

سنسور ضریب شکست پلاسمونیک شامل موجبر و چهار دندانه بر پایه تشدیدهای فانو

وحید نجاری^۱، سعید میرزانژاد^{۲*}، امین قادری^۳

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

V.najjari@stu.umz.ac.ir^۱, saeed@umz.ac.ir^{۲*}, a.ghadi@umz.ac.ir^۳

چکیده:

یک سنسور ضریب شکست پلاسمونیک شامل یک موجبر فلز-دی الکتریک-فلز (MIM) با چهار دندانه پیشنهاد شده است. میزان انتقال نور ورودی (Transmittance)، حساسیت (Sensitivity) و خوش ساختی (Figure Of Merit) محاسبه شده و با استفاده از روش تفاضل محدود دامنه زمانی (FDTD) مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. نتایج، نشان دهنده تولید تشدیدهای چندگانه فانو در ساختار بوده که طول موج و شکل خط تشدید، توسط تغییر هندسه دستگاه قابل تنظیم می باشند. با بهینه سازی دستگاه، میزان حساسیت 1078 nm/RIU و خوش ساختی به مقدار 3.62×10^5 برای طول موج تشدید اول و حساسیت 659 nm/RIU و خوش ساختی به مقدار 2.94×10^4 برای طول موج تشدید دوم به دست می آید. این ساختار برای ساخت سنسور ضریب شکست حساس قابل توجه می باشد.

کلید واژه: پلاسمون-پلاریتون های سطحی، تشدیدهای فانو، سنسور ضریب شکست

Plasmonic refractive index sensor including waveguide and four teeth based on Fano resonances

Vahid Najjari¹, Saeed Mirzanejad^{2*}, Amin Ghadi³

Department of Atomic and molecular physics, Faculty of Sciences, Mazandaran University, Babolsar

V.najjari@stu.umz.ac.ir¹, saeed@umz.ac.ir^{2*}, ghadi@umz.ac.ir³

Abstract:

A plasmonic refractive index sensor including a metal-dielectric-metal waveguide (MIM) with four teeth is proposed. Transmittance, Sensitivity and Figure of Merit (FOM) were calculated and analyzed using the Finite Difference Time Domain method (FDTD). The results show the production of multiple Fano resonances in the structure that the wavelength and shape of the resonant line can be adjusted by changing the geometry of the device. By optimizing the device, the sensitivity of 1078 nm/RIU with a FOM of 3.62×10^5 for First the Fano resonance wavelengths and the sensitivity of 659 nm/RIU with a FOM of 2.94×10^4 for the other resonant wavelength will be obtained. This structure is significant for the construction of a sensitive refractive index sensor.

Keywords: Surface plasmon-polaritons, Fano resonances, Refractive index sensor

مقدمه:

نور [7] و سوئیچ های نوری [8] از آن ساخته شده اند. علاوه بر این،

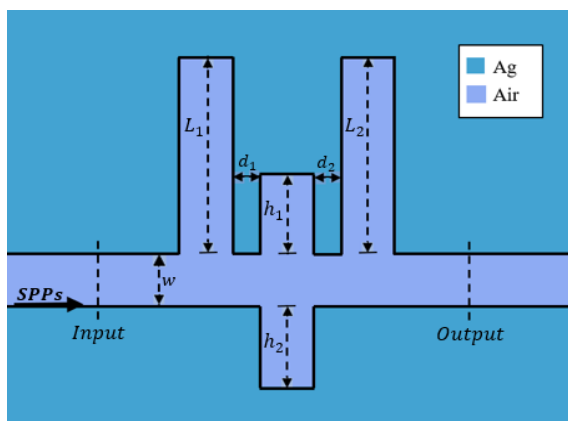
از SPP ها می توان برای انتقال اطلاعات در مدارهای تلفیقی فوتونی با چگالی بالا استفاده نمود [9].

موجبرهای مبتنی بر فلز-دی الکتریک-فلز (MIM)، دارای خواص منحصر به فردی مثل شکستن حد پراش [10]، بازه انتشار طول موجی بالا، سادگی در ساخت [11] و توانایی بالا در محدودسازی نور در مقیاس زیر طول موج هستند [12]. در این ساختارها با تجمع

پلاسمون - پلاریتون های سطحی (SPP)، امواج سطحی الکترومغناطیسی هستند که به شدت در نزدیکی مرز فلز-دی الکتریک محدود شده و در فصل مشترک فلز-دی الکتریک منتشر می شوند [1, 2]. SPP ها توجه دانشمندان و مخترعان زیادی را به خود جلب کرده و دستگاه های متنوعی نظیر سنسورها [3]، کوپلرها [4]، فیلترها [5]، دی مالتی پلکسرها [6]، کاهنده های سرعت

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

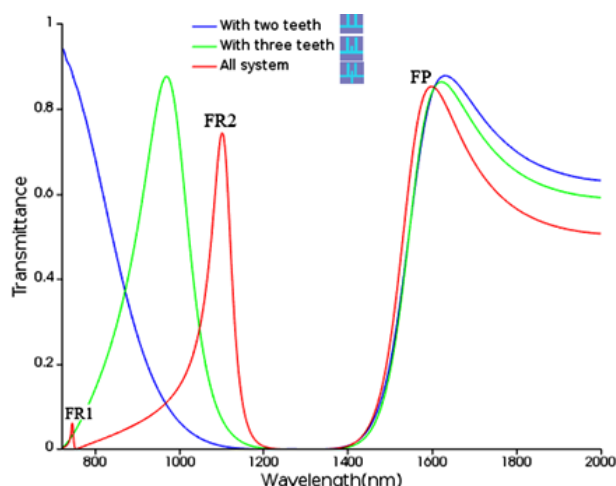
که $(\varepsilon_{\infty} = 3.7, \omega_p = 9.1 \text{ eV}, \gamma = 0.018 \text{ eV})$ در نظر گرفته شده اند.



شکل ۱. سنسور پلاسمونیک

بحث:

با توجه به مقادیر ذکر شده برای هندسه ساختار پیشنهاد شده، طیف عبور برای حالت های مختلف دستگاه در شکل (۲) نشان داده شده است. همان طور که از شکل (۲) مشخص است، وقتی ساختار به صورت کامل مورد شبیه سازی قرار می گیرد، این ساختار دارای دو



شکل ۲. طیف عبور ساختار با دو دندان، سه دندان و کل ساختار.

نقطه تشدید فانو در FR1 و FR2 است. همچنین یک نقطه تشدید وجود دارد که نمودار آن خیلی تیز نبوده و با نام FP علامت گذاری شده است. توزیع میدان $|H_z|$ مطابق تصاویر (۳ الف-د) است.

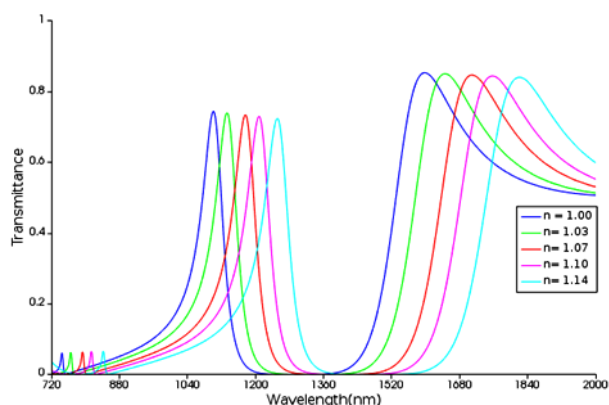
خواص مجتمع های الکترونیکی (کوچک سازی بالا) و فوتونیکی (سرعت بالا)، می توان یک دستگاه منحصر به فرد برای نسل آینده تولید کرد که سرعت پردازش بسیار بالا به ارمغان خواهد آورد [1,13]. بدین خاطر هر روز دانشمندان بیشتری بر تحقیق روی مواد پلاسمونیک تأکید و استفاده از این مواد در تولید و توسعه ابزارهای جدید را ترویج می دهند [14].

رزونانس Fano نوعی پدیده پراکندگی تشدید است [15]. این پدیده در مقایسه با تشدید لورنتزی، دارای طیف انتقال نامتقارن و فوق العاده تیز بوده که به تغییر پارامترهای ساختار و محیط های اطراف خیلی حساس می باشد [16]. این خصوصیات، استفاده از آن را برای طراحی ابزارهای سنجشی مفید کرده و با استفاده از دو پارامتر حساسیت (Sensitivity) و FOM (Figure Of Merit)، می توان عملکرد سیستم را ارزیابی نمود [14,17]. از آن جا که تشدید فانو به شدت تحت تأثیر تغییرات محیط است، استفاده از آن در حسگرها، می تواند موجب بهبود قدرت تفکیک پذیری و حساسیت آن شود [18].

مواد و روش ها / محاسبات / معادلات حاکم:

در این مقاله شبیه سازی ها به صورت دو بعدی انجام گرفته است. مطابق شکل (۱)، ساختار از یک موجبر با عرض w و چهار دندان به طول های L_1 ، L_2 و h_1 ، h_2 طراحی شده که عرض تمامی دندان ها به اندازه w و فاصله بین آنها نیز مطابق شکل، d_1 و d_2 فرض شده است. مقدار w برای انتشار طیف تک مد، 50nm در نظر گرفته شده است. در این ساختار با هدف طراحی بهترین دستگاه، L_1 و L_2 به طور مساوی و به اندازه 205nm و همچنین اندازه h_1 برابر 75nm و h_2 نیز برابر 105nm در نظر گرفته شده اند. با توجه به شبیه سازی های انجام شده، بهترین نتایج برای فاصله های مساوی بین دندان ها به دست آمده و بدین خاطر مقادیر d_1 و d_2 به صورت مساوی و با طول 15nm در نظر گرفته شده اند. طبق شکل (۱)، رنگ های بنفش و آبی به ترتیب نشان دهنده هوا با گذردهی 1.0 و نقره (Ag) می باشند. گذردهی نقره از مدل Drude تبعیت می کند [19]:

استفاده از رابطه (۲) و اطلاعات موجود در شکل (۵)، در نقطه FR1 مقدار حساسیت برابر 696 nm/RIU و در FR2 برابر 1078 nm/RIU به دست می آید.

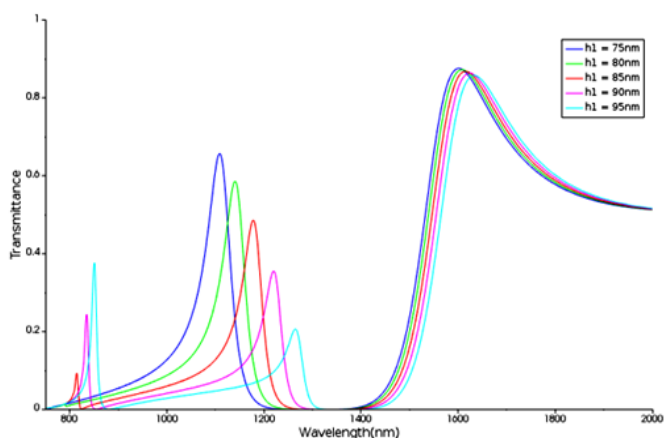


شکل ۵. منحنی طیف عبور با تغییر ضریب شکست

یکی دیگر از پارامترهای مهم در ارزیابی سنسورها، Figure Of Merit آن بوده که مطابق رابطه (۳) محاسبه می شود [21]:

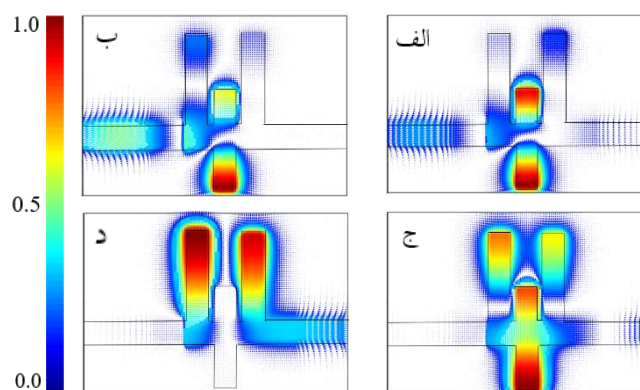
$$FOM = \frac{\Delta T}{T \cdot \Delta n} = \frac{(T_n - T_{n_0})}{T_{n_0} \cdot (n - n_0)} \quad (3)$$

بیشترین مقدار برای FOM در دستگاه برای FR2 به اندازه 3.62×10^5 به دست می آید.



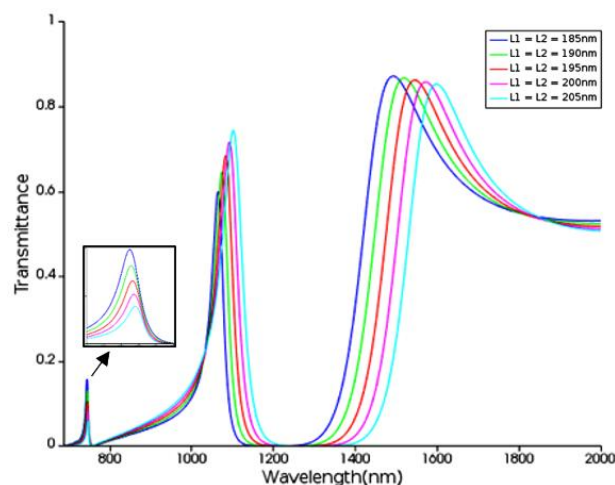
شکل ۷. منحنی طیف عبور نسبت به تغییر طول h_1

اکنون به بررسی تأثیر تغییر طول h_1 و h_2 بر طیف عبور، حساسیت و FOM می پردازیم. مطابق شکل (۷)، افزایش طول h_1 منجر به افزایش میزان عبور طیف در FR1 و کاهش آن در



شکل ۳. توزیع میدان $|H_z|$ در ساختار در طول موج های الف) 744nm، ب) 753nm، ج) 1100nm و د) 1597nm.

تغییرات طیف عبور به ازاء تغییر مساوی و هم زمان L_1 و L_2 در شکل (۴) نشان داده شده است. همان طور که از شکل (۴) مشاهده می شود، با افزایش طول های L_1 و L_2 میزان عبور طیف در FR2 افزایش می یابد و این در حالی است که برای نقطه FR1 برعکس



شکل ۴. منحنی طیف عبور با تغییر هم زمان و مساوی L_1 و L_2

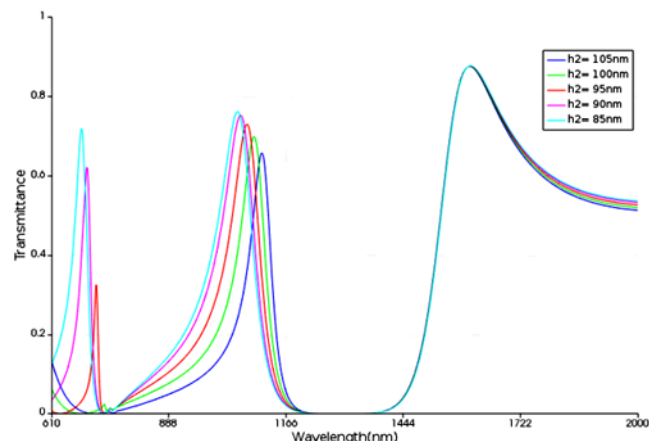
می باشد. هدف اصلی، بررسی ویژگی های سنسور بوده که در آن حساسیت (S) یک پارامتر مهم برای ارزیابی ویژگی های سنسور است که با عبارت [20]:

$$S = \frac{d\lambda}{dn} \text{ (nm/RIU)} \quad (2)$$

بیان می شود و در آن dn ، تغییر ضریب شکست و $d\lambda$ نیز میزان تغییر در طول موج تشدید است. در ادامه نمودار عبور طیف برای ضریب شکست های مختلف در شکل (۵) آورده شده است. با

- [4] Rami A. Wahsheh, Zhaolin Lu, Mustafa A. G. Abushagur (2009), *Optics Express*, Vol. 17, No. 21, 19033.
- [5] W. Lai, K. Wen, J. Lin, Z. Guo, Q. Hu, and Y. Fang (2018), *Applied Optics*, vol. 57, no. 22, p. 6369.
- [6] Wu, Y.D (2014), *J. Lightwave Technol.* 32, 4844-4848.
- [7] Lu Q, Wang Z, Huang Q, Jiang W, Wu Z, Wang Y, Xia J (2017), *Optics Communications* 482-126563.
- [8] C. Min, and G. Veronis (2009), *Opt. Express* 17(13), 10757-10766
- [9] Y. Fang, M. Sun (2015), *Light Sci. Appl.* 4, e294.
- [10] Gongli Xiao, et.al. (2021), *Sensors*, 21, 1164.
- [11] Salah E. Achi, et.al. (2020), *J Lightwave Technol.* 35, 1710-1717.
- [12] W. L. Barnes, A. Dereux, T. W. Ebbesen (2003), *Nature*, vol. 424, no. 6950, pp.824-830.
- [13] J. A. Schuller, E. S. Barnard, W. Cai, Y. C. Jun, J. S. White, M. L. Brongersma (2010), *Nature Materials*, vol. 9, no. 3, pp. 193-204.
- [14] Hao Su, et.al. (2020), *Appl. Sci.* 10, 5096.
- [15] A. Bianconi (2002), *AIP Conference Proceedings, 19th Int. Conference Roma June* 24-28.
- [16] Jianfeng Chen, Jina Li, Xing Liu, Siti Rohimah, He Tian, Dawei Qi (2021), *Progress in Electromagnetics Research*, Vol.96,147-156.
- [17] Z. Chen, L. Yu, L. Wang, G. Duan, Y. Zhao, J. Xiao (2015), *J. Light. Technol.* 33, 3250-3253.
- [18] J. Wang, X. Liu, L. Li, J. He, C. Fan, Y. Tian, P. Ding, D. Chen, Q. Xue, E. Liang (2013), *J. Opt.* 15, 105003.
- [19] Yihong Fang1, et.al. (2018), *IEEE*, 1943-0655.
- [20] Wenhui Lai, et.al. (2018), *Applied Optics*, Vol. 57, No. 22.
- [21] Shilin Yu, Tonggang Zhao, Jianguo Yu and Dafa Pan (2019), *Sensors*, 19, 1559.

FR2 شده و بالعکس. همچنین بنا به شکل (۸)، با کاهش طول h_2 میزان عبور طیف در FR1 و FR2 افزایش می‌یابد و بالعکس.



شکل ۸. منحنی طیف عبور نسبت به تغییر طول h_2

در شکل (۴) نیز مشاهده می‌شود که کاهش طول هم زمان L_1 و L_2 منجر به افزایش عبور طیف در نقطه FR1 خواهد شد. با بهینه‌سازی ابعاد دستگاه، تلاش بر این است که بیشترین حساسیت و FOM را در نقطه FR1 داشته باشیم. پس از بهینه‌سازی هندسه ساختار، L_1 و L_2 به طور مساوی و به اندازه 195nm و همچنین اندازه h_1 برابر 80nm و h_2 نیز برابر 75nm در نظر گرفته شده‌اند. محاسبات انجام شده بیان گر این است که حساسیت در نقاط تشدید FR1 و FR2 با ساختار جدید به ترتیب برابر 659 nm/RIU و 1041 nm/RIU و مقدار FOM نیز به ترتیب برابر 2.94×10^4 و 1.14×10^3 می‌باشد.

با عنایت به سهولت در ساخت، همچنین نتایج به دست آمده برای حساسیت و FOM، استفاده از این دستگاه به عنوان سنسور ضریب شکست پلاسمونیک حساس مورد توجه می‌باشد.

مرجع‌ها:

- [1] Md. Farhad Hassan, et.al. (2020). *IEEE*, doi: 10.1109/ISITIA49792.2020.9163755.
- [2] W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen (2003). *Nature*, vol. 424, no. 6950, pp. 824-830.
- [3] Tsigaridas, G.N (2017). *Photonic Sens*, 7, 217-225.