

کوچک‌سازی و افزایش پهنای باند تفکیک‌کننده قطبش ماخ – زندر با استفاده از تزویج‌گر چندمد غیریکنواخت

شهریار فرهادی^۱، دانشجوی کارشناسی ارشد؛ مهدی میری^۲، استادیار؛ محمدحسین شیخی^۳، استاد

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه شیراز - شیراز - ایران - sh.farhadi@shirazu.ac.ir

۲- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه شیراز - شیراز - ایران - miri@shirazu.ac.ir

۳- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه شیراز - شیراز - ایران - msheikhi@shirazu.ac.ir

چکیده: در این مقاله یک ساختار تفکیک‌کننده قطبش با چیدمان ماخ-زندر (MZI) ارائه شده که در آن از تزویج‌گرهای تداخل چندمد (MMI) غیریکنواخت و بازوهای ناهمسان مبتنی بر موجبر SOI استفاده شده است. تداخل سازنده و یا مخرب برای دو قطبش مختلف نور ورودی و در نتیجه آن تفکیک دو قطبش مختلف، بر اساس تفاوت رفتار فرکانسی دو بازوی MZI محقق می‌گردد. با در نظر گرفتن طول موج مرکزی ۱۵۵۰ nm، ساختار به گونه‌ای طراحی شده است که بهترین عملکرد را در محدوده طول موج ۱۵۰۰ nm تا ۱۶۰۰ nm داشته باشد. نتایج به دست آمده، تلفات عبور کمتر از ۰/۸ dB، نسبت تفکیک قطبش بیشتر از ۱۵ dB، برای قطبش میدان الکتریکی و نسبت تفکیک قطبش بیشتر از ۱۰ dB را برای قطبش میدان مغناطیسی، در محدوده بسیار وسیع طول موج ۱۵۰۰ nm تا ۱۶۰۰ nm نشان می‌دهد. ساختار طراحی شده در مقایسه با تفکیک‌کننده‌های قطبش مبتنی بر کوپلر جهتی پهنای باند بسیار بیشتر و حساسیت کمتری نسبت به خطاهای ساخت دارد. به علاوه ابعاد کلی ساختار طراحی شده $3.86 \times 60 \mu\text{m}^2$ است که نسبت به تفکیک‌کننده‌های قطبش مبتنی بر MZI دارای ابعاد کوچک‌تری است.

واژه‌های کلیدی: تفکیک‌کننده قطبش، تداخل‌گر ماخ – زندر، تزویج‌گر تداخل چندمد، سیلیکون – روی – عایق، نسبت تفکیک قطبش.

Miniaturization and bandwidth enhancement of Mach-Zehnder polarization splitter using non-uniform multimode interferometers

Shahriar Farhadi, MSc student¹; Mehdi Miri, Assistant Professor²; Mohammad Hossein Sheikhi, Professor³

1- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran, Email: sh.farhadi@shirazu.ac.ir

2- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran, Email: miri@shirazu.ac.ir

3- Faculty of Electrical and Computer Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran, Email: msheikhi@shirazu.ac.ir

Abstract: The design of a compact wideband polarization splitter based on Mach-Zehnder interferometer (MZI) with non-uniform multi-mode interferometer (MMI) couplers is presented in this manuscript. The polarization splitting in the proposed structure stems from polarization dependent dispersion of non-uniform silicon-on-insulator (SOI) waveguides used as the MZI arms. The use of non-uniform MMI couplers increases the bandwidth of the structure while reduces its sensitivity to fabrication imperfections. Our simulation results show the very low insertion loss of 0.8dB, and high polarization extinction ratios of 10dB and 15dB for transverse magnetic and transverse electric field polarization, respectively, in the ultra-wide bandwidth of 100nm (1500nm-1600nm). The proposed polarization splitter has wider bandwidth and larger fabrication tolerance compared to the directional coupler based splitter. In addition total footprint is $3.86 \times 60 \mu\text{m}^2$ which is much smaller than MZI based splitters.

Keywords: Polarization beam splitter, Mach-Zehnder Interferometer (MZI), Silicon-On-insulator (SOI), Polarization Extinction ratio (PER).

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۴/۱۰

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۱۸

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۱۰/۰۳

نام نویسنده مسئول: مهدی میری

نشانی نویسنده مسئول: ایران - شیراز - ابتدای خیابان زند - دانشکده مهندسی شماره ۱ - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر.

۱- مقدمه

شونده که نقش افزاینده مرتبه مد را بازی می‌کند، تشکیل شده است. موجبرهای باریک شونده مد TM0 را به مد TE1 تبدیل می‌کند که پس از عبور از تزویجگر MMI مبدل مد، جابه‌جا کننده فاز ۹۰-درجه و تزویجگر ۳-dB MMI، به صورت TE0 خارج می‌شود. در خروجی‌های این تفکیک‌کننده فقط مد TE0 قابل دریافت است و قابلیت تفکیک مدهای TE0 و TM0 و انتقال آن به خروجی‌های متفاوت را ندارد. در این ساختار، هم‌نشویی برای هر دو قطبش ورودی در بازه ۱۵۳۰ nm تا ۱۵۶۰ nm کم‌تر از ۱۷ dB- است. تلفات انتقال این ساختار کمتر از ۰/۶ dB و پهنای باند آن ۱۱۰ nm است. ابعاد کلی این ساختار $۶ \times ۲۰۸ \mu\text{m}^2$ است.

در این مقاله یک ساختار تفکیک‌کننده قطبش با چیدمان MZI ارائه شده که در آن از تزویجگرهای MMI غیریکنواخت با بازوهای ناهمسان مبتنی بر موجبر SOI استفاده شده است. تداخل سازنده و یا مخرب برای دو قطبش مختلف نور ورودی و در نتیجه آن تفکیک دو قطبش مختلف، بر اساس تفاوت رفتار فرکانسی دو بازوی MZI محقق می‌گردد. با در نظر گرفتن طول موج مرکزی ۱۵۵۰ nm، ساختار به گونه‌ای طراحی شده است که بهترین عملکرد را در محدوده طول موج ۱۵۰۰ nm تا ۱۶۰۰ nm داشته باشد. نتایج به دست آمده از شبیه‌سازی ساختار ارائه شده، با استفاده از روش تفاضل‌های متناهی در حوزه زمان سه بعدی (3D FDTD)، تلفات عبور (IL) کمتر از ۰/۱ dB نسبت به تفکیک بیشتر از ۱۵ dB را برای قطبش میدان الکتریکی (TE) و نیست تفکیک بیشتر از ۱۰ dB را برای قطبش میدان مغناطیسی (TM)، در باند فرکانسی بسیار وسیع ۱۵۰۰ nm تا ۱۶۰۰ nm نشان می‌دهد؛ به علاوه ابعاد کلی ساختار طراحی شده $۳/۸۶ \times ۶۰ \mu\text{m}^2$ است که نسبت به ساختارهای پیشنهادی مشابه در مراجع [۱۱-۱۲] دارای ابعاد کوچک‌تر و همچنین پیاده‌سازی آن تنها نیازمند یک مرحله لیتوگرافی و اچینگ^{۱۲} است. عدم نیاز به زیرلایه‌های گران‌قیمت و لایه‌نشانی فلز (مشابه ساختار پیشنهادی در [۱۱]) از دیگر ویژگی‌های این تفکیک‌کننده قطبش است.

۲- طراحی ساختار تفکیک‌کننده قطبش

شکل ۱ شمای کلی تفکیک‌کننده قطبش را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این شکل دیده می‌شود، ساختار متشکل از یک چیدمان MZI با بازوهای نامتقارن است که در آن از تزویجگرهای MMI به عنوان مقسم و ترکیب‌کننده توان^{۱۳} استفاده شده است. علت استفاده از چیدمان ماخ-زندر در این تفکیک‌کننده قطبش، حساسیت کمتر آن به خطاهای موجود در مراحل ساخت و همچنین پهنای باند بیشتر آن نسبت به ساختارهای مبتنی بر تزویجگرهای جهتی است؛ البته این بهره بردن از ویژگی به بهای افزایش طول کلی ساختار تمام می‌شود. نور ورودی با قطبش TE/TM توسط تزویجگر MMI اول (که برای کاهش طول کلی و هم‌زمان دستیابی به کمترین تلف عبور و بیشترین پهنای باند به صورت غیریکنواخت پیاده‌سازی شده است) به دو قسمت مساوی با

مدارات مجتمع فوتونیک^۱ به دلیل ویژگی‌های بارزی چون پهنای باند بسیار زیاد، ابعاد کوچک و هزینه‌ی ساخت پایین همواره مورد توجه بوده‌اند. از میان گزینه‌های مختلف قابل استفاده به عنوان زیرلایه^۲، سیلیکون - روی - عایق (SOI)^۳ به دلیل سازگاری با فناوری CMOS و اختلاف ضریب شکست بالا به یک زیرلایه جذاب برای دستیابی به مدارات مجتمع فوتونیک با چگالی بالا تبدیل شده است [۴-۱]. یکی از چالش‌هایی که مدارات مجتمع فوتونیک بر پایه‌ی SOI با آن روبرو هستند حساسیت بالای این ادوات به قطبش نور و ناشی از اختلاف ضریب شکست بالای لایه‌های سازنده‌ی SOI (سیلیکون و اکسید سیلیکون) است. این مشکل باعث عدم سازگاری مدارهای مجتمع نوری مبتنی بر SOI با سیستم‌های فیبر نوری می‌شود که در آن قطبش نور خروجی از فیبر به صورت تصادفی تغییر می‌کند [۵]. یکی از راهکارهای مناسب به منظور غلبه بر این مشکل استفاده از تفکیک‌کننده‌ی قطبش^۴ به منظور تفکیک قطبش‌های مختلف ورودی و هدایت آن‌ها به سمت خروجی‌های مختلف است. تاکنون ساختارهای مختلفی جهت تفکیک قطبش نور منتشر شونده در مدارهای مجتمع نوری ارائه شده است که ساختارهای مبتنی بر تزویجگر جهتی^۵ [۶]، اتصال Y [۷]، تداخلگر ماخ - زندر (MZI)^۸ و تزویجگر تداخل چندمد (MMI)^۹ از جمله آن‌ها هستند که از این میان ادوات مبتنی بر MMI به دلیل تلفات کم، مقاومت بالا در برابر خطای ساخت، پهنای باند زیاد و ساخت نسبتاً آسان، نسبت به سایر ساختارها دارای برتری هستند [۱۰].

تاکنون تفکیک‌کننده‌های قطبش مبتنی بر MMI متعددی ارائه شده است. در [۱۱] یک تفکیک‌کننده ماخ-زندی با استفاده از دو 2×2 MMI بر مبنای InGaAsP/InP گزارش شده است. بازوهای ماخ-زندر در این تفکیک‌کننده دارای ثابت‌انتشار برابر برای مد TE و ثابت-انتشار متفاوت برای مد TM هستند. ثابت‌انتشار متفاوت برای مد TM با ایجاد یک لایه دی‌الکتریک (SiO₂) و فلز (Au) بر روی یکی از بازوهای ماخ-زندر ایجاد می‌شود. مد TE در عبور از بازوها هیچ جابه‌جایی فاز نسبی را تجربه نمی‌کند؛ اما مد TM جابه‌جایی فاز نسبی π را تجربه می‌کند که این خود باعث تفکیک دو قطبش در تزویجگر MMI خروجی می‌شود. این تفکیک‌کننده قطبش دارای PER حدود ۱۹ dB و ۱۵ dB به ترتیب برای قطبش TE و TM در طول موج ۱۵۱۰ nm است. تلفات انتقال این ساختار ۱/۵ dB و طول آن ۳/۳ mm است. در [۱۲] یک تفکیک‌کننده قطبش ماخ-زندی با استفاده از دو تزویجگر 2×2 MMI و بازوهای ناهمسان با عرض متفاوت گزارش شده که در آن اختلاف ضریب شکست مؤثر در بازوهای ناهمسان باعث تفکیک قطبش می‌شود. در این ساختار، PER برای هر دو قطبش در بازه‌ی ۱۵۴۰ nm تا ۱۵۸۰ nm بیش از ۱۰ dB است. طول کلی این ساختار $۳/۳۶ \times ۲۰۰ \mu\text{m}^2$ است. ساختار تفکیک‌کننده پیشنهادی در [۱۳] از دو تزویجگر MMI پشت سرهم به همراه موجبرهای باریک

باشد که در آن E_i دامنه میدان ورودی از ورودی i -ام، $\delta(x)$ تابع دلتای دیراک، \otimes عملگر کانولوشن و ip محل قرارگیری موجبرهای تک‌مُد اتصالی i -ام است.

می‌توان نشان داد بردارهای دامنه N -تایی E_{0r} (تا $r=1$) وجود دارد که بیانگر الگوهای شدت میدانی هستند که در فواصل $z=L_N$ تکرار می‌شوند. آن‌ها بردارهای ویژه (۱) برای طول انتشار $\Delta z=L_N$ زمانی که میدان به فرم (۳) باشند، هستند. عنصر i -ام از r -امین بردار ویژه توسط رابطه (۴) بیان می‌شود.

$$E_{0ir} = v_{ir} = \frac{2}{\sqrt{2N+2}} \sin\left(\frac{ir\pi}{N+1}\right) \quad (4)$$

که در آن v_{ir} عنصر سطر i -ام و ستون r -ام از ماتریس V_N است. زمانی که یک بردار ویژه E_{0r} در (۲) و (۳) جایگذاری می‌شود، ضرایب غیرصفر \tilde{E}_m به ازای $m=2s(N+1)\pm r$ برای $s=0, 1, 2, \dots$ هستند. زمانی که جمع (۱) به این مقادیر m محدود می‌شود، به‌جز آفست فاز ثابت φ_r ، جمع (۱) در $z=L_N$ با $z=0$ برابر است. N بردار ویژه، یک مجموعه متعامد یکه را تشکیل می‌دهند؛ در نتیجه هر ورودی می‌تواند به‌صورت جمع بردارهای ویژه بیان شود. بردار ویژه r -ام، یک مقدار ویژه متناظر b_r دارد که توسط

$$b_r = \exp(j\varphi_r) = \exp\left(j\frac{r^2\pi}{2N+2}\right) \quad (5)$$

بیان می‌شود که φ_r جابه‌جایی فاز مُد r -ام زمانی که نور یک فاصله $\Delta z=L_N$ را طی می‌کند، است. ماتریس M_N با استفاده از این بردارها و مقادیر ویژه با رابطه ماتریسی $M_N = V_N B_N V_N^T$ تعیین می‌شود که در آن V_N^T ترانهاده ماتریس V_N و B_N یک ماتریس با مقادیر ویژه روی قطر اصلی و صفر در سایر نقاط است.

یک عبارت کلی برای عنصر M_{uv} در سطر u و ستون v از ماتریس M_N می‌تواند به فرم

$$M_{uv} = 2j \frac{\exp(j\frac{\pi}{4})}{\sqrt{6}} \sin\left(\frac{\pi v u}{3}\right) \exp\left(-j\frac{\pi(v^2+u^2)}{6}\right) \quad (6)$$

نوشته شود.

برای یک ساختار تزویجگر 2×2 MMI (با طول مشخص $L=L_N/2$)، می‌توان رابطه دامنه میدان مختلط در موجبرهای ورودی و خروجی را توسط ماتریس انتقال M_2 به‌نحوی که در (۷) دیده می‌شود، بیان کرد [۱۴].

$$\begin{bmatrix} E_{out_1} \\ E_{out_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_{in_1} \\ E_{in_2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

بر اساس این رابطه ماتریسی در صورتی که میدان‌های ورودی به این تزویجگر هم دامنه باشند و فاز میدان ورودی از موجبر یک، E_{in_1} ، به میزان $\pi/2$ از میدان ورودی از موجبر دو، E_{in_2} ، بزرگ‌تر باشد، توان خروجی تماماً به موجبر دوم تزویج خواهد یعنی؛ $|E_{out_1}| = 0$ و $|E_{out_2}|$

فازهای یکسان تقسیم می‌شود. سپس این دو موج به بازوهای MZI تزویج می‌شود که دو موجبر ناهمسان با پهنای مختلف (W_1 و W_4)، در شکل ۱ هستند. به دلیل تفاوت در ضریب شکست مؤثر دو موجبر (که ناشی از متفاوت بودن عرض آن‌هاست) نور عبوری از این بازوهای ناهمسان تغییر فازهای متفاوتی را تجربه می‌کند و در نهایت بین نور خروجی از این بازوها اختلاف‌فازی به وجود خواهد آمد. این فاز برای مُد TE و TM نور عبوری متفاوت است. تزویجگر MMI دوم که به‌عنوان ترکیب‌کننده‌ی توان عمل می‌کند، نورهای ورودی را با توجه به اختلاف‌فاز میان آن‌ها پس از ترکیب به یکی از خروجی‌ها هدایت می‌کند. شکل ۲ (الف) و (ب) به ترتیب شمای کلی یک ساختار تزویجگر 2×2 MMI و سطح مقطع ساختارهای موجبر مبتنی بر ویفر SOI به‌کاررفته در محاسبات و شبیه‌سازی‌های این مقاله را نشان می‌دهد. در این مقاله منظور از مُد TE و TM به ترتیب مُدی از موجبر است که مؤلفه غالب میدان الکتریکی آن در راستای x و y قرار داشته باشد (محورهای مختصات در شکل ۱ و در شکل ۲ (ب) دیده می‌شوند).

یک تزویجگر $N \times N$ MMI شبیه تزویجگر 2×2 MMI نشان داده شده در شکل ۲ را در نظر بگیرید (درواقع شکل ۲ حالت ساده‌شده‌ی تزویجگر $N \times N$ MMI با دو ورودی و دو خروجی است). این تزویجگر، دارای N موجبر تک‌مُد ورودی برای تزریق نور به ناحیه چندمُد در $z=0$ و N موجبر تک‌مُد خروجی برای دریافت نور در $z=L$ است. برای چنین تزویجگری می‌توان یک ماتریس M_N برای محاسبه دامنه‌ی مختلط N تصویر خروجی به ازای N تصویر ورودی در طول L_N ، به‌نحوی که در ادامه بیان می‌شود، ارائه کرد.

با یک تزویجگر به طول $L=L_N=2\Lambda/(N+1)$ که در آن $\Lambda = n_r W_e^2 / \lambda_0$ طول موج فضای آزاد، W_e عرض ناحیه‌ی چندمُد و n_r ضریب شکست مؤثر ناحیه چندمُد است، شروع می‌کنیم. L_N کوتاه‌ترین طول برای یک تزویجگر $N \times N$ بدون تلف (ازلحاظ تئوری) است. در این تزویجگر اگر اختلاف ضریب شکست ناحیه‌ی هسته (موجبر تک‌مُد و چندمُد) با پوشش زیاد باشد، می‌توان توزیع میدان الکتریکی در ناحیه چندمُد را به‌صورت رابطه‌ی (۱) بیان کرد.

$$E(x, z) = \exp(-jkz) \sum_{m=1}^M \tilde{E}_m \exp\left(j\frac{m^2\pi}{4\Lambda}z\right) \sin\left(\frac{m\pi}{W_e}x\right) \quad (1)$$

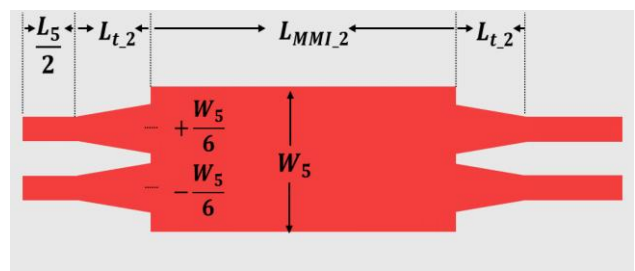
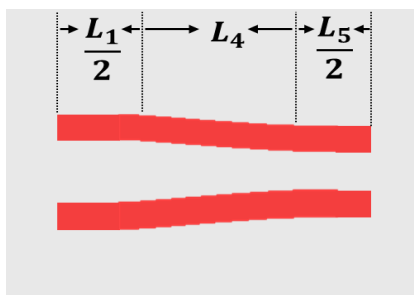
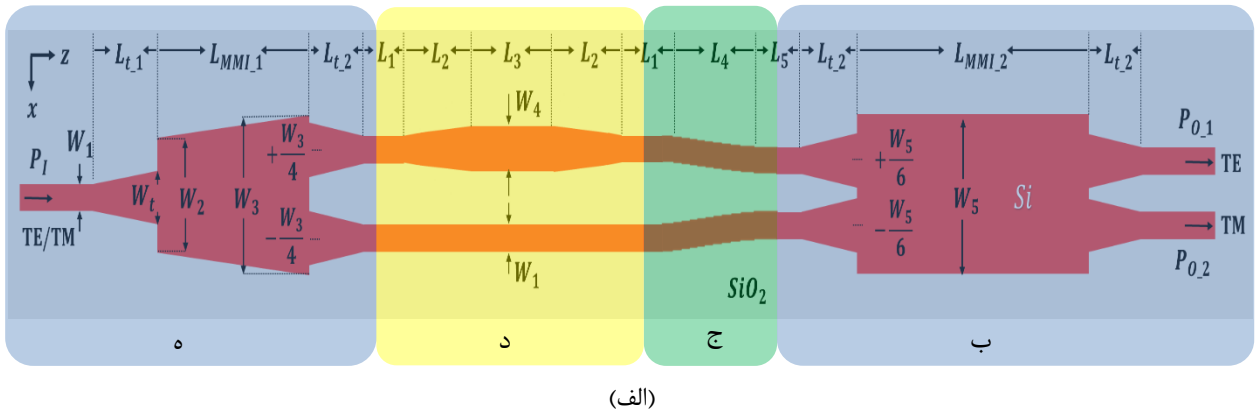
که در آن، M تعداد مُدهای انتشاری در ناحیه چندمُد و $k=2n_r\pi/\lambda_0$ است. ضریب \tilde{E}_m نیز از رابطه‌ی (۲) محاسبه می‌شود.

$$\tilde{E}_m = \frac{2}{W} \int_0^W E(x, z=0) \sin\left(\frac{m\pi}{W}x\right) dx \quad (2)$$

فرض می‌کنیم میدان ورودی در موجبرهای اتصالی که در راستای محور z و با فاصله ثابت $p = W_e/(N+1)$ از یکدیگر قرار گرفته‌اند به فرم

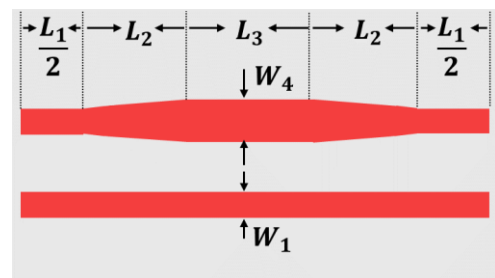
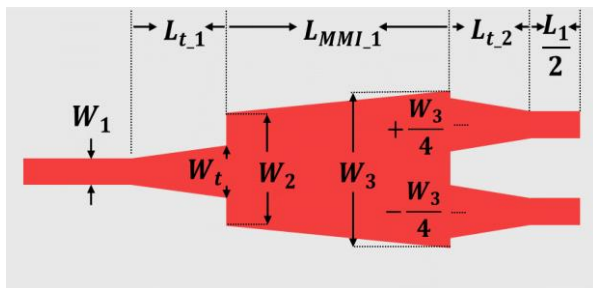
$$E(x, z=0) = \sum_{i=1}^N E_i \delta(ip-x) \otimes A(x) \quad (3)$$

$|E_{out_2}| = 0$ و 1 = به‌طور برعکس، اگر فاز E_{in_1} ، به میزان $\pi/2$ از E_{in_2} ، کوچک‌تر باشد، توان خروجی تماماً به موجبر اول تزویج خواهد یعنی؛ $|E_{out_1}| =$



(ب)

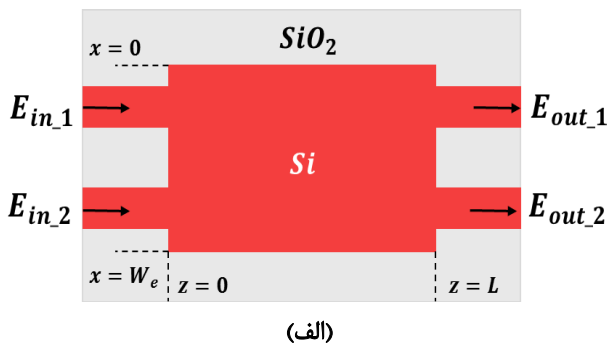
(ج)



(د)

(ه)

شکل ۱: الف) شمای کلی ساختار تفکیک‌کننده قطبش پیشنهادی و ساختارهای تشکیل‌دهنده آن، ب) تزویجگر 3-dB MMI 2x2، ج) موجبرهای خمیده، د) جابه‌جا کننده فاز، ه) تزویجگر 3-dB MMI 1x2

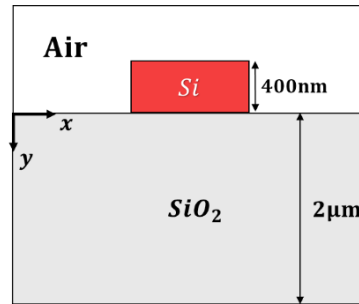


(الف)

در ادامه ابتدا به طراحی موجبرهای دو بازوی MZI می‌پردازیم به‌نحوی که برای امواج ورودی با قطبش TE و TM ملزومات گفته‌شده در بالا را برآورده کند و سپس طراحی ساختار کلی تفکیک‌کننده قطبش برای دستیابی به بیشترین پهنای باند و کمترین تلفات انجام خواهد شد.

توان تزویج شده به دو بازوی خروجی فقط به اختلاف فاز امواج ورودی بستگی داشته باشد. برای رسیدن به این منظور باید مدهای TE و TM موجبرهای ورودی و خروجی ساختار (که در شکل ۱ با عرض W_1 مشخص شده‌اند) دارای ضریب شکست یکسانی باشند و یا به عبارت دیگر؛ $n_{eff,TE} = n_{eff,TM}$ با توجه به اینکه ارتفاع موجبرها بر اساس انتخاب ویفر SOI مورد استفاده، برابر 400 nm تعیین شده است، برای رسیدن به ضریب شکست مورد نظر باید عرض موجبرها به درستی انتخاب شود. شکل ۳ (الف) نمودار تغییرات ضریب شکست مؤثر مدهای اول TE و TM موجبرهای مورد بحث و نمودار داخلی آن اختلاف ضریب شکست مدهای اول TE و TM ساختار را نشان می‌دهد. در این نمودارها عرض موجبر بین 250 nm تا 800 nm تغییر داده شده است. همان‌طور که در شکل دیده می‌شود به ازای عرض $W = 400\text{ nm}$ نمودارهای ضریب شکست مؤثر مدهای TE و TM باهم برخورد کرده و برای این عرض مشخص دو مد دارای ضریب شکست یکسانی برابر با موجبرهای ورودی و خروجی $W_1 = 400\text{ nm}$ در نظر گرفته می‌شود. توزیع میدان مؤلفه‌ی غالب و غیر غالب مدهای TE و TM این موجبر در شکل ۳ (ب) رسم شده است. همان‌طور که انتظار می‌رود به ازای ابعاد گفته شده در بالا، توزیع میدان این مدها تقریباً هم‌شکل بوده و با یک چرخش 90° درجه به یکدیگر قابل تبدیل هستند.

در گام بعد باید طول و عرض موجبرهای ناحیه میانی دو MMI به گونه‌ای انتخاب شود که امواج خروجی از این دو موجبر (در سمت ورودی 2×2 MMI) برای قطبش TE دارای اختلاف فاز $3\pi/2$ و برای قطبش TM دارای اختلاف $\pi/2$ بوده و طول کلی این ناحیه نیز حتی-الامکان کوچک باشد. این هدف را می‌توان با تغییر عرض موجبر در این ناحیه محقق کرد. همان‌طور که در شکل ۳ (الف) دیده می‌شود با تغییر عرض موجبر از مقدار 400 nm اختلاف ضریب شکست مؤثر مدهای TE و TM؛ Δn_{eff} افزایش می‌یابد. برای ساده‌تر شدن طراحی، ما عرض موجبر پائین را ثابت و برابر 400 nm می‌گیریم و اختلاف فاز وابسته به قطبش را با ایجاد تغییر در عرض موجبر بازوی بالا ایجاد می‌کنیم. طبق نمودار داخلی شکل ۳ (الف) با کاهش عرض موجبر می‌توان به Δn_{eff} بزرگ‌تری دست یافت؛ اما باید به این نکته توجه داشت که با کاهش عرض موجبر از مقدار 400 nm تلفات انتشار برای مد TE افزایش می‌یابد و برای عرض کمتر از 250 nm موجبر مد TE نخواهد داشت. افزایش تلفات انتشار یکی از قطبش‌ها باعث مختل شدن عملکرد کلی ساختار می‌شود چون همان‌گونه که در ابتدای این بخش و در توضیح رابطه (۷) اشاره شد برای رسیدن به تفکیک قطبش باید دامنه‌ی امواجی که از دو بازوی MZI عبور می‌کنند باهم برابر باشد. با توجه به این نکات، برای دسترسی به Δn_{eff} مورد نظر عرض موجبر بازوی بالا را افزایش می‌دهیم.



(ب)

ادامه‌ی شکل ۲: الف) شمای ساختار یک تزویجگر 2×2 MMI. ب) سطح مقطع یک موجبر SOI.

۴-۲ طراحی موجبرهای بازوها

همان‌طور که در بالا اشاره شد، تفکیک قطبش در تزویجگر MMI دوم زمانی رخ می‌دهد که اختلاف ثابت انتشار^{۱۴} مد TE و TM در دو بازوی MZI باعث شود که برای موج ورودی دارای قطبش TE در دو بازو اختلاف فاز $3\pi/2$ (و یا $-\pi/2$) و برای موج ورودی دارای قطبش TM در دو بازو اختلاف فاز $-\pi/2$ (و یا $+\pi/2$) ایجاد شود؛ یعنی:

$$\Delta\phi_{TE} = \phi_{1,TE} - \phi_{2,TE} = \pm\pi/2 \quad (8)$$

$$\Delta\phi_{TM} = \phi_{1,TM} - \phi_{2,TM} = \mp\pi/2 \quad (9)$$

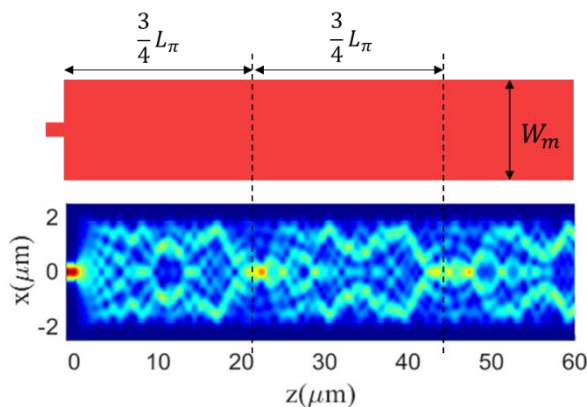
$$|\Delta\phi_{TE} - \Delta\phi_{TM}| = \pi \quad (10)$$

در این روابط $\phi_{1,TE}$ و $\phi_{1,TM}$ ، به ترتیب اختلاف فاز ناشی از عبور موج TE و TM از بازوی بالایی MZI، $\phi_{2,TE}$ و $\phi_{2,TM}$ ، به ترتیب اختلاف فاز ناشی از عبور موج TE و TM از بازوی پائینی MZI، هستند. جابجایی فاز نسبی قطبش‌های TE و TM، ناشی از تغییر شدید ضریب دوشکستی (BR)^{۱۵} با تغییر پهنای موجبر نواری در ساختار SOI، است که به صورت اختلاف نسبی ضریب شکست مؤثر برای مد TE و TM موجبر تعریف می‌شود [۱۵]. در طراحی موجبرهای دو بازوی MZI ما به دنبال دستیابی به حداکثر ضریب دوشکستی برای کاهش طول کلی بازوها و در نتیجه طول کلی ساختار و در عین حال پائین نگه داشتن تلفات عبور از این بازوها هستیم. همان‌طور که در شکل ۲ (ب) دیده می‌شود در محاسبات ما ضخامت لایه سیلیکون و دی‌اکسید سیلیکون در ویفر SOI، به ترتیب 400 nm و $2\text{ }\mu\text{m}$ در نظر گرفته شده است که جزء مقادیر استاندارد هستند.

برای رسیدن به عملکرد بیان شده در قسمت قبل، در اولین گام باید موجبرهای ورودی و خروجی ساختار به گونه‌ای طراحی شوند که دارای یک مد TE و یک مد TM باشند. به علاوه برای جلوگیری از تداخل‌های ناخواسته در MMI-های ورودی و خروجی باید این دو بخش در پاسخ به موج TE و TM رفتار یکسانی داشته باشند؛ یعنی در MMI اول (ورودی) توان ورودی مستقل از TE یا TM بوده به صورت مساوی بین دو بازوی خروجی تقسیم شود و در MMI دوم (خروجی)

از تزویجگر 1×2 MMI به جای 2×2 MMI به‌عنوان مقسم توان ۳-dB در ورودی استفاده شده است؛ زیرا طبق شبیه‌سازی‌های انجام‌شده، دامنه‌ی میدان الکتریکی در خروجی‌های تزویجگر 2×2 زمانی که به‌عنوان مقسم توان ۳-dB به کار می‌رود، برابر نیست؛ درحالی‌که برای بروز تداخل کاملاً سازنده و یا کاملاً مخرب در مقسم توان دوم باید دامنه ورودی‌های آن (که در واقع خروجی‌های مقسم توان اول بعد از ایجاد یک جابجایی فاز هستند) برابر باشند؛ همچنین در تزویجگر 2×2 MMI نزدیک بودن موجبرهای اتصالی به گوشه‌های موجبر چندمُد باعث ایجاد تصاویر با دنباله‌های خارجی پهن‌تر در مدهای مرتبه بالاتر می‌شوند که این خود نیز تلفات انتقال را افزایش می‌دهد. تئوری‌ها و روابط مربوط به انواع مختلف تزویجگرهای MMI به تفصیل در [۱۷] بیان شده است و در این بخش تنها به ارائه برخی روابط مورد استفاده در طراحی می‌پردازیم.

اساس کار تزویجگرهای MMI پدیده‌ی بازتولید تصویر میدان^{۱۶} است. این پدیده یک خصیصه از موجبرهای چندمُد است که بر اساس آن فرم کلی پروفایل میدان ورودی (به صورت تصاویر تکی یا چندتایی) در فواصل متناوب در طول مسیر انتشار، بازتولید می‌شود. به‌عنوان مثال شکل ۴ نمایی از یک تزویجگر MMI با یک موجبر ورودی و توزیع میدان الکتریکی در این ساختار را نشان می‌دهد. در این محاسبات موج ورودی دارای قطبش TE و با طول موج 1550 nm در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل ۴ قابل‌رؤیت است با پیشروی در طول موجبر چندمُد (ناحیه عریض)، فرم کلی میدان در ضرایب مشخصی از طول ضربان L_π ^{۱۷} بازتولید می‌شود.



شکل ۴: شمای کلی ساختار تزویجگر MMI و توزیع میدان الکتریکی در آن.

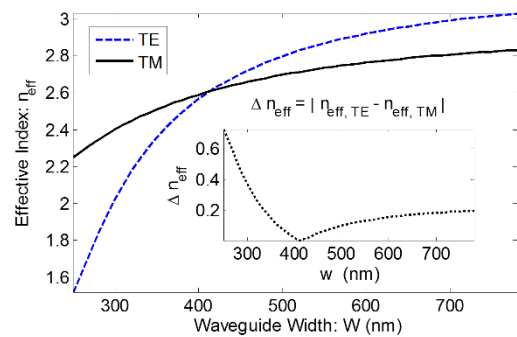
طول ضربان (رابطه‌ی (۱۱)) به طول موج انتشار؛ λ_0 ضریب شکست؛ n_r و عرض ناحیه چندمُد؛ W_e مربوط است [۱۷].

$$L_\pi = \frac{\pi}{\beta_0 - \beta_1} \cong \frac{4n_r W_e^2}{3\lambda_0} \quad (11)$$

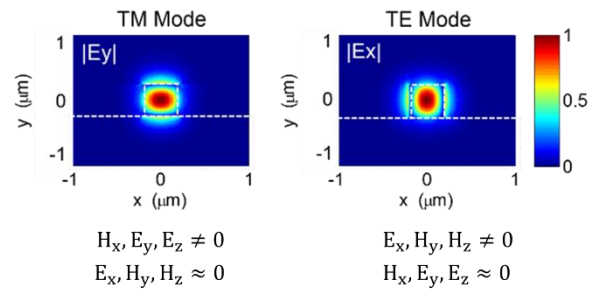
همان‌طور که دیده می‌شود طول ضربان با ضریب شکست و عرض ناحیه چندمُد رابطه مستقیم و با طول موج رابطه معکوس دارد. از میان پارامترهای مؤثر بر طول ضربان، طول موج بر اساس محدوده فرکانسی موردنظر تعیین می‌شود و ضریب شکست نیز با توجه به جنس مواد و

طبق شکل ۳ (الف) برای موجبری با عرض بیشتر از 750 nm قابل دسترسی تقریباً ثابت شده و با افزایش بیشتر عرض موجبر تغییر چندانی نمی‌کند. همچنین با افزایش بیشتر عرض موجبر طول ناحیه‌های موجبری غیریکنواخت که برای تزویج نور از موجبر اولیه (دارای عرض 400 nm) به موجبر عریض موردنیاز است (و در نتیجه طول کلی ساختار)، افزایش خواهد یافت. بر این اساس عرض موجبر بازوی بالایی برابر 750 nm در نظر گرفته می‌شود.

با انتخاب این ابعاد برای موجبر بازوی بالای MZI، امواج عبوری از این موجبر با قطبش TE و TM ضرایب انتشار متفاوتی خواهند داشت و اختلاف فاز نهایی بین دو بازوی MZI به قطبش بستگی خواهد داشت.



(الف)



(ب)

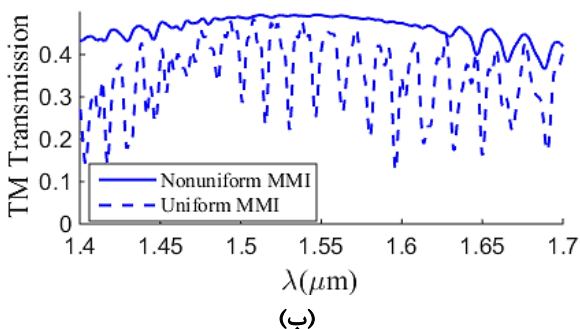
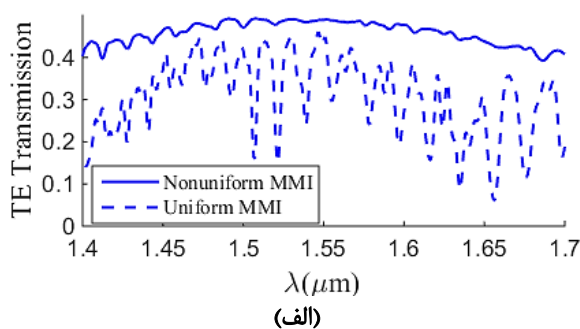
شکل ۳: (الف) نمودار تغییر ضریب شکست مؤثر موجبر برحسب عرض آن. (ب) توزیع میدان مد اول TE و TM موجبر SOI با عرض 400 nm و مؤلفه‌های غالب و غیرغالب آن.

۴-۲ طراحی تزویجگر 2×1 MMI و تزویجگر 2×2 MMI برای

رسیدن به کمترین تلفات و بیشترین پهنای باند

در تفکیک‌کننده قطبش پیشنهادی از دو تزویجگر 2×1 MMI و 2×2 به‌عنوان مقسم/ترکیب‌کننده توان استفاده گردیده است؛ علت استفاده از این تزویجگرها، پهنای باند بسیار زیاد، حساسیت کم آن‌ها به خطاهای ساخت و همچنین به قطبش نور ورودی است [۱۶]. بر اساس خاصیت آخر می‌توان انتظار داشت که نور ورودی را در هر دو مد TE و TM به یک‌میزان تقسیم/ترکیب کنند. در ساختار پیشنهادی تفکیک‌کننده قطبش برخلاف ساختارهای گزارش شده در [۱۱، ۱۲]

کرده و با استفاده از روابط (۱) و (۲)، با دانستن میدان الکتریکی در مرز ورودی ساختار کلی، میدان در هر ناحیه را محاسبه می‌کنیم؛ به این ترتیب که با در اختیار داشتن میدان ورودی در مرز ناحیه اول، دامنه‌های اولین ناحیه و در نتیجه توزیع میدان کلی در این ناحیه به دست می‌آید. سپس با داشتن میدان در اولین ناحیه، میدان در انتهای این ناحیه (مرز ناحیه اول و ناحیه دوم) محاسبه شده و بر اساس آن با رابطه (۲) دامنه‌های ناحیه دوم و در نتیجه توزیع میدان کلی در ناحیه دوم به دست می‌آید. با تکرار این روند می‌توان توزیع میدان در کل ساختار تزویجگر MMI غیریکنواخت را محاسبه کرد. طیف توان منتقل شده به یکی از درگاه‌های خروجی 1×2 MMI طراحی شده بر اساس شروط بالا نیز در شکل ۵ ترسیم و با منحنی توان منتقل شده برای ساختار اولیه مقایسه شده است. طبق شکل ۵ استفاده از MMI غیریکنواخت ضمن حذف نوسانات ناخواسته از طیف خروجی و افزایش قابل توجه پهنای باند، تلفات عبور را به میزان زیادی کاهش می‌دهد. شبیه‌سازی‌های انجام شده با روش نیمه‌تحلیلی [۱۹] نشان می‌دهد که حداقل طول ناحیه‌های موجبر غیریکنواخت در ورودی MMI اول و در سایر ورودی و خروجی‌های MMI-ها برای رسیدن به بهترین نتایج به ترتیب برابر $4 \mu\text{m}$ و $3 \mu\text{m}$ است.



شکل ۵: طیف توان منتقل شده به خروجی‌های 1×2 MMI دارای ابعاد داده شده در جدول (۱) و همچنین 1×2 MMI غیریکنواخت طراحی شده، (الف) برای قطبش TE و (ب) برای قطبش TM.

با طراحی و استخراج ابعاد موجبرهای ورودی، خروجی و موجبرهای عریض بازوهای MZI و همچنین دو تزویجگر MMI موردنیاز، می‌توان به طراحی کلی ساختار تفکیک کننده قطبش برای رسیدن به عملکرد مطلوب پرداخت. از آنجایی که محل قرارگیری موجبرهای ورودی و خروجی در تزویجگرهای 1×2 و 2×2 متفاوت است باید از موجبرهای خمیده به منظور اتصال بازوهای MZI

نوع ویفر مورد استفاده مشخص می‌گردد؛ بنابراین در طراحی تزویجگر MMI پارامتر اصلی طراحی عرض ناحیه چندمُد است که بر اساس تعداد و عرض موجبرهای ورودی و خروجی ساختار و همچنین با در نظر گرفتن اثر آن بر طول ضربان (و در نتیجه طول کلی تزویجگر)، انتخاب می‌شود. با تعریف طول ضربان و بر اساس عرض ناحیه چندمُد می‌توان طول کلی و محل قرار گرفتن خروجی‌ها برای دو تزویجگر 1×2 و 2×2 MMI یکنواخت را به صورت جدول ۱ استخراج کرد [۱۷].

جدول ۱: طول کلی و محل قرارگیری خروجی‌ها برای دو تزویجگر MMI موردنیاز در تفکیک کننده قطبش

| | 2×2 | 2×1 |
|----------------------------------|----------------|----------------|
| تعداد ورودی \times تعداد خروجی | | |
| فاصله‌ی اولین تصویر دوتایی | $L = L\pi/2$ | $3L\pi/8$ |
| مکان ورودی(ها) | $y = \pm We/6$ | $y = 0$ |
| مکان خروجی(ها) | $y = \pm We/6$ | $y = \pm We/4$ |

تزویجگرهای MMI مورد استفاده در این مقاله دو موجبر خروجی دارند و با توجه به ابعاد این موجبرها عرض ناحیه چندمُد به گونه‌ای انتخاب شده است که تزویج توان ناخواسته بین این موجبرها کمتر از ۱ درصد توان کل باشد. با توجه به این شرط عرض ناحیه چندمُد باید حداقل برابر $3/86 \mu\text{m}$ انتخاب شود. استفاده از MMI با ابعاد بیان شده در جدول (۱) تنها در طول موج مرکزی $1.4 \mu\text{m}$ (که در رابطه‌ی (۱۱) استفاده شده است) به خروجی مطلوب منجر خواهد شد و با تغییر طول موج از این مقدار، پاسخ کلی MMI به شدت تغییر خواهد کرد. به عنوان مثال شکل ۵ طیف توان منتقل شده به یکی از درگاه‌های خروجی 1×2 MMI یکنواخت پیاده‌سازی شده با ابعاد داده شده در جدول (۱) را به ازای دو قطبش ورودی TE و TM نشان می‌دهد. همان‌طور که دیده می‌شود پاسخ این ساختار به شدت به طول موج وابسته است. برای کاهش این حساسیت و افزایش پهنای باند MMI و همچنین کاهش تلفات عبور این ساختار، MMI ورودی به صورت غیریکنواخت پیاده‌سازی می‌گردد [۱۸]. برای رسیدن به بیشترین پهنای باند، کمترین تلفات عبور و در عین حال عملکرد یکسان برای قطبش TE و TM در ورودی‌ها و خروجی‌های دو MMI مورد بحث، عرض موجبرها با نزدیک‌تر شدن به ناحیه چندمُد به صورت خطی افزایش داده شده است. به علاوه در 1×2 MMI عرض ناحیه چندمُد از سمت ورودی به خروجی به صورت خطی افزایش داده شده است. این کار باعث کاهش نوسانات ناخواسته در نمودار انتقال می‌شود. در طراحی MMI‌های غیریکنواخت مورد استفاده در این مقاله از روش نیمه‌تحلیلی معرفی شده در مرجع [۱۹] استفاده شده است. از این روش برای تحلیل تزویجگرهای MMI-یی که موجبرهای ورودی و خروجی و یا ناحیه موجبر چندمُد، دارای سطح مقطع یکنواخت در راستای انتشار نیست، استفاده می‌شود. برای این منظور، ساختار غیریکنواخت را به یک چیدمان متوالی از ساختارهای یکنواخت تقسیم

همراه سایر ابعاد ساختار کلی تفکیک‌کننده قطبش در جدول (۲) ارائه شده است. در بخش بعد عملکرد کلی ساختار طراحی شده با شبیه‌سازی به روش FDTD بررسی خواهد شد.

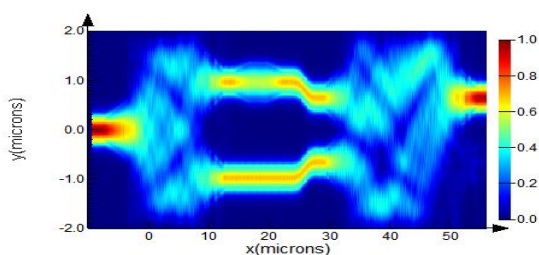
۳- نتایج شبیه‌سازی ساختار طراحی شده

ساختار طراحی شده در بخش‌های قبل با استفاده از روش FDTD (در قالب نرم‌افزار تجاری Lumerical) و به صورت سه‌بعدی شبیه‌سازی شده و نتایج به دست آمده در این بخش ارائه خواهد شد. شکل ۶ توزیع میدان در ساختار تفکیک‌کننده قطبش طراحی شده را به ازای دو قطبش ورودی TE و TM، در طول موج ۱۵۵۰ nm می‌دهد. همان‌طور که در قسمت (الف) و (ب) این شکل مشاهده می‌شود مطابق با طراحی انجام شده در بخش قبل، نور با قطبش TE به‌طور کامل از درگاه خروجی ۱ (P_{O1}) و نور با قطبش TM به‌طور کامل از درگاه خروجی ۲ (P_{O2}) خارج می‌گردد.

جدول ۲: ابعاد قسمت‌های مختلف ساختار

تفکیک‌کننده‌ی قطبش

| | |
|-------------|---------------------|
| W_1 | $0.4 \mu\text{m}$ |
| W_2 | $3.4 \mu\text{m}$ |
| W_3 | $3.86 \mu\text{m}$ |
| W_4 | $0.75 \mu\text{m}$ |
| W_5 | $3.86 \mu\text{m}$ |
| W_t | $1.2 \mu\text{m}$ |
| $L_{t,1}$ | $4 \mu\text{m}$ |
| $L_{t,2}$ | $3 \mu\text{m}$ |
| L_1 | $1.65 \mu\text{m}$ |
| L_2 | $3.56 \mu\text{m}$ |
| L_3 | $3.1 \mu\text{m}$ |
| L_4 | $4 \mu\text{m}$ |
| L_5 | $1.38 \mu\text{m}$ |
| $L_{MMI,1}$ | $12.75 \mu\text{m}$ |
| $L_{MMI,2}$ | $19.1 \mu\text{m}$ |



(الف)

به موجبرهای ورودی MMI دوم استفاده کرد (ناحیه موجبرهای خمیده با طول L_4 در شکل ۱).

در آخرین گام طراحی، برای رسیدن به عملکرد تفکیک قطبش، باید طول نهایی بازوهای MZI به گونه‌ای انتخاب شود که برای یک قطبش ورودی امواج عبوری از بازوهای بالا و پائین MZI به میزان 2π و برای قطبش دیگر به میزان $2\pi + \pi$ اختلاف فاز داشته باشند. ناحیه‌هایی که در شکل ۱ با طول L_1, L_2, L_3, L_4, L_5 مشخص شده‌اند بین دو بازوی MZI مشترک هستند و جابجایی فاز یکسانی در موج عبوری ایجاد خواهند کرد (به عبارت دیگر اختلاف فاز خالص بین دو بازوی MZI، ناشی از عبور موج از این نواحی، صفر خواهد بود)؛ بنابراین اختلاف فاز مورد نظر تنها نتیجه عبور موج از ناحیه‌ی مشخص شده با L_2 و L_3 خواهد بود. در واقع اختلاف فاز اصلی در ناحیه L_2 و L_3 ایجاد خواهد شد و در بقیه طول بازوهای MZI یک ترم فاز ثابت به این مقدار اضافه می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود با توجه به اینکه عرض موجبر بازوی بالا بیشتر است اختلاف فاز ایجاد توسط این بازوی در قطبش TE بیشتر خواهد بود؛ بنابراین طول دو ناحیه L_2 و L_3 باید به گونه‌ای انتخاب شود که اختلاف فاز خالص (اختلاف فاز موج عبور از دو بازوی MZI) ناشی از عبور موج از این ناحیه برای قطبش TE برابر با 2π و برای قطبش TM برابر با $2\pi + \pi$ باشد و یا به عبارت دیگر:

$$\Delta\phi_{TE} = \phi_{1,TE} - \phi_{2,TE} = \frac{3}{2}\pi \quad (12)$$

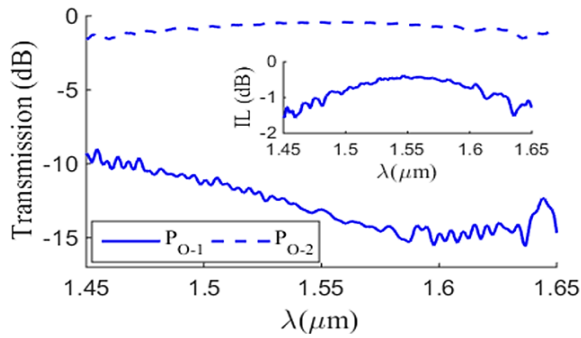
$$\phi_{1,TE} = \left[2 \int_0^{L_2} \beta_{TE}(W) dx + L_3 \beta_{TE1} \right] \quad \& \quad \phi_{2,TE} = (2L_2 + L_3) \beta_{TE0} \quad (13)$$

$$\Delta\phi_{TM} = \phi_{1,TM} - \phi_{2,TM} = \frac{1}{2}\pi \quad (14)$$

$$\phi_{1,TM} = \left[2 \int_0^{L_2} \beta_{TM}(W) dx + L_3 \beta_{TM1} \right] \quad \& \quad \phi_{2,TM} = (2L_2 + L_3) \beta_{TM0} \quad (15)$$

در معادلات (۱۳) و (۱۵) β_{TE0} و β_{TM0} به ترتیب ثابت انتشار موج TE و TM در موجبر دارای عرض W_1 و β_{TE1} و β_{TM1} به ترتیب ثابت انتشار موج TE و TM در موجبر دارای عرض W_4 و $\beta_{TE}(W)$ و $\beta_{TM}(W)$ ثابت انتشار موج TE و TM در ناحیه موجبر غیر یکنواخت با طول L_2 را نشان می‌دهند. این مقادیر با توجه به مشخص شدن عرض W_2 و W_1 در مراحل قبلی طراحی، معلوم بوده و از شکل ۳ (الف) قابل استخراج هستند.

برای رسیدن به اختلاف فاز مورد نظر باید طول L_2 و L_3 با جایگذاری مقادیر ثابت انتشار (که در شکل ۳ (الف) ارائه شده است) در معادلات (۱۲) - (۱۵) محاسبه شود. بر اساس نتایج محاسبات انجام شده (برای طول موج مرکزی $\lambda_0 = 1550 \text{ nm}$) طول دو ناحیه L_2 و L_3 به ترتیب برابر $3.1 \mu\text{m}$ و $3.56 \mu\text{m}$ به دست می‌آید. پارامترهای باقی‌مانده یعنی طول نواحی L_1, L_4 و L_5 ، با شرط دستیابی به حداقل تلفات عبور انتخاب می‌شوند. نتایج حاصل از محاسبات برای طول هر ناحیه به



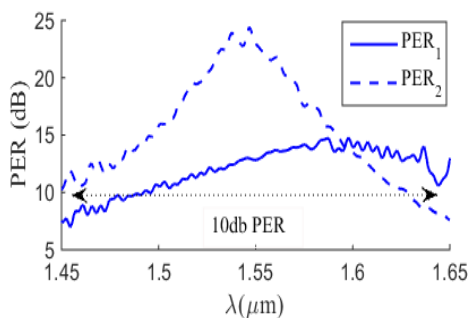
(ب)

شکل ۷: نمودار طیف انتقالی درگاه‌های خروجی ۱ و ۲ به ازای ورودی با قطبش الف (TE، ب) TM.

مهم‌ترین معیارهای ارزیابی عملکرد یک تفکیک‌کننده قطبش، تلفات عبور (IL) برای هر قطبش ورودی و نسبت حذف قطبش (PER)^{۱۹} برای هر یک از درگاه‌های خروجی هستند که طبق روابط (۱۶) و (۱۷) محاسبه می‌گردند.

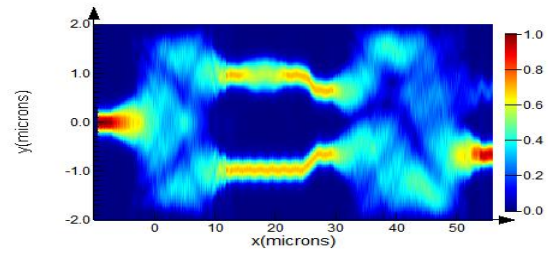
$$IR_{TE} = 10 \log \left(\frac{P_{O-1}}{P_{I,TE}} \right) \quad \& \quad IR_{TM} = 10 \log \left(\frac{P_{O-2}}{P_{I,TM}} \right) \quad (16)$$

$$PER_1 = 10 \log \left(\frac{P_{O-1,TE}}{P_{O-1,TM}} \right) \quad \& \quad PER_2 = 10 \log \left(\frac{P_{O-2,TM}}{P_{O-2,TE}} \right) \quad (17)$$



شکل ۸: نمودار PER برای درگاه‌های خروجی ساختار طراحی شده به ازای ورودی با قطبش TE و TM

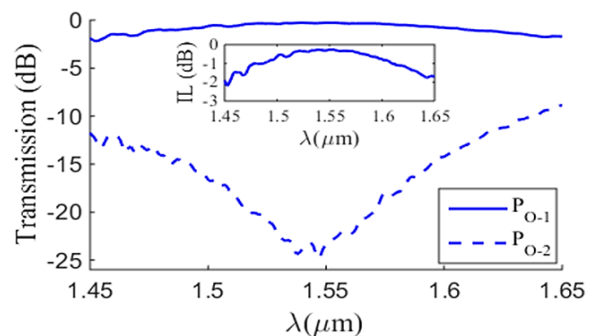
در معادلات (۱۶) و (۱۷)، $P_{I,TE}$ و $P_{I,TM}$ به ترتیب توان ورودی با قطبش TE و TM، $P_{O-1,TE}$ و $P_{O-1,TM}$ به ترتیب توان خروجی از درگاه ۱ با قطبش TE و TM، و $P_{O-2,TE}$ و $P_{O-2,TM}$ به ترتیب توان خروجی از درگاه ۲ با قطبش TE و TM، هستند. نمودار تلفات عبور ساختار طراحی شده به ازای موج ورودی با قطبش TE و TM به ترتیب در شکل‌های ۷ الف) و ۷ ب) ترسیم شده است. همان‌طور که در این



(ب)

شکل ۹: توزیع میدان در ساختار در طول موج ۱۵۵۰ nm به ازای ورودی با قطبش الف (TE، ب) TM.

بر اساس این محاسبات در طول موج ۱۵۵۰ nm به ازای ورودی با قطبش TE نسبت توان خروجی P_{O-1} ، به توان ورودی P_I برابر با ۰/۹۴، $P_{O-1}/P_I = 0.94$ و نسبت توان خروجی P_{O-2} ، به توان ورودی P_I برابر با $P_{O-2}/P_I = 0.05$ است. همچنین به ازای ورودی با قطبش TM نسبت توان خروجی P_{O-1} ، به توان ورودی P_I برابر با $P_{O-1}/P_I = 0.47$ و نسبت توان خروجی P_{O-2} ، به توان ورودی P_I برابر با $P_{O-2}/P_I = 0.91$ است. این مقادیر توانایی ساختار طراحی شده در تفکیک امواج دارای قطبش متفاوت را در طول موج مرکزی ۱۵۵۰ nm نشان می‌دهد. برای بررسی عملکرد ساختار طراحی شده در سایر فرکانس‌ها، نمودار طیف انتقالی^{۱۸} درگاه‌های خروجی P_{O-1} و P_{O-2} ، به ازای اعمال موج ورودی با قطبش TE و TM به این ساختار محاسبه و به ترتیب در شکل‌های ۷ الف) و ۷ ب)، ارائه شده است. بر اساس این شکل اگرچه ساختار با توجه به مشخصات موجبرها در طول موج ۱۵۵۰ nm طراحی شده اما در محدوده‌ی بسیار وسیعی از ۱۴۵۰ nm تا ۱۶۵۰ nm تفکیک قطبش را با دقت بالا محقق می‌سازد. پهنای باند بسیار زیاد ساختار را می‌توان به حساسیت فرکانسی نسبتاً پایین المان‌های بکار رفته در طراحی این تفکیک‌کننده قطبش یعنی موجبرهای SOI و توزیجرهای MMI مربوط دانست.



(الف)

۴- نتیجه

در این مقاله یک ساختار تفکیک‌کننده قطبش با چیدمان MZI ارائه شد که در آن از تزویجگرهای چندمُد MMI غیریکنواخت و بازوهای ناهمسان مبتنی بر موجبر SOI استفاده شده است. با در نظر گرفتن طول موج مرکزی ۱۵۵۰nm، ساختار به‌گونه‌ای طراحی شده است که بهترین عملکرد را در محدوده‌ی طول موج ۱۵۰۰nm تا ۱۶۰۰nm داشته باشد. نتایج به‌دست‌آمده، تلفات عبور کمتر از ۰/۸dB نسبت تفکیک بیشتر از ۱۵dB، برای قطبش میدان الکتریکی و نیست تفکیک بیشتر از ۱۰dB را برای قطبش میدان مغناطیسی، در محدوده بسیار وسیع طول موج ۱۵۰۰nm تا ۱۶۰۰nm نشان می‌دهد. ساختار طراحی شده در مقایسه با تفکیک‌کننده‌های قطبش مبتنی بر کوپلر جهتی پهنای باند بسیار بیشتر و حساسیت کمتری خطاهای ساخت دارد. به‌علاوه ابعاد کلی ساختار طراحی شده $3/86 \times 60 \mu\text{m}^2$ است که نسبت به تفکیک‌کننده‌های قطبش مبتنی بر MZI دارای ابعاد کوچک‌تری است.

مراجع

- [1] K. Tan, Y. Huang, G.Q. Lo, C. Yu, and C. Lee, "Experimental realization of an O-band compact polarization splitter and rotator," *Optics Express*, vol. 25, pp. 3234-3241, 2017.
- [2] M. Yin, W. Yang, Y. Li, X. Wang, and H. Li, "CMOS-compatible and fabrication-tolerant MMI-based polarization beam splitter," *Optics Communications*, vol. 335, pp. 48-52, 2015.
- [۳] پرویز امیری، محمود صیغوری، بابک آفرین و آوا هدایتی‌پور، «طراحی پیش تقویت‌کننده RGC کم نویز مدار مجتمع CMOS با پهنای باند 20 GHz و بهره 60 dBΩ»، مجله علمی-پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۴۶، ۲۳-۱۵، تابستان ۱۳۹۵.
- [۴] عطاله ابراهیم زاده شرمه، عباس فتح‌تبار فیروزجاه و حسین علیجانزاده بورا، «طراحی فیلترهای توری پراشی با استفاده از الگوریتم های تکاملی»، مجله علمی-پژوهشی مهندسی برق دانشگاه تبریز، ۴۵، ۲۲-۱۳، زمستان ۱۳۹۴.
- [5] Y. Wang, M. Ma, H. Yun, Z. Lu, X. Wang, N. A. Jaeger, et al., "Ultra-Compact Sub-Wavelength Grating Polarization Splitter-Rotator for Silicon-on-Insulator Platform," *IEEE Photonics Journal*, vol. 8, pp. 1-9, 2016.
- [6] J. Wang, B. Niu, Z. Sheng, A. Wu, X. Wang, S. Zou, et al., "Design of a SiO₂ top-cladding and compact polarization splitter-rotator based on a rib directional coupler," *Optics express*, vol. 22, pp. 4137-4143, 2014.
- [7] J. Wang, B. Niu, Z. Sheng, A. Wu, W. Li, X. Wang, et al., "Novel ultra-broadband polarization splitter-rotator based on mode-evolution tapers and a mode-sorting asymmetric Y-junction," *Optics express*, vol. 22, pp. 13565-13571, 2014.
- [8] W. Ye, D.-X. Xu, S. Janz, P. Waldron, and N. G. Tarr, "Stress-induced SOI polarization splitter based on Mach-Zehnder Interferometers (MZI)," in *Group IV Photonics, 2006. 3rd IEEE International Conference on*, 2006, pp. 249-251: IEEE.
- [9] Y. Huang, Z. Tu, H. Yi, Y. Li, X. Wang, and W. Hu, "High extinction ratio polarization beam splitter with multimode interference coupler on SOI," *Optics Communications*, vol. 307, pp. 46-49, 2013.

شکل‌ها دیده می‌شود برای هر دو قطبش ورودی IL در بازه طول موج $1500 \text{ nm} < \lambda < 1600 \text{ nm}$ ، تقریباً ثابت و کمتر از ۰/۸dB است که در مقایسه با نتایج ارائه‌شده در ساختارهای مشابه در مراجع بسیار کمتر است. به‌علاوه پارامتر PER برای دو درگاه خروجی ساختار محاسبه و در شکل ۸ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج برای درگاه خروجی ۱، میزان PER در بازه $1500 \text{ nm} < \lambda < 1600 \text{ nm}$ ، بیشتر از ۱۰dB و برای درگاه خروجی ۲، میزان PER در این بازه بیشتر از ۱۵dB است. همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد ساختارهای مبتنی بر MMI دارای پهنای باند بیشتری نسبت به ساختارهای با عملکرد مشابه هستند؛ به‌عنوان نمونه تزویجگر دوند در [۲۰] و تزویجگر جهتی ارائه‌شده در [۲۱] زمانی که به‌عنوان تفکیک‌کننده قطبش عمل می‌کنند دارای حداکثر پهنای باند ۵۰nm هستند (نصف پهنای باند ساختار طراحی شده در این مقاله). همچنین ساختار تفکیک‌کننده قطبش پیشنهادی در مقایسه با ساختار ارائه‌شده در مرجع [۲] از لحاظ پهنای باند (که برای مرجع [۲] حدود ۲۶nm است) و تلفات، عملکرد بسیار بهتری را نشان می‌دهد. به‌علاوه تفکیک‌کننده قطبش پیشنهادی از لحاظ ابعاد کلی، دارای ابعاد به‌مراتب کوچک‌تری از ساختار ارائه‌شده در [۲] (ابعاد $4/2 \times 132/64 \mu\text{m}^2$) و ساختار با عملکرد مشابه از لحاظ PER و JL ، در مرجع [۱۲] (ابعاد $3/36 \times 200 \mu\text{m}^2$) دارد. در جدول ۳، مقایسه‌ی مشخصات تفکیک‌کننده قطبش پیشنهادی با سایر ساختارهای تفکیک‌کننده به‌طور خلاصه نشان داده شده است؛ همان‌طور که مشاهده می‌شود، ساختار پیشنهادی دارای ابعاد کوچک‌تر و پهنای باند بیشتر نسبت به ساختارهای تفکیک‌کننده قطبش پیشین است.

جدول ۳: مقایسه‌ی مشخصات تفکیک‌کننده قطبش پیشنهادی با سایر تفکیک‌کننده‌های قطبش در طول موج کاری متناظرشان

| | footprint | PER | bandwidth |
|----------|---------------------------------------|--------------------------|-----------|
| Designed | $3/86 \times 60 \mu\text{m}^2$ | TE: ۲۳dB TM: ۱۲/۸dB | ۱۰۰nm |
| Ref[2] | $4/2 \times 132/64 \mu\text{m}^2$ | TE: ۲۸dB TM: ۴۲dB | ۲۶nm |
| Ref[11] | $> 16 \mu\text{m} \times 2 \text{mm}$ | TE: ۱۹dB TM: ۱۵dB | - |
| Ref[12] | $3/36 \times 200 \mu\text{m}^2$ | TE: ۲۵dB TM: ۱۲dB | - |
| Ref[13] | $3/4 \times 163 \mu\text{m}^2$ | - | ۱۱۰nm |
| Ref[20] | $0/94 \times 0/9 \mu\text{m}^2$ | TE: ۱۸/۲dB TM: ۱۶/۸dB | ۵۰nm |
| Ref[21] | $18 \mu\text{m} \times 27 \text{mm}$ | TE: ۵۰dB TM: ۳۵dB | ۲۲nm |

- IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, vol. 22, pp. 141-154, 2016.
- [17] L. B. Soldano and E. C. Pennings, "Optical multi-mode interference devices based on self-imaging: principles and applications," *Journal of lightwave technology*, vol. 13, pp. 615-627, 1995. J.
- [18] H.-C. Lu and W.-S. Wang, "Wideband criterion for multimode interference splitters," *IEEE photonics technology letters*, vol. 18, pp. 2332-2334, 2006.
- [۱۹] شهریار فرهادی، مهدی میری و محمدحسین شیخی، « طراحی تداخل‌سنج MMI غیریکنواخت فشرده و پهن‌بند با استفاده از تعمیم روش تحلیل تقریبی»، بیست و پنجمین کنفرانس مهندسی برق ایران، تهران، ایران، اردیبهشت ۱۳۹۶.
- [20] A. Hosseini, S. Rahimi, X. Xu, D. Kwong, J. Covey, and R. Chen, "Ultra-compact and fabrication-tolerant integrated polarization splitter," *Optics letters*, vol. 36, pp. 4047-4049, 2011.
- [21] P. Aashna and K. Thyagarajan, "Polarization splitter based on a three waveguide directional coupler using quantum mechanical analogies," *Optics*, vol. 19, 2017 (doi: 10.1088 / 2040-8986 / aa6e80).
- [10] C. D. Truong, D. H. Tran, V. C. Hoang, and T. T. Le, "A butterfly MMI waveguides based polarization beam splitter etched on SOI platform," in *Communications and Electronics (ICCE), 2014 IEEE Fifth International Conference on*, 2014, pp. 425-429.
- [11] L. Soldano, A. De Vreede, M. Smit, B. Verbeek, E. Metaal, and F. Green, "Mach-Zehnder interferometer polarization splitter in InGaAsP/InP," *IEEE photonics technology letters*, vol. 6, no. 3, pp. 402-405, 1994.
- [12] D. Dai, Z. Wang, J. Peters, and J. E. Bowers, "Compact polarization beam splitter using an asymmetrical Mach-Zehnder interferometer based on silicon-on-insulator waveguides," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, pp. 673-675, 2012.
- [13] J. Wang, M. Qi, Y. Xuan, H. Huang, Y. Li, M. Li, et al., "Proposal for fabrication-tolerant SOI polarization splitter-rotator based on cascaded MMI couplers and an assisted bi-level taper," *Optics express*, vol. 22, pp. 27869-27879, 2014.
- [14] M. Heaton and R. M. Jenkins, "General matrix theory of self-imaging in multimode interference (MMI) couplers," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 11, pp. 212-214, 1999.
- [15] T. Liang and H. Tsang, "Integrated polarization beam splitter in high index contrast silicon-on-insulator waveguides," *IEEE photonics technology letters*, vol. 17, pp. 393-395, 2005.
- [16] S. Pal and S. Gupta, "Proposal and Analysis of a Silicon MMI Coupler-Based Electronically Controllable Photonic Switch,"

زیرنویس‌ها

- ¹ Photonic integrated circuit
- ² Substrate
- ³ Silicon-on-insulator (SOI)
- ⁴ Polarization splitter
- ⁵ Directional coupler
- ⁶ Mach-Zehnder Interferometer (MZI)
- ⁷ Multimode interference (MMI) coupler
- ⁸ 3D Finite-Difference Time-Domain (3D FDTD)
- ⁹ Insertion loss (IL)
- ¹⁰ Transverse-electric (TE) polarization
- ¹¹ Transverse-magnetic (TM) polarization
- ¹² Etching
- ¹³ Power divider/combiner
- ¹⁴ Propagation constant
- ¹⁵ Birefringence
- ¹⁶ Self-imaging
- ¹⁷ Beat length
- ¹⁸ Transmission spectrum
- ¹⁹ Polarization extinction ratio (ER)