



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



شبیه‌سازی و بررسی خاصیت حسگری کلید پلاسمونیک در تشدیدگرهای حلقوی

مریم خاکی^۱، آیدا آرای^۲، حسین ثقفی فر^۱

۱- دانشگاه صنعتی مالک اشتر - مجتمع علوم کاربردی

۲- دانشگاه اصفهان - دانشکده فیزیک

چکیده- در این مقاله شبیه‌سازی ساختار دوبعدی نانو کلید پلاسمونیک در تشدیدگرهای حلقوی که شامل دو موج‌بر فلز-عایق-فلز (MIM) هستند و به وسیله‌ی یک حلقه‌ی تشدیدگر به یکدیگر تزویج شده‌اند؛ ارائه شده است. در این ساختار از نقره Ag به عنوان زیر لایه و از دی الکتریک با ضریب شکست متغیر به عنوان موج‌برها و حلقه تشدیدگر استفاده شده است. طول هریک از موج‌برها ۵۹۵ نانومتر و فاصله‌شان با حلقه ۱۰ نانومتر و در نهایت شعاع حلقه ۱۹۵ نانومتر در نظر گرفته شده است. تغییرات مدهای تشدیدی مشاهده شده در طیف خروجی موج پلاسمونیک؛ با تغییر ضخامت حلقه و ضریب شکست مورد بررسی قرار گرفته است. ویژگی‌های طیف عبوری به صورت عددی با استفاده از روش المان محدود (FEM) و نرم افزار کامسول شبیه‌سازی شده است.

کلیدواژه- «حسگر ضریب شکست، کلید پلاسمونیک، موج‌بر پلاسمونیک، حلقه تشدیدگر»

Simulation and Analysis the properties sensing of plasmonic switch in ring resonators

Maryam Khaki, Ayda Aray, Hossein Saghaififar

mahtab.khk@gmail.com, a.aray38@gmail.com, saghaififar1@yahoo.com

Abstract- In this paper the simulation of a two-dimensional nanoscale Structure of Plasmonic switch in ring resonators which consist of two Metal-Insulator-Metal (MIM) waveguides coupled to each other by a ring resonator is proposed. In This structure we use silver for substrate and the differential refractive index dielectric for waveguides and ring resonator. The length of each waveguide is 595nanometers and their distance between ring is 10nanometer and finally radius of ring consider of 195nanometers. The variation of several resonance modes in the transmission spectrum study with variations of ring radius and refractive index. The transmission properties are numerically simulated by finite element method (FEM) and COMSOL Multiphysic software.

Keywords: Plasmonic Switch, Plasmonic Waveguide, Ring Resonator, Sensing Refractive index.

مقدمه

نانو ساختارهای پلاسمونیک در کلید زنی و مدولاسیون دامنه با بهره‌گیری از اپتیک غیرخطی، تشدیدگرهای حلقوی پلاسمونیک، با توجه به میدان میرای بزرگ، ضریب کیفیت بالا و پهنای باند تشدید کم‌گزینه‌های مناسبی خواهند بود. برای دستیابی به یک تشدیدگر باکیفیت بالا و تزویج مؤثر با بخش مجاور، طراحی تشدیدگر به طریقی انجام می‌شود که حداقل اتلاف تابشی را داشته باشد. [۲]

در این تحقیق نشان خواهیم داد که با استفاده از ترکیب امواج پلاسمونیک با تشدیدگرهای حلقوی می‌توان به حسگر ضریب شکست با حساسیتی حدود ۸.۴ بار بیشتر نسبت به حسگرهای پلاسمونیک رایج دست‌یافت. با استفاده از روش المان محدود و نرم‌افزار کامسول، کلید پلاسمونیک در تشدیدگرهای حلقوی طراحی شده است که به‌عنوان حسگر ضریب شکست مورد استفاده قرار گیرد.

ساختار شبیه‌سازی و بحث تئوری:

در این شبیه‌سازی یک ساختار دوبعدی کلید پلاسمونیک در تشدیدگرهای حلقوی ارائه شده که در آن دو موج‌بر دی‌الکتریک به طول ۵۹۵nm و ضخامت ۵۰nm به فاصله ۱۰nm از یک حلقه تشدیدگر با شعاع ۱۹۵nm قرار گرفته‌اند. به دلیل جذب پایین از نقره به‌عنوان زیر لایه‌ی فلزی استفاده شده است و ضریب شکست دی‌الکتریک بین ۱ تا ۱.۰۸ با گام ۰.۰۴ متغیر است. طول موج نور ورودی ۷۶۰nm انتخاب شده و با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار کامسول جابه‌جایی طیف عبوری برحسب طول موج به ازای ضریب شکست‌های مختلف و به ازای ضخامت ۵۰nm حلقه ترسیم شده است. در شکل ۱ طرح‌واره‌ی دوبعدی ساختار شبیه‌سازی شده قابل مشاهده است. موج فرودی از ورودی بالا وارد ساختار شده و در مرزهای فلز-دی‌الکتریک امواج پلاسمونیک پشتیبانی می‌شوند و با ارضا کردن شرط تشدید حلقه

در امتداد مرز فلز-دی‌الکتریک و در صورت برآورده شدن شرایط تشدید خاص، امواجی پشتیبانی می‌شوند که شدتشان در مرز بیشینه است و در دو محیط به‌صورت نمایی افت می‌کند. این امواج که به نام امواج پلاسمون سطحی شناخته می‌شوند، برای توسعه ساختارها و موج‌برهای اپتیکی کوچک‌تر از حد پراش، بیناب‌نمایی رامان سطحی افزایش‌یافته و دستیابی به حسگرهای دقیق زیستی و شیمیایی مناسب هستند. در دهه‌های گذشته، انواع حسگرهای مبتنی بر تشدید پلاسمون سطحی به‌خصوص حسگرهای ضریب شکست و بیوحسگرها به‌طور گسترده مورد بحث و بررسی قرار گرفته‌اند و با توجه به حساسیت بالا، ویژگی‌های بسیار جالبی را برای کاربرد حسگری نمایش می‌دهند. حساسیت یک مشخصه‌ی کلیدی برای تشخیص عملکرد حسگر محسوب می‌شود و افزایش حساسیت می‌تواند حد تشخیص را بهبود ببخشد. ابعاد کوچک‌تر و استفاده راحت‌تر از حسگرهای پلاسمونیک نسبت به حسگرهای فیبر نوری یک مزیت مهم محسوب می‌شود اما حساسیت گزارش شده برای این حسگرها برابر 10.50 nm/RIU است که در مقایسه با مقدار 30.100 nm/RIU برای حسگرهای فیبر نوری مقدار زیادی نیست؛ بنابراین چگونگی ارتقاء حساسیت، یک مسئله کلیدی در طراحی حسگر پلاسمونیک محسوب می‌شود. از طرفی تشدیدگرهای حلقوی موج‌برهای اپتیکی (WRR) نیز اجزای مهمی در سامانه‌های اپتوالکترونیکی هستند. این تشدیدگرها کاربردهای فراوانی را در زمینه‌ی حسگرهای شیمیایی و زیستی، پالایه‌ها، خطوط تأخیر و نیز در سامانه‌های اپتوالکترونیکی مانند پالایه‌های قابل تنظیم و تفکیک‌کننده فرکانس، کلید زنی و مدولاسیون فراهم کرده‌اند. به‌کارگیری امواج پلاسمونیک در این ساختارها منجر به افزایش اثرات غیرخطی و در نتیجه افزایش عملکرد این ادوات خواهد شد. به‌منظور مطالعه و بررسی

$$k_{z2}^2 = \varepsilon_m k_0^2 - \beta^2 \quad (5)$$

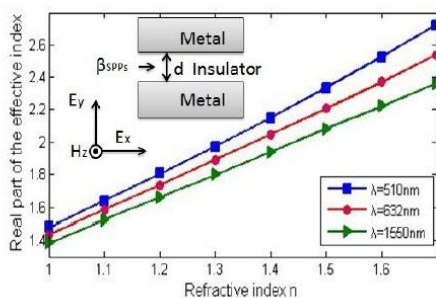
می‌توانند درون حلقه تشدیدگر تزویج شده و از موج‌بر پایین خارج شوند.

با استفاده از فرمول درود می‌توانیم ثابت گذردهی نسبی فلز را محاسبه می‌شود: [۱]

$$\varepsilon_m(\omega) = \varepsilon_\infty - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\omega\gamma} \quad (6)$$

که در آن مقادیر $\varepsilon_\infty = 3.7$ ، $\omega_p = 9.1\text{ev}$ و $\gamma = 18\text{mev}$ برای فلز نقره هستند و در نهایت با توجه به روابط $\varepsilon_D = n^2$ و $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ ضریب شکست مؤثر به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$n_{\text{eff}} = \text{real}(\beta/k_0) \quad (7)$$

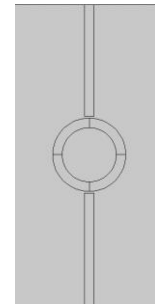


شکل ۲: نمودار ضریب شکست مؤثر برحسب ضریب شکست دی‌الکتریک به ازای طول‌موج‌های مختلف.

با توجه به رابطه‌ی خطی میان ضریب شکست دی‌الکتریک و ضریب شکست مؤثر و با محاسبه n_{eff} و با استفاده تئوری تشدید، طول‌موج تشدید حلقه به صورت زیر محاسبه می‌شود: [۳]

$$2\pi n_{\text{eff}} = m\lambda \quad (8)$$

که در آن m شمارنده مد، Γ شعاع حلقه و λ طول‌موج تشدید خواهد بود. بدین صورت با توجه به معلوم بودن پارامترهای سمت چپ معادله می‌توان با دانستن شماره‌ی مد، طول‌موج تشدید و با معلوم بودن طول‌موج تشدید شماره مد را محاسبه کرد.



شکل ۱: طرح‌واره‌ی دوبعدی کلید پلاسمونیک با تشدیدگر حلقوی

با حل معادلات ماکسول و اعمال شرایط مرزی برای قطبش TM خواهیم داشت: [۱]

$$\beta_m/\varepsilon_m = \beta_D/\varepsilon_D \quad (1)$$

که در آن β_m و β_D ثابت انتشارهای فلز و دی‌الکتریک هستند و ε_m و ε_D ثابت گذردهی نسبی برای فلز و دی‌الکتریک خواهند بود. [۳]

با اعمال شرط جور شدگی فاز، طول‌موج تشدید که در آن بردار موج نور به بردار موج پلاریتون پلاسمون سطحی تزویج می‌شود، به صورت زیر به دست می‌آید:

$$\lambda_{\text{res}} \approx \lambda \sqrt{\varepsilon_m \varepsilon_D / \varepsilon_m + \varepsilon_D} \quad (2)$$

با استفاده از رابطه پاشندگی مد اصلی TM در یک موج‌بر فلز-دی‌الکتریک-فلز و حل این رابطه ضریب شکست مؤثر حلقه محاسبه می‌شود:

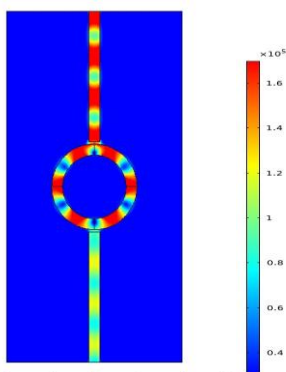
$$\varepsilon_D k_{z2} + \varepsilon_m k_{z1} \coth(ik_{z1} \omega/2) = 0 \quad (3)$$

که در آن k_{1z} و k_{2z} به ترتیب مؤلفه Z ام بردار موج در محیط دی‌الکتریک و فلز هستند و به صورت زیر محاسبه می‌شوند:

$$k_{z1}^2 = \varepsilon_D k_0^2 - \beta^2 \quad (4)$$

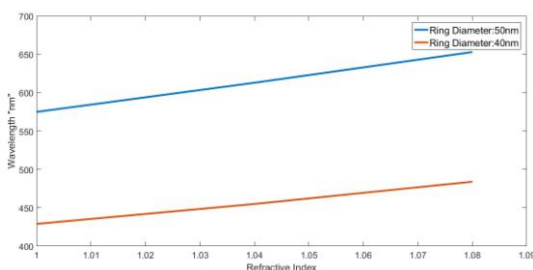
شکل ۴ توزیع دوبعدی میدان الکتریکی را برای مد سوم و میزان حدود ۴۵٪ عبور را نشان می‌دهد.

نتایج و بحث:



شکل ۴: توزیع دوبعدی میدان برای مد سوم

شکل ۵ جابه‌جایی طول موج نسبت به ضریب شکست را برای ساختاری با ضخامت حلقه‌ی ۴۰ nm و ۵۰ nm نشان می‌دهد به‌طوری‌که با استفاده از شیب نمودار می‌توان میزان حساسیت حسگر به دست آورد.



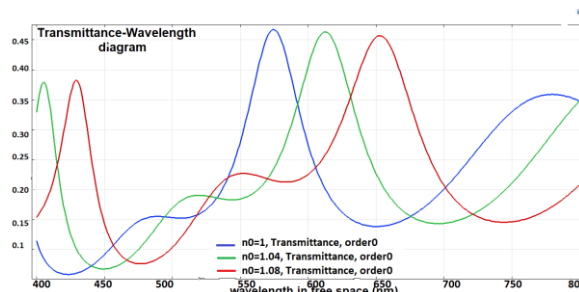
شکل ۵: نمودار جابه‌جایی طول موج تشدید مد سوم به ازای ضخامت‌های ۴۰ nm و ۵۰ nm

مرجع‌ها:

- [1] B.D. Gupta, S.K. Sirvastava, R.Verma "Fiber Optic Sensores Based on Plasmonics", World Scientific, New Jersey 2015.
- [2] T. Wu, Y. Liu, Z. Yu, Y. Peng, C. Shu, H. Ye, "The sensing characteristics of plasmon waveguide with a ring resonator", Optics Express, Vol. 22, No. 7, pp. 7669-7677, 2014.
- [3] T.B. Wang, X.W. Wen, C.P. Yin, H.Z. Wang "The transmission characteristics of surface plasmon polaritons in ring resonator", Optics Express, Vol. 17, No. 26, pp. 24096-24101, 2009.

در این مقاله با استفاده از روابط حاکم بر امواج پلاریتون پلاسمون سطحی و تشدیدگرهای حلقوی و با استفاده از روش المان محدود در نرم‌افزار کامسول، کلید پلاسمونیک در تشدیدگرهای حلقوی شبیه‌سازی شده است که می‌تواند به‌عنوان حسگر ضریب شکست هم مورد استفاده قرار بگیرد. تزویج مؤثر بین موج‌برها و حلقه، به ضریب شکست دی‌الکتریک و فاصله موج‌برها با حلقه و شعاع و ضخامت حلقه بستگی دارد. نتایج به‌دست‌آمده با افزایش شعاع حلقه به نتایج تئوری نزدیک‌تر می‌شوند. با کاهش فاصله میان موج‌برها و حلقه، میزان تزویج موج عبوری افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه با تغییر شعاع حلقه می‌توان قله‌های عبوری را مدوله کرد و بازه طول‌موج‌های تشدید متفاوتی به دست آورد و با توجه به اینکه طول‌موج‌های پلاریتون پلاسمون سطحی معادل قله‌های عبوری هستند از این ساختار می‌توان به‌عنوان پالاینده قابل تنظیم نوار-گذر نیز استفاده کرد.

در شکل ۳ میزان عبور مد سوم تشدید $m=3$ برحسب طول موج به ازای ضریب شکست‌های (۱,۰۸,۱,۰۴,۰) طول موج به ازای ضریب شکست‌های (۱,۰۸,۱,۰۴,۰) برای ضخامت ۵۰ nm حلقه قابل مشاهده است. جابه‌جایی قله‌های عبوری به ازای تغییرات ضریب شکست در شکل، کارکرد حسگر ضریب شکست را تأیید می‌کند.



شکل ۳: میزان عبور برحسب طول موج به ازای ضریب شکست‌های متفاوت