

Research Paper

## Realization of an All-Optical Decoder Based on Photonic Crystals Using Nonlinear Resonant Cavities<sup>1</sup>

Hamed Alipour-Banaei<sup>\*2</sup> and Farhad Mehdizadeh<sup>3</sup>

Received:2020.07.12

Revised:2021.01.16

Accepted:2021.02.09

### Abstract

All-optical decoders play a key role in design and implementation of all-optical processing systems. Switching speed, power and structural dimensions are the most important parameters that should be considered in the design of all-optical devices. In this research, by using two nonlinear resonance cavities based on photonic crystals, a structure for design and implementing an all-optical decoder is presented. Nonlinear resonance cavities are created by adding nonlinear rods made of contaminated glass inside the cavity. The proposed structure has one activation port, one input port and two output ports. If the activator port is off, both outputs will be off regardless of the status of the input port situation. In design of this structure, we need an activator input port and a control input. The activator input port is connected directly to the main waveguide using a side waveguide. The control input of the decoder, which is the same as the main input port of the decoder 1 to 2, is connected to the main waveguide by means of an optical power divider. Also, to improve the efficiency of the light transmission from the activator port to the main waveguide, two point defects with a radius of 60 nm have been installed at the junction of the input waveguides to the main waveguide. In the designed structure, the maximum delay time is 5 ps.

**Keywords:** *All Optical Decoder, Photonic Crystals, Nonlinear Resonance Cavity, Photonic Bandgap.*

---

<sup>1</sup> DOI: 10.22051/ijap.2021.32065.1164

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Electronics, Tabriz Branch, Islamic Azad University, Tabriz, Iran. (Corresponding Author). Email: alipour@iaut.ac.ir

<sup>3</sup> Assistant Professor, Young Researchers and Elite Club, Urmia Branch- Islamic Azad University, Urmia, Iran. Email: f-mehdizadeh@iaut.ac.ir

## تحقق رمزگشای تمام‌نوری مبتنی بر بلورهای فوتونی با به کارگیری کاواک‌های تشدید غیرخطی<sup>۱</sup>

حامد علیپوربنائی\*<sup>۲</sup> و فرهاد مهدیزاده<sup>۳</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۴/۲۲

تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۲۱

### چکیده

رمزگشاهای تمام‌نوری نقشی کلیدی در طراحی و پیاده‌سازی سیستم‌های پردازش تمام‌نوری ایفا می‌کنند. سرعت و توان سوئیچ‌زنی و ابعاد ساختار از جمله مهمترین پارامترهایی است، که باید در طراحی افزاره‌های تمام‌نوری مورد توجه قرار بگیرد. در این تحقیق با استفاده از دو کاواک تشدید غیرخطی مبتنی بر بلورهای فوتونی ساختاری برای طراحی و پیاده‌سازی رمزگشای تمام‌نوری ارائه شده است. کاواک‌های تشدید غیرخطی با اضافه کردن میله‌های غیرخطی از جنس شیشه آلاییده در داخل کاواک ایجاد شده‌اند. ساختار ارائه‌شده یک درگاه فعال‌ساز و یک درگاه ورودی و دو درگاه خروجی دارد. در صورت خاموش بودن درگاه فعال‌ساز، بدون توجه به وضعیت درگاه ورودی، هر دو

<sup>۱</sup> DOI: 10.22051/ijap.2021.32065.1164

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه مهندسی برق، واحد تبریز، دانشگاه آزاد اسلامی، تبریز، ایران. (نویسنده مسئول).

Email: alipour@iaut.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار، باشگاه پژوهشگران نخبگان جوان، واحد ارومیه، دانشگاه آزاد اسلامی، ارومیه، ایران.

Email: f-mehdizadeh@iaut.ac.ir

در گاه خروجی خاموش خواهد بود. در طراحی این ساختار به یک ورودی فعال‌ساز و یک ورودی کنترل نیاز داریم. در گاه ورودی فعال‌ساز مستقیماً با استفاده از موجبر فرعی به موجبر اصلی وصل شده است. ورودی کنترلی رمزگشا که همان در گاه ورودی اصلی رمزگشای ۱ به ۲ است به واسطه یک تقسیم‌کننده توان نوری به موجبر اصلی وصل شده است. همچنین برای بهبود راندمان انتقال نور از در گاه فعال‌ساز به موجبر اصلی، دو نقص نقطه‌ای با شعاع ۶۰ نانومتر در محل اتصال موجبرهای ورودی به موجبر اصلی تعبیه شده است. در ساختار طراحی شده حداکثر زمان تأخیر ۵ پیکوثانیه است.

**واژگان کلیدی:** رمزگشای تمام‌نوری، بلورهای فوتونی، کاواک تشدید غیرخطی، نوار ممنوع فوتونی.

#### ۱. مقدمه

استفاده از سیگنال‌های نوری برای انتقال داده و اطلاعات در بستر فیبرهای نوری و نیز استفاده از پردازش‌های تمام‌نوری در حال حاضر بهترین گزینه برای افزایش سرعت و پهنای نوار مخابرات نوری است [۱-۳]. برای استفاده بهینه از قابلیت‌های مخابرات نوری لازم است که تمام مراحل ارسال و دریافت و پردازش اطلاعات به طور کامل در حوزه نور و بدون دخالت افزاره یا سیگنال‌های الکتریکی یا الکترونیکی انجام شود.

بلورهای فوتونی یکی از بسترهای بالقوه جهت پیاده‌سازی افزاره‌های تمام‌نوری با ابعاد مناسب برای تحقق مدارهای مجتمع تمام‌نوری هستند. نوار ممنوع فوتونی [۴]، انعطاف‌پذیری [۵]، قابلیت موجبری [۶]، طول موج‌گزینی [۷] و سوئیچ‌زنی تمام‌نوری [۸] از جمله کلیدی‌ترین قابلیت‌های بلورهای فوتونی است، که به طراحی و پیاده‌سازی گسترده و وسیعی از افزاره‌های نوری از قبیل فیلتر [۹-۱۲]، دی‌مالتی پلکسر [۱۳-۱۵]، سوئیچ [۱۶]، گیت منطقی [۱۷-۱۹]، رمزگشا [۲۰، ۲۱]، رمزنگار [۲۲، ۲۳] و مبدل‌های آنالوگ به دیجیتال تمام‌نوری [۲۴-۲۶] انجامیده است.

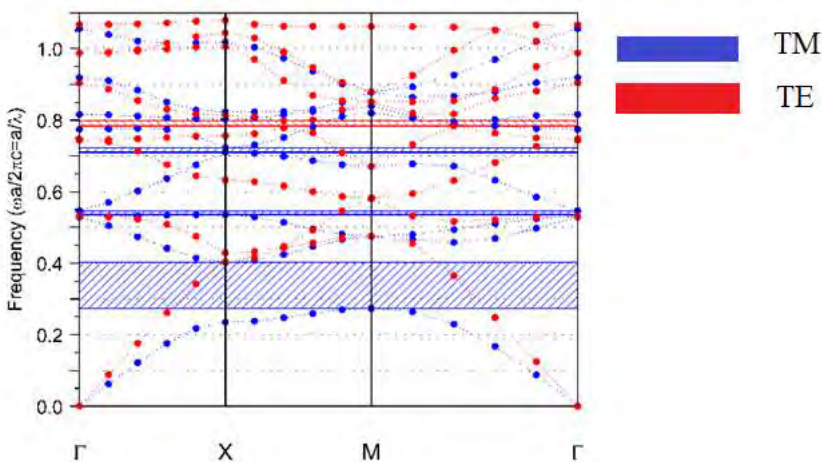
رمزگشاهای تمام‌نوری یکی از قطعات مهم و کلیدی در طراحی سیستم‌های پردازش سیگنال تمام‌نوری است. رمزگشای نوری یک مدار منطقی ترکیبی است که  $N$  درگاه ورودی و  $2^N$  درگاه خروجی دارد. بنابراین، با استفاده از این افزاره می‌توان  $2^N$  خط حافظه را فقط با استفاده از  $N$  خط کنترل نشانی دهی کرد. اولین ساختار پیشنهادی برای طراحی رمزگشا تمام‌نوری مبتنی بر بلور فوتونی در سال ۲۰۱۵ با استفاده از یک حلقه تشدید غیرخطی طراحی و ارائه شده است [۲۷]. در این ساختار، توان نوری لازم برای عملکرد صحیح مدار  $1 \text{ W}/\text{cm}^2$  به دست آمده است. در سالیان

اخیر، ساختارهای دیگری نیز با استفاده از حلقه‌های تشدید غیرخطی برای طراحی و پیاده‌سازی رمزگشاهای تمام‌نوری مبتنی بر بلورهای فوتونی ارائه شده است [۲۸-۳۰]. ایراد اساسی تمام ساختارهای پیشنهادی با استفاده از حلقه‌های تشدید غیرخطی، توان سوئیچ‌زنی بسیار عالی این ساختارهاست که در محدوده  $0.5 \text{ W}/\mu\text{m}^2$  است.

در این پژوهش قصد داریم ساختار جدیدی را با استفاده از کاواک‌های تشدید غیرخطی برای پیاده‌سازی رمزگشا تمام‌نوری مبتنی بر بلور فوتونی ارائه کنیم. کاهش توان سوئیچ‌زنی و افزایش سرعت سوئیچ‌زنی از جمله مهمترین مزیت‌های ساختار پیشنهادی است. برای طراحی و شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی از نرم افزار RSoft استفاده شده است.

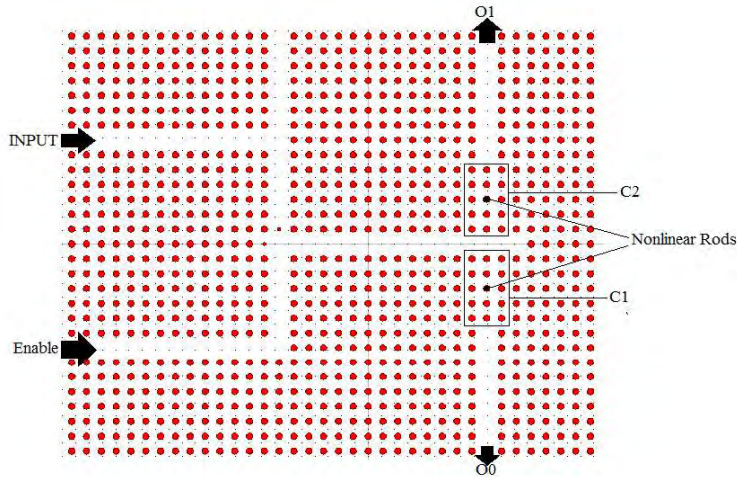
## ۲. فرآیند طراحی

ساختار پایه به کاررفته برای طراحی رمزگشای تمام‌نوری پیشنهادی از یک آرایه بلور فوتونی میله ای  $31 \times 36$  با شبکه مربعی تشکیل شده است. ضریب شکست و شعاع میله‌های سازنده بلور فوتونی به ترتیب  $3.46$  و  $118 \text{ nm}$  انتخاب شده است. ثابت شبکه بلور فوتونی به کاررفته نیز  $558 \text{ nm}$  است. فضای اطراف میله‌های دی‌الکتریک نیز از هوا پر شده است. برای این ساختار پایه، ساختار نواری به صورت نمودار شکل ۱ است، که نشان می‌دهد بلور فوتونی پایه، ۳ نوار ممنوع فوتونی در مد TM (نوار آبی رنگ) و یک نوار ممنوع فوتونی در مد TE (نوار قرمز رنگ) دارد، که نوار اصلی در بازه طول موجی  $1500-1600 \text{ nm}$  قرار دارد.



شکل ۱ ساختار نوار بلور فوتونی پایه.

برای طراحی رمزگشای پیشنهادی از دو کاواک تشدید غیرخطی استفاده شده است. برای ایجاد کاواک‌های غیرخطی در قسمت میانی هر کاواک از یک نقص غیرخطی از جنس شیشه آلانید به ترتیب  $1.4$  و  $10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$  است [۳۱]. شعاع میله‌های نقص به کاررفته در کاواک‌های شماره C1 و C2 به ترتیب  $90 \text{ nm}$  و  $95 \text{ nm}$  است. انتخاب دو مقدار مختلف برای این شعاع‌ها سبب می‌شود که مد تشدید کاواک‌های غیرخطی متفاوت با هم بوده و لذا هر کاواک در توان نوری متفاوتی بتواند نور را انتقال دهد. این پیکربندی کاواک‌های تشدید غیرخطی برای اولین بار توسط نیسی و همکارانش [۳۲] برای طراحی نیم‌جمع‌کننده نوری به کار رفته است، که در این مقاله با اعمال تغییرات مناسب از آن‌ها جهت پیاده‌سازی رمزگشای تمام‌نوری استفاده می‌شود. برای تکمیل طراحی رمزگشا تمام‌نوری پیشنهادی دو موجبر خروجی در امتداد هر یک از کاواک‌های تشدید تعبیه می‌شود. موجبر اصلی ساختار پیشنهادی بین دو کاواک تشدید ایجاد شده است. در طراحی این ساختار به یک ورودی فعال‌سازی و یک ورودی کنترل نیاز داریم. درگاه ورودی فعال‌ساز مستقیماً با استفاده از یک موجبر به موجبر اصلی وصل شده است. اما ورودی کنترل منطقی رمزگشا که همان درگاه ورودی اصلی رمزگشای ۱ به ۲ است با واسطه یک تقسیم‌کننده توان نوری به موجبر اصلی وصل شده است. همچنین، برای بهبود راندمان انتقال نور درگاه فعال-ساز به موجبر اصلی، دو نقص نقطه‌ای با شعاع  $60 \text{ nm}$  در محل اتصال موجبرهای ورودی به موجبر اصلی تعبیه شده است. وجود این نقص‌ها در محل‌های مذکور مانع از حرکت نور به سمت ورودی دیگر شده و موج‌های نوری را به سمت موجبر خروجی هدایت می‌کند. وجود نقص در ردیف مقابل موجبر خروجی باعث می‌شود که موج‌های نوری در برخورد به این نقص به سمت مقابل خود و به داخل موجبر خروجی هدایت شوند. دلیل استفاده از تقسیم‌کننده نوری بین درگاه ورودی و موجبر اصلی در بخش بعد توضیح داده خواهد شد. ساختار نهایی در شکل ۲ پیشنهاد شده است. در این شکل، نقص‌های غیرخطی به کاررفته در طراحی کاواک‌های تشدید با رنگ سیاه از میله‌های خطی متمایز شده‌اند. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود در ساختار پیشنهادی درگاه فعال‌ساز و درگاه ورودی به ترتیب با **Enable** و **Input** نشان داده شده‌اند، درگاه‌های O0 و O1 درگاه‌های خروجی ساختار طراحی شده هستند.



شکل ۲ ساختار رمزگشای پیشنهادی مبتنی بر بلور فوتونی.

### ۳. نتایج شبیه‌سازی

بعد از نهایی شدن ساختار پیشنهادی برای پیاده‌سازی رمزگشای تمام‌نوری، درستی عملکرد ساختار طراحی شده را با استفاده از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری بررسی می‌کنیم. برای شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی از دو منبع نور گاوسی با طول‌موج مرکزی 1585 nm و شدت توان نوری  $0.02 \text{ W}/\mu\text{m}^2$  و به صورت هم‌فاز استفاده شده است. همانگونه که در بخش قبل گفتیم، ساختار پیشنهادی یک درگاه فعال‌ساز و یک درگاه ورودی دارد. توزیع موج‌های نوری برای حالت‌های مختلف ساختار پیشنهادی در شکل ۳ نشان داده شده است. در شکل ۳ الف نشان داده‌ایم که در صورتی که درگاه فعال‌ساز خاموش باشد حتی در صورت روشن بودن ورودی کنترل نیز هیچ‌یک از درگاه‌های خروجی روشن نخواهد بود، چون در این حالت به علت وجود تقسیم‌کننده توان نوری بین درگاه ورودی و موجبر اصلی ساختار طراحی شده شدت توان نور موجود در موجبر اصلی کمتر از  $0.01 \text{ W}/\mu\text{m}^2$  خواهد بود، درحالی‌که کاواک‌های تشدید C1 و C2 به گونه‌ای طراحی شده‌اند که به ترتیب در شدت نور  $0.02 \text{ W}/\mu\text{m}^2$  و  $0.03 \text{ W}/\mu\text{m}^2$  قادر به جفت‌سازی نور از موجبر اصلی به موجبرهای خروجی متناظر خود باشند. بنابراین، در حالتی که درگاه فعال‌ساز خاموش است، هر دو درگاه خروجی ساختار پیشنهادی خاموش خواهند بود به عبارت دیگر ساختار کاملاً غیرفعال خواهد بود.

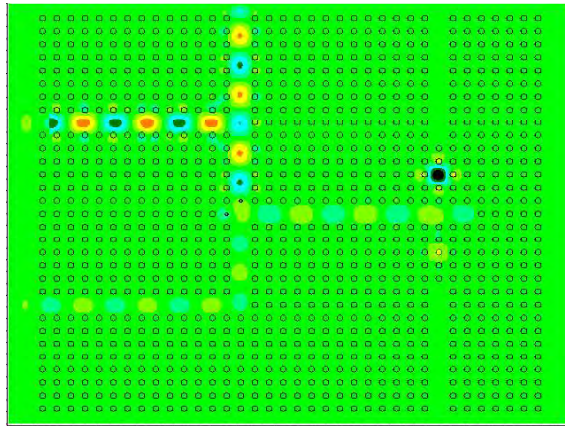
این ذات تمامی ساختارهای نوری است که نسبت به تغییرات فاز حساس باشند و در تمامی ساختارهای نوری ایجاد اختلاف فاز در رفتار نوری ساختار طراحی شده مشکل‌زا خواهد بود. لذا همانند فلیپ فلاپ‌ها که در طراحی مدارهای مجتمع الکترونیکی نقش اساسی داشته و حالت نامعتبر (invalid) برای آنها امری بدیهی است و نیایستی ایجاد شود، برای افزاره‌های نوری نیز چنین حالات invalid وجود داشته و با اعمال پالس‌های بدون اختلاف فاز در ورودی‌های

موجبر از ایجاد چنین حالتی جلوگیری بعمل می‌آید. ضمناً ایجاد پالس‌های بدون اختلاف فاز در سیگنال‌های نوری ساده‌تر از سیگنال‌های الکتریکی است، زیرا سیگنال‌های الکتریکی تحت تاثیر نویز می‌توانند دچار اختلال شوند در حالی که در سیگنال‌های نوری ایجاد اختلال و اغتشاش در سیگنال بسیار دشوار و تقریباً غیر ممکن است. لذا در ساختار طراحی شده سیگنال‌های هم‌فاز در ورودی‌ها بکار گرفته شده است.

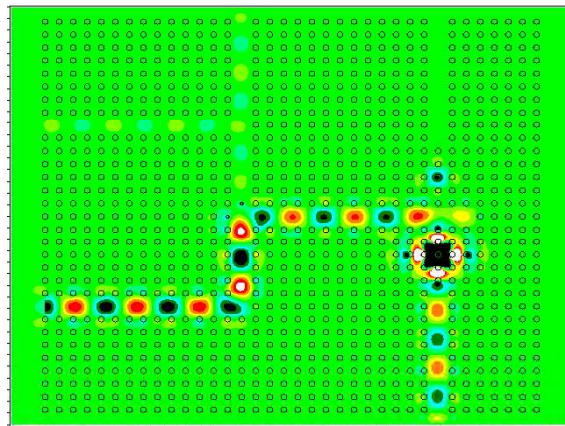
شکل ۳-ب رفتار نوری ساختار پیشنهادی را برای حالتی نشان می‌دهد که در آن درگاه فعال‌ساز روشن بوده و درگاه ورودی خاموش است. در این حالت، با توجه به طراحی ارائه شده برای ساختار، شدت توان نوری در موجبر اصلی در حدود  $0.02 \text{ W}/\mu\text{m}^2$  خواهد بود که با توان سوئیچ-زنی کاواک C1 برابر است. بنابراین، در این حالت کاواک تشدید C1 می‌تواند سیگنال‌های نوری را از موجبر اصلی به موجبر خروجی متناظر خود منتقل کرده و سبب روشن شدن درگاه خروجی O0 شود.

شکل ۳-ج رفتار نوری ساختار پیشنهادی را برای حالتی نشان می‌دهد که در آن درگاه فعال-ساز و درگاه ورودی هر دو روشن است. در این حالت، با توجه به طراحی ارائه شده برای ساختار شدت توان نوری در موجبر اصلی در حدود  $0.03 \text{ W}/\mu\text{m}^2$  خواهد بود که با توان سوئیچ‌زنی کاواک C2 برابر است. بنابراین، در این حالت کاواک تشدید C2 می‌تواند سیگنال‌های نوری را از موجبر اصلی به موجبر خروجی متناظر خود منتقل کرده و سبب روشن شدن درگاه خروجی O1 شود.

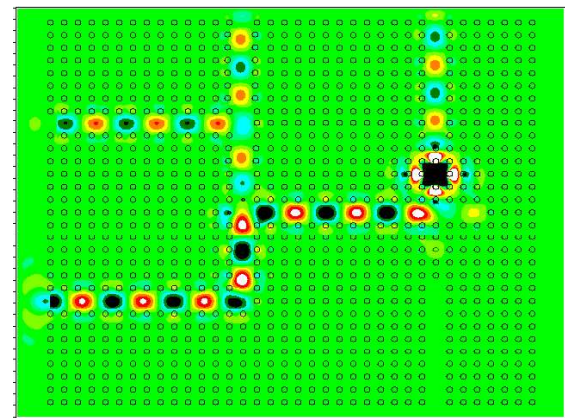
نتایج ارائه شده در شکل ۳-الف و ۳-ب اهمیت استفاده از تقسیم‌کننده توان نوری بین درگاه ورودی و موجبر اصلی را نشان می‌دهد. چنانچه درگاه ورودی نیز مانند درگاه فعال‌ساز مستقیماً و بدون استفاده از تقسیم‌کننده توان نور به موجبر اصلی وصل می‌شد در اینصورت، حالت‌های بررسی شده در ۳-الف و ۳-ب، در هر دو حالت شدت توان نور رسیده به موجبر اصلی یکسان بوده و کاواک‌های تشدید قادر به تشخیص حالت کاری صحیح نبودند. درحالی‌که، استفاده از تقسیم‌کننده توان باعث ایجاد اختلاف در سطح توان نور رسیده به موجبر اصلی در این دو حالت شده و لذا منجر به عملکرد صحیح ساختار پیشنهادی شده‌اند.



(الف)



(ب)

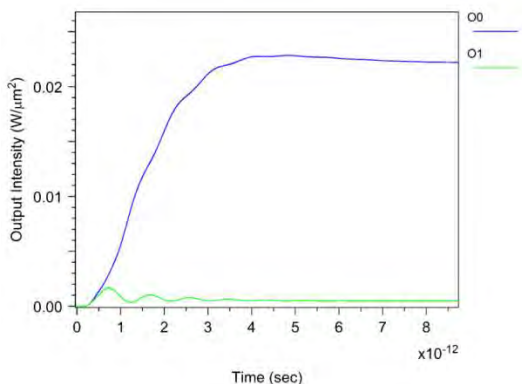


(ج)

شکل ۳ توزیع‌های موج‌های نوری درون ساختار پیشنهادی درحالتی که (الف) درگاه فعال‌سازخاموش است، (ب) درگاه فعال‌سازروشن و ورودی خاموش است، (ج) درگاه فعال‌سازو ورودی هر دو روشن است.

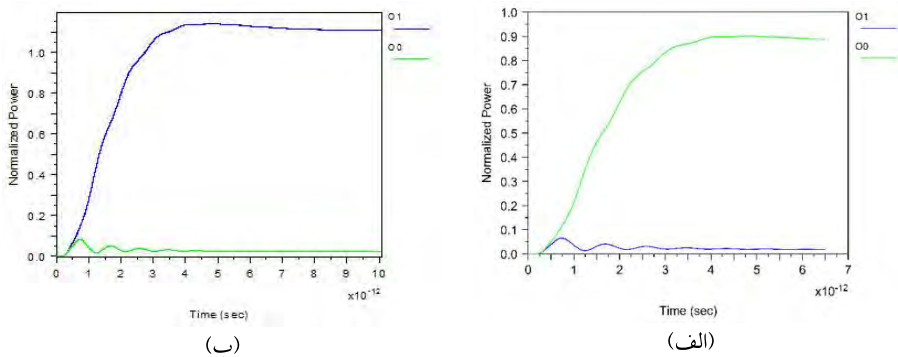


مطابق نمودار شکل ۴ پاسخ زمانی ساختار پیشنهادی در حالت غیر نرمالیزه در حالی که درگاه ورودی روشن است مشاهده می‌شود.



شکل ۴ نمودار پاسخ زمانی غیر نرمالیزه ساختار پیشنهادی در حالی که درگاه ورودی روشن است.

نمودارهای نرمالیزه شده پاسخ زمانی ساختار پیشنهادی نیز در شکل ۵ ارائه شده است. طبق این نمودارها در حالی که درگاه ورودی خاموش است توان بهنجار در درگاه‌های خروجی O0 و O1 به ترتیب ۹۰٪ و ۳٪ خواهد بود. همچنین تأخیر زمانی درگاه O0 نیز 4 ps خواهد بود و در حالی که درگاه ورودی روشن است، توان بهنجار در درگاه‌های خروجی O0 و O1 به ترتیب ۳٪ و ۱۱۰٪ خواهد بود. همچنین تأخیر زمانی درگاه O0 نیز 5 ps خواهد بود.



شکل ۵ نمودارهای پاسخ زمانی نرمالیزه شده ساختار پیشنهادی در حالی که درگاه ورودی (الف) خاموش، (ب) روشن است.

ضمناً از آنجایی که ضریب شکست ساختار طراحی شده فاقد بخش موهومی بوده و عددی حقیقی است، تلفات ساختار در نظر گرفته نشده است. عبارت دیگر اگر ضریب شکست ساختار علاوه بر بخش حقیقی، دارای قسمت موهومی بود بایستی تلفات را محاسبه می کردیم. ضمناً در این ساختار با توجه به ضریب شکست مورد استفاده تلفات جذب نیز وجود ندارد و این از ویژگی های اصلی ساختار طراحی شده است.

#### ۴. نتیجه گیری

در این مقاله با اضافه کردن میله های غیرخطی درون کاواک های تشدید، دو کاواک تشدید با توان های سوئیچ زنی مختلف طراحی شد. سپس از ترکیب کردن کاواک های غیرخطی با تقسیم کننده توان و موجبرهای نوری ساختاری برای طراحی و پیاده سازی رمزگشای تمام نوری ارائه شده است. استفاده از تقسیم کننده توان نوری بعد از درگاه ورودی افزاره جهت ایجاد تمایز بین اثر درگاه فعال ساز و درگاه ورودی است. در ساختار پیشنهادی حداکثر توان بهنجار خروجی در حالت 0 منطقی ۳٪ و حداقل توان بهنجار خروجی در حالت 1 منطقی ۹۰٪ است. بیشترین زمان تأخیر سوئیچ زنی و سطح مقطع افزاره پیشنهادی به ترتیب 5 و 336 میکرومتر مربع است. مهمترین مزیت های ساختار پیشنهادی در این پژوهش با کارهای قبلی کاهش توان سوئیچ زنی و افزایش سرعت سوئیچ زنی است.

#### منابع

- [1] Talebzadeh R., Soroosh M., and Daghooghi T., A 4-Channel Demultiplexer Based on 2D Photonic Crystal Using Line Defect Resonant Cavity, *IETE J. Res.* **62-6**, 866–872, 2016
- [2] Talebzadeh R., Soroosh M., Kaviani Y. S. and Mehdizadeh F., All-optical 6- and 8-channel demultiplexers based on photonic crystal multilayer ring resonators in Si/C rods, *Photonic Netw. Commun.* **34**, 248-257, 2017
- [3] Zavvari M. and Mehdizadeh F., Photonic Crystal Cavity with L3-Defect for Resonant Optical Filtering, *Frequenz.* **68**, 519–523, 2014
- [4] Diaz-Valencia B. F. and Calero J. M., Photonic band gaps of a two-dimensional square lattice composed by superconducting hollow rods, *Phys. C Supercond.* **505**, 74–79, 2014
- [5] Rakhshani M. Reza and Mansouri-Birjandi M. Ali, Design and simulation of wavelength demultiplexer based on heterostructure photonic crystals ring resonators, *Phys. E Low-dimensional Syst. Nanostructures.* **50**, 97–101, 2013
- [6] Noori M. and Soroosh M., A comprehensive comparison of photonic band gap and self-collimation based 2D square array waveguides, *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* **126**, 4775–4781, 2015
- [7] Mansouri-Birjandi M. A., Tavousi A. and Ghadrnan M., Full-optical tunable add/drop filter based on nonlinear photonic crystal ring resonators, *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.* **21**, 44–51, 2016

- [8] Yanik M. F., Fan S., Soljačić M. and Joannopoulos J. D., All-optical transistor action with bistable switching in a photonic crystal cross-waveguide geometry. *Opt. Lett.* **28**, 2003
- [9] Dideban A., Habibiyan H. and Ghafoorifard H., Photonic crystal channel drop filter based on ring-shaped defects for DWDM systems. *Phys. E Low-dimensional Syst. Nanostructures.* **87**, 77–83, 2017
- [10] Wang Y., Chen D., Zhang G., Wang J. and Tao S., A super narrow band filter based on silicon 2D photonic crystal resonator and reflectors. *Opt. Commun.* **363**, 13–20, 2016
- [11] Youcef Mahmoud M., Bassou G. and Metehri F., Channel drop filter using photonic crystal ring resonators for CWDM communication systems. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* **125**, 4718–4721, 2014
- [12] Youcef Mahmoud M., Bassou G. and Taalbi A., A new optical add-drop filter based on two-dimensional photonic crystal ring resonator. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* **124**, 2864–2867, 2013
- [13] Zavvari M., Design of Photonic Crystal-Based Demultiplexer with High-Quality Factor for DWDM Applications. *J. Opt. Commun.* **40**, 135-138, 2019
- [14] Kannaiyan V., Savarimuthu R. and Dhamodharan S. K., Performance analysis of an eight channel demultiplexer using a 2D-photonic crystal quasi square ring resonator. *Opto-Electronics Rev.* **25**, 74–79, 2017
- [15] Venkatachalam K., Kumar D. S. and Robinson S., Investigation on 2D photonic crystal-based eight-channel wavelength-division demultiplexer. *Photonic Netw. Commun.* **34**, 100–110, 2017
- [16] Notomi M., Shinya A., Mitsugi S., Kira G., Kuramochi E. and Tanabe T., Optical bistable switching action of Si high-Q photonic-crystal nanocavities. *Opt. Express.* **13**, 2005
- [17] Rani P., Kalra Y. and Sinha R. K., Realization of and gate in y shaped photonic crystal waveguide. *Opt. Commun.* **298–299**, 227–231, 2013
- [18] Rani P., Kalra Y. and Sinha R. K., Design of all optical logic gates in photonic crystal waveguides. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* **126**, 950–955, 2015
- [19] haq Shaik E. and Rangaswamy N., Multi-mode interference-based photonic crystal logic gates with simple structure and improved contrast ratio. *Photonic Netw. Commun.* **34**, 140-148, 2017
- [20] Daghooghi T., Soroosh M. and Ansari-Asl K., Ultra-fast all-optical decoder based on nonlinear photonic crystal ring resonators. *Appl. Opt.* **57**, 2250–2257, 2018
- [21] Daghooghi T., Soroosh M. and Ansari-Asl K., A novel proposal for all-optical decoder based on photonic crystals. *Photonic Netw. Commun.* **35**, 335-341, 2018
- [22] Alipour-Banaei H., Rabati M. G., Abdollahzadeh-Badelbou P. and Mehdizadeh F., Application of self-collimated beams to realization of all optical photonic crystal encoder. *Phys. E Low-dimensional Syst. Nanostructures.* **75**, 77–85, 2016
- [23] Ouahab I. and Rafah N., A novel all optical 4×2 encoder switch based on photonic crystal ring resonators. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* **127-19**, 7835-7841, 2016
- [24] Mehdizadeh F., Soroosh M., Alipour-Banaei H. and Farshidi E., All optical 2-bit analog to digital converter using photonic crystalbased cavities. *Opt. Quantum Electron.* **49**, 2017
- [25] Mehdizadeh F., Soroosh M., Alipour-Banaei H. and Farshidi E., Ultra-fast analog-to-digital converter based on a nonlinear triplexer and an optical coder with a photonic crystal structure. *Appl. Opt.* **56-7**, 1799–1806, 2017
- [26] Mehdizadeh F., Soroosh M., Alipour-Banaei H. and Farshidi E., A Novel Proposal for All Optical Analog-to-Digital Converter Based on Photonic Crystal Structures. *IEEE Photonics J.* **9-2**, 1–11, 2017
- [27] Serajmohammadi S., Alipour-Banaei H. and Mehdizadeh F., All optical decoder switch based on photonic crystal ring resonators. *Opt. Quantum Electron.* **47-5**, 1109–1115, 2014

- [28] Mehdizadeh F., Alipour-Banaei H. and Serajmohammadi S., Design and simulation of all optical decoder based on nonlinear PhCRRs. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* **156**. 701–706. 2018
- [29] Khosravi S. and Zavvari M., Design and analysis of integrated all-optical  $2 \times 4$  decoder based on 2D photonic crystals. *Photonic Netw. Commun.* **35**. 122-128. 2018
- [30] Alipour-Banaei H., Mehdizadeh F., Serajmohammadi S. and Hassangholizadeh-Kashtiban M., A  $2 \times 4$  all optical decoder switch based on photonic crystal ring resonators. *J. Mod. Opt.* **62-6**. 430–434. 2014
- [31] Youssefi B., Moravvej-Farshi M. K. and Granpayeh N., Two bit all-optical analog-to-digital converter based on nonlinear Kerr effect in 2D photonic crystals. *Opt. Commun.* **285**. 3228–3233. 2012
- [32] Neisy M., Soroosh M. and Ansari-Asl K., All optical half adder based on photonic crystal resonant cavities. *Photonic Netw. Commun.* **35**. 245-250. 2018