



Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2023) 2(2):17-25

Vertical Strip Metal-Insulator-Metal Waveguide Based on a Silicon-on-Insulator Platform

Vahid Sadeghzadeh Maraghi¹, *Ph.D. Student*, Mahmoud Nikoufard², *Associate Professor*, Mahdi Eslami¹, *Assistant Professor*, Seyyed Hossein Pishgar Komleh¹, *Assistant Professor*

¹ Department of Electrical Engineering, College of Engineering, Islamic Azad University, West Tehran Branch, Tehran, Iran

² Department of Electronics, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran

Abstract:

This paper proposes a new ultra-compact strip metal-insulator-metal (MIM) plasmonic waveguide on a silicon-on-insulator (SOI) platform. The waveguide structure can efficiently propagate surface plasmon polaritons (SPPs) within a thin low-index SiO₂ layer at an optical wavelength window of 1550 nm. The main parameters of effective refractive index, propagation length, confinement factor, and effective mode area were determined for the proposed waveguide with different waveguide widths. The simulation results were comparable with the in-plane MIM plasmonic waveguide. The proposed layer stack could be monolithically integrated with conventional and hybrid plasmonic SOI-based devices and has the potential of focusing light to nanoscale dimensions.

Keywords: Nanofocusing, Plasmonic, Photonic integrated circuits, Propagation properties, Strip metal-insulator-metal waveguide, Silicon-on-insulator (SOI).

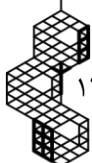
Received: 8 November 2022

Revised: 22 Jun 2023

Accepted: 28 January 2023

Corresponding Author: Dr. Mahmoud Nikoufard, mnik@kashanu.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2023.1972274.1048>





فناوری‌های نوین مهندسی برق در سیستم انرژی سبز

موجبر نواری فلز-عایق-فلز عمودی مبتنی بر ساختار سیلیکون بر روی عایق

وحید صادق زاده مرقی^۱، دانشجوی دکتری، محمود نیکو فرد^۲، دانشیار، مهدی اسلامی^۱، استادیار، سید حسین پیشگر کومله^۱، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد تهران غرب، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران

چکیده: این مقاله یک موجبر پلاسمونیک نواری بسیار فشرده جدید فلز-عایق-فلز (MIM) بر روی ساختار سیلیکون بر روی عایق (SOI) پیشنهاد می‌کند. ساختار موجبر می‌تواند به‌طور مؤثر پلاریتون پلاسمون‌های سطحی (SPPs) را در یک لایه نازک SiO_2 با ضریب شکست کم در پنجره طول موج نوری ۱۵۵۰ نانومتر منتشر کند. پارامترهای اصلی شامل، ضریب شکست مؤثر، طول انتشار، ضریب تحدید و ناحیه حالت مؤثر برای موجبر پیشنهادی با پهنای مختلف موجبر محاسبه شده است. نتایج شبیه‌سازی با موجبر پلاسمونیک MIM افقی قابل مقایسه می‌باشد. ساختار پیشنهادی می‌تواند به‌صورت یکپارچه با ادوات مبتنی بر SOI عایقی مرسوم و پلاسمونیک ترکیبی مجتمع سازی شده و پتانسیل متمرکز کردن نور، در ابعاد نانو را دارد.

واژه های کلیدی: تمرکز در ابعاد نانو، پلاسمونیک، مدارهای یکپارچه فوتونیک، خواص انتشار، موجبر نواری فلز-عایق-فلز (MIM) عمودی، سیلیکون بر روی عایق (SOI).

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۱/۰۸/۱۷

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۱۱/۰۸

نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمود نیکو فرد، mnik@kashanu.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2023.1972274.1048>



پلاریتون پلاسمون‌های سطحی (SPP) موضوع ادوات مجتمع فوتونیک در دو دهه گذشته می‌باشند [۴-۱]. توسعه فناوری‌های نانو ساخت و مشخصه‌سازی نانو، علاقه زیادی را به محدود کردن و هدایت انرژی نوری در مقیاس زیر طول موج ایجاد نموده است [۵-۱۰]. ساختار موج‌برهای پلاسمونیک بر اساس دو ساختار اصلی MIM (فلز-عایق-فلز) و IMI (عایق-فلز-عایق) می‌باشند [۱۱، ۱۲]. موج‌برهای پلاسمونیک MIM مرسوم بهترین تحدید را در راستای افقی دارند که به وسیله موج‌برهای عایقی معمولی نمی‌توانند حاصل شود [۱۳]. تلفات نوری در موج‌برهای پلاسمونیک به دلیل نفوذ میدان‌های نوری در داخل لایه فلزی یک چالش بسیار مهم می‌باشد [۱۴].

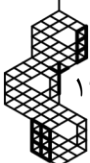
موج‌برهای MIM دوبعدی افقی به صورت تحلیلی و عددی، به کرات تحلیل و مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۵]. مشخصات مود، بخش حقیقی ضریب شکست مؤثر و طول انتشار بر حسب پهنای شکاف و ضخامت لایه‌های فلزی در دو طرف شکاف برای موج‌برهای MIM افقی بر روی زیر لایه SiO_2 در مراجع [۱۶، ۱۷] ارائه و بررسی شده‌اند. موج‌برهای MIM افقی، کاربردهای متفاوتی در مدارات مجتمع نوری دارند که شامل تیپر [۱۸]، تزویج گر جهت‌دار، مقسم توان و مبدل مود [۱۹]، تشدیدکننده حلقه [۲۰]، گیت‌های منطقی [۲۱] و کاربردهای غیرخطی [۲۲] می‌باشند. متأسفانه موج‌بر MIM عمودی فقط در سه مرجع برای تمرکز نور به شکل تیپر استفاده شده‌اند و تحقیقات دیگری جهت طراحی در ادوات غیر فعال نوری انجام نشده است که در ادامه به این سه مورد اشاره می‌شود: یک موج‌بر پلاسمونیک نواری شامل لایه هسته‌ای Si_3N_4 ، SiO_2 و لایه‌های پوششی نقره به صورت تجربی در محدوده طول موج ۹۰۰-۵۰۰ نانومتر با طول انتشار چند میکرومتر گزارش شده‌اند [۲۳]. MIM متمرکز کننده با تیپر خطی، با استفاده از لایه‌های $Au/SiO_2/Au$ بر روی زیر لایه سیلیکونی در [۲۴، ۲۵] ساخته و آزمایش شده‌اند.

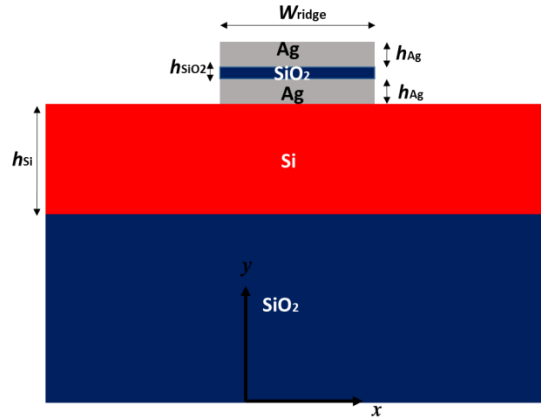
برای اولین بار، این مقاله به‌طور جامع موج‌برهای MIM را بر روی ساختار لایه SOI در طول موج مخابراتی ۱۵۵۰ نانومتر، مورد مطالعه قرار داده است. در واقع، هدف از این مقاله، ارائه موج‌بری جدید و پیشرفته‌تر نسبت به مطالعات موجود و انجام شده در این زمینه است که توانایی تمرکز نمودن نور در ابعاد نانو در دو راستای افقی و عمودی را به طور همزمان داراست که می‌تواند در فوتولیتوگرافی در ابعاد نانو مورد استفاده قرار گیرد. در حالیکه ساختارهای MIM قبلی فقط توانایی تمرکز نور در راستای افقی را دارد. علاوه بر این، موج‌بر نواری MIM پیشنهادی را می‌توان به صورت یکپارچه با موج‌برهای عایقی و پلاسمونیک ترکیبی مبتنی بر ساختار لایه SOI مجتمع سازی کرد که به شدت موجب کاهش هزینه‌های ساخت این ادوات می‌گردد. در مطالعه حاضر، مودهای مغناطیسی عرضی موج‌بر (TM)، پاشندگی و تأثیر برخی از پارامترهای هندسی بر ضریب شکست مؤثر تعیین و مورد بحث قرار داده شده است.

۲- ساختار موج‌بر فلز-عایق-فلز عمودی با پارامترهای انتشار

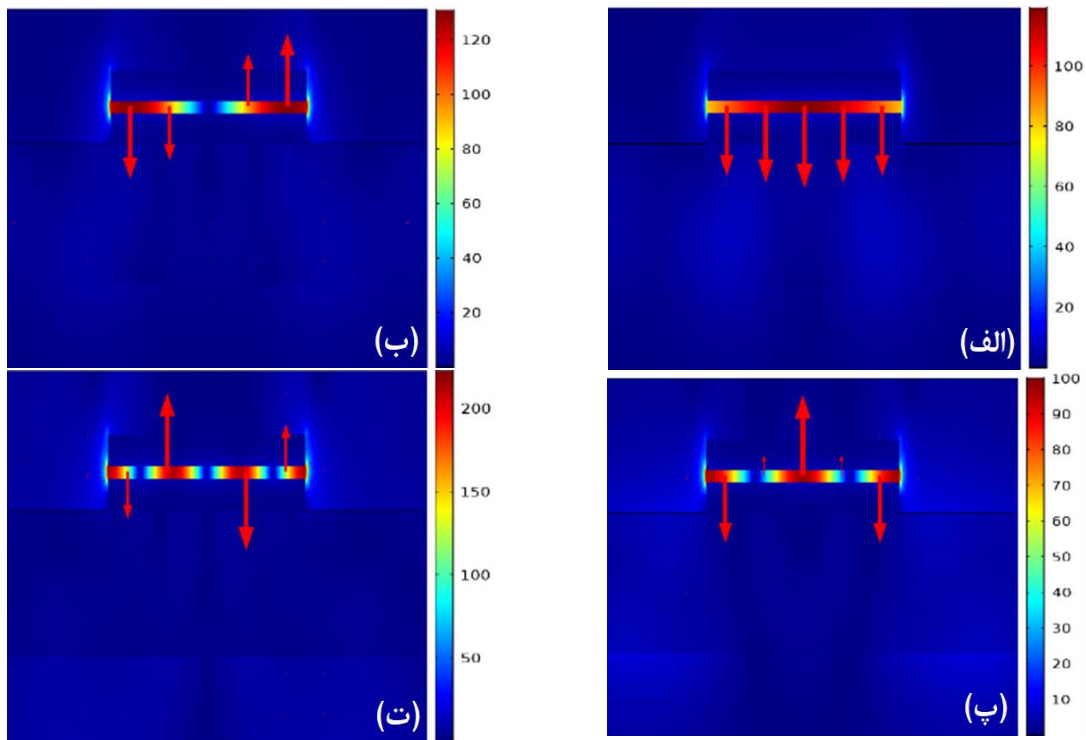
سطح مقطع جانبی موج‌بر نواری پیشنهادی MIM در شکل ۱ نشان داده شده است. موج‌بر پیشنهادی از یک لایه هدایت‌کننده SiO_2 با ضخامت h_{SiO_2} تشکیل شده که با دو لایه فلز احاطه شده است. ضخامت نقره (h_{Ag}) باید ضخیم‌تر از عمق نفوذ میدان نوری در داخل لایه فلز باشد. لایه‌های موج‌بر نواری $Ag/SiO_2/Ag$ بر روی لایه‌های Si و SiO_2 قرار گرفته‌اند به گونه‌ای که این ساختار لایه، منطبق بر فناوری CMOS می‌باشد. ضرایب شکست Ag ، SiO_2 و Si در طول موج مخابراتی ۱۵۵۰ نانومتر به ترتیب برابرند با: $n_{SiO_2}=1.444$ و $n_{Si}=3.48$ و $n_{Ag}=0.144+11.366i$ از نکات مهم در ساختار فوق این است که دارای فناوری ساخت ساده و منطبق بر موج‌برهای عایقی مبتنی بر فناوری SOI می‌باشد [۲۶].

توزیع میدان الکتریکی (اندازه و جهت) و ضریب شکست مؤثر مودهای منتشر شونده با استفاده از روش عناصر محدود (FEM) و نرم‌افزار COMSOL محاسبه شده است. در شکل ۲ مودهای منتشر شونده در یک موج‌بر با پهنای پشته $W_{ridge}=1000nm$ و $h_{SiO_2}=20nm$ نشان داده شده است به گونه‌ای که فقط یک مود را در جهت y پشتیبانی می‌کند. ضمناً این موج‌بر چهار مود میدان مغناطیسی عرضی (TM) را منتشر نموده و میدان الکتریکی در بین دو فلز متمرکز گردیده است. همانطور که دیده می‌شود چهار مود TM منتشر شونده شامل مود اصلی (TM_{00}) ، مود اول (TM_{10}) ، مود دوم (TM_{20}) و مود سوم (TM_{30}) می‌باشند.





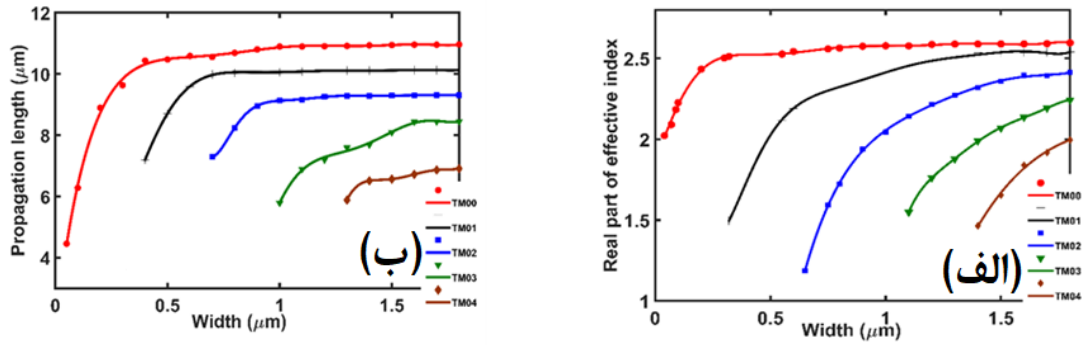
شکل (۱): سطح مقطع جانبی موج بر MIM نوری پیشنهادی بر روی ساختار لایه SOI ($h_{Si} = 300nm$).



شکل (۲): توزیع میدان الکتریکی (اندازه و جهت) موج بر MIM عمودی پیشنهادی. مدهای TM: (الف) اصلی، (ب) اول، (پ) دوم و (ت) سوم، برای پهنای پشته $W_{ridge}=1000\text{ nm}$ ، $h_{SiO2} = 20nm$ و $h_{Ag} = 50nm$

قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر برحسب پهنای پشته در شکل ۳-الف نشان داده شده است. با افزایش پهنای پشته، قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر تقریباً به سمت مقادیر متوسط ضریب شکست مواد Si و SiO_2 میل می کند (یعنی: $2 = 2/46 = (3/48 + 1/444)$). تعداد مدها در راستای افقی (محور x) به پهنای پشته بستگی دارد به گونه ای که طول موج قطع برای مدهای مرتبه اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب حدود ۳۵۰ نانومتر، ۶۵۰ نانومتر، ۱۱۰۰ نانومتر و ۱۴۰۰ نانومتر است. چون موج بر MIM پیشنهادی متقارن است، بنابراین مود اصلی، طول موج قطع ندارد، لذا مود اصلی در موج بر با هر پهنایی منتشر خواهد شد. طول انتشار موج بر، طولی است که توان نوری به $1/e$ مقدار اولیه خود می رسد و با استفاده از قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر با استفاده از رابطه $L_p = \lambda / (4\pi n_{eimag})$ تعیین می شود که در آن n_{eimag} قسمت موهومی ضریب شکست مؤثر و $\lambda = 1550nm$ است. شکل ۳-ب طول انتشار را برحسب پهنای پشته برای مدهای مختلف TM نشان می دهد.

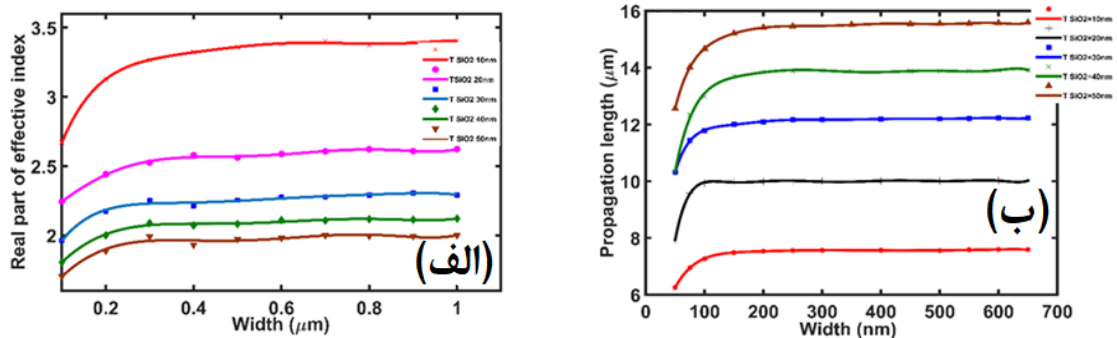




شکل (۳): (الف) قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر و (ب) طول انتشار بر حسب پهناي پشته (W_{ridge}) برای موده‌های مختلف TM به ازای $\lambda = 1550\text{nm}$ و $h_{\text{SiO}_2} = 20\text{nm}$

می‌توان مشاهده کرد که طول انتشار با افزایش پهناي پشته افزایش می‌یابد تا به حداکثر مقدار خود برسد. به‌طور خاص، حداکثر طول انتشار مود اصلی حدود ۱۱ میکرومتر می‌باشد، درحالی‌که برای موده‌های TM اول، دوم، سوم و چهارم به ترتیب حدود ۱۰ میکرومتر، ۹ میکرومتر، ۸/۵ میکرومتر و ۷ میکرومتر است. علاوه بر این، حداقل طول انتشار مود اصلی حدود ۴ میکرومتر است. تلفات انتشار بالا و تضعیف شدید در این موج‌بر، ناشی از نفوذ قابل توجه میدان نوری به داخل لایه‌های پوشش فلز نقره می‌باشد که عیب اصلی تمام موج‌برهای پلاسمونیک می‌باشد. هر چه تماس فیزیکی نور با سطح فلز در موج‌برهای پلاسمونیک بیشتر باشد تضعیف بیشتری را مشاهده خواهیم کرد. لذا اگر پهناي موج‌بر را کمتر از ۴۰۰ نانومتر نگه‌داریم، می‌توانیم صرفاً مود اصلی را در موج‌بر منتشر و بیشترین طول انتشار معادل با ۱۰ میکرومتر را داشته باشیم.

تأثیر ضخامت لایه هدایت‌کننده SiO_2 بر ضریب شکست مؤثر مود اصلی در شکل ۴ نشان داده شده است. ضخامت لایه SiO_2 از ۱۰ نانومتر تا ۵۰ نانومتر در گام‌های ۱۰ نانومتری تغییر یافته است تا فقط یک مود در جهت محور y داشته باشیم. قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر نیز از ۱/۴۴ به ۳/۴۸ برای $h_{\text{SiO}_2} = 50\text{nm}$ و $W_{\text{ridge}} = 100\text{nm}$ تا $h_{\text{SiO}_2} = 10\text{nm}$ و $W_{\text{ridge}} = 1000\text{nm}$ افزایش یافته است، که در شکل ۴-ب نشان داده شده است.



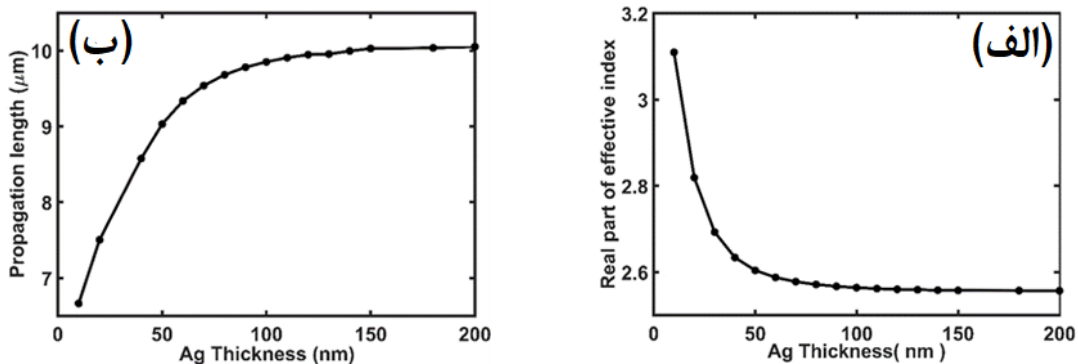
شکل (۴): (الف) قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر و (ب) طول انتشار بر حسب پهناي پشته برای ضخامت لایه SiO_2 ۱۰ نانومتر، ۲۰ نانومتر، ۳۰ نانومتر، ۴۰ نانومتر و ۵۰ نانومتر

هنگامی که ضخامت لایه SiO_2 را افزایش می‌دهیم تا به میزان کافی ضخیم شود (به‌عنوان مثال، $h_{\text{SiO}_2} = 50\text{nm}$)، قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر به سمت ضریب شکست لایه SiO_2 میل می‌کند و هرچه ضخامت لایه SiO_2 را نازک‌تر کنیم (به‌عنوان مثال، $h_{\text{SiO}_2} = 10\text{nm}$) قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر به سمت ضریب شکست لایه Si میل می‌کند و ضریب شکست لایه Si غالب خواهد بود. پس، با افزایش ضخامت لایه SiO_2 ضریب شکست مؤثر کاهش می‌یابد. طول انتشار موج‌بر پیشنهادی رای ضخامت‌های مختلف لایه SiO_2 در شکل ۴-ب نشان داده شده است.



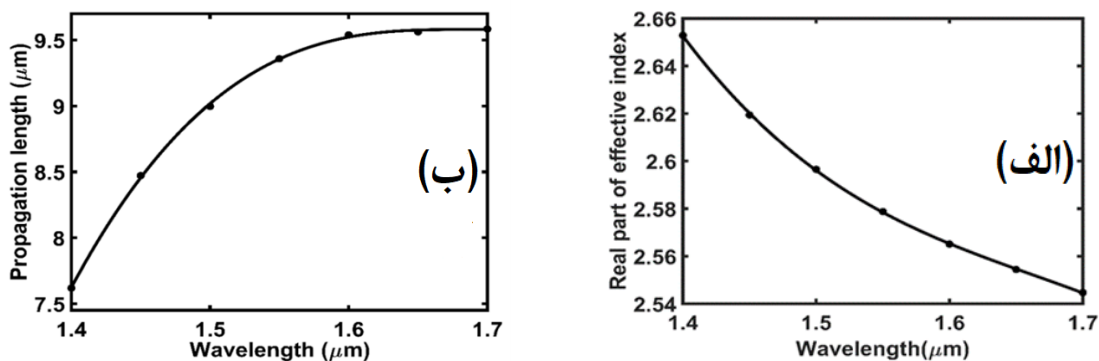
طول انتشار تقریباً یک رابطه خطی با ضخامت لایه SiO_2 در پهنای موج‌برهای بزرگ‌تر از ۲۰۰ نانومتر را دارد. ماکزیمم طول انتشار ۱۵/۵ میکرومتر برای $h_{\text{SiO}_2}=50\text{nm}$ به دست می‌آید. دلیل افزایش طول انتشار در لایه SiO_2 با ضخامت‌های بیشتر این است که نفوذ نور به داخل لایه نقره کاهش می‌یابد و باعث افزایش طول انتشار می‌گردد.

ضخامت نقره (h_{Ag}) نیز همان‌طور که در شکل ۵-الف نشان داده شده است از ۲۰ نانومتر تا ۲۰۰ نانومتر تغییر داده‌ایم تا تاثیر آن را بر قسمت حقیقی ضریب شکست بررسی کنیم. بخش حقیقی ضریب شکست مؤثر با افزایش ضخامت لایه نقره به صورت نمایی کاهش می‌یابد یعنی تحدید نور در لایه موج‌بری کاهش می‌یابد. عمق نفوذ میدان نوری معادل (که به بنا بر تعریف معادل است با $[\lambda/2\pi\text{Im}[n_{\text{Ag}}]]$)، در نقره بیش از ۲۰ نانومتر در طول موج ۱۵۵۰ نانومتر است [۲۷]، به همین دلیل ضخامت لایه نقره در همه محاسبات بیشتر از ۲۰ نانومتر (یعنی ۵۰ نانومتر) در نظر گرفته شده است. شکل ۵-ب طول انتشار را بر حسب ضخامت لایه نقره نشان می‌دهد. تغییرات طول انتشار برای ضخامت نقره بزرگ‌تر از ۱۰۰ نانومتر بسیار جزئی می‌باشد به گونه‌ای که با افزایش ضخامت نقره از ۵۰ نانومتر تا ۱۰۰ نانومتر، طول انتشار فقط حدود ۱ میکرومتر افزایش و قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر نیز به مقدار جزئی کاهش می‌یابد. به همین دلیل در شبیه‌سازی‌ها ضخامت نقره را ۵۰ نانومتر در نظر گرفته‌ایم.



شکل (۵): تأثیر ضخامت نقره بر ضریب شکست مؤثر. (الف) قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر و (ب) طول انتشار.

شکل ۶ ضریب شکست مؤثر را بر حسب طول موج برای موج‌بر پیشنهادی با ضخامت لایه هدایت‌کننده ۲۰ نانومتر و عرض پهنای پشته ۲۰۰ نانومتر در طول موج ۱/۷ - ۱/۴ میکرومتر ترسیم می‌کند. همان‌طور که مشهود است، بخش حقیقی شاخص مؤثر از ۲/۶۵ به ۲/۵۴ کاهش می‌یابد، در حالی که طول انتشار از ۷/۶ میکرومتر به ۹/۶ میکرومتر افزایش یافته است. دلیل کاهش قسمت حقیقی ضریب شکست مؤثر به دلیل کاهش ضریب شکست لایه موج‌بری SiO_2 و دلیل افزایش طول انتشار، افزایش قسمت موهومی ضریب شکست لایه‌های نقره با افزایش طول موج می‌باشد.



شکل (۶): (الف) بخش حقیقی از شاخص مؤثر و (ب) طول انتشار نسبت به طول موج

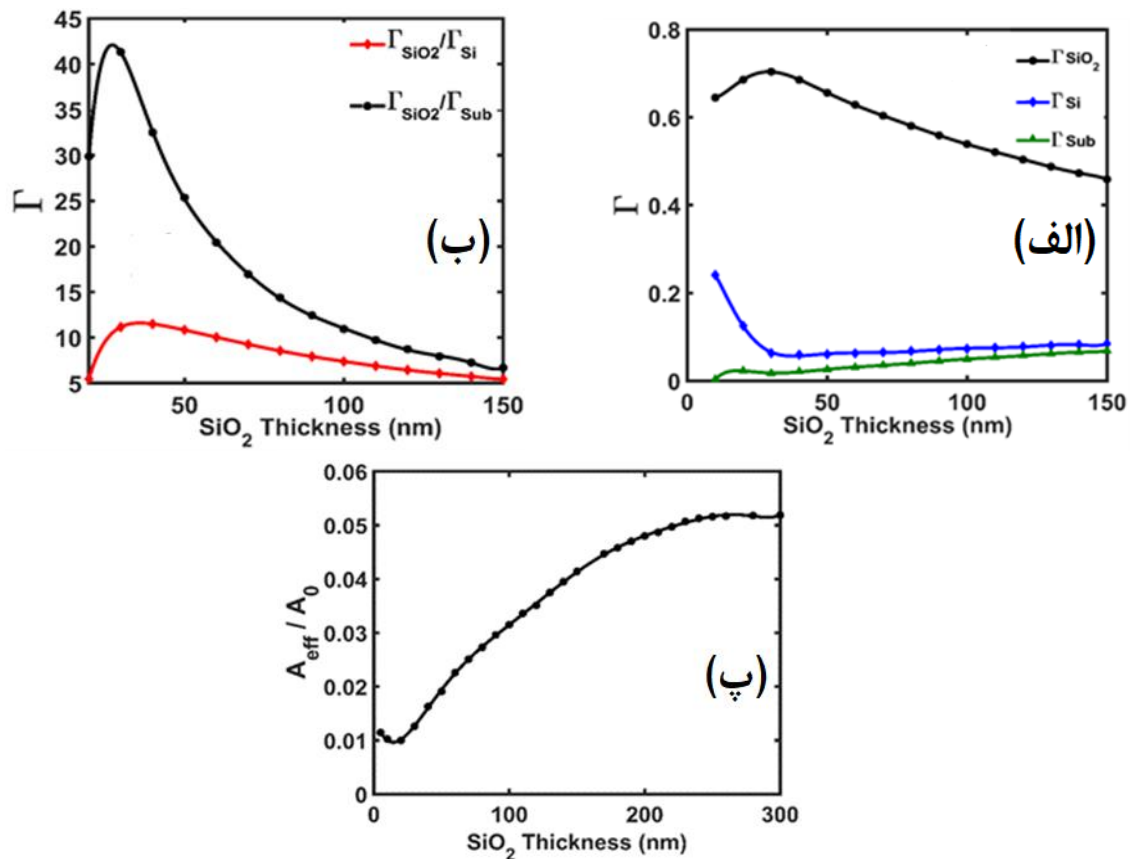
مزیت اصلی موج‌برهای پلاسمونیک، ضریب تحدید بالا Γ_{int} و مود مؤثر A_{eff} کم است که به صورت زیر تعریف شده است [۲۸، ۲۹]:



$$\Gamma_{\text{int}} = \frac{\int_{A_{\text{int}}} p(x,y) dA}{\int_{\text{tot}} p(x,y) dA} \quad (1)$$

$$A_{\text{eff}} = \frac{1}{\max\{p(x,y)\}} \int_A p(x,y) dA \quad (2)$$

که در آن، $P(x,y)$ اندازه بردار مود اصلی است. ضریب تحدید برای لایه هدایت‌کننده SiO_2 ، لایه Si و زیر لایه SiO_2 در شکل ۷-الف نشان داده شده است. حداکثر توان نوری ۷۰ درصد، در لایه هدایت‌کننده SiO_2 با ضخامت حدود ۲۰ نانومتر، متمرکز شده است. در حالی که، توان نوری به حدود ۵ درصد در لایه Si می‌رسد. شکل ۷-ب نسبت ضریب تحدید لایه هدایت‌کننده SiO_2 به ضریب تحدید لایه Si و زیر لایه SiO_2 را نشان می‌دهد. همانطور که در این شکل دیده می‌شود برای ضخامت لایه موجبری SiO_2 حدود ۲۰ نانومتر، حداکثر مقدار تحدید را خواهیم داشت. ناحیه مود مؤثر هنجار شده (هنجار شده به $A_0 = (\lambda/2)^2$) در شکل ۷-پ نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که ناحیه مود مؤثر هنجار شده دارای حداقل مقدار ۰/۰۱ برای ضخامت لایه SiO_2 حدودی ۲۰ نانومتر است.



شکل (۷): (الف) ضریب تحدید لایه هدایت‌کننده SiO_2 ، لایه Si و لایه زیر لایه SiO_2 ، (ب) نسبت ضریب تحدید لایه هدایت‌کننده SiO_2 به ضریب تحدید لایه Si و زیر لایه SiO_2 و (پ) ناحیه مود مؤثر هنجار شده بر حسب ضخامت لایه هدایت‌کننده SiO_2

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله، یک موجبر MIM پلاسمونیکی نواری عمودی جدیدی بر روی ساختار SOI، برای بهبود ضریب تحدید و ناحیه مود مؤثر مطالعه شد. فرآیند ساخت موجبر پیشنهادی، ساده و سازگار با فناوری CMOS است. با استفاده از روش عناصر محدود، ابتدا توزیع میدان نوری در داخل هندسه موجبر و سپس ضریب شکست مؤثر محاسبه شد. تأثیر چندین پارامتر از جمله ضخامت لایه موجبری SiO_2 ،



لایه‌های پوششی نقره، پهنای موج بر و طول موج موج بر روی ضریب شکست مؤثر (بخش‌های حقیقی و موهومی) مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت، دو پارامتر ضریب تحدید و ناحیه مود مؤثر برای ساختار موج بر پیشنهادی محاسبه گردید که نسبت به موج‌برهای پلاسمونیک MIM مرسوم افقی قابل مقایسه بوده و بهبودی قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهند. این ادوات برای انواع کاربردهای پلاسمونیک با تمرکز در ابعاد نانو در دو بعد افقی و عمودی، از جمله میکروسکوپ میدان نزدیک، بسیار مفید خواهند بود.

سپاسگزاری

از آقای عماد رجبعلی زاده برای کمک‌های شایانی که در محاسبات و ارتقای مقاله داشتند، تشکر و قدردانی می‌کنیم.

مراجع

- [1] S. A. Maier and H. A. Atwater, "Plasmonics: Localization and guiding of electromagnetic energy in metal/dielectric structures," *J. Appl. Phys.*, vol. 98, no. 1, p. 10, 2005, doi: 10.1063/1.1951057.
- [2] S. A. Maier *et al.*, "Local detection of electromagnetic energy transport below the diffraction limit in metal nanoparticle plasmon waveguides," *Nat. Mater.*, vol. 2, no. 4, pp. 229–232, 2003, doi: 10.1038/nmat852.
- [3] E. Feigenbaum and M. Orenstein, "Modeling of complementary (void) plasmon waveguiding," *J. Light. Technol.*, vol. 25, no. 9, pp. 2547–2562, 2007, doi: 10.1109/JLT.2007.903558.
- [4] M. S. Tame, K. R. Mcenery, Ş. K. Özdemir, J. Lee, S. A. Maier, and M. S. Kim, "quantum plasmonics" *Nat. Phys.*, vol. 9, no. 6, pp. 1–55, 2013.
- [5] S. A. Maier *et al.*, "Plasmonics—a route to nanoscale optical devices," *Adv. Mater.*, vol. 13, no. 19, pp. 1501–1505, 2001, doi: 10.1002/adma.200390134.
- [6] H. Yan *et al.*, "Tunable infrared plasmonic devices using graphene/insulator stacks," *Nat. Nanotechnol.*, vol. 7, no. 5, pp. 330–334, 2012, doi: 10.1038/NNANO.2012.59.
- [7] I. Malkiel *et al.*, "Deep learning for the design of photonic structures," *Nat. Photonics*, pp. 1–14, 2020, doi: 10.1038/s41566-020-0685-y.
- [8] H. Mathuriya, R. Zafar, and G. Singh, "Plasmonic Grating-Based Refractive Index Sensor with High Sensitivity," *IETE J. Res.*, no. May, pp. 1–7, 2021, doi: 10.1080/03772063.2021.1925600.
- [9] M. Khorshidi, G. Dadashzadeh, and S. Zafari, "Periodic Metallic Stepped Slits for Entire Transmission of Optical Wave and Efficient Transmission of Terahertz Wave," *IETE J. Res.*, vol. 68, no. 3, pp. 1–10, 2019, doi: 10.1080/03772063.2019.1689187.
- [10] R. Zia, M. D. Selker, P. B. Catrysse, and M. L. Brongersma, "Geometries and materials for subwavelength surface plasmon modes," *JOSA A*, vol. 21, no. 12, pp. 2442–2446, 2004.
- [11] V. Shaidiuk, S. G. Menabde, and N. Park, "Effect of structural asymmetry on three layer plasmonic waveguide properties," *JOSA B*, vol. 33, no. 5, pp. 963–970, 2016, doi: 10.1364/JOSAB.33.000963.
- [12] P. Lalanne, S. Coudert, G. Duchateau, S. Dilhaire, and K. Vynck, "Structural slow waves: parallels between photonic crystals and plasmonic waveguides," *ACS photonics*, vol. 6, no. 1, pp. 4–17, 2018, doi: 10.1021/acsp Photonics.8b01337.
- [13] Q. Li and M. Qiu, "Structurally-tolerant vertical directional coupling between metal-insulator-metal plasmonic waveguide and silicon dielectric waveguide," *Opt. Express*, vol. 18, no. 15, pp. 15531–15543, 2010, doi: 10.1364/oe.18.015531
- [14] M. Nikoufard, M. K. Alamouti, and S. Pourgholi, "Multimode interference power-splitter using InP-based deeply etched hybrid plasmonic waveguide," *IEEE Trans. Nanotechnol.*, vol. 16, no. 3, pp. 477–483, 2017, doi: 10.1109/TNANO.2017.2688397.
- [15] J. A. Dionne, L. A. Sweatlock, H. A. Atwater, and A. Polman, "Plasmon slot waveguides: Towards chip-scale propagation with subwavelength-scale localization," *Physical Review B*, vol. 73, no. 3, p. 035407, 2006, , doi: 10.1103/PhysRevB.73.035407.



- [16] N.-N. Feng, M. L. Brongersma, and L. Dal Negro, "Metal–dielectric slot-waveguide structures for the propagation of surface plasmon polaritons at 1550nm," *IEEE J. Quantum Electron*, vol. 43, no. 6, pp. 479-485, 2007, doi: 10.1109/JQE.2007.897913.
- [17] G. Veronis and S. Fan, "Modes of subwavelength plasmonic slot waveguides," *J. Light. Technol.*, vol. 25, no. 9, pp. 2511-2521, 2007, doi: 10.1109/JLT.2007.903544.
- [18] L. Chen, J. Shakya, and M. Lipson, "Subwavelength confinement in an integrated metal slot waveguide on silicon," *Optics letters*, vol. 31, no. 14, pp. 2133-2135, 2006, doi: 0146-9592/06/142133-3.
- [19] M. L. Brongersma *et al.*, "Metal-dielectric-metal plasmonic waveguide devices for manipulating light at the nanoscale," *Chinese Opt. Lett.*, vol. 7, no. 4, pp. 302–308, 2009, doi: 10.3788/COL20090704.0302.1
- [20] S. I. Bozhevolnyi, V. S. Volkov, E. Devaux, J.-Y. Laluet, and T. W. Ebbesen, "Channel plasmon subwavelength waveguide components including interferometers and ring resonators," *Nature*, vol. 440, no. 7083, pp. 508-511, 2006, doi: 10.1038/nature04594.
- [21] Y. Fu, X. Hu, C. Lu, S. Yue, H. Yang, and Q. Gong, "All-optical logic gates based on nanoscale plasmonic slot waveguides," *Nano lett.*, vol. 12, no. 11, pp. 5784-5790, 2012, doi: 10.1021/nl303095s.
- [22] I. D. Rukhlenko, A. Pannipitiya, and M. Premaratne, "Dispersion relation for surface plasmon polaritons in metal/nonlinear-dielectric/metal slot waveguides," *Optics letters*, vol. 36, no. 17, pp. 3374-3376, 2011, doi: 10.1364/ol.36.003374.
- [23] J. A. Dionne, H. J. Lezec, and H. A. Atwater, "Highly confined photon transport in subwavelength metallic slot waveguides," *Nano lett.*, vol. 6, no. 9, pp. 1928-1932, 2006, doi: 10.1021/nl0610477.
- [24] H. Choo *et al.*, "Nanofocusing in a metal–insulator–metal gap plasmon waveguide with a three-dimensional linear taper," *Nat. Photonics*, vol. 6, no. 12, pp. 838-844, 2012, doi: 10.1038/NPHOTON.2012.277.
- [25] K. Wongpanya, T. Kasaya, H. T. Miyazaki, H. Oosato, Y. Sugimoto, and W. Pijitrojana, "Mass-productive fabrication of a metal–insulator–metal plasmon waveguide with a linear taper for nanofocusing," *Appl. Phys B*, vol. 122, no. 9, pp. 1-7, 2016, doi: 10.1007/s00340-016-6515-8.
- [26] M. Saad-Bin-Alam, M. I. Khalil, A. Rahman, and A. M. Chowdhury, "Hybrid plasmonic waveguide fed broadband nanoantenna for nanophotonic applications," *IEEE Photonics Technol Lett.*, vol. 27, no. 10, pp. 1092-1095, 2015, doi: 10.1109/LPT.2015.2407867.
- [27] M. Nikoufard, A. Nourmohammadi, and S. Esmaeili, "Hybrid plasmonic nanoantenna with the capability of monolithic integration with laser and photodetector on InP substrate," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 66, no. 1, pp. 3-8, 2018, doi: 10.1109/TAP.2017.2767623.
- [28] C. Koos, L. Jacome, and C. Poulton, "Nonlinear silicon-on-insulator waveguides for all-optical signal processing," *Opt. Express*, vol. 15, no. 10, pp. 5976–5990, 2007.
- [29] J. T. Robinson, K. Preston, O. Painter, and M. Lipson, "First-principle derivation of gain in high-index-contrast waveguides," *Opt. Express*, vol. 16, no. 21, pp. 16659-16669, 2008.