



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 فرسرخ افزایش یافته است. حسگرهای فرسرخ مبتنی بر فراماده به دلیل سهولت ساخت و کاربردهای مختلف توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. با مطالعه عملکرد حسگرهای فراماده نشان داده شده است که حساسیت حسگرها را می توان با استفاده از فرامواد تا حد زیادی افزایش داد. در طراحی حسگر از ساختار فراماده ای با سلول های 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 نقره ای یکنواخت است که ساختار به عنوان یک جاذب تشدیدی کامل عمل می کند. همچنین بسامد تشدید آن به شدت به ضریب شکست محیط بستگی دارد و نتایج نشان می دهد که با تغییر هندسه ساختار می توان به حساسیت بالاتری دست یافت. حساسیت اولیه ساختار حسگر 2720 nm/RIU ، در حالی که با تغییر هندسه و حذف برخی از لایه ها، می توان حساسیت نهایی را تا $4077/2 \text{ nm/RIU}$ افزایش داد.

کلید واژه- حسگر. فراماده. حساسیت. فرسرخ.

Sensitivity enhancement in refractive index based metamaterial sensors in infrared region

Farrokhi, Zahra ; Pakarzadeh, Hassan ; Askari, Mehdi

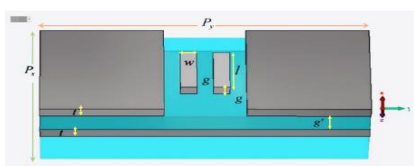
zahrafarrokhi.۱۹۹۶@gmail.com , pakarzadeh@sutech.ac.ir , mehdiaskari@kazerunsfu.ac.ir

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 2720 nm / RIU while by changing the geometry and eliminating some layers, the final sensitivity can be increased to $4077,2 \text{ nm/RIU}$.

Keywords: Sensor. Metamaterials. Sensitivity. Infrared.

مقدمه

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 $t = 30 \text{ nm}$ و $g = 30 \text{ nm}$ دارند. میله های کوتاه در راستای محور X قرار داشته و طولی برابر با $l = 150 \text{ nm}$ و عرض معادل $g = 30 \text{ nm}$ دارند. ورقه های فلزی در دو سمت مخالف سلول واحد در راستای محور Y جایگذاری شده و عرض آن ها در راستای این محور معادل $p_y = 225 \text{ nm}$ و در راستای محور X ، $p_x = 250 \text{ nm}$ است [۷].



شکل ۱: طرح یک نمونه حسگر بر پایه فرامواد در ناحیه فرو سرخ پارامترها در این شکل پارامترها بدین صورت می باشد: $p_y = 600 \text{ nm}$, $p_x = 250 \text{ nm}$, $w = 30 \text{ nm}$ و $t = 30 \text{ nm}$, $g' = 60 \text{ nm}$, $g = 30 \text{ nm}$, $l = 150 \text{ nm}$.

فاصله بین دو میله فلزی و نیز بین هر میله و ورقه مجاور آن $g = 30 \text{ nm}$ است. دومین لایه که زیر لایه حایل قرار می گیرد، از یک ورقه فلزی همگن ساخته شده و عمود بر محور Z جایگذاری شده است. ضخامت این ورقه $w = 30 \text{ nm}$ و عرض آن در راستای محورهای X و Y به ترتیب 250 و 600 نانومتر است. این ورقه فلزی بر روی یک شیشه با گذردهی الکتریکی $2/15$ و ضخامت 80 نانومتر دارد در صفحه XY دوره ای و متناوب است، اما در راستای محور Z تک لایه می باشد. ابعاد سلول واحد در طول دو محور X و Y به ترتیب 250 و 600 نانومتر است. در حل های عددی، ما با استفاده از مجموعه نرم افزار 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 زاویه ای، ω_p بسامد پلاسمایی و γ ضریب میرایی است [۷].

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

در شبیه سازی ها مقدار بسامد پلاسمایی و ضریب میرایی

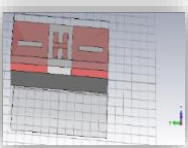
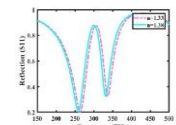
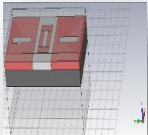
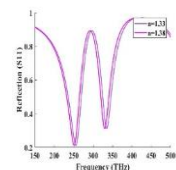
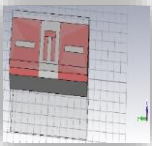
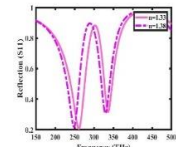
تابش فرو سرخ بخشی از طیف الکترومغناطیس است که ساختار چشم انسان قادر به تشخیص یا دیدن آن نیست [۱]. امواج فرو سرخ معمولاً دارای طول موج هایی بین 0.75 تا 1.00 میکرومتر هستند [۲]. برای حسگر از تعاریف و اصطلاحات مختلفی استفاده می شود که بستگی به زمینه کاربرد دارد. به طور کلی حسگر، یک وسیله الکتریکی است که تغییرات فیزیکی یا شیمیایی را اندازه گیری می کند و آن را به سیگنال الکتریکی تبدیل می نماید. اخیراً یک رده جدیدی از حسگرها براساس فرامواد توسعه یافته اند که به خاطر حساسیت بالا، ساخت آسان و کاربری ساده توجهات زیادی را به خود جلب کرده اند [۵]. فرامواد، مواد مصنوعی معمولاً تشدیدی با سلول های واحد کوچک تر از طول موج تابش الکترومغناطیسی و دارای خصوصیتی بی نظیر به نسبت مواد طبیعی هستند [۶]. سازوکار عملکرد این حسگرها در حقیقت براساس تابش، بازتاب و بسامد تشدیدی ساختار فرامواد است که این موارد خود به گذردهی الکتریکی یا ϵ ، تراوایی مغناطیسی یا μ و ضریب شکست عناصر سازنده آن - هابستگی دارد. با جای گذاری یک نمونه ماده که در آن فرآیند حسگری در حال انجام است، در یک محیط مناسب در مجاورت ساختار فرامواد، بسامد تشدید به دلیل ضریب شکست مختص ماده تغییر می یابد. این تغییر می تواند برای کشف طبیعت آن ماده استفاده شود. این نوع از حسگرها به عنوان حسگرهای بر پایه ضریب شکست شناخته می شوند [۷]. عسکری و همکاران یک حسگر فراماده برای ناحیه فرو سرخ 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 می شود [۷].

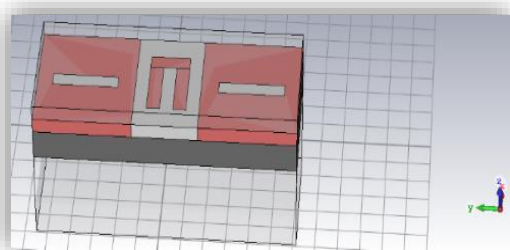
طراحی حسگر و مشخصات هندسی آن

شکل ۱ سلول واحد ساختار آشکار ساز طراحی شده را نشان می دهد. حسگر طراحی شده حساسیت نسبتاً بالا دارد. حساسیت یک حسگر به صورت تغییر در بسامد تشدیدی (طول موج) به ازای یک واحد تغییر در ضریب شکست محیط در برگیرنده تعریف می شود مقادیر حساسیت با افزایش ضریب شکست به آرامی کاهش می یابد. مقدار میانگین 2536 nm/RIU و حداکثر مقدار 2720 nm/RIU دارد که معادل 940 nm/RIU است هر سلول واحد از دو لایه فلزی موازی ساخته شده اند که توسط یک لایه

میله فلزی وسط ساختار را به کمک میله‌ای از فلز بهم متصل می‌کنیم، به گونه‌ای که در بین صفحات فلزی شکلی شبیه π 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.

جدول ۱: مقادیر حساسیت و بسامد تشدید برای طرح‌های مختلف ساختار حسگر.

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



شکل ۲: طراحی ساختار حسگر به صورت 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

$\gamma = 3/2 \times 10^{13}$ و $\omega_p = 1/4 \times 10^{16}$ 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 می‌تابانیم به گونه‌ای که راستای میدان الکتریکی آن در امتداد نانو میله‌ها و میدان مغناطیسی آن عمود بر این نانو میله‌ها باشد استفاده کردیم (راستای انتشار امتداد محور Z). با توجه به این که آب با ضریب شکست $1/332$ 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].

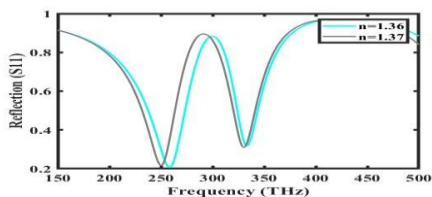
افزایش حساسیت حسگر فروسرخ مبتنی بر فراماده

در ادامه تلاش می‌شود با ایجاد تغییراتی در ابعاد و هندسه ساختار، حساسیت حسگر شکل ۱ از مقدار محاسبه شده (2720 nm/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 هر کدام از ساختارهای جدید، نمودارهای بازتاب، جذب و عبور آن‌ها رسم شده و سپس مقادیر حساسیت محاسبه می‌شود، که این مقادیر که به صورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. میزان حساسیت حسگر از رابطه زیر محاسبه شده است:

$$S = \frac{4\lambda}{\Delta n} \quad (2)$$

طبق جدول ۱ بهترین طرح برای ساختار حسگر مورد ۳ است که در مورد این طرح از ساختار توضیحات کاملی ارائه می‌شود. در این طرح، مطابق شکل ۲ 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

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 نمونه‌ها برسیم، برای رسم نمودار بازتاب از S_{11} استفاده می‌کنیم. در شکل ۳ نمودارهای بازتاب، عبور و جذب برای طرح ساختار حسگر شکل ۲ آورده شده‌است.



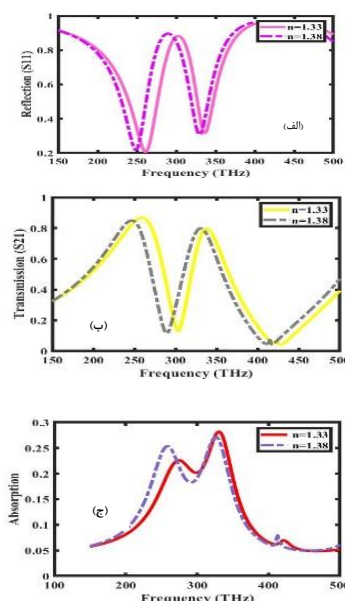
شکل ۴: نمودار بازتاب بر حسب بسامد برای ساختار حسگر به صورت عدد پی در نمونه و میله‌های افقی در صفحات. (ساختار شماره ۳ در جدول ۱)

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 به صورت عدد پی در نمونه و میله‌های افقی در صفحات به دست آمد (شکل ۲). میزان حساسیت از 2720 nm/RIU به $4077/2 \text{ nm/RIU}$ 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. ۱۷۷-۱۷۹, ۲۰۰۹.
- [۲] F. Niklaus, C. Vieider, and H. Jakobsen, "MEMS-based uncooled infrared bolometer arrays: a review", SPIE, Vol. ۶۸۳۶, pp. ۶۸۳۶۰(۱-۵), ۲۰۰۸.
- [۳] T. Chen, S. Li, and H. Sun; "Metamaterials application in sensing"; Sensors Nol. ۱۲, pp. ۲۷۴۲-۲۷۶۵, ۲۰۱۲.
- [۴] Y. Lee, S.J. Kim, H. Park and B. Lee; "Metamaterials and metasurfaces for sensor applications"; Sensors, Vol. ۱۷, pp. ۱۷۲۶, ۲۰۱۷.
- [۵] 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. ۸۶۷-۸۷۱, ۲۰۰۹.
- [۶] J.B. Pendry, D. Schurig, and D.R Smith; "Controlling electromagnetic fields"; science, Vol. ۳۱۲, pp. ۱۷۸۰-۱۷۸۲, ۲۰۰۶.
- [۷] M. Askari, and M. V. Hosseini; "Infrared metamaterial refractive-index-based sensor" JOSA B ۳۷, Vol. ۹, pp. ۲۷۱۲-۲۷۱۸, ۲۰۲۰.



شکل ۳: نمودارهای (الف) بازتاب، (ب) عبور (ج) و جذب ساختار حسگر به صورت عدد پی در نمونه و میله‌های افقی در صفحات.

در بین ۳ ساختار حسگر طراحی شده همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود بیشترین میزان حساسیت مربوط به مورد سوم و برابر با $1163/3 \text{ nm/RIU}$ است که برای ۹ ضریب شکست از $1/34$ تا $1/42$ 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 به صورت پلکانی با پله‌های $0/1$ تغییر کند، و با تغییر بسامد تشدید حساسیت محاسبه شود. بیشترین حساسیت مربوط به دوماده‌ای با ضریب شکست‌های $1/37$ و $1/36$ است که مقدار حساسیت برابر با $4077/2 \text{ nm/RIU}$ می‌باشد. نمودار بازتاب بر حسب بسامد در شکل ۴ نشان داده شده است مشاهده می‌گردد که بسامدهای تشدید در ناحیه فروسرخ نزدیک قرار دارند. مقادیر بسامدهای تشدید به دست آمده برابر با $250/1 \text{ THz}$ و