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

طراحی موجبر پلاسمونیکی برای حسگر ضریب شکست

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 $0.02(dB/nm)/RIU$ برای مد TM_1 است که مناسب برای کاربردهای حسگری است.

کلید واژه – حسگر ضریب شکست، موجبر بازتابنده پادزنشی، موجبر پلاسمونیکی

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 TM_1 mode, which is quite applicable for sensing application.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

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

مقدمه

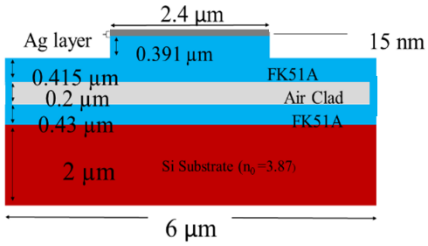
موجبرهای پلاسمونیک بر پایه‌ی پلاریتون‌های پلاسمون سطحی به علت قابلیت بالای هدایت سیگنال در یک مقیاس طول موجی وسیع برای تحقق کوچک‌سازی مدارهای مجتمع نوری با تراکم بالا، همواره توجه پژوهشگران را به خود جلب کرده‌است[۳-۱]. در این موجبرها، امواج سطحی الکترومغناطیسی با مغناطش عرضی (TM) از برهمکنش یک موج الکترومغناطیسی با الکترون‌های رسانش در سطح مشترک فلز و دی‌الکتریک بوجود می‌آیند[۴, ۵]. 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.

پیکربندی موجبر پلاسمونیکی

یک موجبر تخت بازتابنده پادزنشی در شکل ۱ نشان داده شده است. این موجبر ها اساساً شامل پنج لایه هستند: زیر لایه از جنس سیلیکون به ارتفاع 2μm، لایه هسته از جنس FK51A با ضریب شکست $n_c = 1.486$ و ضخامت $d_c = 0.806\ \mu m$، یک لایه پوشش اولیه از هوا با ضریب شکست $n_1 = 1$ $(n_c > n_1)$ و ضخامت $d_1 = 0.2\ \mu m$ و یک لایه پوشش ثانویه از رابطه $d_2 \cong \lambda \Big/ 4n_2\left(1-\frac{n_C^2}{n_2^2}+\frac{\lambda^2}{4n_2^2 d_{Ce}^2}\right)^{1/2}$ و (۱) بدست می‌آید.

این لایه از جنس FK51A با ضریب شکست n_2 $(n_2 > n_1)$ و ضخامت $d_2 = 0.43\ \mu m$. اولین لایه پوشش 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 می‌شود[۹, ۱۰]

$$d_{Ce} = d_C + \frac{\lambda}{2\pi(n_C - n_a^2)} + \frac{\lambda}{2\pi\sqrt{n_C^2 - n_1^2 \tanh(\frac{2\pi d_C}{\lambda}[n_C^2 - n_1^2])}} \quad (۱)$$



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 می‌کند 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 $n_{Ag} = 0.051988 + i\,3.9165$ [11] روی سطح بالایی قسمت تاج هسته موجبر قرار گرفته است. پهنای تاج $w = 2.4\,\mu m$ و ارتفاع تاج $h = 0.391\,\mu m$ اجازه عملکرد دو مد اول را در طول موج $\lambda = 0.589\,\mu m$ را می‌دهد. ضریب شکست لایه پوشش اول $n_1 = 1$ است. برای یک لایه نازک فلز که روی یک موجبر دی‌الکتریک متقارن قرار گرفته است، پلاریتون پلاسمای سطحی روی

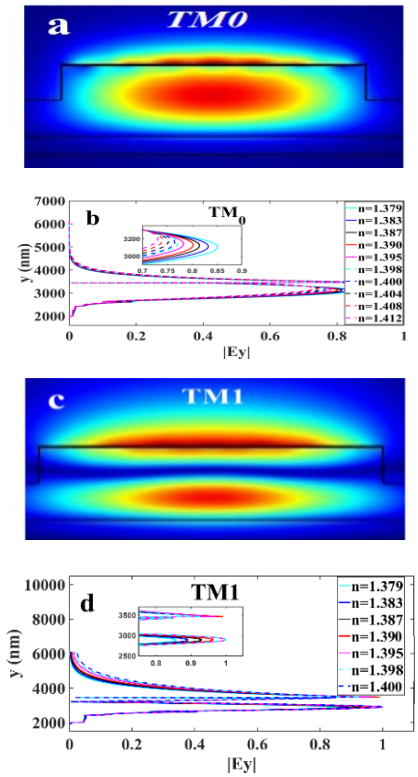
این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]

سطح بالایی و پایینی سطح مشترک دی‌الکتریک-فلز متصل شده‌اند و مد های مختلفی را پشتیبانی می‌کند(شکل۲). 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 می‌کند. مد اول دارای ضریب شکست موثر کمتر و عمق نفوذ بیشتری در دی الکتریک است(شکل۳)، از این رو به عنوان مد پلاریتون پلاسمای سطحی بلند برد شناخته می‌شود. این ویژگی مد اول را گزینه مناسبی برای کاربردهای حسگری می‌کند.

تحلیل مدی موجبر پلاسمونیکی

موجبر پلاسمونیک با استفاده از نرم افزار لومریکال[۱۲] و روش حل ویژه تفاضل محدود در طول موج مرئی $\lambda = 0.589\ \mu m$ شبیه‌سازی شده است. سیر تحول مد و توزیع میدان مدها در ضریب شکست‌های زمینه مختلف n_{top}، توزیع میدان الکتریکی عرضی دو بعدی Ey برای مد پلاسمون پایین‌ترین مرتبه TM_0 و مدهای مرتبه بالا TM_1 در نظر گرفته شده است. مقطع عرضی میدان الکتریکی مد TM برای تغییرات ضریب شکست پوشش از ۱/۳۷۹ تا ۱/۴۱۲ در شکل۲ نمایش داده شده است. برای مطالعه خصوصیات انتشار مد پلاسمونیک مرتبه پایین TM_0 و مد مرتبه بالاتر TM_1 باید ضریب شکست موثر مد n_{eff} 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 ضریب شکست موثر از رابطه $L = \lambda / 4\pi[\mathrm{Im}(n_{eff})]$ بدست می‌آید. به کمک نرم افراز لومریکال(Lumerical-mode solution)[۱۲] تغییرات قسمت حقیقی n_{eff} و طول انتشار L برای مدهای پلاسمونیک برحسب تغییرات ضریب شکست زمینه از ۱/۳۷۹ تا ۱/۴۱۲ برای TM_0 و از ۱/۳۷۹ تا ۱/۴ برای TM_1 در شکل‌های 3-a و 3-b 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 شکل۴ نشان داده شده است.

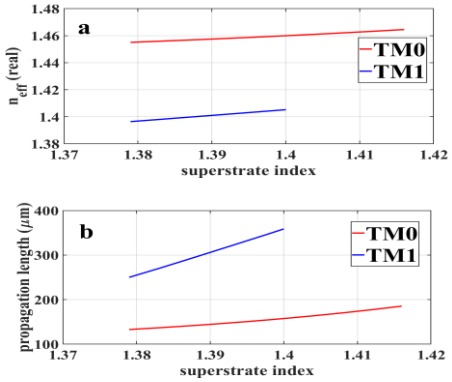


شکل۲: توزیع میدان الکتریکی عرضی دو بعدی در موجبر پلاسمونیکی برای ضریب شکست‌های پوشش مختلف a) مد TM_0 b)توزیع میدانTM_0 c) مد TM_1 d)توزیع میدانTM_1

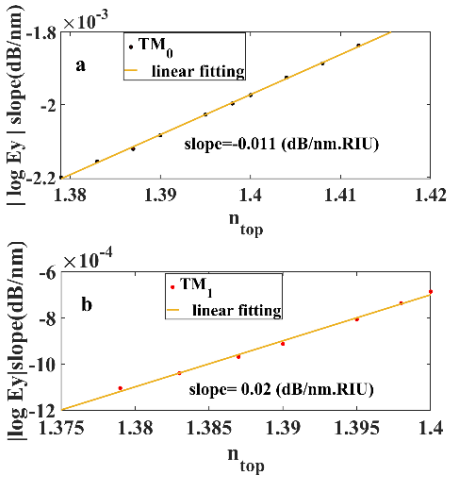
با محاسبه‌ی شیب نمودارها برای هر مد می‌توان حساسیت حسگر $S = \Delta(\log E_y) / \Delta n$ را اندازه گرفت. در اینجا برای مد پایه به حساسیت $0.011(dB/nm)/RIU$ و برای مد اول به حساسیت $0.02(dB/nm)/RIU$ دست یافتیم. حساسیت هر دو مد تقریبا از یک مرتبه است ولی با توجه به طول انتشار بالاتر مد اول نسبت به مد پایه(شکل۳)، مد اول حاصل از موجبر پلاسمونیکی ارایه شده مناسب برای کاربردهای

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]



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



شکل۴: تغییرات شیب دنباله $\log E_y$ در پوشش برای مدهای a)TM_0 b) TM_1 برای ضریب شکست‌های پوشش مختلف.

حسگری است. روش بکارگرفته 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 یافتیم که تنها قابل قیاس با روش ارایه شده در[۱۳] است.

نتیجه گیری

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 حسگر ضریب شکست در ناحیه مرئی شبیه سازی کردیم. حساسیتی از مرتبه $0.011(dB/nm)/RIU$ برای مد پایه $0.02(dB/nm)/RIU$ برای مد اول بدست آمد که برای کاربردهای حسگری مناسب است.

مرجع‌ها

1. Lal, S., S. Link, and N.J. Halas, *Nano-optics from sensing to waveguiding.* Nature photonics, 2007. **1**(11): p. 641.
2. Barnes, W.L., A. Dereux, and T.W. Ebbesen, *Surface plasmon subwavelength optics.* nature, 2003. **424**(6950): p. 824.
3. 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.
6. Grandidier, J., et al., *Dielectric-loaded surface plasmon polariton waveguides on a finite-width metal strip.* Applied Physics Letters, 2010. **96**(6): p. 063105.
7. Chen, L., X. Li, and G. Wang, *A hybrid long-range plasmonic waveguide with sub-wavelength confinement.* Optics Communications, 2013. **291**: p. 400-404.
8. Sorger, V.J., et al., *Experimental demonstration of low-loss optical waveguiding at deep sub-wavelength scales.* Nature Communications, 2011. **2**: p. 331.
9. 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.
10. 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. *Ultra-sensitive 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.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-05]