

شبیه‌سازی و تحلیل واحد منطقی تمام نوری باز آرایی‌پذیر مبتنی بر تشدیدکننده‌های ریزحلقه موازی

محمد سیفی الله^۱، محمد رزاقی^۲، مجتبی گندمکار^۳

^۱ کارشناسی ارشد الکترونیک، دانشگاه کردستان

^۲ دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی برق، دانشگاه کردستان، ir.uok@razaghi.m

^۳ استادیار، دانشکده برق و کامپیوتر، گروه مهندسی الکترونیک، دانشگاه صنعتی جندی شاپور دزفول

چکیده

گیت‌های منطقی نوری به عنوان عنصر پایه‌ای در توسعه ریزپردازنده‌ها و حافظه‌های تمام نوری به حساب می‌آیند. در این مقاله، از تشدیدکننده‌های ریزحلقه برای ساخت واحد منطقی باز آرایی‌پذیر تمام نوری در سیستم مواد GaAs/AlGaAs استفاده خواهد شد. در ساختار پیشنهاد شده با اتصال موازی هفت تشدیدکننده ریزحلقه و انتخاب خروجی مناسب، قابلیت دسترسی به عملگرهای منطقی اساسی سه ورودی فراهم می‌شود. امکان باز آرایی ساختار برای تغییر عملگر، سرعت پردازش مناسب و کیفیت مطلوب در تفکیک سطح صفر و یک، از مزایای این ساختار است. از یک لیزر سبز به عنوان پمپ نوری برای تزریق حامل و تغییر ضریب شکست ماده استفاده شده است که باعث جابه‌جایی طول موج تشدید ریزحلقه‌ها به مقدار ۱/۵ نانومتر می‌شود. در این مقاله شبیه‌سازی گیت منطقی مبتنی بر تک حلقه تشدید به منظور دستیابی به گیت‌های پایه بافر و معکوس کننده انجام خواهد شد. سپس شبیه‌سازی عملگرهای منطقی سه ورودی با استفاده از ساختار پیشنهادی معرفی خواهد شد و در پایان با تحلیل نتایج شبیه‌سازی روی ساختار پیشنهادی، توانایی آن در ایجاد توابع منطقی سه ورودی بررسی خواهد شد.

کلیدواژه

کلید تمام نوری، تشدیدکننده ریزحلقه، ضریب شکست موثر، گیت منطقی تمام نوری، پمپ نوری

مقدمه

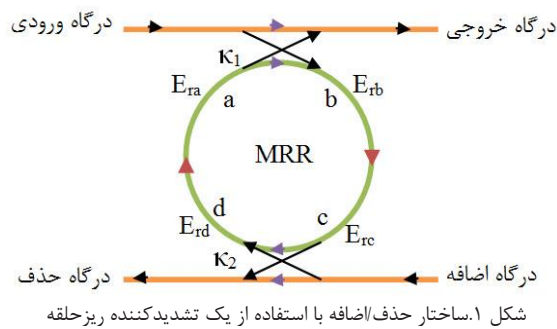
تلفات و افزایش بازده تولید، انتقال و پردازش مناسب سیگنال می‌تواند از سیستم پردازش و انتقال تمام نوری بهره برد. تشدیدکننده‌های ریزحلقه^۴ به صورت مناسبی فوتون و الکترون را محصور می‌کنند. بنابراین ادوات اپتوالکترونیک مبتنی بر این تشدیدکننده‌ها، مشکل اساسی اندازه در مدارهای مجتمع^۵، دسترسی به توان پایین و مدارهای نوری بسیار سریع را حل می‌کنند. بر اساس تعداد موجبرهای مستقیم^۶ و نحوه قرارگیری آنها در اطراف تشدیدکننده‌های ریزحلقه، دو ساختار حذف/اضافه^۷ و تمام گذر^۸ داریم. از این میان، ساختار حذف/اضافه یکی از پر کاربردترین ساختارهای مبتنی بر تشدیدکننده‌های ریزحلقه است [۴-۳]. این ساختار با قرارگیری یک تشدیدکننده ریزحلقه در میان دو موجبر مستقیم شکل می‌گیرد. از جمله کاربردهای آن در پردازش سیگنال^۹ [۵]،

گیت‌های نوری^۱ از عناصر پایه‌ای در عملگرها، حافظه‌ها، واحدهای محاسبه و منطق^۲ و ریزپردازنده‌ها^۳ هستند. این گیت‌ها نسبت به نوع الکترونیکی، دارای سرعت بالاتر، تأثیرپذیری کمتر از نویز^۴ و اعوجاج^۵، قابلیت مجتمع‌سازی بالا و عملکرد مناسب در محدوده فرکانسی بالاتری هستند. جهت انتقال سیگنال‌های تولید شده توسط گیت‌های منطقی الکترونیکی با فیبر نوری^۶، باید آن‌ها را به سیگنال نوری تبدیل کرد. همچنین در سمت گیرنده، سیگنال نوری دریافت شده به سیگنال الکترونیکی تبدیل شود. این تبدیل سیگنال الکترونیکی به نوری و بالعکس دارای تلفاتی است که آن را به عنوان تلفات اپتوالکترونیکی^۷ [۲-۱] معرفی می‌کنند. برای جلوگیری از این

^۸ Microring resonator
^۹ Integrated Circuits (ICs)
^{۱۰} Straight Waveguide (BUS)
^{۱۱} Add/Drop
^{۱۲} All-Pass Structure
^{۱۳} Signal Processing

^۱ Optical gates
^۲ Arithmetic and Logic Unit (ALU)
^۳ Microprocessors
^۴ Noise
^۵ Distortion
^۶ Optical Fiber
^۷ Optoelectronics

شکل ۱ نمونه ای از ساختار حذف/اضافه با استفاده از تشدیدکننده ریزحلقه را نشان می دهد.



ساختار حذف/اضافه با ضرایب تزویج^{۲۲} و میدان های موجود در شکل ۱ نشان داده شده است. ضریب K_1 ضریب تزویج بین حلقه و موجبر ورودی است. همچنین K_2 ضریب تزویج میان حلقه و موجبر خروجی است که درگاه حذف و اضافه بر روی آن قرار دارند. این ساختار دارای چهار درگاه^{۲۳} ورودی، خروجی^{۲۴} (عملیاتی)، حذف و اضافه است. در این ساختار سیگنالی که بر روی درگاه خروجی یا درگاه حذف قرار می گیرد، توسط تداخل میدان موج گذرنده از موجبر^{۲۵} و موج در حال گردش در حلقه تعیین می شود. تشدیدکننده ریزحلقه هنگامی که تداخل سازنده رخ دهد در حالت تشدید^{۲۶} قرار می گیرد. در این وضعیت، طول موج تشدید م ضرب صحیحی از محیط تشدیدکننده ریزحلقه است [۱۷]. در حالت تشدید، حداکثر توان ورودی به درگاه حذف انتقال یافته و کمینه توان، به درگاه خروجی منتقل می شود.

در صورت وجود مواد غیرخطی، ضریب شکست می تواند با شدت نور در تشدیدکننده تغییر کند در یک ماده غیرخطی قطبش دی الکتریک^{۲۷} (جدایی بارهای الکتریکی در عایق) به صورت غیرخطی به میدان الکتریکی نور اعمال شده پاسخ می دهد [۱۸-۱۹]. بنابراین اثرات غیرخطی را می توان به دو گروه، اثرات پارامتری و غیرپارامتری تقسیم کرد. اثر غیرخطی پارامتری، برهم کنشی است که در آن حالت کوانتومی مواد غیرخطی در برهم کنش با میدان الکتریکی نور تغییر نمی کند [۲۰]. لذا در نتیجه ی بقای انرژی و تکانه در میدان نوری، ایجاد تطبیق فازی را مهم کرده و وابسته به قطبش است. طبق آنچه گفته شد در مواد غیرخطی ضریب شکست، به شدت میدان نوری اعمال شده وابسته است. این تغییر ضریب شکست منجر به تغییر طول موج تشدید می شود [۲۱]. طول موج تشدید یک حلقه را می توان به روش های متفاوتی تغییر داد. این

فیلترهای مخبراتی [۸-۱۶]، سیستم های لیزری [۹-۱۰]، تداخل سنج ها^{۱۴} [۱۱-۱۲] و حسگرهای صنعتی [۱۳-۱۴] را می توان نام برد. اندازه کوچک تشدیدکننده های ریزحلقه، آستانه کلیدزنی بسیار پایین که در محدوده پیکوژول قرار دارد و همچنین ویژگی غیرخطی بودن طول موج تشدید [۱۵]، آن ها را به گزینه مناسبی جهت استفاده به عنوان گیت نوری تبدیل کرده است.

روش های مختلفی برای اتصال حلقه های تشدید به موجبر باس و سایر حلقه های تشدید وجود دارد. این اتصال ها به صورت اتصال موازی^{۱۵}، آبشاری^{۱۶} و سری^{۱۷} است. در ساختار موازی تمام حلقه های تشدید به موجبرهای باس متصل می شوند و هر حلقه با حلقه مجاورش فاصله معینی دارد. در این حالت به علت عبور هم زمان نور در میان تمام حلقه ها در حالت تشدید، ظرافت^{۱۸} بالایی دارد. همچنین دسترسی به بازه طیفی آزاد^{۱۹} بزرگ برای این ساختار با استفاده از حلقه های بیش تر در ساختار قابل دسترسی است [۱۶]. در ادامه در مورد پارامترهای ظرافت و بازه طیفی آزاد و کاربرد آنها در گیت های نوری بحث خواهیم کرد. در این تحقیق، کلیه گیت های نوری سه ورودی با استفاده از اتصال موازی هفت تشدیدکننده ریزحلقه به دست آمده است. تعداد ورودی های بیش تر در گیت نوری به معنای قابلیت ایجاد بلوک های منطقی و محاسباتی با ظرفیت بیشتر و در نتیجه مدار منطقی با ابعاد کمتر است.

در این مقاله ابتدا به بررسی تئوری یک تشدیدکننده ریزحلقه و پارامترهای مختلف آن به عنوان گیت نوری پرداخته می شود. در ادامه از ساختار حذف/اضافه دارای یک تشدیدکننده ریزحلقه برای پیاده سازی گیت منطقی پایه بافر و معکوس کننده^{۲۰} استفاده شده است. سپس، محاسبات و تحلیل برای ساختار پیشنهاد شده، مبتنی بر اتصال موازی هفت تشدیدکننده ریزحلقه انجام می شود. تابع انتقال درگاه خروجی و حذف در تشدیدکننده های ریزحلقه موازی محاسبه شده است. همچنین نتایج شبیه سازی گیت های منطقی سه ورودی باز آرای پذیر^{۲۱} مبتنی بر اتصال موازی هفت تشدیدکننده ریزحلقه ارائه شده و مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است.

طراحی کلید تمام نوری با استفاده از تشدیدکننده ریزحلقه

²²Coupling coefficients

²³Port

²⁴Throughput

²⁵Waveguide

²⁶On-resonance

²⁷Dielectric Polarization

¹⁴ Interferometer

¹⁵Parallel Connection

¹⁶Cascaded Connection

¹⁷Serially Connection

¹⁸Finesse

¹⁹Free Spectral Range (FSR)

²⁰Buffer/Not gate

²¹ Reconfigurable optical gate

انتشار k_n است [۸ و ۱۷]. در این حالت با استفاده از رابطه ۲ می‌توان ثابت انتشار را معرفی کرد.

$$k_n = \frac{2\pi m_{eff}}{\lambda} \quad (2)$$

در این رابطه، λ طول موج تشدید و n_{eff} ضریب شکست موثر^{۳۵} ریزحلقه را نشان می‌دهد. ضریب شکست موثر مطابق رابطه ۳ است.

$$n_{eff} = n_0 + n_2 I = n_0 + \frac{n_2}{A_{eff} P} \quad (3)$$

در این حالت n_0 و n_2 به ترتیب ضریب شکست خطی و غیرخطی حلقه هستند [۲۹]. همچنین در این روابط I و P به ترتیب شدت و توان پمپ نوری هستند. فرض می‌کنیم E_{i1} و E_{i2} به ترتیب میدان در درگاه ورودی و اضافه باشند و E_t و E_d میدان در درگاه‌های خروجی و حذف باشد. همچنین فرض شده که میدان در نقاط a, b, c, d در شکل ۱ به ترتیب E_{ra}, E_{rb}, E_{rc} و E_{rd} است. بنابراین می‌توان این میدان‌ها را مطابق روابط زیر نوشت [۳۲].

$$E_{ra} = \sqrt{1-\gamma} [j\sqrt{k_1} E_{i1} + \sqrt{1-k_1} E_{rd}] \quad (4)$$

$$E_{rb} = E_{ra} \cdot \exp\left(\frac{-\alpha L}{4}\right) \cdot \exp\left(\frac{jk_n L}{2}\right) \quad (5)$$

$$E_{rc} = \sqrt{1-\gamma} [j\sqrt{k_2} E_{i2} + \sqrt{1-k_2} E_{rb}] \quad (6)$$

$$E_{rd} = E_{rc} \cdot \exp\left(\frac{-\alpha L}{4}\right) \cdot \exp\left(\frac{jk_n L}{2}\right) \quad (7)$$

میدان در درگاه خروجی به صورت رابطه ۸ است.

$$E_t = \sqrt{1-\gamma} [\sqrt{1-k_1} E_{i1} + j\sqrt{k_1} E_{rd}] \quad (8)$$

همچنین میدان در درگاه حذف به صورت رابطه ۹ بیان می‌شود.

$$E_d = \sqrt{1-\gamma} [\sqrt{1-k_2} E_{i2} + j\sqrt{k_2} E_{rb}] \quad (9)$$

برای ساده‌سازی از روابط ۱۰، ۱۱ و ۱۲ استفاده می‌کنیم.

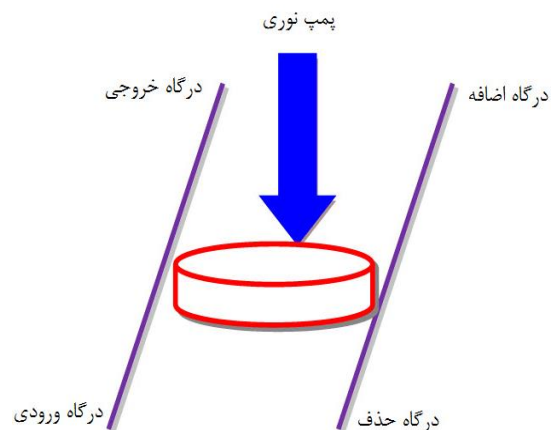
$$\phi = \frac{k_n L}{2} \quad (10)$$

$$D = \sqrt{1-\gamma} \quad (11)$$

$$x = D \exp\left(\frac{-\alpha L}{4}\right) \quad (12)$$

روش‌ها شامل استفاده از اثر الکترو-اپتیک^{۲۸} [۲۳-۲۴]، اثر ترمو-اپتیک^{۲۹} [۲۵-۲۶]، تزریق حامل^{۳۰} [۲۶-۲۷] و تغییر ضریب شکست تشدیدکننده ریزحلقه با استفاده از پمپ نوری [۲۸] هستند. در این تحقیق از روش تغییر ضریب شکست به وسیله اعمال لیزر به عنوان پمپ نوری استفاده شده است. با تغییر ضریب شکست ریزحلقه، طول موج تشدید نیز تغییر می‌کند و خروجی می‌تواند به درگاه عملیاتی یا درگاه حذف منتقل شود.

در مدل استفاده شده در این مقاله جهت ایجاد توانایی مقایسه ساختارهای معرفی شده با نتایج معتبر منتشر شده [۲۹] از لیزر سبز با طول موج ۵۳۲ نانومتر برای پمپ کردن تشدیدکننده ریزحلقه استفاده شده است. با اعمال لیزر، اثر غیرخطی در مواد تشکیل‌دهنده ریزحلقه ناشی از اثر کر^{۳۱} [۳۰] سبب تغییر در ضریب شکست موثر شده و تغییر ضریب شکست، سبب جابجایی در طول موج تشدید شده و در نتیجه شیفت آبی^{۳۲} در فرکانس تشدید رخ دهد [۳۱]. شیفت آبی به هر نوع کاهش در طول موج که متناظر با افزایش در فرکانس است برای یک موج الکترومغناطیس تعریف می‌شود. به عبارتی دیگر شیفت آبی طول موج را به سمت انتهای ابی طیف جابجا می‌کند. فرایند پمپ کردن در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲. فرایند پمپ نوری حلقه تشدید

فرض می‌کنیم که محیط ریزحلقه مطابق رابطه زیر باشد.

$$L = 2\pi R \quad (1)$$

که R شعاع ریزحلقه است. ضریب تضعیف شدت نور در حلقه α ، ضریب تلفات الحاقی^{۳۳} تزویج‌کننده‌های جهتدار^{۳۴} γ و ثابت

³³Insertion loss

³⁴Directional Coupler

³⁵ Effective refraction index

²⁸Electro-optic effect

²⁹Thermo-optic effect

³⁰Carrier injection

³¹ Kerr effect

³² Blue shift

ظرافت بیان کننده مقدار کیفیت تشدیدکننده ریزحلقه است و به صورت زیر تعریف می شود.

$$F = \frac{FSR}{FWHM} \quad (18)$$

در این مقاله ضریب شکست گروه را $3/44$ در نظر گرفته ایم که در طول موج $1/55$ میکرومتر، مقدار بازه طیفی آزاد و پهنای باند به ترتیب 16 نانومتر و $1/1$ نانومتر است. یکی دیگر از پارامترهای مهم، ضریب کیفیت Q است که به نسبت انرژی ذخیره شده به تلفات انرژی در یک سیکل تعریف می شود.

$$Q = \frac{f_0}{\delta f} = \frac{\lambda_0}{\delta \lambda} \quad (19)$$

در رابطه f_0 و λ_0 به ترتیب فرکانس و طول موج تشدید حلقه هستند. همچنین δf و $\delta \lambda$ به ترتیب پهنای باند فرکانسی و طول موجی هستند. در حلقه معرفی شده با استفاده از روابط فوق، مقدار ظرافت 14 و ضریب کیفیت 1400 در طول موج تشدید به دست می آید. نرخ روشن-خاموش، با نسبت شدت تشدید در حالت روشن به شدت تشدید در حالت خاموش تعریف می شود. این ضریب که برای درگاه های خروجی و حذف به کار می رود به صورت زیر تعریف می شود.

$$On-OffRatio = \frac{T_{max}(throughput)}{T_{min}(drop)} \quad (20)$$

مقدار این پارامتر مطابق محاسبات انجام شده برابر 30 دسیبل است. این نرخ روشن-خاموش برای ایجاد فلیپ های 33 بسیار سریع و مناسب در کنترل کلیدهای تمام نوری استفاده می شود. پارامتر دیگر نرخ خاموشی است که به صورت رابطه زیر بیان می شود.

$$ER(dB) = 10 \log \left(\frac{P^1_{min}}{P^0_{max}} \right) \quad (21)$$

در رابطه P^1_{min} و P^0_{max} به ترتیب حداقل دامنه یک منطقی (۱) و حداکثر دامنه صفر منطقی (۰) است. این پارامتر هرچه بیشتر باشد نشان دهنده تفکیک مناسب تر سطح صفر و یک منطقی است. ضریب وضوح خروجی (CR) به صورت نسبت میانگین شدت خروجی در حالت ۱ (P^1_{mean}) به میانگین شدت در حالت صفر (P^0_{mean}) تعریف می شود.

$$CR(dB) = 10 \log \left(\frac{P^1_{mean}}{P^0_{mean}} \right) \quad (22)$$

با حل روابط ۴ تا ۱۲، میدان در درگاه خروجی و حذف را می توان به صورت زیر نوشت.

$$E_t = \frac{(D\sqrt{1-k_1}) - (D\sqrt{1-k_2}x^2 \exp^2(j\phi))}{1 - (\sqrt{1-k_1}\sqrt{1-k_2}x^2 \exp^2(j\phi))} Ei_1 \quad (13)$$

$$+ \frac{-D\sqrt{k_1}\sqrt{k_2}x \exp(j\phi)}{1 - (\sqrt{1-k_1}\sqrt{1-k_2}x^2 \exp^2(j\phi))} Ei_2 \quad (14)$$

$$E_d = \frac{(D\sqrt{1-k_2}) - (D\sqrt{1-k_1}x^2 \exp^2(j\phi))}{1 - (\sqrt{1-k_1}\sqrt{1-k_2}x^2 \exp^2(j\phi))} Ei_2$$

$$+ \frac{-D\sqrt{k_1}\sqrt{k_2}x \exp(j\phi)}{1 - (\sqrt{1-k_1}\sqrt{1-k_2}x^2 \exp^2(j\phi))} Ei_1$$

اگر هیچ سیگنالی بر روی درگاه اضافه تحریک نشود آنگاه $E_{i2}=0$ است بنابراین روابط ۱۳ و ۱۴ را می توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$E_t = \frac{(D\sqrt{1-k_1}) - (D\sqrt{1-k_2}x^2 \exp^2(j\phi))}{1 - (\sqrt{1-k_1}\sqrt{1-k_2}x^2 \exp^2(j\phi))} Ei_1 \quad (15)$$

$$E_d = \frac{-D\sqrt{k_1}\sqrt{k_2}x \exp(j\phi)}{1 - (\sqrt{1-k_1}\sqrt{1-k_2}x^2 \exp^2(j\phi))} Ei_1 \quad (16)$$

تابع انتقال از درگاه ورودی به حذف E_d/E_i1 و از ورودی به خروجی E_t/E_i1 با فرض $E_{i2}=0$ از روابط ۱۵ و ۱۶ به سادگی قابل دسترسی است.

رفتار ساختارهای تشکیل شده از تشدیدکننده های ریزحلقه را با پارامترهای مهم آن مورد سنجش قرار می دهند. برخی از پارامترهای مهم تشدیدکننده ریزحلقه همچون بازه طیفی آزاد^{۳۶} (FSR)، پهنای باند $-3dB$ یا کل پهنای در نصف بیشینه^{۳۷} ($FWHM$)، ظرافت (F)، نرخ روشن-خاموش^{۳۸} (OOR)، ضریب کنتراست^{۳۹} (CR) و ضریب خاموشی^{۴۰} (ER) است. فاصله فرکانسی میان دو قله تشدید را بازه طیفی آزاد می نامند که مطابق رابطه زیر بیان می شود [۷].

$$FSR = \Delta f = \frac{C}{Ln_g} \quad (17)$$

در این روابط n_g ضریب شکست گروه^{۴۱} و L محیط تشدیدکننده ریزحلقه است. همچنین C نشان دهنده سرعت انتشار نور در خلاء است.

پارامتر مهم دیگر در حلقه تشدید، کل پهنای در نصف بیشینه است که برای اندازه گیری پهنای باند به کار می رود. پارامتر

⁴⁰ extinction ratio (ER)
⁴¹ Group refractive index
⁴² Quality Factor
⁴³ flip-flop

³⁶ Free Spectral Range (FSR)
³⁷ Full Width at Half Maximum (FWHM)
³⁸ On-Off Ratio (OOR)
³⁹ contrast ratio (CR)

در طرح شکل ۲، یک سیگنال پیوسته نوری با طول موج λ به ورودی اعمال می‌شود و به وسیله پمپ نوری مدوله می‌گردد. اگر پمپ وجود داشته باشد آنگاه سیگنال نوری که به ورودی اعمال شده به درگاه خروجی می‌رود. اگر پمپ نوری وجود نداشته باشد آنگاه سیگنال ورودی به درگاه حذف منتقل می‌شود. در شبیه‌سازی یک تشدیدکننده فرض می‌کنیم که هیچ سیگنالی در درگاه اضافه قرار ندارد. بنابراین اگر پمپ اعمال شود سیگنال ورودی به درگاه خروجی می‌رود. به عبارتی دیگر زمانی که پمپ نوری اعمال نشده است طول موج تشدید در حلقه λ است و سیگنال قرار گرفته در ورودی، به درگاه حذف راه می‌یابد. برای عملکرد مناسب یک تشدیدکننده ریزحلقه به عنوان کلید، ضرایب تزویج و شعاع حلقه باید به صورت مناسبی انتخاب شوند. انتخاب این مقادیر براساس [۳۲] است. برای اعتبارسنجی شبیه‌سازی انجام شده نتایج مربوط به یک تشدیدکننده ریزحلقه با شعاع $7/088$ میکرومتر و ضرایب تزویج $K_1=K_2=0.25$ انجام شده است. سیگنال پیوسته ورودی در شکل ۴(a) نشان داده شده است. این سیگنال گوسین با رابطه زیر نشان داده می‌شود [۳۳].

$$P_{in}(t) = \frac{E_{in}}{t_0 \sqrt{\pi}} \exp\left(-\frac{(t-bi)^2}{t_0^2}\right) \quad (23)$$

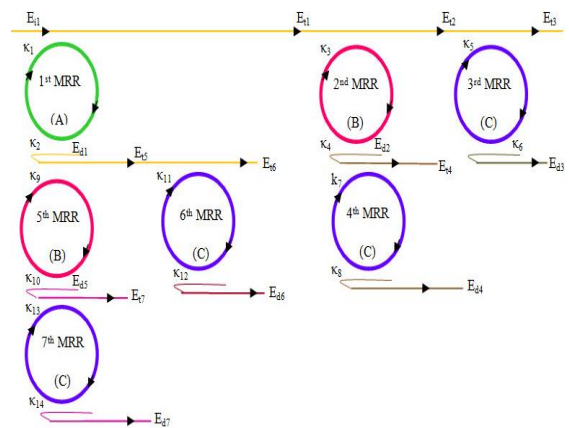
در این رابطه E_{in} انرژی سیگنال ورودی است که در مقاله مقدار ۱ برای آن انتخاب شده است. پهنای پالس $1/1$ پیکوثانیه است که با 2σ نشان داده شده است. همچنین b مرکز پالس گوسین را نشان می‌دهد. ورودی دارای نرخ بیت 200^{45} بیت بر پیکوثانیه است.

سیگنال پمپ به صورت رشته (0010110011) است که در شکل ۴(b) نشان داده شده است. شکل ۴(c) نشان می‌دهد زمانی که سیگنال پمپ اعمال نشده است، سیگنال ورودی به درگاه حذف می‌رود. همچنین شکل ۴(d) نشان می‌دهد که با اعمال سیگنال پمپ به حلقه، سیگنال ورودی به درگاه خروجی می‌رسد. بنابراین تشدیدکننده ریزحلقه به عنوان گیت بافر و معکوس‌کننده عمل می‌کند. نتایج شبیه‌سازی تطبیق مناسبی با [۲۹] دارد.

برای داشتن عملکرد مناسب مقدار این ضریب تا حد ممکن باید بالا باشد. در این حالت بخش عمده‌ای از سیگنال ورودی به خروجی راه می‌یابد. در نقطه عملکرد بهینه ساختار معرفی شده مقدار ضریب وضوح برابر $17/1$ دسیبل است.

طراحی تشدیدکننده‌های موازی تمام نوری

در ساختار پیشنهاد شده از هفت تشدیدکننده ریزحلقه موازی شده مطابق شکل ۳ استفاده شده است.



شکل ۳. ساختار هفت حلقه‌ای موازی

در ساختار معرفی شده ریزحلقه اول با سیگنال پمپ A، ریزحلقه‌های دوم و پنجم با سیگنال پمپ B و ریزحلقه‌های سوم، چهارم، ششم و هفتم با سیگنال پمپ C، تحت تاثیر پمپ نوری قرار گرفته‌اند. این سیگنال‌ها از نوع گوسین 44 هستند که در بخش شبیه‌سازی ویژگی‌های آنها کاملاً بیان خواهد شد. همچنین در ساختار شکل ۳، ورودی حلقه‌های دوم و سوم از درگاه خروجی حلقه اول (E_{d1}) به دست می‌آید. ورودی حلقه‌های پنجم و ششم از درگاه حذف حلقه اول (E_{d1}) گرفته می‌شوند. همچنین ورودی حلقه هفتم ناشی از درگاه حذف حلقه پنجم (E_{d5}) است. میدان‌های نشان داده شده برای هر حلقه، مطابق روش معرفی شده در بخش قبل تعیین شده‌اند. در بخش بعدی نتایج شبیه‌سازی برای تک حلقه تشدید به عنوان کلید نوری و برای تشدیدکننده‌های موازی نشان داده شده در شکل ۳ را تحلیل و بررسی می‌کنیم.

نتایج شبیه‌سازی

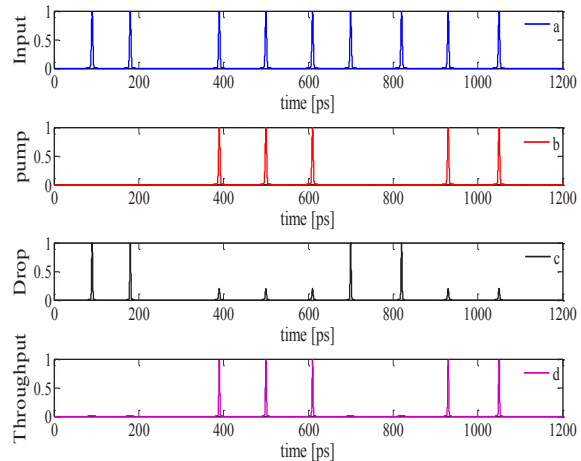
پمپ B نیز اعمال شده است سیگنال به درگاه خروجی حلقه ۵ راه می یابد و به دلیل وجود پمپ C ، خروجی نهایی به درگاه خروجی حلقه ۶ می رسد که بیان کننده عملگر $A'BC$ بر روی درگاه (E_{t6}) است.

حالت ۵: اگر پمپ A موجود باشد، پمپ B و C اعمال نشده باشند آنگاه سیگنالی که به ورودی حلقه ۱ اعمال شده به درگاه خروجی این حلقه می رسد و چون پمپ B موجود نیست سیگنال به درگاه حذف حلقه ۲ راه می یابد و به دلیل اعمال نشدن پمپ C ، خروجی نهایی به درگاه حذف حلقه ۴ می رسد که بیان کننده عملگر ABC' بر روی درگاه (E_{d4}) است.

حالت ۶: اگر پمپ A وجود داشته، پمپ B وجود نداشته باشد و پمپ C اعمال شده باشد آنگاه سیگنالی که به ورودی حلقه ۱ اعمال شده به درگاه خروجی این حلقه می رسد و چون پمپ B وجود ندارد سیگنال به درگاه حذف حلقه ۲ راه می یابد و به دلیل موجود بودن پمپ C ، خروجی نهایی به درگاه خروجی حلقه ۴ می رسد که بیان کننده عملگر ABC' بر روی درگاه (E_{t4}) است.

حالت ۷: اگر پمپ A وجود داشته باشد، پمپ B موجود باشد و پمپ C وجود نداشته باشد آنگاه سیگنالی که به ورودی حلقه ۱ اعمال شده به درگاه خروجی این حلقه می رسد و چون پمپ B نیز به مدار اعمال شده است سیگنال به درگاه خروجی حلقه ۲ راه می یابد و به دلیل نبودن پمپ C ، خروجی نهایی به درگاه حذف حلقه ۳ می رسد که بیان کننده عملگر ABC' بر روی درگاه (E_{d3}) است.

حالت ۸: اگر پمپ A ، B و C وجود داشته باشند آنگاه سیگنالی که به ورودی حلقه ۱ اعمال شده به درگاه خروجی این حلقه می رسد و چون پمپ B نیز وجود دارد سیگنال به درگاه خروجی حلقه ۲ راه می یابد و به دلیل موجود بودن پمپ C ، خروجی نهایی به درگاه خروجی حلقه ۳ می رسد که بیان کننده عملگر ABC بر روی درگاه (E_{t3}) است. خلاصه بررسی حالات فوق در جدول ۱ نشان داده شده است.



شکل ۴. شبیه سازی تک حلقه نوری، (a) سیگنال ورودی، (b) سیگنال پمپ، (c) سیگنال درگاه حذف، (d) سیگنال درگاه خروجی

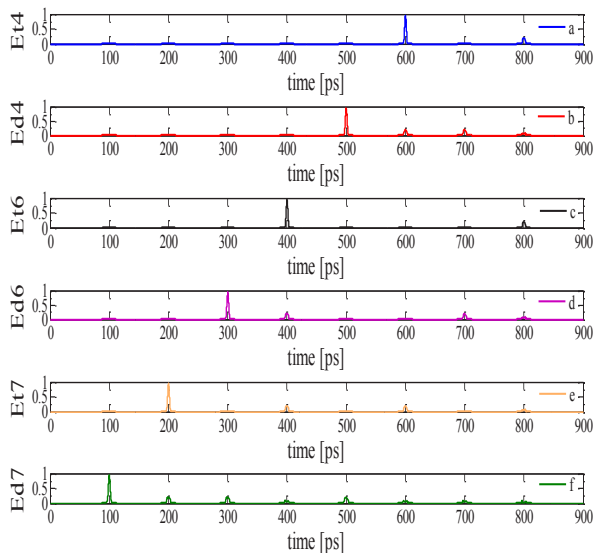
حال به بررسی ساختار معرفی شده در شکل ۳ می پردازیم. با اعمال پمپ های نوری A ، B و C هشت حالت مختلف برای خروجی های نشان داده شده در شکل ۳ به وجود می آید که در ادامه به بررسی آنها می پردازیم.

حالت ۱: اگر هر سه پمپ A ، B و C وجود نداشته باشند آنگاه سیگنالی که به ورودی حلقه ۱ اعمال شده به درگاه حذف این حلقه می رسد و چون پمپ B نیز وجود ندارد لذا سیگنال به درگاه حذف حلقه ۵ راه می یابد. به دلیل این که پمپ C ، وجود ندارد، خروجی نهایی به درگاه حذف حلقه ۷ می رسد که بیان کننده عملگر $A'BC'$ بر روی درگاه (E_{d7}) است.

حالت ۲: حالتی که پمپ A ، B وجود ندارند و پمپ C اعمال شده است. سیگنالی که به ورودی حلقه ۱ اعمال شده به درگاه حذف این حلقه می رسد و چون پمپ B نیز وجود ندارد سیگنال به درگاه حذف حلقه ۵ راه می یابد. چون پمپ C وجود دارد پس سیگنال نهایی به درگاه خروجی حلقه ۷ می رسد که بیان کننده عملگر $A'BC'$ بر روی درگاه (E_{t7}) قرار می گیرد.

حالت ۳: اگر پمپ A اعمال نشود، پمپ B وجود داشته باشد و پمپ C وجود نداشته باشد آنگاه سیگنالی که به ورودی حلقه ۱ اعمال شده به درگاه حذف این حلقه می رسد و چون پمپ B نیز وجود دارد لذا سیگنال به درگاه خروجی حلقه ۵ راه می یابد. در ادامه به دلیل نبودن پمپ C ، خروجی نهایی به درگاه حذف حلقه ۶ می رسد که بیان کننده عملگر $A'BC'$ بر روی درگاه (E_{d6}) است.

حالت ۴: اگر پمپ A وجود نداشته باشد، پمپ B اعمال شود و پمپ C هم وجود داشته باشد آنگاه سیگنالی که به ورودی حلقه ۱ اعمال شده به درگاه حذف این حلقه می رسد و چون



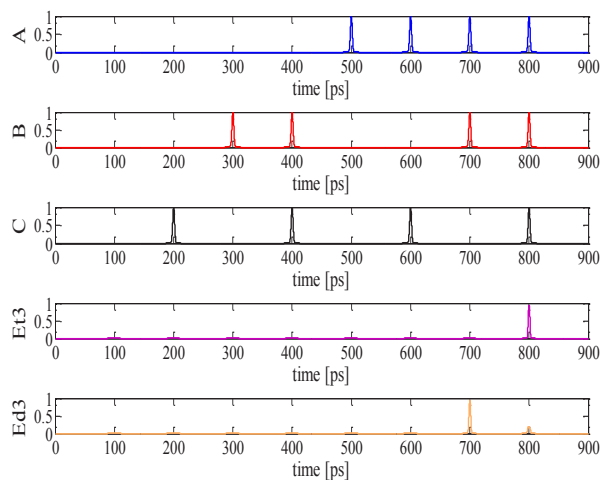
شکل ۶. خروجی‌های مربوط ساختار هفت حلقه‌ای موازی برای به دست آوردن: (a) خروجی E_{14} ، (b) خروجی E_{d4} ، (c) خروجی E_{16} ، (d) خروجی E_{d6} ، (e) خروجی E_{17} ، (f) خروجی E_{d7}

در عمل با استفاده از ساختار ترکیب‌کننده/جداکننده^{۴۶} [۳۴-۳۵] می‌توان خروجی‌های معرفی شده در جدول ۱ را برای دستیابی به گیت‌های نوری بازآرایی‌پذیر، با هم ترکیب نمود. به دلیل قابلیت ترکیب و جدا سازی خروجی‌های مختلفی که در ساختار پیشنهاد شده وجود دارد می‌توان عملگرها و توابع منطقی متفاوتی را به دست آورد. بنابراین ساختار معرفی شده، گیت منطقی بازآرایی‌پذیر است. هر تداخل‌کننده‌ای^{۴۷} برای عملکرد مناسب به دو ویژگی اساسی نیاز دارد. آنها باید دارای تلفات نوری کم و درصد پایین برگشت نور به زیرلایه باشند [۳۶]. تداخل‌کننده‌ها را می‌توان با روش‌های، تشدیدکننده‌های فابری پرو خطی انعکاسی^{۴۸}، تشدیدکننده‌های میکلسون^{۴۹} و توری‌های نوری^{۵۰} ساخت. جداکننده‌های نوری برای تجزیه نور ورودی با بیش از یک مولفه به کار می‌روند. در این نوع ساختارها نور ورودی ابتدا هم‌راستا^{۵۱} شده و سپس توسط جداساز به مولفه‌های آن تقسیم می‌شود. همچنین ترکیب‌کننده‌های نوری دو یا چند پرتو ورودی را با هم ترکیب کرده و بر روی یک خروجی واحد ارسال می‌کنند [۳۷]. ساختار اساسی ترکیب‌کننده/ جداساز متشکل از آینه‌هایی است که یک پرتو را عبور داده و دیگری را منعکس می‌کند. این ساختار در شکل ۷ نشان داده شده است.

جدول ۱. خروجی‌های ممکن به ازای اعمال سیگنال‌های پمپ A ، B و C به ساختار معرفی شده در شکل ۳

A	B	C	عملگر منطقی	درگاه خروجی
.	.	.	$A'.B'.C'$	E_{d7}
.	.	۱	$A'.B'.C$	E_{17}
.	۱	.	$A'.B.C'$	E_{d6}
.	۱	۱	$A'.B.C$	E_{16}
۱	.	.	$A.B'.C'$	E_{d4}
۱	.	۱	$A.B'.C$	E_{14}
۱	۱	.	$A.B.C'$	E_{d3}
۱	۱	۱	$A.B.C$	E_{13}

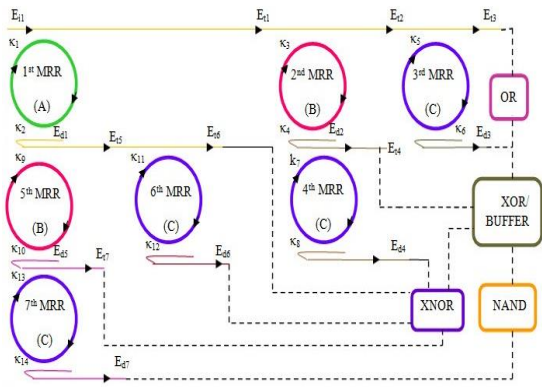
برای بررسی صحت حالات فوق پمپ $A=00001111$ ، پمپ $B=00110011$ و پمپ $C=01010101$ را به حلقه‌ها اعمال می‌کنیم. همچنین سیگنال پیوسته‌ای به ورودی حلقه اول اعمال می‌کنیم. بررسی حالات معرفی شده در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده است.



شکل ۵. خروجی‌های مربوط به ساختار هفت حلقه‌ای موازی: (a) سیگنال پمپ A ، (b) سیگنال پمپ B ، (c) سیگنال پمپ C ، (d) خروجی E_{d3} ، (e) خروجی E_{13}

⁴⁹Michelson cavities
⁵⁰Optical grating
⁵¹Collimate

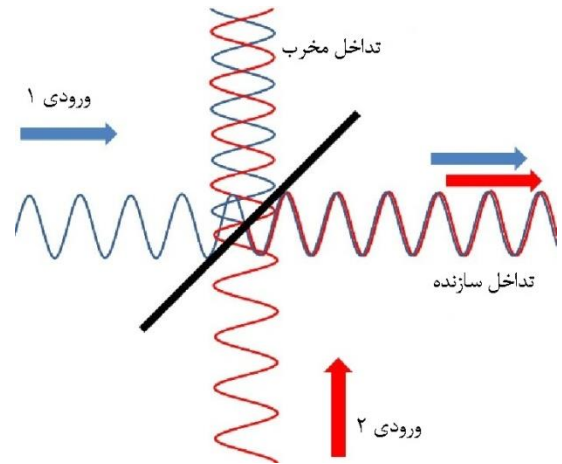
⁴⁶Beam splitters/combiners
⁴⁷Interferometer
⁴⁸Reflective linear Fabry Perot cavities



شکل ۸: ساختار هفت تشدیدکننده موازی با استفاده از ترکیب کننده/جداساز نوری

در ادامه به بررسی امکان دستیابی به گیت های XOR و $XNOR$ می پردازیم.

می دانیم که گیت XOR به ازای تعداد فردی از ورودی هایی که مقدارشان یک منطقی است، خروجی برابر با ۱ دارد و در غیر این صورت خروجی آن صفر است. همچنین گیت $XNOR$ به ازای تعداد زوجی از ورودی هایی که مقدار آن ها، یک منطقی است، خروجی برابر با ۱ دارد و در حالتی که تمام ورودی ها صفر منطقی است خروجی این گیت ۱ است. برای این حالات بر اساس جدول کارنو^{۵۸} $XOR=ABC+A'B'C+A'BC'+AB'C'$ و $XNOR=A'B'C'+A'BC+AB'C+ABC'$ استفاده از ساختار شکل ۳ و بر اساس جدول ۱ می توان خروجی مربوط به XOR و $XNOR$ را به صورت $XOR=E_{13}+E_{d4}+E_{d6}+E_{17}$ و $XNOR=E_{d3}+E_{14}+E_{16}+E_{d7}$ استفاده از ترکیب کننده/جداساز مبتنی به دست آورد. شبیه سازی به ازای پمپ $A=00001111$ ، پمپ $B=00110011$ و پمپ $C=01010101$ انجام شده است و سیگنالی پیوسته به ورودی حلقه اول اعمال شده است. در این حالت نیز کل مدت زمان اعمال این سیگنال ها ۹۰۰ پیکو ثانیه است. بررسی خروجی های ممکن برای گیت های XOR و $XNOR$ در شکل ۹ نشان داده شده است.



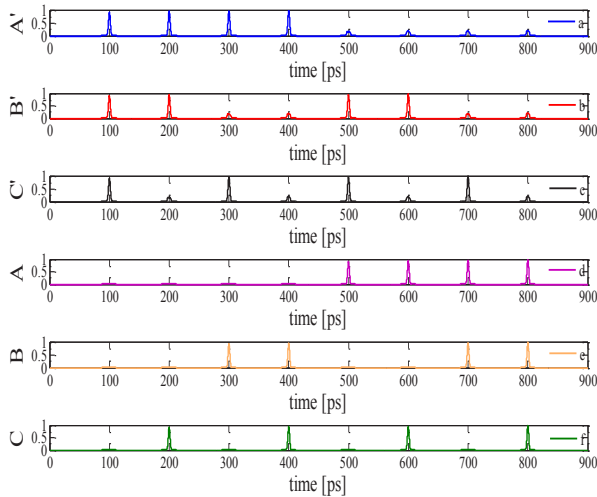
شکل ۷: ساختار اساسی ترکیب کننده/جداساز متشکل از آینه ها منعکس کننده و جداساز

به دلیل وجود غیر ایده آلی ها در ساختار مواد و فرایند ساخت این تجهیزات (ساختار مواد غیر خطی و انواع کاستی های نقطه ای یا خطی)، همواره قسمتی از نور منعکس شده به مسیر خروجی راه می یابد. بنابراین سطوح این آینه ها را معمولاً با لایه ای مخصوص می پوشانند. این سطوح باید دارای ویژگی های قدرت انتقال/جذب مناسب، پایداری حرارتی و انعطاف ساختاری کافی باشند [۳۴ و ۳۶]. ترکیب کننده/جداساز مبتنی بر آینه، شامل روش های آینه چند رنگی^{۵۲}، آینه قطبی^{۵۳} و ترکیب پرتوهای همدوس با آینه^{۵۴} است. از طرفی ساختارهای آینه ای انعکاس نور سبب گرم شدن زیر لایه می شوند که در طولانی مدت بر بازده و کیفیت ساختار تاثیر می گذارد [۳۵]. برای رفع این مشکل از ساختارهای مبتنی بر توری نوری استفاده می شود [۳۷]. مزیت این ساختارها حذف حساسیت نسبت به انتخاب نوع زیر لایه و کاهش تلفات نوری است. توری ها از ساختاری دودویی^{۵۵} مبتنی بر اثر مرتبه دوم لیترو^{۵۶} تشکیل شده اند. مشکل توری ها وجود همسپنوی مابین پرتو ورودی و پرتو انعکاسی است. برای مقابله با این اثر از روش هایی همچون، صفحات هلوگرافیک^{۵۷} و توری های با ضریب شکست بالا استفاده می کنند [۳۸-۳۹]. ساختار معرفی شده در این مقاله از ترکیب کننده/جداساز مبتنی بر آینه نشان داده شده در شکل ۸ استفاده می کند.

⁵⁶Littrow second order effect
⁵⁷Holographic plates
⁵⁸Karnaugh map

⁵²Dichroic Mirror
⁵³Polarize mirror
⁵⁴Coherent beam combining with mirror
⁵⁵Binary structure

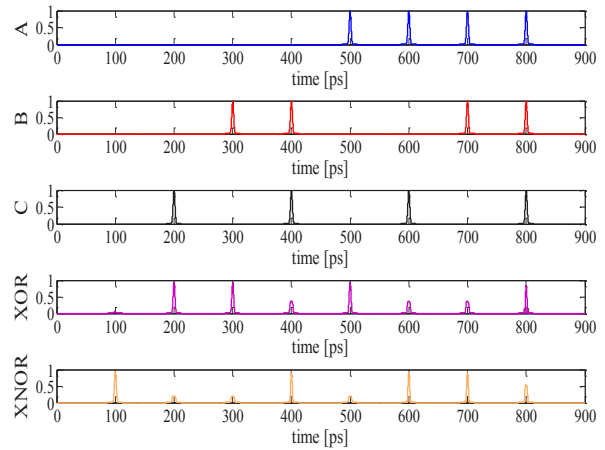
دارد. بنابراین با استفاده از ساختار موازی و افزایش تعداد حلقه‌ها، می‌توان به انواع گیت‌های نوری با ورودی‌های بیش‌تر و همچنین با ترکیب آنها با یکدیگر به عناصر مهمی همچون حافظه‌های نوری مبتنی بر تشدیدکننده‌های ریزحلقه دست یافت.



شکل ۱۰. خروجی‌های مربوط ساختار هفت حلقه‌ای موازی برای به دست آوردن: (a) سیگنال A' ، (b) سیگنال B' ، (c) سیگنال C' ، (d) سیگنال A ، (e) سیگنال B ، (f) سیگنال C

نتیجه‌گیری

تحلیل کلید تمام نوری با استفاده از تشدیدکننده‌های ریزحلقه در سیستم مواد GaAs/AlGaAs با استفاده از روش پمپ نوری بررسی شد. همچنین اثرات غیرخطی و ویژگی‌های لازم برای رسیدن به یک گیت مطلوب بیان شده و برای ساختار با شعاع و ضرایب تزویج مناسب، این ویژگی‌ها اعمال شد. با استفاده از اتصال موازی هفت تشدیدکننده ریزحلقه امکان دستیابی به گیت‌های منطقی سه ورودی بازآرایی‌پذیر به وجود آمد.



شکل ۹. خروجی‌های مربوط به گیت‌های XOR و XNOR: (a) سیگنال پمپ A ، (b) سیگنال پمپ B ، (c) سیگنال پمپ C ، (d) عملگر XOR، (e) گیت XNOR، همچنین گیت‌های منطقی بافر A ، B و C و معکوس‌کننده A' ، B' و C' براساس ترکیب خروجی‌های معرفی شده در جدول ۴ قابل دسترس است.

جدول ۴. ترکیب خروجی‌های ساختار شکل ۳ برای دستیابی به گیت‌های بافر A ، B و C و گیت‌های معکوس‌کننده A' ، B' و C'

ترکیب خروجی‌ها	عملگر منتهی
$E_{13}+E_{14}+E_{d3}+E_{d4}$	A
$E_{d3}+E_{13}+E_{d6}+E_{16}$	B
$E_{13}+E_{14}+E_{16}+E_{17}$	C
$E_{d6}+E_{16}+E_{d7}+E_{17}$	A'
$E_{14}+E_{d4}+E_{d7}+E_{17}$	B'
$E_{d3}+E_{d4}+E_{d6}+E_{d7}$	C'

نتایج شبیه‌سازی گیت‌های معرفی شده به ازای اعمال پمپ $A=00001111$ ، پمپ $B=00110011$ و پمپ $C=01010101$ سیگنال پیوسته در ورودی حلقه اول انجام شده است. در این شرایط نیز کل مدت زمان اعمال این سیگنال‌ها ۹۰۰ پیکو ثانیه است. خروجی‌های ساختار در شکل ۱۰ نشان داده شده است. بررسی نتایج به دست آمده از ساختار مبتنی بر اتصال موازی تشدیدکننده‌های ریزحلقه مشخص شد که این ساختار قابلیت ایجاد کلیه عملگرهای سه ورودی و توابع منطقی سه ورودی را

- [12] M. Kohtoku, S. Oku, Y. Kadota, Y. Shibata, Y. Yoshikuni, "200 GHz FSR Periodic multi/demultiplexer with flattened transmission and rejection band by using a Mach Zehnder interferometer with a ring resonator", IEEE Photon. Technol. Lett, vol.12, pp. 1174-1176, 2000
- [13] I. Kiyat, C. Kocabas, A. Aydinli, "Integrated micro ring resonator displacement sensor for scanning probe microscopies", J. Micromechanics Microengineering, vol. 14, pp.374-381, 2004
- [14] B. Bholra, H.C. Song, H. Tazawa, W.H. Steier, "Polymer micro resonator strain sensors", IEEE Photon. Technol. Lett, vol.14, pp.867-869, 2005
- [15] C. Chaichuay, P.P. Yupapin, P. Saeung, "The serially coupled multiple ring resonator filters and Vernier effect", Optica Applicata, vol. 39.1, pp. 175-194, 2009
- [16] R. Grover, et al, "Parallel-cascaded semiconductor microring resonators for high-order and wide-FSR filters", Journal of Light wave Technology, vol. 20.5, pp. 872, 2002
- [17] I. Chremmos, S. Otto, and N. Uzunoglu, "Photonic micro resonator research and applications", vol. 156, Springer, 2010
- [18] Pelleg, Joshua, "Mechanical properties of materials", vol. 190. Springer Science & Business Media, 2012
- [19] Bloembergen, Nicolaas, "Nonlinear optics", World Scientific, 1996
- [۲۰] Shen, Yuen-Ron, "The principles of nonlinear optics", New York, Wiley-Interscience, vol.575, 1984
- [۲۱] W. R. Boyd, "Nonlinear optics", Academic press, 2003
- [22] S. Boscolo, K.J. Blow, "Interferometric optical switch enhanced by a multi resonance ring resonator structure", J. Mod. Opt, vol.52, pp. 845-855, 2005
- [23] L. Zhang, R. Ji, et al, "Simultaneous implementation of XOR and XNOR operations using a directed logic circuit based on two microring resonators", Opt. Exp, vol.19, pp. 6524-6540, 2011
- [24] M.B.J. Diemeer, "Polymeric thermo optic space switches for optical communications", Opt. Mat, vol. 9, pp. 192-200. 1998
- [1] R. Meade, J. Joannopoulos and O. L. Alerhand. "Optoelectronic integrated circuits and method of fabricating and reducing losses using same." U.S. Patent 5,526,449, issued June 11, 1996
- [2] Vlasov, A. Yurii., and J. Sharee, "Losses in single-mode silicon-on-insulator strip waveguides and bends", Optics express, vol.12.8, pp. 1622-1631, 2004
- [3] Xiao, Shijun, et al. "Silicon-on-insulator microring add-drop filters with free spectral ranges over 30 nm", Journal of lightwave Technology, vol. 26.2, pp. 228-236, 2008
- [4] Barwicz, Tymon, et al, "Microring-resonator-based add-drop filters in SiN: fabrication and analysis", Optics express, vol.12.7, pp. 1437-1442, 2004
- [5] J. Azaña, L.R. Chen, "Multi wavelength optical signal processing using multi stage ring resonators", IEEE Photon. Technol. Lett, vVol. 14, pp. 654-656, 2002
- [6] M. Razaghi and M. Sayfi Laleh, "Design and modeling of flower like microring resonator", Optics Communications, vol. 366, pp. 370-38, 2016
- [7] محمد رزاقی، محمد سیفی لاله، طراحی و مدل سازی فیلتر تمام نوری براساس اتصال سری پنج تشدیدکننده ریزحلقه، فصلنامه صنایع الکترونیک ایران، پاییز ۱۳۹۳، دوره ۵، شماره ۷۳-۸۳
- [8] Griffel, Giora, "Synthesis of optical filters using ring resonator arrays", IEEE Photonics Technology Letters, vol. 12.7, pp. 810-812, 2000
- [9] T.M. Hill, H.J.S. Dorren, T. de Vries, X.J.M. Leijtens, J.H. den Besten, B. Smalbrugge, J.S. Oei, H. Binsma, G.D. Khoe, M.K. Smit, "A fast low-power optical memory based on coupled microring lasers", Nature, vol. 432, pp. 206-209, 2004
- [10] S.H. Kim, H.Y. Ryu, H.G. Park, G.H. Kim, Y.S. Choi, Y.H. Lee, J.S. Kim, "Two-dimensional photonic crystal hexagonal waveguide ring laser", Appl. Phys. Lett, vol.81, pp. 2499-2501, 2002
- [11] G.T. Palocz, Y. Huang, A. Yariv, S. Mookherjee, "Polymeric Mach Zehnder Interferometer using serially coupled microring resonators", Opt. Express, vol.11, pp.2666-2671, 2003

- [33] GP. Agrawal, NA. Olsson, "Self-phase modulation and spectral broadening of optical pulses in semiconductor laser amplifiers", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. 25(11):pp. 2297-306, 1989
- [34] M. S. Shahriar, et al, "Coherent and incoherent beam combination using thick holographic substrates", Optics communications, vol. 220.1, pp. 75-83 ,2003
- [35] E. Serabyn, and M. M. Colavita, "Fully symmetric nulling beam combiners", Applied Optics, vol. 40.10, pp. 1668-1671, 2001
- [36] A. Bunkowski, et al, "Input–output relations for a three-port grating coupled Fabry–Perot cavity", Optics letters, vol. 30.10, pp. 1183-1185, 2005
- [37] A. Bunkowski, et al, "Low-loss grating for coupling to a high-finesse cavity." Optics letters, vol. 29.20, pp. 2342-2344, 2004
- [38] H. N. Yum, et al, "Demonstration of a multi-wave coherent holographic beam combiner in a polymeric substrate", Optics letters, vol. 30.22, pp. 3012-3014, 2005
- [39] H. N. Yum, et al, "Holographic optical beam combining, splitting and cross-coupling: numerical analysis and experimental investigation", Journal of Holography and Speckle, vol. 5.2, pp. 197-209, 2009
- [25] H. Jianguang, L. Akhlesh, "Semiconductor split ring resonators for thermally tunable terahertz metamaterials", J. Mod. Opt, vol. 56, pp. 554–557. 2009
- [26] L. Shiyun, I. Yasuhiko, W. Kazumi, "Demonstration of optical computing logics based on binary decision diagram", Opt. Exp. vol. 20 (2), pp. 1378–1384, 2012
- [27] V.R. Almeida, C.A. Barrios, R.R. Panepucci, M. Lipson, "All-optical control of light on a silicon chip", Nature, vol.431, pp. 1081–1084, 2004
- [28] E. Krioukov, D.J.W. Klunder, A. Driessen, J. Greve, C. Otto, "Integrated optical micro cavities for enhanced evanescent wave spectroscopy", Opt. Lett, vol.27, pp. 1504–1506, 2002
- [29] J. K. Rakshit, T. Chattopadhyay, J. N. Roy, "Design of ring resonator based all optical switch for logic and arithmetic operations a theoretical study," Optik International Journal for Light and Electron Optics, vol. 124(23), pp. 6048–6057, 2013
- [30] J. XL. Kerr, " A new relation between electricity and light: Dielectrified media birefringent", *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, vol. 50.332, pp. 337-348, 1875
- [31] Q. Xu, et al. "12.5 Gbit/s carrier injection based silicon micro-ring silicon modulators", Optics express, vol.15.2, pp. 430-436, 2007
- [32] Rakshit, J. Kumar, and J. Roy, "Design of all optical time division multiplexing scheme with the help of microring resonator", Optica Applicata, vol. 44.1, 2014

