

Research Paper

Design and Simulation of all-optical Comparator Using Photonic Crystal-based Nonlinear Ring Resonators¹

Alidoost Rostamizadeh²

Received:2021.02.07

Revised: 2021.04.22

Accepted:2021.06.14

Abstract

All-optical comparators can play crucial roles in the next generation of optical integrated circuits. In this paper, a novel structure was proposed for designing and implementing an all-optical comparator. Two nonlinear ring resonators were used for designing the proposed structure. These ring resonators can drop optical waves with central wavelength and optical intensities equal to 1550 nm and 0.1 W/m², respectively. The simulation results show that the proposed structure can perform optical cooperation. At the proposed structure when X is ON and Y is OFF (i.e. $X > Y$) O1 will be ON and O2 will be OFF. When X is OFF and Y is ON (i.e. $X < Y$) O1 will be OFF and O2 will be ON. Finally, when X and Y are in similar states (i.e. $X=Y$) both output ports will be OFF. By Combining these output states one can implement optical comparison. The maximum rise time is about 1/5 ps.

Keyword: *Optical Comparator, Photonic Crystal, Nonlinear Ring Resonator, Kerr Effect.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2021.35400.1198

² Department of Electrical and Computer Engineering, Yasuj Branch, Technical and Vocational University (TVU), Kohgiluyeh and BoyerAhmad, Iran. Email: rostamizadehalidoost@gmail.com

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا

سال یازدهم، پیاپی ۲۴، بهار ۱۴۰۰

مقاله پژوهشی

طراحی و شبیه‌سازی مقایسه‌کننده تمام‌نوری با استفاده از حلقه‌های تشدید غیرخطی مبتنی بر بلور فوتونی^۱

علیدوست رستمی‌زاده^۲

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۱۹

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۲/۰۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۳/۲۴

چکیده

مقایسه‌کننده‌های تمام‌نوری می‌توانند نقش بسیار حیاتی در نسل بعدی مدارهای مجتمع تمام‌نوری ایفا کنند. در این مقاله، ساختار جدیدی برای طراحی و پیاده‌سازی یک مقایسه‌کننده تمام‌نوری ارائه شده است. برای طراحی این ساختار، از دو حلقه تشدید غیرخطی استفاده شده است. حلقه‌های تشدید به کاررفته می‌توانند پرتوهای نوری با طول موج مرکزی 1550 nm و شدت نور 1 W/m^2 را به بین موجبرهای نوری انتقال دهند. نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داده است که ساختار پیشنهادی می‌تواند یک مقایسه‌کننده تمام‌نوری یک‌بیتی را پیاده‌سازی کند. در

^۱ DOI: 10.22051/ijap.2021.35400.1198

^۲ دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه پسران یاسوج، دانشگاه فنی و حرفه‌ای استان کهگیلویه و بویراحمد، ایران.

Email: rostamizadehalidoost@gmail.com

ساختار پیشنهادی در حالتی که درگاه X روشن و درگاه Y خاموش است ($X > Y$)، درگاه خروجی O_1 روشن و درگاه خروجی O_2 خاموش می‌ماند. در حالتی که درگاه X خاموش و درگاه Y روشن است ($X < Y$)، درگاه خروجی O_1 خاموش و درگاه خروجی O_2 روشن می‌شود. همچنین، در حالت‌هایی که درگاه‌های ورودی هر دو با هم روشن یا هر دو با هم خاموش هستند ($X = Y$) هر دو درگاه خروجی خاموش می‌مانند. برای ساختار پیشنهادی، حداکثر زمان صعود نیز برابر $1/5$ ps است.

واژگان کلیدی: مقایسه‌کننده تمام‌نوری، بلور فوتونی، حلقه تشدید غیرخطی، اثر کر.

۱. مقدمه

بلورهای فوتونی ساختارهایی هستند که توزیع ضریب شکست در آن‌ها تناوب مکانی دارد. این تناوب مکانی توزیع ضریب شکست منشأ ویژگی منحصربه‌فردی برای این ساختارها به نام «نوار ممنوع فوتونی» است [۱]. نوار ممنوع فوتونی به این ساختارها امکان تنظیم انتشار موج‌های نوری داخل موجبرهای نوری با ابعاد چند صد نانومتر را فراهم می‌کند [۲]. علاوه بر ویژگی موجبری از بلورهای فوتونی می‌توان در طول موج‌گزینی [۳، ۴] و سویچ‌زنی [۵] تمام‌نوری نیز استفاده کرد. موجبرهای نوری [۶] و کاواک [۷] و حلقه‌های [۸] تشدید مهم‌ترین عناصر سازنده هر افزاره تمام‌نوری مبتنی بر بلور فوتونی هستند. پیشتر نشان داده‌اند که با ترکیب موجبرهای نوری با کاواک یا حلقه‌های تشدید می‌توان انواع فیلتر [۹-۱۳]، دی‌مالتی‌پلسکر [۱۶-۱۴]، درگاه [۲۱-۱۷]، دیکدر [۲۵-۲۲]، انکدر [۲۸-۲۶]، جمع‌کننده [۳۳-۲۹]، تفریق‌کننده [۳۶-۳۴]، مقایسه‌کننده [۴۰-۳۷]، مالتی‌پلکسر [۴۱] حافظه [۴۴-۴۲] و مبدل آنالوگ به دیجیتال [۴۸-۴۵] تمام‌نوری را طراحی و پیاده‌سازی کرد.

دو روش در طراحی افزاره‌های منطقی تمام‌نوری مبتنی بر بلورهای فوتونی پرکاربرد است. یکی از این روش‌ها استفاده از سویچ‌زنی حد آستانه است که با استفاده از تشدیدگرهای غیرخطی پیاده‌سازی می‌شود. اصول کاری این روش بر تغییر مد تشدید تشدیدگر با استفاده از شدت نور ورودی وابسته است. نشان داده‌اند که مد تشدید کاواک و حلقه‌های تشدید به تغییرات ضریب شکست وابسته است. از طرف دیگر می‌دانیم طبق پدیده اثر کر ضریب شکست مواد غیرخطی نیز به شدت نور تابشی به این مواد وابسته است. لذا در صورتی که در ساختار کاواک یا حلقه تشدید از مواد دی‌الکتریک غیرخطی استفاده شده باشد، می‌توان رفتار نوری آن‌ها را با استفاده از شدت نور تنظیم کرد که به این روش در اصطلاح سویچ‌زنی حد آستانه می‌گویند [۴۹]. روش دیگر استفاده از

تداخل سازنده و مخرب پرتوهای نوری درون موجبرهای نوری است. می‌دانیم که دو پرتو نوری در صورت داشتن اختلاف فاز برابر با صفر با هم تداخل سازنده خواهند داشت و در صورتی که اختلاف فاز آن‌ها ۱۸۰ درجه باشد تداخل مخرب ایجاد می‌شود [۳۰].

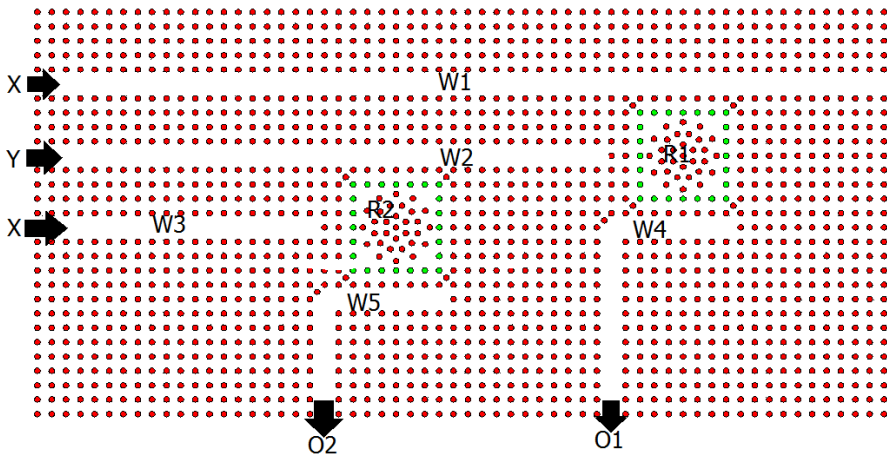
مقایسه‌کننده‌های تمام‌نوری کاربردهای بسیاری در سیستم‌های دیجیتال و پردازش نوری و سیستم‌های کنترلی دارند. اولین مقایسه‌کننده تمام‌نوری مبتنی بر بلور فوتونی توسط فکوری فرید و عندلیب ارائه شده است [۴۰]. این ساختار با استفاده از چهار حلقه تشدید غیرخطی طراحی شده است. در این ساختار، زمان تأخیر 6 ps به دست آمده است. ساختار دیگر برای طراحی مقایسه‌کننده تمام‌نوری توسط سراج محمدی و همکاران ارائه شده است [۵۰]. در طراحی این ساختار از ترکیب تقسیم‌کننده‌های نوری و حلقه‌های تشدید غیرخطی استفاده کرده‌اند. برای این ساختار زمان تأخیر 6 ps به دست آمده است. سرندار و همکارانش مقایسه‌کننده‌ای طراحی کردند که زمان تأخیر آن $3/5\text{ ps}$ است [۳۹]. ژو و همکاران نیز در طراحی خود از مقایسه‌کننده به ساختاری با زمان تأخیر 4 ps دست یافتند [۳۸]. تمامی ساختارهای فوق دو ورودی و سه خروجی دارند. سراج و همکاران ساختار متفاوتی را برای طراحی مقایسه‌کننده تمام‌نوری طراحی کردند که دو ورودی و دو خروجی دارد، که یکسان بودن پورت‌های ورودی را با خاموش بودن هر دو پورت خروجی نشان داده‌اند. در پژوهش حاضر، ساختار جدیدی برای پیاده‌سازی مقایسه‌کننده تمام‌نوری طراحی و ارائه شده است، که مشابه ساختار سراج و همکاران دو خروجی دارد و خاموش بودن همزمان هر دو خروجی به معنای وضعیت یکسان ورودی‌های آن است [۵۱].

۲. مقایسه‌کننده تمام‌نوری

برای طراحی ساختار پیشنهادی برای پیاده‌سازی مقایسه‌کننده تمام‌نوری، از یک بلور فوتونی دو بعدی متشکل از میله‌های دی‌الکتریک در هوا استفاده کرده‌ایم. ضریب شکست میله‌های دی‌الکتریک $3/46$ و شعاع میله‌ها 120 نانومتر و ثابت شبکه ساختار 600 نانومتر است. ماده به کاررفته برای میله‌های غیرخطی نیز از جنس شیشه آلاییده است که ضریب شکست خطی و ضریب اثر کر آن به ترتیب $1/4$ و 10^{-14} W/m^2 است.

برای طراحی مقایسه‌کننده تمام‌نوری پیشنهادی از دو حلقه تشدید غیرخطی استفاده کرده‌ایم. حلقه‌های تشدید هسته، یک لایه میانی و یک لایه بیرونی دارند. حلقه میانی که با میله‌های سبز نشان داده شده است، از جنس ماده غیرخطی ساخته شده‌اند. شعاع این میله‌ها با شعاع میله‌های ساختار پایه یکسان است. ابتدا سه موجبر موازی به نام‌های W_1 و W_2 و W_3 با طول‌های مختلف به فاصله 4 ردیف از یکدیگر در ساختار پایه ایجاد شده است. سپس حلقه تشدید غیرخطی R را در زیر موجبر

W^1 و انتهای موجبر W^2 ایجاد کردیم. در مرحله بعد حلقه تشدید غیرخطی R^2 را زیر موجبر W^2 و انتهای موجبر W^3 ایجاد کردیم. در مرحله آخر، دو موجبر L شکل زیر حلقه‌های تشدید ایجاد کردیم، که W^4 و W^5 نامگذاری شد. ساختار نهایی که در شکل ۱ آمده است دو درگاه ورودی و دو درگاه خروجی دارد. حلقه‌های تشدید غیرخطی مهمترین بخش به کاررفته در این ساختار است. وظیفه آن‌ها سوپرجزنی تمام‌نوری است. در صورتی که توان نور از حد آستانه حلقه کمتر باشد، حلقه می‌تواند پرتوهای نوری را به موجبر خروجی هدایت کند ولی اگر توان نور از حد آستانه حلقه بیشتر باشد حلقه بیشتر باشد حلقه نمی‌تواند نور را به موجبر خروجی منتقل کند لذا با این روش عمل سوپرجزنی پیاده سازی می‌شود.

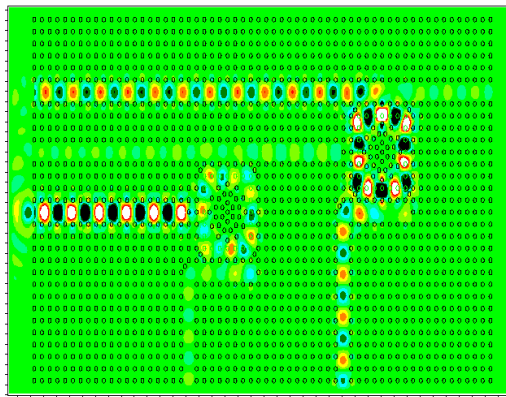


شکل ۱ مقایسه‌کننده تمام‌نوری.

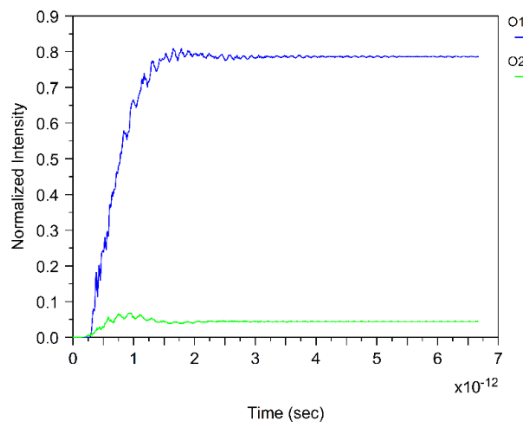
۳. نتایج شبیه‌سازی

بعد از طراحی ساختار پیشنهادی برای پیاده‌سازی مقایسه‌کننده تمام‌نوری جهت بررسی درستی عملکرد آن، ساختار پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار آرسافت شبیه‌سازی شد. برای شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی در درگاه‌های ورودی از منبع نوری با طول موج مرکزی 1550 nm و شدت نور 0.1 W/m^2 استفاده شده است. لازم است ذکر کنیم که حلقه‌های تشدید به کاررفته می‌توانند پرتوهای نوری با طول موج مرکزی 1550 nm و شدت نور 0.1 W/m^2 را به بین موجبرهای نوری انتقال دهند. با توجه به اینکه ساختار پیشنهادی دو درگاه ورودی دارد، در ورودی چهار حالت ممکن برای عملکرد ساختار پیشنهادی وجود دارد.

در حالتی که هر دو درگاه ورودی خاموش است، هیچ نوری وارد ساختار نمی‌شود. لذا هر دو درگاه خروجی نیز خاموش بوده و دامنه شدت نور بهنجارشده در هر دو خروجی برابر ۰٪ خواهد بود. در حالتی که درگاه X روشن و درگاه Y خاموش است، حلقه تشدید R_1 پرتوهای نوری ورودی از درگاه X را از موجبر W_1 به موجبر W_4 انتقال داده و به سمت درگاه خروجی O_1 هدایت می‌کند. در این حالت، درگاه O_1 روشن می‌شود ولی نور کافی به درگاه O_2 نمی‌رسد، لذا این درگاه خروجی در حالت خاموش می‌ماند (شکل ۲ الف). برای این حالت؟ شدت نور بهنجارشده در درگاه‌های O_1 و O_2 به ترتیب ۷۸٪ و ۴٪ خواهد بود. همچنین، زمان صعود برای درگاه O_1 نیز ۱/۵ ps است (شکل ۲ ب).



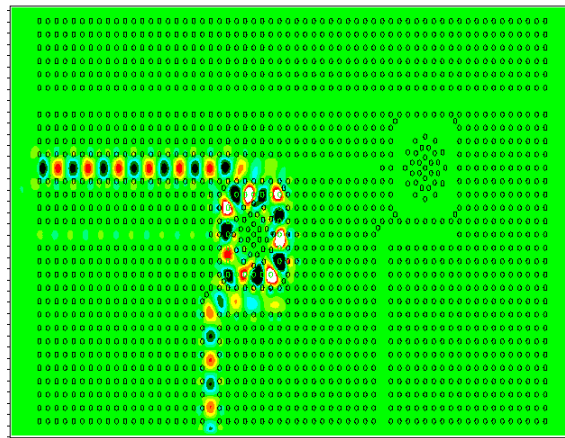
(الف)



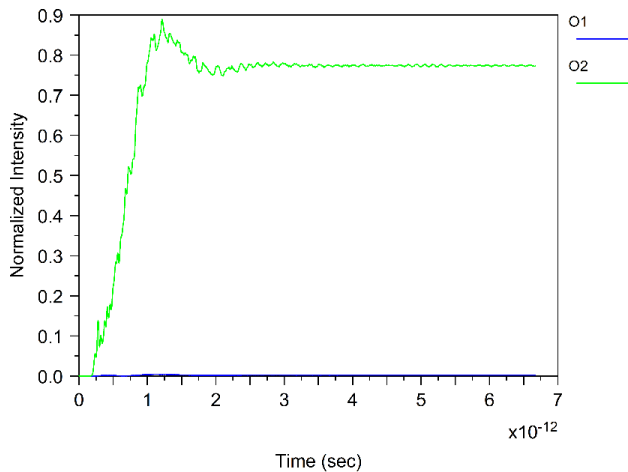
(ب)

شکل ۲ (الف) رفتار نوری و (ب) نمودار پاسخ زمانی مقایسه‌کننده تمام‌نوری وقتی X روشن و Y خاموش است.

در حالتی که درگاه X خاموش و درگاه Y روشن است، حلقه تشدید R_2 پرتوهای نوری ورودی از درگاه Y را از موجبر W_2 به موجبر W_5 انتقال داده و به سمت درگاه خروجی O_2 هدایت می‌کند. در این حالت، درگاه O_2 روشن می‌شود ولی نور کافی به درگاه O_1 نمی‌رسد. لذا این درگاه خروجی در حالت خاموش می‌ماند (شکل ۳ الف). برای این حالت شدت نور بهنجار شده در درگاه‌های O_1 و O_2 به ترتیب 0% و 77% خواهد بود. همچنین زمان صعود برای درگاه O_2 نیز $1/5$ ps است (شکل ۳ ب).



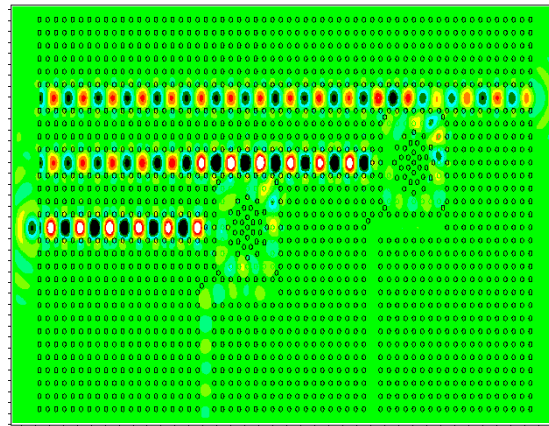
(الف)



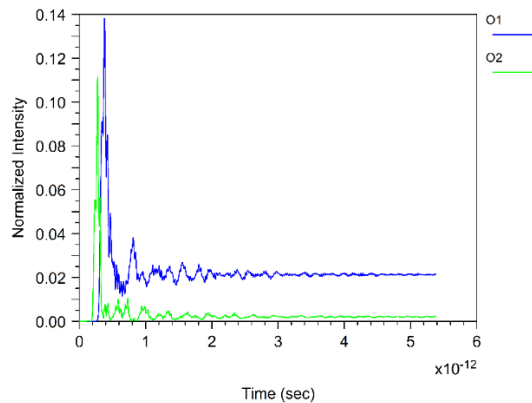
(ب)

شکل ۳ (الف) رفتار نوری و (ب) نمودار پاسخ زمانی مقایسه‌کننده تمام‌نوری وقتی X خاموش و Y روشن است.

در حالتی که هر دو درگاه ورودی روشن هستند، حلقه تشدید R^2 نمی تواند پرتوهای نوری ورودی از درگاه Y را از موجبر W^2 به موجبر W^5 انتقال دهد، چون روشن بودن همزمان درگاه های ورودی باعث افزایش شدت نور در مجاورت حلقه R^2 شده است. لذا در این حالت نور کافی به درگاه O^2 نرسیده و این درگاه خاموش می شود. پرتوهای نوری ورودی از Y به حلقه R^1 رسیده و با افزایش شدت نور در مجاورت این حلقه، باعث می شود که R^1 نتواند پرتوهای نوری را از W^1 به W^3 انتقال دهد. لذا، نور کافی به درگاه O^1 نرسیده و این نیز خاموش می شود (شکل الف). برای این حالت، شدت نور بهنجارشده در درگاه های O^1 و O^2 به ترتیب ۲٪ و ۰٪ خواهد بود (شکل ب).



(الف)



(ب)

شکل ۴ (الف) رفتار نوری و (ب) نمودار پاسخ زمانی مقایسه کننده تمام نوری وقتی هر دو درگاه ورودی روشن هستند.

جدول ۱ جدول درستی مقایسه‌کننده پیشنهادی.

خروجی‌ها		ورودی‌ها	
O ₂	O ₁	Y	X
۰	۰	۰	۰
۰	۱	۰	۱
۱	۰	۱	۰
۰	۰	۱	۱

۴. نتیجه‌گیری

نتایج شبیه‌سازی‌ها نشان داد که در ساختار پیشنهادی در حالتی که درگاه X روشن و درگاه Y خاموش است ($X > Y$)، درگاه خروجی O₁ روشن و درگاه خروجی O₂ خاموش می‌ماند. در حالتی که درگاه X خاموش و درگاه Y روشن است ($X < Y$)، درگاه خروجی O₁ خاموش و درگاه خروجی O₂ روشن می‌شود. همچنین، در حالت‌هایی که درگاه‌های ورودی هر دو با هم روشن یا هر دو با هم خاموش هستند ($X = Y$) هر دو درگاه خروجی خاموش می‌مانند. لذا، می‌توان نتیجه گرفت که با استفاده از حالت‌های مختلف کاری ساختار پیشنهادی می‌توان یک مقایسه‌کننده تمام‌نوری یک‌بیتی را پیاده‌سازی کرد. برای ساختار پیشنهادی، حداکثر زمان صعود نیز برابر ۱/۵ ps است.

منابع

- [1] Liu, D., Gao, Y., Tong, A., Hu, S.: Absolute photonic band gap in 2D honeycomb annular photonic crystals. *Phys. Lett. A*. 379, 214–217 (2015).
- [2] Mirjalili, S.M., Mirjalili, S.Z.: Asymmetric Oval-Shaped-Hole Photonic Crystal Waveguide Design by Artificial Intelligence Optimizers. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 22, 258–264 (2016).
- [3] Talebzadeh, R., Soroosh, M., Kavian, Y.S., Mehdizadeh, F.: Eight-channel all-optical demultiplexer based on photonic crystal resonant cavities. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* 140, 331–337 (2017).
- [4] Talebzadeh, R., Soroosh, M., Kavian, Y.S., 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).
- [5] Alipour-Banaei, H., Mehdizadeh, F., Serajmohammadi, S., Hassangholizadeh-Kashtiban, M.: A 2*4 all optical decoder switch based on photonic crystal ring resonators. *J. Mod. Opt.* 62, 430–434 (2014).
- [6] Noori, M., Soroosh, M., Baghban, H.: Highly efficient self-collimation based waveguide for Mid-IR applications. *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.* 19,

۱-۱۱ (۲۰۱۶).

- [7] Alipour-Banaei, H., Mehdizadeh, F.: Significant role of photonic crystal resonant cavities in WDM and DWDM communication tunable filters. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* 124, 2639-2644 (2013).
- [8] Taalbi, A., Bassou, G., Youcef Mahmoud, M.: New design of channel drop filters based on photonic crystal ring resonators. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* 124, 824-827 (2013).
- [9] Youcef Mahmoud, M., Bassou, G., Metehri, F.: Channel drop filter using photonic crystal ring resonators for CWDM communication systems. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* 125, 4718-4721 (2014).
- [10] Chiu, W.-Y., Huang, T.-W., Wu, Y.-H., Chan, Y.-J., Hou, C.-H., Chien, H.T., Chen, C.-C.: A photonic crystal ring resonator formed by SOI nano-rods. *Opt. Express.* 15, 15500 (2007).
- [11] Ren, C., Wang, P., Cheng, L., Feng, S., Gan, L., Li, Z.: Multichannel W3 Y-branch filter in a two dimensional triangular-lattice photonic crystal slab. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* 125, 7203-7206 (2014).
- [12] Alipour-banaei, H., Mehdizadeh, F.: a Proposal for Anti-Uvb Filter Based on One-Dimensional Photonic Crystal Structure. 7, 367-371 (2012).
- [13] Mehdizadeh, F., Alipour-Banaei, H., Daie-Kuzekanani, Z.: All optical multi reflection structure based on one dimensional photonic crystals for WDM communication systems. *Optoelectron. Adv. Mater. Rapid Commun.* 6, 527-531 (2012).
- [14] Kannaiyan, V., Savarimuthu, R., Dhamodharan, S.K.: Investigation of 2D-photonic crystal resonant cavity based WDM demultiplexer. *Opto-Electronics Rev.* 26, 108-115 (2018).
- [15] Abolhaasani-Kaleibar, A., Andalib, A.: Studying photonics crystal cavities by design and simulation of a 1 to 8 optical demultiplexer. *Frequenz.* 72, 459-464 (2018).
- [16] Moungar, A., Badaoui, H., Abri, M.: 16-Channels wavelength efficient demultiplexing around 1.31/1.55 μm in 2D photonic crystal slab. *Optik (Stuttg).* 193, 162685 (2019).
- [17] Hassangholizadeh-Kashtiban, M., Alipour-Banaei, H., Tavakoli, M.B., Sabbaghi-Nadooshan, R.: All-optical Fredkin gate using photonic-crystal-based nonlinear cavities. *Appl. Opt.* 59, 635-641 (2020).
- [18] Hassangholizadeh-Kashtiban, M., Alipour-Banaei, H., Tavakoli, M.B., Sabbaghi-Nadooshan, R.: Creation of a fast optical Toffoli gate based on photonic crystal nonlinear ring resonators. *J. Comput. Electron.* 19, 1281-1287 (2020).
- [19] Hassangholizadeh-Kashtiban, M., Alipour-Banaei, H., Tavakoli, M.B., Sabbaghi-Nadooshan, R.: An ultra fast optical reversible gate based on electromagnetic scattering in nonlinear photonic crystal resonant cavities. *Opt. Mater. (Amst).* 94, 371-377 (2019).
- [20] Zhang, Q., Zhen, Z., Liu, C., Jariwala, D., Cui, X.: Gate-tunable polariton superlens in 2D/3D heterostructures. *Opt. Express.* 27, 18628 (2019).
- [21] Mehdizadeh, F., Soroosh, M.: Designing of all optical NOR gate based on photonic crystal. *Indian J. Pure Appl. Phys.* 54, 35-39 (2016).
- [22] Khosravi, S., Zavvari, M.: Design and analysis of integrated all-optical 2×4 decoder based on 2D photonic crystals. *Photonic Netw. Commun.* 35, 122-128 (2018).
- [23] Daghooghi, T., Soroosh, M., Ansari-Asl, K.: Ultra-fast all-optical decoder based on nonlinear photonic crystal ring resonators. *Appl. Opt.* 57, 2250 (2018).
- [24] Daghooghi, T., Soroosh, M., Ansari-Asl, K.: Slow light in ultracompact photonic crystal decoder. *Appl. Opt.* 58, 2050 (2019).
- [25] Daghooghi, T., Soroosh, M., Ansari-Asl, K.: A low-power all optical decoder based on photonic crystal nonlinear ring resonators. *Optik (Stuttg).* 174, 400-408 (2018).
- [26] Gholamnejad, S., Zavvari, M.: Design and analysis of all-optical 4--2 binary encoder

- based on photonic crystal. *Opt. Quantum Electron.* 49, 302 (2017).
- [27] Haddadan, F., Soroosh, M.: Low-power all-optical 8-to-3 encoder using photonic crystal-based waveguides. *Photonic Netw. Commun.* 37, 83–89 (2019).
- [28] Moniem, T.A.: All-optical digital 4×2 encoder based on 2D photonic crystal ring resonators. *J. Mod. Opt.* 63, 735–741 (2016).
- [29] Rahmani, A., Mehdizadeh, F.: Application of nonlinear PhCRRs in realizing all optical half-adder. *Opt. Quantum Electron.* 50, 30 (2017).
- [30] Serajmohammadi, S., Alipour-Banaei, H., Mehdizadeh, F.: Proposal for realizing an all-optical half adder based on photonic crystals. *Appl. Opt.* 57, 1617 (2018).
- [31] Jalali-Azizpoor, M.R., Soroosh, M., Seifi-Kavian, Y.: Application of self-collimated beams in realizing all-optical photonic crystal-based half-adder. *Photonic Netw. Commun.* 36, 344–349 (2018).
- [32] Neisy, M., Soroosh, M., Ansari-Asl, K.: All optical half adder based on photonic crystal resonant cavities. *Photonic Netw. Commun.* 35, 245–250 (2018).
- [33] Cheraghi, F., Soroosh, M., Akbarizadeh, G.: An ultra-compact all optical full adder based on nonlinear photonic crystal resonant cavities. *Superlattices Microstruct.* 113, 359–365 (2018).
- [34] Askarian, A., Akbarizadeh, G., Fartash, M.: All-optical half-subtractor based on photonic crystals. *Appl. Opt.* 58, 5931 (2019).
- [35] Askarian, A., Akbarizadeh, G., Fartash, M.: A novel proposal for all optical half-subtractor based on photonic crystals. *Opt. Quantum Electron.* 51, 264 (2019).
- [36] Moradi, R.: All optical half subtractor using photonic crystal based nonlinear ring resonators. *Opt. Quantum Electron.* 51, 1–9 (2019).
- [37] Serajmohammadi, S., Alipour-Banaei, H., Mehdizadeh, F.: A novel proposal for all optical 1-bit comparator using nonlinear PhCRRs. *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.* 34, 19–23 (2019).
- [38] Zhu, L., Mehdizadeh, F., Talebzadeh, R.: Application of photonic-crystal-based nonlinear ring resonators for realizing an all-optical comparator. *Appl. Opt.* 58, 8316–8321 (2019).
- [39] Surendar, A., Asghari, M., Mehdizadeh, F.: A novel proposal for all-optical 1-bit comparator using nonlinear PhCRRs. *Photonic Netw. Commun.* 38, 244–249 (2019).
- [40] Fakouri-Farid, V., Andalib, A.: Design and simulation of an all optical photonic crystal-based comparator. *Optik (Stuttg.)* 172, 241–248 (2018).
- [41] Zhao, T., Asghari, M., Mehdizadeh, F.: An All-Optical Digital 2-to-1 Multiplexer Using Photonic Crystal-Based Nonlinear Ring Resonators. *J. Electron. Mater.* 48, 2482–2486 (2019).
- [42] Zamanian-Dehkordi, S.S., Soroosh, M., Akbarizadeh, G.: An ultra-fast all-optical RS flip-flop based on nonlinear photonic crystal structures. *Opt. Rev.* 25, 523–531 (2018).
- [43] Tanabe, T., Notomi, M., Mitsugi, S., Shinya, A., Kuramochi, E.: Fast bistable all-optical switch and memory on a silicon photonic crystal on-chip. *Opt. Lett.* 30, 2575 (2005).
- [44] Amiri, I.S., Yupapin, P., Palai, G.: Realization of photonic memory using 1D optical metamaterial structure through absorption, reflection, and transmission analysis. *Optik (Stuttg.)* 185, 264–268 (2019).
- [45] Mehdizadeh, F., Soroosh, M., Alipour-Banaei, H., Farshidi, E.: A Novel Proposal for All Optical Analog-to-Digital Converter Based on Photonic Crystal Structures. *IEEE Photonics J.* 9, 1–11 (2017).
- [46] Mehdizadeh, F., Soroosh, M., Alipour-Banaei, H., Farshidi, E.: All optical 2-bit analog to digital converter using photonic crystal based cavities. *Opt. Quantum Electron.* 49, 38 (2017).
- [47] Mehdizadeh, F., Soroosh, M., Alipour-Banaei, H., 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, 1799–1806 (2017).
- [48] Tavousi, A., Mansouri-Birjandi, M.A.: Optical-analog-to-digital conversion based on successive-like approximations in octagonal-shape photonic crystal ring resonators. *Superlattices Microstruct.* 114, 23–31 (2018).
- [49] Mehdizadeh, F., Alipour-Banaei, H., Serajmohammadi, S.: Design and simulation of all optical decoder based on nonlinear PhCRRs. *Opt. - Int. J. Light Electron Opt.* 156, 701–706 (2018).
- [50] Serajmohammadi, S., Alipour-Banaei, H., Mehdizadeh, F.: A novel proposal for all optical 1-bit comparator using nonlinear PhCRRs. *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.* 34, 19–23 (2019).
- [51] Seraj, Z., Soroosh, M., Alaei-Sheini, N.: Ultra-compact ultra-fast 1-bit comparator based on a two-dimensional nonlinear photonic crystal structure. *Appl. Opt.* 59, 811 (2020).