

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

زهرا فرخی. حسن پاکارزاده و مهدی عسکری

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 فرامواد 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 TYT۰nm/RIU ، در حالی که با تغییر هندسه و حذف برخی از لایهها، میتوان حساسیت نهایی را تا لاتی فراسیت اولیه ساختار حسگر **کاری ای ترکتر Tyt۰nm/RIU** ، در حالی که با تغییر هندسه و حذف برخی از لایهها، میتوان حساسیت نهایی را تا تا **کرار Tyt۰nm/RIU** افزایش داد.

# Sensitivity enhancement in refractive index based metamaterial sensors in infrared region

Farrokhi, Zahra; Pakarzadeh, Hassan; Askari, Mehdi

 $zahrafarrokhi. \verb|````@gmail.com", pakarzadeh@sutech.ac.ir", mehdiaskari@kazerunsfu.ac.ir", mehdiaskari@kazerunsfu.ac.ir",$ 

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  $YYY \cdot nm / RIU$  while by changing the geometry and eliminating some layers, the final sensitivity can be increased to  $\xi \cdot YY , \gamma nm / RIU$ .

Keywords: Sensor. Metamaterials. Sensitivity. Infrared.

تابش فروسرخ بخشى از طيف الكترومغناطيس است كه 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 می شود که بستگی به زمینه کاربرد دارد. به-طوركلى حسكر، يك وسيله الكتريكي است كه تغييرات فيزيكي یا شیمیایی را اندازه گیری می کند و آنرا به سیگنال الکتریکی تبدیل مینماید. اخیرا یک رده جدیدی از حسگرها براساس فرامواد توسعه يافتهاند كه به خاطر حساسيت بالا، ساخت آسان وکاربری ساده توجهاتزیادی را به خود جلب کردهاند[۵-].فرامواد، مواد مصنوعی معمولا تشدیدی با سلولهای واحد کوچکتر ازطولموج تابش الکترومغناطیسی و دارای خصوصیاتی بىنظير به نسبت مواد طبيعى هستند [8]. سازوكارعملكرد اين-حسگرها در حقیقت براساس تابش، بازتاب و بسامد تشدیدی ساختارفرامواد است که این موارد خود به گذردهی الکتریکی یا -، تراوایی مغناطیسی یا  $\mu$ و ضریب شکست عناصر سازنده آن $\epsilon$ هابستگی دارد. با جایگذاری یک نمونه ماده که در آن فرآیند حسگری در حال انجام است، در یک محیط مناسب درمجاورت ساختار فرامواد، بسامدتشدید به دلیل ضریب شکست مختص ماده تغيير مىيابد. اين تغيير مىتواند براى كشف طبيعت 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 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 محیط دربرگیرنده تعریف میشود مقادیر حساسیت با افزایش ضریب شکست به آرامی میشود مقادیر حساسیت با افزایش ضریب شکست به آرامی کاهش مییابد. مقدار میانگین۲۵۳۶ nm/RIU وحداکثر مقدار 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 gنشان 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 nm و ۳۰ nm و ۳۰ m g دارند. میلههای کوتاه در راستای محور x قرار داشته و طولی برابر با میلههای کوتاه در راستای محور x قرار داشته و طولی برابر با مدر دو سمت مخالف سلول واحد در راستای محور y جایگذاری شده و عرض آنها در راستای این محور معادل nm [y].



شکل ۱: طرح یک نمونه حسگر بر پایه فرامواد درناحیه فرو سرخ پارامترها دراین شکل پارامترها بدین صورت می باشد: py =۶۰۰ nm، px =۲۵۰ nm  $[\gamma] \mathbf{w} = \gamma \cdot \mathbf{nm}, \mathbf{t} = \gamma \cdot \mathbf{nm}, \mathbf{g}' = \gamma \cdot \mathbf{nm}, \mathbf{g} = \gamma \cdot \mathbf{nm}, \mathbf{l} = \gamma \diamond \cdot \mathbf{nm},$ فاصله بین دو میله فلزی و نیز بین هرمیله و ورقه مجاور آن g = ۳۰nm 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 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 الكتريكي آن؛ كه در آن € گذردهي الكتريكي، ۞ بسامد زاويهاي، بسامد پلاسمایی و  $\gamma$  ضریب میرایی است $[\gamma]$ .

$$\epsilon(\omega) = \mathbf{1} - rac{\omega_p^2}{\omega^2 + \mathrm{i} \gamma \omega}$$
 (۱)  
درشبیه سازیها مقدار بسامد پلاسمایی و ضریب میرایی

## 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 می گردد. بدین صورت که ابتدا لایه فلزی یکنواخت (که نقش آینهای دارد) و زیر لایه اصلی حذف می شود(در این حالت، لایه حایل نقش زیر لایه جدید را دارد)، سپس با ایجاد تغییراتی در لایه بالایی، حسگرهای جدید ایجاد می شود. برای هر کدام از ساختارهای جدید، نمودارهای بازتاب، جذب و عبور آنها رسم شده و سپس مقادیر حساسیت محاسبه می شود، که این مقادیر که به صورت خلاصه در جدول ۱ آورده شده است. میزان

$$S = \frac{\Delta \lambda}{\Delta n} \tag{(1)}$$

طبق جدول ۱ بهترین طرح برای ساختار حسگر مورد۳ است که در مورد این طرح از ساختار توضیحات کاملی ارائه می شود. در این طرح، مطابق شکل۲ در صفحات فلزی لایه اول ساختار حسگر، دو حفرهی میله ای افقی خالی می شود که در مرحله بعد در آن ماده نمونه ریخته می شود. هم چنین 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





**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

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 نموداربازتاب از S۱۱ استفاده میکنیم. در شکل۳ نمودارهای بازتاب، عبور و جذب برای طرح ساختار حسگر شکل۲ آورده شدهاست.



شکل۳: نمودارهای (الف)بازتاب، (ب)عبور (ج)وجذب ساختارحسگر به-صورت عدد یی در نمونه و میلههای افقی در صفحات.

در بین۳ ساختار حسگر طراحی شده همان طور که در جدول ۱ مشاهده می شود 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 شده است و سپس برای برای هردو ضریب شکست پیاپی حساسیت محاسبه شده تا بیشترین مقدار حساسیت به دست آید. ماده های انتخابی شده تا بیشترین مقدار حساسیت به دست آید. ماده های انتخابی آزمایشی بوده و فقط هدف این بوده است که ضریب شکست به-آزمایشی بوده و فقط هدف این بوده است که ضریب شکست به-مورت پلکانی با پله های ۱۰/۰ تغییر کند، و با تغییر بسامد تشدید حساسیت محاسبه شود. بیشترین حساسیت مربوط به دوماده ی با ضریب شکست های ۱/۳۷ و ۱/۳۶ است که مقدار حساسیت برابر با ۱/۳۷/۲nm/RIU است که مقدار حسب بسامد در شکل ۴ نشان داده شده است مشاهده می گردد که بسامدهای تشدیدی در ناحیه فروسرخ نزدیک قرار دارند.

۲۵۸/۹ THz میباشد و محدوده بسامدی در نظر گرفته شده ۲۱۴-۴۰۰ 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)

#### نتيجهگيرى

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

[1] 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. 7, pp. 194-1997, 7449.

[ $\uparrow$ ] F. Niklaus, C. Vieider, and H. Jakobsen, "MEMSbased uncooled infrared bolometer arrays: a review", SPIE, Vol.  $1\land 1\uparrow$ , pp.  $1\land 1\uparrow (1-1\circ), \uparrow \cdots \land$ .

[ $^{r}$ ] T. Chen, S. Li, and H. Sun; "Metamaterials application in sensing "; Sensors Nol. 17, pp.  $^{rv \xi r}$ - $^{rv \tau \circ, r \cdot 1 r}$ .

[<sup>£</sup>] Y. Lee, S.J. Kim, H. Park and B. Lee; "Metamaterials and metasurfaces for sensor applications"; Sensors, Vol. <sup>1</sup>V, pp. <sup>1</sup>VY7,<sup>7</sup>,<sup>1</sup>V.

[°] 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. <sup>A</sup>, pp. <sup>ATV</sup>-<sup>AVI</sup>,<sup>Y</sup>··<sup>9</sup>.

[<sup>1</sup>] J.B. Pendry, D. Schurig, and D.R Smith; "Controlling electromagnetic fields"; science, Vol. <sup>*m*</sup>, pp. 1*V*A.-1*V*A*Y*, *Y*...*T*.

[ $\vee$ ] M. Askari, and M. V. Hosseini; ""Infrared metamaterial refractive-index-based sensor" *JOSA B*  $\vee$ , Vol. 9, pp.  $\vee \vee \vee \times \vee \times \cdots$ .