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 پلاسمونیکی 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 پلاسمونیکی مبتنی بر تزویج موجبر فلز-دی الکتریک-فلز به یک کاواک با طول موجهای تشدیدی 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 جابه‌جایی طول موج تشدید ساختار در اثر تغییرات ضریب شکست محیط بررسی شده است. برای ساختار پیشنهادی، بیشترین حساسیت به دست آمده $1480\ nm/RIU$ و بهترین فاکتور شایستگی $134{,}5\ RIU^{-1}$ حاصل شد. همچنین جابه‌جایی طیفی برای تغییر ۰٫۰۱ ضریب شکست محیط $15\ nm$ ثبت شد.**

کلید واژه- سنسور پلاسمونیکی MIM، فاکتور شایستگی، طول موج تشدید، جا به‌جایی 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 $nm/RIU$ and 134.5 $RIU^{-1}$ 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

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01 ]



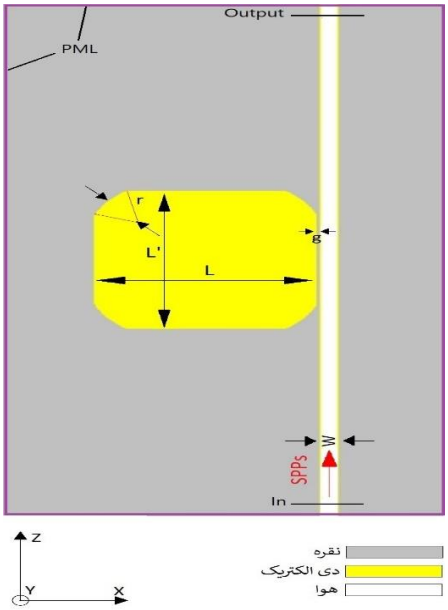
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

## مقدمه

پلاریتون پلاسمون‌های سطحی، امواج الکترومغناطیسی طولی هستند که در مرز فلز – دی الکتریک انتشار پیدا می کنند و به خاطر خواص محدود کنندگی میدان، کاربرد های متنوعی را در زمینه های مختلف یافته اند[۱]. یکی از مهم ترین خواص امواج پلاسمونی، توانایی انتشار در زیر حد پراش است که امکان طراحی ساختارهای در ابعاد نانو را فراهم می کند. هر چه ساختار کوچک تر باشد، اتلاف توان کمتر و همچنین سرعت پردازش اطلاعات بالاتر می رود [۲]. در سال های اخیر، ساختارهای متنوعی مثل فیلترها، کلیدهای‌نوری، مولتی‌پلکسرها، حسگرها و تقسیم‌کننده‌های نوری ارائه شده است که اهمیت این ساختارها را برای مجتمع سازی مدارها نشان می دهد. انواع گوناگونی از نانو ساختار های فلزی برای انتشار امواج پلاسمونیکی تا به اکنون ارائه شده اند، اما مهم ترین ساختار های پلاسمونیکی 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 نمی تواند 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 می شوند. 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 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 می دهد که از یک موجبر پلاسمونیکی نقره – هوا – نقره و تشدیدگر پلاسمونیکی مربعی با دی الکتریک هوا که لبه های 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 پلاسمونیکی، 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 پلاسمونیکی با لبه های 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 می شود[۶]:

$$\varepsilon_m(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{(\omega^2 + i\gamma\omega)} \qquad (۱)$$



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01 ]

که در این رابطه $\omega_p$ فرکانس پلاسمای فلز، $\varepsilon_\infty$ ثابت دی الکتریک فلز در فرکانس بی نهایت، $\gamma$ فرکانس برخوردی الکترون های آزاد فلز و $\omega$ فرکانس زاویه‌ای فرودی به سطح فلز می‌باشد[۶]، و مقادیر در آن به صورت $\varepsilon_\infty = 3.7$ ، $\gamma = 2.73\times10Hz$ و $\omega_p = 1.38\times10^{16}Hz$ است. اگر 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[۱] حاصل می شود و طبق رابطه (۲) بدست می آید[۷]:

$$T = \frac{(\omega-\omega_r)^2+\frac{1}{\tau_c^2}}{(\omega-\omega_r)^2+\left(\frac{1}{\tau_c}+\frac{1}{\tau_w}\right)^2} \qquad (۲)$$

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:

$$T_{min} = \frac{1}{\tau_c^2}\Big/\left(\frac{1}{\tau_c}+\frac{1}{\tau_w}\right)^2 \qquad (۳)$$

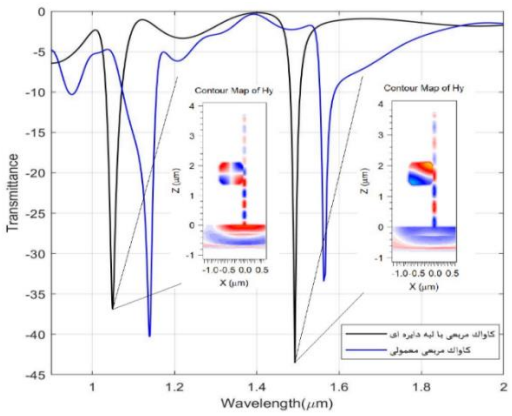
محل تقریبی طول موج های تشدید کاواک از این رابطه بدست می آید:

$$\Delta\phi = \beta.\Delta L + \varphi \qquad (۴)$$

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,... تعریف می شود. $\varphi$ فاز اولیه موج فرودی و $\Delta L$ طول مؤثر محیط کاواک است. همچنین ثابت انتشار $\beta = 2\pi/\lambda_m .n_{eff}$ که $\lambda_m$ طول موج های تشدید کاواک می باشد.

## تحلیل نتایج

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




شکل۲: منحنی عبور برحسب طول موج: خط مشکی رنگ ساختار پیشنهادی، خط آبی رنگ ساختار با کاواک مربعی معمولی

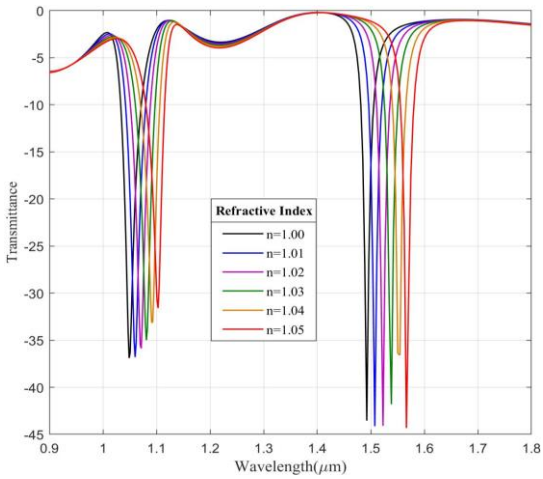
به منظور مقایسه، ساختار مربعی معمولی را نیز که طول و عرض مشابه ای با ساختار پیشنهادی دارد و $g = 15nm$ از موجبر قرار گرفته است، مورد بررسی قرار دادیم (منحنی آبی رنگ در شکل ۲). مدهای مشاهده شده، امواج ایستای تشکیل شده در داخل کاواک می باشند. برای ساختار مربعی معمولی پهنای FWHM برای مد اول مقداری برابر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

[۱] Coupled mode theory



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01 ]

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 می‌باشد و باعث افزایش فاکتور شایستگی می شود. برای مطالعه بر روی جابه‌جایی طیفی ساختار، به ازای تغییرات ضریب شکست محیط کاواک، ضریب شکست را از ۱,۰۰ تا ۱,۰۵ تغییر دادیم و مشخصه‌های کاواک را به صورت $w = 50nm$، r=300nm و $g = 15nm$ 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 جابه‌جایی طول موج بر حسب تغییرات ضریب شکست

حسگر های پلاسمونیکی 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 ضریب شکست محیط می باشد. پارامتر بعدی شایستگی حسگر (FOM) است که به صورت $FOM = S/\Delta\lambda_{FWHM}$ تعریف می‌شود[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:

$$S_{mode1} = 1020\ nm / RIU$$
$$S_{mode2} = 1480\ nm / RIU$$
$$FOM_{mode1} = 44 RIU^{-1}$$
$$FOM_{mode2} = 134.5 RIU^{-1}$$

## نتیجه‌گیری

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

## مرجع‌ها

[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.



این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-02-01 ]