

بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. ۱۳۹۸ بهمن ۱۳۹۸



طراحي موجبر پلاسمونيكي براي حسگر ضريب شكست

سید امیر حسین زارعیان، عباس کلاته سیفری و مهدی بهادران*

a.zareian@sutech.ac.ir, a.kalate@sutech.ac.ir, *bahadoran@sutech.ac.ir

دانشکده فیزیک شیراز-دانشگاه صنعتی شیراز-فارس-ایران

چکیده – در این مقاله به طراحی یک موجبر بازتابنده پادزنشی پلاسمونیکی از هسته شیشه FK51A بر اساس تشدید جفت شده بین یک مُد دی الکتریک هدایت شده می پردازیم. با بکارگیری روش حل ویژه تفاضل محدود، مُدهای TM پایه و اول در طول موجهای مرئی و توزیع میدان الکتریکی عرضی دو بعدی برای ضریب شکستهای پوشش مختلف شبیه سازی کردیم. به کمک میزان نفوذ میدان و تغییرات دنبالهی میدان الکتریکی در ناحیهی پوشش، یک حسگر ضریب شکست طراحی کردیم. این حسگر دارای حساسیت بالای RUL/(db/nm) 0.02 برای مد TM است که مناسب برای کاربردهای حسگری است.

كليد واژه – حسگر ضريب شكست، موجبر بازتابنده پادزنشی، موجبر پلاسمونيكی

Design of a Plasmonic Waveguide for Refractive Index Sensor

Amir Hossein Zareian, Abbas Kalate Seyfari, Mahdi Bahadoran*

Department of Physics, Shiraz University of Technology, 31371555, Shiraz, Fars, Iran.

Abstract- An anti-resonant reflecting plasmonic waveguide from core of FK51A-glass based on the resonant coupling between a guided dielectric mode and surface plasmon polariton wave is designed for refractive index sensing application. The Finite Difference Eigen solver method is used and two fundamental modes are obtained at the visible wavelengths by varying the refractive index of the superstrate layer. Considering the light evanescent through the superstrate layer and light responses in this layer, a sensitivity as high as 0.02 (dB/nm)/RIU was measured for the TM₁ mode, which is quite applicable for sensing application.

Keywords: Anti-resonant reflecting waveguide, Plasmonic waveguide, Refractive Index Sensor,

بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، ۱۵–۱۶ بهمن ۱۳۹۸

 $\sum_{k=1}^{N} \left(\frac{\lambda^2}{4n_2^2} + \frac{\lambda^2}{n_2^2} + \frac{\lambda^2}{4n_2^2} d_{ce}^2 \right)^{1/2} + \frac{\lambda^2}{4n_2^2} d_{ce}^2 \right)^{1/2}$ n2 این لایه از جنس FK51A با ضریب شکست n2 این لایه از جنس fK51A با ضریب شکست $(n_2 > n_1)$ و ضخامت μm باید به حدی نازک باشد تا میدان نفوذی به لایه پوشش دوم برسد و در مرز هسته و پوشش منعکس شود. ضخامت دو لایه پوشش باید به گونهای انتخاب شود که شرایط اتلاف کم و انتشار شبه تک مد را برآورده کند. ضخامت لایه دوم با شرط غیر تشدید کننده انتخاب می شود $(n_1 - n_2)^2$

$$d_{ce} = d_{c} + \frac{\lambda}{2\pi(n_{c} - n_{a}^{2})} + \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_{c}^{2} - n_{1}^{2} \tanh(\frac{2\pi d_{c}}{\lambda}[n_{c}^{2} - n_{1}^{2}])}}$$
(1)



شکل ۱: . پیکربندی یک موجبر پلاسمونیک بازتابنده پادزنشی

که Λ طول موج نور ورودی n_a ضریب شکست محیط زمینه، و d_{ce} ضخامت معادل ناحیه هسته است. از آنجا که پلاریتون پلاسمای سطحی فقط مدهای TM را پشتیبانی می کند بنابراین تمرکز ما تنها بر روی مدهای پشتیبانی می کند بنابراین تمرکز ما تنها بر روی مدهای TM اصلی در موجبر بازتابنده پادزنشی است. یک لایه نازک از فلز نقره با ضخامت 15nm و ضریب شکست نازک از فلز نقره با ضخامت 15nm او ضریب شکست تاج هسته موجبر قرار گرفته است. پهنای تاج قسمت تاج هسته موجبر قرار گرفته است. پهنای تاج قسمت تاج هسته موجبر قرار گرفته است. پهنای تاج مملکرد دو مد اول را در طول موج $m = 0.589 \mu m$ اجازه میدهد. ضریب شکست لایه پوشش اول 1 = 1 است. برای یک لایه نازک فلز که روی یک موجبر دی الکتریک

مقدمه

موجبرهای پلاسمونیک بر پایهی پلاریتونهای پلاسمون سطحی به علت قابلیت بالای هدایت سیگنال در یک مقیاس طول موجی وسیع برای تحقق کوچکسازی مدارهای مجتمع نوری با تراکم بالا، همواره توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده است [۲-۳]. در این موجبرها، امواج سطحی الكترومغناطيسى با مغناطش عرضى (TM) از برهمكنش یک موج الکترومغناطیسی با الکترون های رسانش در سطح مشترک فلز و دیالکتریک بوجود می آیند [⁴, ⁴]. با درنظر گرفتن ابعادی کوچکتر از طولموج نور برای این موجبرها، میتوان انرژی الکترومغناطیسی را بوسیله تبدیل مد نوری به مد پلاسمونی سطحی غیرتابشی، هدایت کرد. مطالعات بر روی دستگاههای فعال زیادی بر پایهی موجبرهای پلاسمونیک هم از لحاظ تئوری[۶, ۷] و هم آزمایشگاهی صورت گرفته است[8]. در موجبرهای پلاسمونیکی، افزایش شدت مد روی سطح فلز وابسته به تغییرات ضریب شکست ماده در تماس با سطح فلز است در نتیجه این موجبرها گزینه مناسبی برای کاربردهای حسگری هستند. در این مقاله ابتدا با استفاده از روش حل ویژه تفاضل محدود خصوصیات انتشار مدها در موجبر پلاسمونیکی، شامل یک مد خالص و یک مد پلاریتون سطحی در مرز دیالکتریک -فلز مورد بررسی قرار میدهیم، سپس نتایج را برای طراحی یک حسگر ضریب شکست پلاسمونیکی به کار میبریم.

پيكربندى موجبر پلاسمونيكى

یک موجبر تخت بازتابنده پادزنشی در شکل ⁽⁾ نشان داده شده است. این موجبر ها اساساً شامل پنج لایه هستند: زیر لایه از جنس سیلیکون به ارتفاع 2μ ، لایه هسته از جنس FK51A با ضریب شکست $n_c = 1.486$ و ضخامت FK51A با ضریب شکست $n_c = 1.486$ و ضخامت شکست $d_c = 0.806 \, \mu m$ شکست $d_c = 0.806 \, \mu m$ شکست $n_1 = 1$ و ضخامت $n_1 = 1$ و یک لایه پوشش ثانویه از رابطه

سطح بالایی و پایینی سطح مشترک دیالکتریک-فلز متصل شدهاند و مد های مختلفی را پشتیبانی می کند(شکل ۲). مد پایه در نزدیکی سطح فلز قرار دارد، دارای ضریب شکست موثر بالاتری است که منجر به عمق نفوذ و طول انتشار کمتری میشود و حبس شدگی در ابعاد زیر طول موجی را فراهم می کند. مد اول دارای ضریب شکست موثر کمتر و عمق نفوذ بیشتری در دی الکتریک است(شکل ^۳)، از این رو به عنوان مد پلاریتون پلاسمای سطحی بلند برد شناخته میشود. این ویژگی مد اول را گزینه مناسبی برای کاربردهای حسگری می کند.

تحليل مدى موجبر پلاسمونيكى

موجبر پلاسمونیک با استفاده از نرم افزار لومریکال[۱۲] و روش حل ویژه تفاضل محدود در طول موج مرئی شبیهسازی شده است. سیر تحول مد و $\lambda=0.589~\mu\mathrm{m}$ توزيع ميدان مدها در ضريب شكستهاى زمينه مختلف ntop، توزیع میدان الکتریکی عرضی دو بعدی Ey برای مد پلاسمون پایینترین مرتبه TM_0 و مدهای مرتبه بالا در نظر گرفته شده است. مقطع عرضی میدان TM_1 الکتریکی مد TM برای تغییرات ضریب شکست پوشش از ۱/۳۷۹ تا ۱/۴۱۲ در شکل۲ نمایش داده شده است. برای مطالعه خصوصيات انتشار مد پلاسمونيک مرتبه پايين و مد مرتبه بالاتر TM_1 باید ضریب شکست موثر TM_0 مد neff و طول انتشار این مدها را بدست آوریم. مقیاس اتلاف انتشار در موجبر، طول انتشار L است که به دلیل جذب توان بوسیله فلز است و با داشتن قسمت موهومی $L = \lambda / 4\pi [\text{Im}(n_{e\!f\!f})]$ فريب شكست موثر از رابطه بدست می آید. به کمک نرم افراز لومریکال(-Lumerical neff المتحقيقي neff والمتحقيقي neff و طول انتشار L برای مدهای پلاسمونیک برحسب تغییرات ضریب شکست زمینه از ۱/۳۷۹ تا ۱/۴۱۲ برای TM₀ و از ۱/۳۷۹ تا ۱/۴ برای TM در شکلهای a-B و b-5 نشان

داده شده است. با توجه به شکل دنبالهی میدان الکتریکی در ناحیهی پوشش، شیب نمودار log Ey با تغییر ضریب شکست پوشش به صورت خطی با مقدار منفی افزایش مییابد، این تغییر شیب در طراحی یک حسگر ضریب شکست استفاده میشود. برای تغییرات ضریب شکست زمینه از ۱٫۳۷۹ تا ۱٫۴۱۲ شیب لگاریتمی تغییرات توزیع میدان برای هر مد در شکل^۴ نشان داده شده است.



شکل۲: توزیع میدان الکتریکی عرضی دو بعدی در موجبر پلاسمونیکی برای ضریب شکستهای پوشش مختلف a) مد TM₀ b)توزیع میدان₍C TM₁) مد (c TM₁)توزیع میدان

با محاسبه ی شیب نمودارها برای هر مد می توان حساسیت حسگر $\Delta n / (\Delta p E_y) / \Delta n$ را اندازه گرفت. در اینجا برای مد پایه به حساسیت $S = \Delta(\log E_y) / \Delta n$ و برای مد اول به پایه به حساسیت NIU / (B/nm) / RIU و برای مد اول به حساسیت NIU / (B/nm) / RIU دست یافتیم. حساسیت هر دو مد تقریبا از یک مرتبه است ولی با توجه به طول انتشار بالاتر مد اول نسبت به مد پایه (شکل ۳)، مد اول حاصل از موجبر پلاسمونیکی ارایه شده مناسب برای کاربردهای بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران، ۱۵–۱۶ بهمن ۱۳۹۸

حسگر ضریب شکست در ناحیه مرئی شبیه سازی کردیم. حساسیتی از مرتبه RIU = (dB / nm) / RIU برای مد پایه 0.01 (dB / nm) / RIU برای مد اول بدست آمد که برای کاربردهای حسگری مناسب است.

مرجعها

- Lal, S., S. Link, and N.J. Halas, *Nano-optics* from sensing to waveguiding. Nature photonics, 2007. 1(11): p. 641.
- Barnes, W.L., A. Dereux, and T.W. Ebbesen, Surface plasmon subwavelength optics. nature, 2003. 424(6950): p. 824.
- Ozbay, E., Plasmonics: merging photonics and electronics at nanoscale dimensions. science, 2006. 311(5758): p. 189-193.
- 4. Maier, S.A., Surface plasmon polaritons at metal/insulator interfaces, in Plasmonics: Fundamentals and Applications. 2007, Springer. p. 21-37.
- 5. Raether, H., Surface Plasmons, vol. 111 of Springer-Verlag Tracts in Modern Physics. 1988, Springer-Verlag, New York.
- Grandidier, J., et al., Dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides on a finite-width metal strip. Applied Physics Letters, 2010. 96(6): p. 063105.
- Chen, L., X. Li, and G. Wang, A hybrid longrange plasmonic waveguide with subwavelength confinement. Optics Communications, 2013. 291: p. 400-404.
- 8. Sorger, V.J., et al., *Experimental demonstration* of low-loss optical waveguiding at deep subwavelength scales. Nature Communications, 2011. **2**: p. 331.
- Baba, T. and Y. Kokubun, Dispersion and radiation loss characteristics of antiresonant reflecting optical waveguides-numerical results and analytical expressions. IEEE Journal of Quantum electronics, 1992. 28(7): p. 1689-1700.
- Sinha, R. and R. Bhattacharyya, Analysis and design of hybrid ARROW-B plasmonic waveguides. JOSA A, 2013. 30(8): p. 1502-1507.
- 11. Palik, E.D., *Handbook of optical constants of solids*. Vol. 3. 1998: Academic press.
- 12. Lumerical, M., Solutions 7.10, Inc.
- 13. Sharma, M., S.K. Mishra, and B. Ung. Ultrasensitive and large dynamic range refractive index sensor utilizing annular core photonic crystal fiber. in Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications XIII. 2019. International Society for Optics and Photonics.



شکل۳: نمودار a) ضریب شکست مؤثر b) طول انتشار بر حسب ضریب شکستهای یوشش مختلف.



شکل ۴: تغییرات شیب دنباله Log E_y در پوشش برای مدهای TM₀(a) شکل ۲: تغییرات شیب دنباله IDg E_y در پوشش مختلف.

حسگری است. روش بکار گرفته در این مقاله برای حساسیت کاملا نو آورانه است و برخلاف روشهای موجود در موجبرها که به حساسیتی بر حسب nm/RIU دست می یابند ، ما به حساسیت بر حسب dB/nm)/RIU) دست یافیتم که تنها قابل قیاس با روش ارایه شده در [۱۳] است.

نتيجه گيرى

یک موجبر پلاسمونیکی پادزنشی برای هدایت مُدهای مغناطیس عرضی پایه و اول در طول موجهای مرئی طراحی شد. بر اساس روش حل ویژه تفاضل محدود توزیع میدان الکتریکی عرضی در ناحیه پوشش موجبر را برای ضریب شکستهای پوشش مختلف، بررسی کردیم و نتایج را برای