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

بررسی موجبر پلاسمونی هیبریدی چندلایه با پلیمر DDMEBT

مجتبی دهقانی فیروزآبادی[۱]، محمود نیکوفرد[۲]، محمدرضا پهلوان شمسی میبدی[۳]

[۱] آموزشکده فنی و حرفه ای امام خمینی (ره) میبد، گروه برق، mojtaba_f84@yahoo.com
[۲] دانشگاه کاشان، دانشکده مهندسی برق کامپیوتر، گروه الکترونیک، mnik@kashanu.ac.ir
[۳] آموزشکده فنی و حرفه ای امام خمینی (ره) میبد، گروه سرامیک، mrpshm@gmail.com

چکیده – موجبرهای پلا سمونی (PW) م ستقل از حد پراش قادر به د ستکاری نور در ساختارهای نانو از طریق پلاریتون پلا سمون سطح (SPP) در مرز فلز- دی الکتریک ه ستند. PW ها برای تولید مدارات مجتمع متراکم فوتونی مورد توجه زیادی قرار گرفته اند. موجبرهای پلا سمونی هیبریدی(HPW) تعادل مطلوبی بین مح صور شدگی و تلفات انت شار ایجاد می کنند. در این مقاله یک موجبر پلاسمونی هیبریدی چندلایه نوین با دی الکتریک DDMEBT ارائه می گردد و ویژگی های مد آن شامل ضریب شکست موثر، طول انت شار (L_P) و م ساحت موثر مد(A_{eff}) به کمک روش عددی اجزاء محدود(FEM) محا سبه می گردد. همچنین عملکرد نوری موجبر پلا سمونی هیبریدی با عدد شای ستگی آن مورد ارزیابی قرار می گیرد. در این موجبر سطح موثر مد در محدوده $0.027\text{-}0.069\mu m^2$ بد ست آمده ا ست. نتایج ن شان می دهد که می توان از چنین ساختارهایی برای ادوات نانو فوتونیک مجتمع شده با تراکم بالا بهره برد.

کلید واژه- ضریب شکست موثر، طول انتشار، عدد شایستگی، مساحت موثر، موجبر پلاسمونی هیبریدی.

Investigation of Hybrid Plasmonic Waveguide with DDMEBT Polymer

Mojtaba Dehghani Firouzabadi[1], Mahmoud Nikoufard [2], Mohammad Reza Pahlavanshamsi [3]

[1]Department of Electrical Engineering, , Imam Khomeini Technical College of Meybod, Yazd, Iran
[2]Department of Electronics, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran
[3]Department of Ceramic Engineering, Imam Khomeini Technical College of Meybod, Yazd, Iran

Abstract- Beyond the diffraction limit, **plasmonic waveguides (PWs)** have the ability to manipulate light at nanoscale structures through surface plasmon polaritons (SPPs) at metal-dielectric interface. Much interest has been paid to PWs because they are promising candidates for developing highly-dense integrated photonic circuits. Hybrid plasmonic waveguides (HPWs) are recent novel type of PWs, which have shown a favorable balance between mode confinement and propagation loss. In this paper a multi-layer HPW including DDMEBT dielectric layer is proposed and it's modal properties such as effective refractive index, propagation length and effective mode area using finite element method (FEM) is calculated. Also performance of HPW is evaluated using figure of merit (FoM). In this waveguide effective mode area is achieved in the range of $0.027\text{-}0.069\mu m^2$. Such waveguides structures can be utilized for ultra-compact nano-photonic devices.

Keywords: Effective refractive index, Effective area, Figure of merit, Hybrid plasmonic waveguide, Propagation length.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-15]

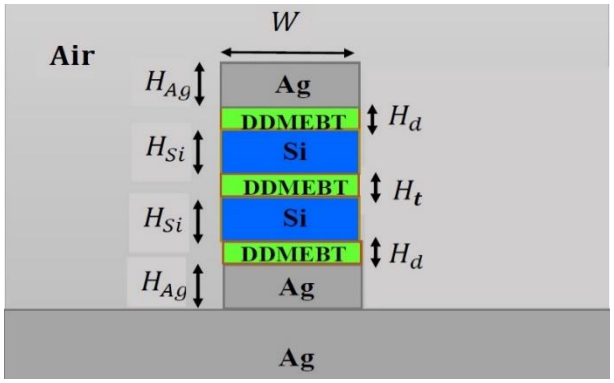
مقدمه

نانو پلاسمونیک حوزه نوینی از علم و فناوری است که این امکان را فراهم می سازد که ویژگی های مهمی از فناوری های فوتونی و الکترونیک با هم ترکیب شوند[۲،۱]. امواج نوری می توانند در ابعاد مقیاس نانو مستقل از حد پراش توسط پلاریتونهای پلاسمون سطح (SPPs) در مرز فلز-دی الکتریک محصور شوند[۲]. موجبرهای پلاسمونی (PW) زیادی نظیر موجبرهای فلز-دی الکتریک-فلز (MIM) و دی الکتریک-فلز-دی الکتریک (IMI) پیشنهاد شده اند[۳،۴]. موجبرهای MIM محصور شدگی بسیار زیاد از خود نشان می دهند در حالیکه موجبرهای IMI طول انتشار بالایی دارند. یکی از چالشهای پیش روی موجبرهای پلاسمونی مصالحه بین تلفات انتشار و محصور شدگی مد می باشد. موجبرهای پلاسمونی هیبریدی(HPW) تعادل خوبی بین تلفات انتشار و محصور شدگی مد ایجاد می کنند و شامل یک لایه دی الکتریک با ضریب شکست کم در ابعاد زیر طول موج که بین لایه فلز و لایه با ضریب شکست بالا واقع شده است. همچنین ساختارهای موجبرهای پلاسمونی هیبریدی چندلایه نیز مورد بررسی قرار گرفته اند.[۵].

در این مقاله یک موجبر پلاسمونی هیبریدی چندلایه با دی الکتریک DDMEBT (2-[4-(dimethylamino)phenyl]-3-f[4-(dimethylamino)phenyl]ethynylgbuta-1,3-diene-1,1,4,4-tetracarbonitrile) با تلفات جذب کم و سازگار با فناوری CMOS ارائه و با استفاده از روش اجزاء محدود (FEM) توسط نرم افزار COMSOL شبیه سازی می گردد. نتایج شبیه سازی نشان می دهد که مد به شدت در HPW پیشنهاد شده محصور می گردد. علاوه بر آن این ساختار موجبر چندلایه کاملا سازگار با فرآیند ساخت نیمه هادی است.

ساختار موجبر چند لایه پیشنهادی

ساختار موجبر HPW چندلایه پیشنهاد شده در شکل ۱ نشان داده شده است. این موجبر از لایه های فلز نقره(Ag) با ضخامت H_{Ag}، نیمه هادی Si با ضخامت H_{Si} و دی الکتریک DDMEBT بین نیمه هادی و فلز و بین دو نیمه



شکل ۱: هندسه موجبر پلاسمونی هیبریدی چندلایه پیشنهادی.

هادی در مرکز موجبر به ترتیب با ضخامتهای H_d و H_t تشکیل شده است. W عرض موجبر می باشد و در تمام شبیه سازی ها برابر 200nm در نظر گرفته شده است. ویژگی مواد و پارامترهای هندسی موجبر HPW چند لایه در طول موج $\lambda = 1550nm$ در جدول ۱ ارائه شده است. جهت شبیه سازی این موجبر از نرم افزار کامسول و روش عددی FEM در طول موج $\lambda = 1550nm$ استفاده شده است.

جدول ۱: ویژگی هندسی و مواد HPW چندلایه پیشنهادی.

ماده	ضخامت	ضریب شکست	مرجع
Ag	$H_{Ag} = 50nm$	$n_{Ag} = 0.14+11.35i$	[۶]
Si	$H_{Si} = 50nm$	$n_{Si} = 3.45$	[۶]
DDMEBT	$H_t = 10nm$ $H_d = 10nm$	$n_D = 1.8$	[۷]

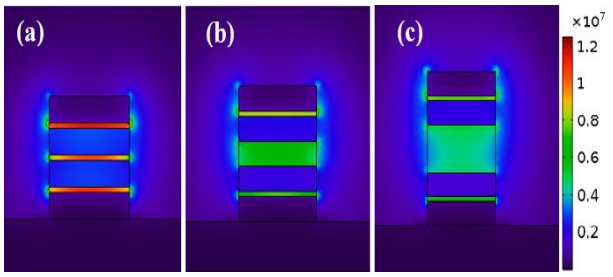
نتایج شبیه سازی و بحث

شکل ۲ توزیع میدان الکتریکی مد اصلی موجبر HPW پیشنهاد شده در شکل ۱ را برای ضخامتهای $H_t = 10nm$،

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-15]

$50nm$ و $100nm$ لایه دی الکتریک DDMEBT مرکز موجبر رانشان می دهد. ابعاد و ضریب شکست سایر لایه ها نیز مطابق داده های جدول ۱ می باشد. همانطوریکه مشاهده می شود محصورشدگی میدان با افزایش ضخامت H_t در این موجبر کاهش می یابد.



شکل ۲: توزیع میدان الکتریکی دو بعدی در لایه های DDMEBT برای ضخامت های مختلف (a) $H_t = 10nm$ (b) $H_t = 50nm$ (c) $H_t = 100nm$ در HPW چندلایه.

به منظور ارزیابی عملکرد و کارآیی این موجبر یک عدد شایستگی (FoM) در مرجع [۸] معرفی شده است که به صورت زیر می باشد:

$$FoM = \frac{L_P}{2\sqrt{\frac{A_{eff}}{\pi}}} \qquad (۱)$$

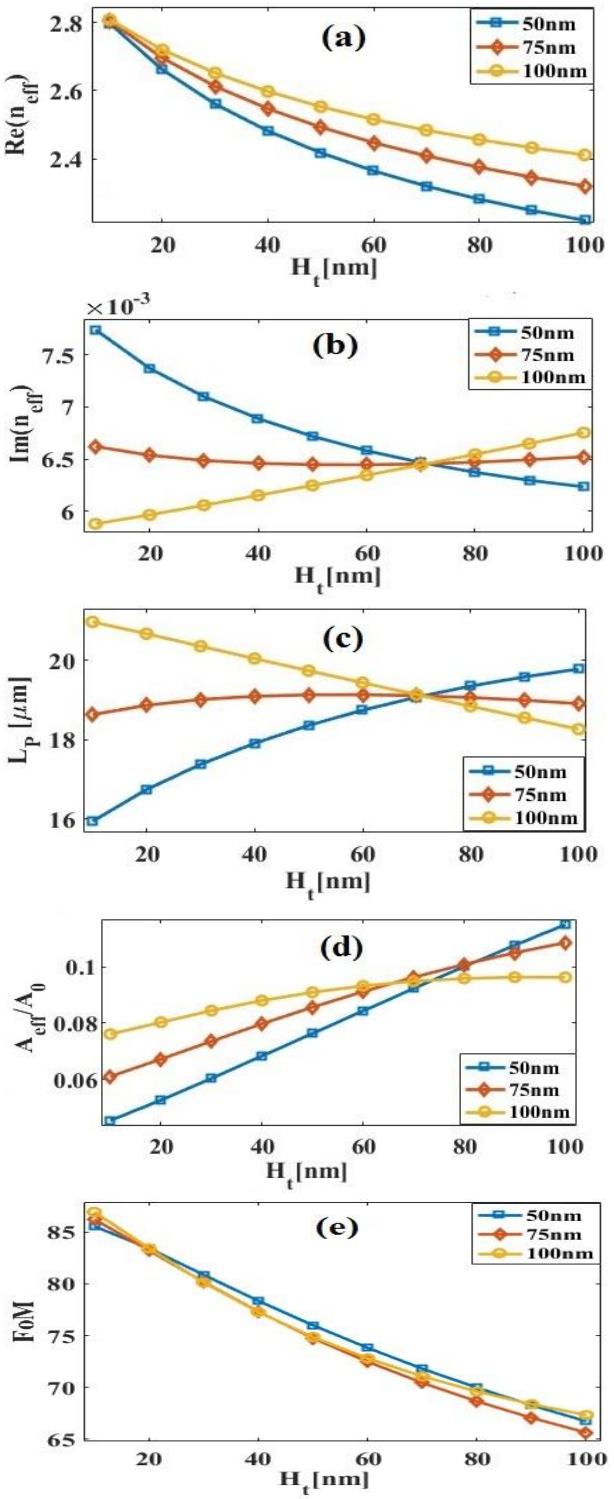
که در آن L_P طول انتشار موجبر می باشد و طبق رابطه زیر بدست می آید:

$$L_P = \frac{\lambda}{4\pi\,\mathrm{Im}(n_{eff})} \qquad (۲)$$

که در آن λ طول موج و $\mathrm{Im}(n_{eff})$ بخش موهومی ضریب شکست موثر مختلط مد موجبر می باشد. همچنین A_{eff} مساحت موثر مد می باشد که طبق رابطه زیر بدست می آید[۸]:

$$A_{\mathrm{eff}} = \frac{|\iint(\mathbf{E}\times\mathbf{H}^*).\hat{z}\,dA|^2}{\iint|(\mathbf{E}\times\mathbf{H}^*).\hat{z}|^2\,dA} \qquad (۳)$$

که در آن E و H به ترتیب میدانهای الکتریکی و مغناطیسی می باشند. جهت شبیه سازی HPW چندلایه با تغییر



شکل ۳: منحنی تغییرات:(a) $\mathrm{Re}(n_{eff})$ ، (b) $\mathrm{Im}(n_{eff})$ ، (c)طول انتشار L_P ، (d)مساحت موثر نرمالیزه شده مد A_{eff}/A_0 که $A_0 = \lambda^2/4$ (e) FoM برحسب H_t با ضخامتهای مختلف $H_{Si} = 10nm$ ، $50nm$ و $100nm$.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-15]

ضخامت لایه DDMEBT مرکز موجبر H_t از 10تا $100nm$ و ثابت بودن ضخامت لایه های DDMEBT بین Ag و Si ($H_d = 10nm$) پارامترهای L_P، A_{eff} و FoM محاسبه شده است. شبیه سازی فوق برای سه ضخامت مختلف لایه Si $H_{Si} = 10nm$، $50nm$ و $100nm$انجام شده است و نتایج آن در شکل ۳ نشان داده شده است. شکل ۳-(a) بخش حقیقی ضریب شکست موثر را نشان می دهد که همانطور که انتظار می رود با افزایش ضخامت لایه DDMEBT وسط با ضریب شکست کم، کاهش می یابد و با افزایش ضخامت لایه های Si با ضریب شکست زیاد، افزایش می یابد. همانطورکه در شکل ۳-(b) مشاهده می شود هنگامی که $H_t \langle 70nm$ است $\mathrm{Im}(n_{eff})$ با کاهش H_{Si} افزایش می یابد، به عبارت دیگر با افزایش H_{Si} تلفات انتشار کاهش می یابد که باعث افزایش طول انتشار می گردد(شکل ۳-(c)). همچنین با توجه به شکل ۳-(d) با افزایش H_{Si} و H_t مساحت موثر نرمالیزه شده $\frac{A_{eff}}{A_0}$ که در آن $A_0 = \frac{\lambda^2}{4}$ می باشد، افزایش می یابد. که بدین معنی است که محصورشدگی میدان کاهش می یابد. کمترین سطح موثر مد محاسبه شده $A_{eff} = 0.027\mu m^2$ می باشد. شکل ۳-(e) منحنی تغییرات FoM برحسب H_t با H_{Si} مختلف را نشان می دهد که با توجه به آن ساختار بهینه شده هنگامی بدست می آید که ابعاد موجبر $W = 200nm$، $H_t = H_d = 10nm$ و $H_{Si} = 100nm$ می باشد. در این حالت $A_{eff} = 0.045\mu m^2$، $L_P = 21\mu m$ و در نتیجه $FoM = 86.9$ محاسبه شده است که با توجه به مقادیر A_{eff} و L_P مصالحه خوبی بین محصورشدگی و تلفات وجود دارد. در این مورد ضریب شکست موثر مد $n_{eff} = 2.809 + 0.0058i$ بدست می آید.

نتیجه‌گیری

در این مقاله یک موجبر پلاسمونی هیبریدی چندلایه ارائه شد که در آن از ماده آلی DDMEBT با ضریب شکست و تلفات جذب کم به عنوان دی الکتریک استفاده شد. سپس به کمک روش عددی FEM ویژگی های مد این موجبر بررسی شد و نتایج نشان داد با افزایش ضخامت دی الکتریک، طول انتشار کاهش و سطح موثر مد افزایش می یابد، افزایش سطح موثر، محصور شدگی را بهبود می بخشد. همچنین با تغییر ضخامت لایه های Si تلفات انتشار کاهش می یابد که با یک عدد شایستگی مناسب برای این موجبر بهینه گردید. حداقل سطح موثر مد $A_{eff} = 0.027\mu m^2$ می باشد که نشان می دهد این موجبر جهت مدارات مجتمع فوتونیک با متراکم و کاربردهای غیرخطی مناسب می باشد.

مرجع‌ها

[1] E. Ozbay, “Plasmonics: Merging Photonics and Electronics at Nanoscale Dimensions,” Science, vol.311, pp. 189-193, 2006.

[2] W. L. Barnes, A. Dereux, and T. W. Ebbesen, “Surface Plasmon subwavelength optics,” Nature, vol.424, pp.824-830 (2003).

[3] N. N. Feng, M. L. Brongersma, and L. D. Negro, “Metal-dielectric slot-waveguide structures for the propagation of surface Plasmon polaritons at 1.55 μm,” IEEE J. Quantum Electron., vol. 43, no. 6, pp.479–485, 2007.

[4] E. P. Fitakis, T. Kamalakis, and T. Sphicopoulos, “Slow light in insulator-metal-insulator plasmonic waveguides,” J. Opt. Am. B, vol. 28, o. 9, pp. 2159-2164, 2011.

[5] S. Aldawsari, W. Li, and L. W. Ki. ”A Comprehensive Theoretical Study of the Guided Modes in a Five-Layer Hybrid Metal/Dielectric/ Metal Waveguide. “Journal of Light wave Technology, 35.11, pp 2243, 2016.

[6] P. B. Johnson and R. W. Christy, “Optical constants of the noble metals,” Phys. Rev. B, vol. 6, no. 12, pp. 4370–4379, Dec. 1972.

[7] M. Dehghani Firouzabadi, M. Nikoufard, and M. B. Tavakoli. “Optical Kerr nonlinear effect in InP-based hybrid plasmonic waveguides.” Optical and Quantum Electronics 49.12, pp.390, 2017.

[8] R. F. Oulton, V. J. Sorger, D. A. Genov, D. F. P. Pile, and X. Zhang,“A hybrid plasmonic waveguide for subwavelength confinement andlong-range propagation,” Nature Photon., vol. 2, no. 8, pp. 496–500,Aug. 2008.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-15]