

حسگر ضریب شکست پلاسمونیک بر اساس سیستم تشدید کننده همراه با دو موجبر پلاسمونیک، دو رینگ متصل به هم و سه کاواک

عباسی ، حمید ؛ قادی، امین ؛ رشیدی ، آرزو

گروه فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده علوم پایه دانشگاه مازندران ، بابلسر

چکیده

در این مقاله یک سنسور ضریب شکست پلاسمونیک بر اساس موجبر فلزی عایق فلزی (MIM) همراه با دو رینگ چسبیده به هم و سه کاواک تشدیدگر پیشنهاد و بررسی عددی می‌شود. طول موج های تشدید و ضریب شکست تشدیدگرها به روش تفاضل محدود حوزه زمان بررسی و شبیه سازی شده اند. با توجه به اینکه سنسور و ویژگی های انتقال هدایت موج پلاسمونیک ها، تحت تاثیر پارامترهای ساختار قرار دارند، با تغییر ضریب شکست و تغییر ابعاد کاواک ها و رینگ ها می توانیم ضریب عبور در مدهای تشدید را تضعیف یا تقویت کنیم. در نتیجه ضریب حساسیت، رقم شایستگی (FOM) و ضریب کیفیت سنسور را بدست می آوریم. این سنسورهای پلاسمونیک با چارچوب ساده و وضوح نوری بالا می توانند برای اندازه گیری ضریب شکست در صنایع پزشکی، شیمیایی و صنایع غذایی استفاده شوند و به دلیل توزیع درست خاص رزونانس ها، حساسیت بالایی به تغییرات ضریب شکست محیط دارند.

واژه های کلیدی: پلاسمونیک ها ، پلاریتونهای سطح پلاسمون ، عایق فلز فلز ، سنسور ضریب شکست.

Plasmonic refractive index sensor based on resonant system with two plasmonic waveguides, two interconnected rings and three cavities

Abbasi, Hamid ; Ghadi, Amin ; Rashidi , Arezou

Atomoc and molecular of Physics group, faculty of basic science, University of Mazandaran, Babolsar

Abstract

In this paper, a plasmonic refractive index sensor based on metal Insulator metal waveguide (MIM) with three rings attached to each other and a resonant cavity is proposed and numerically evaluated. The resonant wavelengths and refractive index of the resonators have been investigated and simulated by the finite difference time domain method. Due to the fact that the sensor and transmission characteristics of the plasmonic wave conduction system are affected by the structure parameters, changing the refractive index and changing the dimensions of the cavities and rings, we can weaken or strengthen the transmittance in the resonant modes. As a result, we obtain the sensitivity coefficient, figure of merit (FOM) and the sensor Q-factor. These plasmonic sensors with a simple frame and high optical resolution can be used to measure the refractive index in the medical, chemical and food industries and due to the specific correct distribution of resonances, they are highly sensitive to changes in the refractive index of the environment.

Keywords: plasmonics; Surface plasmon polaritons; Metal-Insulator Metal; refractive index sensor.

PACS No 42.

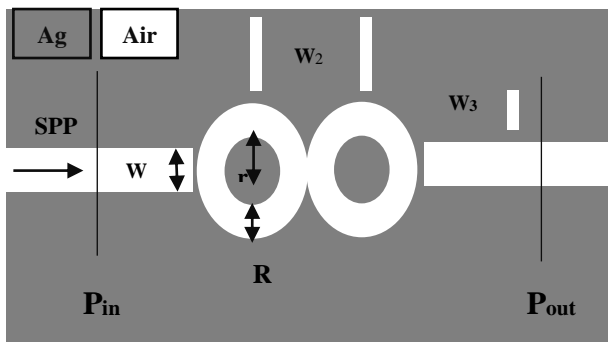
بسیار کوچکتر از طول موج تابشی محصور کند. پلاسمونیک به دو قسمت پلاسمون های سطحی موضعی و پلاسمون پلاریتونهای سطحی تقسیم می‌شود. پلاریتونهای سطح پلاسمون (SPP)، یک موج الکترومغناطیسی عرضی است که در رابط بین دی الکتریک و مواد فلزی محدود می‌شود و قادر به انتشار تا چند میکرومتر است. توانایی SPP ها در غلبه بر محدودیت پراش نوری کلاسیک، باعث

مقدمه

یکی از گام‌های طراحی دستگاه های نوری کاملاً یکپارچه با بازدهی بالا و استفاده ی بیشتر از آنها، کوچک نمودن ساختارهای پلاسمونی است. علم پلاسمونیک، برهم کنش امواج الکترومغناطیسی تابشی به سطح فلزات و الکترون های رسانش آن را تشریح می‌کند و می‌تواند امواج الکترومغناطیس را در ابعادی

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{p^2}{\omega^2} + i\gamma\omega \quad (1)$$

ω فرکانس زاویه ای، $\varepsilon_{\infty} = 1$ ثابت دی الکتریک فرکانس بی نهایت، $\omega_p = 1.37 \times 10^{16}$ فرکانس پلاسما و $\gamma = 3.21 \times 10^{13}$ نشان فرکانس نوسان الکترون است. ساختار پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده شده که شامل دو موجبر و سه کاواک و دو رینگ متصل به هم می باشد. موج ورودی از موجبر سمت چپ به طرف رینگها و کاواکها حرکت می کند و سرانجام به سمت موجبر خروجی می رود. عرض دو موجبر $w_1 = 50 \text{ nm}$ می باشد. دو رینگ چسبیده به هم دارای شعاع داخلی $r = 65 \text{ nm}$ و شعاع خارجی $R = 100 \text{ nm}$ می باشد. دو کاواک وسط دارای عرض $w_2 = 120 \text{ nm}$ و طول 20 nm می باشند و کاواک سمت راست دارای عرض $w_3 = 60 \text{ nm}$ و طول 20 nm می باشد که به فاصله 11 nm از موجبر قرار گرفته است. P_{in} و P_{out} به ترتیب مانیتورهای اندازه گیری موج ورودی و موج خروجی هستند و انتقال توسط $T = P_{out}/P_{in}$ محاسبه می شود.



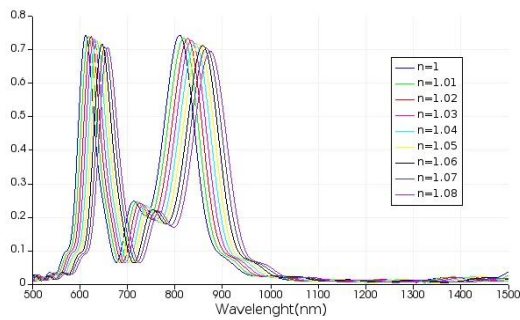
شکل ۱: تصویر دو بعدی از حسگر پلاسمونیک

بستر شبیه سازی را نقره در نظر می گیریم و محیط داخل کاواکها، رینگها و موجبرها را هوا در نظر می گیریم. فقط حالت بنیادی پلاسمونیک TM می تواند در ساختار وجود داشته باشد چون عرض موجبرها کوچکتر از طول موج نور تابشی است. موج TM که برای امواج برانگیخته SPP استفاده می شود از سمت موجبر چپ، شروع به انتشار می کند و در موجبر منتشر می شود و هرچه به درگاه خروجی نزدیک تر می شود شدت آن کاهش می یابد. هر یک از تشدید کننده ها مقداری از سیگنال ورودی را بازتاب می کنند. مشخصات شدت میدان الکتریکی برای منبع نور اعمال شده به موجبر MIM را در شکل ۲ مشاهده می کنیم.

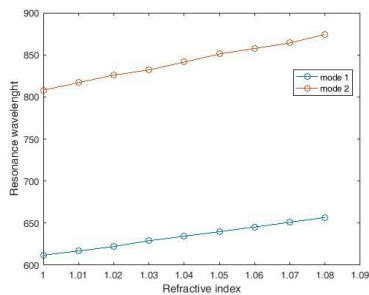
بهبود عملکرد سنسورهای مبتنی بر SPP می شود و آنها را به عنوان حامل های انرژی و اطلاعات در دستگاه های نوری یکپارچه، جذاب کرده است. در میان ساختارهای مختلف SPP، ساختارهای فلز عایق-فلزی و ساختارهای عایق-فلز-عایق دو نوع رایج از ساختارهای پلاسمونی هستند که می توان از آنها برای هدایت، تقویت و اصلاح زمینه های نوری استفاده کرد که یکی از آنها حسگر ضریب شکست پلاسمونی می باشد. به دلیل حالت های پشتیبانی کننده، محصوریت نوری بسیار بالا و طول انتشار قابل قبول، ساختار فلز عایق فلزی را انتخاب می کنیم. همچنین مهم ترین قطعات پلاسمونیک بر مبنای ساختار ادوات فعال و غیر فعال هستند. محیط های غیر فعال، همسانگرد هستند و فقط یک ضریب شکست دارند و محیط های فعال، ناهمسانگرد هستند و می توان با اعمال یک عامل خارجی، ضریب شکست و طول را تغییر داد، بنابراین ما محیط فعال را انتخاب می کنیم. برای ساخت حسگرهایی پلاسمونی می بایست پارامترهایی مثل بازده انتقال بالا، فاکتور کیفیت بالا، رزولوشن بالا، پایداری نوری، ارتقای حساسیت و قابلیت تنظیم پذیری در محدوده ای از طول موجها مورد بررسی قرار گیرند. بهبود این پارامترها باعث افزایش سرعت پردازش اطلاعات در مدارهای مجتمع نوری می شود

مدل ساختاری و تحلیل نظریه

از معادلات ماکسول می توان معادلات اساسی حاصل از برهم کنش امواج الکترومغناطیس و ماده را بدست آورد و مدل پلاسما ویژگی نوری فلزات در بالای یک ناحیه ی فرکانسی را توصیف می کند. در پاسخ به میدان الکترومغناطیسی اعمال شده، الکترون ها نوسان می کنند و حرکتشان با برخوردهایی با فرکانس ω انجام می شود تا سرانجام میرا شوند. تابع دی الکتریک در مدل الکترون آزاد در فرکانس های خیلی بزرگتر از فرکانس پلاسما، به سمت صفر میل می کند. برای فلزات نجیب، تعمیم این مدل در ناحیه ی فرکانسی بزرگتر از فرکانس پلاسما، به علت پر شدن نوار نزدیک به سطح فرمی باعث یک محیط بسیار قطبی می شود. برای توصیف فلز و موجبرهای پلاسمونیک در سنسورها، از مدل درود استفاده می شود زیرا مدل درود به راحتی می تواند در شبیه سازی های روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) [5] ادغام شود:



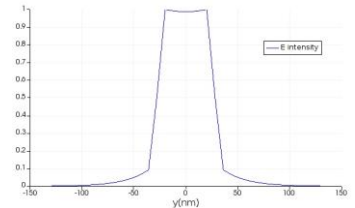
شکل ۴: طیف های انتقال حسگر ضریب شکست پلاسمونیک با دو کاواک آنالیز ضریب شکست و میزان تغییر آن برای هر طول موج برای طراحی سنسور مورد نظرمان لازم است، بنابراین نمودار طول موج رزونانس در برابر شاخص آنالیز ضریب شکست را رسم می کنیم.



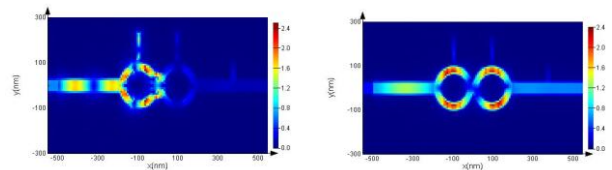
شکل ۵: طول موج رزونانس در برابر شاخص آنالیز ضریب شکست اولین مشخصه ای که باید برای یک حسگر اندازه گیری شود حساسیت آن است. حساسیت S به عنوان تغییر طول موج رزونانس هنگامی که دی الکتریک تغییر واحد دارد توصیف می شود:

$$S = \Delta \lambda / \Delta n \text{ (nm/RIU)} \quad (2)$$

در این معادله، $\Delta \lambda$ تغییر طول موج رزونانس و Δn تغییر ضریب شکست است. مطابق شکل ۵ بیشترین حساسیت برای ضریب شکست $n=1.08$ (در پیک سمت راست شکل ۴) می باشد که برابر است با 1010.7 nm / RIU و کمترین مقدار برای ضریب شکست $n = 1.01$ (در پیک سمت چپ شکل ۴) می باشد که برابر است با 505 nm / RIU . طبق این نمودار، یک رابطه نسبتاً خطی بین دو پارامتر طول موج تشدید و ضریب شکست وجود دارد یعنی همان چیزی که معادله ۲ تعریف می کند. در نتیجه از طریق معادله ۲ به شکل ۶ یعنی میزان حساسیت طول موج های مختلف می رسیم که در آن، mode 2 که مربوط به پیک سمت راست شکل ۵ می باشد، دارای حساسیت بیشتری است و mode 1 دارای حساسیت کمتری است. حساسیت بیشتر باعث کاهش



شکل ۲: مشخصات شدت میدان الکتریکی برای منبع نور اعمال شده به موجبر توزیع میدان الکتریکی در فرکانس تشدید ساختار شبیه سازی شده را در شکل ۳ می بینیم که مطابق قسمت (آ)، ماکزیمم تشعشع در دو رینگ صورت می گیرد. هنگامی که توزیع میدان در دو رینگ و کاواکها مشابه باشد، اتلاف انرژی کاهش می یابد اما در قسمت (ب) که توزیع میدان برای کمترین مقدار حساسیت را نشان می دهد توزیع میدان در رینگها یکسان نیست و اتلاف انرژی بیشتری دارد این یعنی برای رسیدن به حداکثر توزیع میدان در ساختار، همه ی ابعاد باید بهینه باشند در غیر این صورت باید ابعاد ساختار را تغییر دهیم تا به توزیع میدان حداکثری برسیم.



(ب)

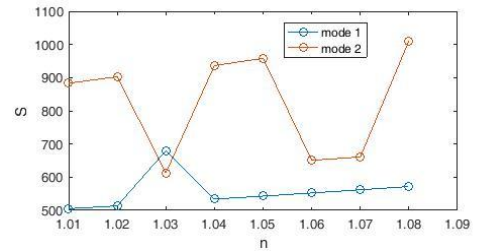
(آ)

شکل ۳: توزیع میدان الکتریکی در فرکانس تشدید برای (آ) بیشترین حساسیت و (ب) کمترین حساسیت

روش های شبیه سازی و سنجش ضریب شکست

به صورت عددی و نظری، رفتار تشدید ساختار پلاسمونی پیشنهادی را بررسی می کنیم که در رویکرد عددی از روش تفاضل محدود حوزه زمان (FDTD) [5] با ۸ لایه کاملاً منطبق جذب شرایط مرزی استفاده می کنیم. اندازه مش یکنواخت برای جهت x و y به ترتیب ۸ و ۸ نانومتر در نظر گرفته شده است و از مدل خط انتقال برای تحلیل تئوری ساختار استفاده می شود. شبیه سازی دو بعدی انجام می شود تا زمان شبیه سازی کاهش یابد و به نتیجه مطلوب برسیم. طیف انتقال حاصل از دستگاه حسگر در شکل ۱ با دو رینگ و سه کاواک در شکل ۴ نشان داده شده است. ضریب شکست دی الکتریک را با گام 0.01 نانومتر از 1 تا 1.08 افزایش می دهیم که این کار منجر به تغییر طیفها و طول موج رزونانس می شود.

FOM در نقطه ی مورد نظر می شود.

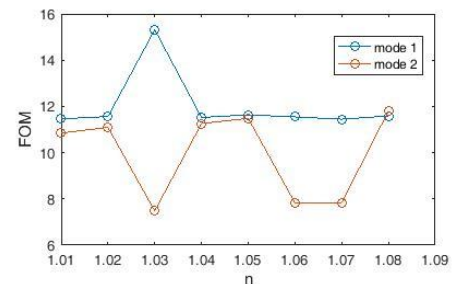


شکل ۶: نمودار ضریب حساسیت حسگر پلاسمونیک

از آنجا که حساسیت به تنهایی معیار عملکرد خوبی برای مقایسه انواع مختلف حسگر نیست و وضوح نوری برای حسگرها نیز بسیار مهم است، بنابراین شایستگی بالایی (FOM) برای مقایسه حسگرها لازم است:

$$FOM = S / FWHM \quad (3)$$

نمودار شایستگی FOM حسگر را در شکل ۷ مشاهده می کنیم. بدیهی است که افزایش اندازه طول کاواک و رینگها می تواند عملکرد حساسیت سنسور را با اندازه FOM کمتری بهبود بخشد، که ممکن است به ترتیب از مسیر نوری طولانی تر و اتلاف بیشتر انرژی ناشی شود.

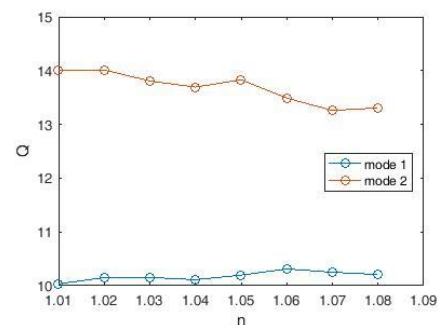


شکل ۷: نمودار شایستگی FOM حسگر پلاسمونیک

همچنین به ضریب کیفیت حسگرها نیز، نیاز داریم :

$$Q = \lambda_{res} / FWHM \quad (4)$$

نمودار ضریب کیفیت را در شکل ۸ مشاهده می کنیم که با استفاده از معادله ۴ و با تقسیم طول موج بر FWHM بدست آمده است.



شکل ۸: نمودار ضریب کیفیت حسگر پلاسمونیک

مقدار ضریب کیفیت در ضریب شکست $n=1.08$ که دارای بیشترین ضریب حساسیت می باشد، به مقدار $10,2082$ می رسد. هنگامی که دو رینگ به هم متصل می شوند و سه کاواک در اطراف آنها قرار می گیرند، ضریب شکست آنها را تغییر می دهیم و با استفاده از معادله های ۲، ۳ و ۴، قابلیت های سنجش حسگرهای پلاسمونی (ضریب حساسیت، ضریب کیفیت Q و شایستگی FOM) را بدست می آوریم.

نتیجه گیری

حسگرهای ضریب شکست پلاسمونیک به دلیل اینکه با یک تغییر کوچک در ضریب شکست کاواک ها باعث تغییر در خصوصیات انتشار موج می شوند، مورد توجه قرار گرفته اند و در زمینه ی سنجش شیمیایی و بیولوژیکی محبوب شده اند. این حسگر به حساسیت بالا (S) و عدد شایستگی بالا (FOM) نیاز دارد تا به عملکرد عالی با وضوح نوری بالا دست یابد. در این پژوهش با استفاده از سه کاواک و دو رینگ متصل به هم، تلاش کردیم تا یک حسگر ضریب شکست را طراحی کنیم. برای مقایسه، ضریب شکست سازه را از ۱ به $1/0.8$ تغییر می دهیم و طول موج تشدید را در هر مرحله محاسبه می کنیم. به این نتیجه می رسیم که این حسگر به دلیل دقت تفکیک پذیری بالایی که دارد، به راحتی می تواند تغییر در ضریب شکست 0.01 را برای موادی که ضریب شکست آنها بین ۱ تا $1/0.8$ است، تشخیص دهد. این طرح به دلیل اندازه کم، سرعت، سهولت استفاده، حساسیت بالا و FOM با قدرت جذب بالا، پتانسیل زیادی را برای طراحی دستگاه های حسگر ضریب شکست دارد و برای استفاده در مدارهای کاملاً مجتمع مناسب است.

مرجع ها

- [1] Di Wu, Jinping Tian, Lu Li, Rongcao Yang. *Plasmon induced transparency and refractive index sensing in a new type of graphene-based plasmonic waveguide*. Optics Communications, Volume 412, April 2018.
- [2] El Shamy RS, Khalil D, Swillam MA. *Mid Infrared Optical Gas Sensor Using Plasmonic Mach-Zehnder Interferometer*. Sci Rep. 2020.
- [3] Gomez-Cardona, N.; Reyes-Vera, E.; Torres, P. *High Sensitivity Refractive Index Sensor Based on the Excitation of Long-Range Surface Plasmon Polaritons in H-Shaped Optical Fiber*. Sensors 2020.
- [4] Chou Chao CT, Chou Chau YF, Huang HJ, Kumara NTRN, Kooh MRR, Lim CM, Chiang HP. *Highly Sensitive and Tunable Plasmonic Sensor Based on a Nanoring Resonator with Silver Nanorods*. Nanomaterials (Basel). 2020.
- [5] Allen Taflove; Susan C Hagness. *Computational Electrodynamics: The Finite-difference Time-domain Method*. 2005.