

سوئیچ نوری با تعبیه جفتگر متقارن پاریته-زمان در ساختار ماخ زندر بر پایه تداخل سنج مالتی مد

فخرالدین نظری^{۱*}، شهاب عبداللهی^۲، میثاق ایزدی^۳

۱-استادیار دانشکده مهندسی فناوری‌های نوین، دانشگاه تخصصی فناوری‌های نوین آمل (نویسنده مسئول - nazari@ausmt.ac.ir)

۲-کارشناسی ارشد برق الکترونیک، موسسه آموزش عالی هدف ساری

چکیده

در این مقاله، سوئیچ نوری با طراحی و تعبیه یک جفتگر متقارن پاریته-زمان در درون یکی از بازوهای ساختار ماخ زندر بر پایه تداخل سنج مالتی مد ارائه و شبیه سازی می‌شود. ساختار سوئیچ شامل دو جفتگر در ابتدا و انتهای ساختار بر پایه تداخل سنج مالتی مد و دو بازوی متصل کننده این دو جفتگر به یکدیگر است، که در یکی از این بازوان، یک جفتگر متقارن پاریته-زمان قرار داده شد. تمام عناصر به کار رفته در ساختار پیشنهادی خطی بوده و با توجه به وضعیت جفتگر متقارن پاریته-زمان، سوئیچ پیشنهادی در دو حالت فعال (جفتگر دارای بهره/تلفات) و غیرفعال (جفتگر فاقد بهره/تلفات) عمل می‌کند. سوئیچ طراحی شده در حالت فعال و غیرفعال به ترتیب دارای نرخ خاموشی $ER_{active} = -20/41 \text{ dB}$ و $ER_{passive} = -14/62 \text{ dB}$ است. همچنین بر اساس نتایج شبیه‌سازی، در ساختار سوئیچ پیشنهادی برای درگاه‌های مختلف، تلفات داخلی با مقادیر بسیار پایین حاصل شد.

کلید واژه

سوئیچ نوری، ساختار متقارن پاریته-زمان، تداخل سنج ماخ-زندر، تداخل سنج مالتی مد.

۱. مقدمه

سوئیچ‌های تمام‌نوری یکی از افزاره‌های پراهمیت و حیاتی در سیستم‌های مخابرات نوری و مدارات مجتمع نوری محسوب می‌شوند. از کاربردهای آنها می‌توان به مسیریابی سیگنال‌ها و پردازش سیگنال‌های تقسیم‌زمانی اشاره نمود. از مزایای ویژه سوئیچ‌های تمام نوری عدم نیاز به تبدیلات نوری-الکتریکی است. این تبدیلات نه تنها تطبیق پذیری و شفافیت سیستم‌ها را محدود می‌کنند بلکه باعث ایجاد خطاهایی در سیگنال‌های فرستاده شده و در نهایت منجر به کاهش کارایی سیستم می‌شوند.

تاکنون برای طراحی و یا بهبود و ارتقای سوئیچ‌های نوری، مواد و ساختارهای متنوعی ارائه شد. به عنوان مثال، می‌توان با توجه به عملکرد فیزیکی سوئیچ‌ها، از سوئیچ‌های صوتی-نوری [۱-۲]، الکتریکی-نوری [۳]، الکتریکی-مکانیکی [۴]، و تمام نوری [۵-۷] نام برد. برای طراحی سوئیچ‌های نوری، یکی از ابزارهای پرکاربرد و کلیدی، تداخل سنج ماخ-زندر است [۸-۹]. اصول کار تداخل سنج

ماخ-زندر تقسیم میدان ورودی به دو میدان مساوی است که این دو میدان در خروجی با یکدیگر ترکیب شده و میدان ورودی را با توجه به اختلاف فاز تولید شده در یکی از خروجی‌ها بازتولید می‌کند. در واقع در ساختار ماخ-زندر با توجه به مقادیر فاز دو میدان تقسیم شده، میدان خروجی در یکی از خروجی‌های دلخواه قابل بازیابی است.

روش‌های متداول در سودهی نوری بر پایه تداخل سنج ماخ-زندر شامل دو روش عمده‌ی حلقه‌های تشدیدگر نوری^۵ و تقویت کننده‌های نیمه‌هادی^۶ جفت شده به بازوهای ماخ-زندر است [۴-۵]. همچنین در روش دیگری از سودهی نوری بر پایه تداخل سنج ماخ-زندر، جفتگرهای مالتی مد^۷ یا جداکننده‌های^۸ جایگذاری شده در بازوهای ماخ-زندر استفاده شد [۱۰-۱۱]. یکی از مشکلات این ابزارها طول زیاد برای سودهی است، بنابراین اینگونه سوئیچ‌ها قابلیت مجتمع‌سازی در مدارات مجتمع نوری را ندارند. همچنین در تحقیقات دیگر، از موجبرهای غیرخطی در ساختار سوئیچ‌ها

5 Ring resonator
6 Semiconductor optical amplifier
7 Multi mode couplers
8 Spiliter

1 Acousto-optic
2 Electro-optics
3 Electro-mechanical
4 Mach-Zehender

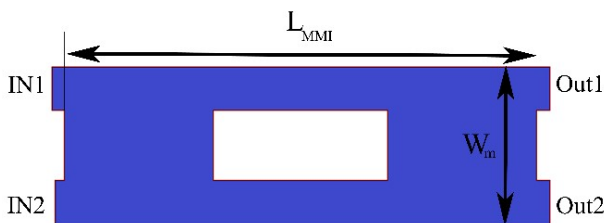
طریق پرتوهایی لیزر Ar^+ مقدار بهره مطلوب را در موجبر ایجاد می‌کنند. همچنین، در مرجع [۳۴] با نشان دادن یک لایه نازک فلز کروم در موجبر از جنس گالیم آرسناید تلفات مطلوب را تامین نمودند.

در این مقاله، با تعبیه جفتگر متقارن پاریته-زمان در یکی از بازوی‌های ماخ-زندر مبتنی بر ساختار مالتی‌مد، سوئیچی نوری خطی طراحی و شبیه‌سازی می‌گردد. در سوئیچ پیشنهادی، با تغییر میزان بهره/تلفات در دو بازوی جفتگر متقارن پاریته-زمان از مقدار صفر تا مقدار معین، مکان خروجی سوئیچ از درگاه خروجی ۱ به درگاه خروجی ۲ تغییر پیدا می‌کند. رفتار خطی و نرخ خاموشی بالا، از دیگر مشخصه‌های مطلوب سوئیچ پیشنهادی است. کلیه شبیه‌سازی‌ها در این مقاله از روش انتشار پرتو^{۱۹}، با کمک نرم افزار آرسافت^{۲۰} انجام گرفت.

در بخش ۲ و ۳، به ترتیب پیش زمینه‌ی تئوری عناصر سوئیچ و همچنین عملکرد سوئیچ و نتایج شبیه‌سازی‌ها گزارش داده می‌شود.

۲. پیش زمینه تئوری

همانطور که در بخش قبل بیان شد، سوئیچ ارائه شده ماخ-زندری از دو ساختار مالتی‌مد و متقارن پاریته-زمان تشکیل می‌شود. بنابراین در این بخش اصول تئوری و ریاضیاتی ساختار مالتی‌مد و همچنین ساختارهای متقارن پاریته-زمان بیان می‌شوند.



شکل ۱: ساختار اولیه ماخ-زندر ۲×۲ مبتنی بر جفتگرهای تداخل سنج مالتی‌مد

۱.۲. تداخل سنج مالتی مد

تداخل سنج‌های مالتی‌مد بر اساس اصل خود تصویری^{۲۱} کار می‌کنند. خود تصویری یکی از ویژگی‌های موجبرهای چند مد است که نمایه میدان ورودی در یک یا چندین تصویر به صورت تناوبی در طول مسیر انتشار بازتولید می‌شوند.

استفاده شد [۱۲-۱۳]. به طور مثال در [۱۲]، سودهی با استفاده از نور کنترلی در موجبرهای غیرخطی مورد بررسی قرار گرفته است. در اینگونه سوئیچ‌ها، نور کنترلی یکی در درگاه ورودی و دیگری در درگاه خروجی جایگذاری می‌شود. بنابراین جداسازی سیگنال ورودی و کنترلی از یکدیگر از مشکلات این الگوی پیشنهادی محسوب می‌شود. به طور کلی سودهی با استفاده از جفتگرهای غیرخطی روشی پر کاربرد به حساب می‌آید که در این روش، داده‌ی ورودی پس از عبور از دو فاز متفاوت در دو سطح توان مختلف در بین درگاه‌های خروجی سوئیچ می‌کند. به طور کلی در طراحی افزاره‌های نوری سعی بر این است که از روابط و عناصر غیرخطی به دلیل نیاز به مواد خاص، منابع نوری توان بالا و پیچیدگی‌های دیگر پیاده‌سازی اجتناب شود.

در این مقاله، رویکرد جدید با ترکیب ساختار متقارن پاریته-زمان و تداخل سنج ماخ-زندر برای طراحی سوئیچ نوری ارائه می‌گردد. در واقع مفهوم اصلی ساختار متقارن پاریته-زمان که از مکانیک کوانتوم غیرهمبستگی گرفته شد، بیان می‌کند که پتانسیل‌های مختلط $V(r)=V^*(-r)$ با شرط دارا بودن تقارن مکانی و زمانی به جای شرط دیراک، توانایی نمایش ویژه مقادیر انرژی حقیقی را دارند [۱۴]. این مفهوم صرفاً تئوریک در فیزیک، بعدها در حوزه‌های دیگر علم همچون اپتیک^۹ [۱۵-۱۸] آکوستیک^{۱۰} [۱۹-۲۰]، الکترونیک^{۱۱} [۲۱-۲۲]، و سایر رشته‌ها نیز بسط داده شد [۲۳]. تا به امروز مطالعات زیادی به صورت تئوری و یا تجربی با استفاده از ساختارهای متقارن پاریته-زمان انجام گرفت، برای مثال می‌توان از لیزرهای مبتنی بر ساختار متقارن پاریته-زمان [۲۴]، موجبرهای پلاسمونیک^{۱۲} [۲۵]، ابرماده‌ها^{۱۳} [۲۶]، سوئیچ‌های نوری^{۱۴} [۲۷]، جذب‌ها^{۱۵} [۲۸]، سولیتون‌های نوری^{۱۶} [۲۹]، شبکه‌های نوری^{۱۷} [۳۰-۳۱]، میکروکاوکاها^{۱۸} [۳۲]، و غیره نام برد. یکی از ساختارهای تجربی ساخته شده، ساختار جفتگر متقارن پاریته-زمان است [۳۳-۳۴]. با توجه به مرجع [۳۳]، در موجبر لیتیوم نایوبیت ناخالصی‌های Fe^{+3} (برای ایجاد بهره) و Fe^{+2} (برای ایجاد تلفات) تزریق می‌کنند. سپس با اعمال پمپ خارجی از

⁹ Optics

¹⁰ Acoustics

¹¹ Electronics

¹² Plasmonic

¹³ Metamaterial

¹⁴ Optical switch

¹⁵ Absorber

¹⁶ Optical soliton

¹⁷ Optical lattice

¹⁸ Micro cavity

¹⁹ Beam propagation method

²⁰ Rsoft

²¹ Self-imaging

های مختلف از جمله نور توسعه پیدا کرد. به عبارت دقیق‌تر در حوزه نور، ضریب شکست مختلط در معادلات پیرامحوری، جایگزین پتانسیل‌های مختلط در معادلات شرودینگر در حوزه تئوری کوانتوم می‌شود. این امر با کمک یک جفت موجبر "بهره/تلفات" جفت شده یا متصل به هم تحقق پیدا می‌کند. برای رعایت شرط تقارن پاریته-زمان در جفتگر مدنظر، قسمت‌های حقیقی و موهومی ضریب شکست باید به ترتیب تابعی زوج $(n_r(x) = n_r(-x))$ و فرد $(n_l(x) = -n_l(-x))$ باشند یعنی قسمت‌های حقیقی ضریب شکست دو بازوی موجبری جفت شده در جفتگر، دارای مقدار یکسان ولی از سوی دیگر یکی از بازوهای جفتگر دارای بهره و بازوی دیگر به همان اندازه دارای تلفات باشد. معادله‌ی انتشار میدان الکتریکی ψ در طول موجبرهای متقارن پاریته-زمان در راستای محور Z ، به صورت زیر است [۳۳]:

$$i \frac{\partial \psi}{\partial z} + (2k_0 n_0)^{-1} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + k_0 [n_r(x) + i n_l(x)] \psi = 0 \quad (5)$$

که در آن $k_0 = 2\pi / \lambda$ ثابت انتشار، n_0 ضریب شکست زمینه و λ طول موج فضای آزاد است.

با توجه به معادله (۵) و با فرض برقراری شرایط تقارن پاریته-زمان بین دو موجبر جفتگر، نحوه انتشار میدان به صورت معادلات جفت شده زیر محاسبه می‌شوند [۳۳]:

$$i \frac{d\psi_2}{dz} = -K\psi_1 - i\alpha/2\psi_2 \quad (2.6) \quad i \frac{d\psi_1}{dz} = i\alpha/2\psi_1 - K\psi_2 \quad (6)$$

که در آن α ، ضریب بهره/تلفات و $K = \pi / 2L_c$ ، ثابت جفت شدگی هستند. به علاوه در این معادله، L_c طول جفت‌شدگی بین دو موجبر (بدون تلفات/بهره) تعریف می‌شود.

با فرض اینکه نور ورودی با شرایط اولیه $\psi'_{1,2}(z=0)$ از یکی از درگاه‌های ورودی جفتگر متقارن وارد جفتگر شود، با حل معادله (۶) و با تعریف پارامتر $\chi = (k^2 - (\alpha/2)^2)^{1/2}$ ، مقدار گذردهی نور در ساختار جفتگر از درگاه ۱ ورودی به درگاه‌های ۱ و ۲ خروجی در جفتگر در نقطه فرضی Z ، به ترتیب برابر $T_{12} = ik \sin(\chi z) / \chi$ و $T_{11} = \cos(\chi z) + \alpha \sin(\chi z) / 2\chi$ می‌شود [۳۷]. جفتگرهای متقارن پاریته-زمان برخلاف جفتگرهای معمولی با توجه به روابط بیان‌شده‌ی انتشار نور، به دلیل وجود بهره/تلفات، رفتاری نامتقارن دارند. به عبارتی سیر تکاملی انتشار نور جفت شده از بازوی بهره به بازوی تلفات با سیر تکاملی انتشار آن از بازوی تلفات به بازوی بهره در جفتگرهای متقارن پاریته-زمان

ساختار پایه‌ای تداخل‌سنج مالتمی‌مد از یک موجبر که توانایی پوشش تعداد قابل توجهی مد (بیشتر از ۳ مد) را دارد، تشکیل می‌شود. به منظور تاباندن نور از ورودی و همچنین دریافت نور از خروجی تعدادی موجبر دسترسی در ابتدا و انتهای ساختار تعبیه می‌گردد. در موجبرهای مالتمی‌مد پروفایل میدان در مسافت Z ، به صورت جمع توزیع میدان‌های همه‌ی مدهای هدایتی نوشته می‌شود [۳۵]:

$$\psi(x, z) = \sum_m c_m \varphi(x) \exp(-j\beta_m z) \quad (1)$$

در این معادله c_m نشان‌دهنده‌ی ضریب تحریک میدان و $\varphi(x)$ ، توزیع میدان مدها و β_m ثابت انتشار مدهای هدایت شونده است. با توجه به مرجع [۳۵] ثابت انتشار طبق معادله‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\beta_m = \frac{2\pi n_r}{\lambda_0} - \frac{(m+1)^2 \pi \lambda_0}{4n_r w_e^2} \quad (2)$$

که در آن n_r ضریب شکست مغزی و w_e عرض مؤثر ناحیه مالتمی‌مد است. در واقع w_e نشان دهنده‌ی عرض مؤثر مد پایه است که از طریق میزان عمق نفوذ به ناحیه‌ی مرزی لبه‌ای، قابل محاسبه است. همچنین λ_0 طول موج فضای آزاد است.

به موجب جفت شدن مدها در فازهای متفاوت، نور به هنگام انتشار در موجبرهای مالتمی‌مد، در موقعیت‌های متفاوتی آشکار می‌شود که این موقعیت‌ها را طول ضربان^{۲۲} می‌نامند که با L_π نمایش داده می‌شود [۳۵]:

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

در حالت کلی عرض مؤثر w_e به صورت تقریبی به صورت زیر قابل محاسبه است [۳۶]:

$$w_e = W_M + \left(\frac{\lambda_0}{\pi} \right) \left(\frac{n_c}{n_r} \right)^{2\sigma} (n_r^2 - n_c^2)^{\left(\frac{1}{2} \right)} \quad (4)$$

در این معادله W_M عرض ناحیه‌ی مالتمی‌مد، و n_r و n_c به ترتیب ضرایب شکست مغزی و پوشش هستند.

۲.۲. جفتگر بر پایه ساختار متقارن پاریته-زمان:

همانطور که بیان شد مفهوم ساختار متقارن پاریته-زمان از مکانیک کوانتوم غیرهمیتی در حوزه نظری آغاز شد و به حوزه

عملکرد سوئیچ طراحی شده در دو حالت فعال و غیرفعال در نظر گرفته می‌شود. در حالت غیرفعال مقدار ضریب بهره/تلفات برابر با صفر است ($a=0$). به عبارت دیگر در این حالت، جفتگر متقارن پاریته-زمان همانند جفتگر متعارف و معمولی عمل می‌کند. بنابراین نور وارد شده به ورودی ۱ ساختار ماخ-زندر، بعد از عبور از جفتگر مالتی مد ۳ dB اولی، به اندازه نصف شدت ورودی وارد بازوی پایینی ساختار ماخ-زندر می‌شود. به عبارت دیگر با وجود یک جفتگر با ضریب بهره/تلفات صفر در بازوی پایین ساختار ماخ-زندر، نور وارد جفتگر می‌شود. طول جفتگر طوری انتخاب شد تا نور دو بار بین موجبرهای جفتگر، جفت شود ($L_{pt} = 2L_c$). همچنین بنابر قانون تئوری مد جفتگرها^{۲۳} در جفتگرهای غیرفعال به ازای هر بار جفت شدن بین موجبرهای جفتگر، نور انتشاری اختلاف فازی برابر نصف π پیدا می‌کند. بنابراین با دو بار جفت-شدگی در حالت غیرفعال، نور با اختلاف فازی برابر با π از بازوی پایینی ماخ-زندر خارج و وارد جفتگر مالتی مد ۳ dB دوم در ساختار سوئیچ می‌شود. اما نور وارد شده از جفتگر مالتی مد ۳ dB اولی به بازوی بالایی ساختار ماخ-زندر، مسیری مستقیم را طی می‌کند و سپس وارد جفتگر ۳ dB مالتی مد دوم می‌شود. بنابراین، دو نور وارد شده به دو ورودی جفتگر ۳ dB مالتی مد دوم اختلاف فازی برابر با π با یکدیگر پیدا می‌کنند. این اختلاف فاز سبب می‌شود بر اثر تداخل این دو نور با یکدیگر، نور از درگاه خروجی ۱ سوئیچ پیشنهادی خارج شود. شکل ۳.الف) نمایه میدان را در مسیر انتشار نمایش می‌دهد. شکل ۳.ب) نیز مقدار شدت به‌هنگار شده را در طول کل ساختار سوئیچ برای دو مسیر مستقیم^{۲۴} و متقاطع^{۲۵} نمایش می‌دهد. مطابق شکل مسیر مستقیم، از ورودی شماره ۱ (۲) در ساختار تا خروجی ۱ (۲) است. همچنین مسیر متقاطع از ورودی ۱ (۲) تا خروجی ۲ (۱) تعریف می‌شود.

در حالت فعال، ضریب بهره/تلفات در جفتگر متقارن پاریته-زمان، برابر $\alpha = 4\lambda/21 \text{ cm}^{-1}$ است. در این حالت، نور پس از ورود به درگاه ورودی ۱ و نصف شدن شدت آن بعد از گذر از جفتگر مالتی مد ۳ dB اولی، وارد بازوی پایینی ساختار ماخ-زندر می‌شود. در این قسمت با وجود بهره و تلفات متقارن در جفتگر متقارن پاریته-زمان و همچنین به موجب رفتار انتشاری نامتقارن نور در این‌گونه جفتگرها، نصف نوری که وارد بازوی بهره‌ای جفتگر می‌شود، با توجه به طول انتخاب شده برای آن، تا انتهای مسیر

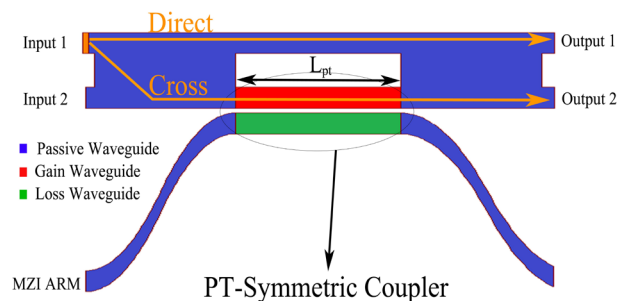
متفاوت است. در واقع با افزایش ضریب بهره/تلفات این رفتار نامتقارن افزایش می‌یابد.

رابطه‌ی بین ضریب بهره/تلفات و قسمت موهومی ضریب شکست موجبر به صورت معادله‌ی زیر تعریف می‌شود [۳۸]:

$$n_i = \frac{\alpha \cdot \lambda}{4\pi} \quad (7)$$

۳. طراحی سوئیچ ۲×۲ و نتایج شبیه‌سازی

ساختار پیشنهادی برای سوئیچ تمام‌نوری خطی در شکل ۲ نمایش داده شد. این سوئیچ بر پایه ساختار ماخ-زندر ۲×۲، از دو جفتگر بر اساس تداخل سنج مالتی مد در ورودی و خروجی تشکیل می‌شود. در واقع این جفتگرها به عنوان یک تقسیم‌کننده ۳ dB عمل می‌کنند. هر یک از این جفتگرهای مبتنی بر تداخل سنج مالتی مد از دو ورودی و دو خروجی تشکیل شده‌اند. جفتگرهای مالتی مد نشان داده شده در شکل ۲، دارای عرض $18 \mu\text{m}$ و طول $784 \mu\text{m}$ هستند. همچنین موجبرهای دسترسی در محل ورودی و خروجی جفتگر، دارای عرض $5 \mu\text{m}$ و طول $50 \mu\text{m}$ هستند. دو جفتگر مبتنی بر تداخل سنج مالتی مد با دو بازو به هم متصل می‌شوند و تشکیل ساختار ماخ-زندر را می‌دهند. این بازوها دارای طول $L_{pt} = 1000 \mu\text{m}$ هستند. همچنین طول جفت‌شدگی (L_c) برای موجبر بدون تلفات/بهره، برابر با $500 \mu\text{m}$ است.



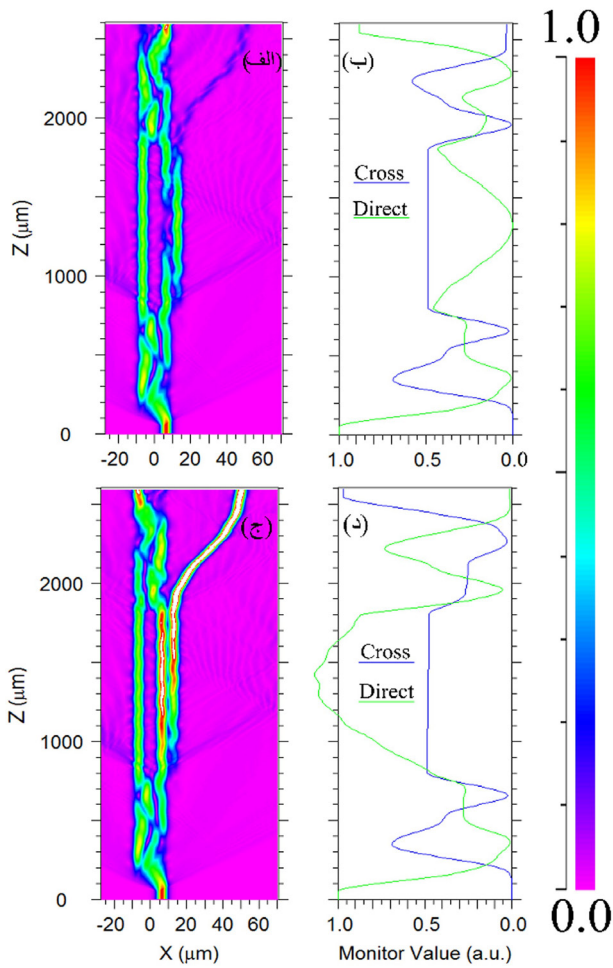
شکل ۲: ساختار سوئیچ ۲×۲ نوری خطی پیشنهاد شده بر پایه ساختار ماخ-زندر که در یک بازو یک جفتگر متقارن پاریته-زمان تعبیه شد.

در بازوی پایینی در شکل ۲، یک جفتگر متقارن پاریته-زمان تعبیه شد که در آن یکی از بازوهای جفتگر (بازوی قرمز رنگ) دارای بهره، و بازوی متناظر آن (بازوی سبز رنگ) در جفتگر دارای همان مقدار تلفات است. ضریب شکست موجبرها در ساختار برابر ۱.۴۶ و از جنس سیلیکا است. همچنین در ساختار سوئیچ طراحی شده بازویی با نام بازوی MZI جهت هدایت نور مازاد به بیرون تعبیه شد که به بازوی پایینی ماخ-زندر متصل می‌شود.

²³ Coupled mode theory
²⁴ Direct
²⁵ Cross

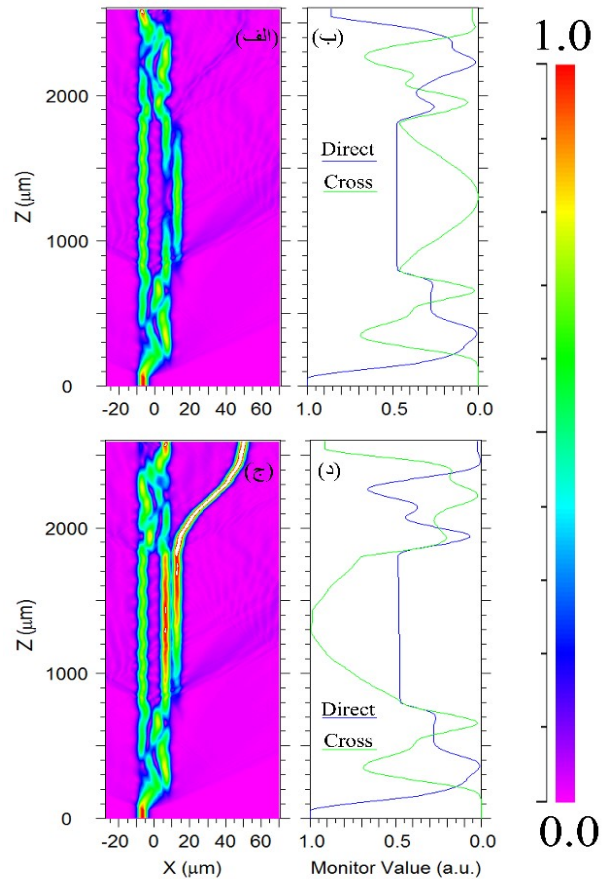
در جفتگر متقارن پاریته-زمان، نور مازادی که بر اثر تقویت شدن نور در موجبر بهره‌ای وارد موجبر تلفاتی می‌شود، بدون اینکه شرط جفت‌شدگی مجدد به موجبر بهره‌ای را تامین کند از بازوی MZI به بیرون انتقال پیدا می‌کند. شکل ۳(د)، شدت به هنجار شده نور را در مسیرهای مستقیم و متقاطع تعریف شده در کل ساختار نشان می‌دهد.

شکل ۴ به ترتیب رفتار نمایه میدان وقتی نور وارد درگاه ورودی ۲ می‌شود را برای حالت غیرفعال (الف) و فعال (ج) نشان می‌دهد. همچنین شکل ۴(ب) و ۴(د)، رفتار شدت به هنجار شده نور در مسیرهای مستقیم و متقاطع را به ترتیب برای حالات غیرفعال و فعال نشان می‌دهد.



شکل ۴: نمایه میدان در کل ساختار سوئیچ در دو حالت غیرفعال (الف) $\alpha=0$ و (ج) فعال با ضریب بهره/تلفات $\alpha=\pm 48/21 \text{ cm}^{-1}$. (ب) و (د) نیز شدت نور به هنجار شده‌ی متناظر قسمت اول شکل، در مسیرهای مستقیم و متقاطع، وقتی نور از درگاه ورودی ۲ وارد ساختار سوئیچ می‌شود را نشان می‌دهد.

جفتگر متقارن پاریته-زمان در بازوی بهره‌ای می‌ماند. به عبارت دیگر به دلیل طول انتخاب شده برای جفتگر متقارن پاریته-زمان، شرط جفت‌شدگی به موجبر تلفاتی تامین نمی‌شود. بنابراین آن بخشی از نور که همچنان در بازوی بهره‌ای در حال انتشار است مستقیماً بدون هیچ‌گونه جفتی وارد جفتگر مالتی‌مد 3 dB دوم می‌شود. از این رو، اختلاف فازی بابت جفت‌شدن بین موجبر بهره و تلفات ایجاد نمی‌شود و فاز آن با نور منتشر شونده از بازوی بالایی ساختار ماخ-زندر یکسان است. همین عدم اختلاف فاز بین دو نور وارد شده به ورودی‌های جفتگر مالتی‌مد 3 dB دوم در ساختار ماخ-زندر سبب می‌شود که تداخل سازنده در محل خروجی ۲ در ساختار سوئیچ رخ دهد و نور از درگاه خروجی ۲ خارج شود. شکل ۳(ج) نمودار نمایه میدان را در کل ساختار سوئیچ زمانی که نور از درگاه ۱ وارد شده و از درگاه خروجی ۲ خارج می‌شود را نشان می‌دهد.



شکل ۳: نمایه میدان در کل ساختار سوئیچ در دو حالت غیرفعال (الف) $\alpha=0$ و (ج) فعال با ضریب بهره/تلفات $\alpha=\pm 48/21 \text{ cm}^{-1}$. (ب) و (د) نیز شدت نور به هنجار شده‌ی متناظر قسمت اول شکل، در مسیرهای مستقیم و متقاطع، وقتی نور از درگاه ورودی ۱ وارد ساختار سوئیچ می‌شود را نشان می‌دهد.

۴. نتیجه گیری

در این مقاله ساختار جدیدی از سوئیچ‌های نوری خطی با استفاده از ترکیب ساختار تداخل سنج ماخ-زندر و ساختار متقارن پاریته-زمان معرفی شد. این ساختار در دو حالت فعال و غیرفعال عمل می‌کند، در حالت غیرفعال (بدون حضور بهره/تلفات) نور ورودی از درگاه ۱(۲) ورودی وارد و از درگاه ۱(۲) خروجی خارج می‌شود همچنین در حالت فعال (با حضور بهره/تلفات) نور ورودی به درگاه ۱(۲) ورودی از درگاه ۱(۲) خروجی خارج می‌گردد. به عبارت دیگر، در این ساختار با اعمال بهره و تلفات (اثر ساختار متقارن پاریته-زمان) به صورت متقارن به بازوی پایینی تداخل سنج ماخ-زندر، نور خروجی بین دو درگاه خروجی ۱ و خروجی ۲، سوئیچ می‌شود. نتایج شبیه‌سازی نشان داد نرخ خاموشی حداقل 14 dB و حداکثر 20 dB است. همچنین تمام نتایج در طول موج کاربردی مخابرات نوری یعنی $155\ \mu\text{m}$ انجام گرفت.

قدردانی: این کار پژوهشی با گرنت پژوهشی دانشگاه تخصصی فناوری‌های نوین آمل انجام گرفت.

مراجع

- [1] G. Aubin, J. Sapriel, V.Y. Molchanov, R. Gabet, P. Grosso, S. Gosselin, Y. Jaouen, 'Multichannel acousto-optic cells for fast optical cross connect', Electron. Lett. Vol. 40, pp. 448-449, 2004.
- [2] S. Gosselin, J. Sapriel, 'Versatile acousto-optic vector-matrix architecture for fast optical space switches', Optical Communication. Vol. 1, pp. 253-254, 1998.
- [3] S. Akiyama, H. Itoh, T. Takeuchi, A. Kuramata, T. Yamamoto, 'Low-chirp 10Gbit/s InP-based Mach-Zehnder modulator driven by 1.2V single electrical signal', Electron. Lett. Vol. 41, pp. 40-41, 2005.
- [4] P.B. Chu, S.S. Lee, S. Park, 'the path to large optical cross connects', IEEE Communication magazine. Vol. 40, pp. 80-87, 2002.
- [5] F. Nazari, Sh. Abdollahi, 'PT-symmetric system based optical modulator' Applied Physics B. Vol. 100, pp. 124-197, 2018.
- [6] F. Mehdizadeh, M. Soroosh, Hamed Alipour-Banaei, E. Farshidi, 'All optical 2-bit analog to digital converter using photonic crystal based cavities', Optical and Quantum Electronics, Vol. 49, 2017.
- [7] O. Qasaimeh, 'Multichannel and Multistate All-Optical Switch Using Quantum-Dot and Sample-Grating Semiconductor Optical Amplifier', Electronics. Vol. 7, pp. 166, 2018.

در انتها دو شاخص مهم، یعنی نرخ خاموشی^{۲۶} و تلفات ذاتی تعریف می‌گردد. طبق تعریف، نرخ خاموشی از رابطه زیر حاصل می‌شود[۳۹]:

$$ER = 10 \log_{10} (P_{Low} / P_{High}) \quad (8)$$

که در آن توان پایین و بالا به ترتیب مقدار پایین‌ترین و بالاترین توان در درگاه خروجی در حالات صفر و یک سوئیچ است.

طبق نتایج شبیه‌سازی در شکل ۳ و ۴ در حالت فعال (جفتگر دارای بهره/تلفات) و غیرفعال (جفتگر فاقد بهره/تلفات)، سوئیچ دارای ضریب خاموشی به ترتیب $ER_{active} = -20/41\text{ dB}$ و $ER_{passive} = -14/62\text{ dB}$ است.

همچنین، مقدار تلفات داخلی از رابطه زیر حاصل می‌شود[۳۹]:

$$IL.(dB) = 10 \log_{10} (P_{out} / P_{in}) \quad (9)$$

که در آن P_{in} و P_{out} به ترتیب توان خروجی و ورودی سوئیچ هستند. تلفات داخلی برای سوئیچ ارائه شده در جدول ۱ مطابق رابطه (۹) محاسبه شد.

جدول ۱. میزان تلفات داخلی محاسبه شده در دو حالت فعال و غیرفعال برای زمانی که نور از ورودی ۱ تابیده می‌شود.

	خروجی ۱ (dB)	خروجی ۲ (dB)
فعال	-۱۷.۴۴	-۰.۴۱
غیر فعال	-۰.۶۷	-۱۵.۰۱۲

در پایان، مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از ساختار پیشنهادی در این مقاله با چند ساختار ارائه شده در گذشته در جدول ۲ ارائه شد.

جدول ۲. مقایسه‌ی نتایج ساختار پیشنهادی با مقاله‌های دیگر

نحوه عملکرد	ضریب خاموشی (فعال) (dB)	تلفات داخلی (مقاطع) (dB)	تلفات داخلی (مستقیم) (dB)
ساختار فعلی	-۲۰.۴۱	-۲۰	-۰.۶
مرجع [۳۹]	-۱۹.۹۱	-۱۶.۶	-۰.۳۹
مرجع [۴۰]	---	-۶.۷	-۱۴

- [21] Y. Fang, Y. Zhang, J. Xia, 'Reversible unidirectional reflection and absorption of PT-symmetry structure under electro-optical modulation' Optics Communications. Vol.416, pp. 25-31, 2018.
- [22] N. Bender, S. Factor, J. D. Bodyfelt, H. Ramezani, D. N Christodoulides, F. M Ellis, T. Kottos, 'Observation of asymmetric transport in structures with active nonlinearities', Phys. Rev. Lett, Vol.110, pp. 234101, 2013.
- [23] V. V. Konotop, J.e Yang, and D. A. Zezyulin, 'Nonlinear waves in PT-symmetric systems', Rev. Mod. Phys. Vol.88, pp. 035002, 2016.
- [24] L. Pilozzi, C. Conti, 'Topological cascade laser for frequency comb generation in PT -symmetric structures' Optics Letters. Vol.42, pp. 5174-5177, 2017.
- [25] G. Veronis, Y. Huang, C. Min, 'Non-PT-symmetric plasmonic waveguide-cavity systems: unidirectional reflection lessness and broadband near total light absorption' Active Photonic Platforms IX. Vol. 10345, pp. 103451Z, 2017.
- [26] Y. Fu, Y. Xu, 'Asymmetric effects in waveguide systems using PT symmetry and zero index metamaterials' Scientific Reports.Vol.7, pp. 12476, 2017.
- [27] F. Nazari, M. Nazari, and M. K. Moravvej-Farshi, 'A 2×2 spatial optical switch based on PT symmetry', Opt. Lett.Vol.36, pp. 4368-4370, 2011.
- [28] H. Ramezani, Y. Wang, E. Yablonovitch, X. Zhang, 'Unidirectional Perfect Absorber', IEEE J. Sel. Topics Quantum Electron,22, 115-120, 2016.
- [29] P Li, D Mihalache, B Malomed, 'Optical solitons in media with focusing and defocusing saturable nonlinearity and a parity-time-symmetric external potential' Physics Optics. Vol.376, pp. 2124,2018.
- [30] S Hu, X Ma, D Lu, Y Zheng, W Hu, 'Defect solitons in parity-time-symmetric optical lattices with nonlocal nonlinearity' Physics Review A. Vol.85, pp. 043826,2012.
- [31] F. Nazari, M.K. Moravvej-Farshi, 'Multi-channel optical isolator based on nonlinear triangular parity time symmetric lattice', IEEE J. Quant. Electron. Vol.52, PP. 6100207,2016.
- [32] J Wen, X Jiang, L Jiang, M Xiao, 'Parity-time symmetry in optical micro cavity systems' Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. Vol.51, pp. 22,2018.
- [33] C. E. Ruter, K. G. Makris, R. El-Ganainy, D. N. Christodoulides, M. Segev, and D. Kip, 'Observation of parity-time symmetry in optics', Nat. Phys.6, 192-195, 2010.
- [34] A. Guo, G. J. Salamo, D. Duchesne, R. Morandotti, M. Volatier-Ravat, V. Aimez, G. A. Siviloglou, and D. N. Christodoulides, 'Observation of PT-Symmetry Breaking in Complex Optical
- [8] K. Suzuk, K. Tanizawa, S. Suda, H.Matsuura, T. Inoue, Kazuhiro Ikeda, S. Namiki, H. Kawashima, 'Broadband silicon photonics 8×8 switch based on double-Mach-Zehnder element switches' Optics Express, Vol. 25, pp. 7538-7546, 2017.
- [9] Z Guo, L Lu, L Zhou, L Shen, J Chen, '16 \times 16 Silicon Optical Switch Based on Dual-Ring-Assisted Mach-Zehnder Interferometers' Lightwave Technology. Vol.36, pp. 225-232, 2018.
- [10] D. Yang, Y. Li, F. Sun, S. Chen, J. Yu, 'Fabrication of a 4×4 strictly non-blocking SOI switch matrix', Opt. Communications. Vol. 250, pp. 48-53, 2005.
- [11] R. Ghayour, A. NaseriTaheri, M.T. Fathi, 'Integrated Mach-Zehnder-based 2×2 all-optical switch using nonlinear two-mode interference waveguide', Apply Optics. Vol. 47, pp. 632-638, 2008.
- [12] W. Samir, C. Pask, S.J. Garth, 'Signal switching by a control beam in a nonlinear coupler', JOSA B. Vol. 11, pp. 2193-2205, 1994.
- [13] F. Nazari, N. Bender, H. Ramezani, M.K. Moravvej-Farshi, D.N. Christodoulides, T. Kottos, 'Optical isolation via PT-symmetric nonlinear Fano resonances', Opt. Exp. Vol, 22, pp. 9574-9578, 2014.
- [14] C. M. Bender and S. Boettcher, 'Real spectra in non-Hermitian Hamiltonians having PT symmetry', Phys. Rev. Lett. Vol.80, pp. 5243-5246, 1998.
- [15] K. Ji, Z. Wen, Z. Liu, Y. Dai, K. Han, P. Gao, A. Gao, J. Bai, G. Zhang, X. Qi, 'Asymmetric localization induced by non-Hermitian perturbations with PT symmetry in photonic lattice' Optics Letters. Vol. 43, pp.4457-4460, 2018.
- [16] G. Gbur, K. Makri, 'Introduction to non-Hermitian photonics in complex media: PT-symmetry and beyond' Photonics Research, Vol. 6, PP. PTS1,2018.
- [17] C. E. Ruter, K. G. Makris, R. El-Ganainy, D. N. Christodoulides, M. Segev, and D. Kip, 'Observation of parity-time symmetry in optics', Nature Physcs. Vol.6, pp. 192-195, 2010.
- [18] L. Feng, M. Ayache, J. Huang, Y. L. Xu, M.-H. Lu, Y. F. Chen, Y. Fainman, and A. Scherer, 'Nonreciprocal light propagation in a silicon photonic circuit', Science. Vol. 333, pp. 729-733, 2011.
- [19] T. Liu, X. Zhu, F. Chen, Sh. Liang, J. Zhu, 'Unidirectional Wave Vector Manipulation in Two-Dimensional Space with an All Passive Acoustic Parity-Time-Symmetric Metamaterials Crystal' Phys. Rev. Lett.Vol.120, pp. 124502, 2018.
- [20] C. Shi, M. Dubois, Y. Chen, L. Cheng, H. Ramezani, Y. Wang, X. Zhang, 'Accessing the exceptional points of parity-time symmetric acoustics', Nature Communication. Vol.7, pp. 11110, 2016.

- Potentials', Phys. Rev. Lett. V. 103, PP. 093902, 2009.
- [35] L. Chung, S. Lee, Y. Lin, 'Principles and application of reduced beat length in MMI couplers' Optics express. Vol. 14, pp 19 / 8753, 2006.
- [36] T. Augustsson, 'Bragg Grating-Assisted MMI-Coupler for Add-Drop Multiplexing' Light wave Technology, Vol. 8, PP 1517, 1998.
- [37] H. Benisty, A. Degiron, A. Lupu, A. D. Lustrac, S. Chénaïs, S. Forget, M. Besbes, G. Barbillon, A. Bruyant, S. Blaize, and G. Lérondel, 'Implementation of PT symmetric devices using plasmonics principle and applications', Opt Express. Vol. 19, PP. 18004-18019, 2011.
- [38] M. Marciniak, "Light Propagation in optical waveguides with complex refractive indices" optical Applicata, V. 4, 1996.
- [39] A. Bahrami, A. Rostami, F. Nazari, 'MZ-MMI-based all-optical switch using nonlinear coupled waveguides', Elsevier. Vol. 122, PP. 1787-1790, 2010.
- [40] L. Lu, S. Zhao, L. Zhou, D. Li, Z. Li, M. Wang, X. Li, and J. Chen, '16 × 16 non-blocking silicon optical switch based on electro-optic Mach-Zehnder interferometers', Optics Express, V. 24, pp. 9295-9307, 2016.