

مدار نیم‌جمع کننده تمام نوری با استفاده از برهم‌کنش‌های سالیتون‌های نوری فضایی

امین قادی*

دانشگاه مازندران مازندران، دانشکده فیزیک

پذیرش: ۹۹/۶/۳۰

دریافت: ۹۸/۷/۱۳

چکیده

در این مقاله به طراحی و شبیه‌سازی تمام نوری یکی از مهم‌ترین مدارهای پایه‌ای محاسبات الکترونیکی پرداخته شده است. با شناخت و بهره‌گیری از برهم‌کنش سه سالیتون نوری فضایی مدار نیم‌جمع کننده شبیه‌سازی شده است که پایه مدارهای پردازشگر پیچیده بوده و می‌تواند به عنوان کاندیدای بسیار خوبی در آینده دانش فوتونیک و محاسبات نوری مورد استفاده قرار گیرد. ورودی‌های مدار منطقی طراحی شده سه سالیتون فضایی هستند که به یک محیط غیرخطی کر وارد شده و با تنظیم فاز اولیه آن‌ها برهم‌کنش جاذبه و دافعه بین سالیتون‌ها رخ داده و عملکرد مورد نظر مدار نیم‌جمع کننده به دست می‌آید. شبیه‌سازی انتشار سالیتون‌ها با استفاده از روش تقسیم مرحله فوریه انجام شده است. این پژوهش نشان می‌دهد که برهم‌کنش سالیتون‌های فضایی قابلیت‌های بسیار مفیدی دارد که می‌تواند راه‌گشای محاسبات نوری و پردازش نوری داده‌ها باشد و بر مشکل افزایش سرعت مدارهای الکترونیکی فائق آید. نمونه مدار منطقی نیم‌جمع کننده معرفی شده یکی از آنهاست و روش ارائه شده می‌تواند برای طراحی نوری دیگر مدارهای منطقی استفاده شود.

واژگان کلیدی: سالیتون‌های فضایی، سالیتون‌های نوری، مدار نیم‌جمع کننده، گیت‌های منطقی، اثر کر

مقدمه

سالیتون‌ها همه جا هستند، در زمینه‌های مختلف [۱] مانند دینامیک شاره‌ها، فیزیک پلاسما، آکوستیک، هیدرودینامیک مغناطیسی، الکترودینامیک کوانتومی، چگالش بوز-انشتین فقط مثال‌هایی از این موارد بسیار است. در اپتیک، سالیتون‌های فضایی به عنوان پاسخ غیرخطی معادله انتشار شناخته می‌شود، زمانی که نور در ماده دی‌الکتریک انتشار می‌یابد و ضریب شکست آن با افزایش شدت افزایش می‌یابد. سالیتون‌های اپتیکی پرتوهای خود به دام افتاده‌ای هستند که می‌توانند برای خود یک مسیر موجبرگونه درست کنند و در آن بدون پهن شدن انتشار پیدا کنند. کارهای تئوری و آزمایشگاهی ارزشمند زیادی در زمینه سالیتون‌های اپتیکی و پتانسیل کاربردی آنها در فوتونیک، موجبرهای اپتیکی، ارتباطات نوری و اتصال دهنده‌های نوری انجام شده است.

* نویسنده مسئول: a.ghadi@umz.ac.ir

با افزایش تقاضا برای به‌دست آوردن سرعت بیشتر در سیستم‌های ارتباطی و با توجه به محدودیت ابزارهای الکترونیکی، تقاضا برای عملگرهای منطقی تمام نوری از قبیل کلیدها، تصمیم‌سازی، بازتولید، و محاسبات پایه‌ای و پیچیده به شدت در حال افزایش است. گیت‌های منطقی تمام نوری عناصر اصلی برای پردازشگرهای سیگنال‌های نوری و شبکه‌ها هستند. برای کاهش تاخیر الکترونیکی شبکه‌های نوری با عملکرد بالا می‌توانند در پردازش تمام نوری برای توابع شبکه‌ای فوق سریع در آینده بکار گرفته شوند.

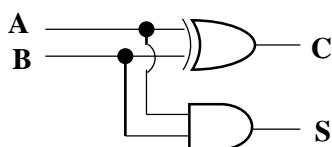
یک جمع‌کننده یک مدار دیجیتالی است که عملیات جمع اعداد را انجام می‌دهد. در بسیاری از رایانه‌ها و دیگر انواع پردازشگرها جمع‌کننده‌ها در واحدهای منطقی ریاضی استفاده می‌شوند. همچنین آنها در دیگر بخش‌های پردازشگرها برای محاسبه آدرسها، ضرایب جدول، عملگرهای مقسوم و مقسوم علیه و دیگر عملگرهای مشابه استفاده می‌شود. مدار نیم جمع‌کننده یک مدار شناخته شده در الکترونیک دیجیتال است و پایه مدارهای پردازشگر پیچیده‌ی بسیاری از قبیل ثبت‌کننده شیفت، محاسبه‌گر باینری، نیم جمع‌کننده تمام نوری، مبدل موازی و سری اطلاعات بطور تمام نوری است. نیم جمع‌کننده ساده‌ترین واحد ریاضی باینری است. دارای دو ورودی و دو خروجی است. ورودی‌ها بیت‌های باینری یا همان صفر و یک‌ها هستند. پژوهش‌های گسترده زیادی در زمینه مدار نیم جمع‌کننده تاکنون ارائه شده است که از جمله آنها می‌توان به مدار نیم جمع‌کننده فوق سریع بر پایه پلاسمون پلاریتون‌های سطحی [۲]، مدار نیم جمع‌کننده و تفریق‌کننده بر پایه سالیتونهای روشن و تاریک [۳]، بر پایه جفت‌شونده‌های جهتی غیرخطی [۴]، گیت‌های منطقی AND و OR با استفاده از سالیتونهای روشن و تاریک [۵]، نیم جمع‌کننده و تفریق‌کننده بر پایه زیرساخت فوتونیک [۶]، مدار نیم جمع‌کننده بر پایه سه جفت‌شونده غیرخطی [۷]، نیم جمع‌کننده بر پایه بلورهای فوتونیک [۸-۱۷] و بر پایه میکرومشدهای حلقوی [۱۸] از جمله آنهاست. در پژوهش قبلی [۱۹] با استفاده از برهم‌کنش سالیتون‌های نوری فضایی به طراحی مدارهای منطقی AND، OR، XNOR و NOT پرداخته شده است. در این پژوهش به طراحی و شبیه‌سازی نوع دیگری از مدار محاسبات یک هم‌مدار نیم جمع‌کننده تمام نوری می‌باشد، پرداخته شده است. این مدار یکی از ارکان محاسبات فوق سریع تمام نوری است که می‌تواند کاندیدای خوبی در آینده مدارهای محاسباتی باشد. با بهره‌گیری از برهم‌کنش جاذبه و دافعه سه سالیتون نوری فضایی و با تنظیم فاز اولیه آنها عملگرهای منطقی مورد نظر به‌دست می‌آید. شبیه‌سازی انتشار سالیتون‌های نوری فضایی با روش تقسیم مرحله فوریه و با نرم‌افزار متلب انجام می‌شود.

روش کار

در این مقاله به طراحی یک مدار منطقی نیم جمع‌کننده^۱ (یا جمع‌کننده ناقص) می‌پردازیم. این گیت منطقی بر اساس برهم‌کنش سالیتون‌های نوری فضایی طراحی شده است و بعنوان کاندیدای خوبی در آینده پردازشگرهای فوق سریع تمام

^۱Half-Adder

نوری در فوتونیک می تواند بکار رود. مدار جمع کننده دو ورودی به نامهای (A,B) و دو خروجی به نامهای (C,S) دارد. S^2 رقم جمع و C^3 رقم نقلی است. شکل (۱) مدار نیم جمع کننده را بطور شماتیک نشان می دهد. جدول (۱) صحت مدار نیم جمع کننده با استفاده از نمادهای الکترونیکی را نشان می دهد. در این جدول ورودی های A و B و خروجی های C و S اعداد "0" و "1" هستند. ستون آخر عمل جمع مبنای دو را نشان می دهد که با استفاده از خروجی های C و S نوشته می شود. همانطور که از شکل (۱) و جدول (۱) مشاهده می شود، C همان گیت منطقی AND و S همان گیت منطقی XOR است. پس برای ساختن یک مدار منطقی نیم جمع کننده نیاز به دو عملگر گیت منطقی AND و XOR بطور همزمان در خروجی داریم. خروجی منطقی C زمانی یک است که هر دو ورودی یک باشد، در غیر اینصورت صفر است. خروجی منطقی S زمانی که فقط یکی از ورودی های یک باشد حاصل آن یک و در بقیه حالاتها صفر است.



شکل (۱) مدار نیم جمع کننده

جدول ۱. صحت مدار نیم جمع کننده

A	B	C	S	
0	0	0	0	$0+0=0$
0	1	0	1	$0+1=1$
1	0	0	1	$1+0=1$
1	1	1	0	$1+1=10$

در این مقاله با استفاده از برهمکنش سه سالیتون نوری فضایی به طراحی مدار تمام نوری جمع کننده می پردازیم. شبیه سازی انتشار سالیتون های نوری فضایی با حل عددی معادله شرودینگر غیر خطی به روش تقسیم-مرحله فوریه^۴ و با استفاده از نرم افزار متلب صورت می گیرد. فضای انتشار سالیتون ها را بصورت توده حجمی در نظر می گیریم که ضریب شکست خطی آن n_0 و ضریب شکست غیر خطی کره^۵ آن n_2 است. اگر تابع موج را با $\psi(x, Z)$ در نظر بگیریم که در اینجا x و Z به ترتیب محورهای عرضی و طولی است، آنگاه معادله شرودینگر غیر خطی بصورت زیر خواهد بود [۲]

²Sum

³Carry

⁴Split-step Fourier method

⁵Kerr

$$i \frac{d\varphi}{dz} + \frac{1}{2} \frac{d^2\varphi}{dx^2} + \frac{1}{2} k_0^2 n_0^2 \varphi + |\varphi|^2 \varphi = 0, (1)$$

که در اینجا محورهای طولی و عرضی نرمالیزه با روابط $X = x/x_0$ و $Z = z/(k_0 n_0 x_0^2)$ بیان می‌شود. با در نظر گرفتن مقادیر $x_0 = 1 \mu m$ ، $n_0 = 1.54$ و k_0 بردار موج خلا در طول موج $\lambda_0 = 1.55 \mu m$ ، اندازه موج نرمالیزه بصورت $\psi_A = (k_0^2 n_0^2 x_0^2)^{1/2} \psi$ خواهد بود. برای طراحی مدار منطقی نیم جمع کننده به دو سالیتون فضایی به نام‌های ψ_A و ψ_B بترتیب در موقعیت عرضی $x = +8 \mu m$ و $x = -8 \mu m$ با فازهای اولیه بترتیب ϕ_A و ϕ_B و یک سالیتون کاوش به نام ψ_P در $x = 0$ با فاز صفر (بدون فاز اولیه) در $Z = 0$ بصورت زیر نیاز داریم.

$$\psi_A(x) = \text{sech}(x - 8 \mu m) e^{-i\phi_A}, (2)$$

$$\psi_B(x) = \text{sech}(x + 8 \mu m) e^{-i\phi_B}, (3)$$

$$\psi_P(x) = \text{sech}(x), (4)$$

برای ایجاد تاخیر فاز در سالیتونهای ورودی می‌توان از تاخیرگر فاز [۹] استفاده نمود. برای تعیین معیاری برای عملکرد کلیدزنی، نسبت شدت انتگرال گیری شده در خروجی به شدت انتگرال گیری شده به سالیتون ورودی را با r تعریف می‌کنیم [۱۹].

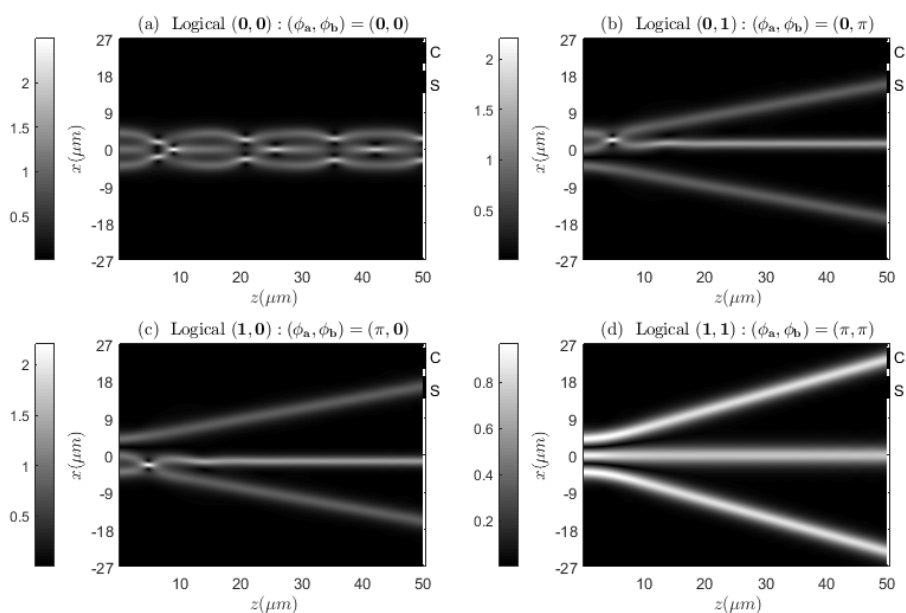
$$r = \frac{\int_{x_1}^{x_2} |\psi(x, z=50 \mu m)|^2 dx}{\int_{-27 \mu m}^{+27 \mu m} |\text{sech}(x)|^2 dx}, (5)$$

که در اینجا x_1 و x_2 مربوط به مختصات خروجی از x_1 تا x_2 در $Z = 50 \mu m$ است. مخرج کسر شدت انتگرال گیری شده یک سالیتون ورودی است. با قرار دادن یک حسگر در $Z = 50 \mu m$ که از x_1 تا x_2 باشد، می‌توان میزان توان رسیده به خروجی کلید را نشان داد. با این تعریف، زمانی که $r > 0.75$ باشد، خروجی "روشن" قلمداد شده و ارزش منطقی یک "1" دارد و زمانی که $r < 0.05$ باشد، کلید خاموش قلمداد می‌شود، که ارزش منطقی صفر "0" دارد.

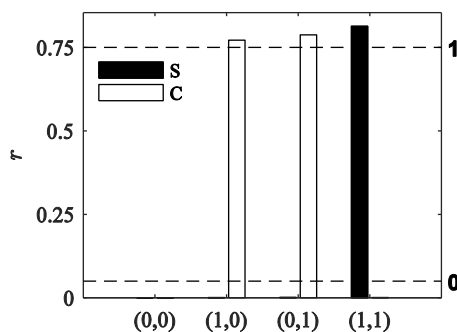
نتایج و شبیه‌سازی

شکل (۲) شبیه‌سازی انتشار سه سالیتون فضایی را نشان می‌دهد. سالیتون‌های ورودی در مبدا $Z = 0$ بترتیب در $x = +8 \mu m$ ، $x = 0$ و $x = -8 \mu m$ وارد محیط غیرخطی می‌شوند. خروجی‌های مدار منطقی نیم جمع کننده که شامل گیت‌های منطقی AND و XOR هستند که آنها را بترتیب C و S نام‌گذاری کردیم که بترتیب از $x_1 = +21 \mu m$ تا $x_2 = +26 \mu m$ و از $x_1 = +14 \mu m$ تا $x_2 = +19 \mu m$ در $Z = 50 \mu m$ می‌باشند. این خروجی‌ها با یک مستطیل سیاه رنگ در انتهای شکل مشخص شده است. در شکل (۲-ا) فاز اولیه سالیتون‌های A و B

به ترتیب برابر با $(\phi_A, \phi_B) = (0, 0)$ که این بعنوان حالت منطقی $(0, 0)$ قلمداد می‌شود. یعنی ورودی‌های منطقی A و B هر دو برابر با صفرند. در این حالت هر سه سالیتون ورودی با هم هم‌فازند و یکدیگر را بطور متناوب جذب می‌کنند. بدین شکل هیچکدام از سالیتون‌ها به خروجی‌های C و S نمی‌رسند و این بدین معنی است که خروجی اولین حالت منطقی برای هر دو گیت صفر "0" است، یعنی $(C, S) = (0, 0)$. بدین شکل اولین سطر جدول (۱) ایجاد می‌شود. در شکل (۲-b) فاز اولیه سالیتون A برابر با صفر و سالیتون B برابر با π است یعنی $(\phi_A, \phi_B) = (0, \pi)$ که این بعنوان حالت منطقی $(0, 1)$ قلمداد می‌شود. در این حالت سالیتون A و سالیتون B هم‌فاز بوده و یکدیگر را جذب می‌کنند بطوریکه سالیتون A به خروجی S می‌رسد و هیچ سالیتونی به خروجی C نمی‌رسد. در حالت خروجی گیت نیم‌جمع کننده $(C, S) = (0, 1)$ است و بدین ترتیب سطر دوم جدول گیت منطقی تکمیل می‌شود. در شکل (۲-c) فاز اولیه سالیتون A برابر با π و سالیتون B برابر با صفر است یعنی $(\phi_A, \phi_B) = (\pi, 0)$ که این بعنوان حالت منطقی $(1, 0)$ قلمداد می‌شود. در این حالت سالیتون B و سالیتون A هم‌فاز بوده و یکدیگر را جذب می‌کنند، در حالی که سالیتون A با سالیتون B ناهم‌فاز بوده و یکدیگر را دفع می‌کنند. بدین شکل سالیتون A به خروجی گیت S رسیده و هیچ سالیتونی به خروجی گیت C نمی‌رسد. در این حالت خروجی گیت نیم‌جمع کننده $(C, S) = (0, 1)$ است و بدین ترتیب سطر سوم جدول گیت منطقی تکمیل می‌شود. در شکل (۲-d) فاز اولیه سالیتون‌های A و B هر دو برابر با π است یعنی $(\phi_A, \phi_B) = (\pi, \pi)$ که این بعنوان حالت منطقی $(1, 1)$ قلمداد می‌شود. در این حالت هر دو سالیتون A و B با سالیتون A ناهم‌فاز بوده و یکدیگر را دفع می‌کنند، بطوریکه سالیتون A به خروجی گیت C رسیده و خروجی گیت S خالی می‌ماند. در این حالت خروجی گیت نیم‌جمع کننده $(C, S) = (1, 1)$ است و بدین ترتیب سطر چهارم جدول گیت منطقی تکمیل می‌شود. بدین شکل مدار منطقی نیم‌جمع کننده تکمیل می‌شود.



شکل ۲. انتشار سالیتون‌های فضایی برای چهار حالت منطقی مدار نیم‌جمع کننده.



شکل ۳. نمودار مقادیر r برای حالت‌های منطقی مدار منطقی نیم جمع کننده. خط‌چین‌های افقی تراز تصمیم حالت‌های "0" و "1" را نشان می‌دهند.

در این مقاله نشان داده شده است که برهمکنش سالیتون‌های نوری فضایی قابلیت‌های بسیار بالایی ایجاد می‌کنند که می‌توان با بهره‌گیری از آنها عناصر اصلی محاسبات مجتمع را بصورت تمام نوری طراحی نمود. مدار نیم جمع کننده معرفی شده در اینجا یکی از آنهاست که یکی از عناصر اساسی محاسبات منطقی می‌باشد. مدار طراحی شده می‌تواند از سرعت بسیار بالای فوتونها بهره برده و بر مشکل افزایش سرعت مدارهای الکترونیکی دیجیتال کنونی فائق آید. حساسیت به فاز، سادگی در طراحی، امکان انجام عملی آن، و قابلیت عملکرد آن در محیط حجمی غیرخطی از مزایای مدار منطقی پیشنهاد شده است که می‌تواند کاندیدای خوبی برای آینده علم فوتونیک باشد.

نتیجه‌گیری

در این مقاله به طراحی و شبیه‌سازی تمام نوری یکی از عناصر اصلی و کلیدی پردازش دیجیتال داده‌ها یعنی مدار منطقی نیم جمع کننده پرداخته شده است. ورودی‌های مدار نیم جمع کننده سالیتونهای نوری فضایی در نظر گرفته شده‌اند. با تنظیم فاز اولیه سالیتون‌ها و بهره‌گیری از برهمکنش جاذبه و دافعه بین آنها، خروجی‌های لازم مدار بدست آمده است. مدار نیم جمع کننده طراحی شده در اینجا بطور تمام نوری عمل نموده که این امر سرعت محاسبات را بسیار بالا می‌برد و معایب مدارهای دیجیتال الکترونیکی مشابه را نخواهد داشت. بدین منظور این مدار نیم جمع کننده تمام نوری کاندیدای بسیار خوبی در آینده پردازشگرهای تمام نوری خواهد بود و می‌تواند راه گشای افزایش سرعت پردازشگرهای الکترونیکی کنونی باشد. انتشار و برهمکنش سالیتونهای نوری فضایی با حل عددی معادله شرودینگر غیرخطی به روش تقسیم-مرحله صورت گرفته است. بدین شکل نشان داده شده است که سالیتونهای نوری فضایی کاندیدای بسیار خوبی برای طراحی تمام نوری مدارهای الکترونیکی کنونی می‌باشند و گزینه مطلوبی در آینده علم فوتونیک و الکترونیک در محاسبات فوق سریع است که مدار نیم جمع کننده معرفی شده یکی از آنهاست.

منابع

1. A. C. Newell, *Solitons in mathematics and physics*, 1985.
2. T. Birr, U. Zywietz, P. Chhantyal, B. N. Chichkov, and C. Reinhardt, "Ultrafast surface plasmon-polariton logic gates and half-adder," *Optics Express*, vol. 23, (2015) 31755-31765.
3. P. Phongsanam, S. Mitatha, C. Teeka, and P. P. Yupapin, "All optical half adder/subtractor using dark-bright soliton conversion control," *Microwave and Optical Technology Letters*, vol. 53, (2011) 1541-1544.
4. J. W. M. Menezes, W. B. Fraga, A. C. Ferreira, G. F. Guimarães, A. F. G. F. Filho, C. S. Sobrinho, *et al.*, "All-Optical Half-Adder Using All-Optical XOR and AND Gates for Optical Generation of "Sum" and "Carry"," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 29, (2010)254-271.
5. P. Phongsanam, C. Teeka, R. Jomtarak, S. Mitatha, and P. P. Yupapin, "All-optical logic AND and OR gates generated by dark-bright soliton conversion," *Optik*, vol. 124, (2013) 406-410.
6. H. Zou, G.-Q. Liang, and H.-Z. Wang, "Efficient all-optical dual-channel switches, logic gates, half-adder, and half-subtractor in a one-dimensional photonic heterostructure," *Journal of the Optical Society of America B*, vol. 25, (2008) 351-360.
7. J. W. M. Menezes, W. B. Fraga, F. T. Lima, G. F. Guimarães, A. C. Ferreira, M. L. Lyra, *et al.*, "Study of the Performance of an All-Optical Half-Adder Based on Three-Core Non-Linear Directional Fiber Coupler Under Delayed and Instantaneous Non-Linear Kerr Responses," *Fiber and Integrated Optics*, vol. 30, (2011) 201-230.
8. Q. Liu, Z. Ouyang, C. J. Wu, C. P. Liu, and J. C. Wang, "All-optical half adder based on cross structures in two-dimensional photonic crystals," *Optics Express*, vol. 16, (2008) 18992-19000.
9. M. Seifouri, S. Olyaei, M. Sardari, and A. Mohebzadeh-Bahabady, "Ultra-fast and compact all-optical half adder using 2D photonic crystals." *IET Optoelectronics*13(3), (2019) 139-143.

10. C. Lu, B. Zhu, C. Zhu, L. Ge, Y. Liu, Y. Chen, *et al.*, "All-optical logic gates and a half-adder based on lithium niobate photonic crystal micro-cavities," *Chinese Optics Letters*, vol. 17, (2019) 072301.
11. D. Yan and J. Li, "Design for realizing an all-optical terahertz wave half adder based on photonic crystals," *Laser Physics*, vol. 29, (2019) 076203.
12. M. Abdollahi and F. Parandin, "A novel structure for realization of an all-optical, one-bit half-adder based on 2D photonic crystals," *Journal of Computational Electronics*, (2019).
13. M. Neisy, M. Soroosh, and K. Ansari-Asl, All optical half adder based on photonic crystal resonant cavities, *Photonic Netw. Commun.* 35(2) (2018) 245-250.
14. M. R. Jalali-Azizpoor, M. Soroosh, and Y. Seifi-Kavian, Application of selfcollimated beams in realizing all-optical photonic crystal-based half-adder, *Photonic Netw. Commun.* 36(3) (2018) 344-343.
15. F. Cheraghi, M. Soroosh, and G. Akbarizadeh, An ultra-compact all optical full adder based on nonlinear photonic crystal resonant cavities, *Superlattices Microstruct.* 113 (2018) 359-365.
16. S. Serajmohammadi, H. Alipour-Banaei, and F. Mehdizadeh, Proposal for realizing an all-optical half adder based on photonic crystals, *Appl. Opt.* 57(7) (2018) 1617-1621.
17. A. Rahmani and F. Mehdizadeh, Application of nonlinear PhCRRs in realizing all optical half-adder, *Opt. Quantum Electron.* 50 (2017) 30-37.
18. A. Kumar, "Implementation of all-optical NAND logic gate and half-adder using the micro-ring resonator structures," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 48, (2016) 477.
19. A. Ghadi and S. Sohrabfar, "All-Optical Multiple Logic Gates Based on Spatial Optical Soliton Interactions," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 30, (2018) 569-572.