

ارتباط سطح موثر مود و طول انتشار در موجبرهای هیبریدی پلاسمونیک با خورگی عمیق بر روی

زیر لایه InP

سلیمان نژاد، فرشاد^۱؛ نیکوفرد، محمود^۲؛ مهدیان، محمد امین^۲

^۱پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان

^۲گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر دانشگاه کاشان

چکیده

در این مقاله، پارامترهای سطح موثر مود (A_{eff}) و ضریب تحدید میدان (Γ) در موجبر هیبریدی پلاسمونیک با خورگی عمیق مبتنی بر مواد InP برای اولین بار محاسبه شده است. تاثیر پهنای موجبر پلاسمونیک و ضخامت لایه پوشش بر روی طول انتشار در ابتدا بررسی شده است. به دلیل اینکه توان نوری در موجبرهای پلاسمونیک در لایه پوشش متمرکز می باشد تاثیر ضخامت این لایه بر روی دو پارامتر مهم سطح موثر و ضریب تحدید مود اصلی TM محاسبه شده است که نشان دهنده این است که یک مصالحه بین سطح موثر مود و طول انتشار مود لازم می باشد.

Effective Mode Area and Propagation Length of Deeply-etched InP-Based Hybrid Plasmonic Waveguides

Solaymannezhad, Farshad¹; Nikoufard, Mahmoud²; Mahdian, Mohamad Amin²

¹ Institute of nanoscience and nanotechnology, University of Kashan, Kashan, Iran

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

Abstract

In this paper, effective mode area (A_{eff}) and field confinement factor (Γ) has been calculated for a deeply-etched InP-based hybrid plasmonic waveguide. The effect of ridge width and cladding thickness of InP layer on the propagation length is investigated. Because of the concentration of optical power of hybrid plasmonic waveguide in cladding layer, the effect of this layer on two main parameters of effective mode area and confinement factor of fundamental mode is also determined which showing a tradeoff between the effective mode area and propagation length is necessary.

PACS No. 41, 42, 61

مناسبی برای تحقق مجتمع سازی یکپارچه ادوات فوتونیک

غیرفعال مطرح شده اند [۱, ۲].

ساختارهای مبتنی بر InP برخلاف ساختارهای مبتنی بر SOI دارای قابلیت مجتمع سازی یک پارچه با ادوات فعال آشکار ساز و لیزر در طول موج مخابراتی می باشند. موجبر مبتنی بر زیر لایه InP با هسته InGaAsP و پوشش InP بر روی آن می تواند میدان های نور را در طول موج مخابراتی $1.55\mu m$ تحدید کند. علاوه بر این اتلاف پایین تزویج بین موجبرهای کلاسیک مبتنی بر InP با خورندگی کم و موجبرهای هیبریدی پلاسمونیک با گذار از

مقدمه

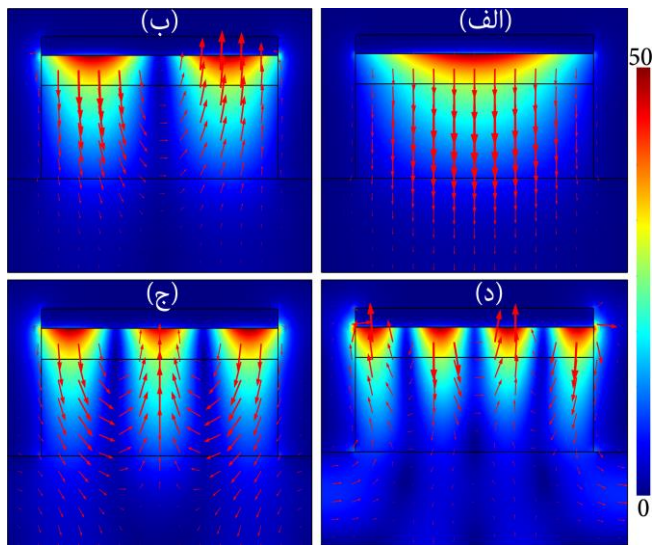
موجبرهای پلاسمونیک با فائق آمدن بر حد پراش مرسوم می توانند نور را در مقیاس نانومتری تحدید کنند که با متمرکز کردن شدید پلاریتون های پلاسمون سطحی (SPP) در فصل مشترک فلز و دی الکتریک محقق می شود و ساخت ادوات نانوفتونیک را ممکن می سازد. تاکنون انواع گوناگونی از نانو ساختارهای پلاسمونیک برای هدایت پلاریتون های پلاسمون سطحی پیشنهاد شده است. که از میان آنها موجبرهای هیبریدی پلاسمونیک سیلیکون بر روی عایق (SOI-HPWG) به عنوان گزینه های

خورندگی کم به خورندگی عمیق مورد توجه محققین ادوات فوتونیک می باشد [۳].

در این مقاله یک موجبر با خورندگی عمیق مبتنی بر زیرلایه InP و پوشش فلزی نقره پیشنهاد شده است و پارامترهای مهم در طراحی موجبرهای پلاسمونیک همچون طول انتشار، ضریب تحدید، سطح موثر مود مورد بررسی قرار گرفته اند.

موجبر هیبریدی پلاسمونیک با خورندگی عمیق

تصویر شمایی موجبر کلاسیک و موجبر هیبریدی پلاسمونیک مبتنی بر InP و توزیع میدان الکتریکی مود اصلی TM در آنها به ترتیب در شکل های ۱-الف و ۱-ب نشان داده شده است.



شکل ۲: توزیع و جهت میدان الکتریکی مدهای (الف) TM00، (ب) TM01، (ج) TM02، (د) TM03 برای $h_{InP}=160nm$ ، $W_g=1000nm$ ، $h_{Ag}=100nm$

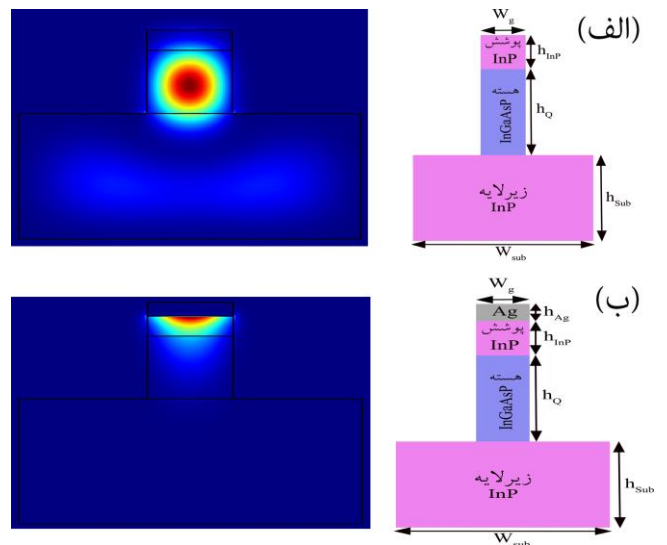
در شکل ۳ نمودار قسمت حقیقی ضریب شکست مدهای منتشر شونده بر حسب عرض موجبر نشان داده شده است و همانطور که پیداست با افزایش پهنای موجبر قسمت حقیقی ضریب شکست مدها نیز افزایش می یابد و به ضریب شکست هسته نزدیک می شود. در شکل ۴ نمودار طول انتشار مدهای منتشر شونده بر حسب پهنای موجبر نمایش داده شده است که طول انتشار مدها با استفاده از قسمت موهومی ضریب شکست و از رابطه

$$L_p = 1/(2k_0 n_{eff,imag}) \quad (1)$$

به دست می آید که در آن $n_{eff,imag}$ قسمت موهومی ضریب شکست و

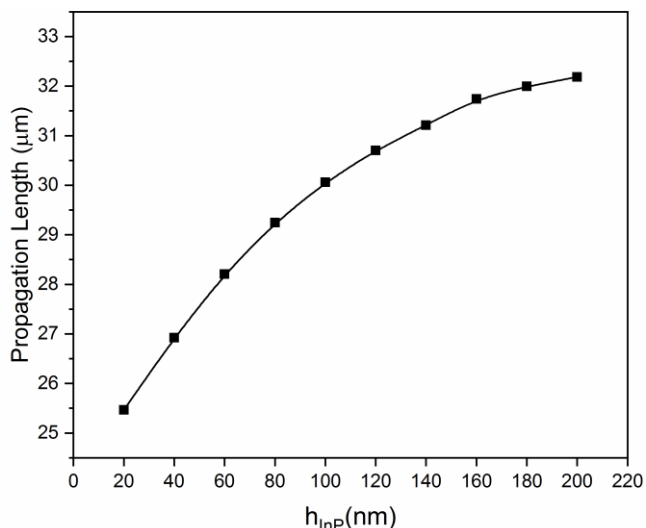
$$k_0 = 2\pi/\lambda \quad (2)$$

عدد موج در خلا می باشد [۵]. نتایج نشان می دهد که با افزایش پهنای موجبر طول انتشار مدهای منتشر شونده افزایش می یابد و رفته رفته به حالت اشباع نزدیک می شوند و نیز پیداست که کمینه طول انتشار برای تمام مدها از ۳۰ میکرومتر بیشتر است که در کاربردهای عملی موجبرهای پلاسمونیک مزیت های فراوانی را به همراه خواهد داشت.



شکل ۱: سطح مقطع یک موجبر مبتنی بر InP و توزیع میدان الکتریکی مود اصلی TM در آن برای (الف) موجبر کلاسیک و (ب) موجبر هیبریدی پلاسمونیک.

موجبر هیبریدی پلاسمونیک مبتنی بر مواد InP از هسته InGaAsP با ضخامت ۵۰۰ نانومتر و ضریب شکست ۳٫۳۶۳۶، لایه پوشش InP با ضخامت ۱۶۰ نانومتر و ضریب شکست ۳٫۱۶۶۹، لایه نقره با ضخامت ۱۰۰ نانومتر و ضریب شکست $0.1388 + i0.31$ بر روی زیرلایه InP تشکیل شده است [۴]. در شکل ۲ مدهای اول تا چهارم موجبر با پهنای ۱۰۰۰ نانومتر در طول موج $1.55 \mu m$ نشان داده شده است.



شکل ۵: نمودار طول انتشار مود اول TM بر حسب ضخامت لایه پوشش.

سطح موثر مود در واقع نشان دهنده نسبت کل انرژی مود به بیشینه چگالی انرژی الکترومغناطیسی مود در کل سطح مقطع موجبر است که کاهش آن امکان تحدید میدان در ابعاد نانومتری را فراهم می‌آورد. سطح موثر مود از رابطه زیر محاسبه شده است:

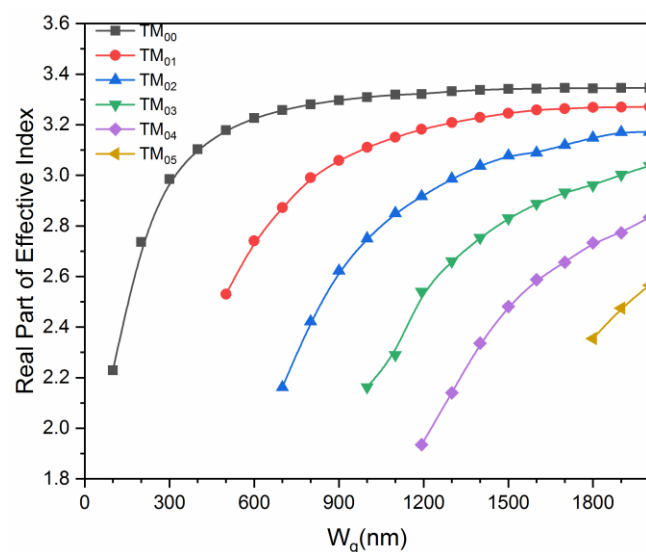
$$A_{\text{eff}} = \frac{1}{\max[P(x, y)]} \int_S P(x, y) dA \quad (3)$$

که در این رابطه $P(x, y)$ چگالی شار انرژی (بردار پوینتینگ) مربوط به مود TM اساسی است. و برای نرمالیزه کردن A_{eff} ، آن را بر

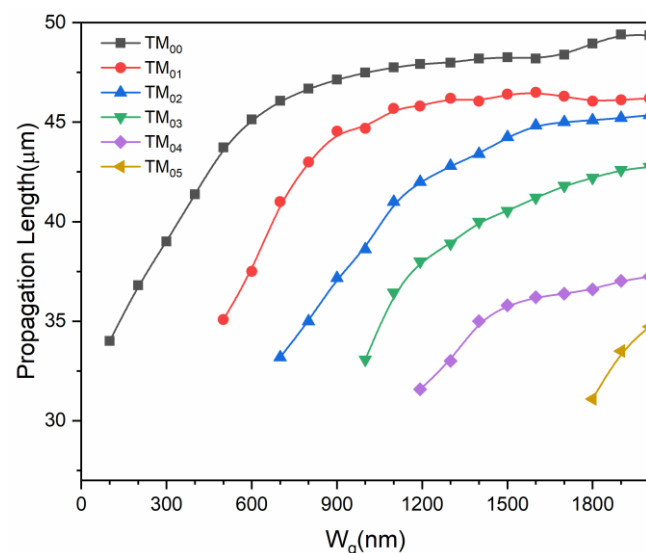
$$A_0 = \left(\frac{\lambda^2}{4}\right) \quad (4)$$

تقسیم می‌کنند [۶]. همانطور که از شکل پیداست با افزایش ضخامت لایه پوشش، سطح موثر مود نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه هم طول انتشار مود و هم سطح موثر مود با افزایش ضخامت لایه پوشش، افزایش می‌یابند می‌توان بسته به کاربرد مورد نظر و اهمیت هر یک از پارامترهای طول انتشار و A_{eff} ، ضخامت لایه پوشش را تعیین نمود.

در شکل ۷ نمودار تغییرات ضریب تحدید میدان (Γ) برای لایه های مختلف پوشش، هسته و زیرلایه موجبر نشان داده شده است. که از رابطه (۵) برای محاسبه آن استفاده کرده‌ایم.



شکل ۳: نمودار قسمت حقیقی ضریب شکست بر حسب پهنای موجبر برای مدهای منتشر شونده.



شکل ۴: نمودار طول انتشار مدهای منتشر شونده بر حسب پهنای موجبر.

در شکل ۵ منحنی طول انتشار بر حسب ضخامت لایه پوشش InP برای مود اول در حالتی که پهنای موجبر ۵۰۰ نانومتر است، آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش ضخامت لایه پوشش، طول انتشار نیز افزایش می‌یابد و به مدهای موجبر کلاسیک نزدیک می‌شود.

نتایج و بحث

در شکل ۶ منحنی سطح موثر مود بر حسب ضخامت لایه پوشش به صورت خط چین نشان داده شده است و نیز منحنی نرمالیزه آن به صورت خط ممتد آورده شده است.

است و همواره میزان تقریباً ثابتی از میدان در محیط در برگیرنده موجبر وجود دارد. و این بدان معناست که با افزایش ضخامت لایه پوشش اندازه آن با ضخامت لایه‌های هسته و زیرلایه موجبر قابل قیاس می‌باشد و از تمرکز میدان در لایه هسته کاسته و بر تمرکز در لایه پوشش افزوده می‌شود و مقدار ماکزیمم میدان در محدود وسیعتری قرار گرفته و سطح موثر مود افزایش می‌یابد.

نتیجه گیری

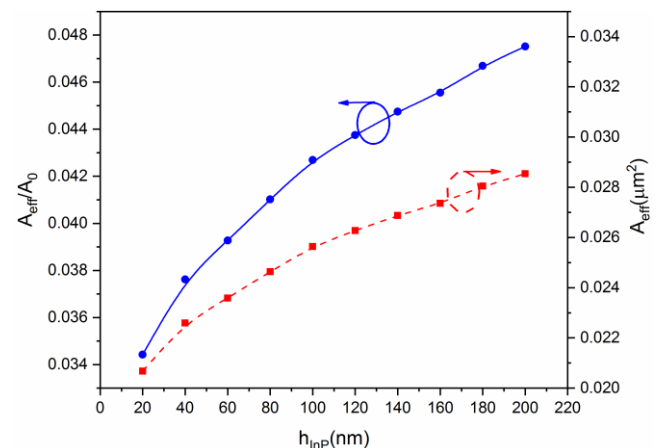
نشان داده شد که با افزایش پهنای موجبر قسمت حقیقی ضریب شکست و طول انتشار مودهای منتشر شونده افزایش می‌یابد. با افزایش ضخامت لایه پوشش، طول انتشار مود اول و نیز سطح موثر آن افزایش می‌یابد و با افزایش ضخامت لایه پوشش ضریب تحدید میدان زیرلایه تقریباً ثابت بوده اما از ضریب تحدید میدان لایه هسته کاسته شده و بر ضریب لایه پوشش افزوده می‌شود.

مرجع ها

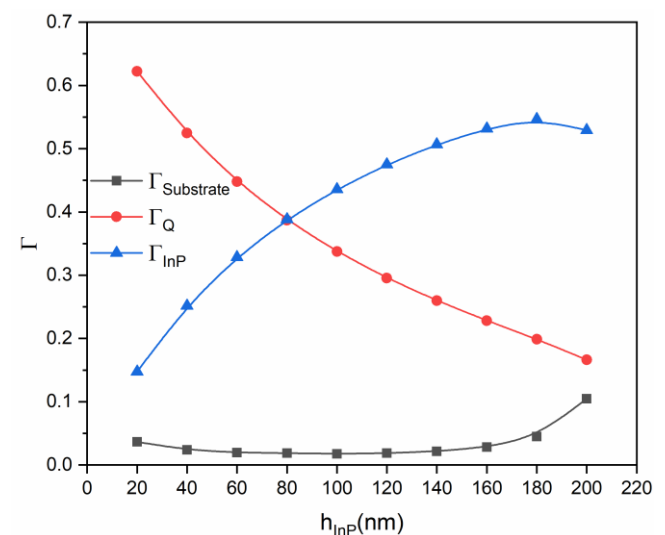
- [۱] M. Alam, J. N. Caspers, J. S. Aitchison, and M. Mojahedi, "Compact low loss and broadband hybrid plasmonic directional coupler," *Optics express*, vol. **21**, no. 13, pp. 16029-16034, 2013.
- [۲] D. K. Gramotnev and S. I. Bozhevolnyi, "Plasmonics beyond the diffraction limit," *Nature photonics*, vol. **4**, no. 2, p. 83, 2010.
- [۳] M. Nikoufard, N. Heydari, S. Pourgholi, and A. R. Khomami, "Novel hybrid plasmonic-based directional coupler on InP substrate," *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, vol. **22**, pp. 9-17, 2016.
- [۴] <http://refractiveindex.info/>
- [۵] J. Ctyroky, P. Kwiecien, and I. Richter, "Analysis of hybrid dielectric-plasmonic slot waveguide structures with 3D Fourier Modal Methods," *Journal of the European Optical Society-Rapid publications*, vol. **8**, 2013.
- [۶] R. Oulton, G. Bartal, D. Pile, and X. Zhang, "Confinement and propagation characteristics of subwavelength plasmonic modes," *New Journal of Physics*, vol. **10**, no. 10, p. 105018, 2008.
- [۷] P. Steglich, C. Villringer, S. Dumecke, Y. P. Michel, M. Casaboni, and S. Schrader, "Silicon-on-insulator slot-waveguide design trade-offs," in *Photonics, Optics and Laser Technology (PHOTOPTICS), 2015 International Conference on*, 2015, vol. **2**, pp. 47-52: IEEE.

$$\Gamma_{\text{int}} = \frac{\int_{A_{\text{int}}} P(x, y) dA}{\int_{A_{\text{tot}}} P(x, y) dA} \quad (5)$$

در این رابطه $P(x, y)$ چگالی شار انرژی و A_{int} و A_{tot} به ترتیب سطح مورد نظر برای محاسبه ضریب تحدید و کل سطح مقطع موجبر می‌باشند [۷].



شکل ۶: نمودار سطح موثر و سطح موثر نرمالیزه مود اول TM بر حسب ضخامت لایه پوشش.



شکل ۷: نمودار ضریب تحدید میدان (Γ) بر حسب ضخامت لایه پوشش.

همانطور که پیداست با افزایش ضخامت لایه پوشش، ضریب تحدید لایه پوشش تقریباً ثابت مانده در حالیکه از ضریب تحدید لایه هسته کاسته شده و به ضریب تحدید لایه پوشش افزوده شده