بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

آنالیز عددی موجبرهای نوری هیبریدی سیلیکون-پلاسمونی کم اتلاف و موجبرهای فلز –پلاسمونی در ساختارهای شبه مسطح

ماجد اکبری[۱] و ابوالفضل چمن‌مطلق[۲]

[۱] دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

[۲] دانشکده مهندسی برق، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران

چکیده – در این مقاله با استفاده از یک روش عددی یک موجبری سیلیکونی کم اتلاف و موجبرهای فلری در ساختارهای شبه مسطح مورد آنالیز قرار گرفته است. استفاده از سیلیکون به جای فلزات نجیب (طلا و نقره) مزیت بسیار خوب در طراحی موجبرهای نوری است چرا که مقدار تلفات بسیار پایینی در محدوده‌ی مخابراتی (حدود ۱۵۵۰ نانومتر) دارند. نتایج ارائه شده در این مقاله نشان می‌دهد که موجبر سلیکونی دارای ابعاد کوچکتری نسبت به موجبرهای فلزی بوده و به لحاظ محصور کردن موج حدود عملکرد داشته و تلفات انتشار پایین‌تری را دارد.

کلید واژه- پلاسمونی سطحی، تلفات پایین، روش المان محدود، موجبر با ساختار شبیه مسطح، موجبرهای نوری.

Numerical Investigation of Low-Loss Hybrid Silicon Plasmonics Waveguides and Metal Plasmonics waveguides in Quasi-coplanar schemes

Majed Akbari[1], Abolfazl Chamanmotlagh[2]

[1]Reseach assistant, Electrical and Computer engineering Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

[2]Assistant professor Electrical engineering Faculty, Imam Hossien Comprehensive University, Tehran, Iran

Abstract- In this paper, a numerical method has been utilized in order to analyze of Low-Loss Hybrid Silicon Plasmonics Waveguides and Metal Plasmonics waveguides. Using silicon instead of noble metals (e.g. Au and Ag) is an advantage in designing of photonic waveguides due to have low-loss in comparison to noble at telecom bandwidth. The presented results show that the new model has smaller structures and have better performance in the terms mode confinement and propagation loss.

Keywords: Finite element method, Low-loss, Optical waveguide, Quasi-coplanar waveguide, Surface Plasmon

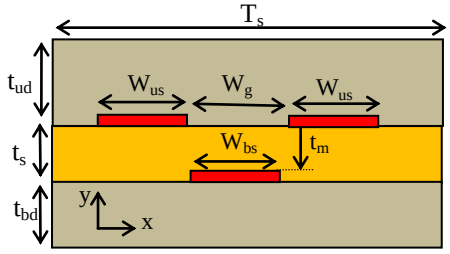
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

۱- مقدمه

امروزه استفاده پلاسمونی سطحی SPP [۱] در به دلیل قابلیت انحصار نور ریز طول موج‌ها، موضوع بسیاری از فعالیت¬ها تحقیقاتی در تجمع نوری با چگالش بالا بوده است. موجبرهای مناسب یک المان ضروری در بحث تجمع بوده و انواع مختلفی از موجبرها برای هدایت موثر نور بر اساس ساختار و جنس آنها ارائه شده است. این ساختارها شامل فاصله¬ی بین ساختارهای فلزی[۱] ، تراشه زنی در نوارهای فلزی [۲-۴]، شکاف فلزی بر لایه¬های دی-الکتریک[۵-۷]، ریزنوارهای فلزی بر روی لایه¬های دی¬الکتریک [۸،۹]، ریزنوارهای دی¬الکتریک بر روی لایه¬های فلزی [۱۰] و ساختارهای چند لایه [۱۱،۱۲] را می¬توان نام برد.

پارامترهای مهم در طراحی یک موجبر پلاسمونی شامل مقدار مد محصور شده، تلفات انتشار و مقدار پراکندگی و تفرق است. همچنین قابلیت استفاده در باند مخابراتی (حدود ۱.۵۵میکرومتر) نیز یک پارامتر مهم دیگری خواهد بود. موجبرهای اشاره شده به لحاظ عملی یا تئوری دارای انحصار بسیار قوی در ۱.۵۵ میکرومتر هستند. هرچند که ایجاد شیارهای عمیق در سطح دی¬الکتریک یک عامل محدود کننده رای آنها محسوب می¬شود. [۵] اما در عمل ساختارهای موجبرهای با ساختار V شکل و ادوات نوری مرتبط با آن در محدوده‌ی انحصار پلاسمونی سطحی و همچنین عمل در باند مخابراتی در عمل به خوبی توانسته اند جوابگو باشند.

در شکل ۱ هندسه‌ی این موجبر نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل نشان داده شده است، فلز وسطی بین دو فلز بالایی قرار گرفته است. به دلیل اینکه به در مباحث مداری به موجبرهای یکپارچه با سه ریز نوار عنوان موجبر مسطح گفته می‌شود، موجبر ارائه شده در شکل ۱ به عنوان موجبر شبه مسطح QCPW[۲] نامیده می‌شود.



شکل۱: هندسه‌ی یک موجبر شبه مسطح QCPW.

در این مقاله یک موجبر نوری بر پایه‌ی پلاسمونی سطحی ارائه می‌شود که مد انحصار آن در محدوده‌ی λ_0^2 است (یعنی اندازه مد کوچکتر از λ_0^2 است که در آن λ_0 طول موج خلا است) و تلفات انتشار بسیار پایینی نیز دارد.

برای مطالعات از یک بسته‌ی نرم‌افزاری که برپایه‌ی روش المان محدود معادلات را برای یافتن ثابت انتشار و نمونه-های مد استفاده می‌شود [۱۳] تحلیل‌های دوبعدی این موجبرها سطح بسیار خوبی را از انحصار نور در محدوده‌ی پهنای باند مخابراتی نشان می‌دهند. لازم به ذکر است که از ضخامت‌های ۵۰ نانومتری برای ریزنوارها استفاده شده است که فرآیند ساخت ساده‌تری دارد. همچنین اندازه کلی موجبر در مقایسه‌ی با موجبرهای بر پایه‌ی شکاف در طول موج ۱.۵۵ میکرومتر کوچکتر است.

در همین راستا، ساختار این مقاله بدین صورت زیر سازماندهی می‌شود که در بخش دوم به معرفی و نحوه‌ی مدلسازی پرداخته می‌شود. نتایج شبیه‌سازی در بخش سوم و در نهایت در بخش چهارم نتیجه‌گیری کلی ارائه شده-است.

۲- شبیه‌سازی و نتایج

در شکل ۱ هندسه‌ی یک موجبر QCPW نشان داده شده است. همانگونه که در این شکل مشخص است،به صورت یک کانال به طور مجازی بین سه فلز به وجود آمده است. دو ریز نوار بالایی توسط دی الکتریک به صورت عمودی از ریز نوار پایینی جدا شده اند. بنابراین این موجبر از دیدگاه ساخت شامل اسلت‌های عمودی و نانوسیم است.

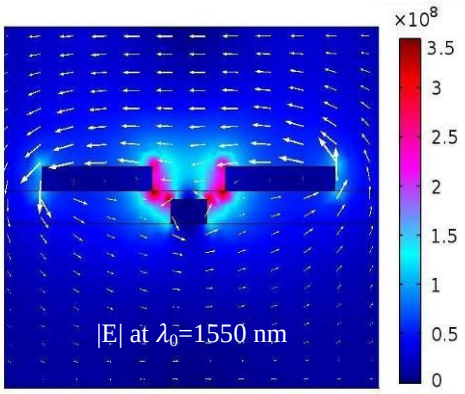
جدول ۱: متغیرهای تحت تاثیر آنالیز مد[۱۳].

name	Description	Expression	complex
β	Propagation constant	imag(-λ)	No
δz	Attenuation constant	real(-λ)	No
δz -dB	Attenuation per meter in dB	20*log10(exp(1))* δz	No
$\mathbf{n_{eff}}$	Effective index	j*λ/k0	Yes

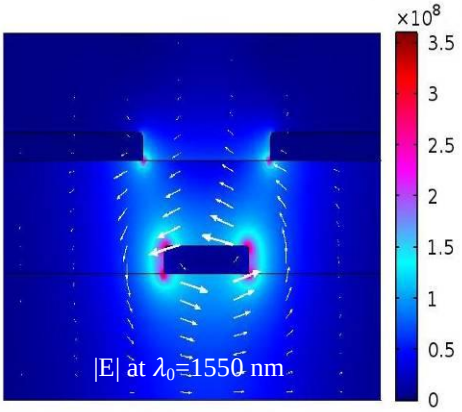
[2] Quasi quplaner waveguide

خ1 Surface plasmon polartion

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]



شکل۲: الف) اندازه میدان الکتریکی |E| در مد اصلی موجبر سیلیکونی QCPW در طول موج λ_0=1550 nm. پیکان‌ها میدان مغناطیسی را نشان می‌دهند.



شکل۳: پروفایل اندازه میدان الکتریکی |E| در مد اصلی موجبر فلزی QCPW در طول موج λ_0=1550 nm. پیکان‌ها میدان مغناطیسی را نشان می‌دهند.

برای مطالعه از یک بسته‌ی نرم افزاری المان محدود در حوزه‌ی فرکانس استفاده شده است که قابلیت حل میدان-های الکترومغناطیسی را در فضای دو بعدی و سه بعدی دارد. برای یافتن مدهای انتشار، از آنالیز مد مرزی[3] (s) استفاده می‌شود که در آن معادلات ماکسول را برای یافتن ثابت‌های انتشار حل می‌کند که برای امواج مسطح و مسائل مد مرزی به کار می‌رود. نمایش معادلات که به صورت هارمونیک زمانی به صورت زیر است:

$$E(r,t) = \mathrm{Re}(\tilde{E}(r_T)e^{j\omega t - j\beta z}) = \mathrm{Re}(\tilde{E}(r)e^{j\omega t - \alpha z}) \quad (۱)$$

در معادله‌ی (۱) پارامتر مکانی $\alpha=\delta_z+j\beta$ دارای قسمت حقیقی و موهومی است. ثابت انتشار برابر با قسمت موهومی

[3]boundary mode analysis

جدول ۲: پارامترهای مرتبط با موجبر شکل ۱.

	t_s (nm)	W_g (nm)	W_{ts} (nm)	W_{bs} (nm)	n_{sup}	n_{spc}	n_{su}
Si	70	300	850	200	1.5	1.4	1
Au	200	300	850	200	1.5	1.4	1

جدول ۳: نتایج خروجی موجبر پلاسمونی سطحی.

	n_{eff}	EM loss	Mode size at -10 dB
Au	1.78	0.2398 (W/μm)	0.0208 (μm^2)
Si	1.94	0.0247 (W/μm)	0.0392(μm^2)

بوده و قسمت حقیقی نیز (δz) مقدار میرایی در جهت انتشار را مشخص می¬کند.

متغیرهایی که توسط آنالیز مد تحت تاثیر قرار می-گیرند در جدول ۱ آمده است که در این جدول λ طول موج و k0 عدد موج در فضای آزاد بوده و مقدار آن برابر با ω/c است که c سرعت نور در خلا است. برای شبیه¬سازی از ریز نوار سیلیکون (Si)و طلا(Au) با ضخامت ۵۰ نانومتر استفاده شده است. سایر پارامترهای مرتبط با موجبر در جدول۲ آمده است. شکل۲ و شکل۳ نتایج شبیه سازی میدان الکتریکی در مد اصلی برای طول موج λ_0=1550 nm را به ترتیب برای سیلیکون و فلز نشان می¬دهند. در این دو شکل به خوبی تزویج بین گوشه¬های ریز نوار پایینی با ریز نواهای بالایی نشان داده شده است. همانگونه که دیده می-شود میدان¬های الکتریکی در جهتy پلاریزه شده¬ است. میدان¬های مغناطیسی هم نیز در جهت x پلاریزه شده¬اند. بنابراین می¬توان گفت که موجبری در مد اصلی خود را به صورت شبه TEM هدایت می‌کند.

در جدول ۳ سایر پارامترهای مرتبط با دو موجبر آورده شده است. نتایج مربوط به اندازه‌ی مد در 10 dB- نشان می‌دهد که شدت میدان الکتریکی 10 dB- بوده در ناحیه 1550 nm از حد λ_0^2 =2.405 (μm^2) کوچکتر است. با استفاده ازتکنیک برازش منحنی می‌توان دید که میدان به صورت $\exp(\pm y/y_0)$ تغییر می‌کند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقدار انحصار موج تا چند صد نانو متر در لایه بالایی و پایینی موجبر پلاسمونی وجود خواهد داشت که مقدار این انحصار ناشی از دو مکانیزم مختلف خواهد بود: اولین مکانیزم به دلیل تزویج میدان‌های راه نزدیک بین ریز نوار بالایی و پایینی بوده که سبب باقی ماندن میدان در بین دو ریز نوار می‌شود. دومین مکانیزم وجود ریز نوار پایینی که به طور غیر مستقیم دو ریز نوار بالایی را به هم ترویج می‌دهد و توازنی را برای انحصار موج به وجود می‌آورد. در واقع مکانیزم اول برای انحصار عمودی و دیگری برای هدایت

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]

موج به کار می‌رود.

در جدول ۳ نتایج مرتبط با تلفات الکترومغناطیسی در دو موجبر ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که سیلیکون دارای تلفات به مراتب کمتری (حدود ۰.۰۱) نسبت به موجبرهای فلزی است. دلیل این امر مقدار پایین قسمت موهومی ضریب دی‌الکتریک سیلیکون نسبت به فلز طلا است.

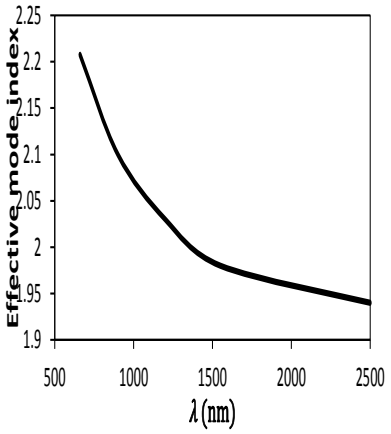
ذکر این نکته ضروری است که پارامترهای انتخاب شده برای طراحی موجبر با استفاده از یک روند بهینه سازی پیدا شده است که در آن مقدار انحصار موج و تلفات به عنوان هدف بررسی در نظر گرفته شده است. یک مقایسه بین پارامترهای دو موجبر در جدول ۲ نشان می‌دهد که موجبرهای بر پایه‌ی سیلیکون دارای ابعاد کوچکتری در مقایسه با موجبر فلزی است که این امر می‌تواند به کوچکتر شدن ابعاد موجبر نیز کمک کند.

در انتها یک آنالیز حساسیت بر اساس طول موج بر روی عملکرد موجبر موجبر سیلیکونی انجام شده است که نتایج آن در شکل ۴ نشان داده شده است. نتایج ارائه شده در این شکل نشان می‌دهد که ۱) در طول موج‌های پایین اندیس موثر موجبر کمی بالاتر بیشتر از ناحیه رادیویی است.

۲) این موجبر در طول موج‌های زیر ۱۰۰۰ نانومتر تلفات بالایی دارد ولی برای طول موج‌های مخابراتی و بالاتر تلفات آن به شدت پایین می‌آید.

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله دو موجبر نوری شبه مسطح به لحاظ مقدار انحصار موج و تلفات با یک روش عددی بر پایه¬ی المان محدود مورد بررسی شد. نتایج نشان داد که موجبرهایی که در آنها به جای فلزات نجیب، از سیلیکون استفاده می‌شود دارای تلفات به مراتب کمتری بوده مقدار انحصار موج بهتری نسبت به ساختار قبلی دارد. همچنین به لحاظ ابعادی نیز کوچکتر بوده که می‌تواند یک مزیت خوبی برای این موجبرها باشد.



شکل4: اندیس موثر بر حسب طول موج. ب) چگالی تلفات الکترومغناطیسی بر حسب طول موج.

مراجع

[1] K. Tanaka and M. Tanaka, "Simulations of nanometric optical circuits based on surface plasmon polariton gap waveguide," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 82, no. 8, pp.1158-1160 (2003).

[2] D. K. Gramotnev and D. F. P. Pile, "Single-mode subwavelength waveguide with channel plasmon-polaritons in triangular grooves on a metal surface," *Appl. Phys. Lett.* vol. 85, no. 26. pp. 6323-6325 (2004).

[3] E. Moreno, F. J. Garcia-Vidal, S. G. Rodrigo, L. Martin-Moreno, and S. I. Bozhevolnyi, "Channel plasmon-polaritons: modal shape, dispersion, and losses," *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 23, pp.3447-3449 (2006).

[4] Y. Satuby and M. Orenstein, "Surface-Plasmon-Polariton modes in deep metallic trenches- measurement and analysis," *Opt. Express*, vol. 15, no. 7, pp.4247-4252 (2007).

[5] 5. G. Veronis and S. Fan, "Guided subwavelength plasmonic mode supported by a slot in a thin metal film," *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 24, pp.3359-3361 (2005).

[6] L. Liu, Z. Han, and S. He, "Novel surface plasmon waveguide for high integration," *Opt. Express*, vol. 13, no. 17, pp.6645-6650 (2005).

[7] L. Chen, J. Shakya, and M. Lipson, "Subwavelength confinement in an integrated metal slot waveguide on silicon" *Opt. Lett.*, vol. 31, no. 14, pp.2133-2135 (2006).

[8] R. Zia, A. Chandran, and M. L. Brongersma, "Dielectric waveguide model for guided surface polaritons" *Opt. Lett.*, vol. 30, no. 12, pp.1473-1475 (2005).

[9] M. Hochberg, T. Baehr-Jones, C. Walker, and A. Scherer, "Integrated plasmon and dielectric waveguides," *Opt. Express*, vol. 12, no. 22, pp.5481-5486 (2004).

[10] B. Steinberger, A. Hohenau, H. Ditlbacher, A. L. Stepanov, A. Drezet, F. R. Aussenegg, A. Leitner, and J. R. Krenn, "Dielectric stripes on gold as surface plasmon waveguides ," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 88, no.9, pp. 4104-4106 (2006).

[11] F. Kusonoki, T. Yotsuya, J. Takahara, and T. Kobayashi, "Propagation properties of guided waves in index-guided two-dimensional optical waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, no. 21, pp. 1101-1103 (2005).

[12] B. Wang and G. P. Wang, "Planar metal heterostructures for nanoplasmonic waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, no.1, pp.3114-3316 (2007).

[13] COMSOL RF Module User's Guide May 2011, COMSOL 4.2.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-06]