

Research Paper

Design and Simulation of an All-optical Half Adder Using Nonlinear Photonic Crystal Ring Resonators¹

Niloofer Khajeheian², Jasem Jamali^{3*}, Mohammadhossein Fatehi-Dindarlou⁴ and Mehdi Taghizadeh⁵

Received: 2021.06.29

Revised: 2021.09.16

Accepted: 2021.10.20

Abstract

All-optical adders play a key role in the next generation of all-optical digital circuits. In this paper, using nonlinear resonance rings based on 2D photon crystals, a new structure has been designed to implement an all-optical half adder. To implement the required nonlinear ring resonators, some nonlinear defects made of doped glass were introduced between the core and outer layer of the resonant rings. The refractive index of nonlinear materials with high Kerr coefficients is very sensitive to the variation of optical intensity, so one can design optical switches by combining these materials with resonant rings. Two nonlinear resonant rings are used for designing the proposed all-optical half adder. Both rings are designed such that they can drop optical waves when the optical intensity is less than the switching threshold, but when the optical intensity is more than the switching threshold, they cannot drop the optical waves. The final structure has two input and two output ports. The proposed structure was simulated using Rsoft photonics CAD. According to the simulation results when both input ports are OFF, both output ports will remain OFF. If only one of the input ports is ON, the S port will be ON, and C will be OFF. Finally, when both input ports are ON, the C port will be ON, and S will be OFF. Therefore, these results prove that the proposed structure can work as an all-optical half adder. The maximum rise time for the proposed structure is about 1.5 ps.

Keywords: *Photonic Crystal, Optical Half Adder, Nonlinear Ring Resonator, Kerr Effect.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2021.36720.1218

² Ph. D. Student, Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran. Email: niloo.khajeheian91@gmail.com

³ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran. (Corresponding Author) Email: jasemjamali059@gmail.com

⁴ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran. Email: mh_fatehi@kau.ac.ir

⁵ Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Kazerun Branch, Islamic Azad University, Kazerun, Iran. Email: m.taghizadeh@kau.ac.ir



طراحی و شبیه‌سازی یک نیم‌جمع‌کننده تمام‌نوری با استفاده

از حلقه‌های تشدید غیرخطی مبتنی بر بلور فوتونی^۱

نیلوفر خواجه‌ئیان^۲، جاسم جمالی^{۳*}، محمدحسین فاتحی دیندارلو^۴ و مهدی

تقی‌زاده^۵

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک شیمی، دانشگاه الزهرا

سال یازدهم، پیاپی ۲۶، پاییز ۱۴۰۰

صص ۱۵-۲۴

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۸

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۰۶/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۸

چکیده

جمع‌کننده‌های تمام‌نوری نقشی کلیدی در تحقق نسل جدید مدارهای دیجیتال تمام‌نوری ایفا می‌کنند. در این مقاله، با استفاده از حلقه‌های تشدید غیرخطی مبتنی بر بلورهای فوتونی دوبعدی ساختار جدیدی برای پیاده‌سازی نیم‌جمع‌کننده تمام‌نوری طراحی و ارائه شده است. برای پیاده‌سازی حلقه‌های غیرخطی از یک لایه میله ناراستی از جنس شیشه آلاییده شده بین هسته و لایه بیرونی حلقه تشدید استفاده شده است. در موادی که ضریب گر بزرگی دارند، ضریب شکست به شدت به تغییرات شدت نور وابسته است، لذا با ترکیب این مواد با تشدیدکننده‌های تمام‌نوری می‌توان سوئیچ نوری را پیاده‌سازی کرد. برای طراحی ساختار پیشنهادی، از دو حلقه تشدید غیرخطی استفاده شده است. هر دو حلقه چنان طراحی شده‌اند که پرتوهای نوری با شدت نور کمتر از آستانه سوئیچ‌زنی را بین دو موجبر منتقل می‌کنند. ولی اگر شدت نور بیشتر از حد آستانه سوئیچ‌زنی باشد، حلقه‌ها نمی‌توانند پرتوهای نوری را بین دو موجبر منتقل کنند. ساختار طراحی شده با استفاده از نرم‌افزار آرسافت شبیه‌سازی شده است. ساختار پیشنهادی دو پایه ورودی و دو پایه خروجی دارد. مطابق با نتایج شبیه‌سازی‌ها، در حالتی که هر دو پایه ورودی خاموش است، هر دو پایه خروجی نیز خاموش خواهد بود. در صورتی که فقط یکی از پایه‌های ورودی روشن باشد، پایه خروجی S روشن می‌شود و در صورتی که هر دو پایه ورودی روشن باشد، پایه خروجی C روشن می‌شود. این نتایج کاملاً با عملکرد یک نیم‌جمع‌کننده مطابقت دارند. بیشترین مقدار برای زمان صعود ساختار طراحی شده برابر $1/5 ps$ است.

واژگان کلیدی: بلور فوتونی، نیم‌جمع‌کننده نوری، اثر کر، حلقه تشدید غیرخطی.

¹ DOI: 10.22051/ijap.2021.36720.1218

^۲ دانشجوی دکترا، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون، کازرون، ایران. Email: niloo.khajeheian91@gmail.com

^۳ استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون، کازرون، ایران. (نویسنده مسئول). Email: jasemjamali059@gmail.com

^۴ استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون، کازرون، ایران. Email: mh_fatehi@kau.ac.ir

^۵ استادیار، گروه مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کازرون، کازرون، ایران. Email: m.taghizadeh@kau.ac.ir

۱. مقدمه

افزایش سرعت پردازش و انتقال داده در بسترهای مخابراتی یکی از چالش‌ها و اهداف محققان این رشته است. در دهه‌های اخیر، اثبات شده است که استفاده از سیستم‌های نوری یک روش مناسب برای نیل به این هدف است. برای پیاده‌سازی یک شبکه کاملاً نوری انواع افزاره‌های تمام‌نوری از قبیل فیلتر [۱-۵]، دی‌مالتی‌پلسکر [۶-۸]، گیت [۹-۱۳]، دیکدر [۱۴-۱۷]، انکدر [۱۸-۲۰]، جمع‌کننده [۲۱-۲۵]، تفریق‌کننده [۲۶-۲۸]، مقایسه‌کننده [۲۹-۳۲]، مالتی‌پلسکر [۳۳]، حافظه [۳۴-۳۶] و مبدل آنالوگ به دیجیتال [۳۷-۴۰] تمام‌نوری مورد نیاز است.

جمع‌کننده تمام‌نوری یکی از افزاره‌های کلیدی در طراحی انواع مدارهای مجتمع خطی جهت پردازش سیگنال‌های تمام‌نوری است. نیم‌جمع‌کننده نوری یک مدار منطقی تمام‌نوری است که دو ورودی و دو خروجی دارد. این مدار می‌تواند دو عدد یک‌بیتی را باهم جمع کرده و در خروجی یک عدد دوبیتی را تولید کند. برای طراحی مدار تمام‌جمع‌کننده، می‌توان از دو گیت AND و XOR استفاده کرد.

یکی از رایج‌ترین ساختارها برای طراحی و پیاده‌سازی انواع افزاره‌ها و مدارهای مجتمع نوری، بلورهای فوتونی هستند [۴۱ و ۲۹]. وجود باند ممنوعه فوتونی در این ساختارها به آنها قابلیت و توانایی کنترل انتشار موج‌های نوری داخل موجبرهایی در ابعاد چند ده نانومتر را فراهم کرده است [۴۲ و ۴۳]. یکی دیگر از ویژگی‌های بلورهای فوتونی که باعث جذابیت آنها برای طراحان فوتونیک شده است، سوئیچ‌زنی حد آستانه است که با ترکیب اثر کر با تشدیدکننده‌های نوری مانند حلقه یا کاواک‌های تشدید قابل پیاده‌سازی است [۴۴]. ساختارهای مختلفی با استفاده از این خاصیت بلورهای فوتونی طراحی شده است.

در سال ۲۰۰۸ میلادی، اولین نیم‌جمع‌کننده نوری براساس بلورهای فوتونی ارائه شد. در این طرح، گیانگ لیو و همکارانش با استفاده از مواد غیرخطی یک گیت AND و سپس یک گیت XOR را پیاده‌سازی نمودند [۴۵]. این دو گیت در کنار هم، با ورودی‌های مشترکی که دارند، عملیات نیم‌جمع‌کننده را اجرا می‌کنند. در سال ۲۰۱۳ م. قدردان و منصور بی‌رجندی با استفاده از رزوناتورهای حلقوی غیرخطی در بستر بلورهای فوتونی دوبعدی دو ساختار متفاوت برای گیت‌های AND و XOR تمام‌نوری طراحی کردند [۴۶]. سپس با ترکیب این دو ساختار، یک مدار نیم‌جمع‌کننده تمام‌نوری را طراحی و ارائه کردند. در سال ۲۰۱۵ م.، گیانگ و همکارانش با استفاده از خاصیت خودجمع‌کنندگی بلورهای فوتونی و ایجاد آینه‌ها و تقسیم‌کننده‌های توان



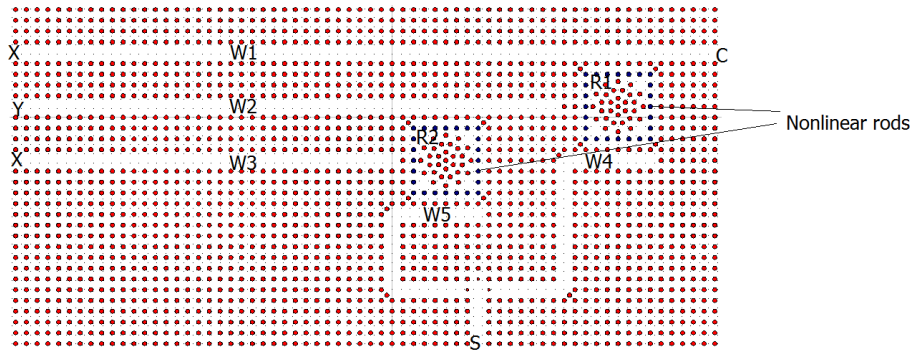
درون بلور فوتونی دوبعدی ساختار دیگری برای پیاده‌سازی نیم‌جمع‌کننده تمام‌نوری ارائه کردند [۴۷]. در سال ۲۰۱۳ م. زاویر و همکارانش با ترکیب یک انعکاس‌دهنده کامل با دو تقسیم‌کننده نوری و استفاده از خاصیت خودجمع‌کنندگی ساختار نیم‌جمع‌کننده دیگری را طراحی کردند که مکانیزم کار آن براساس تداخل سازنده و مخرب پرتوهای همفاز و ناهمفاز است [۴۸]. در سال ۲۰۱۶ م. علی پوربنایی و سیف درگاهی ساختاری را برای پیاده‌سازی یک تمام‌جمع‌کننده تمام‌نوری یک‌بیتی ارائه کردند. ساختار پیشنهادی آنها از سری شدن دو نیم‌جمع‌کننده تمام‌نوری تشکیل شده است [۴۹]. برای پیاده‌سازی نیم‌جمع‌کننده از یک حلقه رزونانسی غیرخطی استفاده شده است. در سال ۲۰۱۷ م. نیسی و همکارانش ساختاری را برای پیاده‌سازی نیم‌جمع‌کننده نوری طراحی و ارائه کردند [۲۴]. برای طراحی موردنظر آنها از دو کاواک رزونانسی غیرخطی با آستانه هدایت متفاوت استفاده کردند. در سال ۲۰۱۷ م. چراغی و همکارانش با استفاده از ۴ کاواک رزونانسی غیرخطی ساختاری را برای پیاده‌سازی تمام‌جمع‌کننده نوری مبتنی بر کریستال فوتونیکی ارائه کردند [۲۵]. برای این ساختار حداکثر تاخیر زمانی برابر ۸ ps به دست آمده است. در این مقاله، ساختار جدیدی برای پیاده‌سازی یک نیم‌جمع‌کننده تمام‌نوری طراحی و شبیه‌سازی شده است. برای طراحی ساختار پیشنهادی از دو حلقه تشدید غیرخطی استفاده شده است. برای طراحی و شبیه‌سازی ساختار پیشنهادی از نرم‌افزار آرسافت استفاده شده است.

۲. طراحی

برای طراحی ساختار موردنظر، جهت پیاده‌سازی نیم‌جمع‌کننده تمام‌نوری از یک آرایه 33×66 تایی از میله‌های سیلیکونی با ساختار شبکه‌مربعی استفاده شده است. ضریب شکست میله‌های سیلیکونی $3/46$ ، شعاع میله‌ها 119 nm ، و ثابت شبکه این ساختار 595 nm است. برای طراحی ساختار موردنظر دو حلقه تشدید غیرخطی مورد نیاز است. بدین منظور، از حلقه تشدید ارائه‌شده توسط مهدیزاده و همکارانش استفاده شده است [۳۹]، که در آن، بین هسته و لایه بیرونی، یک ردیف میله از جنس شیشه آلائیده شده چیده شده است. شیشه آلائیده شده یک ماده دی‌الکتریک با ضریب کر زیاد است. ضریب شکست و ضریب کر شیشه آلائیده شده، به ترتیب، $1/4$ و $10^{-14} \text{ m}^2/\text{W}$ است.

برای طراحی ساختار پیشنهادی، ابتدا سه موجبر موازی با فاصله ۵ ردیف از هم ایجاد شد. حلقه‌های تشدید R1 و R2، به ترتیب، زیر موجبرهای W1 و W2 قرار گرفتند. انتهای موجبرهای

W2 و W3، به ترتیب، به حلقه‌های تشدید R1 و R2 وصل شدند. دو موجبر W4 و W5، به ترتیب، زیر حلقه‌های R1 و R2 ایجاد شدند. موجبرهای W4 و W5 در ابتدای موجبر W6 به هم متصل شدند و انتهای موجبرهای W1 و W6، به ترتیب، به عنوان پورت‌های خروجی S و C در نظر گرفته شدند. پایه ورودی X به ابتدای موجبرهای W1 و W3 و پایه ورودی Y نیز به ابتدای موجبر W2 وصل شده است. ساختار نهایی در شکل ۱ نشان داده شده است.



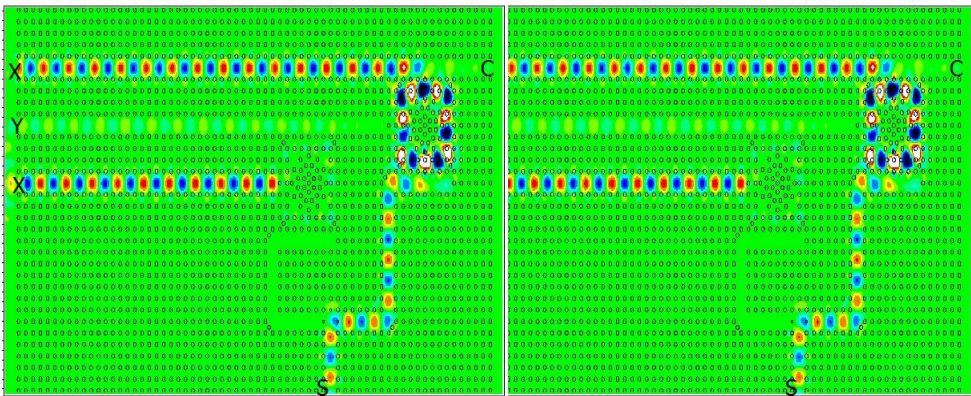
شکل ۱ ساختار نیم‌جمع‌کننده پیشنهادی.

۳. نتایج شبیه‌سازی

برای شبیه‌سازی ساختار طراحی شده از نرم‌افزار آرسافت استفاده شده است. ساختار پیشنهادی دو پایه ورودی دارد، بنابراین، طبق اصل شمارش، چهار حالت کاری متفاوت خواهد داشت. در حالتی که هر دو پایه ورودی خاموش باشند، هیچ نوری وارد ساختار نمی‌شود، لذا هر دو پورت خروجی خاموش خواهد بود. در حالتی که X روشن و Y خاموش باشد، حلقه R1 می‌تواند پرتوهای نوری منتشرشده درون موجبر W1 را به موجبر W4 منتقل کرده و به سمت پورت خروجی S هدایت کند. چون تمام پرتوهای نوری از موجبر W1 به موجبر W4 منتقل می‌شود، نوری به پورت خروجی C نمی‌رسد. بنابراین در این حالت S روشن و C خاموش است (شکل ۲-الف). در حالتی که X خاموش و Y روشن باشد، حلقه R2 می‌تواند پرتوهای نوری منتشرشده درون موجبر W2 را به موجبر W5 منتقل کرده و به سمت پورت خروجی S هدایت کند. با توجه به خاموش بودن پورت X، نوری درون موجبر W1 منتشر نمی‌شود و به پورت خروجی C نمی‌رسد. بنابراین، در این حالت نیز پورت S روشن و C خاموش خواهد بود (شکل ۲-ب). اگر هر دو پورت ورودی روشن باشند، پرتوهای نوری ورودی از پورت X از طریق موجبر W3 به

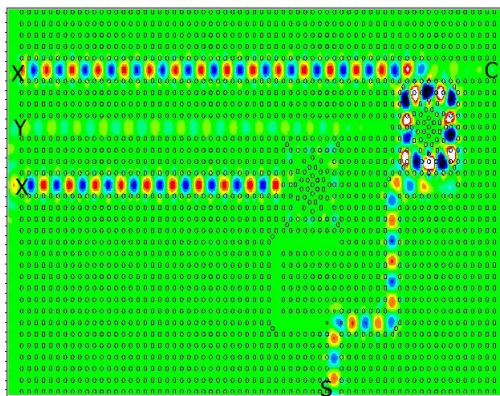


حلقه R2 رسیده و باعث می‌شوند که به علت جابجایی مود تشدید، این حلقه نتواند پرتوهای نوری را از W2 به W5 منتقل کند. از این رو، پرتوهای نوری ورودی از Y از طریق موجبر W2 به حلقه R1 رسیده و باعث می‌شود که این حلقه نتواند پرتوهای نوری را از W1 به W4 منتقل کند. در نتیجه، نوری به پورت S نمی‌رسد و پرتوهای ورودی از X از طریق W1 به پورت C هدایت می‌شوند (شکل ۲-ج).



(ب)

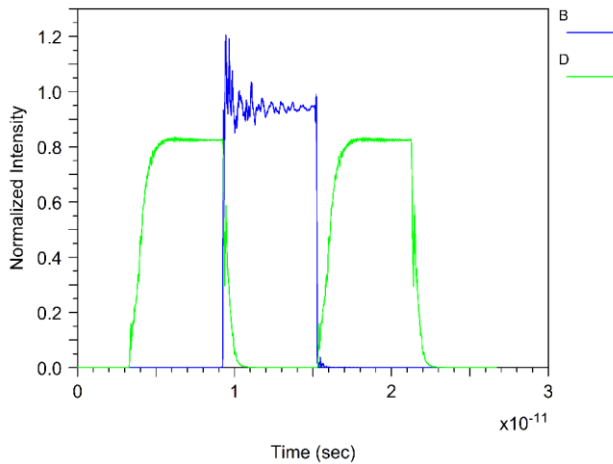
(الف)



(ج)

شکل ۲ رفتار نوری نیم‌جمع‌کننده پیشنهادی.

نمودارهای پاسخ زمانی ساختار پیشنهادی در شکل ۳ ارائه شده‌اند. در حالتی که X روشن و Y خاموش است، توان نرمالیزه خروجی در پورت‌های S و C ، به ترتیب، $۰/۸۵$ و $۰/۳$ است. زمان صعود و نزول پورت S نیز به ترتیب برابر $۱/۵$ ps و ۱ ps است. در حالتی که X خاموش و Y روشن است، توان نرمالیزه خروجی در پورت‌های S و C ، به ترتیب ۸۲% و صفر است. زمان صعود و نزول پورت S نیز به ترتیب برابر $۱/۵$ ps و ۱ ps است. در حالتی که هر دو پورت ورودی روشن است، توان نرمالیزه خروجی در پورت‌های S و C به ترتیب $۰/۳$ و $۰/۸۶$ است. زمان صعود و نزول پورت C ، هر دو، برابر $۰/۵$ ps است. نتایج درستی ساختار پیشنهادی در جدول ۱ و داده‌های حاصل از مقایسه مشخصات ساختار پیشنهادی با ساختارهای مشابه در جدول ۲ ارائه شده است. مقایسه نشان می‌دهد که ساختار پیشنهادی، از لحاظ تأخیر صعود و نزول، عملکرد بهتری نسبت به بسیاری از کارهای مشابه پیشین دارد.



شکل ۳ نمودار پاسخ زمانی نیم جمع‌کننده پیشنهادی.

جدول ۱ نتایج درستی ساختار پیشنهادی

خروجی‌ها		ورودی‌ها	
C	S	Y	X
0	0	0	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	1	1



جدول ۲ مقایسه مشخصات ساختار پیشنهادی با ساختارهای پیشین

کار	زمان صعود (ps)	زمان نزول (ps)
نیسی و همکاران [۲۴]	6	1.5
چراغی و همکاران [۲۵]	8	2
سراج‌محمدی و همکاران [۲۲]	4	1
رحمانی و مهدیزاده [۲۱]	1.5	1

۴. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، ساختار جدیدی برای پیاده‌سازی نیم‌جمع‌کننده تمام‌نوری با استفاده از حلقه‌های تشدید غیرخطی مبتنی بر بلور فوتونی طراحی و ارائه شده است. برای طراحی ساختار پیشنهادی از دو حلقه تشدید غیرخطی استفاده شده است. حلقه‌ها چنان طراحی شده‌اند که پرتوهای با شدت نور کمتر از آستانه سوئیچ‌زنی را بین دو موجبر منتقل می‌کنند، ولی پرتوهای با شدت نور بیشتر از آستانه سوئیچ‌زنی را منتقل نمی‌کنند. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که ساختار طراحی شده می‌تواند به‌عنوان یک نیم‌جمع‌کننده تمام‌نوری عمل کند. بیشترین مقدار برای زمان صعود ساختار طراحی شده برابر ۱/۵ ps است.

منابع

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Alipour-banaei H., Mehdizadeh F., A Proposal for Anti-Uvb Filter Based on One-Dimensional Photonic Crystal Structure, *Digest Journal of Nanomaterials and Biostructures*, **7**, 367–371, 2012.
- [5] 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.
- [6] Kannaiyan V., Savarimuthu R., Dhamodharan S.K., Investigation of 2D-photonic crystal resonant cavity based WDM demultiplexer, *Opto-Electronics Rev.* **26**, 108–115, 2018.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Zhang Q., Zhen Z., Liu C., Jariwala D., Cui X., Gate-tunable polariton superlens in 2D/3D heterostructures. *Opt. Express*, **27**, 18628, 2019.
- [13] Mehdizadeh F., Soroosh M., Designing of all optical NOR gate based on photonic crystal, *Indian J. Pure Appl. Phys.*, **54**, 35–39, 2016.
- [14] 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.
- [15] Daghooghi T., Soroosh M., Ansari-Asl K., Ultra-fast all-optical decoder based on nonlinear photonic crystal ring resonators, *Appl. Opt.* **57**, 2250, 2018.
- [16] Daghooghi T., Soroosh M., Ansari-Asl K., Slow light in ultracompact photonic crystal decoder. *Appl. Opt.* **58**, 2050, 2019.
- [17] 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.
- [18] Gholamnejad S., Zavvari M., Design and analysis of all-optical 4--2 binary encoder based on photonic crystal, *Opt. Quantum Electron*, **49**, 302, 2017.
- [19] Haddadan F., Soroosh M., Low-power all-optical 8-to-3 encoder using photonic crystal-based waveguides, *Photonic Netw. Commun*, **37**, 83–89, 2019.
- [20] Moniem T.A., All-optical digital 4×2 encoder based on 2D photonic crystal ring resonators, *J. Mod. Opt.* **63**, 735–741, 2016.
- [21] Rahmani A., Mehdizadeh F., Application of nonlinear PhCRRs in realizing all optical half-adder, *Opt. Quantum Electron*, **50**, 30, 2017.
- [22] Serajmohammadi S., Alipour-Banaei H., Mehdizadeh F., Proposal for realizing an all-optical half adder based on photonic crystals, *Appl. Opt.* **57**, 1617, 2018.
- [23] 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.
- [24] Neisy M., Soroosh M., Ansari-Asl K., All optical half adder based on photonic crystal resonant cavities, *Photonic Netw. Commun*, **35**, 245–250, 2018.
- [25] 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.
- [26] Askarian A., Akbarizadeh G., Fartash M., All-optical half-subtractor based on photonic crystals, *Appl. Opt.* **58**, 5931, 2019.
- [27] Askarian A., Akbarizadeh G., Fartash M., A novel proposal for all optical half-subtractor based on photonic crystals, *Opt. Quantum Electron*, **51**, 264, 2019.
- [28] Moradi R., All optical half subtractor using photonic crystal based



- nonlinear ring resonators, *Opt. Quantum Electron*, **51**, 1–9, 2019.
- [29] 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.
- [30] 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.
- [31] 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.
- [32] Fakouri-Farid V., Andalib A., Design and simulation of an all optical photonic crystal-based comparator, *Optik (Stuttg)*. **172**, 241–248, 2018.
- [33] 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.
- [34] 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.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] 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.
- [38] 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.
- [39] 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.
- [40] 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.
- [41] Massoudi R., Najjar M., Mehdizadeh F., Janyani V., Investigation of resonant mode sensitivity in PhC based ring resonators, *Opt. Quantum Electron*, **51**, 87, 2019.
- [42] 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.
- [43] 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.
- [44] Tavousi A., Mansouri-Birjandi M.A., Ghadrddan M., Ranjbar-Torkamani M., Application of photonic crystal ring resonator nonlinear response for full-optical tunable add-drop filtering, *Photonic Netw. Commun*, **34**, 131–139, 2017.
- [45] Liu Q., Ouyang Z., Wu C.J., Liu C.P., Wang J.C., All-optical half adder based on cross structures in two-dimensional photonic crystals, *Opt. Express*, **16**, 18992–19000, 2008.
- [46] Ghadrddan M., Mansouri-Birjandi M.A., Concurrent implementation of all-optical

- half-adder and AND & XOR logic gates based on nonlinear photonic crystal, *Opt. Quantum Electron*, **45**, 1027-1036, 2013.
- [47] Jiang Y.-C., Liu S.-B., Zhang H.-F., Kong X.-K., Realization of all optical half-adder based on self-collimated beams by two-dimensional photonic crystals, *Opt. Commun*, **348**, 90-94, 2015.
- [48] Xavier S.C., Arunachalam K., Caroline E., Johnson W., Design of two-dimensional photonic crystal-based all-optical binary adder, *Opt. Eng.*, **52**, 25201, 2013.
- [49] Alipour-Banaei H., Seif-Dargahi H., Photonic crystal based 1-bit full-adder optical circuit by using ring resonators in a nonlinear structure. *Photonics Nanostructures - Fundam. Appl.*, **24**, 29-34, 2017.

