



Design of photonic crystal all-optical demultiplexer for optical analog-to-digital circuits using nonlinear Kerr effect

N. Esmaeeli, M. S. Feali, Fariborz Parandin*

* Associate Professor, Department of Electrical Engineering, Islamic Azad University, Kermanshah Branch, Kermanshah, Iran

(Received: 2024/07/12 revised: 2024/09/15 Accepted:2024/10/09 published: 2024/11/06)

Abstract

This research presents a new design of nonlinear demultiplexers. Three square nonlinear ring resonators are used in this structure. The rods used in the structure are made of silicon, and the nonlinear rods inside the resonators are made of contaminated glass. In this structure, the optical Kerr effect is used, which controls the optical behavior of the nonlinear demultiplexer. The proposed structure has a non-linear demultiplexer that can create several quantized discrete levels. The analysis of the proposed nonlinear demultiplexer has been investigated using PWE and FDTD methods. The proposed structure has a dimension of $324 \mu\text{m}^2$ as well as a sampling rate of 125 Gs/s with minimal leakage losses. Also, due to its nonlinear property, this structure can be used in all-optical analog-to-digital converters (ADC).

Keywords: Photonic Crystal, Demultiplexer, Kerr Effect

Cite this article: N.Esmaeeli, M.S. Feali, F.Parandin, "Design of photonic crystal all-optical demultiplexer for optical analog", *AppliedElectromagnetics* ,vol.12,no.2,pp.73-79 <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.8.8>



OPEN ACCESS

© The Author(s).

Publisher: Imam Hossein University

*Corresponding Author Email: fa.parandin@iau.ac.ir

علمی - پژوهشی

طراحی دی مالتی پلکسر تمام نوری بلور فوتونی برای مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال نوری با استفاده از اثر غیرخطی کر

نگار اسماعیلی^۱، محمد سعید فعلی^۲، فریبرز پرندین^{۳*}

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

۳- دانشیار، گروه مهندسی برق، واحد کرمانشاه، دانشگاه آزاد اسلامی، کرمانشاه، ایران

(دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲، بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۱۸، انتشار: ۱۴۰۳/۰۸/۱۶)

چکیده

در این تحقیق، طرح جدیدی از دی مالتی پلکسر غیرخطی ارائه شده است. این ساختار از سه تشدیدگر حلقه‌ای غیرخطی مربعی شکل تشکیل شده است. میله‌های استفاده شده در این سازه، از جنس سیلیکون است و میله‌های غیرخطی درون تشدیدگرها از جنس شیشه آلیپیده شده هستند. در این ساختار از اثر نوری کر استفاده شده تا رفتار نوری دی مالتی پلکسر غیرخطی را کنترل کند. ساختار پیشنهادی، دارای یک دی مالتی پلکسر غیرخطی است که با طول موج نور ورودی 1550 nm می‌تواند چند سطح گسسته کمی شده را ایجاد کند. تحلیل دی مالتی پلکسر غیرخطی پیشنهادی با استفاده از روش‌های PWE و FDTD بررسی گردیده است. سازه‌ی پیشنهادی، دارای ابعاد $324\text{ }\mu\text{m}^2$ است و همچنین نرخ نمونه‌برداری برابر با 125 Gs/s با حداقل تلفات نشت است. دقت تفکیک بالا در خروجی‌ها و همچنین سادگی ساختار را می‌توان به‌عنوان دیگر مزایای طرح پیشنهادی نام برد. افزون بر این، ساختار پیشنهادی به علت خاصیت غیرخطی می‌تواند در مبدل‌های تمام نوری آنالوگ به دیجیتال (ADC) به کار رود.

کلیدواژه‌ها: بلورهای فوتونی، دی مالتی پلکسر، اثر کر.

۱- مقدمه

می‌افتد. همچنین افزایش تعداد ترانزیستورها بر روی تراشه امکان‌پذیر شده و در نتیجه سرعت پردازنده افزایش می‌یابد. اما به دلیل محدودیت‌های ساخت و نیز فیزیک حاکم بر ادوات نیمه-هادی، فرایند کوچک‌سازی زمانی به حد نهایی خود خواهد رسید.

بنابراین پیش بینی می‌شود دیگر امکان کوچک‌تر شدن ترانزیستورها وجود نخواهد داشت و رشد سرعت پردازنده‌ها، متوقف خواهد شد. به همین دلیل، در سال‌های اخیر علاقه به

با توسعه فناوری، ترانزیستور یکی از اصلی‌ترین اجزای یک مدار الکترونیکی شناخته شده است. از آنجاکه ترانزیستور الکترونیکی بر مبنای الکترون کار می‌کند، بدیهی است که برای کلید زنی می‌بایست الکترون‌ها از یک سوی ترانزیستور به سوی دیگر هدایت شوند. با کوچک‌تر شدن ترانزیستورها، و به تبع آن کوتاه‌تر شدن کانال آن‌ها، پروسه کلید زنی در زمان کوتاه‌تر اتفاق

استناد: اسماعیلی، نگار، فعلی، محمد سعید، پرندین، فریبرز، "طراحی دی مالتی پلکسر تمام نوری بلور فوتونی برای مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال نوری با استفاده از اثر غیرخطی کر"، الکترومغناطیس کاربردی، ۱۲ (۲)، ۷۳-۹۳، ۱۴۰۳. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.26455153.1403.12.2.8.8>

طراحی شده‌اند.

بیشتر سیگنال‌ها در دنیای واقعی به صورت پیوسته در زمان هستند و برای پردازش آن‌ها توسط رایانه‌ها باید ابتدا به سیگنال‌های گسسته در زمان تبدیل شوند. یکی از خواص دی‌مالتی-پلکسر غیرخطی، گسسته نمودن سیگنال‌های پیوسته است. همچنین، یکی از کاربردهای جدید بلورهای فوتونی، استفاده از دی‌مالتی پلکسرهای غیرخطی در سایر مدارهای نوری نظیر مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال تمام نوری است [۲۴].

محققان نشان داده‌اند که رفتار نوری بلورهای فوتونی به ضریب شکست آن‌ها بستگی دارد. به عبارت دیگر ضریب شکست ماده دی‌الکتریک به شدت نور ورودی بستگی دارد که به اثر نوری کر^۱ معروف است. ساختارهای بلور فوتونی می‌توانند برای طراحی‌های مختلف مورد استفاده قرار گیرند، زیرا رفتار نوری آن‌ها از طریق میله‌های غیرخطی و با شدت نور قابل کنترل است.

یکی از بخش‌های مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال، دی‌مالتی-پلکسر است. طراحی این قسمت از مبدل بسیار مهم است، زیرا خروجی آن‌ها به خروجی نهایی مبدل منتهی می‌شود. تاکنون کارهای بسیار محدودی در زمینه طراحی دی‌مالتی پلکسر و مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال بر مبنای بلورهای فوتونی دوبعدی انجام شده است. در این ساختارها از تشدیدگرهای غیرخطی استفاده شده است. در اکثر آن‌ها تشدیدگرها دارای پیچیدگی زیادی بوده و در موقع ساخت دارای مشکلاتی خواهند بود. از دیگر معایب آن‌ها، ابعاد بزرگ آن‌ها است. همچنین در بعضی از آن‌ها توان در حالت ۱ منطقی نسبتاً پایین بوده یا توان در حالت صفر منطقی نسبتاً بالا است [۲۶-۲۵].

در این مقاله در طراحی ساختار پیشنهادی تلاش شده است که با توجه به معایب ساختارهای گذشته، از یک ساختار با تشدیدگرهای تقریباً یکسان، ساده و متقارن استفاده شود. همچنین، سعی شده است تا طرح پیشنهادی دارای ابعاد کوچکی باشد. از اهداف دیگر این ساختار، زمان پاسخگویی مناسب است.

۲- ساختار اولیه بلور فوتونی

برای تحقق دی‌مالتی پلکسر غیرخطی پیشنهادی از یک بلور فوتونی با آرایش مربعی برای میله‌های دی‌الکتریک در پس‌زمینه هوا استفاده شده است. در ساختار پیشنهادی، مقدار ثابت شبکه که فاصله بین دو مرکز میله مجاور است، برابر با $a=600\text{nm}$ در نظر گرفته شده است.

در این ساختار ضریب شکست میله‌های دی‌الکتریک $3/46$ بوده و شعاع میله‌ها در ساختار پیشنهادی $r=0/2a$ در نظر

جایگزینی پردازنده‌های الکترونیکی با پردازنده‌های مبتنی بر فوتون به شدت افزایش یافته است. همچنین میل به تمام نوری کردن دستگاه انتقال اطلاعات و پردازش وجود دارد. یکی از ساختارهایی که بیشتر مورد توجه محققان قرار گرفته است بلورهای فوتونی است. این ساختارها دارای یک ساختار متناوب بوده که می‌توانند در یک، دو یا سه بعد متناوب باشند. یکی از چالش‌های اساسی در طراحی و ساخت بلورهای فوتونی دوبعدی، نیاز به دقت بالا در مقیاس کوچک است. ویژگی‌های نوری این بلورها تا حد زیادی به این وابسته است که این ساختارها تا چه حد دقیق طراحی و ساخته شده باشند. هرگونه تغییر کوچکی در ابعاد یا ترکیب مواد می‌تواند تأثیرات عمده‌ای بر عملکرد نوری بلور بگذارد. ساخت بلورهای فوتونی دوبعدی علاوه بر نیاز به دقت بالا، با چالش‌های دیگری مانند انتخاب مواد مناسب و استفاده از فناوری‌های پیشرفته در ساخت مواجه است. از طرفی، با پیشرفت‌های روزافزون در فناوری‌های نانو و علم مواد، این چالش‌ها به تدریج قابل حل شدن هستند. توسعه روش‌های تولید ارزان‌تر، دقیق‌تر، و مقیاس پذیر می‌تواند به گسترش کاربرد این بلورها در صنایع مختلف، از جمله اپتیک، مخابرات و پردازش اطلاعات کمک کند. [۴-۱].

امروزه فیبرهای بلور فوتونی در مدارهای مخابراتی تمام نوری از اهمیت بالایی برخوردارند، زیرا نسبت به مدارهای الکترونیکی از سرعت پردازش بالاتر، بازدهی عالی، توان تلفاتی کمتر و دقت در پردازش داده‌ها بهره‌مند هستند [۶-۵]. این موضوع باعث شده است در چند دهه اخیر مطالعات فراوانی در زمینه^۱ مختلف بر روی فیبرهای بلور فوتونی انجام شود. از کاربردهای بلورهای فوتونی می‌توان به فیبرهای نوری، حسگرها و فیلترها اشاره کرد. بلورهای فوتونی به عنوان محیطی برای انتشار نور قابل استفاده است و با توجه به این خاصیت، قابلیت استفاده در مدارهای آنالوگ و دیجیتال مختلف را دارند. هرچند بیشتر فعالیت‌های انجام شده در این زمینه، شامل شبیه‌سازی است، اما اخیراً تعدادی ادوات نوری با استفاده از بلورهای فوتونی ساخته شده‌اند، که می‌توان به فیبرهای بلور فوتونی و سانسورهای اپتیکی اشاره کرد. انتظار می‌رود با پیشرفت تکنولوژی ساختار بلورهای فوتونی دوبعدی، ساخت سایر ادوات اپتیکی نیز در آینده امکان پذیر شود [۱۴-۷].

یکی از کاربردهای مهم بلورهای فوتونی، استفاده در مدارهای دیجیتال است. تاکنون، انواع مدارهای دیجیتال بر اساس بلورهای فوتونی طراحی شده‌اند. این مدارها شامل انواع گیت‌های منطقی می‌شوند [۱۸-۱۵]. علاوه، مدارهای دیجیتال مختلفی مانند دیکدرها [۱۹]، انکدرها [۲۰]، مقایسه کننده‌ها [۲۱]، تفریق گرها [۲۲] و جمع کننده‌ها [۲۳] نیز با استفاده از این ساختار

¹ Optical Kerr effect

وظیفه دی‌مالتی پلکسر غیرخطی این است که سیگنال پیوسته ورودی را با توجه به شدت نور ورودی به سه سطح گسسته تبدیل کند. در ساختار دی‌مالتی پلکسر غیرخطی پیشنهادی از سه حلقه مربعی R_1 ، R_2 و R_3 استفاده شده است که عمل کلید زنی در دی‌مالتی پلکسر غیرخطی به واسطه این سه حلقه انجام می‌شود (شکل ۲ الف)). در داخل حلقه‌ها چند میله غیرخطی به‌منظور استفاده از اثر کر^۳ قرار داده شده است (شکل ۲ ب)).

میله‌های غیرخطی از جنس شیشه آلاینده شده^۴ می‌باشند که ضریب شکست خطی و ضریب غیرخطی کر در این میله‌ها به ترتیب $1/4$ و $10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$ هستند. این میله‌های غیرخطی، به دلیل اثر غیرخطی کر، می‌توانند شدت نور ورودی را کنترل کنند. به این صورت که ضریب شکست میله‌های غیرخطی با افزایش توان ورودی افزایش می‌یابد و طول موج تشدید نیز تغییر می‌کند. به عبارت دیگر، خاصیت اثر غیرخطی کر این است که رفتار نوری دی‌مالتی پلکسر با شدت نور ورودی کنترل شود. این میله‌های غیرخطی در حلقه‌ها، به رنگ مشکی در شکل ۲ نشان داده شده‌اند. سه خروجی دی‌مالتی پلکسر غیرخطی به ترتیب O_1 ، O_2 و O_3 نام‌گذاری شده‌اند. لازم به ذکر است که ضریب شکست موثر میله‌های غیرخطی از رابطه (۱) به دست می‌آید:

$$(1) \quad n = n_1 + n_2 I$$

که n_1 ضریب شکست خطی میله، n_2 ضریب غیرخطی کر و I شدت نور است.

در شکل ۳ توزیع توان نوری با توجه به شدت‌های نوری متفاوت در ورودی نشان داده شده است. مطابق این شکل، برای ورودی $0 < P_{in} < 19P_0$ (که $P_0 = 1/3 \text{ W}/\mu\text{m}^2$) در نظر گرفته شده است) هیچ کدام از حلقه‌ها نور را از خود عبور نمی‌دهد و شدت نور، در خروجی‌ها بسیار پایین است.

زمانی که شدت نور ورودی محدوده‌های $P_0 < 25P_0$ ، $19P_0 < P_{in} < 60P_0$ و $25P_0 < P_{in} < 60P_0$ قرار دارد، حلقه‌های R_1 ، R_3 و R_2 به ترتیب کلید زنی می‌کنند. در حقیقت این عمل به علت استفاده از اثر نوری کر بر میله‌های دی‌الکتریک است که ضریب شکست حلقه‌ها را تغییر می‌دهد. ذکر این نکته ضروری است که در خروجی‌های O_1 ، O_2 و O_3 زمانی توان نوری وجود دارد که طول موج مرکزی باحالت تشدید حلقه‌های غیرخطی، مطابقت داشته باشد.

زمانی که شدت نور ورودی کمتر از $19P_0$ باشد (شکل ۴ الف)) طول موج مرکزی، باحالت تشدید هیچ کدام از حلقه‌ها مطابقت ندارد و توان خروجی به‌نجار شده در خروجی‌ها، $0/1$ خواهد بود.

زمانی که شدت نور ورودی محدوده $19P_0 < P_{in} < 25P_0$

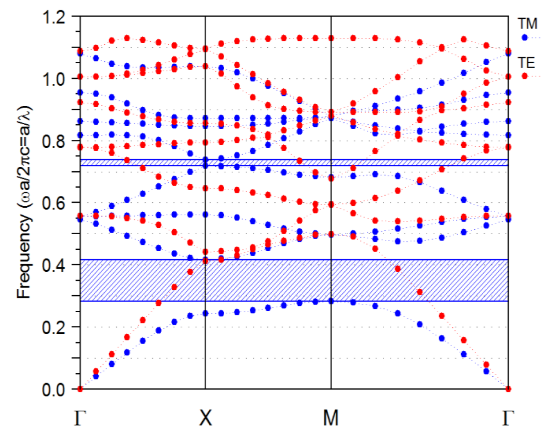
گرفته شده است. شکل ۱ نمودار نوار ممنوعه فوتونی^۱ (PBG) را برای ساختار پیشنهادی نشان می‌دهد. این ساختار باند با استفاده از نرم‌افزار RSoft CAD محاسبه شده است. پارامترهای فیزیکی ساختار مورد استفاده در این مقاله در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول (۱). پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی

نام پارامتر	علامت	مقدار
تعداد میله‌ها	-	51×20
ابعاد	-	$342 \mu\text{m}^2$
ثابت شبکه	a	60 nm
شعاع میله‌ها	r	120 nm
شعاع میله‌های R_1	R_1	102 nm
شعاع میله‌های R_2	R_2	30 nm
شعاع میله‌های R_3	R_3	48 nm

PBG ناحیه‌ای است که نور قادر به عبور از ساختار بلور فوتونی نیست و پس از برخورد به آن منعکس می‌شود. این نمودار نوری، از طریق بسط امواج تخت^۲ (PWE) با استفاده از محاسبات ساختار نوار به دست آمده است. در شکل ۱ می‌توان به وضوح مشاهده کرد که ساختار اولیه دارای دو نوار PBG در حالت TM است.

محدوده PBG اصلی، دارای فرکانس به‌نجار شده در محدوده $0/29 < a/\lambda < 0/42$ است. با یک محاسبه ساده می‌توان نشان داد که طول موج معادل آن، طول موج‌هایی در محدوده $2/07 \mu\text{m} < \lambda < 1/43 \mu\text{m}$ است.



شکل (۱). نمودار نوار ممنوعه فوتونی برای مدهای TE و TM در بلور فوتونی پیشنهادی

۳- دی مالتی پلکسر غیرخطی

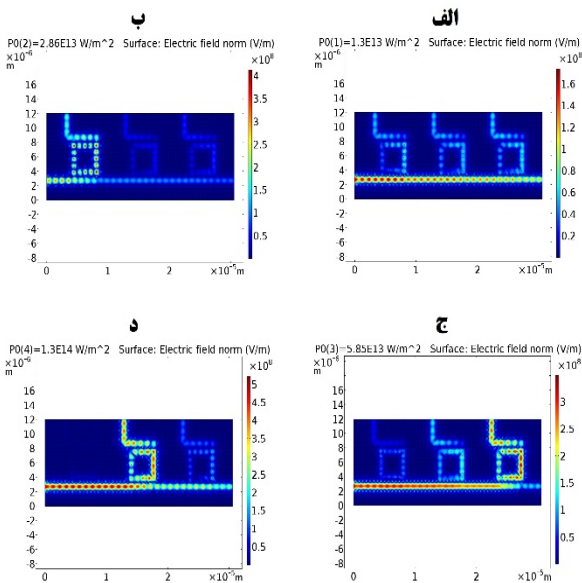
می‌توان گفت دی‌مالتی پلکسر غیرخطی، نمونه‌برداری و گسسته کردن سیگنال پیوسته را در زمان انجام می‌دهد. در حقیقت

^۳ Kerr effect
^۴ Doped glass

^۱ Photonic Band Gap
^۲ Plane Wave Expansion

در شکل ۳ (ج) توان در محدوده $۶۰P_0 < P_{in} < ۲۵P_0$ قرار دارد. چنانچه دیده می‌شود در این حالت بیشترین توان به خروجی O_3 انتقال یافته و توان در دو خروجی دیگر بسیار کم است. یعنی می‌توان خروجی O_3 را به‌عنوان ۱ منطقی و دو خروجی دیگر را به‌عنوان ۰ منطقی در نظر گرفت. توزیع توان نوری در حالت آخر یعنی وقتی که خروجی در محدوده $۱۶۰P_0 < P_{in} < ۶۰P_0$ قرار دارد در شکل ۳ (د) نمایش داده شده است. با توجه به شکل، دیده می‌شود که در این حالت تنها خروجی O_2 دارای توان بالا بوده و در دو خروجی دیگر توان بسیار کم است.

به‌منظور صحت‌سنجی نتایج شبیه‌سازی‌های فوق، شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار کامسول تکرار شده است، که در شکل ۴ نتایج آن نشان داده شده است. همان‌گونه که در شکل مشخص است، نتایج این شبیه‌سازی با نتایج حاصل از نرم‌افزار RSoft CAD مطابقت مناسبی دارد.

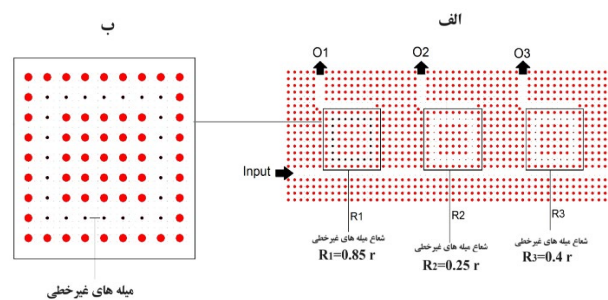


شکل (۴). صحت‌سنجی رفتار نوری دی‌مالتی‌پلکسر در مقادیر مختلف توان ورودی در نرم‌افزار کامسول

شکل ۵ مقدار توان بهنجار شده در خروجی در حالت‌های مختلف ورودی را نشان می‌دهد. چنان‌که دیده می‌شود، شکل ۵ (الف) خروجی‌ها را در سطح اول یعنی $۰ < P_{in} < ۱۹P_0$ نشان می‌دهد. طبق آن، هر سه خروجی دارای توان بسیار کم و در حدود ۰/۱ هستند و می‌توان آن‌ها را به‌عنوان ۰ منطقی در نظر گرفت. شکل ۵ (ب) مربوط به سطح دوم توان ورودی است یعنی زمانی که $۱۹P_0 < P_{in} < ۲۵P_0$. با توجه به این شکل، دیده می‌شود که خروجی O_1 دارای توان بهنجار شده حدود ۰/۹ بوده، درحالی‌که توان دو خروجی O_2 و O_3 به ترتیب برابر با ۰/۰ و ۰/۱ بهنجار شده هستند.

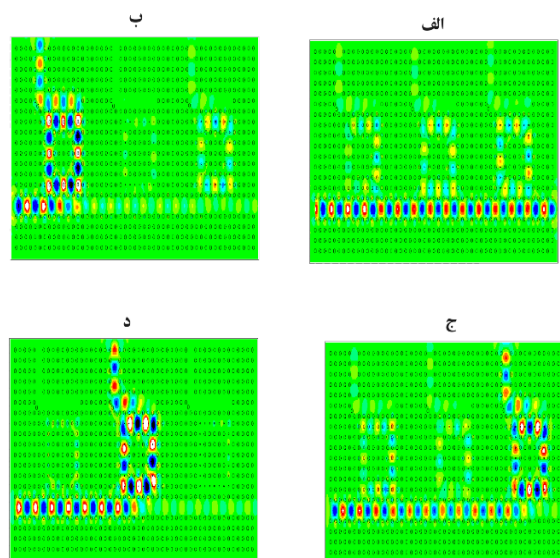
است، خروجی O_1 توان بهنجار شده برابر با ۰/۹۵ را عبور می‌دهد و O_2 ، O_3 هم توانی برابر با ۰/۰ و ۰/۱ خواهند داشت (شکل ۴(ب)).

اگر شدت نور ورودی $۲۵P_0 < P_{in} < ۶۰P_0$ باشد، O_3 توان بهنجار شده ۰/۸۵ را عبور می‌دهد و توان در خروجی‌های O_1 و O_2 برابر با ۰/۱ است (شکل ۴(ج)). درحالت آخر اگر شدت نور ورودی بین $۱۶۰P_0 < P_{in} < ۶۰P_0$ رخ دهد، توان بهنجار شده خروجی O_2 برابر با ۱ را داشته و این توان در خروجی‌های O_1 و O_3 نزدیک به ۰/۰ است (شکل ۴(د)).



شکل (۲). (الف) دی‌مالتی‌پلکسر غیرخطی به همراه سه حلقه غیرخطی و (ب) حلقه‌های غیرخطی

شکل ۳ (الف) توان بهنجار شده را در حالت اول یعنی $۰ < P_{in} < ۱۹P_0$ نشان می‌دهد. در این حالت توان تشدید هیچ‌کدام از حلقه‌ها، نه‌تنها در این محدوده قرار نداشته، بلکه در تمام خروجی‌ها بسیار کم است. در این حالت می‌توان گفت که توان خروجی در هر سه خروجی تقریباً معادل با ۰ منطقی است.



شکل (۳). رفتار نوری دی‌مالتی‌پلکسر در مقادیر مختلف توان ورودی در نرم‌افزار RSoft CAD

در شکل ۳ (ب) توان ورودی به ساختار در محدوده $۱۹P_0 < P_{in} < ۲۵P_0$ قرار گرفته است. در این حالت حلقه R1 کلید زنی می‌کند و توان از طریق این حلقه به خروجی O_1 انتشار می‌یابد.

است. همچنین ساختار استفاده شده نسبت به ساختارهای قبلی ساده تر است به طوری که در هر حلقه از میله‌های غیرخطی یکسان استفاده شده است.

نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی دارای زمان تأخیر $0.16 ps$ در بدترین حالت است، همچنین نرخ نمونه‌برداری به دست آمده برای ساختار پیشنهادی $125 Gs/s$ است.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق ساختار جدید برای دی مالتی پلکسر با استفاده از سه تشدیدکننده غیرخطی با شبکه مربعی شکل ارائه شده است. در این ساختار، دی مالتی پلکسر غیرخطی وظیفه نمونه‌برداری از شدت نور ورودی (سیگنال پیوسته) را بر عهده دارد. درون دی مالتی پلکسر چند میله دی الکتریک خطی و غیرخطی به کار برده شده است. میله‌های غیرخطی دارای ضریب شکست خطی $n_1 = 1/4$ و ضریب غیرخطی $n_2 = 10^{-4} m^2/w$ هستند. عملکرد ساختار پیشنهادی با استفاده از روش‌های PWE و FDTD در طول موج $1550 nm$ بررسی شده است. علاوه بر دقت تفکیک بالا در خروجی‌ها، مزیت دیگر ساختار پیشنهادی نسبت به ساختارهای قبل سادگی ساختار و استفاده از حلقه‌های مربعی شکل متقارن است. همچنین ساختار پیشنهادی دارای ابعادی برابر با $1324 \mu m^2$ بوده که برای استفاده در مدارهای مجتمع نوری مناسب است. حداکثر پاسخ زمانی در خروجی $0.16 ps$ بوده و نرخ نمونه‌برداری نیز $125 Gs/s$ است.

۵- مراجع

[1] A. Askarian, and F. Parandin, "Investigations of all-optical gates based on linear photonic crystals using the PSK technique and beam interference effect," *Electromagnetics*, vol. 43, no.5, pp. 291-308, 2023 <https://doi.org/10.1080/02726343.2023.2244829>

[2] S. Olyae, "Ultra-fast and compact all-optical encoder based on photonic crystal nano-resonator without using nonlinear materials," *Phot. Lett. Pol.*, vol.11, no.11, pp. 10-12, 2019 <https://doi.org/10.4302/plp.v11i11.890>

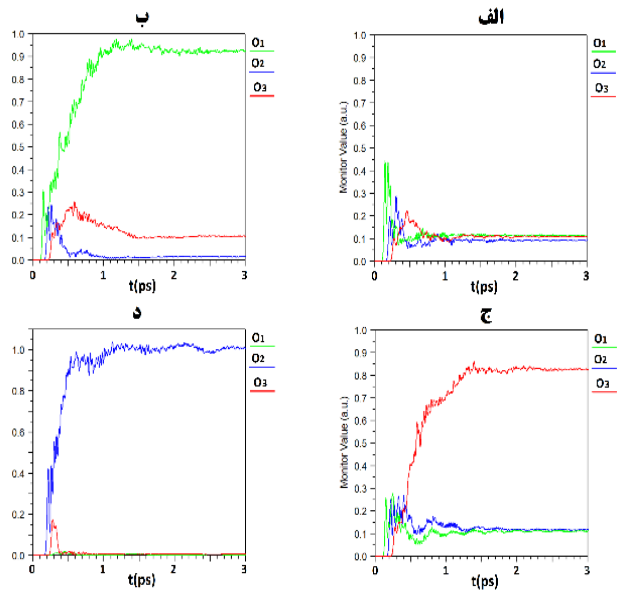
[3] A. Askarian, and F. Parandin, "A novel proposal for all optical 1-bit comparator based on 2D linear photonic crystal," *J Comput Electron*, vol.22, pp.288-295, 2023 <https://doi.org/10.1007/s10825-022-01961-2>

[4] S. Serajmohammadi, H. Alipour-Banaei and F. Mehdizadeh, "All optical decoder switch based on photonic crystal ring resonators," *Opt Quant Electron*, vol.47, pp.1109-1115, 2015 <http://dx.doi.org/10.1007/s11082-014-9967-2>

[5] S. Naghizade, and H. Saghaei, "An ultra-fast optical analog-to-digital converter using nonlinear X-shaped photonic crystal ring resonators," *Optical and Quantum Electronics*, vol.53, no.3, pp.1-16, 2021 DOI:10.1007/s11082-021-02798-y

[6] E. Rafiee, F. Emami, and R. Negahdari, "Design of a novel nano plasmonic-dielectric photonic crystal power splitter suitable for photonic integrated circuits," *Optik*, vol.172, pp.234-240, 2018 DOI:10.1016/j.ijleo.2018.06.006

[7] A. Farmani, "Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifier: Performance and Application for Optical Logic Gates," *Majlesi*



شکل (۵). توان‌های بهنجار شده خروجی دی مالتی پلکسر برای حالت‌های نوری مختلف ورودی

در شکل ۵ (ج) که ورودی در سطح سوم قرار دارد، یعنی به صورت $60P_0 < P_{in} < 25P_0$ است، توان بهنجار شده خروجی O_3 دارای برابر با 0.18 بوده و دو خروجی دیگر حدود 0.1 هستند. نمودار توان در خروجی‌ها در آخرین سطح ورودی یعنی زمانی که ورودی در حالت $160P_0 < P_{in} < 60P_0$ قرار دارد در شکل ۵ (د) نشان داده شده است. طبق این شکل خروجی بهنجار شده در O_2 تقریباً برابر با 0.1 است. دو خروجی دیگر دارای توان بهنجار شده برابر با 0.1 هستند. در جدول ۲، برای حالت‌های مختلف سطوح ورودی، خروجی‌های $O_1 O_2 O_3$ نمایش داده شده است.

جدول (۲). خلاصه حالت‌های مختلف سطوح ورودی در خروجی‌ها

معادل منطقی در $O_1 O_2 O_3$	توان نرمالیزه در O_1	توان نرمالیزه در O_2	توان نرمالیزه در O_3	سطح ورودی
0 0 0	0.1	0.1	0.1	$P_{in} < 0.19P_0$
1 0 0	0.1	0.0	0.1	$0.19P_0 < P_{in} < 0.25P_0$
0 0 1	0.1	0.1	0.18	$0.25P_0 < P_{in} < 0.60P_0$
0 1 0	0.1	0.1	0.0	$0.60P_0 < P_{in} < 0.60P_0$

باتوجه به ستون آخر جدول ۲ دیده می‌شود که توان ورودی را می‌توان به چهار سطح مختلف تقسیم کرد. به‌ازای این چهار سطح، خروجی‌ها را می‌توان به چهار سطح منطقی تقسیم نمود. به عبارت دیگر خروجی به صورت گسسته درآمده است. از جمله خصوصیات ساختار طراحی شده پیشنهادی، این است که توان بهنجار شده دارای توان بالا برای حالت ۱ منطقی و توان کم برای حالت ۰ منطقی است، پس دقت تفکیک سطوح در خروجی بالا

with Nonlinear Kerr Effects Based on Two Dimensional Photonic Crystals,” Applied Electromagnetics, Vol. 9, No.2, pp.9-15,2021. DOI:20.1001.1.26455153.1400.9.2.2.1

[18] F. Parandin, A. Sheykhan, and N. Bagheri, “A novel design for an ultracompact optical majority gate based on a ring resonator on photonic crystal substrate,” J Comput Electron, vol.22, pp.716-722,2023
DOI:10.21203/rs.3.rs-2231762/v1

[19] F. Parandin, and M. Mohammadi, “Compact all-optical decoder design for optical integrated circuits,” Appl. Opt. vol.62, pp.5355-5359, 2023
<https://doi.org/10.1364/AO.492238>

[20] F. Haddadan, M. Soroosh, and N. Alaei-Sheini, “Designing an electro-optical encoder based on photonic crystals using the graphene-Al₂O₃ stacks,” Appl. Opt. vol.59, pp.2179-2185, 2020
DOI: 10.1364/AO.386248

[21] Z. Seraj, M. Soroosh, and N. Alaei-Sheini, “Ultra-compact ultra-fast 1-bit comparator based on a two-dimensional nonlinear photonic crystal structure,” Appl. Opt. vol.59, pp.811-816,2020
<https://doi.org/10.1364/AO.374428>

[22] R. Moradi, “All optical half subtractor using photonic crystal based nonlinear ring resonators,” Optical and Quantum Electronics, vol.51, pp.119,2019
DOI:10.1007/s11082-019-1831-y

[23] M.J. Maleki, A. Mir, and M. Soroosh, “Designing an ultra-fast all-optical full-adder based on nonlinear photonic crystal cavities,” Opt Quant Electron, vol.52, pp.196, 2020
DOI:10.1007/s11107-020-00917-5

[24] H. Saghaei, “Supercontinuum source for dense wavelength division multiplexing in square photonic crystal fiber via fluidic infiltration approach,” Radioengineering, vol.26, no.1, pp.16-22, 2017
DOI:10.13164/re.2017.0016

[25] A. Taheri, M. Seifouri, and S. Olyae, “Optimized high-speed all-optical 2-bit ADC based on two-dimensional photonic crystal nanoresonators,” Applied Optics, vol.60, no.1, pp.60-66, 2021 DOI:10.1364/AO.410157

[26] S.R. Fard, M.R. Salehi, and E. Abiri, “Ultra-fast all-optical ADC using nonlinear ring resonators in photonic crystal microstructure,” Optical and Quantum Electronics, vol.53, no.2, pp.1-14,2021. DOI:10.1007/s11082-021-02769-3

Journal of Telecommunication Devices, vol.6, no.3, pp.93-97, 2017

[8] M. Karimi, “Analysis of Photonic Crystal fibers Using Finite Difference Frequency Domain Method,” Applied Electromagnetics, Vol.6, No.2, pp.33-42, 2018
DOI:20.1001.1.26455153.1397.6.2.4.2

[9] F. Parandin, F. Heidari, Z. Rahimi, and S. Olyae, “Two-Dimensional photonic crystal Biosensors,” A review, Optics & Laser Technology, vol.144, pp.107397, 2021
<https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107397>

[10] A. Askarian, and F. Parandin, “Numerical analysis of all optical 1-bit comparator based on PhC structure for optical integrated circuits,” Opt Quant Electron, vol.55, pp.419, 2023
DOI:10.1007/s11082-023-04552-y

[11] R. Negahdari, E. Rafiee, F. Emami, and H. Pakarzadeh, “Design of tunable ring-shaped plasmonic photonic crystal filters infiltrated with optical fluids,” Opt. Eng, vol.60, no.9, 097102, 2021. DOI:10.1117/1.OE.60.9.097102

[12] F. Parandin, "Realization of Ultra-compact All-optical Universal NOR Gate on Photonic Crystal Platform," Journal of Electrical and Computer Engineering Innovations, vol.9, no.1, pp.1-8, 2021. <https://doi.org/10.22061/jeccei.2021.7637.414>

[13] A. Seyed Faraji, and V. Ahmadi, “Enhanced Raman Amplification in Hybrid Photonic Crystal Based Waveguide Structure by Using Optofluidic Materials,” Applied Electromagnetics, Vol. 4, No. 3, pp.57-64, 2016

[14] M. Karimi, “Theoretical study of hole structure and core size on the gap-map of hollow-core photonic crystal fiber,” Applied Electromagnetics, Vol.11, No.1, pp.95-105,2023
DOI:20.1001.1.26455153.1402.11.1.10.1

[15] A. Farmani, A. Mir, and M. Irannejad, “2D-FDTD simulation of ultra-compact multifunctional logic gates with nonlinear photonic crystal,” Journal of the Optical Society of America B, vol.36, no.4, pp.811-818,2019
<https://doi.org/10.1364/JOSAB.36.000811>

[16] E. Rafiee, and F. Abolghasemi, “Research Paper An All-Optical NOR Gate based on Two-Dimensional Photonic Crystals,” Journal of Optoelectronic Nanostructures, vol.8, no.1, pp.47-57, 2023.
DOI: 10.30495/JOPN.2023.31310.1275

[17] A. Farmani, and R. Beyranvand, “Numerical Modeling of a Compact and High Contrast Reversible All Optical Feynman Gate