار فراماده‌ای با سلول‌های واحد متشکل از دو لایه نقره استفاده شده است به طوری که لایه اول از دو نانو میله فلزی و دو نانو صفحه تشکیل شده است و لایه دوم شامل یک صفحه نقره‌ای یکنواخت است که ساختار به عنوان یک جاذب تشدیدی کامل عمل می‌کند. هم‌چنین بسامد تشدید آن به شدت به ضریب شکست محیط بستگی دارد و نتایج نشان می‌دهد که با تغییر هندسه ساختار می‌توان به حساسیت بالاتری دست یافت. حساسیت اولیه ساختار حسگر ۲۷۲۰nm/RIU ، در حالی که با تغییر هندسه و حذف برخی از لایه‌ها، می‌توان حساسیت نهایی را تا ۴۰۷۷/۲nm/RIU افزایش داد.

کلید واژه- حسگر. فراماده. حساسیت. فروسرخ.

Sensitivity enhancement in refractive index based metamaterial sensors in infrared region

Farrokhi, Zahra ; Pakarzadeh, Hassan ; Askari, Mehdi

zahrafarrokhi.۱۹۹۶@gmail.com , pakarzadeh@sutech.ac.ir , mehdiaskari@kazerunsfu.ac.ir

Abstract – In this paper, by changing the geometry and design of the unit cell of the sensor structure without changing the values of the parameters, the sensitivity of the metamaterial sensor based on the refractive index introduced in the infrared region is increased. Metamaterial-based infrared sensors have attracted a lot of attention due to their ease of fabrication and various applications. By studying the performance of metamaterial sensors, it is shown that the sensitivity of sensors can be greatly increased using metamaterials. In the sensor design, a metamaterial structure with unit cells consisting of two layers of silver is used so that the first layer consists of two metal nano-rods and two nano-plates while the second layer includes a uniform silver plate such that the structure acts as a perfect resonant absorber. Moreover, its resonance frequency strongly depends on the refractive index of the environment, and the results show that by changing the geometry of the structure, a higher sensitivity can be achieved. The initial sensitivity of the sensor structure was ۲۷۲۰ nm / RIU while by changing the geometry and eliminating some layers, the final sensitivity can be increased to ٤٠٧٧,٢ nm/RIU.

Keywords: Sensor. Metamaterials. Sensitivity. Infrared.

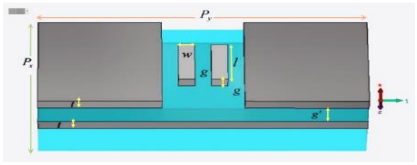
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

مقدمه

تابش فروسرخ بخشی از طیف الکترومغناطیس است که ساختار چشم انسان قادر به تشخیص یا دیدن آن نیست[۱]. امواج فروسرخ معمولاً دارای طول‌موج‌هایی بین ۰/۷۵ تا ۱۰۰۰ میکرومتر هستند[۲]. برای حسگر از تعاریف و اصطلاحات مختلفی استفاده می‌شود که بستگی به زمینه کاربرد دارد. به‌طورکلی حسگر، یک وسیله الکتریکی است که تغییرات فیزیکی یا شیمیایی را اندازه‌گیری می‌کند و آن‌را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌نماید. اخیرا یک رده جدیدی ازحسگرها براساس فرامواد توسعه یافته‌اند که به خاطر حساسیت بالا، ساخت آسان وکاربری ساده توجهات‌زیادی را به خود جلب کرده‌اند[۵-۳].فرامواد، مواد مصنوعی معمولا تشدیدی با سلول‌های واحد کوچک‌تر ازطول‌موج تابش الکترومغناطیسی و دارای خصوصیاتی بی‌نظیر به نسبت مواد طبیعی هستند[۶]. سازوکارعملکرد این‌حسگرها در حقیقت براساس تابش، بازتاب و بسامد تشدیدی ساختارفرامواد است که این موارد خود به گذردهی الکتریکی یا ϵ، تراوایی مغناطیسی یا μو ضریب شکست عناصر سازنده آن‌هابستگی دارد. با جای‌گذاری یک نمونه ماده که در آن فرآیند حسگری در حال انجام است، در یک محیط مناسب درمجاورت ساختارفرامواد، بسامدتشدید به دلیل ضریب شکست مختص ماده تغییر می‌یابد. این تغییر می‌تواند برای کشف طبیعت آن ماده استفاده شود. این نوع از حسگرها به عنوان حسگرهای بر پایه ضریب شکست شناخته می‌شوند[۷]. عسکری و همکاران یک حسگر فراماده برای ناحیه فروسرخ طراحی کردند. در بخش اول چگونگی طراحی حسگر و مشخصات هندسی آن بیان شده سپس در بخش دوم با تغییر ابعاد ساختار و هندسه حسگر معرفی شده، میزان افزایش حساسیت حسگر بررسی می‌شود [۷].

طراحی حسگر و مشخصات هندسی آن

شکل ۱ سلول واحد ساختار آشکارساز طراحی شده را نشان می دهد . حسگر طراحی شده حساسیت نسبتا بالا دارد. حساسیت یک حسگر به صورت تغییر در بسامد تشدیدی (طول موج) به ازای یک واحد تغییر در ضریب شکست محیط‌دربرگیرنده تعریف می‌شود مقادیر حساسیت با افزایش ضریب شکست به آرامی کاهش می‌یابد. مقدار میانگین۲۵۳۶ nm/RIUوحداکثر مقدار ۲۷۲۰nm/RIUدارد که معادل با۹۴۰ nm/RIU است هر سلول واحد ازدو لایه فلزی موازی ساخته شده‌اند که توسط یک لایه حایل (بافر) از جنس شیشه که فاصله ی بین لایه اول و لایه دوم است که در شکل ۱ با g'نشان داده شده است.. اولین لایه بالای لایه حایل و روی صفحه xy قرار داشته و شامل چهار عنصر فلزی شامل دو میله کوتاه و کوچک و دو ورقه مخصوص است که همگی ضخامتی معادل$t = ۳۰$ nm و $g = ۳۰$ nm دارند. میله‌های کوتاه در راستای محور x قرار داشته و طولی برابر با $l = ۱۵۰$nm و عرض معادل$g = ۳۰$ nm دارند. ورقه‌های فلزی در دو سمت مخالف سلول واحد در راستای محور y جایگذاری شده و عرض آن‌ها در راستای این محور معادل$p_y = ۲۲۵$ nm و در راستای محور x، $p_x = ۲۵۰$ nm است[۷].



شکل۱: طرح یک نمونه حسگر بر پایه فرامواد درناحیه فرو سرخ پارامترها دراین شکل پارامترها بدین صورت می‌باشد: $p_y = ۶۰۰$ nm، $p_x = ۲۵۰$ nm، $l = ۱۵۰$ nm، $g = ۳۰$nm، $g' = ۶۰$ nm، $t = ۳۰$ nm و $w = ۳۰$nm [۷].

فاصله بین دو میله فلزی و نیز بین هرمیله و ورقه مجاور آن $g = ۳۰$nm است. دومین لایه که زیر لایه حایل قرار می‌گیرد، از یک ورقه فلزی همگن ساخته شده و عمود بر محور z جایگذاری شده است. ضخامت این‌ورقه $w = ۳۰$ nm و عرض آن در راستای محورهای x و y به ترتیب۲۵۰ و ۶۰۰ نانومتر است. این ورقه فلزی بر روی یک شیشه با گذردهی الکتریکی ۲/۱۵ و ضخامت ۸۰ نانومتر دارد در صفحه xy دوره ای و متناوب است، اما در راستای محور z تک لایه می‌باشد. ابعاد سلول واحد در طول دو محور x و y به ترتیب ۲۵۰ و ۶۰۰ نانومتر است. در حل های عددی، ما با استفاده از مجموعه نرم‌افزار CST microwave studio، و یک عنصر فلز نقره برای تمام اجزای فلزی استفاده کرده و از مدل الکترون آزاد درود برای گذردهی الکتریکی آن؛ که در آن ϵ گذردهی الکتریکی، ω بسامد زاویه‌ای، ω_p بسامد پلاسمایی و γ ضریب میرایی است[۷].

$$\epsilon(\omega) = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \qquad (۱)$$

درشبیه سازی‌ها مقدار بسامد پلاسمایی و ضریب میرایی

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

$\gamma = ۳/۲ \times ۱۰^{۱۳}$ و $\omega_p = ۱/۴ \times ۱۰^{۱۶}$ rad/s می‌باشد. برای در نظر گرفتن اثرات پراکندگی سطح برای ساختارهای دارای ابعاد نانومتر، از یک ضریب میرایی ۳ برابر بزرگ‌تر از ضریب میرایی کل حجم ماده استفاده شده است[۷]. هم‌چنین از یک سلول ساختاری واحد با شرایط متناوب مرزی مناسب برای شبیه‌سازی های عددی استفاده شده است. برای محاسبه ضرایب تابش و بازتاب یک موج الکترومغناطیسی قطبیده تخت را عمود بر ساختار می تابانیم به گونه ای که راستای میدان الکتریکی آن در امتداد نانو میله ها و میدان مغناطیسی آن عمود براین نانو میله ها باشد استفاده کردیم (راستای انتشار امتداد محور **z**). با توجه به این که آب با ضریب شکست ۱/۳۳۲ به عنوان محیط در برگیرنده ساختار انتخاب شده است، دامنه تابش در تمام مقادیر بسامدی کم و قابل چشم‌پوشی است و این خصیصه‌ای است که می‌تواند با توجه به حضور دومین لایه فلزی که به عنوان یک آینه فلزی عمل می‌کند، قابل پیش‌بینی باشد[۷].

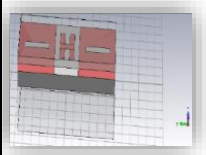
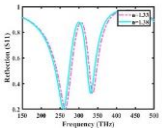
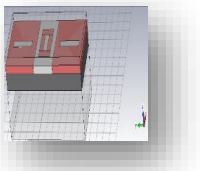
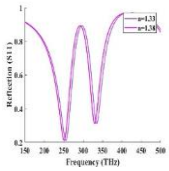
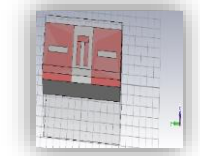
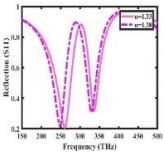
افزایش حساسیت حسگر فروسرخ مبتنی بر فراماده

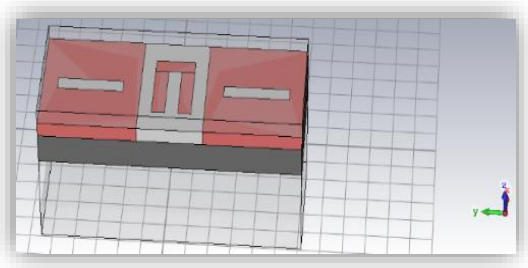
در ادامه تلاش می‌شود با ایجاد تغییراتی در ابعاد و هندسه ساختار، حساسیت حسگر شکل ۱ از مقدار محاسبه شده (۲۷۲۰nm/RIU) افزایش یابد. برای افزایش حساسیت حسگر، با ایجاد تغییراتی در ساختار حسگر اصلی ، حسگرهای جدیدی طراحی می‌گردد. بدین صورت که ابتدا لایه فلزی یکنواخت (که نقش آینه‌ای دارد) و زیر لایه اصلی حذف می‌شود(در این حالت، لایه حایل نقش زیر لایه جدید را دارد)، سپس با ایجاد تغییراتی در لایه بالایی، حسگرهای جدید ایجاد می‌شود. برای هرکدام از ساختارهای جدید، نمودارهای بازتاب، جذب و عبور آن‌ها رسم شده و سپس مقادیر حساسیت محاسبه می‌شود، که این مقادیر که به‌صورت خلاصه در جدول۱ آورده شده است. میزان حساسیت حسگر از رابطه زیر محاسبه شده‌است:

$$S = \frac{\Delta\lambda}{\Delta n} \qquad (۲)$$

طبق جدول ۱ بهترین طرح برای ساختار حسگر مورد۳ است که در مورد این طرح از ساختار توضیحات کاملی ارائه می‌شود. در این طرح، مطابق شکل۲ در صفحات فلزی لایه اول ساختار حسگر، دو حفره‌ی میله‌ای افقی خالی می‌شود که در مرحله بعد در آن ماده نمونه ریخته می‌شود. هم‌چنین یکی از دو انتهای دو میله فلزی وسط ساختار را به کمک میله‌ای از فلز بهم متصل می‌کنیم، به گونه‌ای که در بین صفحات فلزی شکلی شبیه pi به دست می‌آید، سپس در فضاهای خالی همین لایه و در بین فلزات، ماده نمونه را قرار می‌دهیم و نمودارهای بازتاب، عبور و جذب را رسم می‌کنیم.

جدول۱: مقادیر حساسیت و بسامد تشدید برای طرح‌های مختلف ساختار حسگر.

ردیف	طرح ساختار حسگر	حساسیت (nm/RIU)	فرکاس تشدید (n=۱,۳۳) (THz)
۱		۵۲۸/۱۳۶	۲۶۴/۱ 
۲		۵۳۳/۳۱۳	۲۵۶/۱ 
۳		۱۱۶۳/۳	۲۶۱/۳ 

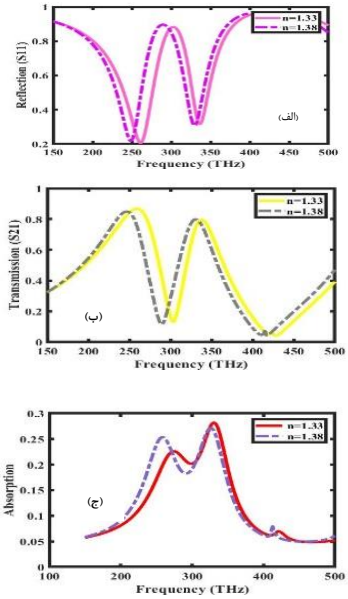


شکل۲: طراحی ساختارحسگر به‌صورت عدد پی در نمونه و میله‌های افقی در صفحات.

برای رسم نمودارهای بازتاب، عبور و جذب چون دو نمونه داریم، دوبار شبیه‌سازی را انجام می‌دهیم و سپس نمودار مربوط به

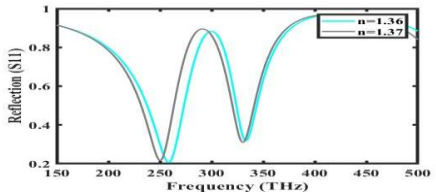
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]

پارامتر S (پارامتر پراکندگی رفتار الکتریکی خطی را در شرایط مانا توصیف می‌کند) از برنامه خارج و وارد کد متلب مربوطه می‌کنیم، تا از روابط بین بسامد و پارامتر S به نمودارهای عبور، جذب و بازتاب نمونه ها برسیم، برای رسم نمودارهای بازتاب از S_{11} استفاده می‌کنیم. در شکل۳ نمودارهای بازتاب، عبور و جذب برای طرح ساختارحسگر شکل۲ آورده شده‌است.



شکل۳: نمودارهای (الف)بازتاب، (ب)عبور (ج)وجذب ساختارحسگر به‌صورت عدد پی در نمونه و میله‌های افقی در صفحات.

در بین۳ ساختار حسگر طراحی شده همان‌طور که در جدول۱ مشاهده می‌شود بیشترین میزان حساسیت مربوط به مورد سوم و برابر با ۱۱۶۳/۳ nm/RIU است که برای ۹ ضریب شکست از ۱/۳۴ تا ۱/۴۲ نمودار بازتاب بر حسب بسامد رسم شده‌است و سپس برای برای هردو ضریب شکست پیاپی حساسیت محاسبه شده تا بیشترین مقدار حساسیت به دست آید. ماده‌های انتخابی آزمایشی بوده و فقط هدف این بوده‌است که ضریب شکست به‌صورت پلکانی با پله‌های ۰/۰۱ تغییر کند، و با تغییر بسامد تشدید حساسیت محاسبه شود. بیشترین حساسیت مربوط به دومادهٔ با ضریب شکست‌های ۱/۳۷ و۱/۳۶ است که مقدار حساسیت برابر با ۴۰۷۷/۲nm/RIU می‌باشد. نمودار بازتاب بر حسب بسامد در شکل۴ نشان داده‌شده است مشاهده می‌گردد که بسامدهای تشدیدی در ناحیه فروسرخ نزدیک قرار دارند. مقادیر بسامدهای تشدید به‌دست آمده برابر با ۲۵۰/۱ THz و ۲۵۸/۹ THz می‌باشد و محدوده بسامدی در نظر گرفته شده ۴۰۰-۲۱۴ تراهرتز می‌باشد.



شکل۴: نمودار بازتاب برحسب بسامد برای ساختارحسگر به‌صورت عدد پی در نمونه و میله‌های افقی در صفحات.(ساختار شماره ۳ در جدول ۱)

نتیجه‌گیری

در این مقاله با تغییر هندسه و طرح‌های مختلف سلول واحد در حسگرهای فروسرخ حساسیت را به دست آوردیم که بهترین میزان حساسیت برای ساختار به‌صورت عدد پی در نمونه و میله-های افقی درصفحات به دست آمد(شکل۲). میزان حساسیت از۲۷۲۰nm/RIU به ۴۰۷۷/۲ nm/RIU افزایش یافت.

مراجع

[۱] H.N.E. Jafarzadeh, S. Salamaat, Z. Rezvani, and M. Behrouz, “Determination of Near Infrared Radiation (IR-A) at work unit in one of the Iran steel industries”, Iran. J. Public Health, Vol. ۲, pp. ۱۷۰-۱۷۷, ۲۰۰۹.

[۲] F. Niklaus, C. Vieider, and H. Jakobsen, “MEMS-based uncooled infrared bolometer arrays: a review”, SPIE ,Vol. ٦٨٣٦, pp. ٦٨٣٦٠(١-١٥),٢٠٠٨.

[۳] T. Chen, S. Li, and H. Sun; “ Metamaterials application in sensing “; Sensors Nol. ۱۲, pp. ۲۷٤۲-۲۷٦٥,۲۰۱۲.

[٤] Y. Lee, S.J. Kim, H. Park and B. Lee; “Metamaterials and metasurfaces for sensor applications”; Sensors, Vol. ۱۷, pp.۱۷۲٦,۲۰۱۷.

[٥] A. V. Kabashin, P. Evans, S. Pastkovsky, W. Hendren, G. A. Wurtz, R. Atkinson, V.A.P Robert Pollard and A. V. Zayats; ” Plasmonic nanorod metamaterials for biosensing” ; Nature materials Vol. ۸, pp. ۸٦۷-۸۷۱,۲۰۰۹.

[٦] J.B. Pendry, D. Schurig, and D.R Smith; “Controlling electromagnetic fields”; science, Vol. ۳۱۲, pp. ۱۷۸۰-۱۷۸۲,۲۰۰٦.

[۷] M. Askari, and M. V. Hosseini; “"Infrared metamaterial refractive-index-based sensor” *JOSA B* ۳۷, Vol. ۹, pp. ۲۷۱۲-۲۷۱۸,۲۰۲۰.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-06]