



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.  
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷



## حسگر نانو ساختار پلاسمونیک بسیار حساس مبتنی بر موجبر فلز-دی الکتریک-فلز

مجتبی مرادخانی، محمد واحدی

دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

چکیده - در این مقاله، به بررسی یک نمونه حسگر پلاسمونیک مبتنی بر تزویج موجبر فلز-دی الکتریک-فلز به یک کاواک با طول موجهای تشدید ۱۰۵۰ و ۱۴۹۰ نانومتر پرداخته می شود. ساختار پیشنهادی با استفاده از روش شبیه سازی FDTD به طور عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است و میزان جابه جایی طول موج تشدید ساختار در اثر تغییرات ضریب شکست محیط بررسی شده است. برای ساختار پیشنهادی، بیشترین حساسیت به دست آمده  $1480 \text{ nm} / \text{RIU}$  و بهترین فاکتور شایستگی  $134.5 \text{ RIU}^{-1}$  حاصل شد. همچنین جابه جایی طیفی برای تغییر  $0.01$  ضریب شکست محیط  $15 \text{ nm}$  ثبت شد.

کلیدواژه- سنسور پلاسمونیک MIM، فاکتور شایستگی، طول موج تشدید، جابه جایی طیفی

## High Sensitive Nano Structure Plasmonic Sensor Based on Metal-Insulator-Metal Waveguide

Mojtaba Moradkhani, Mohammad Vahedi

School of Physics, Iran University of Science and Technology

Abstract- In this Paper, we investigate a plasmonic sensor based on a MIM waveguide coupled to a resonator. The resonant wavelengths of the resonator are 1050nm and 1490nm. The proposed structure has been numerically investigated using FDTD method and the shift of the resonance wavelength as a result of the change in the refractive index of the structure is explored. Maximum sensitivity and Figure of Merit (FOM) of  $1480 \text{ nm} / \text{RIU}$  and  $134.5 \text{ RIU}^{-1}$  was obtained respectively. The maximum spectrum shift due to 0.01 refractive index change of the medium of 15nm was recorded.

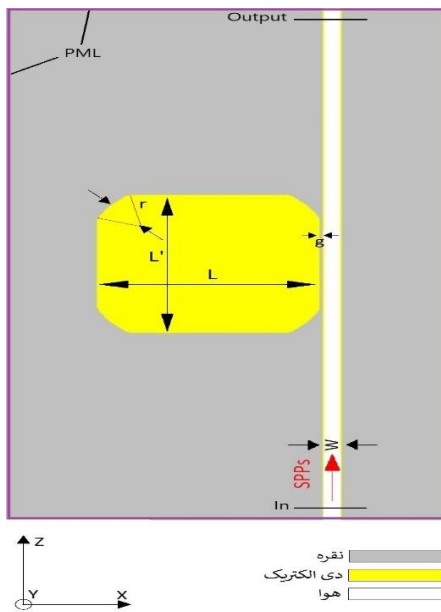
Keywords: Plasmonic MIM Sensor, Figure of Merit (FOM), Resonance Wavelength, Spectrum Shift

## مقدمه

نانوحسگرها در چیپ‌های مدارهای مجتمع و همچنین در زیست‌حسگرها مورد استفاده قرار گیرد.

## معرفی ساختار و آنالیز نظری

شکل (۱) ساختار دو بعدی حسگر پیشنهادی را نشان می‌دهد که از یک موجبر پلاسمونیکی نقره - هوا - نقره و تشدیدگر پلاسمونیکی مربعی با دی الکتریک هوا که لبه‌های آن حالت دایره ای شکل دارد، تشکیل شده است. پارامتر  $W$  نشان دهنده عرض موجبر و پارامتر  $L$  و  $L'$  نشان دهنده طول و عرض تشدیدگر پلاسمونیک، پارامتر  $g$  فاصله تزویج بین تشدیدگر و موجبر و  $r$  شعاع لبه دایره ای شکل تشدیدگر هستند.



شکل ۱: ساختار دو بعدی حسگر پیشنهادی که از موجبر نقره - هوا - نقره و تشدیدگر مربعی پلاسمونیک با لبه‌های دایره شکل که با دی الکتریک هوا پر شده است.

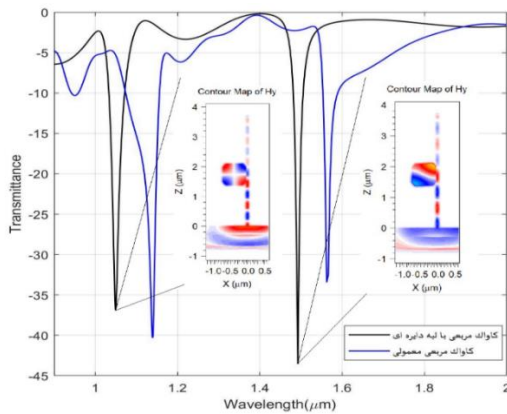
تابع دی الکتریک فلزات از مدل درود تبعیت می‌کند که به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۶]:

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

پلاریتون پلاسمون‌های سطحی، امواج الکترومغناطیسی طولی هستند که در مرز فلز - دی الکتریک انتشار پیدا می‌کنند و به خاطر خواص محدود کنندگی میدان، کاربردهای متنوعی را در زمینه‌های مختلف یافته‌اند [۱]. یکی از مهم‌ترین خواص امواج پلاسمونی، توانایی انتشار در زیر حد پراش است که امکان طراحی ساختارهای در ابعاد نانو را فراهم می‌کند. هر چه ساختار کوچک‌تر باشد، اتلاف توان کمتر و همچنین سرعت پردازش اطلاعات بالاتر می‌رود [۲]. در سال‌های اخیر، ساختارهای متنوعی مثل فیلترها، کلیدهای نوری، مولتی‌پلکسرها، حسگرها و تقسیم‌کننده‌های نوری ارائه شده است که اهمیت این ساختارها را برای مجتمع سازی مدارها نشان می‌دهد. انواع گوناگونی از نانو ساختارهای فلزی برای انتشار امواج پلاسمونیک تا به اکنون ارائه شده‌اند، اما مهم‌ترین ساختارهای پلاسمونیک که در بسیاری از ساختارها مشاهده می‌شود موجبرهای فلز - دی الکتریک - فلز (MIM) و دی الکتریک - فلز - دی الکتریک (IMI) هستند [۳، ۴]. موجبر IMI قادر به انتشار امواج SPP تا فاصله چند سانتی متری است اما میدان الکترومغناطیسی را نمی‌تواند خیلی محدود کند. در حالیکه موجبرهای MIM قادر به محدود کنندگی موج الکترومغناطیسی در ابعاد زیر طول موجی هستند، اما اتلاف اهمی بسیار بالایی دارد و باعث کاهش طول انتشار موج (از مرتبه میکرومتر یا کمتر) می‌شود [۵]. از این رو موجبرهای MIM گزینه مناسب‌تری برای مجتمع سازی محسوب می‌شوند. ساختار پیشنهادی که در این مقاله در نظر گرفتیم از یک تشدیدگر پلاسمونیکی تشکیل شده است که از پهلو به یک موجبر MIM تزویج شده و با استفاده از روش عددی تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده می‌تواند در بهبود عملکرد

## تحلیل نتایج

برای مطالعه عملکرد ساختار، ابتدا پارامترهای ساختار را به صورت  $w = 50nm$ ،  $L' = 700nm$ ،  $L = 700nm$ ،  $g = 15nm$  و  $r = 300nm$  در نظر گرفتیم و با استفاده از روش شبیه سازی FDTD به شبیه سازی آن پرداختیم. پارامترهای FDTD را به صورت  $\delta x = 2nm$  و  $\delta t = \delta x/2c$  و از منبع پهن باند با پهنای گاوسی  $\Delta v = 194THz$  استفاده شده است. منحنی مشکی رنگ در شکل (۲) نمودار عبور بر حسب طول موج ساختار را نشان می دهد.



شکل ۲: منحنی عبور بر حسب طول موج: خط مشکی رنگ ساختار پیشنهادی، خط آبی رنگ ساختار با کاواک مربعی معمولی

به منظور مقایسه، ساختار مربعی معمولی را نیز که طول و عرض مشابه ای با ساختار پیشنهادی دارد و  $g = 15nm$  از موجبر قرار گرفته است، مورد بررسی قرار دادیم (منحنی آبی رنگ در شکل ۲). مدهای مشاهده شده، امواج ایستای تشکیل شده در داخل کاواک می باشند. برای ساختار مربعی معمولی پهنای FWHM برای مد اول مقداری برابر ۳۲ نانومتر و برای مد دوم ۱۵ نانومتر حاصل شد. اما برای ساختار مربعی با لبه دایره ای پهنای

که در این رابطه  $\omega_p$  فرکانس پلاسمای فلز،  $\epsilon_\infty$  ثابت دی الکتریک فلز در فرکانس بی نهایت،  $\gamma$  فرکانس برخوردی الکترون های آزاد فلز و  $\omega$  فرکانس زاویه ای فرودی به سطح فلز می باشد [۶]، و مقادیر در آن به صورت  $\epsilon_\infty = 3.7$ ، اگر  $\omega_p = 1.38 \times 10^{16} Hz$  و  $\gamma = 2.73 \times 10^{10} Hz$ ، عرض موجبر بسیار کوچک تر از طول موج فرودی باشد، تنها مد عرضی TM قادر به تحریک امواج SPP درون موجبر MIM خواهد بود [۱]. میزان عبور ساختار از روش تزویج مد<sup>۱</sup> حاصل می شود و طبق رابطه (۲) بدست می آید [۷]:

$$T = \frac{(\omega - \omega_r)^2 + \frac{1}{\tau_c^2}}{(\omega - \omega_r)^2 + \left(\frac{1}{\tau_c} + \frac{1}{\tau_w}\right)^2} \quad (2)$$

در این رابطه  $\omega_r$  فرکانس تشدید کاواک،  $\tau_w$  نرخ اتلاف در موجبر MIM و  $\tau_c$  نرخ اتلاف بین کاواک و موجبر است. به ازای  $\omega = \omega_r$  کمترین میزان عبور بدست می آید و مقدار آن برابر است با:

$$T_{min} = \frac{1}{\tau_c^2} \left/ \left( \frac{1}{\tau_c} + \frac{1}{\tau_w} \right)^2 \right. \quad (3)$$

محل تقریبی طول موج های تشدید کاواک از این رابطه بدست می آید:

$$\Delta\phi = \beta \cdot \Delta L + \phi \quad (4)$$

در این رابطه  $\Delta\phi$  اختلاف فاز بین موج فرودی و موج داخل کاواک است، که به صورت  $\Delta\phi = 2m\pi$   $m=1,2,\dots$  تعریف می شود.  $\phi$  فاز اولیه موج فرودی و  $\Delta L$  طول مؤثر محیط کاواک است. همچنین ثابت انتشار  $\beta = 2\pi/\lambda_m \cdot n_{eff}$  که  $\lambda_m$  طول موج های تشدید کاواک می باشد.

<sup>۱</sup> Coupled mode theory

ضریب شکست محیط می باشد. پارامتر بعدی شایستگی حسگر (FOM) است که به صورت  $FOM = S/\Delta\lambda_{FWHM}$  تعریف می شود [۸]. شایستگی حسگر، میزان حساسیت حسگر را به نسبت پهنای (FWHM) طول موج تشدید نشان می دهد. برای ساختار پیشنهادی این مقادیر به صورت زیر محاسبه شده است:

$$S_{mode1} = 1020 \text{ nm} / RIU$$

$$S_{mode2} = 1480 \text{ nm} / RIU$$

$$FOM_{mode1} = 44RIU^{-1}$$

$$FOM_{mode2} = 134.5RIU^{-1}$$

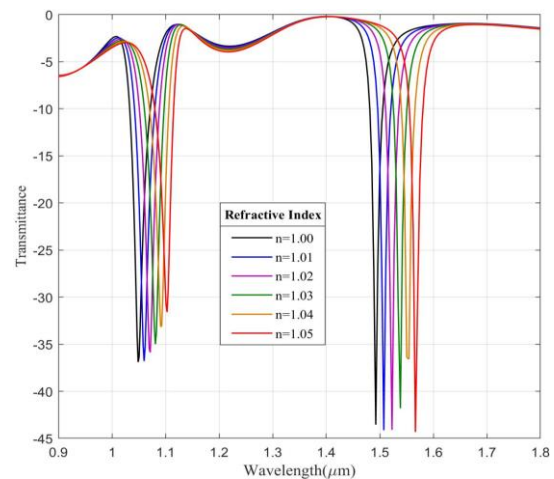
### نتیجه گیری

در این مقاله حسگر پلاسمونیک را مورد بررسی قرار دادیم که متشکل از یک موجبر پلاسمونیک MIM و یک کاواک مربعی با لبه های دایره ای است که از پهلو به موجبر تزویج شده است. بیشترین حساسیت و فاکتور شایستگی مربوط به مد دوم و به ترتیب مساوی  $1480 \text{ nm} / RIU$  و  $134.5RIU^{-1}$  حاصل شد.

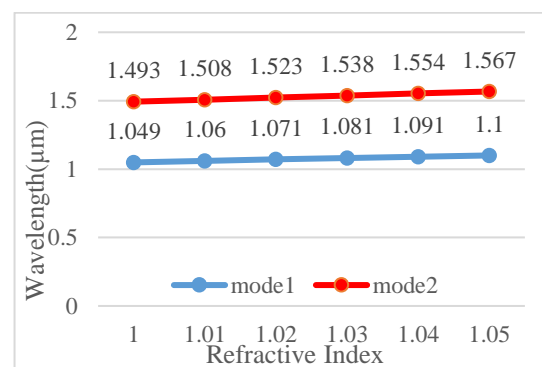
### مرجع ها

- [1] Maier, S.A., *Plasmonics: Fundamentals and Applications*, Springer US, 2007.
- [2] Gramotnev, D.K. and Bozhevolnyi S.I., *Plasmonics beyond the diffraction limit*. Nature Photonics, **4**(2): p. 83, 2010.
- [3] Veronis, G. and Fan S., *Guided subwavelength plasmonic mode supported by a slot in a thin metal film*. Optics Letters, **30**(24): p. 3359-3361, 2005.
- [4] Berini, P.J., *Plasmon-polariton modes guided by a metal film of finite width*. Optics Letters, **24**(15): p. 1011-1013, 1999.
- [5] Zia, R., et al., *Geometries and materials for subwavelength surface plasmon modes*. JOSA A, **21**(12): p. 2442-2446, 2004.
- [6] Johnson, P.B. and R.-W.J. Christy, *Optical constants of the noble metals*. PRB, **6**(12): p. 4370, 1972.
- [7] Lu, F., et al., *A plasmonic triple-wavelength demultiplexing structure based on a MIM waveguide with side-coupled nanodisk cavities*, IEEE Transactions on Nanotechnology, **12**(6): p. 1185-1190, 2013.
- [8] Chen, Y. and Ming H., *Review of surface plasmon resonance and localized surface plasmon resonance sensor*. Photonic Sensors. **2**(1): p. 37-49, 2012.

FWHM برای مد اول ۲۳ نانومتر و برای مد دوم ۱۱ نانومتر بدست آمد که پهنای بسیار باریک تری نسبت به حالت مربعی معمولی دارد، که این ناشی از اتلاف کمتر پلاسمونی برای لبه های دایره ای شکل می باشد و باعث افزایش فاکتور شایستگی می شود. برای مطالعه بر روی جابه جایی طیفی ساختار، به ازای تغییرات ضریب شکست محیط کاواک، ضریب شکست را از ۱،۰۰ تا ۱،۰۵ تغییر دادیم و مشخصه های کاواک را به صورت  $w = 50 \text{ nm}$  و  $r = 300 \text{ nm}$  و  $g = 15 \text{ nm}$  ثابت در نظر گرفتیم. نتایج برای هر دو مد به صورت شکل (۳) بدست آمد.



شکل ۳: منحنی عبور ساختار پیشنهادی به ازای تغییرات ضریب شکست



شکل ۴: منحنی جابه جایی طول موج بر حسب تغییرات ضریب شکست

حسگر های پلاسمونیک دارای دو پارامتر بسیار مهم جهت بررسی عملکردشان هستند. پارامتر اول حساسیت حسگر (S) است که به صورت  $S = \Delta\lambda_R / \Delta n$  تعریف می شود [۸]، که در این رابطه  $\lambda_R$  طول موج تشدید و  $n$  نشان دهنده