

## **Design and Simulation of an Ultra-Fast All-Optical Single-Bit Comparator Based on Photonic Crystal Ring Resonators**

**H. Saghaei<sup>\*1</sup>**

\* Department of Electrical Engineering, Shahrekord Branch, Islamic Azad University, Shahrekord, Iran

(Received: 25/03/2021; Accepted: 15/06/2021)

### **Abstract**

*A digital comparator is a logic circuit used to compare two binary numbers. So far, various designs have been proposed using logic gates, which are mainly based on electrical signals and lack the desired high speed. This paper presents a new design of an ultra-fast all-optical single-bit comparator based on photonic crystal ring resonators consisting of highly nonlinear glass. The structure of this comparator consists of two inputs, four ring resonators with a number of waveguides for comparison and three outputs for displaying the result, all created in a photon crystal bed. Using the plane wave expansion method, its band structure is calculated and the results show that the fundamental photonic crystal has a photonic band gap in the polarized TM mode in S, C and L bands that is a suitable tool for telecommunication applications. To solve the Maxwell's equations, the finite-difference time-domain method is used, which aims to investigate the light propagation inside the final structure. The results of numerical studies show that the designed structure has a very short response time of 3 ps, making it faster than all the comparators designed so far, including electronic, electro-optical and all-optical comparators. Also, its relatively small area of 826  $\mu\text{m}^2$  makes it applicable in the design of photonic integrated circuits.*

**Keywords:** All-Optical Comparator, Photonic Crystal, Nonlinear Ring Resonator, Optical Kerr Effect, Plane Wave Expansion Method, Finite-Difference Time-Domain Method.

---

\* Corresponding author E-mail: h.saghaei@iaushk.ac.ir

علمی-پژوهشی

طراحی و شبیه‌سازی مقایسه‌کننده تک‌بیتی تمام نوری فوق سریع با استفاده از تشدیدگرهای

حلقوی بلور فوتونی

حامد سقائی

استادیار گروه مهندسی برق، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد شهرکرد، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۰۱/۰۵ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۵)

چکیده

در این مقاله یک طرح جدید از یک مقایسه‌کننده تک‌بیتی تمام نوری فوق سریع ارائه می‌شود که بر اساس تشدیدگرهای حلقوی بلور فوتونی متشکل از شیشه‌های آلانئید با ضریب غیرخطی بالا ساخته می‌شود. ساختار کلی این مقایسه‌کننده شامل دو ورودی، چهار تشدیدگر حلقوی همراه با تعدادی موج‌بر برای مقایسه و سه خروجی برای ارائه نتیجه است که همه در بستر بلور فوتونی ایجاد شده‌اند. با استفاده از روش عددی بسط امواج تخت ساختار بانندی آن محاسبه و نتایج حاصل شده نشان می‌دهند که بلور فوتونی پایه دارای شکاف بانده فوتونی در مد پلاریزه TM در پنجره طول موجی بانده C، S و L است و برای کاربردهای مخابراتی ابزاری مناسب می‌باشد. برای حل معادلات ماکسول از روش تفاضلی محدود در حوزه زمان استفاده شده است که هدف از آن بررسی رفتار انتشاری نور درون ساختار نهایی است. نتایج مطالعات عددی نشان می‌دهند ساختار طراحی شده دارای پاسخ زمانی بسیار کوتاه ۳ پیکوثانیه است که نسبت به تمامی مقایسه‌کننده‌های طراحی شده تاکنون شامل مقایسه‌کننده‌های الکترونیکی، و تمام نوری از سرعت بالاتری برخوردار است. همچنین مساحت نسبتاً کوچک آن که در حدود ۸۲۶ میکرومتر مربع است، استفاده از آن در طراحی مدارهای فوتونیکی مجتمع را ممکن می‌سازد.

**کلیدواژه‌ها:** مقایسه‌کننده تمام نوری، تشدیدگر حلقوی بلور فوتونی، اثر غیرخطی کر، بسط امواج تخت، روش اجزا محدود در حوزه زمان.

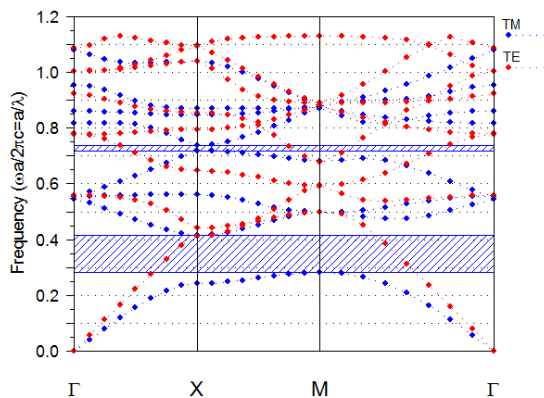
۱. مقدمه

آنها وابسته است. طول موج‌هایی از نور که اجازه انتشار پیدا می‌کنند مد نامیده می‌شوند و گروهی از مدهای انتشار یافته تشکیل باند (نوار) می‌دهند. باندهای غیرمجاز، شکاف باند یا گاف نوری نامیده می‌شوند بدین معنی که پرتو نور قادر به انتشار درون ساختار نیست [۱]، [۴]، [۵]. ممکن است یک ساختار بلور فوتونی پایه دارای یک یا چندین شکاف باند فوتونی در مدهای TE یا TM باشد که از آنها برای طراحی ادواتی شامل گیت‌های منطقی [۶-۸]، فیلترهای نوری [۹-۱۱]، دیکدرها و انکدرها [۱۷-۱۲]، مولتی پلکسرها و دی مولتی پلکسرها [۱۸]، [۱۹]، مقایسه‌کننده‌ها [۲۰-۲۲]، جمع‌کننده و تفریق‌گرها [۹]، [۲۳]، عناصر حافظه [۲۴-۲۶]، حسگرها، زمان‌سنج‌ها و نظایر آن استفاده شود [۲۷]، [۲۸].

یک مقایسه‌کننده دیجیتال یک مدار ترکیبی منطقی است که دو بیت منطقی را با یکدیگر مقایسه می‌کند و نتیجه را با تغییر وضعیت در خروجی‌ها گزارش می‌دهد. تاکنون ساختارهای متنوعی از مقایسه‌کننده‌های نوری توسط محققان گزارش شده است. تشدیدگرهای حلقوی بلور فوتونی متشکل از میله‌های دی‌الکتریک ساخته شده از مواد با ضریب غیرخطی بالا عموماً نقش مهمی در طراحی این مقایسه‌کننده‌ها ایفا می‌کند و با

بلورهای فوتونی ابزاری مناسب برای کنترل و مدیریت انتشار نور به‌منظور طراحی ادوات تمام نوری هستند. در این ساختارها ضریب شکست به‌طور متناوب تغییر می‌کند اگر این تکرار در یک بعد باشد به بلور تشکیل شده، بلور فوتونی یک بعدی می‌گوییم. تکرار ساختار متناوب در دو و سه بعد نیز بلورهای فوتونی دو و سه بعدی را به‌وجود خواهد آورد [۱]. این ساختارها در واقع دوگان بلورهای نیمه‌هادی هستند. در واقع این موضوع از مشابهت معادله شرودینگر در فیزیک حالت جامد و معادله هلمهولتز در میدان ناشی می‌شود [۲]. ضریب شکست در معادله هلمهولتز نقشی مشابه پتانسیل الکتریکی در معادله شرودینگر دارد. بنابراین عملکرد بلورهای فوتونی در برابر فوتون‌ها مشابه عملکرد بلورهای نیمه‌هادی در برابر الکترون‌ها است. بلورهای فوتونی دو بعدی ساختارهای نانومتری متناوبی از میله‌های دی‌الکتریک در بستر هوا یا حفره‌های هوا در بستر دی‌الکتریک هستند که مسیر حرکت موج الکترومغناطیسی را تحت تاثیر قرار می‌دهند [۳]. انتشار فوتون در داخل این ساختارها به طول موج

است ساختار پایه بلور فوتونی پیشنهادی دارای دو شکاف باند فوتونی در مد TM است که با رنگ آبی نشان داده شده است. این شکل با استفاده از روش عددی بسط امواج تخت محاسبه شده است. اولین شکاف باند که عرض بیشتری نیز دارد در محدوده طول موجی  $0.41 < a/\lambda < 0.29$  قرار دارد و برای  $a=590$  nm خواهیم داشت  $2034 \text{ nm} < \lambda < 1439$  nm و این بازه طول موجی سومین پنجره برای طول موج‌های مخابراتی را پوشش می‌دهد.



شکل (۱): ساختار باندی بلور فوتونی پایه شامل یک آرایه دارای ۲۷ سطر و ۲۱ ستون از میله‌های سیلیکونی با چیدمان مربعی.

جدول (۱): جدول درستی مقایسه‌کننده تکبیتی

X	Y	F <sub>1</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>3</sub>
0	0	1	0	0
0	1	0	1	0
1	0	0	0	1
1	1	1	0	0

برای طراحی مقایسه‌کننده پیشنهادی، لازم است از تشدیدگرهای حلقوی بلور فوتونی متشکل از میله‌های دی‌الکتریک با ضریب غیرخطی بالا استفاده شود. اخیراً انواع مختلفی از این تشدیدگرها توسط گروه‌های تحقیقاتی مختلف ارائه شده‌اند. برای عملکرد صحیح ساختار پیشنهادی، از چندین تشدیدگر حلقوی غیرخطی استفاده می‌شود که در صورت تشدید هر یک از آنها، سیگنال ورودی وارد تشدیدگر شده و پس از تشدید لازم از خروجی تشدیدگر خارج می‌شود. شکل (۲) طرح‌واره تشدیدگر حلقوی بلور فوتونی استفاده‌شده در این مقاله را نمایش می‌دهد. این تشدیدگر شامل یک ورودی و سه خروجی است. برای بهره‌مندی از خواص غیرخطی تعدادی از میله‌های سیلیکونی با میله‌های شیشه‌ای با ضریب خطی  $1/4$  و ضریب غیرخطی بسیار بالا ( $10^{-14}$  m<sup>2</sup>/W) جایگزین شده‌اند. برای تحلیل حساسیت تشدیدگر حلقوی غیرخطی پیشنهادی در این تحقیق، پالس‌های نوری با دو توان متفاوت و با طول موج ۱۵۵۰ نانومتر به ساختار اعمال می‌شوند. رفتار انتشار نور درون تشدیدگر مطابق شکل (۳) نشان داده شده است.

افزایش شدت نور ورودی به دلیل ظاهر شدن اثر غیرخطی کر<sup>۱</sup>، ضریب شکست کلی ساختار افزایش می‌یابد و راستای انتشار نور به دلیل تشدید ایجاد شده تغییر می‌کند. برای توضیح بیشتر، رابطه بین ضریب شکست کلی ( $n$ ) و شدت نور ورودی ( $I$ ) به صورت  $n=n_0+n_2I$  است که در آن  $n_0$  ضریب شکست خطی و  $n_2$  ضریب شکست غیرخطی می‌باشند [۲۹]. مشاهده می‌شود که  $n$  به  $I$  وابسته است بنابراین می‌توان با تغییر شدت نور، مد تشدید را تغییر و مطابق مطلوب تنظیم نمود. این روش برای طراحی ادوات تمام نوری دارای کاربرد فراوانی است. اخیراً، چندین نوع از مقایسه‌کننده‌های تمام نوری با استفاده از اثر غیرخطی کر طراحی شده است. فکوری و عندلیب [۲۰] یک مقایسه‌کننده تمام نوری پیشنهاد دادند که متشکل از تشدیدگرهای حلقوی بلور فوتونی ساخته‌شده از میله‌های غیرخطی است. ساختار پیشنهادی دارای پاسخ زمانی ۶ پیکوثانیه و مساحت ۱۷۰۵ میکرومتر مربع است. ژو و همکاران [۳۰] یک مقایسه‌کننده تکبیتی تمام نوری پیشنهاد دادند که دارای پاسخ زمانی ۴ پیکوثانیه و مساحت ۱۲۷۰ میکرومتر مربع است. سراج محمدی و همکاران [۳۱] یک مقایسه‌کننده تکبیتی تمام نوری بر اساس تشدیدگر X شکل طراحی کردند که دارای پاسخ زمانی کوتاه‌تر اما مساحت بزرگ‌تر است. در این خصوص مقاله‌های دیگری نیز توسط پژوهشگران منتشر شده است اما در تمامی مقاله‌های منتشرشده مشکلاتی شامل پاسخ زمانی نسبتاً طولانی، مساحت بزرگ، دشواری و هزینه بالای ساخت به چشم می‌خورد. در این مقاله، یک مقایسه‌کننده تمام نوری با استفاده از تشدیدگرهای حلقوی را ارائه می‌کنیم. ساز و کار عملکرد این مقایسه‌کننده به شدت نور ورودی وابسته است که این شدت مد تشدید تشدیدگر را تغییر می‌دهد. مقاله مطابق زیر سازمان‌دهی شده است: در بخش دوم به فرایند طراحی مقایسه‌کننده پیشنهادی همچنین روش‌های عددی مورد استفاده برای محاسبه ساختار باندی و رفتار انتشاری پرداخته می‌شود. در بخش سوم نتایج شبیه‌سازی عددی نور ارائه و بحث و بررسی می‌شوند و سرانجام در بخش ۴ از مقاله نتیجه‌گیری خواهد شد.

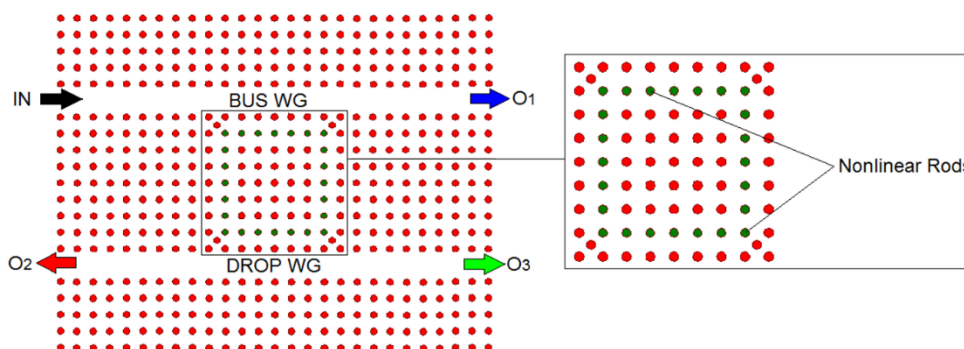
## ۲. ساختار پیشنهادی

برای طراحی مقایسه‌کننده پیشنهادی در این مقاله، از یک ساختار بلور فوتونی پایه شامل یک آرایه دارای ۲۷ سطر و ۲۱ ستون از میله‌های سیلیکونی استفاده می‌شود. هر میله دی‌الکتریک دارای شعاع  $R=0.2a$  است که در آن  $a$  ثابت شبکه (فاصله مرکز به مرکز میله‌های دی‌الکتریک) و مقدار آن برابر با ۵۹۰ نانومتر می‌باشد. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده

<sup>1</sup> Nonlinear Kerr effect

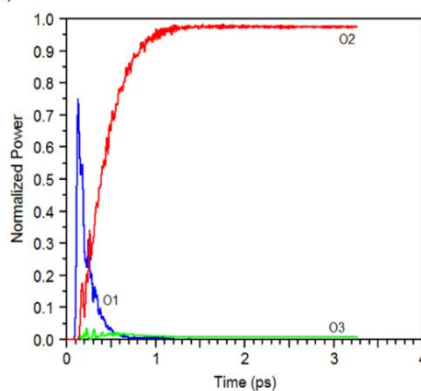
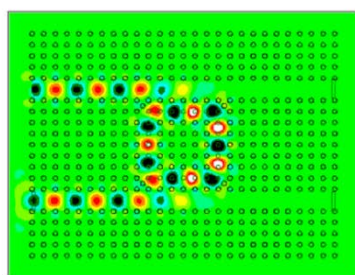
مقایسه می‌کند و نتیجه کوچک‌تر، مساوی یا بزرگ‌تر بودن را در خروجی نمایش می‌دهد. یک مقایسه‌کننده تک‌بیتی متداول شامل دو پورت ورودی  $X$  و  $Y$  و سه پورت خروجی  $F1$ ،  $F2$  و  $F3$  است و توابع منطقی برای آنها مطابق رابطه زیر نوشته می‌شوند [۳۲]:

$$\begin{cases} F_1 = X \square Y \\ F_2 = \overline{X} \cdot Y \\ F_3 = X \cdot \overline{Y} \end{cases} \quad (1)$$

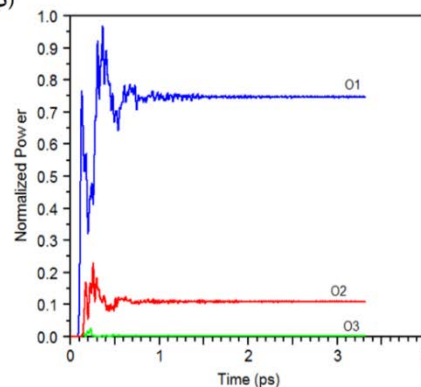
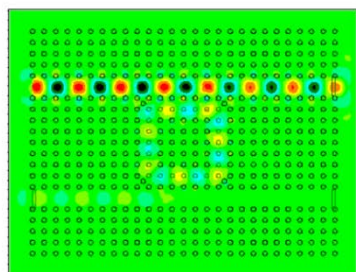


شکل (۲): طرح‌واره تشدیدگر حلقوی متشکل از میله‌های سیلیکونی با رنگ قرمز و میله‌ها با ضریب غیرخطی بالا به رنگ سبز.

(الف)

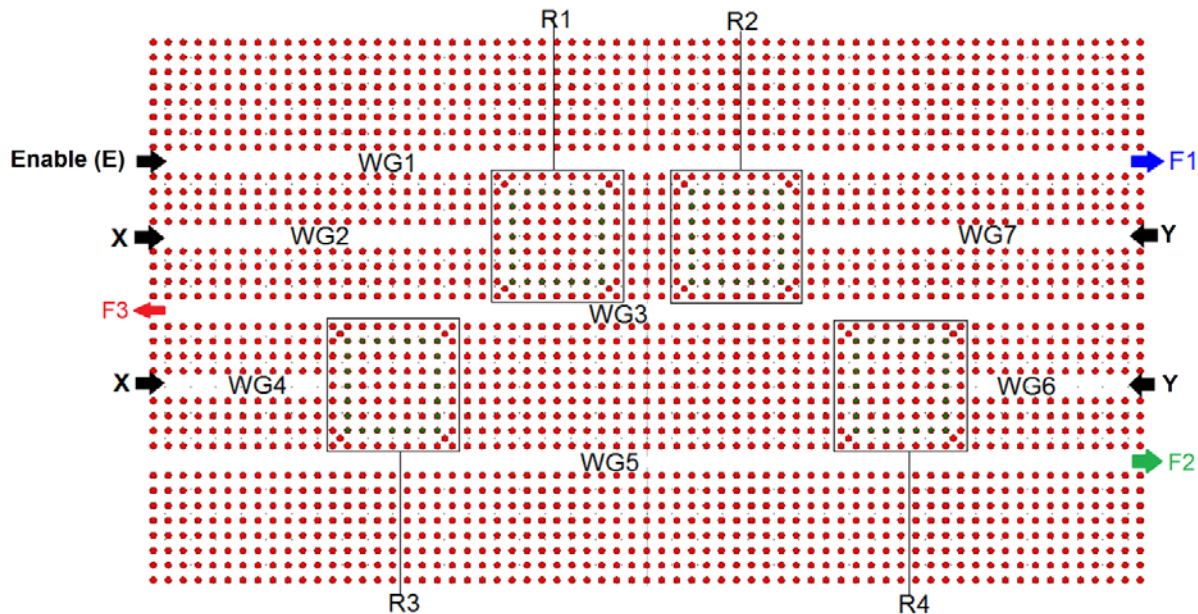


(ب)



شکل (۳): توزیع میدان نور ورودی درون ساختار تشدیدگر حلقوی بلور فوتونی با میله‌های غیرخطی برای دو توان نور ورودی متفاوت، (الف)  $P=1 \text{ W}/\mu\text{m}^2$  و (ب)  $P=2 \text{ W}/\mu\text{m}^2$ .

دی الکتریک ایجاد شده‌اند و در انتها به ترتیب به خروجی‌های F1، F3 و F2 متصل شده‌اند و ورودی WG1 نیز به پورت فعال‌ساز متصل شده است. دو تشدیدگر حلقوی R1 و R2 بین موج‌برهای WG1 و WG3 قرار گرفته‌اند. همچنین دو تشدیدگر حلقوی R3 و R4 بین موج‌برهای WG3 و WG5 قرار گرفته‌اند. پورت X را به ترتیب R1 و R3 متصل می‌کنند و WG6 و WG7 پورت Y را به ترتیب R4 و R2 متصل می‌کنند.



شکل (۴): ساختار مقایسه کننده تک‌بیتی پیشنهادی تشکیل شده از چهار تشدیدگر حلقوی غیرخطی و هفت موج‌بر.

از طریق اعمال تفاضل متناهی بر روی مشتق زمانی و مکانی مؤلفه‌های میدان، شش معادله به هنگام‌سازی برای شش مؤلفه میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی حاصل می‌شود. دکتر Yee در سال ۱۹۶۶ روشی برای شبکه‌بندی فضایی معادلات دیفرانسیل یا انتگرالی ماکسول جهت حل آنها در حوزه زمان ارائه داد. گرچه روش‌های متنوعی پس از وی ارائه گردید ولی همچنان روش ارائه شده توسط وی اصلی‌ترین روش محسوب می‌گردد.

در این تحقیق، برای تحلیل و شبیه‌سازی انتشار نور درون مقایسه‌کننده پیشنهادی از روش اجزا محدود حوزه زمان استفاده شده است. همان‌طور که در شکل (۴) نشان داده شده است مقایسه‌کننده تک‌بیتی دارای دو پورت ورودی است. بنابراین، مطابق اصل محاسبات چهار حالت برای ورودی باینری وجود دارد (برای  $N$  ورودی  $2^N$  حالت وجود دارد). در ساختار مقایسه‌کننده پیشنهادی تمامی تشدیدگرهای حلقوی طوری طراحی شده‌اند که دارای طول موج تشدید یکسان ۱۵۵۰ نانومتر باشند. این بدین معنی است که نور ورودی با شدت کم با ورود به آنها به تشدید افتاده و از سمت دیگر خروجی تشدیدگر خارج می‌شود درحالی‌که با افزایش شدت ورودی به دلیل عدم تطابق مد

شکل (۴) ساختار مقایسه‌کننده تک‌بیتی پیشنهادی در این تحقیق را نمایش می‌دهد و عملکرد آن در جدول (۱) که به جدول درستی معروف است نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، با ایجاد چهار تشدیدگر حلقوی غیرخطی و هفت موج‌بر درون ساختار پایه بلور فوتونی ساختار نهایی تشکیل می‌شود. هر یک از موج‌برهای WG1، WG3 و WG5 با حذف یک ردیف از میله‌های

### ۳. نتایج شبیه‌سازی و بحث

روش تفاضل محدود در حوزه زمان FDTD با شبکه‌بندی فضای مدل‌سازی، ساختار مورد مطالعه و میدان‌های برهم‌کنش کننده تعریف می‌شوند. این روش نخستین بار با حل معادلات مستقل از زمان ماکسول، توسط Kane Yee در سال ۱۹۶۶ ارائه شد. اما به دلیل عدم دسترسی به کامپیوترهای با سرعت و حافظه مورد نیاز تا اواخر دهه ۸۰ مورد توجه واقع نگردید. با پیشرفت در ساخت کامپیوترهای شخصی، این روش به‌عنوان کارآمدترین روش در مطالعه انتشار و برهم‌کنش امواج الکترومغناطیس ماده در بسیاری از شاخه‌ها از قبیل: فیزیک، الکترونیک، مخابرات، فوتونیک و نظایر آن مطرح گردید. در روش FDTD استاندارد، فضای شبیه‌سازی به سلول‌های مکعبی شکل یکسان تقسیم‌بندی می‌شود. محل قرارگیری مؤلفه‌های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی بر روی هر سلول به صورت یک در میان به‌گونه‌ای تعیین می‌گردد که هر مؤلفه میدان الکتریکی توسط مؤلفه‌های میدان مغناطیسی و هر مؤلفه میدان مغناطیسی توسط مؤلفه‌های میدان الکتریکی احاطه گردد. با گسسته‌سازی معادلات ماکسول

توان کمتر از  $2W/\mu m^2$  وارد آنها شده و به ترتیب به موج‌برهای خروجی WG3 و WG5 تزویج شده و در موج‌بر WG5 با منبع نور موجود جمع شده و مسیر موج‌بر WG5 را به سمت خروجی F2 ادامه می‌دهد و از آن خارج می‌شود. در این حالت خروجی‌های F1 و F3 غیرفعال (خاموش) و خروجی F2 فعال (روشن) هستند. برای توضیحات بیشتر، نتایج شبیه‌سازی در شکل (۵-ب) ارائه شده‌اند.

#### حالت سوم: حالتی که ورودی X فعال و ورودی Y غیرفعال

هستند. در این حالت نور منتشر شده در فعال‌ساز E در موج‌بر WG1 به R1 نزدیک می‌شود. به‌طور هم‌زمان نور ورودی به ورودی X از طریق موج‌برهای WG2 و WG4 به ترتیب به تشدیدگرهای R1 و R3 می‌رسد به دلیل ورود نور به تشدیدگر R1 و عدم تطبیق فرکانسی، نور موجود در موج‌بر WG1 اجازه ورود به این موج‌بر را پیدا نمی‌کند و مسیر خود را ادامه می‌دهد تا به تشدیدگر R2 برسد و به دلیل توان انتشاری کمتر از  $2W/\mu m^2$ ، وارد این تشدیدگر شده و به دلیل محقق شدن شرط تطبیق طول موجی، نور از آن به موج‌بر WG3 تزویج می‌شود و با انتشار در آن به تشدیدگر R3 نزدیک می‌شود و با انتشار درون این تشدیدگر ناشی از انتشار توسط ورودی X، قادر به ورود به این تشدیدگر نیست و مسیر مستقیم خود را درون موج‌بر WG3 به سمت خروجی F3 ادامه و از آن خارج می‌شود. شکل (۵-ج) میدان نور انتشاری درون مقایسه‌کننده پیشنهادی برای این حالت را نشان می‌دهد و مؤید توضیحات فوق است. در این حالت خروجی‌های F1 و F2 غیرفعال (خاموش) و خروجی F3 فعال (روشن) هستند.

#### حالت چهارم: وقتی ورودی‌های X و Y هر دو فعال

(روشن) هستند بدین معنی که سیگنال نوری درون هر دو آنها انتشار دارد. در این حالت نور منتشرشده در فعال‌ساز E در موج‌بر WG1 به R1 نزدیک می‌شود. به‌طور هم‌زمان نور ورودی به ورودی X از طریق موج‌برهای WG2 و WG4 به ترتیب به تشدیدگرهای R1 و R3 می‌رسد به دلیل ورود نور به تشدیدگر R1 و عدم تطبیق فرکانسی، نور موجود در موج‌بر WG1 اجازه ورود به این موج‌بر را پیدا نمی‌کند و مسیر خود را ادامه می‌دهد تا به تشدیدگر R2 برسد. به‌طور هم‌زمان نور ورودی به ورودی Y از طریق موج‌برهای WG7 و WG6 به ترتیب به تشدیدگرهای R2 و R4 می‌رسد به دلیل ورود نور به تشدیدگر R2 و عدم تطبیق فرکانسی، نور موجود در موج‌بر WG1 اجازه ورود به این موج‌بر را پیدا نمی‌کند و مسیر خود را ادامه می‌دهد تا به پورت خروجی F1 برسد و از آن خارج شود. در این حالت خروجی F2 و F3 غیرفعال (خاموش) و خروجی F1 فعال (روشن) هستند. برای توضیحات بیشتر، نتایج شبیه‌سازی در شکل (۵-د) ارائه شده‌اند.

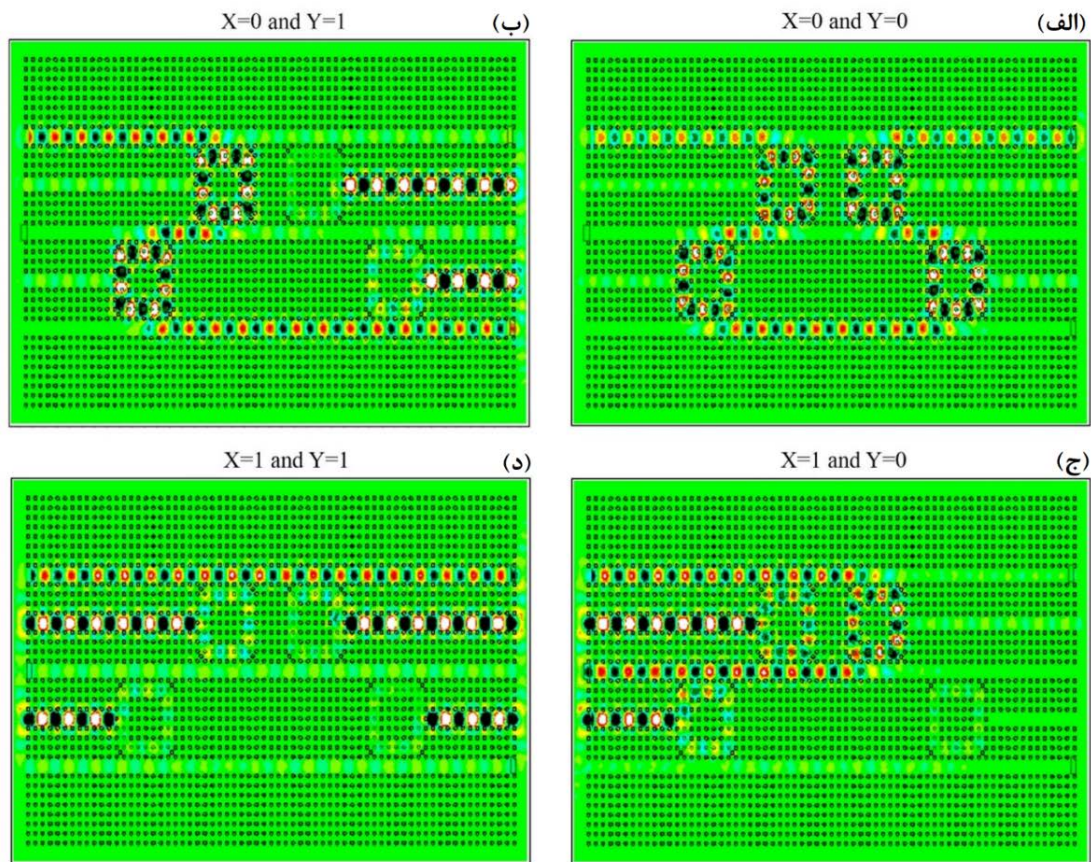
تشدیدی، تشدید رخ نمی‌دهد. این پدیده مهمی است که عملکرد ساختار پیشنهادی را تعیین می‌کند. مقایسه‌کننده تک‌بیتی پیشنهادی در این تحقیق دارای دو ورودی است که هر یک برای یک کد یک بیتی استفاده می‌شود که در هر لحظه دارای مقدار صفر یا یک است. برای عملکرد صحیح ساختار پیشنهادی، پورت ورودی E باید همیشه فعال باشد یعنی به‌صورت پیوسته سیگنال نوری درون آن انتشار یابد. مطابق جدول (۱)، چهار حالت برای ورودی‌های X و Y وجود دارند که مطابق زیر بحث می‌شوند:

#### حالت اول: وقتی ورودی‌های X و Y هر دو غیرفعال

(خاموش) هستند بدین معنی که هیچ سیگنال نوری درون آنها انتشار ندارد و تنها سیگنال فعال‌ساز (پورت E) در حال انتشار باشد. در این حالت نور منتشرشده در موج‌بر WG1 با نزدیک شدن به R1 به دلیل توان انتشاری آن که کمتر از  $2W/\mu m^2$  است وارد تشدیدگر حلقوی R1 می‌شود و به دلیل محقق شدن شرط تطبیق طول موجی، نور از تشدیدگر R1 به موج‌بر WG3 تزویج می‌شود و با انتشار در آن به تشدیدگر R3 نزدیک می‌شود و به دلیل توان کمتر از  $2W/\mu m^2$  وارد آن شده و مجدداً به دلیل محقق شدن شرط تطبیق طول موجی، نور از تشدیدگر R3 به موج‌بر WG5 تزویج می‌شود و با انتشار در آن به تشدیدگر R4 نزدیک می‌شود و به دلیل توان کمتر از  $2W/\mu m^2$  وارد آن شده و مجدداً به دلیل محقق شدن شرط تطبیق طول موجی، نور از تشدیدگر R4 به موج‌بر WG3 تزویج می‌شود و با انتشار در آن به تشدیدگر R2 نزدیک می‌شود و به دلیل توان کمتر از  $2W/\mu m^2$  وارد آن شده و مجدداً به دلیل محقق شدن شرط تطبیق طول موجی، نور از تشدیدگر R2 به موج‌بر WG1 تزویج می‌شود و با انتشار در آن به تشدیدگر R4 نزدیک می‌شود و به دلیل توان کمتر از  $2W/\mu m^2$  وارد آن شده و مجدداً به دلیل محقق شدن شرط تطبیق طول موجی، نور از تشدیدگر R4 به موج‌بر WG3 تزویج می‌شود و با انتشار در آن به تشدیدگر R2 نزدیک می‌شود و به دلیل توان کمتر از  $2W/\mu m^2$  وارد آن شده و مجدداً به دلیل محقق شدن شرط تطبیق طول موجی، نور از تشدیدگر R2 به موج‌بر WG1 تزویج می‌شود و با انتشار در آن از F1 خارج می‌شود بنابراین وضعیت خروجی F1 فعال (یا روشن) شده و F2 و F3 همچنان خاموش باقی می‌مانند. نتایج این شبیه‌سازی در شکل (۵-الف) نشان داده شده‌اند.

#### حالت دوم: وقتی ورودی X غیرفعال و ورودی Y فعال

است. دقت شود در تمامی حالت‌ها سیگنال فعال‌ساز (پورت E) در حال انتشار است. در این حالت نور منتشرشده در موج‌بر WG1 با نزدیک شدن به R1 به دلیل توان انتشاری آن که کمتر از  $2W/\mu m^2$  است وارد تشدیدگر حلقوی R1 می‌شود و به دلیل محقق شدن شرط تطبیق طول موجی، نور از تشدیدگر R1 به موج‌بر WG3 تزویج می‌شود و با انتشار در آن به تشدیدگر R3 نزدیک می‌شود و به دلیل توان کمتر از  $2W/\mu m^2$  وارد آن شده و مجدداً به دلیل محقق شدن شرط تطبیق طول موجی، نور از تشدیدگر R3 به موج‌بر WG5 تزویج می‌شود و با انتشار در آن به تشدیدگر R4 نزدیک می‌شود. به‌طور هم‌زمان، نور اعمالی به پورت ورودی Y به تشدیدگرهای حلقوی R2 و R4 می‌رسد و به دلیل



شکل (۵): توزیع میدان نور ورودی درون مقایسه کننده تکبیتی پیشنهادی برای چهار حالت متفاوت دو پورت ورودی  $X$  و  $Y$  که در همه حالت‌ها به ورودی فعال ساز بلور فوتونی سیگنال اعمال شده است (الف) هر دو ورودی  $X$  و  $Y$  غیرفعال هستند، (ب) ورودی  $Y$  فعال و  $X$  غیرفعال، (ج) ورودی  $X$  فعال و ورودی  $Y$  غیرفعال، (د) هر دو ورودی  $X$  و  $Y$  فعال هستند.

جدول (۲): وضعیت پورت‌های خروجی بر حسب حالت‌های مختلف ورودی مقایسه کننده تکبیتی

وضعیت پورت ورودی	منطق پورت خروجی			توان نرمالیزه شده (%)			تاخیر زمانی (ps)
	$F_1$	$F_2$	$F_3$	$F_1$	$F_2$	$F_3$	
$X=0$ and $Y=0$	۱	۰	۰	۹۵	۱	۱	۳
$X=0$ and $Y=1$	۰	۱	۰	۱	۹۵	۱	۲/۵
$X=1$ and $Y=0$	۰	۰	۱	۵	۲	۸۵	۲/۵
$X=1$ and $Y=1$	۱	۰	۰	۸۰	۱۰	۵	۲

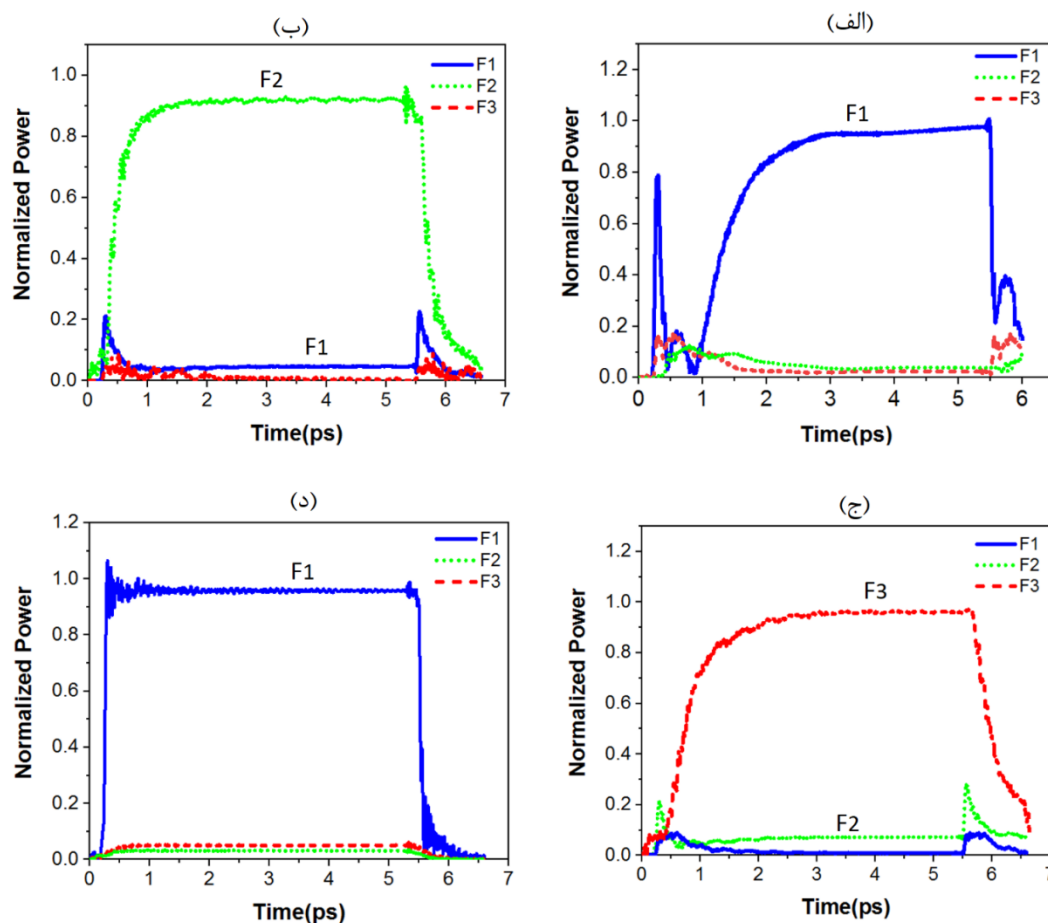
طریق موج‌برهای  $WG6$  و  $WG7$  به ترتیب به تشدیدگرهای  $R2$  و  $R4$  می‌رسد به دلیل ورود نور به تشدیدگر  $R2$  و عدم تطبیق فرکانسی، نور موجود در موج‌بر  $WG1$  اجازه ورود به این موج‌بر را پیدا نمی‌کند و مسیر خود را ادامه می‌دهد تا به پورت خروجی  $F1$  برسد و از آن خارج شود. در این حالت خروجی  $F2$  و  $F3$  غیرفعال (خاموش) و خروجی  $F1$  فعال (روشن) هستند. برای توضیحات بیشتر، نتایج شبیه‌سازی در شکل (۵-د) ارائه شده‌اند.

شکل (۶) توان نرمالیزه خروجی مقایسه کننده پیشنهادی را بر حسب زمان برای چهار وضعیت ورودی نمایش می‌دهد. در

**حالت چهارم:** وقتی ورودی‌های  $X$  و  $Y$  هر دو فعال (روشن) هستند بدین معنی که سیگنال نوری درون هر دو آنها انتشار دارد. در این حالت نور منتشر شده در فعال‌ساز  $E$  در موج‌بر  $WG1$  به  $R1$  نزدیک می‌شود. به‌طور هم‌زمان نور ورودی به ورودی  $X$  از طریق موج‌برهای  $WG2$  و  $WG4$  به ترتیب به تشدیدگرهای  $R1$  و  $R3$  می‌رسد به دلیل ورود نور به تشدیدگر  $R1$  و عدم تطبیق فرکانسی، نور موجود در موج‌بر  $WG1$  اجازه ورود به این موج‌بر را پیدا نمی‌کند و مسیر خود را ادامه می‌دهد تا به تشدیدگر  $R2$  برسد. به‌طور هم‌زمان نور ورودی به ورودی  $Y$  از

نرمالیزه برابر با ۷۰ درصد است. این نتایج در جدول (۲) به صورت خلاصه ارائه شده‌اند. دقت شود هنگامی که هر دو ورودی یکسان هستند F1 فعال شده و نشان می‌دهد نتیجه که هر دو ورودی باینری دارای مقادیر یکسان (هر دو صفر یا هر دو یک) هستند. هنگامی که ورودی Y از ورودی X بزرگ‌تر باشد بدین معنی که Y فعال (برابر با یک) و X غیرفعال (برابر با صفر) باشد آنگاه F2 فعال می‌شود و در حالت سوم یعنی زمانی که ورودی Y از ورودی X کوچک‌تر باشد بدین معنی که X فعال (برابر با یک) و Y غیرفعال (برابر با صفر) باشد آنگاه F3 فعال خواهد شد.

این شبیه‌سازی ورودی‌ها در صورت فعال بودن پالسی با عرض ۵ پیکوثانیه در نظر گرفته شدند تا به طرز مطلوبی بتوان رفتار خروجی را در لبه‌های بالارونده و پایین‌رونده ارزیابی نمود. همان‌طور که ملاحظه می‌شود بیشینه تأخیر زمانی در لبه بالارونده برابر با ۳ پیکوثانیه و در لبه پائین‌رونده در حدود ۱ پیکوثانیه است که می‌توان گفت تأخیر نهایی ساختار در پاسخ به سیگنال‌های ورودی پالسی ۴ پیکوثانیه است. بنابراین می‌توان از آن در کاربردهای سرعت بالا استفاده نمود. اختلاف بین منطق‌های صفر (خاموش) و یک (روشن) در حالت توان خروجی



شکل (۶): توان نرمالیزه خروجی مقایسه‌کننده تک‌بیتی تمام نوری پیشنهادی برای حالت‌های (الف)  $X=0$  و  $Y=0$  (ب)  $X=0$  و  $Y=1$  (ج)  $X=1$  و  $Y=0$  (د) و  $X=1$  و  $Y=1$  که در صورت فعال بودن هر یک از ورودی‌ها، منع ورودی به صورت پالسی با عرض ۵ پیکوثانیه در نظر گرفته شده است.

باند C است و با انتشار منبع نور با طول موج ۱۵۵۰ نانومتر رفتار انتشاری آن با استفاده از روش اجزا محدود حوزه زمان بررسی شدند. نتایج این مطالعه نشان دادند بیشینه تأخیر زمانی ساختار پیشنهادی ۳ پیکوثانیه است و در حالت فعال بودن دارای کمینه عبور ۸۰ درصدی می‌باشد که از مزایای این ساختار در مقایسه با تحقیقات اخیر است. همچنین مساحت این مقایسه‌کننده ۸۲۶

#### ۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله، با استفاده از تشدیدگرهای حلقوی بلور فوتونی غیرخطی، یک مقایسه‌کننده باینری تمام نوری طراحی شد. نتایج شبیه‌سازی عددی مبتنی بر روش بسط امواج تخت نشان دادند ساختار پایه دارای شکاف باند فوتونی در پنجره انتشاری



- [15] T. Daghooghi, M. Soroosh, and K. Ansari-Asl, "Ultra-fast all-optical decoder based on nonlinear photonic crystal ring resonators," *Applied Optics*, vol. 57, no. 9, p. 2250, 2018.
- [16] Z. Chen, Z. Li, and B. Li, "A 2-to-4 decoder switch in SiGe/Si multimode interference," *Optics Express*, vol. 14, no. 7, p. 2671, 2006.
- [17] F. Parandin, M. M. Karkhanechi, M. Naseri, and A. Zahedi, "Design of a high bitrate optical decoder based on photonic crystals," *Journal of Computational Electronics*, vol. 17, no. 2, pp. 830–836, 2018.
- [18] G. Manzacca, D. Paciotti, A. Marchese, M. S. Moreolo, and G. Cincotti, "2D photonic crystal cavity-based WDM multiplexer," *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, vol. 5, no. 4, pp. 164–170, 2007.
- [19] M. Koshiba, "Wavelength division multiplexing and demultiplexing with photonic crystal waveguide couplers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 19, no. 12, pp. 1970–1975, 2001.
- [20] V. Fakouri-Farid and A. Andalib, "Design and simulation of an all optical photonic crystal-based comparator," *Optik*, vol. 172, pp. 241–248, 2018.
- [21] H. Jile, "Realization of an all-optical comparator using beam interference inside photonic crystal waveguides," *Applied Optics*, vol. 59, no. 12, p. 3714, 2020.
- [22] C. Lu, X. Hu, H. Yang, and Q. Gong, "Chip-integrated ultrawide-band all-optical logic comparator in plasmonic circuits," *Scientific Reports*, vol. 4, no. 1, pp. 1–8, 2014.
- [23] R. Moradi, "All optical half subtractor using photonic crystal based nonlinear ring resonators," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 51, no. 4, p. 119, 2019.
- [24] E. Kuramochi et al., "Large-scale integration of wavelength-addressable all-optical memories on a photonic crystal chip," *Nature Photonics*, vol. 8, no. 6, pp. 474–481, 2014.
- [25] T. Alexoudi, G. T. Kanellos, and N. Pleros, "Optical RAM and integrated optical memories: a survey," *Light: Science and Applications*, vol. 9, no. 1, pp. 1–16, 2020.
- [26] T. Uda, A. Ishii, and Y. K. Kato, "Single Carbon Nanotubes as Ultrasmall All-Optical Memories," *ACS Photonics*, vol. 5, no. 2, pp. 559–565, 2018.
- [27] A. Poustie, R. J. Manning, A. E. Kelly, and K. J. Blow, "All-optical binary counter," *Optics Express*, vol. 6, no. 3, p. 69, 2000.
- [28] S. Kaur and R. S. Kaler, "5 GHz all-optical binary counter employing SOA-MZIs and an optical NOT gate," *Journal of Optics (United Kingdom)*, vol. 16, no. 3, p. 35201, 2014.
- [29] F. Mehdizadeh, M. Soroosh, and H. Alipour-Banaei, "A novel proposal for optical decoder switch based on photonic crystal ring resonators," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 48, no. 1, pp. 1–9, 2016.
- [30] L. Zhu, F. Mehdizadeh, and R. Talebzadeh, "Application of photonic-crystal-based nonlinear ring resonators for realizing an all-optical comparator," *Applied Optics*, vol. 58, no. 30, pp. 8316–8321, 2019.
- [31] S. Serajmohammadi, H. Alipour-Banaei, and F. Mehdizadeh, "A novel proposal for all optical 1-bit comparator using nonlinear PhCRRs," *Photonics and Nanostructures-Fundamentals and Applications*, vol. 34, pp. 19–23, 2019.
- [32] F. Parandin, R. Kamarian, and M. Jomour, "Optical 1-bit comparator based on two-dimensional photonic crystals," *Applied Optics*, vol. 60, no. 8, pp. 2275–2280, 2021.

میکرومتر مربع است که از آن می‌توان در مدارهای مجتمع فوتونیک برای پردازش‌های فوق سریع استفاده نمود.

## ۵. مراجع

- [1] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, and K. M. Leung, "Photonic band structure: The face-centered-cubic case employing nonspherical atoms," *Physical Review Letters*, vol. 67, no. 17, pp. 2295–2298, 1991.
- [2] E. Yablonovitch, "Photonic band-gap crystals," *Journal of Physics: Condensed Matter*, vol. 5, no. 16, p. 2443, 1993.
- [3] E. Yablonovitch, "Photonic crystals," *Journal of Modern Optics*, vol. 41, no. 2, pp. 173–194, 1994.
- [4] S. Mukherjee, R. Maiti, A. Midya, S. Das, and S. K. Ray, "Tunable direct bandgap optical transitions in MoS<sub>2</sub> nanocrystals for photonic devices," *Acs Photonics*, vol. 2, no. 6, pp. 760–768, 2015.
- [5] C. Trigona, B. Ando, and S. Baglio, "Design, fabrication, and characterization of BESOI-accelerometer exploiting photonic bandgap materials," *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63, no. 3, pp. 702–710, 2014.
- [6] R. M. Younis, N. F. F. Areed, and S. S. A. Obayya, "Fully integrated and and or optical logic gates," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 26, no. 19, pp. 1900–1903, 2014.
- [7] P. Andalib and N. Granpayeh, "All-optical ultracompact photonic crystal and gate based on nonlinear ring resonators," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 26, no. 1, p. 10, 2009.
- [8] H. M. E. Hussein, T. A. Ali, and N. H. Rafat, "New designs of a complete set of Photonic Crystals logic gates," *Optics Communications*, vol. 411, pp. 175–181, 2018.
- [9] M. Hosseinzadeh Sani, A. Ghanbari, and H. Saghaei, "An ultra-narrowband all-optical filter based on the resonant cavities in rod-based photonic crystal microstructure," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 52, no. 6, p. 295, 2020.
- [10] M. Zamani, "Photonic crystal-based optical filters for operating in second and third optical fiber windows," *Superlattices and Microstructures*, vol. 92, pp. 157–165, 2016.
- [11] A. Foroughifar, H. Saghaei, and E. Veisi, "Design and analysis of a novel four channel optical filter using ring resonators and line defects in photonic crystal microstructure," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 53, no. 2, 2021.
- [12] S. Naghizade, H. Khoshshima, "Low input power all optical 4×2 encoder based on triangular lattice shape photonic crystal," *Journal of Optical Communications*, vol. 1, pp. 1–8, 2018.
- [13] T. A. Moniem, "All-optical digital 4 × 2 encoder based on 2D photonic crystal ring resonators," *Journal of Modern Optics*, vol. 63, no. 8, pp. 735–741, 2016.
- [14] F. Mehdizadeh, M. Soroosh, and H. Alipour-Banaei, "Proposal for 4-to-2 optical encoder based on photonic crystals," *IET Optoelectronics*, vol. 11, no. 1, pp. 29–35, 2017.