

طراحی تزویج گر غیر خطی پلاسمونی با بازدهی تزویج بالا در محدوده باندهای مخابرات نوری

مریم پورمحمی آبادی^۱ علیرضا حاج حسینی^۲

۱- استادیار- آزمایشگاه الکترونیک نوری، بخش برق، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان- ایران

Pourmahyabadi@uk.ac.ir

۲- دانش آموخته کارشناسی ارشد - آزمایشگاه الکترونیک نوری، بخش برق، دانشکده فنی، دانشگاه شهید باهنر کرمان- ایران

A.Hajhosseini72@eng.uk.ac.ir

چکیده: یکی از چالش‌های موجود در ادوات نوری به خصوص تزویج گرها، کاهش ابعاد و تلفات کلی ساختار است. در این مقاله یک تزویج گر جهت دار پلاسمونی غیر خطی که شامل دو موجبر MIM (فلز-دی الکتریک-فلز) است، پیشنهاد شده است. در این طرح، از یک زائده دوزنقه‌ای شکل در ناحیه موجبر ورودی و خروجی جهت کاهش طول تزویج استفاده شده است و با توجه به اثر کر در ماده غیر خطی موجبر دی الکتریک، میزان انتقال توان در خروجی‌ها کنترل پذیر است. نتایج تحلیل عددی توسط روش تفاضل متناهی در حوزه زمان نشان می‌دهد که بازدهی تزویج و طول تزویج ساختار پیشنهادی در توان ورودی $4\text{W}/\mu\text{m}$ و طول موج 1550nm ، به ترتیب برابر 90% و 650nm است. همچنین، در طول موج 1310nm و در توان ورودی $25\text{W}/\mu\text{m}$ ، بازدهی تزویج برابر 92% و طول تزویج آن برابر با 510nm به دست می‌آید. بنابراین طرح پیشنهادی در حالت توان ورودی کم، دارای بازدهی تزویج بیش از 80% در اکثر باندهای مخابراتی (1260nm تا 1675nm) است.

واژه‌های کلیدی: تزویج گر پلاسمونی، موجبر MIM، اثر کر، بازدهی تزویج، طول تزویج

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.2.65

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۹/۰۱/۲۹

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۴۰۰/۰۳/۰۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۷/۲۱

نام نویسنده‌ی مسئول: دکتر مریم پورمحمی آبادی

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - کرمان - میدان پژوهش - دانشگاه شهید باهنر کرمان - دانشکده‌ی فنی - گروه برق

۱- مقدمه

تزویج‌گرهای نوری نقش مهمی را در حوزه مدارهای مجتمع نانوفوتونیک و ادوات نوری ایفا می‌کنند. این ادوات جهت ترکیب، جداسازی نور و انتقال سیگنال و اطلاعات مربوطه بین مدارهای مجتمع استفاده می‌شوند. در مدارهای مجتمع نوری عمدتاً انتقال سیگنال به دو صورت انتقال از یک موجبر به موجبر مجاور یا انتقال موج از فضای آزاد به موجبر و بالعکس اتفاق می‌افتد.

همچنین، این ادوات بر حسب نوع عملکرد و کارایی که دارند به دو دسته کلی فعال و غیر فعال تقسیم می‌شوند [۱-۳]. تزویج‌گرهای نوری غیر فعال نیازی به توان و انرژی خارجی جهت انجام عمل تزویج ندارند در حالی که تزویج‌گرهای فعال با اعمال یک توان و انرژی خارجی، عملکرد مطلوبی را از خود نشان می‌دهند. در تقسیم‌بندی دیگر، تزویج‌گرهای نوری به دو دسته خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند. در تزویج‌گرهای خطی، در یک طول موج ثابت، خصوصیات ماده دی‌الکتریک استفاده شده در موجبرها اعم از ضریب حساسیت ماده و ضریب شکست آن نسبت به میدان خارجی ثابت هستند، در حالی که در تزویج‌گرهای غیرخطی با اعمال میدان خارجی ضریب شکست ماده نیز متغیر بوده و به نوعی این نوع تزویج‌گرها کنترل‌پذیر هستند. در دسته‌بندی دیگر، تزویج‌گرها در دو دسته تزویج‌گرهای جهت‌دار و بدون جهت قرار می‌گیرند [۴ و ۵]. در این ادوات نوری از نوع جهت‌دار، دریافت و انتقال سیگنال همانند تداخل‌سنج ماخ‌زندر درون یک موجبر امکان‌پذیر است در حالی که در نوع بدون جهت، یک موجبر می‌تواند سیگنال را انتقال یا دریافت کند.

در سال‌های اخیر پژوهشگران جهت کاهش ابعاد ادوات نوری و کنترل حد پراش آن‌ها، به استفاده از مواد با خاصیت پلاسمونی روی آوردند [۶]. بدین ترتیب، جهت بهبود طول انتشار در تزویج‌گرهای نوری و همچنین کاهش تلفات جذب، استفاده بیشتر از مواد با خاصیت پلاسمونی در ادوات نوری رایج‌تر شد. در تزویج‌گرهای پلاسمونی موادی که خاصیت پلاسمونی از خود نشان می‌دهند، عمدتاً فلز هستند. از فلزات مورد استفاده در این نوع ادوات می‌توان به نقره، طلا، مس و کروم اشاره کرد. فلزات ذکر شده بر حسب عملکرد تزویج‌گر مربوطه و محدوده طول موج آن، عمدتاً به صورت بدنه موجبر دی‌الکتریک و یا شبکه انتقال در سطح موجبر دی‌الکتریک مورد استفاده واقع می‌شوند. زمانی که میدان الکتریکی به سطح مشترک فلز-دی‌الکتریک اعمال می‌شود، پلاسمونهای موجود بر روی این سطح تحریک شده و باعث جذب و انتقال بهتر امواج فضای آزاد درون موجبر پلاسمونی و افزایش بازدهی انتقال و تزویج از یک موجبر به موجبر دیگر می‌شوند. جهت بهبود بازدهی تزویج در تزویج‌گرهای مبتنی بر ساختار پلاسمونی، باید دو عامل مهم شیفت فاز و تطبیق عدد موج بین موج ورودی به تزویج‌گر و موج انتقالی در موجبر دی‌الکتریک یا هم‌شنوایی بین دو موجبر مجاور مورد توجه و ارزیابی قرار گیرد.

پو^۱ و همکارانش در سال ۲۰۱۰ تزویج‌گر غیرخطی مبتنی بر موجبر MIM و تداخل‌سنج ماخ‌زندر به صورت خطی و غیرخطی را بررسی کردند [۷]. بدنه موجبرها از فلز نقره و هسته موجبرها در حالت خطی از هوا و در حالت غیرخطی از ماده $\text{MEH-PPV (C}_{18}\text{H}_{28}\text{O}_2)$ تشکیل شده است. به دلیل استفاده از ماده غیرخطی به عنوان موجبر، در طول موج 1100 nm ، قسمت حقیقی و موهومی ضریب شکست مؤثر مدهای متقارن بسیار کوچکتر از مدهای نامتقارن است. این اختلاف زیاد، کاهش طول تزویج را به همراه خواهد داشت. ماده غیرخطی مورد نظر دارای عملکرد بسیار خوب در طول موج مخابراتی 1550 nm است. همچنین به دلیل استفاده از ماده غیرخطی، شدت تابش در درگاه‌های خروجی بر حسب شدت تابش در درگاه ورودی کنترل‌پذیر است.

راکش^۲ و همکارانش، در سال ۲۰۱۲، تزویج‌گر پلاسمونی غیر جهتی را مبتنی بر تئوری تزویج بین موجبر هیبرید و دی‌الکتریک به صورت تئوری و تجربی مورد تحلیل و بررسی قرار دادند [۸]. در انتهای قسمت موجبر ورودی (دی‌الکتریک) از ساختاری شبه مخروطی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از مخروط در انتهای موجبر ورودی علاوه بر کاهش ریزش عددی، منطقه مؤثر مد ورودی به موجبر هیبرید را افزایش می‌دهد.

نزهت و همکارش دو طرح برای تزویج‌گر پلاسمونی غیرخطی مبتنی بر اثر کر را ارائه کردند که در آنها بدنه موجبر از فلز نقره و هسته موجبر از ماده غیرخطی کالکوناید^۴ تشکیل شده است. تزویج‌گر پیشنهادی از لحاظ بازدهی تزویج کنترل‌پذیر بوده و در طول موج مخابراتی 1550 nm دارای عملکرد مطلوب است. تزویج‌گر پیشنهادی ساختاری مشابه با تداخل‌سنج ماخ‌زندر دارد. در حالت غیرخطی KPM^5 با افزایش توان ورودی تا $4\text{ W}/\mu\text{m}$ ، بازدهی تزویج تا ۹۸ درصد افزایش پیدا می‌کند. در حالی که پس این توان ورودی بازدهی تزویج رو به کاهش است [۹-۱۰].

همچنین طرح یک تزویج‌گر پلاسمونی غیرخطی مبتنی بر اثر کر توسط پتراچک^۶ ارائه شد که در طول موج 480 nm عمل می‌کند [۱۱]. ساختار از دو موجبر MIM تشکیل شده و هسته موجبرها نیز از ماده غیرخطی پر شده است. با افزایش شدت تابش ورودی، میزان ضریب شکست ماده غیرخطی تغییر کرده و به دنبال آن ضریب شکست مؤثر مدهای موجود درون موجبر مجاور نیز کنترل می‌شوند. لو^۷ و همکارانش در سال ۲۰۱۴، تزویج‌گر پلاسمونی غیرخطی را با استفاده از پدیده PCA^8 و ساختار گریتنینگ پیشنهاد کردند [۱۲]. به دلیل وجود ماده دی‌الکتریک در سطح طلا و شکست TIR^9 ، تحدید مدهای درون شکاف‌ها و طول انتشار آن‌ها در سطح لایه فلز، افزایش پیدا می‌کند. از مشکلات تزویج‌گرهای با ساختار مشبک، عدم پوشش تمام زوایای ورودی به شکاف‌ها (برقراری قله تشدید پلاسمون‌های سطحی در زاویه بحرانی) و انتقال تمام مدهای مربوطه در سطح

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 - j\gamma_p\omega} \quad (1)$$

که در آن $\varepsilon_{\infty} = 3/7$ نفوذپذیری نسبی در فرکانس بینهایت، $\omega_p = 9/1 \text{ eV}$ فرکانس پلاسما و $\gamma_p = 0/018 \text{ eV}$ می باشد. طبق رابطه زیر جهت کاهش طول تزویج ساختارهای جهت دار، باید اختلاف ضرائب شکست مؤثر مدهای متقارن و نامتقارن افزایش یابد. اگر شیف فاز موج بین دو موجبر مجاور به مقدار π یا $-\pi$ برسد حداقل طول تزویج حاصل می شود [۱۶]:

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta N_{eff} L_c \quad (2)$$

که در آن، ΔN_{eff} مربوط به اختلاف ضریب شکست مؤثر مدهای متقارن و نامتقارن و L_c طول تزویج هست که در واقع مجموع قسمت متقارن و نامتقارن ساختار در ناحیه تزویج است. ثابت خطی دی الکتریک کالکوزناید به صورت $\varepsilon_r = 5/76$ ، ضریب نفوذپذیری غیرخطی و مرتبه سوم برابر با $\chi^{(3)} = 4 \times 10^{-19} (m^2/v^2)$ و ضریب شکست غیرخطی برابر با $n_2 = 2 \times 10^{-13} (cm^2/W)$ در نظر گرفته شده اند [۴]. با توجه به غیرخطی بودن ماده استفاده شده درون موجبرها و اثر کر، با افزایش شدت توان ورودی، میزان اختلاف ثابت انتشار مدهای متقارن و نامتقارن موجبرهای مجاور افزایش یافته که این امر کاهش طول تزویج و افزایش بازدهی تزویج گر را به دنبال دارد. توزیع میدان مغناطیسی و الکتریکی درون موجبرهای مجاور هم به صورت زیر توصیف می شوند:

$$E = E_x X + E_z Z \quad (3)$$

$$H = H_y Y \quad (4)$$

ضریب دی الکتریک بدنه فلزی و هسته موجبرها نیز با توجه به رابطه زیر توصیف می شوند:

$$\varepsilon(r) = \varepsilon_d + |E_x|^2 + \gamma |E_z|^2 \quad (5)$$

که در آن ε_d ضریب دی الکتریک و γ نیز عامل میرایی^{۱۱} است. ضریب دی الکتریک ماده غیرخطی از میدان های الکتریکی در راستای x و z پیروی کرده و متغیر خواهد بود. در واقع تغییر میدان در راستای ذکر شده، باعث تغییر پارامتر γ (اثر کر) و در نتیجه باعث تغییر ضریب شکست ماده دی الکتریک و ثابت انتشار مدها می شود. توان تزویج شده از موجبر اول به موجبر دوم (خروجی) و در فاصله دلخواه از مرکز $z = 0$ از رابطه زیر به دست می آید [۴].

$$P_{OUT} = \left| \frac{1}{2} [\exp(-j\gamma_s z) - \exp(-j\gamma_a z)] \right|^2 \exp \left[-(\alpha_s + \alpha_a)z \right] \left| \sinh \left[\left(\frac{\alpha_s - \alpha_a}{2} - \frac{j(\beta_s - \beta_a)}{2} \right) z \right] \right|^2 \quad (6)$$

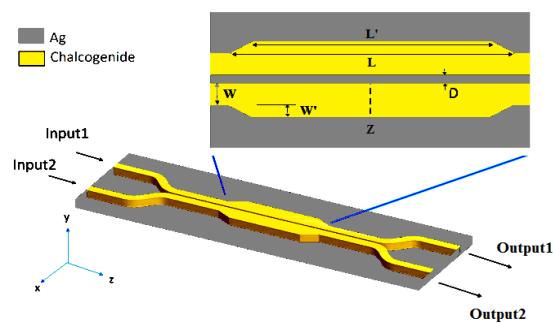
که در آن γ_s و γ_a ثابت انتشار مختلط مدهای متقارن و نامتقارن هستند و به صورت زیر توصیف خواهند شد:

شکافها است. ساختار پیشنهادی، زوایای پذیرش نسبتاً خوبی $(\theta > 28^\circ)$ را تحت پوشش قرار می دهد.

در این مقاله، طرح یک تزویج گر پلاسمونی جهت دار مبتنی بر ساختار MIM، پیشنهاد شده است. تزویج گر پیشنهادی دارای طول تزویج کمتر و بازدهی تزویج بیشتر نسبت به ساختارهای غیرخطی مشابه است. در ادامه ساختار پیشنهادی از لحاظ تئوری مورد بررسی قرار گرفته است. سپس، عملکرد قطعه با استفاده از روش FDTD^{۱۲} شبیه سازی و تحلیل شده است. همچنین، تأثیر پارامترها و ابعاد تزویجگر بر بازدهی تزویج بررسی شده است.

۲- طراحی ساختار تزویج گر پلاسمونی

شکل ۱ نمای سه بعدی ساختار پیشنهادی تزویج گر غیرخطی را نشان می دهد. تزویج گر پیشنهادی از دو موجبر MIM، دو ورودی و دو خروجی تشکیل شده است و به صورت غیرفعال، جهت دار و غیرخطی عمل می کند. از نقره به عنوان لایه پلاسمونی و بدنه موجبرها و از ماده غیرخطی کالکوزناید به عنوان هسته موجبر دی الکتریک استفاده شده است.



شکل (۱): نمای سه بعدی تزویج گر پیشنهادی

در این ساختار جهت کنترل مدهای موجود درون دو موجبر مجاور و تنظیم هم پوشانی آنها در موجبرها، از زائده دوزنقه ای شکل در قسمت بالا و پایین موجبرهای ورودی استفاده شده است. پارامترهای ساختار پیشنهادی (شکل ۱) به صورت W عرض دو موجبر، W' ارتفاع دوزنقه، D فاصله بین دو موجبر، L طول قاعده بزرگ و L' طول قاعده کوچک دوزنقه در نظر گرفته شده اند. با توجه به اینکه طرح موجبر اولیه در محدوده امواج مخابرات نوری عمل می کند، ابعاد آن انتخاب شده و سپس بخشی از آن به صورت تزویج گر مازخ زندر در آمده و بقیه ابعاد مربوط به طرح (L, W, W') مربوط قسمت زائده دوزنقه ای شکل) با نوشتن یک برنامه بهینه سازی، جهت به دست آوردن بیشترین ضریب تزویج و کمترین طول تزویج ممکن، به دست آمده اند. ضریب دی الکتریک ناحیه فلزی (نقره) بر حسب فرکانس، توسط مدل درود و رابطه زیر توصیف می شود [۱۳ - ۱۵]:

$$\gamma_a = \beta_a - j\alpha_a \quad (7)$$

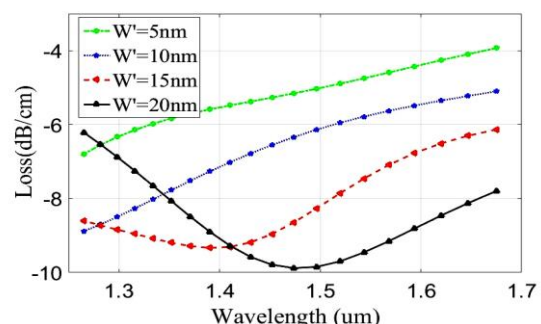
$$\gamma_s = \beta_s - j\alpha_s \quad (8)$$

که در آن β_s و β_a ثابت انتشار مدهای متقارن و نامتقارن، α_s و α_a ثابتهای جذب این مدها هستند. پارامترهای ذکر شده تعیین کننده ضرایب شکست مؤثر مدهای متقارن و نامتقارن موجود درون دو موجبر مجاور هم می باشند. شیفت فاز بین دو موجبر بر حسب اختلاف ضرایب شکست مؤثر مدهای متقارن و نامتقارن و طبق رابطه ۲ به دست می آید. اگر اختلاف فاز بین دو موجبر مجاور به مقدار π برسد حداقل طول تزویج محقق خواهد شد.

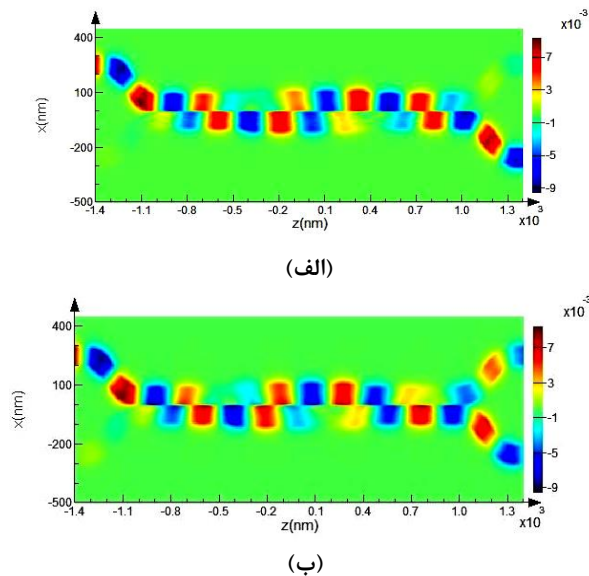
۳- نتایج تحلیل عددی ساختار

در این بخش نتایج شبیه سازی با استفاده از روش تحلیل عددی FDTD ارائه شده است. امواج ورودی دارای قطبش TM بوده و در بازه طول موج ۱۲۶۰ nm تا ۱۶۷۵ nm به ساختار اعمال می شود. شرایط مرزی PML در نظر گرفته شده است. تزویجگر همانند ساختار ماخ-زندر دارای دو ورودی و دو خروجی است. بازدهی تزویج برابر با نسبت $(P_{Output2}/P_{Input1})$ است. تأثیر پارامترهایی نظیر ارتفاع دوزنقه، عرض موجبر و فاصله بین دو موجبر، بر بازدهی تزویج مورد ارزیابی قرار گرفته است.

ابعاد ابتدایی تزویج گر (با روش سعی و خطا) به صورت $D=10\text{ nm}$ و $L=700\text{ nm}$ ، $L=1000\text{ nm}$ ، $W'=20\text{ nm}$ ، $W=8\text{ nm}$ گرفته شده اند. شکل ۲ توزیع میدان مغناطیسی را در دو طول موج ۱۵۵۰ nm (باند C) و ۱۳۱۰ nm (باند O) نشان می دهد. مشخصه تلفات کلی ساختار $L=10\log((P_{Input1}-P_{Output2})/P_{Input1})$ بر حسب طول موج ورودی و به ازاء مقادیر مختلف W' و توان ورودی $4W/\mu\text{m}$ در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به این نمودارها دیده می شود که با افزایش W' میزان تلفات کلی کاهش پیدا کرده و در طول موج ۱۵۵۰ nm به مقدار ۹/۵ dB/cm می رسد.



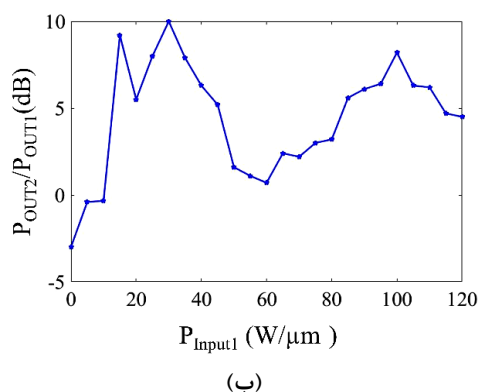
شکل (۳): مشخصه تلفات بر حسب طول موج به ازاء مقادیر مختلف W' در توان ورودی $4W/\mu\text{m}$



شکل (۲): (الف) توزیع میدان مغناطیسی در طول موج $\lambda=1310\text{ nm}$ و توان $4W/\mu\text{m}$ (ب) توزیع میدان مغناطیسی در طول موج $\lambda=1550\text{ nm}$ و توان ورودی $4W/\mu\text{m}$

شکل ۴ مشخصه بازدهی تزویج $(P_{Output2}/P_{Input1})$ را بر حسب طول موج به ازاء مقادیر مختلف W' و در توان ورودی $4W/\mu\text{m}$ نشان می دهد. نتایج نشان می دهند که با افزایش W' و به دنبال آن، اختلاف بیشتر ضرایب شکست مؤثر مد متقارن و نامتقارن، قله نمودار به سمت طول موج های بالاتر حرکت می کند. دلیل این امر این است که با افزایش مقدار W' و افزایش منطقه مؤثر مدها، شیفت فاز بین مدهای موجبرهای مجاور به مقدار π نزدیک شده و این امر کاهش طول تزویج و افزایش بازدهی را به خصوص در باند مخابراتی ۱۲۶۰ nm تا ۱۶۷۵ nm به دنبال دارد. به عنوان مثال، برای $W'=20\text{ nm}$ و طول موج ۱۵۵۰ nm، مقدار بازدهی تزویج حدود ۸۵٪ خواهد شد. طول تزویج در این طول موج، برابر با ۶۵۰ nm است. همچنین، با افزایش فاصله D ، بازدهی تزویج نیز کاهش می یابد (شکل ۵). با افزایش D ضرایب شکست مدهای مؤثر متقارن و نامتقارن موجبر ورودی و خروجی به هم نزدیک شده که باعث افزایش طول تزویج و کاهش شیفت فاز بین مدهای دو موجبر می شود. نمودار شکل ۵ نشان می دهد که در $D=10\text{ nm}$ و طول موج ۱۵۵۰ nm، بازدهی تزویج نزدیک به ۹۰٪ است.

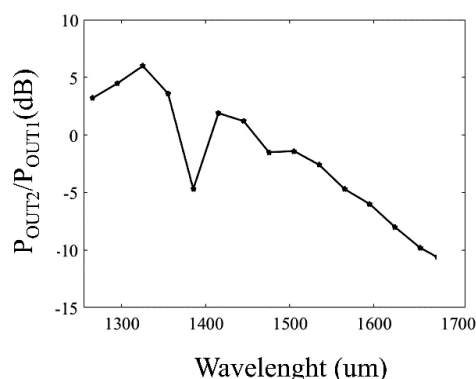
در ادامه تغییرات توان خروجی نرمالیزه شده نسبت به ورودی درگاه اول و دوم، در طول موج ۱۵۵۰ nm و ۱۳۱۰ nm محاسبه شده است (شکل ۶). نتایج نشان می دهند که با افزایش توان موج ورودی اول، توان موج انتقال یافته در درگاه خروجی اول و دوم نیز افزایش یافته است. همچنین، تغییرات ضریب شکست ماده دی الکتریک برای طول موج ورودی ۱۳۱۰ nm بیشتر از طول موج ورودی ۱۵۵۰ nm است. به عنوان مثال در توان ورودی $100W/\mu\text{m}$ و طول موج ۱۳۱۰ nm، نسبت توان خروجی دوم به اول، تقریباً برابر با ۸ dB است.



شکل (۶): مشخصه P_{Out2}/P_{Out1} بر حسب توان ورودی (الف)
 $\lambda = 1310\text{nm}$ (ب) $\lambda = 1550\text{nm}$

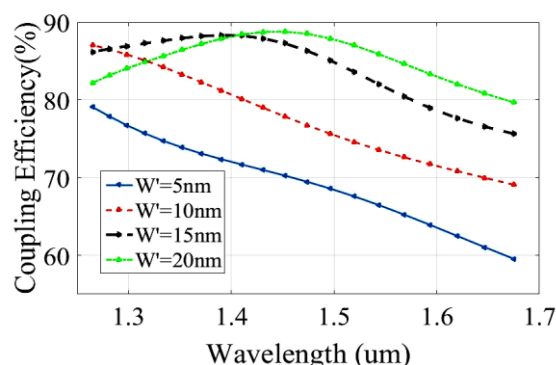
سیس مشخصه P_{Out2}/P_{Out1} بر حسب طول موج و توان ورودی $100\text{W}/\mu\text{m}$ محاسبه شده است (شکل ۷). نمودار به دست آمده نشان می‌دهد که در توان ورودی $100\text{W}/\mu\text{m}$ ، میزان تغییرات ضریب شکست کالکوزناید بیشتر از حالتی است که توان ورودی $4\text{W}/\mu\text{m}$ است و این تغییر ضریب شکست به خصوص در طول موج مخابراتی 1550nm به خوبی نمایان است.

شکل ۸ بازدهی تزویج در دو طول موج 1310nm و 1550nm را بر حسب توان ورودی نشان می‌دهد. با توجه به این شکل دیده می‌شود که با افزایش توان ورودی تا $4\text{W}/\mu\text{m}$ ، بازدهی تزویج نیز، تا مقدار تقریبی ۸۰٪ افزایش پیدا می‌کند. با افزایش توان ورودی به ساختار، ثابت انتشار مدهای متقارن و نامتقارن نیز تغییر می‌کند. این امر باعث تغییر طول تزویج می‌شود. تغییرات طول تزویج در طول موج 1310nm نسبت به طول موج 1550nm کمتر است. به همین دلیل نیز تغییرات بازدهی خروجی در طول موج 1310nm نسبت به طول موج 1550nm کمتر است. بیشترین بازدهی در طول موج 1310nm در توان $25\text{W}/\mu\text{m}$ و تقریباً برابر با ۹۲٪ به دست می‌آید.

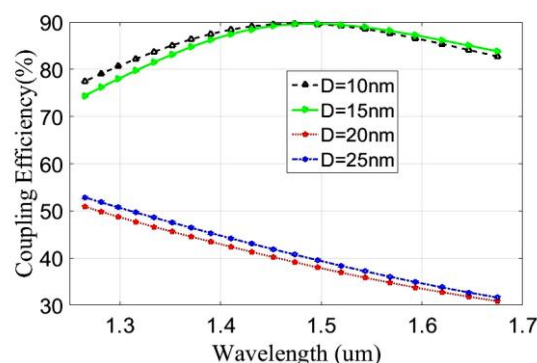


شکل (۷): مشخصه P_{Out2}/P_{Out1} بر حسب طول موج در توان ورودی $100\text{W}/\mu\text{m}$

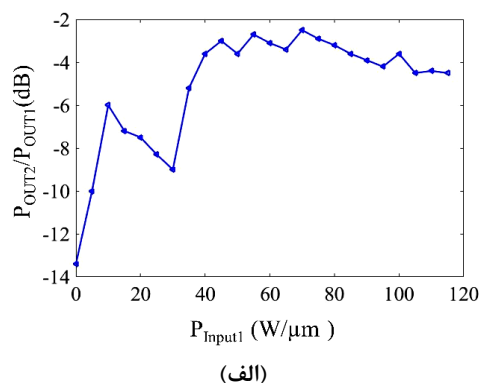
در حالی که در طول موج 1550nm با همین توان ورودی، این نسبت برابر با $-3/8\text{dB}$ است.



شکل (۴): مشخصه بازدهی تزویج بر حسب طول موج به ازاء مقادیر مختلف W' و توان ورودی $4\text{W}/\mu\text{m}$



شکل (۵): مشخصه بازدهی تزویج بر حسب طول موج و به ازاء مقادیر مختلف D در توان ورودی $4\text{W}/\mu\text{m}$



(الف)

با توجه به نتایج موجود در جدول، ساختار طرح [۸] دارای طول تزویج مطلوب در طول موج مخابراتی 1550 nm است. اگرچه ساختار مرجع [۱۰] در طول موج ورودی 1550 nm و توان ورودی $4/3\text{ W}/\mu\text{m}$ دارای میزان بازدهی خروجی به 98% است اما طول تزویج حداقل برابر با 887 nm می‌باشد. در طرح مرجع [۱۱]، بازدهی تزویج در طول موج مخابراتی 1550 nm حدود 43% و طول تزویج برابر با 1500 nm است. ساختار پیشنهادی در مرجع [۱۷] دارای عملکرد مناسب در طول موج آبی و دارای بازدهی 20% است. طرح ارائه شده در مرجع [۱۸] در مورد تزویج موجبرهای کریستال نوری غیرخطی است و دارای بازدهی خوبی نیست. طرح مرجع [۱۹] دارای ساختاری متفاوت و به صورت تزویج در جهت غیرمستقیم ADC^{12} بوده و اگرچه دارای بازدهی تزویج نسبتاً خوبی است اما در نتایج ارائه شده، ناحیه عملکرد و طول تزویج آن مشخص نیست. بنابراین، ساختار پیشنهادی، در مجموع از لحاظ بازدهی تزویج و طول تزویج به سایر طرح‌های موجود ارجحیت دارد.

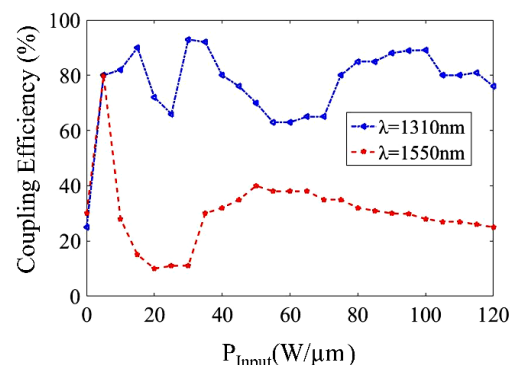
جدول (۲): مقایسه طرح پیشنهادی با ساختارهای غیرخطی دیگر

مرجع	طول موج (nm)	طول تزویج (nm)	بازدهی (%)
[۸]	۱۵۵۰	۳۸۰	-
[۱۰]	۱۵۵۰	۸۸۷	۹۸
[۱۱]	۱۵۵۰	۱۵۰۰	۴۳
[۱۷]	۴۸۰	-	۲۰
[۱۸]	۱۵۵۰	-	۱۵
	۱۸۰۰	-	۴۵
[۱۹]	-	-	۹۰
ساختار پیشنهادی	۱۳۱۰	۵۱۰	۹۲
	۱۵۵۰	۶۵۰	۸۱

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله طرح پیشنهادی یک نوع تزویجگر پلاسمونی جهت‌دار با استفاده از روش عددی FDTD مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. با توجه به اثر کر و ماده غیرخطی مورد استفاده به عنوان موجبر دی-الکتریک در این تزویجگر، میزان انتقال توان ورودی در خروجی‌ها کنترل پذیر است. تزویجگر پیشنهادی در طول موج 1550 nm و توان ورودی کم، دارای بازدهی تزویج حدود 90% است. طول تزویج طرح پیشنهادی در این حالت 650 nm است. در حالی که در توان

وجود زائده دوزنقه ای شکل در موجبر ورودی باعث شیف‌ت فاز مدهای موجبر ورودی و خروجی می‌شود. این شیف‌ت فاز بسیار به ابعاد دوزنقه وابسته است و باعث تغییر طول تزویج می‌شود. همان‌طور که مشاهده شد به ازاء برخی پارامترهای زائده دوزنقه‌ای شکل، بازدهی در خروجی در باندهای مخابراتی به حداکثر خود می‌رسد. حداقل طول تزویج در حالت خطی و توان ورودی کم برابر با $4\text{ W}/\mu\text{m}$ و طول موج 1550 nm ، برابر با 650 nm و بازدهی تزویج نیز بیش از 80% درصد است، در حالی که در طول موج 1310 nm و در حالت غیرخطی و توان ورودی زیاد $100\text{ W}/\mu\text{m}$ ، حداقل طول تزویج برابر با 510 nm و بازدهی تزویج بیش از 90% است. جدول ۱، طول تزویج در طول موج‌های مرکزی باندهای مخابراتی را به ازاء توان‌های ورودی کم و زیاد نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود کمترین طول تزویج در توان ورودی $100\text{ W}/\mu\text{m}$ و طول موج 1495 nm (باند S) برابر با 375 nm می‌باشد، در حالی که در توان ورودی کم، تغییر چندانی بین طول تزویج باندهای مخابراتی مشاهده نمی‌شود. کمترین طول تزویج در توان ورودی $4\text{ W}/\mu\text{m}$ در طول موج 1495 nm و برابر با 634 nm است. جدول ۲ نیز مقایسه بین ویژگی‌های طرح پیشنهادی و ساختارهای غیرخطی موجود را نشان می‌دهد.



شکل (۸): مشخصه بازدهی تزویج بر حسب توان ورودی در دو طول موج 1550 nm و 1310 nm

جدول (۱): مقایسه طول تزویج ساختار پیشنهادی در طول موج‌های مخابراتی مختلف به ازاء دو توان ورودی مختلف

طول موج (nm)	طول تزویج (nm) $P_{\text{In}}=4\text{ W}/\mu\text{m}$	طول تزویج (nm) $P_{\text{In}}=100\text{ W}/\mu\text{m}$
۱۳۱۰ (باند O)	۶۸۰	۵۱۰
۱۴۱۰ (باند E)	۶۵۲	۴۵۶
۱۴۹۵ (باند S)	۶۳۴	۳۷۵
۱۵۵۰ (باند C)	۶۵۰	۱۴۱۰
۱۵۹۵ (باند L)	۶۶۷	۱۳۲۴
۱۶۵۰ (باند U)	۷۰۲	۵۷۵

- [12] Lu, F., Xiao, F., Li, K., Xu, A., "Ultra-broadband wide-angle unidirectional plasmonic coupler based on joint effects of plasmonic critical angles and subwavelength metallic gratings", *Optics letters*, Vol. 39, No. 11, pp. 3254-3257, 2014.
- [13] Salgueiro, J. R., Kivshar, Y.S., "Optimization of biased PT-symmetric plasmonic directional couplers", *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, Vol. 22, No. 5, pp. 60-66, 2016.
- [14] Cheng, Ch., Fan, R., Fan, G., Liu, H., Zhang, J., Shen, J., Ma, Q., Wei, R., Guo, Z., "Tunable negative permittivity and magnetic performance of yttrium iron garnet/polypyrrole metamaterials at the RF frequency", *Journal of Materials Chemistry C*; Vol. 7, No. 8, pp. 3160-3167, 2019.
- [15] Gong, D., Yuan, Y., Liang, L., Yang, M., "Theoretical study on negative permittivity of the material producing sharp surface plasmon resonance dips", *Chinese Optics Letters*, Vol. 17, No. 4, p. 042801, 2019.
- [16] Holmgaard, T., Chen, Z., Bozhevolnyi, S. I., Markey, L., Dereux, A., "Design and characterization of dielectric-loaded plasmonic directional couplers", *Journal of Lightwave Technology*, Vol. 27, No. 24, pp. 5521-5528, 2009.
- [17] Salgueiro, J. R., Kivshar, Y. S., "Nonlinear plasmonic directional couplers", *Applied Physics Letters*, Vol. 97, No. 8, p. 081106, 2010.
- [18] Curillaa, L., Astrauskas, I., Pugzlys, A., Stajanca, P., Pysz, D., Uherek, F., Baltuska, A., Bugar, I., "performance of asymmetric coupler based on dual-core photonic crystal fiber: Towards sub-nanojoule solitonic ultrafast all-optical switch", *Optical Fiber Technology*, Vol. 42, pp. 39-49, 2018.
- [19] Govindarajan, A., Malomed, B. A., Lakshmanan, M., "Tunable nonlinear spectra of anti-directional couplers", *Optics letters*, Vol. 45, No. 7, pp. 1-4, 2020.

زیر نویس ها

- ¹ Mingbo Pu
² Poly (2-methoxy-5-(28-ethylhexyloxy)-PPV
³ Rakesh
⁴ Chalcogenide
⁵ Kerr cross Phase Modulation
⁶ Petracek
⁷ Lu
⁸ Plasmonic Critical Angle
⁹ Total Internal Reflection
¹⁰ Finite-Difference Time-Domain
¹¹ Damping Factor
¹² Anti-Directional Coupler

ورودی $25\text{W}/\mu\text{m}$ و طول موج ورودی 1310nm ، بازدهی تزویج بیش از ۹۲٪ و طول تزویج برابر با 510nm است. وجود ساختار دوزنقه‌ای شکل در موجبر ورودی باعث تغییر ضریب شکست مؤثر مداهای متقارن و نامتقارن شده که این امر باعث شیفت فاز و به دنبال آن کاهش طول تزویج می‌شود. ضمناً، با توجه به ابعاد ساختار، طول موج عملکرد (باندهای C و O مخابراتی) و مواد به کار رفته در ساختار، می‌توان از آن در مدارهای مجتمع نوری مخابراتی استفاده کرد.

مراجع

- [1] Elbially, S., Yousif, B., Samra, A., "Modeling of active plasmonic coupler and filter based on metal-dielectric-metal waveguide", *Optical and Quantum Electronics*, Vol. 49, No. 4, pp. 1-19, 2017.
- [2] Kang, L., Jenkins, R. P., Werner, D. H., "Recent progress in active optical metasurfaces." *Advanced Optical Materials*, Vol. 7, No. 14, p. 1801813, 2019.
- [3] Kumar, K., Liu, Q., Hiller, J., Schedel, Ch., Maier, A., Meixner, A., Braun, K., Lauth, J., Scheele, M., "Fast, Infrared-Active Optical Transistors Based on Dye-Sensitized CdSe Nanocrystals." *ACS applied materials & interfaces*, Vol. 11, No. 51, pp. 48271-48280, 2019.
- [4] Noghani, M.T., Samiei, M. H. V., "Ultrashort hybrid metal-insulator plasmonic directional coupler", *Applied optics*, Vol. 52, No. 31, pp. 7498-7503, 2013.
- [۵] عریضی همایون، سیاه کاری محمدجواد، "تحلیل و طراحی تزویجگر جهتی نامتقارن چند بخشی به همراه تطبیق امپدانس ورودی و خروجی"، *مجله انجمن مهندسی برق و الکترونیک ایران*، دوره ۱۷، شماره ۳، صفحات ۱۰۷-۱۰۱، ۱۳۹۹.
- [۶] امامی فرزین، رفیعی عصمت، نگهداری روزبه، "طراحی و شبیه سازی ساختار فیلتر نوری فلز-عایق-فلز برپایه رینگ شکاف دار پلاسمونیک"، *مجله مهندسی برق و الکترونیک ایران*، دوره ۱۸، شماره ۱، صفحات ۶۹-۶۵، ۱۴۰۰.
- [7] Pu, M., Yao, N., Hu, Ch., Xin, X., Zhao, Z., Wang, Ch., Luo, X., "Directional coupler and nonlinear Mach-Zehnder interferometer based on metal-insulator-metal plasmonic waveguide", *Optics Express*, Vol. 18, No. 20, pp. 21030-21037, 2010.
- [8] Mote, R. G., Chu, H. S., Bai, P., Li, E. P., "Compact and efficient coupler to interface hybrid dielectric-loaded plasmonic waveguide with silicon photonic slab waveguide", *Optics Communications*, Vol. 285, No. 18, pp. 3709-3713, 2012.
- [9] Nozhat, N., Granpayeh, N., "Switching power reduction in the ultra-compact Kerr nonlinear plasmonic directional coupler", *Optics Communications*, Vol. 285, No. 6, pp. 1555-1559, 2012.
- [10] Nozhat, N., Granpayeh, N., "Controlling the coupling ratio of the plasmonic directional couplers by SPM and XPM nonlinear effects", *21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, Mashhad, Iran, 14-16 May, 2013.
- [11] Petráček, J., "Nonlinear directional coupling between plasmonic slot waveguides", *Applied Physics B*, Vol. 112, No.4, pp. 593-598, 2013.