

تحلیل و طراحی تزویج گر جهتی پلاسمونیک با استفاده از موج بر پلاسمونیک پیوندی

عباسعلی رضایی^۱، محمدرضا سهیلی فر^۲

rsheilifar@ee.kntu.ac.ir

۱- کارشناسی ارشد مهندسی برق- مخابرات

۲- استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علوم دریایی امام خمینی(ره)

چکیده

از ساختارهای مهم در زمینه‌ی پلاسمونیک، تزویج گر جهتی پلاسمونیک است که در موارد مختلفی از جمله سوئیچ‌ها، مالتی پلکسرها، تقسیم و ترکیب کننده‌های توان، تقسیم کننده‌های پلاریزاسیون، مدولاتورها و فیلترهای انتخاب گر فرکانس کاربردهای فراوانی دارد. در این مقاله به معرفی پارامترهای مهم در یک تزویج گر جهتی پرداخته شده و آخرین نمونه از پژوهش‌های انجام شده جهت بهبود این پارامترها برای کاربردهای مدار مجتمع نوری معرفی شده است. همچنین ساختار یک نوع تزویج گر، پیشنهاد شده که دارای پارامترهای مناسب تر نسبت به دیگر ساختارها برای کاربردهای مدار مجتمع نوری است. با تحلیل نتایج بدست آمده از نرم افزار لومریکال، مشاهده شد که تزویج گر پیشنهادی دارای حداکثر ضریب تزویج ۹۰٪ و ضریب ایزولاسیون 19 dB است که مقادیر مناسبی نسبت به دیگر ساختارهای معرفی شده هستند. ساختار این تزویج گر نسبت به ساختار دیگر تزویج گرهای بررسی شده، ساده تر است؛ بنابراین ساخت آن نیز آسان تر است. همچنین به دلیل حضور دو لایه‌ی فلز در دو طرف این ساختار، از تداخل با دیگر ابزارها جلوگیری می‌شود. ابعاد این تزویج گر در حدود $1\ \mu\text{m}$ است که یک ساختار بسیار فشرده محسوب می‌شود و برای کاربرد در مدارهای مجتمع نوری مناسب است.

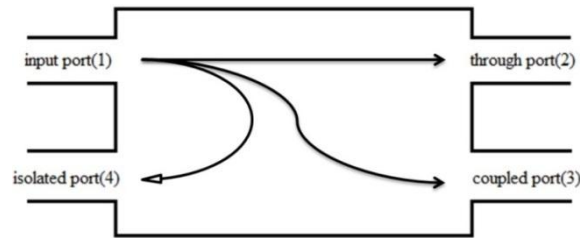
واژگان کلیدی: ضریب ایزولاسیون، ضریب تزویج، طول تزویج، موج بر پلاسمونیک، موج بر پلاسمونیک پیوندی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۶/۰۵/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۶/۱۰/۰۶

۱- مقدمه

با ترکیب موجبرهای پلاسمونیک پیوندی، می‌توان به تزویج‌گرهای جهتی پلاسمونیک دست یافت [۱]. تزویج‌گرهای جهتی پلاسمونیک اساس ابزارهای نوری هستند که در موارد مختلفی از جمله سویچ‌ها، مالتی پلکسرها، تقسیم و ترکیب‌کننده‌های توان، تقسیم‌کننده‌های پلاریزاسیون، مدولاتورها و فیلترهای انتخاب‌گر فرکانس کاربردهای فراوانی دارند [۷] - [۲]. عملکرد کلی یک تزویج‌گر جهتی در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل (۱) ساختار کلی تزویج‌گر جهتی

روابط کلی برای هر تزویج‌گر جهتی در معادلات (۱) الی (۴) نمایش داده شده است:

$$C[dB] = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_2} \right) \quad (۱)$$

$$D[dB] = 10 \log \left(\frac{P_2}{P_4} \right) \quad (۲)$$

$$I[dB] = 10 \log \left(\frac{P_1}{P_4} \right) \quad (۳)$$

$$I[dB] = D + C \quad (۴)$$

که در این روابط C، D و I به ترتیب ضرایب تزویج، جهت‌دهندگی و ایزولاسیون و P_1, P_2, P_3, P_4 به ترتیب، توان در دهانه‌های ورودی، مستقیم، تزویج و ایزوله هستند. ضرایب جهت‌دهندگی و ایزولاسیون در یک تزویج‌گر ایده‌آل، بی‌نهایت است و در طراحی‌ها سعی می‌شود این پارامترها، مقادیر بزرگی باشند [۸].

در کاربردهای مدار مجتمع نوری، تحقیقات در زمینه‌ی تزویج‌گرهای جهتی به منظور کاهش طول ساختار و در عین حال افزایش حداکثر ضریب تزویج صورت می‌گیرد [۹]. عاملی که باعث محدودیت در کاهش طول این ساختارها می‌شود، طول تزویج است [۱۰]. طول تزویج، طول مورد نیاز در جهت انتشار برای تزویج کامل

توان از یک موجبر به موجبر دیگر است که از رابطه‌ی (۵) محاسبه می‌شود [۸].

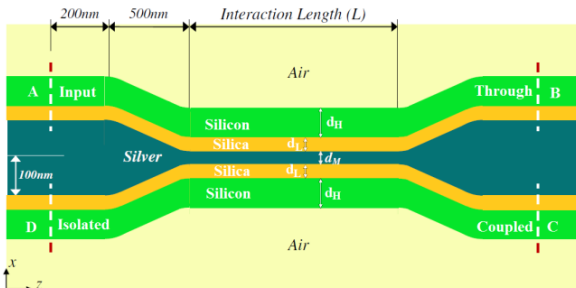
$$L_c = \pi / (\text{Re}\{\beta_{\text{even}}\} - \text{Re}\{\beta_{\text{odd}}\}) \quad (۵-ا)$$

$$= \pi / [k_0 |\text{Re}\{n_{\text{eff}}(\text{even}) - n_{\text{eff}}(\text{odd})\}|] \quad (۵-ب)$$

$$= \pi / [k_0 |\text{Re}\{\Delta n_{\text{eff}}\}|] \quad (۵-ج)$$

در این رابطه، L_c طول تزویج، β_{even} و β_{odd} به ترتیب ثابت‌های انتشار مدهای زوج و فرد، k_0 عدد موج فضای آزاد و n_{eff} ضریب شکست مؤثر مد است. بنابراین برای کاهش طول تزویج می‌توان از ساختارهایی با $\text{Re}\{\Delta n\}$ بزرگ بهره برد. موجبرهای فلزی از جمله‌ی این ساختارها هستند [۱۱].

طبق پژوهش‌های انجام شده در سال‌های اخیر در زمینه‌ی تزویج‌گرهای جهتی پلاسمونیک، بهترین نتیجه‌ی گزارش شده، دارای حداکثر ضریب تزویج ۷۵٪ با ایزولاسیون ۲۵dB است [۱۲]، [۱۳]. ساختار این تزویج‌گر در شکل ۲ نشان داده شده است. این ساختار از روی هم قرار دادن دو موجبر مشابه تشکیل شده است. برای رسیدن به این نسبت، طول نهایی ساختار ۲ μm است.

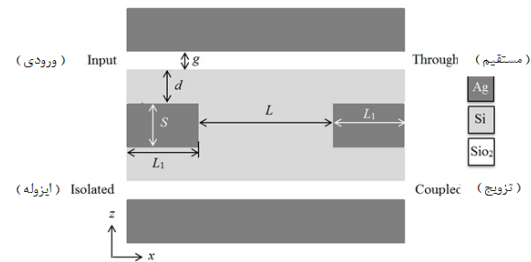


شکل (۲) ساختار بهترین تزویج‌گر جهتی گزارش شده [۲]

۲- ساختار تزویج‌گر جهتی فشرده پلاسمونیک

برای ایجاد یک تزویج‌گر فشرده‌ی پلاسمونیک، شکل ۳ مورد بررسی قرار گرفته است. این شکل سطح مقطع ساختار را در صفحه‌ی (x-z) نمایش می‌دهد. جهت انتشار موج در راستای x در نظر گرفته شده و ساختار در راستای y، بینهایت فرض شده است. در این ساختار از سه ماده‌ی نقره، سیلیکون و سیلیکا استفاده شده است. این ساختار از سه قسمت تشکیل شده است. قسمت‌های اول و سوم، شامل دو موجبر پلاسمونیک پیوندی هستند که دهانه‌های تزویج‌گر را تشکیل می‌دهند و قسمت دوم یک تزویج‌گر MIM است که از روی هم قرار دادن دو موجبر پیوندی

پلاسمونیک تشکیل شده است.



شکل (۳) نمای دو بعدی ساختار تزویج گر جهتی فشرده‌ی پلاسمونیک

دهانه‌ی تزویج می‌رسد. برای ایزوله شدن دهانه‌های خروجی از ساختار تزویج گر، طول L_1 در نظر گرفته شده برابر 200 nm انتخاب می‌شود.

در این مقاله به ارائه‌ی نتایج حاصل از شبیه‌سازی تزویج گر فشرده‌ی پلاسمونیک با استفاده از نرم‌افزار لومریکال پرداخته می‌شود.

۳- شبیه‌سازی تزویج گر جهتی فشرده‌ی پلاسمونیک

در این بخش، تزویج گر با استفاده از نرم‌افزار لومریکال و به روش FDTD شبیه‌سازی می‌شود. ابتدا تمام نتایج در طول موج پرکاربرد $\lambda = 1550 \text{ nm}$ ارائه می‌شود. با تحلیل نتایج شبیه‌سازی، سعی می‌شود پارامترهای تزویج گر را بهبود بخشید و پارامترهای مناسبی برای طراحی تزویج گر بدست آورده شود.

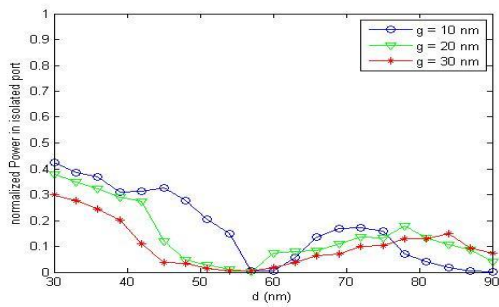
برای این که حداکثر توان ورودی به دهانه‌ی تزویج برسد، لازم است که طول L برابر طول تزویج انتخاب شود. به منظور طراحی تزویج گری مناسب برای کاربردهای مدار مجتمع نوری، به یک تزویج گر با ابعاد کوچک نیاز است. بنابراین سعی می‌شود با تنظیم ضخامت‌های g و d به این مهم دست یافت. ابتدا باید طول تزویج گر MIM که در بخش مرکزی شکل ۳ مورد استفاده قرار گرفته است، به ازای ضخامت‌های مختلف g و d محاسبه شود. برای این منظور، ضخامت g را در سه مقدار مختلف 10 nm ، 20 nm و 30 nm در نظر گرفته و d از 30 nm تا 90 nm تغییر داده می‌شود و برای هر ساختار بدست آمده، شبیه‌سازی انجام می‌شود. حدود تغییرات این ضخامت‌ها برای بدست آمدن پاسخ مناسب، با توجه به رابطه‌ی ۵ در نظر گرفته شد.

بعد از استخراج نتایج شبیه‌سازی، طولی که در آن ماکزیمم توان به موج بر پایینی تزویج گر، منتقل شده است، طول تزویج ساختار است. شکل ۴ تغییرات طول تزویج ساختار را به ازای سه مقدار 10 nm ، 20 nm و 30 nm برای g و بر حسب d نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود با افزایش d و g ، طول تزویج افزایش می‌یابد. بنابراین با انتخاب هرچه کوچک‌تر d و g می‌توان به کاهش ابعاد ساختار کمک کرد.

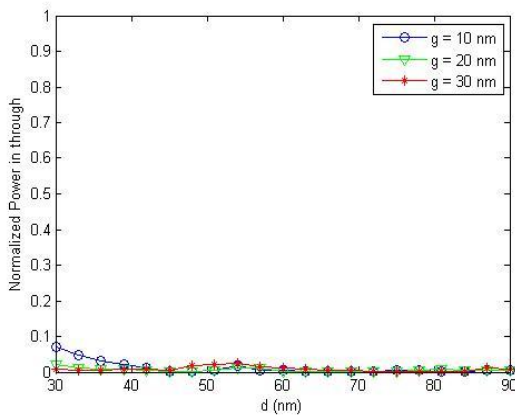
هدف اصلی در این مقاله طراحی تزویج گری است که

مطابق شکل ۳، موج‌برهای پیوندی، شامل دو لایه‌ی سیلیکون و سیلیکا هستند که از دو طرف توسط لایه‌های نقره احاطه شده‌اند. موج‌برهای پیوندی معمولاً شامل سه لایه‌ی فلز، دی الکتریکی با ضریب گذردهی الکتریکی کم و دی الکتریکی با ضریب گذردهی الکتریکی زیاد هستند [۱]. در ساختار مورد بررسی، یک لایه‌ی فلزی دیگر (لایه‌ی فلزی میانی) افزوده شده است تا از تزویج ناخواسته‌ی دو موج بر پیوندی که روی هم قرار گرفته‌اند، جلوگیری شود. هر چند وجود این لایه ممکن است باعث ایجاد تلفاتی در ساختار شود؛ اما به دلیل فراهم کردن زمینه برای استفاده از تزویج گر MIM و بهره بردن از مزایای این نوع تزویج گر، مناسب است.

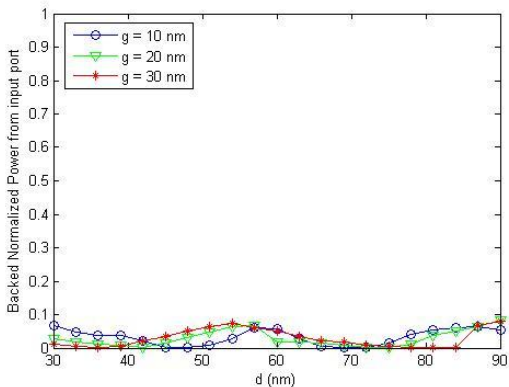
در شکل ۳ ضخامت‌های لایه‌های فلز میانی، سیلیکون و سیلیکا به ترتیب با پارامترهای S ، d و g نشان داده شده‌اند. همچنین تزویج گر MIM دارای طول L و شامل لایه‌های سیلیکون با ضخامت $S + 2d$ ، دو لایه‌ی سیلیکا با ضخامت g و دو لایه‌ی فلز است. اساس عملکرد این ساختار به این صورت است که با تحریک دهانه‌ی ورودی، موج پلاسمونیک در جهت x در موج بر پیوندی منتشر شده و لایه‌ی فلز میانی مانع نفوذ توان به لایه‌های پایینی می‌شود. لازمه‌ی این عملکرد این است که ضخامت S از عمق نفوذ فلز بیشتر باشد. در تمام نتایج ارائه شده در این مقاله، مقدار $S = 100 \text{ nm}$ انتخاب شده است تا از نفوذ ناخواسته‌ی توان جلوگیری شود. با رسیدن موج به تزویج گر MIM، توان به لایه‌های پایینی نفوذ می‌کند و به دهانه‌های خروجی می‌رسد. با تنظیم مناسب طول L ، می‌توان میزان این نفوذ را کنترل کرد. اگر طول L را برابر طول تزویج تزویج گر MIM انتخاب شود، حداکثر توان به



(ب)



(ج)

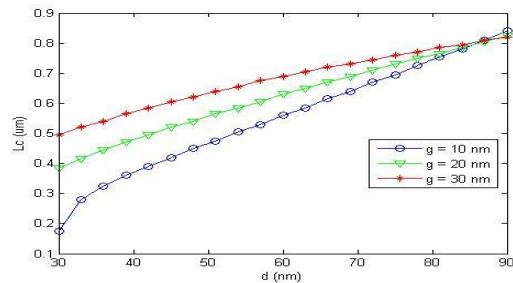


(د)

شکل (۵) تغییرات توان نرمالیزه به ازای سه مقدار g و بر حسب d در دهانه‌ی (آ). تزویج (ب). ایزوله (ج). مستقیم (د). ورودی (توان برگشتی)

از شکل ۵ مشاهده می‌شود که با انتخاب $d = 50$ nm و $g = 20$ nm می‌توان به یک تزویج مناسب دست یافت. شکل ۶ تغییرات توان را در هر کدام از موج‌برهای بالایی (P1) و پایینی (P2) به ازای این مقادیر از ضخامت‌ها نشان می‌دهد. از این شکل مشاهده می‌شود که توان رسیده به دهانه‌ی تزویج واقع در $x = 0.95 \mu\text{m}$ در حدود ۰.۸۸٪ توان

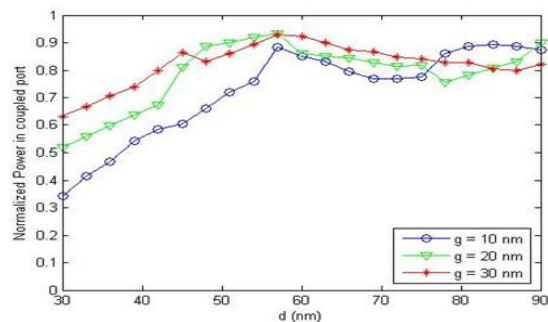
حداکثر توان را از دهانه‌ی ورودی به دهانه‌ی تزویج منتقل کند. بنابراین طول L را در ساختار تزویج‌گر، برابر طول تزویج بدست آمده از شکل ۴ قرار داده می‌شود.



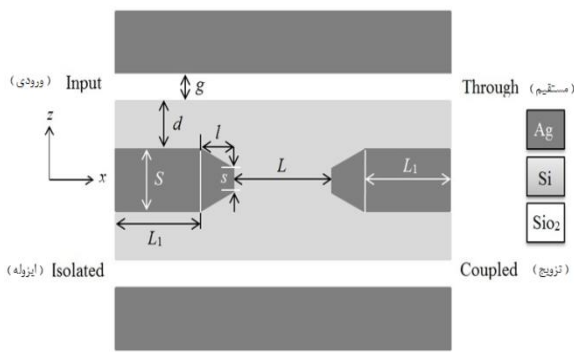
شکل (۴) تغییرات طول تزویج به ازای سه مقدار g و بر حسب

d

در ادامه به بررسی رفتار تزویج‌گر به ازای تغییرات ضخامت‌های g و d ، پرداخته می‌شود. برای این منظور حدود تغییرات ضخامت‌ها را مشابه شکل ۴ در نظر گرفته و توان نرمالیزه‌ی رسیده به هرکدام از دهانه‌های ساختار را به ازای تغییرات ضخامت‌های g و d بدست آورده می‌شود. شکل ۵، تغییرات توان نرمالیزه در هرکدام از سه دهانه‌ی خروجی و توان برگشتی از دهانه‌ی ورودی تزویج‌گر را به ازای طول L برابر طول تزویج (L_c) و سه مقدار g و بر حسب تغییرات d نشان می‌دهد. در طراحی تزویج‌گرها هدف اصلی باید افزایش ماکزیمم ضریب تزویج و در عین حال کاهش ضریب ایزولاسیون باشد. بنابراین پارامترهای طراحی تزویج‌گر باید به گونه‌ای انتخاب شوند که توان تزویج شده به دهانه‌ی تزویج افزایش یابد و در عین حال توان رسیده به دهانه‌ی ایزوله کاهش پیدا کند.



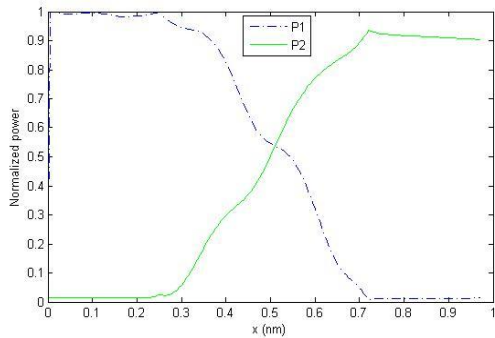
(ا)



شکل (۷) ساختار اصلاح شده

۴- بررسی رفتار فرکانسی تزویج گر

در ادامه به بررسی رفتار فرکانسی تزویج گر طراحی شده پرداخته می‌شود. در این جا رفتار تزویج گر در طول



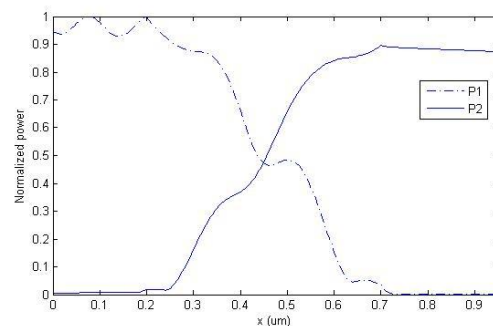
شکل (۸) تغییرات توان به ازای $d = 50 \text{ nm}$ $L = 470 \text{ nm}$ و $g = 20 \text{ nm}$ در هر کدام از موج‌برهای بالایی (P_1) و پایینی (P_2) در شکل ۷

موج‌های 1200 nm تا 1800 nm شبیه سازی می‌شود و نتایج مورد تجزیه و تحلیل قرار داده می‌شود. در کاربردهای تقسیم و ترکیب کننده‌ی توان و تقسیم کننده‌ی پلاریزاسیون، معمولاً تغییرات طول موج در بازه‌ی 1450 nm تا 1650 nm در نظر گرفته می‌شود [۲]-[۷].

در اینجا تزویج گر مورد بررسی به ازای ابعاد $L = 550 \text{ nm}$ ، $g = 20 \text{ nm}$ و $d = 50 \text{ nm}$ در فرکانس‌های مختلف شبیه‌سازی شده است. شکل ۹ تغییرات توان رسیده به هر کدام از سه دهانه‌ی خروجی ساختار را در بازه‌ی طول موج 1200 nm تا 1800 nm نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که تغییرات توان در دهانه‌های خروجی این تزویج گر در بازه‌ی طول موجی 1450 nm تا 1650 nm ، حداکثر 10% است و رفتار تقریباً ثابتی دارد. بنابراین این

ورودی است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که میزان ایزولاسیون در این طراحی، در حدود 22 dB است. این پارامترها، دارای مقادیر مناسبی هستند.

نوسانات مشاهده شده در دهانه‌ی ورودی در شکل ۶ به دلیل برگشت توان از محل اتصال موج‌بر دهانه‌ی ورودی به تزویج گر MIM واقع در $x = 0.2 \mu\text{m}$ است. میزان این برگشت توان با توجه به قله‌های توان ایجاد شده در موج‌بر دهانه‌ی ورودی ساختار تعیین می‌شود. از شکل ۵-د و نیز شکل ۶ مشاهده می‌شود که میزان این توان برگشتی در حدود 8% توان ورودی است.



شکل (۶) تغییرات توان به ازای مقادیر $d = 50 \text{ nm}$ $L = 550 \text{ nm}$ و $g = 20 \text{ nm}$ در هر کدام از موج‌برهای بالایی (P_1) و پایینی (P_2)

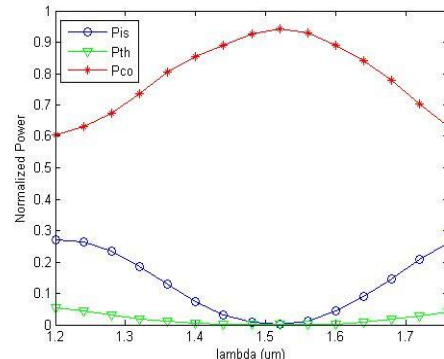
برای کاهش توان برگشتی، از ساختار شکل ۷ استفاده شده است. در این ساختار ضخامت لایه‌ی فلز میانی به طور تدریجی کاهش می‌یابد تا تغییرات در ساختار روند نرمی داشته باشد و توان بازگشتی کاهش یابد. طول هر کدام از قطعات اضافه شده 50 nm است و ضخامت آن‌ها از 100 nm به 50 nm کاهش می‌یابد (مطابق شکل ۷، $l = 50 \text{ nm}$ و $s = 50 \text{ nm}$). شکل ۸ تغییرات توان در هر کدام از موج‌برهای بالایی (P_1) و پایینی (P_2) را برای ساختار شکل ۷ نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که توان رسیده به دهانه‌ی تزویج در حدود 90% توان ورودی است. همچنین نتایج نشان می‌دهند که میزان ایزولاسیون در این طراحی 19 dB است. کاهش ضریب ایزولاسیون نسبت به ساختار شکل ۳ به دلیل کاهش ضخامت فلز میانی است که باعث نفوذ جزئی توان به دهانه‌ی ایزوله می‌شود.

بیان شد. در ادامه ساختاری برای تزویج گر فشرده‌ی پلاسمونیک معرفی شد و شبیه‌سازی ساختار تزویج گر معرفی شده ارائه شد. با تحلیل نتایج بدست آمده، یک تزویج گر جهتی بسیار فشرده‌ی پلاسمونیک طراحی شد که دارای حداکثر ضریب تزویج بیش از ۹۰٪ و ضریب ایزولاسیون در حدود 19 dB است که مقادیر مناسبی نسبت به دیگر ساختارهای معرفی شده هستند. ساختار تزویج گر پیشنهادی نسبت به ساختار دیگر تزویج گرهای بررسی شده، ساده‌تر است؛ بنابراین ساخت آن نیز آسان‌تر است. همچنین به دلیل حضور دو لایه‌ی فلز در دو طرف این ساختار، از تداخل با دیگر ابزارها جلوگیری می‌شود. ابعاد این تزویج گر در حدود $1 \mu\text{m}$ است که یک ساختار بسیار فشرده محسوب می‌شود و برای کاربردهای مدار مجتمع نوری بسیار مناسب است.

۶- مراجع

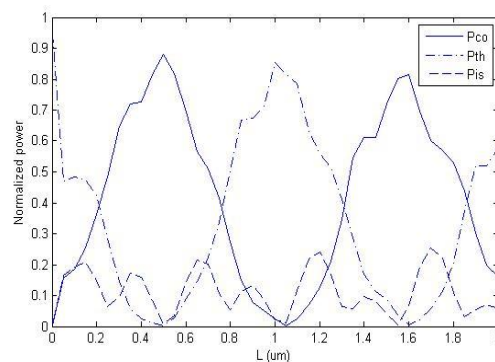
- [1] C. H. Du and Y. P. Chiou, "Vertical directional couplers with ultra-short coupling length based on hybrid plasmonic waveguides," *J. Lightw. Technol.*, vol. 32, no. 11, pp. 2065-2071, 2014.
- [2] R. K. Gupta, S. Chandran and B. K. Das, "Wavelength-Independent Directional Couplers for Integrated Silicon Photonics," *J. Lightw. Technol.*, vol 35, Issue 22, 2017.
- [3] W. K. Zhao, K. X. Chen, J. Y. Wu and K. S. Chiang, "Horizontal Directional Coupler Formed With Waveguides of Different Heights for Mode-Division Multiplexing," *IEEE Photonics Journal*, vol 9, Issue 5, 2017.
- [4] J. Chen and Y. Shi, "An Ultracompact Silicon Triplexer Based on Cascaded Bent Directional Couplers," *Journal of Lightwave Technology*, vol 35, Issue 23, 2017.
- [5] L. Gao, F. Hu, X. Wang, L. Tang and Z. Zhou, "Ultracompact and silicon-on-insulator-compatible polarization splitter based on asymmetric plasmonic-dielectric coupling," *Appl. Phys. B*, vol. 113, pp. 199-203, 2013.
- [6] F. Lou, D. Dai and L. Wosinski, "Ultracompact polarization beam splitter based on a dielectric-hybrid plasmonic-dielectric coupler," *Optics Letters*, vol. 37, no. 16, pp. 3372-3374, 2012.
- [7] M. Nikufard and A. Rostami Khomami, "Hybrid plasmonic polarization splitter using three-waveguide directional coupler in InGaAsP/InP," *Opt. Quant. Electron.*, vol. 48, pp. 296 (1-7), 2016.
- [8] M. Z. Alam, *Hybrid Plasmonic Waveguides: Theory and Applications*, Toronto, 2012.

ساختار برای کاربردهای تقسیم و ترکیب کننده‌ی توان و تقسیم کننده‌ی پلاریزاسیون، از نظر فرکانسی نیز مناسب است.



شکل (۹) تغییرات توان رسیده به هر کدام از سه دهانه‌ی خروجی ساختار بر حسب طول موج

شکل ۱۰ توان رسیده به هر کدام از سه دهانه‌ی خروجی ساختار شکل ۳ را به ازای ضخامت‌های مناسب با استفاده از این شکل می‌توان طول مناسب را برای کاربردهای مختلف انتخاب کرد. در این شکل، توان در دهانه‌های ایزوله، مستقیم و تزویج به ترتیب با پارامترهای P_{co} و P_{th} ، P_{is} مشخص شده‌اند. مشاهده می‌شود با افزایش طول L از صفر و نزدیک شدن به طول تزویج (550 nm)، توان منتقل شده به دهانه‌ی تزویج، افزایش یافته و به مقدار ماکزیمم خود که ۸۸٪ است، می‌رسد.



شکل ۱۰: توان رسیده به هر کدام از سه دهانه‌ی تزویج (P_{co})، ایزوله (P_{is}) و مستقیم (P_{th}) به ازای $d = 50 \text{ nm}$ و $g = 20 \text{ nm}$ بر حسب طول L

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا مقدمه‌ای از تزویج گرهای پلاسمونیک

-
- [9] Y. Kou, F. Ye and X. Chen, "Low-loss hybrid plasmonic waveguide for compact and high-efficient photonic integration," *Optics Express*, vol. 19, no. 12, pp. 11746-11752, 2011.
- [10] M. Z. 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. 16029-16.34, 2013
- [11] C. H. Du and Y. P. Chiou, "Ultra-compact directional coupler using hybrid plasmonic waveguide with dual metallic layers", *NUSOD*, Vancouver, Canada, 2013.
- [12] M. T. Noghani and M. H. V. Samiei, "Ultrashort hybrid metal-insulator plasmonic directional coupler," *Applied Optics*, vol. 52, no. 31, pp. 7498-7503, 2013.
- [13] M. T. Noghani and M. H. V. Samiei, "Hybrid metal-insulator plasmonic slab directional coupler," in *ICEE*, Mashhad, Iran, 2013.