

Simulation and analysis of the all-optical NOT logic gate by XPM mechanism using Mach-Zehnder interferometer based on photonic crystal semiconductor optical amplifier

A.Nosratpour*, KH. Heydarian,

* Department of Electrical Engineering, Sanandaj Branch, Islamic Azad university, Sanandaj, Iran

(Received: 2022/04/10; Accepted: 2023/07/29)

Abstract

In this paper, the simulation and analysis of the all-optical NOT logic gate using photonic crystal semiconductor optical amplifier (PC-SOA) based on Mach-Zehnder interferometer and nonlinear cross-phase modulation (XPM) mechanism is performed. The input light pulse sequence used in the design is RZ (Return to Zero). With 4fJ input pulse train energy and 1mA injection current, the most suitable mode for NOT logic gate with 80Gbps bit rate is obtained. The finite difference method (FDM) is used to solve the rate and propagation equations. Also, in this paper for proper performance and better efficiency of the all-optical NOT logic gate, pattern effect (PE) parameters, conversion efficiency (CE), extinction ratio (ER), contrast ratio (CR), quality factor (QF), and gain recovery are simultaneously examined. Another important parameter that plays a vital role in improving PC-SOA as well as the bit rate value is the carrier lifetime. In previous publications, this parameter has been considered as a constant value in PC-SOA equations. Therefore, it can increase the error of the results to some extent. But in this paper, the structure of each PC-SOA and the materials used in it are based on an experimental and valid model. As a result, the carrier lifetime calculations that depend on the carrier density changes are accurately calculated. Also, according to the obtained results, PC-SOA shows a better logical performance than conventional SOA, and due to its much shorter length than SOA, it can be a very suitable candidate for integrated optical circuits.

Keywords: Photonic crystal semiconductor optical amplifier, all-optical NOT logic gate, Mach-Zehnder interferometer, pattern effect, quality factor, contrast ratio, conversion efficiency, and extinction ratio.

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University

© Authors



شبیه‌سازی و تحلیل دروازه منطقی تمام نوری NOT توسط سازوکار XPM با استفاده از تداخل سنج

ماخ زندر مبتنی بر تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی بلور فوتونی

آریز نصرت پور^{۱*}، خسرو حیدریان^۲

۱- استادیار، ۲- دانشجو دکترا، گروه مهندسی برق، واحد سنندج، دانشگاه آزاد اسلامی، سنندج، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۲۱، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۷)

چکیده

در این مقاله شبیه‌سازی و تحلیل دروازه منطقی تمام نوری NOT با استفاده از تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی بلور فوتونی (PC-SOA) مبتنی بر تداخل سنج ماخ زندری و سازوکار غیرخطی مدوله‌سازی فاز متقابل انجام گرفته است. توالی پالس نوری ورودی مورد استفاده در طراحی از نوع بازگشت به صفر است. بانرزی قطار پالس ورودی 4fJ و جریان تزریق 1mA، مناسب‌ترین حالت برای دروازه منطقی NOT با نرخ بیت 80Gbps به دست آمده است. برای حل معادلات نرخ و انتشار از روش عددی تفاضل محدود استفاده شده است. همچنین در این مقاله برای عملکرد مناسب و بازدهی بهتر دروازه منطقی تمام نوری NOT، پارامترهای اثر الگو، نسبت خاموشی، بازده تبدیل، نسبت تضاد، ضریب کیفیت و بازیابی بهره به صورت هم‌زمان مورد بررسی قرار گرفته است. پارامتر مهم دیگری که در بهبود PC-SOA و همچنین مقدار نرخ بیت نقش اساسی دارد، طول عمر حامل است. در انتشارات قبلی ارائه شده این پارامتر در معادلات PC-SOA به صورت مقدار ثابت در نظر گرفته شده است بنابراین می‌تواند خطای نتایج را تا حدی افزایش دهد. اما در این مقاله، ساختار هر PC-SOA و مواد استفاده شده در آن بر اساس یک مدل تجربی و معتبر است. در نتیجه، محاسبات طول عمر حامل که وابسته به تغییرات چگالی حامل است با دقت محاسبه می‌شود. همچنین با توجه به نتایج به دست آمده، PC-SOA عملکرد منطقی بهتری نسبت به SOA معمولی از خود نشان می‌دهد و به دلیل طول بسیار کمتر از SOA، می‌تواند کاندیدای بسیار مناسبی برای مدارهای نوری مجتمع باشد.

کلیدواژه‌ها: تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی بلور فوتونی، تداخل سنج ماخ زندر، اثر الگو، نسبت خاموشی، بازده تبدیل، نسبت تضاد.

ضریب کیفیت

۱- مقدمه

تداخل سنج و سازوکارهای غیرخطی در PC-SOA شامل ترکیب چهار موج^۲ (FWM)، مدوله‌سازی فاز متقابل^۳ (XPM) و مدوله‌سازی بهره متقابل^۴ (XGM) استفاده نمود [۱۵-۱۰]. PC-SOA به علت تغییرات چگالی حامل‌های ناشی از سیگنال نور ورودی و جریان تزریقی در ناحیه فعال دارای عملکردی غیرخطی است و همچنین دارای ساختاری با ضریب شکست متناوب و محیطی با خواص نوری دوره‌ای است که حداقل متشکل از دو ماده با ثابت دی‌الکتریک متناوب و به صورت دوره‌ای است. نور عبوری از ناحیه فعال توسط پهنای باند افزاره کنترل و محدود می‌شود [۴، ۱۶ و ۱۷]. PC-SOA به علت عکس‌العمل بین نور و ماده دارای طول خیلی کوتاه‌تری نسبت به SOA است [۲۳-۱۸] و به همین دلیل برای ساخت دروازه‌های منطقی تمام نوری به صورت مجتمع می‌تواند گزینه مناسب‌تری باشد. تقویت‌کننده‌های نوری نیمه‌هادی دارای کاربردهای

با توجه به پیشرفت علم و نیاز مبرم به انتقال داده‌ها در سرعت‌های خیلی بالا و همچنین برای ردیابی این داده‌های ارسالی، نیاز به شبکه‌ای است که اولاً دارای پهنای باند وسیع و ثانیاً پرسرعت و کم‌حجم باشد، به همین دلیل از شبکه‌های تمام نوری استفاده می‌شود که بتواند نیازهای پیشرفت علم را برآورده کند. لازم به ذکر است در سال‌های اخیر بلورهای فوتونی نقش بسزایی در ارتقاء شبکه‌های نوری داشته است [۲۱]. برای ساخت، طراحی و شبیه‌سازی شبکه‌های تمام نوری نیاز به تجهیزات و مدارات منطقی تمام نوری است، یکی از این تجهیزات بسیار مهم دروازه‌های منطقی تمام نوری از جمله دروازه پرکاربرد NOT است. یکی از افزاره‌های کلیدی که برای طراحی و شبیه‌سازی دروازه‌های منطقی تمام نوری مورد استفاده قرار می‌گیرد تقویت‌کننده‌های نوری نیمه‌هادی بلور فوتونی^۱ (PC-SOA) است [۳-۹]. برای طراحی و شبیه‌سازی دروازه منطقی تمام نوری به کمک PC-SOA می‌توان از ساختارهای

^۲ Four wave mixing

^۳ Cross phase modulation

^۴ Cross gain modulation

* رایانامه نویسنده مسئول: Arez.nosrat@gmail.com

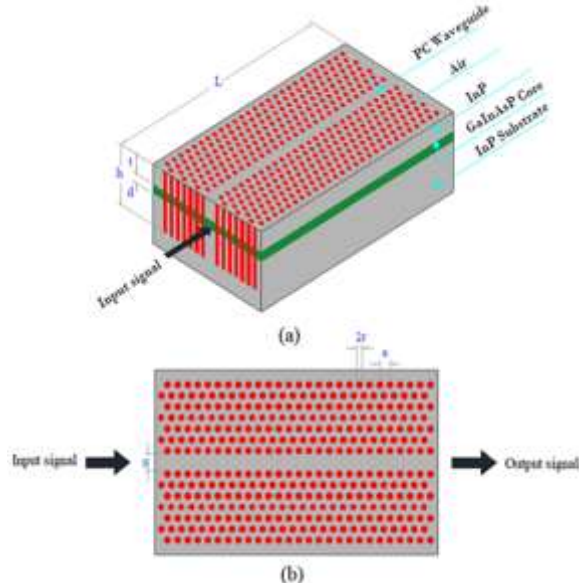
^۱ Photonic crystal semiconductor optical amplifier



۲- طراحی ساختار PC-SOA

مطابق شکل (۱) ساختار طراحی شده دارای سه لایه است. ماده تشکیل دهنده پایین ترین لایه (p-cladding) و بالاترین لایه (n-) InP (cladding) است که ضریب شکست آن $n=3.17$ است. لایه میانی یا ناحیه فعال که ماده تشکیل دهنده آن GaInAsP است دارای ضریب شکست $n=3.45$ است که هسته اصلی این ساختار محسوب می شود. ضخامت لایه بالایی $t = 1.58a$ و ضخامت لایه میانی $d = 1.32a$ است. طول افزاره $L = 9\mu m$ است. همچنین ارتفاع حفره های هوا $h = 5.26a$ است. $a = 0.325\mu m$ ثابت شبکه است که برابر بافاصله بین مرکز استوانه های هوایی است، $2r = 0.72a$ قطر استوانه های حفره های هوایی و $w = 0.5\mu m$ عرض موج بر است. لایه فوقانی لایه n-cladding را هوا تشکیل داده است که ضریب شکست هوا برابر با $n=1$ است [۴، ۱۰ و ۳۷]. برای محاسبه ضریب شکست گروه (n_g) و تلفات تشعشی (α) مطابق شکل (۲) از روش FDTD به صورت ۳ بعدی استفاده شده است [۴، ۱۰]. در این مقاله مقدار $n_g = 100$ و $\alpha_{int} = 1450\text{cm}^{-1}$ برای PC-SOA در محاسبات آورده شده است [۳۷ و ۴].

لازم به ذکر است که حفره های هوا عمیق در نظر گرفته شده اند زیرا هرچه عمیق تر باشند عمل خنک کنندگی و کاهش مقاومت حرارتی بهتری در تقویت کننده صورت می گیرد [۳ و ۱۰]. مطابق شکل (۱) سیگنال نوری به ناحیه موج بر اعمال و از طریق لایه n-cladding نیز جریان به ناحیه فعال تزریق می شود که با این روش تقویت سیگنال ورودی انجام می پذیرد [۴۰ و ۳۹].



شکل (۱). (الف) نمای سه بعدی از ساختار PC-SOA، (ب) نمای دوبعدی از ساختار PC-SOA

دیگری از جمله تقویت کننده داخلی^۱، پیش تقویت کننده^۲ و تقویت کننده اصلی^۳ هستند [۲۴ و ۵].

تاکنون گزارش های زیادی از طراحی دروازه های منطقی تمام نوری با استفاده از SOA ارائه شده است که می توان به دروازه های AND، NOR، NAND، XOR و XNOR اشاره کرد [۲۵-۳۲]. همچنین در سال ۲۰۱۲ دروازه منطقی تمام نوری NOT با استفاده از تقویت کننده نوری نیمه های کوانتوم دات^۴ و مبتنی بر ساختار ماخ زندر^۵ (MZI) گزارش شد [۳۳]. با توجه به مزیت ها و ویژگی های خاص ساختار بلور فوتونی، در سال های اخیر طراحی دروازه های منطقی با استفاده از PC-bulk-SOA و مبتنی بر ساختار MZI مورد توجه قرار گرفته است که می توان به موارد XOR [۳۴]، NOR و XNOR [۳۵]، NAND [۳۶] و AND [۳۷] اشاره کرد. لازم به ذکر است بر اساس دانش نویسندگان تاکنون دروازه منطقی تمام نوری NOT بر اساس PC-bulk-SOA به صورت مجزا مورد تحلیل و بررسی قرار نگرفته است. در این مقاله دروازه منطقی NOT با استفاده از MZI و بر اساس سازوکار غیرخطی مدوله سازی فاز متقابل (XPM) طراحی و شبیه سازی شده است. در این طراحی پارامترهای اثر الگو^۶ (PE)، نسبت خاموشی^۷ (ER)، بازده تبدیل^۸ (CE)، نسبت تضاد^۹ (CR)، ضریب کیفیت^{۱۰} (QF) و بازایی بهره به صورت همزمان بررسی می گردد [۳۸ و ۴]. در این مقاله برای حل معادلات نرخ و انتشار از روش تفاضل محدود^{۱۱} (FD) بصورت کد نویسی در محیط نرم افزار متلب^{۱۲} استفاده شده است. همچنین برای محاسبه ضریب شکست گروه و تلفات تشعشی از روش عددی تفاضل محدود در حوزه زمان^{۱۳} (FDTD) در نرم افزار آرسافت^{۱۴} استفاده شده است [۱۴].

این مقاله به شرح ذیل جمع بندی شده است: در قسمت ۱ مقدمه بیان شده است. قسمت ۲ شامل طراحی ساختار PC-SOA است. تئوری عملکرد ساختار PC-SOA در قسمت ۳ توضیح داده شده است. در قسمت ۴ طراحی ساختار دروازه منطقی تمام نوری NOT بیان شده است. نتایج شبیه سازی در قسمت ۵ نشان داده شده است و در نهایت جمع بندی نتایج و دستاوردهای به دست آمده در این مقاله در قسمت ۶ توضیح داده شده است.

- ¹ In-line amplifier
- ² Pre amplifier
- ³ Booster amplifier
- ⁴ Quantum dot semiconductor optical amplifier
- ⁵ Mach Zehnder Interferometer
- ⁶ pattern effect
- ⁷ extinction ratio
- ⁸ conversion efficiency
- ⁹ contrast ratio
- ¹⁰ quality factor
- ¹¹ Finite difference
- ¹² MATLAB
- ¹³ Finite difference time domain
- ¹⁴ RSOFT

مقطع ناحیه فعال و W و d به ترتیب عرض و ارتفاع ناحیه فعال است. $\hbar = h/2\pi$ برابر با ثابت پلانک، $\omega_0 = 2\pi f_0$ برابر با فرکانس زاویه‌ای نوری و τ_c طول عمر حامل است که به صورت رابطه‌ی (۴) بیان می‌شود:

$$\frac{1}{\tau_c} = A + BN + CN^2 \quad (4)$$

A نرخ بازترکیب سطحی^۶، B نرخ بازترکیب خود به خودی^۷ و C نرخ بازترکیب اژه^۸ است.

معمولاً در تقویت‌کننده‌های نوری برای بررسی و تحلیل انتشار پالس در ناحیه فعال، معادله نرخ (۳) بر اساس تغییرات زمانی بهره نوشته می‌شود. بنابراین با ترکیب معادلات (۲) الی (۴) معادله تغییرات زمانی بهره به صورت معادله (۵) به دست می‌آید:

$$\frac{\partial g}{\partial t} = \frac{I\Gamma G_0}{qV} - \Gamma G_0 \left(A \left(\frac{g}{\Gamma G_0} + N_0 \right) + B \left(\frac{g}{\Gamma G_0} + N_0 \right)^2 + c \left(\frac{g}{\Gamma G_0} + N_0 \right)^3 \right) - \left(\frac{n_g}{n_{eq}} \right) \frac{g|A_m|^2}{E_{sat}} \quad (5)$$

E_{sat} انرژی اشباع تقویت‌کننده است که با رابطه (۶) بیان می‌شود:

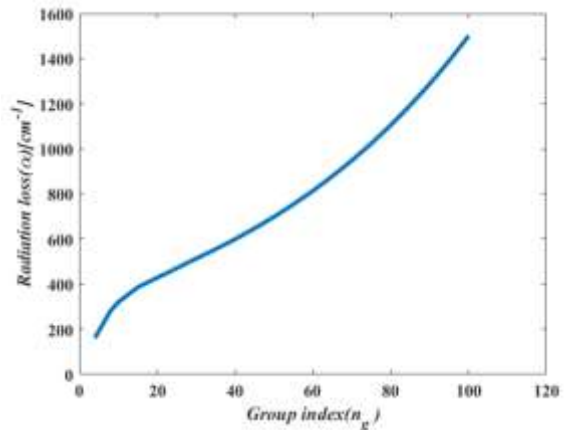
$$E_{sat} = \frac{hf_0\sigma}{\Gamma G_0} \quad (6)$$

همچنین، تغییرات فاز سیگنال ورودی در موجبر PC-SOA به صورت رابطه (۷) تعریف می‌شود:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{1}{2} \left(\frac{n_g}{n_{eq}} \right) \alpha g \quad (7)$$

۴- طراحی ساختار دروازه منطقی تمام نوری

یکی از پدیده‌های نو ظهور و منحصر به فرد در بلورهای فوتونی مبحث نور کند است که زمینه مناسبی برای کنترل پاشندگی و سرعت نور است. با انتشار پالس نوری در ناحیه نور کند یا همان ناحیه موجبر که در شکل (۱) نشان داده شده است، پالس نوری در مکان فشرده و چگالی انرژی پالس افزایش می‌یابد. این پدیده به دلیل افزایش برهم کنش نور با ماده (محیط) است. افزایش چگالی انرژی پالس در موجبر موجب تقویت پالس نوری می‌شود و ازینرو باعث کاهش طول ناحیه موجبری در ساختار PC-SOA می‌شود [۴ و ۹-۱۱].



شکل (۲). نمودار تلفات تشعشعی نسبت به ضریب شکست گروه در PC-SOA [۳۷]

۳- تئوری ساختار PC-SOA

در ناحیه فعال PC-SOA انتشار سیگنال نور از معادله (۱) پیروی می‌کند:

$$\frac{1}{v_g} \frac{dA_m}{dt} + \frac{\partial A_m}{\partial z} = \left(\frac{n_g}{n_{eq}} g - \alpha_{int} \right) A_m \quad (1)$$

در این معادله $A_m = A_m(z, t)$ دامنه موج منتشرشده با تغییرات ملایم پوش^۱ مربوط به پالس نوری است. علاوه به این، $A_m = \sqrt{P} \exp(i\phi)$ است که $P(z, t)$ و $\phi(z, t)$ به ترتیب توان و فاز سیگنال ورودی هستند. $v_g = c/n_g$ سرعت گروه^۲ و c سرعت نور در خلأ است. n_{eq} ضریب شکست استاندارد SOA، α_{int} تلفات تشعشعی، α ضریب افزایش پهنای خط^۳ و g بهره نوری است که به صورت رابطه (۲) بیان شده است:

$$g(N) = \Gamma G_0 (N - N_0) \quad (2)$$

در این رابطه Γ ضریب تحدید نوری^۴ است، G_0 ضریب بهره خطی، N چگالی حامل و N_0 شفافیت چگالی حامل^۵ است. معادله نرخ در PC-SOA به صورت معادله‌ی (۳) تعریف می‌شود:

$$\frac{dN}{dt} = \frac{I}{eWdL} - \frac{N}{\tau_c} - \left(\frac{c}{n_{eq}} \times \frac{g(N)|A_m|^2}{\hbar\omega_0\sigma_m} \right) \quad (3)$$

در معادله (۳) I ، e و L به ترتیب جریان الکتریکی تزریقی، بار الکتریکی و طول ناحیه فعال است. $\sigma = W \cdot d$ برابر است با سطح

⁶ Surface recombination rate

⁷ Radiative recombination coefficient

⁸ Auger recombination rate

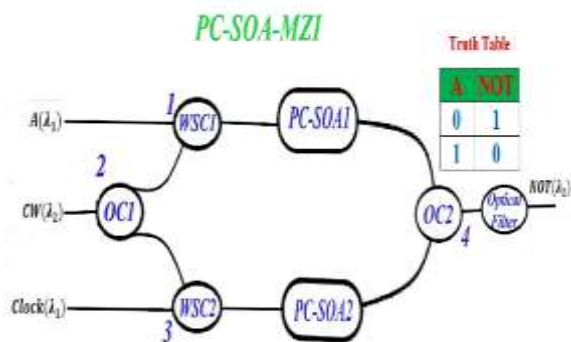
¹ Slowly varying envelop

² Group velocity

³ Line-width enhancement factor

⁴ Optical confinement factor

⁵ Transparency carrier density



شکل (۳). دروازه منطقی NOT با ساختار ماخ زندی و جدول درستی در PC-SOA همراه با فیلتر نوری

در ساختار MZI برای تولید دروازه NOT قطار پالس A و قطار پالس Clock به بازوهای MZI اعمال می‌کنیم که باعث مدوله شدن بهره‌ی PC-SOA شده و به این طریق فاز هم‌جهت با سیگنال CW ایجاد می‌شود. در خروجی MZI سیگنال CW تداخل ایجاد نموده و باعث تولید سیگنال NOT می‌شود که توسط معادلات **Error! Reference source not found.** الی **Error! Reference source not found.** بیان شده است.

$$P_1(t) = P_A(t) + \frac{P_{CW}}{2} \quad (11)$$

$$P_2(t) = P_{Clock} + \frac{P_{CW}}{2} \quad (12)$$

$$TF(t) = 0.25(G_1(t) + G_2(t) - 2\sqrt{G_1(t) \cdot G_2(t)} \cdot \cos(\Delta\phi_{NL})) \quad (13)$$

$$\Delta\phi_{NL}(t) = \Delta\phi_1(t) - \Delta\phi_2(t) = \left(-\frac{\alpha}{2}\right) \cdot \ln\left(\frac{G_2}{G_1}\right) \quad (14)$$

$$P_{Out-Not}(t) = P_{CW}(t) \cdot TF(t) \quad (15)$$

توان قطار پالس A و توان سیگنال Clock، همچنین $P_1(t)$ و $P_2(t)$ به ترتیب توان سیگنال CW، توان قطار پالس A و توان سیگنال Clock است. همچنین $P_1(t)$ و $P_2(t)$ به ترتیب توان سیگنال ورودی PC-SOA₁ و توان سیگنال ورودی به PC-SOA₂ و توان سیگنال خروجی دروازه منطقی تمام نوری NOT است. $TF(t)$ تابع انتقال دروازه NOT است که در رابطه (۱۳) نشان داده شده است [۱۳]. $G_1(t)$ و $G_2(t)$ بهره وابسته به زمان، $\Delta\phi_1(t)$ و $\Delta\phi_2(t)$ فاز وابسته به زمان و $\Delta\phi_{NL}(t)$ اختلاف فاز بین دو بازوی MZI است که توسط رابطه (۱۴) بیان شده است [۱۳]. با توجه به معادله (۱۳) حالت بهینه زمانی است که سیگنال CW به نسبت مساوی به دو بازو

هنگامی که دو موج نوری با گذشت زمان همپوشانی انجام می‌دهند، فاز یکی از پالس‌ها با پالس نوری دیگر مدوله می‌شود. به عبارتی دیگر یک جابجایی فاز در موجبر نوری به وجود می‌آید که ناشی از حضور میدان نوری دیگری (موج نوری دوم) در حین انتشار موج نوری اول است. این آمیختگی را مدوله‌سازی فاز متقابل (XPM) می‌نامند [۴، ۱۰، ۱۱، ۳۴ و ۳۶].

در **Error! Reference source not found.** ساختار دروازه منطقی تمام نوری NOT نشان داده شده است. در هر بازوی MZI یک PC-SOA قرار داده شده است که با تزریق سیگنال‌های نوری می‌توان اختلاف فاز لازم بین MZI را ایجاد نمود. این اختلاف فاز به علت تغییر چگالی حامل‌ها و ضریب شکست در PC-SOA و ناشی از سیگنال داده، Clock و موج پیوسته^۱ (CW) ورودی به هر بازو و کاهش تجمع حامل‌ها در آن بازو است. بنابراین با این اختلاف فاز بین بازوها، می‌توان عملکرد منطقی لازم را ایجاد کرد [۳۴، ۳۹، ۴۶-۴۱].

مطابق شکل (۳) دو سیگنال ورودی موج پیوسته (CW) و Clock به‌عنوان سیگنال‌های کنترلی و سیگنال A به‌عنوان قطار پالس داده تعریف می‌شود. قطار پالس A و Clock (با طول موج λ_1) به‌طور هم‌زمان جداگانه از طریق یک جفت کننده انتخابی طول موج^۲ (WSC) به بازوهای MZI بالا و پایین وارد می‌شوند. هدف اصلی استفاده از WSC ها جفت کردن سیگنال‌های ورودی و سیگنال‌های کنترلی به PC-SOA است درحالی‌که تمام طول موج‌های ناخواسته دیگر را حذف می‌کند. لازم به ذکر است که شکل موج و انرژی سیگنال A و Clock کاملاً یکسان هستند. سیگنال CW (با طول موج λ_2) از طریق جفت کننده نوری ورودی^۳ (OC1) به یک جفت سیگنال مساوی تقسیم می‌شود و طبق شکل (۳) به‌صورت مساوی به WSC های بالا و پایین وارد می‌شود و در نهایت به تقویت کننده‌های نوری نیمه‌هادی بلور فوتونی یکسان واقع در هر بازوی MZI وارد می‌شوند. البته دقت شود که طول موج‌های λ_1 و λ_2 باهم متفاوت هستند. در ابتدا MZI متعادل نیست، زمانی که $A=1$ و $Clock=1$ باشد سیگنال CW در دو بازو یک اختلاف فاز مساوی به وجود آورده که در خروجی باهم ترکیب شده و حاصل آن '0' خواهد شد، وقتی $A=0$ و $Clock=1$ باشد سیگنال CW به دلیل پدیده XPM در بازوی پایینی اختلاف فاز به وجود آورده ولی در بازوی بالایی تغییر فاز اضافی نخواهد داشت، بنابراین در خروجی تداخل سازنده‌ای اتفاق می‌افتد و خروجی برابر با '1' می‌شود [۲۹، ۳۱، ۳۵، ۴۳ و ۴۷].

¹ Continuous wave

² Wavelength selective coupler

³ Optical coupler

جدول (۱). پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی دروازه منطقی تمام نوری NOT [۳۸، ۴]

پارامتر	نشانه	مقدار	واحد
ضریب شکست معادل SOA استاندارد	n_{eq}	3	-
ضریب تحدید نوری	Γ	0.191	-
بهره خطی	G_0	4×10^{-16}	cm^2
شفافیت چگالی حامل	N_0	2×10^{18}	s^{-1}
نرخ باز ترکیب سطحی	A	2×10^8	$\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$
نرخ باز ترکیب خودبه‌خودی	B	1×10^{-10}	$\text{cm}^3 \text{s}^{-1}$
نرخ باز ترکیب اژه	C	5×10^{-29}	$\text{cm}^6 \text{s}^{-1}$
عرض ناحیه فعال	W	0.5	μm
طول ناحیه فعال SOA	L_{SOA}	300	μm
طول ناحیه فعال PC-SOA	L_{PC-SOA}	9	μm

نسبت تضاد (CR) مطابق معادله (۲۰) برابر است با نسبت توان متوسط قله '1' سیگنال خروجی (P_{mean}^1) به توان متوسط '0' سیگنال خروجی (P_{mean}^0) [۵۰].

$$CR = 10 \log \left(\frac{P_{mean}^1}{P_{mean}^0} \right) \quad (20)$$

همچنین ضریب کیفیت (QF) مطابق معادله (۲۱) برابر با نسبت تفاضل توان پیک متوسط '1' سیگنال خروجی (P_{mean}^1) و توان پیک متوسط '0' سیگنال خروجی (P_{mean}^0) به حاصل جمع مقدار انحراف استاندارد '1' (σ_1) و مقدار انحراف استاندارد '0' (σ_0) است [۵۰].

$$QF = 10 \log \left(\frac{P_{mean}^1 - P_{mean}^0}{\sigma_1 + \sigma_0} \right) \quad (21)$$

با اعمال قطار پالس داده '0' به درگاه ۱ شکل (۳) و قطار پالس Clock '1' مطابق با شکل (۴ الف) به درگاه ۳ شکل (۳)، در خروجی شکل (۳)، قطار پالس شکل (۴ ب) به دست می‌آید که به دلیل پدیده بازبایی بهره سطح توان اولیه قله دروازه NOT تولیدی در طول زمان افت می‌کند. زمانی که یک‌رشته پالس طولانی به PC-SOA داده شود بهره زمان کافی برای بازبایی را نداشته و سطح توان پالس خروجی نمی‌تواند به مقدار سطح اولیه خود بازگردد. بنابراین توان قله پالس خروجی در طول زمان شروع به افت می‌کند تا به یک مقدار ثابت برسد که بعد از آن سطح توان قله خروجی بدون تغییر باقی می‌ماند. شکل (۴ ج) نمودار چشمی تغییرات PE (تغییرات ناشی از سطح قله توان خروجی برای رشته پالس طولانی) را برای خروجی دروازه منطقی تمام نوری NOT نشان می‌دهد.

تزیق گردد و همچنین خروجی دو بازو نیز به صورت مساوی باهم تداخل داشته باشند و $\Delta \phi_{NL}(t) = \pi$ باشد [۱۳].

۵- نتایج شبیه‌سازی دروازه منطقی تمام نوری NOT

پارامترهای استفاده شده در شبیه‌سازی در جدول (۱) لیست شده است [۴]. در این شبیه‌سازی قطار پالس ورودی به شکل سالیوتونی و به صورت معادله (۱۶) تعریف می‌شود.

$$P_{in(A)}(z, t) = \sum_{k=1}^N a_{k(CW.C.D)} \left(\frac{E_0}{2\tau_{FWHM}} \right) \text{sech}^2 \left(\frac{-(t - kT)}{\tau_{FWHM}} \right) \quad (16)$$

τ_{FWHM} به‌عنوان عرض کامل در نیمی از حداکثر ($FWHM^1$) پالس‌های ورودی طبق رابطه $\tau_P = 1.7627\tau_{FWHM}$ تعریف می‌شود که در این مقاله $\tau_{FWHM} = 3\text{ps}$ است. E_0 و T به ترتیب انرژی و دوره تناوب سیگنال‌های ورودی هستند. برای بهبود عملکرد سیستم، اثر الگو (PE) به صورت معادله (۱۷) مورد بررسی قرار می‌گیرد [۱۱ و ۳۸].

$$PE = 10 \lg(P_{max}/P_{min}) \quad (17)$$

P_{max} حداکثر توان قله سیگنال و P_{min} حداقل توان قله سیگنال دروازه NOT تولیدی است. زمانی که یک قطار پالس '0' به PC-SOA وارد می‌شود به علت بازبایی بهره^۲ توان سیگنال خروجی اولیه دروازه NOT در طول زمان شروع به افت نموده تا اینکه تقویت‌کننده به حالت اشباع برسد که بعد از آن توان سیگنال خروجی تقریباً ثابت خواهد ماند [۱۱، ۳۶ و ۳۸].

بازده تبدیل (CE) مطابق معادله (۱۸) برابر است با نسبت توان قله سیگنال خروجی $P_{output-NOT}$ به قله سیگنال ورودی $P_{input-A}$ [۱۰، ۳۸، ۵۰ و ۴۸].

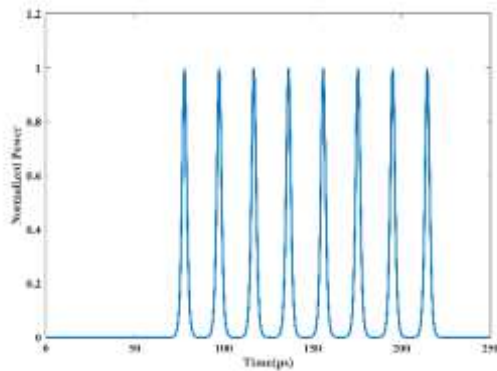
$$CE = 10 \log \left(\frac{P_{output-NOT}}{P_{input-A}} \right) \quad (18)$$

نسبت خاموشی (ER) مطابق معادله (۱۹) برابر با نسبت کمینه قله '1' (P_{min}^1) سیگنال خروجی به بیشینه قله '0' سیگنال خروجی (P_{max}^0) است [۳۶ و ۴۰].

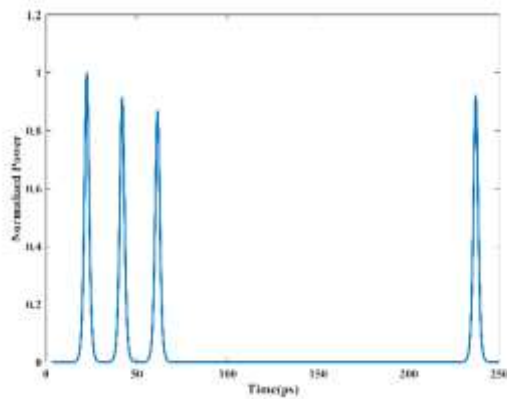
$$ER = 10 \log \left(\frac{P_{min}^1}{P_{max}^0} \right) \quad (19)$$

¹ Full width at half maximum

² Gain recovery phenomena



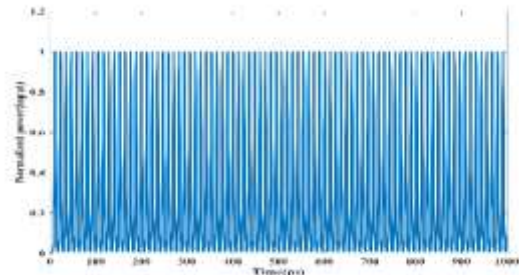
(الف)



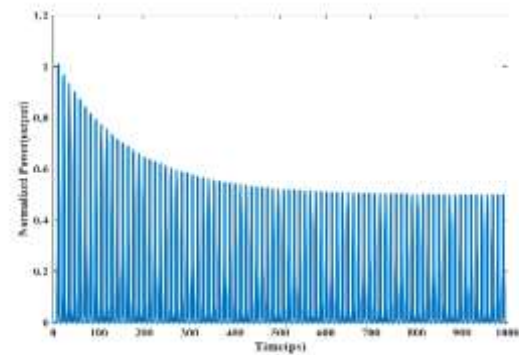
(ب)

شکل (۵). نمایش بازبایی بهره در PC-SOA برای دروازه NOT (الف) پالس ورودی به درگاه ۱ که تعدادی از بیت‌ها صفر و یک شده‌اند، (ب) خروجی دروازه NOT که بازبایی بهره را نشان می‌دهد.

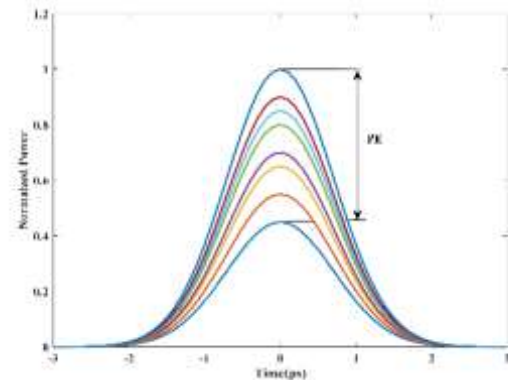
شکل (۶) مقایسه PE برحسب نرخ بیت بین PC-SOA و SOA در دروازه منطقی تمام نوری NOT نسبت به تغییرات جریان تزریقی را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل (۶) نشان داده شده است با افزایش نرخ بیت مقدار PE افزایش می‌یابد. افزایش نرخ بیت ناشی از کاهش فاصله بین بیت‌های سیگنال ورودی است، از این رو باعث می‌شود که PC-SOA و SOA زمانی کافی برای بازبایی بهره و برگشت سطح توان خروجی به حالت اولیه خود را نداشته باشند و در نتیجه افزایش PE را در پی خواهد داشت [۱۱]. از طرفی دیگر افزایش جریان تزریقی باعث تشدید ریزش حامل‌ها می‌شود. از این رو تقویت‌کننده در حالت اشباع قرار می‌گیرد [۱۱]. با قرار گرفتن PC-SOA و SOA در حالت اشباع این افزاره‌ها زمان بیشتری برای بازبایی بهره لازم دارند، در نتیجه افزایش PE را به دنبال خواهد داشت. با اعمال سیگنال $E_{CLK} = E_A = 4fJ$ به درگاه‌های ۱ و ۳ شکل (۳) و توان $P_{CW} = 0.001P_{sat}$ به درگاه ۲، نرخ بیت بهینه $80Gbps$ با جریان تزریقی $I = 1mA$ و $I = 80mA$ به ترتیب برای PC-SOA و SOA به دست می‌آید. علت تفاوت بالای جریان تزریقی ناشی از تفاوت در پارامترهای L ، n_g و a_{int} می‌باشد.



(الف)



(ب)

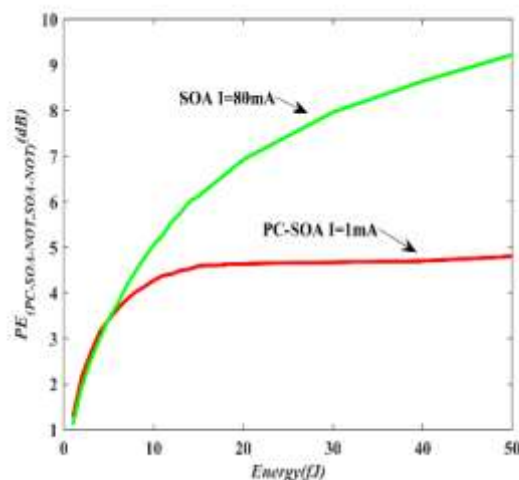


(ج)

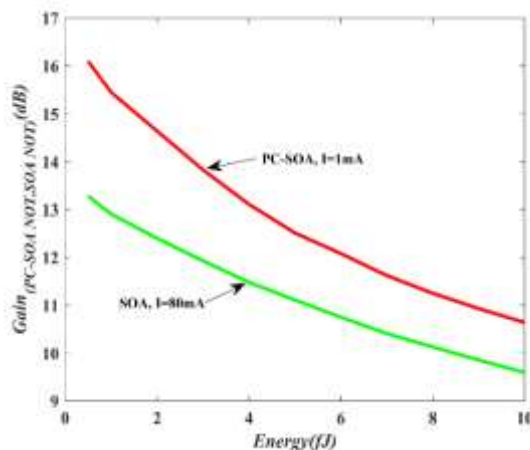
شکل (۴). (الف) قطار پالس Clock، (ب) سیگنال خروجی دروازه NOT (ج) نمودار چشمی PE بر اساس خروجی دروازه NOT

لازم به ذکر است که طول رشته پالس برای اندازه‌گیری PE از نمودار چشمی برابر $2^6 - 1$ است. از این رو با توجه به شکل (۴) مقدار P_{min} تولیدشده در این توالی بیت به یک سطح توان ثابت رسیده است و با افزایش تعداد بیت‌ها، تغییری در حداقل سطح توان خروجی P_{min} ایجاد نمی‌شود.

اگر رشته پالس '000111111110' مطابق با شکل (۵) (الف) به درگاه ۱، شکل (۳) اعمال کنیم. در درگاه ۴، رشته پالس '111000000001' مطابق با شکل (۵) (ب) به دست می‌آید. همان‌طور که در شکل (۵) (ب) نشان داده شده است بهره زمان کافی برای بازبایی را داشته و از این رو مقدار سطح توان خروجی به حالت اولیه بازگشته است.



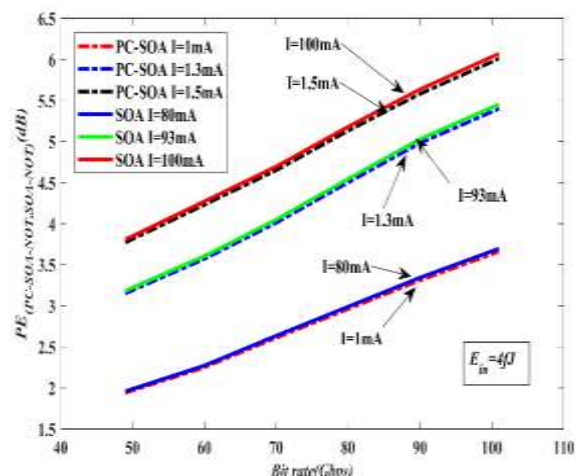
شکل (۷). مقایسه PE برحسب تغییرات انرژی ورودی در PC-SOA و SOA برای دروازه NOT



شکل (۸). مقایسه بهره برحسب تغییرات انرژی سیگنال ورودی برای PC-SOA و SOA در دروازه NOT

شکل (۹) تغییرات CE را در PC-SOA و SOA نسبت به انرژی سیگنال ورودی نشان می‌دهد. جریان تزریقی به ترتیب برابر با $I_{PC-SOA} = 1mA$ و $I_{SOA} = 80mA$ است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش انرژی سیگنال ورودی مقدار CE کاهش می‌یابد. بنابراین برای دستیابی به بالاترین CE در نرخ بیت‌های بالا لازم است که بهینه‌سازی لازم در PC-SOA انجام پذیرد. همان‌طور که در شکل (۹) نشان داده شده است، می‌توان نتیجه گرفت که PC-SOA با $I_{PC-SOA} = 1mA$ و $E_{in} < 5fJ$ نسبت به SOA با $I_{SOA} = 80mA$ و $E_{in} < 5fJ$ دارای CE مناسب‌تری است.

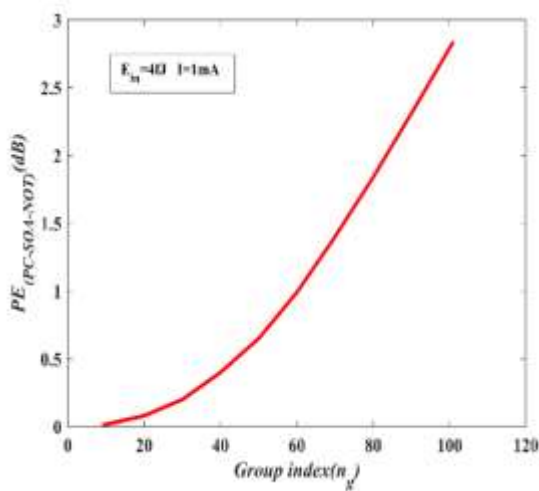
با توجه به معادله (۱۹)، هر چه مقدار ER بالاتر باشد، عملکرد دروازه منطقی مناسب‌تر است. همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده شده است، ER برای مقادیر انرژی سیگنال ورودی پایین ($E_{in} < 5fJ$) مقادیر بالایی را تجربه می‌کند و بنابراین می‌تواند برای ساخت دروازه



شکل (۶). مقایسه PE برحسب نرخ بیت در PC-SOA و SOA برای دروازه NOT نسبت به تغییرات جریان تزریقی

شکل (۷) مقایسه بین PC-SOA و SOA برحسب تغییرات PE نسبت به انرژی سیگنال ورودی یکسان به درگاه‌های ۱ و ۳ را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقدار $(E_{CLK} = E_A)$ همان‌طور که در شکل (۷) نشان داده شده است با افزایش انرژی سیگنال ورودی PE از ناحیه تغییرات خطی به سمت ناحیه غیرخطی و اشباع حرکت می‌کند و در نهایت تقریباً ثابت می‌ماند. $1dB < PE < 4dB$ می‌تواند رنج قابل قبولی برای ساخت دروازه‌های منطقی مبتنی بر PC-SOA و SOA باشد [۱۱]. بنابراین مطابق شکل (۷) یک ناحیه خطی با مشخصات $E_{in(PC-SOA)} = E_{in(SOA)} < 5fJ$ با $I = 80mA$ و $I = 1mA$ به ترتیب برای PC-SOA و SOA وجود دارد که با توجه به رنج تغییرات $PE < 4dB$ می‌تواند مناسب برای ساخت دروازه منطقی نوری و به دست آوردن مقدار انرژی ورودی بهینه باشد.

شکل (۸) مقایسه بین تغییرات بهره برحسب تغییرات انرژی سیگنال ورودی را برای PC-SOA و SOA نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است با افزایش انرژی سیگنال ورودی به دلیل قرارگرفتن تقویت‌کننده در ناحیه اشباع بهره تقویت‌کننده شروع به کاهش می‌نماید [۱۱]. علیرغم اینکه جریان تزریقی SOA خیلی بیشتر از PC-SOA ($I_{PC-SOA} \ll I_{SOA}$) است ولی PC-SOA دارای بهره بالاتری به‌ویژه در انرژی سیگنال ورودی پایین یعنی $E_{in} < 5fJ$ است. بنابراین یکی دیگر از پارامترهای مهمی که باید برای به دست آوردن بهترین نرخ بیت و PE بررسی و تحلیل قرار گردد، بهره تقویت‌کننده است.



شکل (۱۱). نمودار تغییرات PE نسبت به تغییرات ضریب شکست گروه در PC-SOA

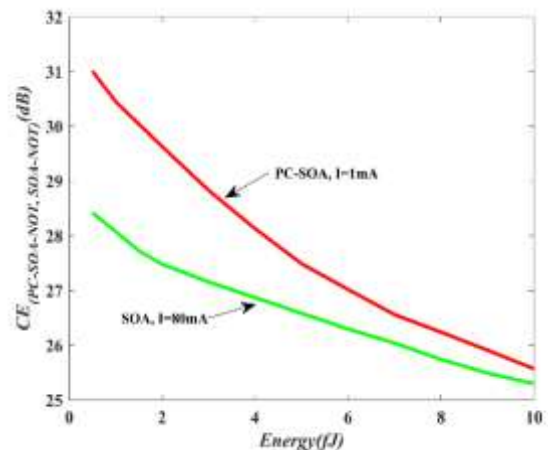
طبق معادله **Error! Reference source not found.** افزایش n_g باعث افزایش توان سیگنال نوری می‌گردد [۴].

$$\frac{\partial P}{\partial Z} = \left(\frac{n_g}{n_{eq}} g - \alpha_{int} \right) P \quad (22)$$

همچنین افزایش n_g در موج‌بر بلور فوتونی باعث تولید نور کند می‌شود. از این رو پالس نوری در مکان فشرده و چگالی انرژی پالس در زمان افزایش می‌یابد، این پدیده به دلیل افزایش برهم‌کنش نور با ماده است. این افزایش چگالی انرژی پالس موجب تقویت پالس نوری می‌شود [۴، ۱۰ و ۱۱]. بنابراین PC-SOA زمان زیادتری برای بازیابی بهره خود لازم دارد که نهایتاً افزایش PE را به دنبال خواهد داشت. با توجه به توضیحات بالا n_g نیز نقش بسیار مهمی در تعیین نرخ بیت و PE دارد که باید در طراحی و شبیه‌سازی مدنظر قرار گیرد.

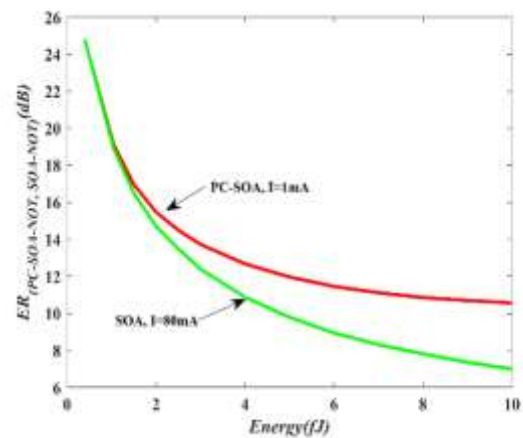
شکل (۱۲) تغییرات CR در PC-SOA و SOA را نسبت به انرژی سیگنال ورودی نشان می‌دهد. جریان تزریقی به ترتیب برابر با $I_{PC-SOA} = 1mA$ و $I_{SOA} = 80mA$ است. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود با افزایش انرژی سیگنال ورودی CR کاهش می‌یابد. بنابراین برای دستیابی به بالاترین CR در نرخ بیت‌های بالا لازم است که بهینه‌سازی در PC-SOA انجام پذیرد. همان‌طور که در شکل (۱۲) نشان داده شده است، می‌توان نتیجه گرفت که PC-SOA با $I_{PC-SOA} = 1mA$ و $E_{in} < 5fJ$ نسبت به SOA با $I_{SOA} = 80mA$ و $E_{in} < 5fJ$ دارای CR مناسب‌تری است.

منطقی مناسب باشد. همچنین می‌توان از شکل (۱۰) نتیجه گرفت که با افزایش انرژی سیگنال ورودی $E_{in} > 5fJ$ تقویت‌کننده وارد ناحیه اشباع شده و مقدار ER تقریباً ثابت می‌ماند. PC-SOA با توجه به جریان تزریقی خیلی کمتر نسبت به SOA یعنی $I_{PC-SOA} = 1mA$ و $I_{SOA} = 80mA$ با انرژی سیگنال ورودی یکسان دارای ER بهتری نسبت به SOA است.



شکل (۹). مقایسه CE نسبت به تغییرات انرژی سیگنال ورودی در دروازه منطقی NOT برای SOA و PC-SOA

شکل (۱۱) تغییرات PE را برحسب تغییرات ضریب شکست گروه (n_g) در PC-SOA نشان می‌دهد. با توجه به شکل افزایش n_g روند افزایش PE را به دنبال دارد. همان‌طور که قبلاً نیز توضیح داده شد مقدار PE مناسب برای ساخت دروازه منطقی نوری برابر با $1dB < PE < 4dB$ است. از این رو جهت دستیابی به نتیجه مطلوب لازم است که مقدار ضریب شکست گروه در رنج $70 < n_g \leq 100$ قرار گیرد.



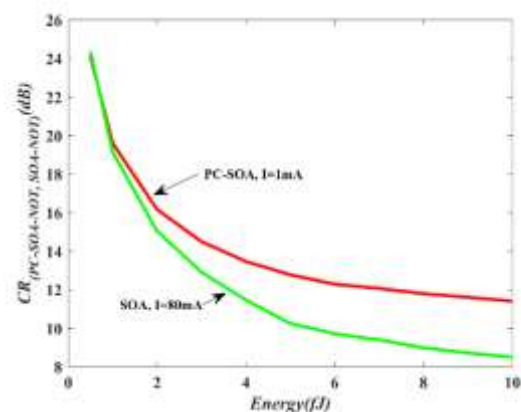
شکل (۱۰). نمودار مقایسه ER نسبت به تغییرات انرژی سیگنال ورودی در دروازه منطقی NOT برای SOA و PC-SOA

با $E_{in-SOA} = 4fJ$ ، $I_{SOA} = 80mA$ ، مقادیر $G_{SOA} = 11.5dB$ ، $ER_{SOA} = 10.5dB$ ، $CR_{SOA} = 11.5dB$ ، $CE_{SOA} = 26.5dB$ و $QF_{SOA} = 15dB$ به دست می‌آید. دستاورد دیگری که از این نتایج حاصل می‌شود این است که PC-SOA با انرژی سیگنال ورودی برابر با SOA با طول ناحیه فعال و جریانی تزریقی خیلی کم ($I_{PC-SOA} \ll I_{SOA}$) بهره، بهره، CR ، CE و ER مناسب‌تری دارد، که این یکی از دلایل مهمی در استفاده از این افزاره بجای SOA خواهد بود.

شکل (۱۴) نتایج شبیه‌سازی دروازه منطقی تمام نوری NOT را نشان می‌دهد. شکل (۱۴ الف) قطار پالس A مطابق با رشته بیت منطقی RZ به صورت '10101010' است. شکل (۱۴ ب) خروجی دروازه منطقی تمام نوری NOT که به صورت '01010101' به دست آمده را نشان می‌دهد. همچنین شکل (۱۴ ج) فاز خروجی مربوط به دروازه NOT را نشان می‌دهد. بر اساس معادلات **Error! Reference source not found.** حالت بهینه برای خروجی سیگنال NOT زمانی است که $\Delta\phi_{NL}(t) = \pi$ باشد، یعنی بین دو بازوی تداخل‌سنج ماخ زندر 180° درجه اختلاف‌فاز وجود داشته باشد که شکل (۱۴ ج) این موضوع را تأیید می‌نماید.

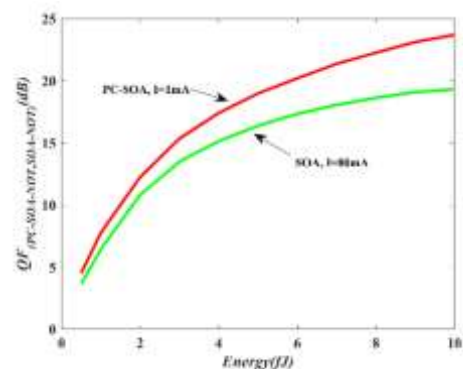
۶- نتایج

در این مقاله یک دروازه منطقی تمام نوری NOT با استفاده از تقویت‌کننده نوری نیمه‌هادی و مبتنی بر ساختار بلور فوتونی به صورت عددی و با استفاده از روش تفاضل محدود شبیه‌سازی شده است. برای طراحی دروازه منطقی تمام نوری NOT از تداخل‌سنج ماخ زندر و سازوکار غیرخطی XPM استفاده شده است. بازیابی بهره نقش بسیار مهمی در بهینه‌سازی پارامترهای PE، CE، ER، QF و نرخ بیت در طراحی و شبیه‌سازی دروازه منطقی تمام نوری NOT در رشته بیت‌های طولانی را دارد. همچنین جریان بایاس، ضریب شکست گروه، انرژی سیگنال CW، انرژی قطار پالس A و انرژی قطار پالس CLK نیز تأثیر بسیار مهمی در بهینه‌سازی پارامترهای فوق دارند. در این مقاله با جریان تزریقی $I = 1mA$ انرژی سیگنال $E_{CLK} = E_A = 4fJ$ و $P_{CW} = 0.001P_{Sat}$ توان خروجی دروازه منطقی تمام نوری NOT برابر با $0.39mw$ در نرخ بیت $80Gbs^{-1}$ به دست می‌آید. با توجه به طول کوتاه ناحیه فعال، جریان تزریقی کم و بهره بالا PC-SOA یک کاندیدای مناسب‌تری نسبت به SOA برای طراحی مدارات منطقی تمام نوری خواهد بود.



شکل (۱۲). مقایسه CR نسبت به تغییرات انرژی سیگنال ورودی در دروازه منطقی NOT برای PC-SOA و SOA

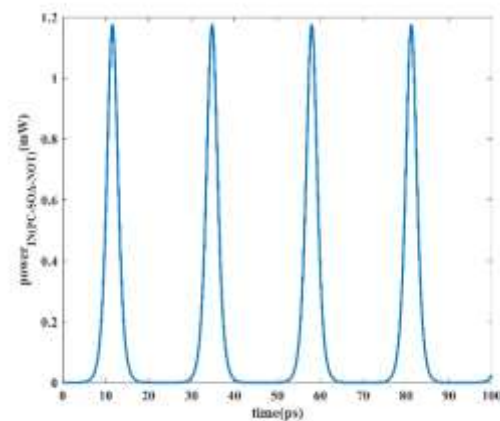
شکل (۱۳) تغییرات QF برحسب انرژی سیگنال ورودی را برای PC-SOA و SOA نشان می‌دهد. مطابق شکل با افزایش انرژی سیگنال ورودی QF شروع به افزایش می‌نماید. برای مقادیر کم انرژی سیگنال ورودی افزایش QF قابل‌ملاحظه است. ولی با افزایش انرژی یعنی ($E_{in} > 5fJ$) به در نهایت QF به حالت اشباع رفته و تقریباً ثابت می‌ماند. همان‌طور که مشاهده می‌شود در دامنه تغییرات انرژی سیگنال ورودی به ازای جریانی تزریقی $I_{PC-SOA} = 1mA$ و $I_{SOA} = 80mA$ ، PC-SOA دارای QF بالاتری نسبت به SOA است.



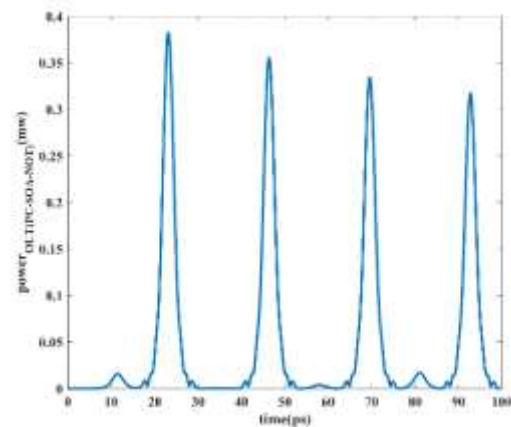
شکل (۱۳). نمودار تغییرات QF نسبت به انرژی سیگنال ورودی برای PC-SOA و SOA

با توجه به توضیحات شکل (۶) تا شکل (۱۳) می‌توان نتیجه گرفت که برای طراحی دروازه منطقی تمام نوری باید پارامترهای انرژی سیگنال ورودی، جریان تزریقی، بهره و محدوده عملکرد PE، CE، ER، CR به رنج مناسب $1dB < PE < 4dB$ حالت بهینه برای PC-SOA با $E_{in-PC-SOA} = 4fJ$ و $I_{PC-SOA} = 1mA$ رخ می‌دهد. در نتیجه مقادیر $G_{PC-SOA} = 13.5dB$ ، $ER_{PC-SOA} = 10.5dB$ ، $CE_{PC-SOA} = 28.5dB$ ، $CR_{PC-SOA} = 14dB$ ، $13dB$ و $QF_{PC-SOA} = 17.5dB$ به دست می‌آید. همچنین برای SOA

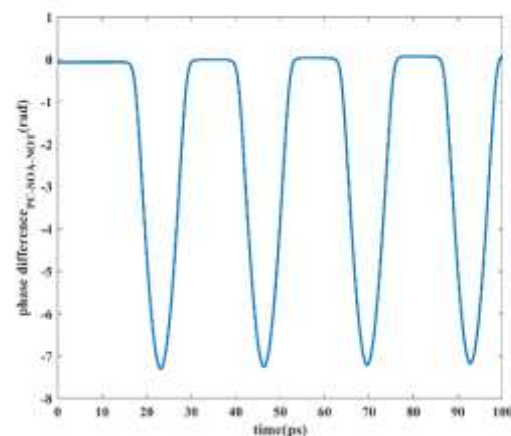
- [2] S. O. A. Mohebzadeh Bahabadi, "Design of an All-Optical AND Logic Gate based on Photonic Crystal with Small Dimensions Suitable for Integrated Optical Circuits," *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 1, Autumn & Winter 2018 (Serial No. 2) pp. Pages 53-59 (In Persian), 2018.
- [3] E. Mizuta, H. Watanabe, and T. Baba, "All Semiconductor Low- Δ Photonic Crystal Waveguide for Semiconductor Optical Amplifier," *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 45(8A), no. 8A, pp. 6116-6120 2006.
- [4] A. Nosratpour, M. Razaghi, and G. Darvish, "Computational study of pulse propagation in photonic crystal semiconductor optical amplifier," *Journal of Nanophotonics*, vol. 12(3), 036015, no. 03, 2018.
- [5] F. D. Mahad, A. S. M. Supa'at, S. M. Idrus, and D. Forsyth, "Review Of Semiconductor Optical Amplifier (SOA) Functionalities," *Jurnal Teknologi*, vol. 55(1), no. 1, pp. 85-96, 2011.
- [6] M. Connelly, "Semiconductor Optical Amplifiers," *Elsevier, Encyclopedia of Modern Optics, eBook: 978-0-12-814982-9*, 2004.
- [7] G. P. Agrawal and N. A. OLSSON, "Self-Phase Modulation and Spectral Broadening of Optical Pulses in Semiconductor Laser Amplifiers," *IEEE JOURNAL OF QUNTUM ELECTRONICS*, vol. 75, 1989.
- [8] N. K. D. Q. Wang, "Semiconductor Optical Amplifiers," *Copyright © 2006 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.*, vol. ISBN 981-256-397-0, Printed in Singapore., 2006. [Online]. Available: Email: enquiries@stallionpress.com. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd. 5 Toh Tuck Link, Singapore 596224.
- [9] K. Heydarian, A. Nosratpour, and M. Razaghi, "Computational study of wavelength conversion based on XGM by photonic crystal semiconductor optical amplifier," *Optics & Laser Technology*, vol. 156(1), pp. 108531(1-9), 2022.
- [10] A. Nosratpour, M. Razaghi, and G. Darvish, "Numerical analysis of four wave mixing in photonic crystal semiconductor optical amplifier," *Optics Communications*, vol. 433, pp. 104-110., 2019.
- [11] M. Razaghi, A. Nosratpour, and N. K. Das, "Demonstration and optimisation of an ultrafast all-optical AND logic gate using four-wave mixing in a semiconductor optical amplifier," *Quantum Electronics*, vol. 43(2), no. 2, pp. 184-187 2013.
- [12] A. Kotb, "AND gate based on two-photon absorption in semiconductor optical amplifier," *Optoelectronics Letters*, vol. 9, no. 3, pp. 181-184., 2013.
- [13] Y. Khorrami, V. Ahmadi, M. Razaghi, and N. Das, "Picosecond and femtosecond asymmetric switching using a semiconductor optical amplifier-based Mach-Zehnder interferometer," *Appl Opt*, vol. 57, no. 7, pp. 1634-1639, Mar 1 2018.
- [14] J. P. a. E. Larkins, "2008 International conference on numerical simulation of optoelectronic devices NUSOD '08.," *The IEEE Lasers and Electro-Optics Society IEEE Catalog Number: CF08817, ISBN: 978-1-4244-2307-1*, 2008. [15] A. L. Gaeta,



(الف)



(ب)



(ج)

شکل (۱۴). شکل موجها برای (الف) قطار پالس A، (ب) قطار پالس خروجی NOT، (ج) فاز خروجی دروازه NOT

۷- مراجع

- [1] H. Saghaei, "Design and Simulation of an Ultra-Fast All-Optical Single-Bit Comparator Based on Photonic Crystal Ring Resonators," *Scientific Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 9, no. 2, pp. 99-106. (In Persian), 2021.

- effect of amplified spontaneous emission," *Optoelectronics Letters*, vol. 8, no. 6, pp. 437-440, 2012.
- [30] A. Kotb, "Simulation of all-optical logic NOR gate based on two-photon absorption with semiconductor optical amplifier-assisted Mach-Zehnder interferometer with the effect of amplified spontaneous emission," *Journal of the Korean Physical Society*, vol. 66, no. 10, pp. 1593-1598, 2015.
- [31] A. Kotb and C. Guo, "All-optical NOR and XNOR logic gates at 2 Tb/s based on two-photon absorption in quantum-dot semiconductor optical amplifiers," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 52, no. 1, 2019.
- [32] A. Kotb, "Theoretical analysis of soliton NOR gate with semiconductor optical amplifier-assisted Mach-Zehnder interferometer," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 49, no. 5, 2017.
- [33] E. Dimitriadou and K. E. Zoiros, "On the design of ultrafast all-optical NOT gate using quantum-dot semiconductor optical amplifier-based Mach-Zehnder interferometer," *Optics & Laser Technology*, vol. 44, no. 3, pp. 600-607, 2012.
- [34] K. Heydarian, A. Nosratpour, and M. Razaghi, "Design and simulation of the all-optical XOR logic gate by XPM mechanism using photonic crystal semiconductor optical amplifier based on mach-zehnder interferometer," *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials (World Scientific Publishing Company)*, pp. 2250013-(1-24), 2022.
- [35] A. Kotb and C. Guo, "Numerical modeling of photonic crystal semiconductor optical amplifiers-based 160 Gb/s all-optical NOR and XNOR logic gates," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 52, no. 2, 02/01 2020.
- [36] K. Heydarian, A. Nosratpour, and M. Razaghi, "Design and analysis of an all-optical NAND logic gate using a photonic crystal semiconductor optical amplifier based on the Mach-Zehnder interferometer structure," *Photonics and Nanostructures - Fundamentals and Applications*, vol. 49(3), pp. 100992(1-11), 2022/05/01/ 2022.
- [37] K. Heydarian, A. Nosratpour, and M. Razaghi, "Use of four-wave mixing for designing and simulating an all-optical AND logic gate in a photonic crystal semiconductor optical amplifier," *Optical Engineering*, vol. 60(4), pp. 0471041-15(4/1 2021).
- [38] M. Razaghi, O. Jafari, and N. K. Das, "Pattern effect reduction scheme for high-speed all-optical amplification system," *Optical Engineering*, vol. 53, no. 7, 2014.
- [39] Q. W. N. K. Dutta "semiconductor optical amplifiers, seconded.," *Word scientific publishing company, singapore*, , 2013.
- [40] S. Barua, Das, N., Nordholm, S., & Razaghi, M. , " Comparison of pulse propagation and gain saturation characteristics among different input pulse shapes in semiconductor optical amplifiers. ," *Optics Communications*, vol. 359, pp. 73-78., 2016, doi: 10.1016/j.optcom.2015.09.038.
- "Nonlinear propagation and continuum generation in microstructured optical fibers," *Opt Lett*, vol. 27, no. 11, pp. 924-6, Jun 1 2002.
- [16] W. Z. Yejin Zhang, Qi Aiyi, Hongwei Qu, Hongling Peng, Shizhong Xie, and Lianghai Chen, "Design of Photonic Crystal Semiconductor Optical Amplifier With Polarization Independence," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28(22), pp. 3207-3211, 2010.
- [17] M. Y. Tekeste and J. M. Yarrison-Rice, "High efficiency photonic crystal based wavelength demultiplexer," *Opt Express*, vol. 14, no. 17, pp. 7931-42, Aug 21, 2006.
- [18] J. H. Chu, O. Voskoboinikov, and C. P. Lee, "Slow light in photonic crystals," *Microelectronics Journal*, vol. 36, no. 3-6, pp. 282-284 2005.
- [19] K. Abedi and S. M. Mirjalili, "Slow light performance enhancement of Bragg slot photonic crystal waveguide with particle swarm optimization algorithm," *Optics Communications*, vol. 339, pp. 7-13, 2015.
- [20] Y. A. Vlasov, M. O'Boyle, H. F. Hamann, and S. J. McNab, "Active control of slow light on a chip with photonic crystal waveguides," *Nature*, vol. 438, no. 7064, pp. 65-9 Nov 3 2005,
- [21] T. F. Krauss, "Slow light in photonic crystal waveguides," *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 40, no. 9, pp. 2666-2670 , 2007.
- [22] T. Baba, "Slow light in photonic crystals," *Nature Photonics*, vol. 2, no. 8, pp. 465-473. , 2008.
- [23] H. Jin, G. Dingshan, W. Huaming, H. Ran, and Z. Zhiping, "Flat Band Slow Light in Symmetric Line Defect Photonic Crystal Waveguides," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 21, no. 20, pp. 1571-1573, 2009.
- [24] M. Connelly, "Semiconductor Optical Amplifiers and their Applications," *Conference: 3rd Spanish Meeting of Optoelectronics, OPTOEL'03At: Madrid*, 2003.
- [25] S. M. A. Kotb, Z. Chen, N. K. Dutta, G. Said, "All optical logic NAND gate based on two-photon absorption," presented at the Photonic Fiber and Crystal Devices: Advances in Materials and Innovations in Device Applications IV, 2010.
- [26] M. R. Arez Nosratpour, "Optical and Logic Gate Implementation using Four Wave Mixing in Semiconductor Optical Amplifier for High Speed Optical Communication Systems " *2011 International Conference on Network and Electronics Engineering IPCSIT vol.11 (2011) © (2011) IACSIT Press, Singapore* 2011.
- [27] A. Kotb, "Computational analysis of solitons all-optical logic NAND and XNOR gates using semiconductor optical amplifiers," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 49, no. 8, 2017.
- [28] A. Kotb, K. E. Zoiros, and C. Guo, "All-optical XOR, NOR, and NAND logic functions with parallel semiconductor optical amplifier-based Mach-Zehnder interferometer modules," *Optics & Laser Technology*, vol. 108, pp. 426-433, 2018.
- [29] A. Kotb and J. Maeda, "All-optical logic NXOR based on semiconductor optical amplifiers with the

- [41] A. Kotb and K. E. Zoiros, "Performance of all-optical XOR gate based on two-photon absorption in semiconductor optical amplifier-assisted Mach-Zehnder interferometer with effect of amplified spontaneous emission," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 46, no. 7, pp. 935-944, 2013.
- [42] G. Wang, X. Yang, and W. Hu, "All-optical logic gates for 40Gb/s NRZ signals using complementary data in SOA-MZIs," *Optics Communications*, vol. 290, pp. 28-32, 2013, doi: 10.1016/j.optcom.2012.10.047.
- [43] A. Kotb, "NAND gate with quantum dot-semiconductor optical amplifiers-based Mach-Zehnder interferometer," *Optoelectronics Letters*, vol. 9, no. 2, pp. 89-92, 2013.
- [44] A. Kotb, "NOR gate based on QD-SOA at 250 Gbit/s," *Optical and Quantum Electronics*, vol. 45, no. 6, pp. 473-480, 2013.
- [45] A. Kotb, S. Ma, Z. Chen, N. K. Dutta, and G. Said, "Effect of amplified spontaneous emission on semiconductor optical amplifier based all-optical logic," *Optics Communications*, vol. 284, no. 24, pp. 5798-5803, 2011.
- [46] S. Ma, Kotb, A., Chen, Z., & Dutta, N. K. , " All optical logic gates based on two-photon absorption," *In Photonics North 2010, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. Vol. 7750 77501L-1, 2010.
- [47] A. Kotb and K. E. Zoiros, "1 Tb/s high quality factor NAND gate using quantum-dot semiconductor optical amplifiers in Mach-Zehnder interferometer," *Journal of Computational Electronics*, vol. 13, no. 2, pp. 555-561, 2014.
- [48] F. D. Mahad, A. S. M. Supa'at, S. M. Idrus, and D. Forsyth, "Analyses of semiconductor optical amplifier (SOA) four-wave mixing (FWM) for future all-optical wavelength conversion," *Optik*, vol. 124, no. 1, pp. 1-3 2013.
- [49] H. Brahmi, & Menif, M. , " Optimizing four-wave mixing performance in semiconductor optical amplifiers. ," *In Photonics North 2008, Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering*, vol. Vol. 7099 709914-1, 2008.
- [50] V. A. Yaser Khorrami, & Mohammad Razaghi, "Tb/s all-optical nonlinear switching using semiconductor optical amplifier based Mach-Zehnder interferometer. ," *IEEE, 20th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE2012)*. 2012.