

تأثیر عمق خوردگی در طراحی مقسم توان تداخل چند مود مبتنی بر مواد InP

مهدیان، محمدامین^۱؛ نیکوفرد، محمود^۱؛ سلیمان نژاد، فرشاد^۲

^۱ گروه الکترونیک، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه کاشان

^۲ پژوهشکده علوم و فناوری نانو، دانشگاه کاشان

چکیده

در این مقاله، ساختار هیبریدی پلاسمونیک با زیرلایه InP جهت طراحی و بهبود مقسم توان نوری 1×2 توسط تداخل چند مود طراحی و تحلیل شده است. در ساختار موجبر، لایه هسته (InGaAsP) می‌تواند دارای عمق خوردگی متغییری از صفر تا ۵۰۰ نانومتر باشد. با بررسی‌های انجام شده در این مقاله نشان داده شده است که با افزایش عمق خوردگی، طول انتشار در موجبر پلاسمونیک مبتنی بر InP تا ۵۰ درصد کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش عمق خوردگی در ساختار موجبر، توان انتقال نوری در مقسم توان تداخل چند مود می‌توان طول لازم برای داشتن یک مقسم توان یک ورودی دو خروجی را تا حدود ۶۰ نانومتر کاهش داد و طول آنرا به کمتر از ۶۵۰ نانومتر کاهش داد که در مقایسه با کارهای قبلی طول مقسم توان بیش از ۴۶۰ نانومتر کمتر شده است در حالی که درصد انتقال توان بیشتر از ۹۰ درصد حفظ شده است. با توجه به اهمیت مقسم‌های توان در مدارات مجتمع فتونیک، این مسئله تحقق مدارات مجتمع یکپارچه فتونیک را بیش از پیش میسر می‌کند.

Effect of Etch Depth on Design of InP Based Multi-Mode Interferometer

Mahdian, Mohamad Amin¹; Nikoufard, Mahmoud¹; Solaymannezhad, Farshad²

¹ Department of Electronics, Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Kashan

² Institute of nanoscience and nanotechnology, University of Kashan, Kashan, Iran

Abstract

In this article, an InP-based hybrid plasmonic waveguide (HPWG) is used to design and improve a 1×2 multimode interference power splitter. The etch depth of core (InGaAsP) layer in waveguide structure can vary from zero to 500nm from a shallow etch waveguide to a deeply etch one, respectively. By numerical calculations it is shown that the propagation length of the HPWG can drop about 50% by increasing the etch depth, but will decrease the MMI length about 50nm while the power transmission is still more than 90%. As the power splitters are an essential device in photonic integrated circuits, decreasing the footprint of device with increasing the power transmission can help fulfilling nanoscale photonic integrated circuits.

PACS No. 41, 42, 61

مقدمه

موجبرهای پلاسمونیک با تبدیل نور به پلاسمون‌های سطحی توانایی هدایت میدان‌های نوری در ابعاد نانو را دارند. نانو ساختارهای پلاسمونیک متنوعی تا به حال معرفی شده است. در این بین ساختارهای هیبریدی پلاسمونیک به علت برقراری مصالحه میان طول انتشار و سطح موثر مود کاندید مناسبی برای طراحی و پیاده‌سازی ادوات مجتمع فتونیک هستند [۱].

به علت امکان مجتمع سازی یکپارچه ادوات فعال و غیر فعال

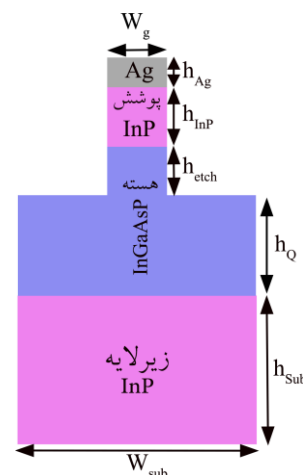
فتونیک بر روی یک زیرلایه در طول موج مخابراتی ۱.۵۵ میکرومتر، ادوات مبتنی بر زیرلایه InP دارای اهمیت ویژه‌ای هستند.

یکی از پرکاربردترین ادوات فتونیک در مدارات مجتمع نوری مقسم‌های توان هستند که در تداخل سنج ماخ زندر، مالتی پلکسر-های طول موج فیلترهای مود و... کاربرد دارند. مطالعاتی بر روی مقسم‌های توان مبتنی بر سیلیکون انجام شده است. طی این مقاله ابتدا ساختار هیبریدی پلاسمونیک مبتنی بر InP معرفی می‌شود و با استفاده از این ساختار یک تزویج گر جهت دار و مقسم توان چند

مود طراحی شده است [۲].

موجبر هیبریدی پلاسمونیک مبتنی بر InP

در شکل ۱ سطح مقطع موجبر پلاسمونیک مبتنی بر زیر لایه InP نمایش داده شده است. در شکل ۱ به ترتیب از پایین به بالا، زیر لایه InP با ضخامت h_{Sub} و برابر 500nm و ضریب شکست در طول موج مخابراتی $1.55\mu m$ برابر با 3.1669 در نظر گرفته شده است و بر روی آن لایه هسته InGaAsP(Q) با ضخامت $h_{etch} + h_Q$ مجموعاً برابر 500nm و ضریب شکست در طول موج مخابراتی 3.3636 نمایش داده شده است. سپس بر روی آنها دو لایه هم عرض InP و Ag به ترتیب با ضخامت‌های h_{InP} و h_{Ag} قرار گرفته است. ضریب شکست فلز نقره در طول موج مخابراتی برابر $0.1388 + 11.31i$ است که در مقایسه با فلز طلا باعث تلفات کمتری می‌شود [۳]. ضریب شکست مواد InP، InGaAsP و Ag تابع طول موج می‌باشند که ضریب شکست مواد InP و InGaAsP بر حسب طول موج طبق رابطه سلمیر محاسبه می‌گردند [۲].



شکل ۱: نمایش ساختار لایه‌های موجبر پلاسمونیک هیبریدی مبتنی بر InP.

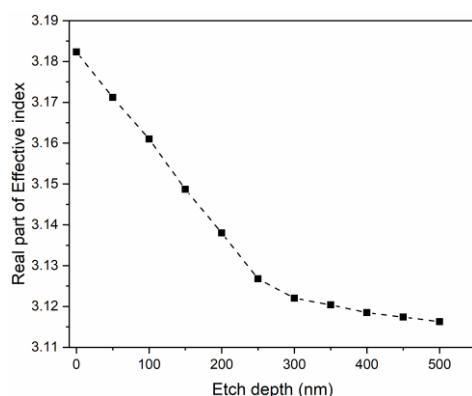
در ساختار شکل ۱، h_{Sub} و h_{InP} به ترتیب برابر 500nm و 160nm و پهنای زیر لایه یک میکرومتر در نظر گرفته شده است. لایه هسته InGaAsP می‌تواند به صورت کامل یا بخشی از آن در فرآیند ساخت دچار خوردگی شود. میزان خوردگی لایه Q در موجبر بر روی طول انتشار و ضریب شکست موثر تاثیر مستقیمی

دارد. در شکل ۲ و ۳ تاثیر میزان خوردگی به ترتیب بر روی قسمت حقیقی ضریب شکست موثر و طول انتشار مود نمایش داده شده است. طول انتشار نور در یک موجبر پلاسمونیک برابر است با

$$L_p = \lambda / (4\pi n_{eff,imag}) \quad (1)$$

که λ طول موج نور ورودی و $n_{eff,imag}$ قسمت موهومی ضریب شکست موثر است.

با افزایش عمق خوردگی از 0nm تا 500nm در لایه هسته Q، قسمت حقیقی ضریب شکست موثر مود اصلی TM به دلیل کاهش سطح لایه Q با بیشترین ضریب شکست، مطابق نمودار شکل ۲ کاهش می‌یابد.



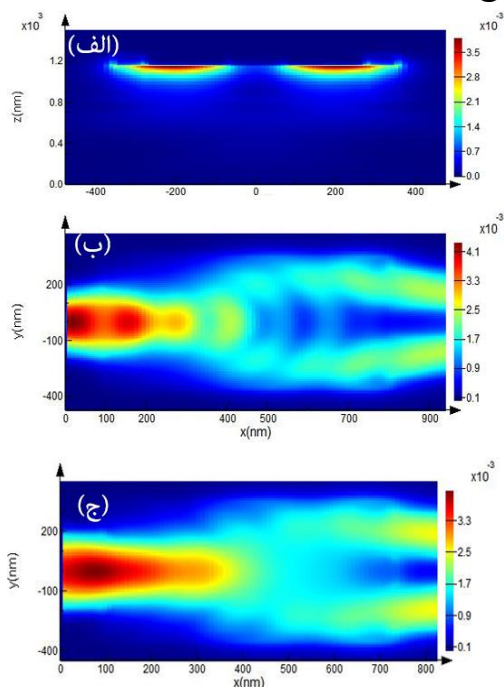
شکل ۲: نمودار قسمت حقیقی ضریب شکست موثر مود اصلی TM بر حسب عمق خوردگی لایه Q.

همچنین با افزایش عمق خوردگی در لایه Q، قسمت موهومی ضریب شکست موثر افزایش می‌یابد و در نتیجه طول انتشار به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد که به دلیل افزایش تحدید میدان در لایه پوشش با افزایش عمق خوردگی است که باعث افزایش تلفات اهمی فلز به دلیل تماس بیشتر میدان با سطح فلز می‌شود و در نتیجه تلفات انتشاری افزایش می‌یابد.

با توجه به اینکه در فرآیند ساخت، دیواره‌های موجبر دارای اعوجاج‌هایی خواهد بود ساخت موجبر با خوردگی کم عمق بهتر است.

در ادامه به معرفی و طراحی یک مقسم توان با تداخل چند مود می‌پردازیم و تاثیر عمق خوردگی لایه Q در پارامترهای مهم مقسم توان را بررسی می‌کنیم.

لایه InP پوششی نشان می‌دهد در حالتی که طول L_{MMI} برابر با 800nm و پهنای W_{MMI} برابر با 700nm است. عمق خوردگی در ساختار شکل ۵ قسمت (الف) و (ب) برابر با 200nm و در قسمت (ج)، یک ساختار بدون خوردگی در نظر گرفته شده است.

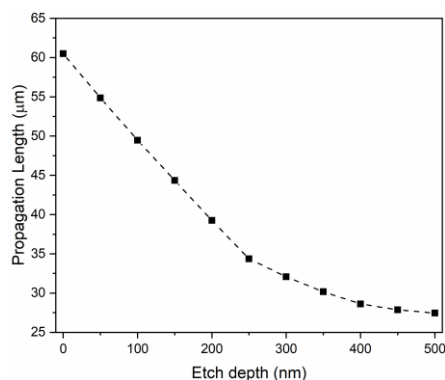


شکل ۵: نمایش توزیع توان در مقسم توان چند مود (الف) در موجبرهای خروجی (ب) در وسط لایه پوشش InP با 200nm نانومتر خوردگی در لایه Q (ج) در وسط لایه پوشش InP بدون خوردگی در لایه Q.

بررسی تاثیر عمق خوردگی در طراحی مقسم توان

بیشترین توان نوری انتقالی با توجه به نمودار شکل ۶ زمانی اتفاق می‌افتد که لایه هسته Q دارای خوردگی عمیق باشد و کمترین میزان توان انتقالی زمانی رخ می‌دهد که لایه هسته Q بدون خوردگی است. در مقایسه با تغییراتی که در طول مقسم توان با تغییرات عمق خوردگی رخ می‌دهد، مقدار توان انتقالی نسبتاً ثابت مانده و فقط شاهد ۲ درصد تغییرات در آن هستیم. و به طور کلی توان انتقالی در تمامی شرایط بیشتر از ۹۳ درصد است که ۷٪ تلفات ناشی از ویژگی ذاتی موجبرهای پلاسمونیک است.

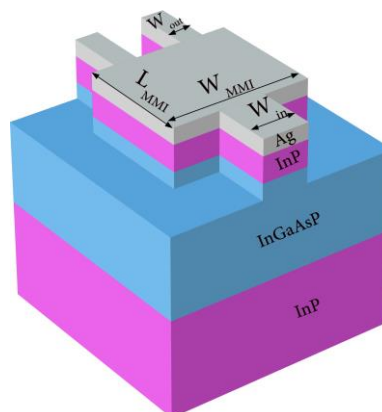
شکل ۷ منحنی طول مقسم توان 1×2 را برحسب عمق خوردگی نشان می‌دهد که با شبیه‌سازی به روش FDTD به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که کوتاه‌ترین طول مقسم توان 1×2 در عمق خوردگی صفر به دست می‌آید و با افزایش عمق خوردگی



شکل ۳: نمودار طول انتشار مود اصلی TM بر حسب عمق خوردگی لایه Q.

طراحی مقسم توان تداخل چند مود (MMI)

بر کاربردترین عنصر در مدارات مجتمع فتونیکی مقسم‌های توان هستند. در شکل ۴ یک مقسم توان تداخل چند مود 1×2 نمایش داده شده است.



شکل ۴: نمای سه بعدی از مقسم توان 1×2 با تداخل چند مود با خوردگی کم عمق در لایه Q.

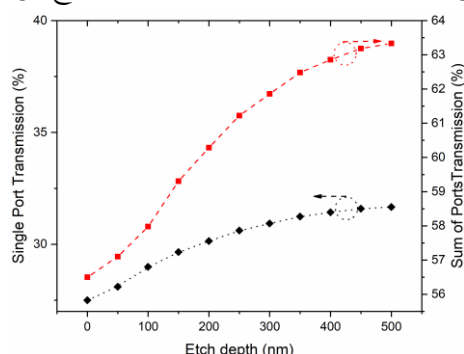
پهنای موجبر ورودی مقسم توان با W_{in} و پهنای موجبرهای خروجی با W_{out} ، طول و پهنای مقسم توان چند مود به ترتیب با L_{MMI} و W_{MMI} نمایش داده شده است.

در شکل ۴، پهنای W_{out} برابر با 200nm و پهنای موجبر ورودی W_{in} برابر با 400nm در نظر گرفته شده است. جهت تحریک دو مود در مقسم توان، پهنای W_{MMI} برابر با 700nm انتخاب شده است. ضمناً موجبرهای خروجی به صورت متقارن قرار گرفته‌اند و با توجه به اینکه موجبر ورودی در وسط MMI قرار گرفته است فقط مدهای زوج (TM_{00} و TM_{02}) تحریک می‌شوند [۴]. برای شبیه‌سازی عددی MMI از روش FDTD سه بعدی استفاده شده است.

شکل ۵ توزیع توان در مقسم توان چند مود را در خروجی و وسط

در نمودار شکل ۸ توان منتقل شده به هر یک از موجبرهای خروجی بر حسب عمق خوردگی بر روی محور سمت چپ و مجموع توان هدایت شده در دو موجبر خروجی بر روی محور سمت راست نمایش داده شده است.

همین طور که از شکل ۸ نیز مشخص است توان میان دو موجبر خروجی به صورت متقارن توزیع شده است و با افزایش عمق خوردگی لایه Q توان انتقالی به هر دو موجبر به صورت یکسان افزایش می یابد و حدوداً در مقدار ۳۰ درصد به اشباع می رسد.



شکل ۸: نمودار توان انتقالی به موجبرهای خروجی بر حسب عمق خوردگی لایه Q.

نتیجه گیری

در این مقاله، تاثیر عمق خوردگی بر ضریب شکست موثر موجبر پلاسمونیک هیبریدی مبتنی بر مواد InP بررسی گردید و نشان داده شد که با افزایش عمق خوردگی، طول انتشار کاهش می یابد. سپس تاثیر عمق خوردگی بر روی طول یک مقسم توان MMI 1x2 بررسی شد. مشاهده گردید که با افزایش عمق خوردگی، طول مقسم توان کاهش خواهد یافت در حالیکه تقریباً توان انتقالی مقدار ثابت حدود 93% خواهد داشت.

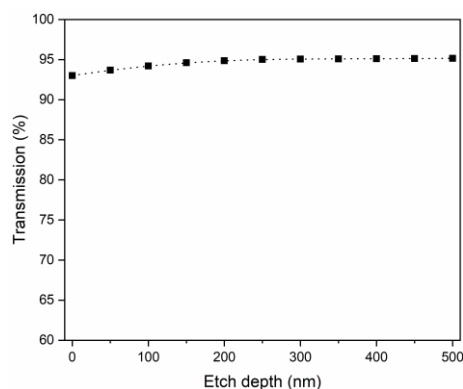
مرجع ها

- [۱] D. Dai and S. He, "A silicon-based hybrid plasmonic waveguide with a metal cap for a nano-scale light confinement," *Optics express*, vol. 17, no. 19, pp. 16646-16653, 2009.
- [۲] M. Nikoufard, M. K. Alamouti, and S. Pourgholi, "Multimode Interference Power-Splitter Using InP-Based Deeply Etched Hybrid Plasmonic Waveguide," *IEEE Transactions on Nanotechnology*, vol. 16, no. 3, pp. 477-483, 2017.
- [۳] Available: <http://refractiveindex.info/>
- [۴] J. Wang et al., "Sub- μm 2 power splitters by using silicon hybrid plasmonic waveguides," *Optics express*, vol. 19, no. 2, pp. 838-847, 2011.
- [۵] L. B. Soldano, F. B. Veerman, M. K. Smit, B. H. Verbeek, A. H. Dubost, and E. C. Pennings, "Planar monomode optical couplers based on multimode interference effects," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 10, no. 12, pp. 1843-1850, 1992.

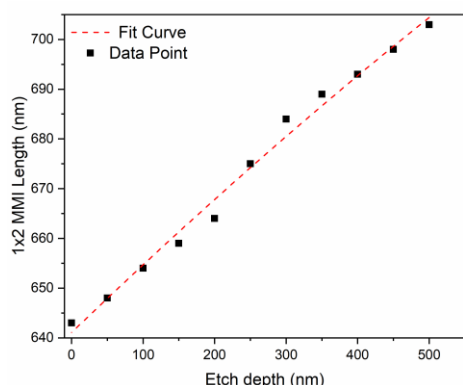
طول مقسم توان 1x2 افزایش می یابد و بیشترین طول مقسم توان را در حالت خوردگی عمیق مشاهده می کنیم. طول مقسم توان به صورت تئوری از رابطه

$$L_{\text{MMI}} = \frac{3\pi}{k_0(n_e - n_o)} \quad (2)$$

محاسبه می شود [۵]. در این رابطه n_e و n_o به ترتیب مقدار حقیقی ضریب شکست موثر مودهای زوج و فرد و k_0 عدد موج در خلا می باشند.



شکل ۹: نمودار توان انتقالی مقسم توان بر حسب عمق خوردگی لایه Q.



شکل ۱۰: نمودار طول MMI بر حسب میزان خوردگی در لایه Q. با افزایش میزان خوردگی شاهد افزایش خطی طول لازم برای داشتن مقسم توان دو خروجی هستیم.

با افزایش عمق خوردگی و کاهش اختلاف میان ضریب شکست موثر مودهای زوج و فرد ایجاد شده در مقسم توان چند مود L_{MMI} افزایش می یابد در حالی که درصد توان انتقالی تقریباً ثابت مانده و با افزایش عمق خوردگی تنها دو درصد افزایش می یابد که تقریباً بدون تغییر است. دلیل این موضوع این است که با افزایش عمق خوردگی، معکوس اختلاف ضریب شکست مودهای اول و دوم (فرد و زوج) به صورت خطی افزایش می یابد.