بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

موجبر پلاسمونی پیوندی با طول انتشار زیاد

محسن کافی نوغان[۱]، میرمجتبی میر صالحی[۲]

[۱]گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، mohsen.kafi@stu.um.ac.ir
[۲]گروه برق دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد، mirsalehi@ um.ac.ir

چکیده – یکی از محدودیت های اصلی موجبرهای پلاسمونی، طول انتشار کوتاه آن هاست. با وجود معرفی ساختارهای پیوندی برای رفع این محدودیت هنوز طول انتشار در حدود چند ده میکرومتر است. هدف از این مقاله بررسی و انتخاب مواد مناسب به منظور افزایش بیشتر طول انتشار در موجبرهای پلاسمونی پیوندی است. برای این منظور، تأثیر استفاده از مواد دی الکتریک Si_3N_4 ، Nb_2O_5 و TiO_2 و فلزات Al ، Ag و Au در عملکرد موجبر مورد بررسی قرارگرفته است. نتایج به دست آمده نشان می دهد انتخاب مناسب مواد، تأثیر زیادی در افزایش طول انتشار این موجبرها دارد. طبق نتایج شبیه سازی با استفاده از ساختار $Ag\text{-}SiO_2\text{-}Si_3N_4$ طول انتشار در طول موج ۱/۵۵ میکرومتر را می توان به بیش از ۴ میلیمتر افزایش داد.

کلید واژه- پلاسمونهای سطحی، طول انتشار، موجبر پلاسمونی پیوندی

Hybrid plasmonic waveguide with long propagation length

M. Kafi[1], M. M. Mirsalehi[2]

[1]Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, mohsen.kafi@stu.um.ac.ir
[2]Department of Electrical Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, Iran, mirsalehi@um.ac.ir

Abstract- One of the major restrictions of plasmonic waveguides is their short propagation lengths. Although hybrid structures have been introduced to overcome this problem, the propagation length has not exceeded tens of micrometers. The purpose of this paper is to investigate and select suitable materials in order to increase the propagation lengths of hybrid plasmonic waveguides further. To achieve this goal, the effects of using Si_3N_4, Nb_2O_5, and TiO_2 dielectric materials and Al, Ag, and Au metals on characteristics of waveguides have been investigated. The numerical results show that proper selection of materials has significant effect on increasing the propagation lengths of these waveguides. According to the simulation results, using an $Ag\text{-}SiO_2\text{-}Si_3N_4$ structure, the propagation length can be increased to more than 4mm at the wavelength of 1.55 micrometers.

Keywords: hybrid plasmonic waveguide, propagation length, surface plasmon

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-06]

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

۱- مقدمه

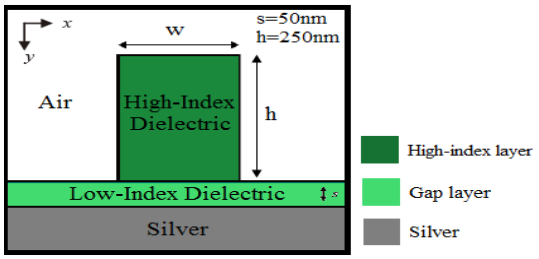
در سالهای اخیر پلاسمونیک با هدف توسعه نسل جدیدی از مدارهای مجتمع در مقیاس نانو که قادر به پردازش اطلاعات با پهنای باند زیاد می‌باشند، موضوع اصلی بسیاری از پژوهش‌ها بوده است [۱]. از طرفی ایجاد محدودیت بر امواج الکترومغناطیسی و غلبه بر محدودیت پراش نور در ابعاد زیر طول موجی از اهمیت بالایی برخوردار است. بنابراین به منظور تحقق دستیابی به مدارهای مجتمع نوری، نیازمند موجبرهایی با قابلیت انتقال نور در ابعاد نانو و غلبه بر محدودیت پراش نور خواهیم بود [۲]. چالش معمول ایجاد شده در چنین ساختارهای موجبری، ایجاد مصالحه ای بین محدودیت قوی میدان نوری و دستیابی به طول انتشار مناسب است. موجبرهای پلاسمونی پیوندی به عنوان یکی از ساختار های مورد نظر جهت تحقق موجبرهایی با طول انتشار زیاد به شمار می روند [۳].

ساختار موجبرهای پلاسمونی پیوندی متشکل از لایه ای با ضریب دی الکتریک نسبی پایین می باشد که در میان یک سطح فلزی و لایه ای با ضریب دی الکتریک نسبی بالا قرار گرفته است. تزویج میان مدهای پلاسمونی حاصل از تحریک پلاسمون های سطحی در مرز میان فلز-دی الکتریک و مدهای موجبر دی الکتریک سبب انتشار مدهای ترکیبی در ناحیه شکاف با ضریب دی الکتریک نسبی پایین می شود [۴]. یکی از پارامترهای مهم جهت بررسی عملکرد موجبرهای پلاسمونی پیوندی طول انتشار مدهای هدایت شده بوده که علاوه بر هندسه و ابعاد ساختار، خواص مواد مورد استفاده در هر یک از لایه های موجبر نیز در مقدار آن تاثیر گذار خواهد بود.

در این مقاله به بررسی تاثیر تغییر ضریب دی الکتریک مواد بکار رفته در هر یک از لایه های ساختار موجبر پلاسمونی پیوندی بر طول انتشار مدهای هدایت شده میپردازیم، و با توجه به نتایج شبیه سازی بدست آمده شرایط دستیابی به بیشترین طول انتشار ممکن را بررسی می کنیم.

۲- تاثیر تغییر ضریب شکست بر طول انتشار

شکل ۱ ساختار یک موجبر پلاسمونی پیوندی را نشان می دهد [۵]. در این ساختار لایه شکاف با ضریب شکست کم بر روی یک لایه فلزی قرار گرفته و در بالای آن لایه ای با ضریب شکست زیاد قرار گرفته است. در ابتدا به منظور بررسی تاثیر ضریب دی الکتریک لایه شکاف بر طول انتشار مدهای هدایت شده لایه دی الکتریک با ضریب شکست بالا را از جنس سیلیکون (Si) و با ضریب شکست ۳/۴۸ و لایه فلزی را از جنس نقره (Ag) با ضریب شکست ۰/۱۴۴-j۱۱/۳۶۶ در نظر می گیریم [۶].



شکل ۱: ساختار موجبر ترکیبی پلاسمونی [۵].

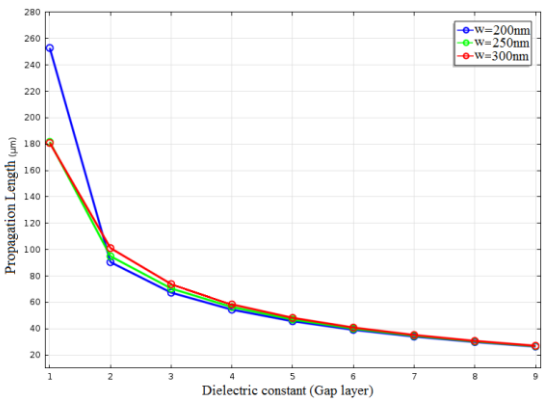
لازم به ذکر است که ضریب شکست نقره با استفاده از مدل درود طبق رابطه (۱) محاسبه شده است.

$$\varepsilon(\omega) \cong 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + i\gamma\omega} \qquad (۱)$$

در این رابطه، ω_p فرکانس پلاسما و γ ضریب میرایی فلز است [۷]. محاسبات برای طول موج ۱/۵۵ µm انجام شده است. همچنین در محاسبات طول انتشار بصورت فاصله ای که در آن توان به 1/e مقدار اولیه خود می رسد تعریف شده و با استفاده از رابطه (۲) به دست می آید [۷]:

$$L_p = \frac{1}{2\,\mathrm{Im}[\beta]} \qquad (۲)$$

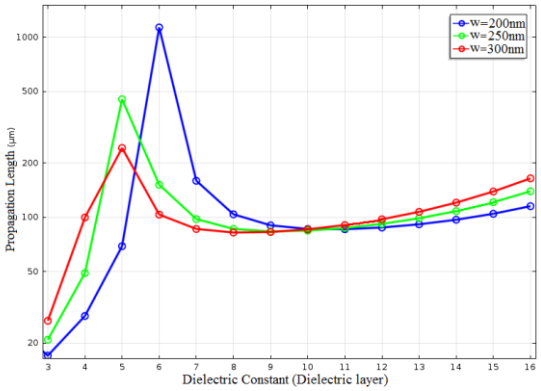
در این رابطه، β ثابت انتشار است.



شکل۲: نمودار مقادیر طول انتشار بر حسب تغییرات ضریب شکست ماده لایه شکاف.

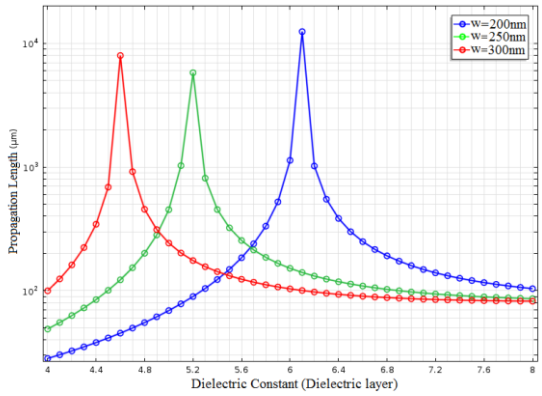
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-06]

در مرحله دوم به منظور بررسی تغییرات ضریب شکست لایه با ضریب شکست بالاتر در ساختار شکل ۱ لایه شکاف را از جنس سیلیکا (SiO_2) با ضریب شکست ۱/۴۴ و لایه فلزی را از جنس نقره (Ag) با ضریب شکست ۰/۱۴۴-j۱۱/۳۶۶ در نظر می گیریم. شکل ۳ مقادیر طول انتشار بدست آمده بر حسب تغییرات ضریب شکست ماده با ضریب شکست بالا را نشان می دهد.



شکل ۳: نمودار مقادیر طول انتشار بر حسب ضریب شکست.

نتایج بدست آمده در شکل های ۲ و ۳ نشان می دهد در لایه شکاف افزایش ضریب شکست ماده سبب کاهش طول انتشار می شود، همچنین در لایه دی الکتریک طول انتشار وابسته به عرض موجبر بوده و با افزایش ضریب شکست ماده در ابتدا افزایش و سپس کاهش می یابد. به منظور بررسی دقیق تر تغییرات طول انتشار در حالتی که ضریب شکست ماده در لایه دی الکتریک در حال افزایش است، نمودار شکل ۳ بصورت دقیق تر در بازه تغییرات $۴ < \varepsilon < ۸$ در شکل ۴ نشان داده شده است.



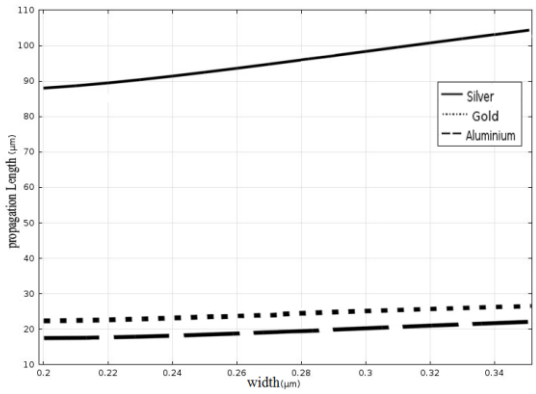
شکل ۴: نمودار مقادیر طول انتشار بر حسب ضریب شکست.

۲-۱- تاثیر تغییر لایه فلزی بر طول انتشار

بکارگیری فلزات مختلف در ساختار موجبر ترکیبی پلاسمونی با توجه به مقادیر مختلط ضریب شکست آنها از دیگر عوامل موثر بر پارامتر طول انتشار موجبر می باشد. در شکل ۴ مقادیر طول انتشار برای فلزات نقره، آلومینیوم و طلا در صورتی که جنس لایه شکاف سیلیکا و لایه دی الکتریک سیلیکون در نظر گرفته شود، نشان داده شده است. در جدول ۱ ضرایب شکست فلزات بکار رفته در ساختار موجبر آمده است.

جدول ۱: مقادیر ضریب شکست فلزات با استفاده از مدل درود در طول موج ۱۵۵۰nm [۷]

فلز	ضریب شکست
طلا	۰/۵۲۴-j۱۰/۷۴۲
نقره	۰/۱۴۴-j۱۱/۳۶۶
آلومینیوم	۱/۵۱۴-j۱۵/۲۳۴



شکل ۵: مقادیر طول انتشار موجبر ترکیبی پلاسمونی برای فلزات آلومینیوم، طلا و نقره.

نتایج بدست آمده در شکل ۴ نشان می دهد طول انتشار بدست آمده برای فلز نقره به مراتب نسبت به فلز طلا و آلومینیوم بهتر است.

۳- نتایج شبیه سازی

با توجه به نتایج بدست آمده در قسمت قبل می توان با انتخاب مواد مناسب در ساختار موجبر طول انتشار را به میزان قابل توجهی افزایش داد. در جدول ۳ نتایج بدست آمده برای طول انتشار در ساختارهای نقره–سیلیکا–سیلیکون، نقره-سیلیکا-تیتانیوم دی اکسید (TiO_2) و نقره-سیلیکا-سیلیکون نیترید (Si_3N_4) برای عرض موجبر

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-06]

۲۰۰nm و ساختارهای نقره-سیلیکا-سیلیکون، نقره-سیلیکا-تیتانیوم دی اکسید (TiO_2) و نقره-سیلیکا-نیوبیوم پنتااکسید (Nb_2O_5) برای عرض موجبر ۲۵۰nm و نتایج ارائه شده در مرجع [۵] با ساختار آلومینیوم-سیلیکا-سیلیکون آمده است.

جدول ۲: مقادیر ضریب شکست موادر طول موج ۱۵۵۰nm [۷]

مواد	ضریب شکست
Nb_2O_5	۲/۲۳۶
Si_3N_4	۲/۴۶
TiO_2	۲/۴۳

جدول ۳: مقایسه نتایج شبیه سازی انجام شده و نتایج ارائه شده در مرجع [۵] برای طول انتشار موجبر

ساختار موجبر	عرض موجبر w(nm)	طول انتشار L_p (μm)
Al-SiO_2-Si [5]	۲۰۰	۱۸/۹
Ag-SiO_2-Si	۲۰۰	۸۸
Ag-SiO_2- TiO_2	۲۰۰	۵۸۳/۱
Ag-SiO_2- Si_3N_4	۲۰۰	۴۱۴۹/۱
Al-SiO_2-Si [5]	۲۵۰	۱۹/۵
Ag-SiO_2-Si	۲۵۰	۹۲/۵
Ag-SiO_2- TiO_2	۲۵۰	۱۶۳/۲
Ag-SiO_2- Nb_2O_5	۲۵۰	۴۴۹/۸

نتایج بدست آمده در جدول فوق نشان می دهد استفاده از فلز نقره به جای آلومینیوم سبب افزایش زیاد طول انتشار می شود. علاوه بر این با توجه به نمودار شکل ۴ انتخاب صحیح ماده مورد نظر در لایه دی الکتریک با توجه به عرض موجبر در افزایش طول انتشار آن موثر خواهد بود. البته باید به این نکته توجه نمود که همواره میان طول انتشار و محدودیت میدان مصالحه ای وجود دارد. در این صورت افزایش طول انتشار باعث کاهش محدودیت میدان خواهد شد.

۴- نتیجه‌گیری

دراین مقاله تاثیر تغییر ضریب دی الکتریک نسبی مواد بکار رفته در ساختار موجبر پلاسمونی بر طول انتشار مدهای هدایت شده مورد بررسی قرار گرفت. نتایج بدست آمده نشان داد انتخاب صحیح مواد با توجه به ابعاد هندسه موجبر می تواند باعث افزایش زیاد طول انتشار موجبر گردد. با توجه به نتایج شبیه سازی های انجام شده مقادیر طول انتشار با توجه به ابعاد موجبر و مواد مورد استفاده می تواند در محدوده ۱۰μm تا چند میلیمتر بدست آید.

مراجع

[1] M. Z. Alam, J. Meier, J. S. Aitchison, and M. Mojahedi, *Propagation characteristics of hybrid modes supported by metal-low-high index waveguides and bends*, **Opt. Express**, vol. 18, pp.12971–12979, 2010.

[2] Q. Huang, F. Bao, and S. He, *Nonlocal effects in a hybrid plasmonic waveguide for nanoscale confinement*, **Opt. Express**, vol. 21, pp.1430–1439, 2013.

[3] D. Dai and S. He, *Low-loss hybrid plasmonic waveguide with double low-index nano-slots*, **Opt. Express**, vol. 18, pp.17958–17966, 2010.

[4] S. Belan, S. Vergeles and P. Vorobev, *Adjustable subwavelength localization in a hybrid plasmonic waveguide*, ***Opt. Express***, vol. 21, pp. 7427–7438, 2013.

[5] M. Nagai, Y. Ishizaka, K. Saitoh, and M. Koshiba, *Propagation length and coupling characteristics of a hybrid plasmonic waveguide with a uniform silica layer*, IEEE Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim (CLEO-PR), vol. 8, pp. 4673-4676, 2013.

[6] Material parameters are extrapolated using data from *http://refractiverndex.info*.

[7] S. A. Maier. *Plasmonics: Fundamentals and Applications*. New York: Springer, 2007.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-06]