

## کلید تمام‌نوری غیرخطی با ساختار تداخلی ساگاناک مبتنی بر تقویت‌کننده نوری نیم‌رسانا و آثار متقابل پالس‌های خلاف جهت

مرتضی جمالی<sup>۱</sup>  
وحید احمدی<sup>۲</sup>، محمد رزاقی<sup>۳</sup>

### چکیده

در این مقاله ساختار تداخلی ساگاناک بر پایه‌ی اثرات متقابل پالس‌های خلاف جهت فوق باریک در تقویت‌کننده نوری نیم‌رسانا مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. با استفاده از مدلی جامع، معادله شرودینگر غیرخطی تعمیم یافته با در نظر گرفتن کلیه پدیده‌های غیرخطی در حوزه زیر قله و ثانیه از جمله پراش سرعت گروه (GVD)، تغییرات غیرخطی بهره و ضریب شکست، سوختگی طیفی (SHB)، داغ‌شدگی حامل (CH) و جذب دو فوتونی (TPA) برای انتشار پالس در تقویت‌کننده نوری نیم‌رسانا به کار گرفته شده است. با استفاده از مدل اشاره شده برای اولین بار آهنگ کلیدزنی را در درگاه خروجی مورد نظر به آهنگ  $167 \text{ Gb/s}$  از میان رشته داده با آهنگ  $667 \text{ Gb/s}$  رسانده‌ایم. همچنین تأثیر بهره سیگنال کوچک (غیر اشباع) تقویت‌کننده، پهنا و انرژی پالس کنترل بر عملکرد کلید بررسی شده است.

### کلید واژه

کلید تمام نوری ساگاناک، پالس فوق باریک، تقویت‌کننده نوری نیم‌رسانا، آثار غیر خطی

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد برق الکترونیک، دانشگاه تربیت مدرس

<sup>۲</sup> استاد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تربیت مدرس v\_ahmadi@modares.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی برق، دانشگاه کردستان

تاریخ پذیرش: ۱۳ خرداد ۱۳۹۱

تاریخ دریافت: ۹ دی ۱۳۹۱

نیاز روز افزون به پهنای باند بیشتر که جواب‌گوی حجم بالای استفاده از اینترنت و کاربردهای چندرسانه‌ای باشد، توسعه شبکه‌های تمام نوری فوق سریع که قابلیت ارائه سرویس‌های مجتمع با کیفیت بالا برای ترافیک موجود را داشته باشد، را اجتناب ناپذیر کرده است. کلید<sup>۴</sup> تمام‌نوری پرسرعت در انجام عمل مالتی/دی‌مالتی پلکس کردن در مخابرات نوری کاربرد گسترده‌ای دارند [۱]. تقویت‌کننده نوری نیم‌رسانا<sup>۵</sup> (SOA) به دلیل اندازه فشرده و امکان مجتمع شدن با ادوات نوری و قابلیت تقویت پالس‌های فوق باریک گزینه مناسبی برای انجام عمل کلیدزنی است. بالابودن طول عمر حامل‌ها و افت شدید بهره پس از عبور چند بیت از مهمترین مشکل‌های این تقویت‌کننده است، بطوری که پس از عبور چند بیت به حالتی می‌رسیم که امکان تشخیص بیت‌های صفر و یک از یکدیگر در خروجی تقویت‌کننده میسر نخواهد بود. برای حل این مشکل، روش‌های مختلفی چون استفاده از تداخل‌سنج‌ها مرسوم شده است [۲]. تداخل‌سنج‌های مبتنی بر پدیده ساگاناک از جمله ساختارهای تداخلی مطلوب برای عمل کلیدزنی در شبکه‌های مخابرات نوری هستند. عمده تحقیقاتی که روی کلیدهای ساگاناک مبتنی بر تقویت‌کننده نوری نیم‌رسانا انجام شده در حوزه پالس‌های قله‌ثابتی بوده است [۳ و ۲]، بطوری که در کلید کردن تمام نوری در دو درگاه<sup>۶</sup> خروجی به آهنگ بیت ۴۰ Gb/s دست یافته‌اند [۴]. مرجعی که تاکنون به بررسی مشخصات کلید ساگاناک در حوزه فمتوثانیه‌ای پرداخته [۵] از مدل ارائه شده در مرجع [۶] استفاده کرده و از بررسی عوامل دخیل در شبیه‌سازی و تأثیر آن‌ها بر خروجی کلید مانند پهنای پالس، انرژی ورودی و ... چشم‌پوشی شده است. همین‌طور این مدل تمامی اثرات زیر قله و ثانیه‌ای را بطور جامع در نظر نمی‌گیرد. در این مقاله از معادلات شرودینگر برای شبیه‌سازی عملکرد کلید ساگاناک استفاده کرده‌ایم. با استفاده از این معادلات قادریم اثر تمامی مشخصه‌های غیرخطی ظاهر شده در SOA را بصورت همزمان و موثرتری در عملکرد کلید ببینیم. برای انتشار دو پالس خلاف‌جهت در SOA، معادلات شرودینگر غیرخطی تعمیم یافته [۷] استفاده شده است که اثرات پالس‌های عبوری بر روی هم در هر نقطه از موجبر تقویت‌کننده لحاظ شود. مالتی/دی‌مالتی پلکسر یکی از کاربردهای اساسی کلیدها در مخابرات هستند. در مالتی/دی‌مالتی پلکسر معمولاً از بین دنباله اطلاعات ورودی، بیت‌های خاصی انتخاب و در خروجی ظاهر می‌شوند. آهنگ انتخاب شده برای کلید می‌تواند در بازه  $\text{Data bit rate} > \text{Control bit rate} > 0$  در اینجا با استفاده از پالس‌های زیر قله و ثانیه‌ای، بطور

نمونه آهنگ دی‌مالتی پلکس را در درگاه عبور کلید به آهنگ ۱۶۷ Gb/s از میان رشته داده<sup>۷</sup> با آهنگ ۶۶۷ Gb/s رسانده‌ایم. همچنین تأثیر بهره سیگنال کوچک (غیر اشباع) تقویت‌کننده، پهنا و انرژی پالس کنترل بر عملکرد کلید بررسی شده است.

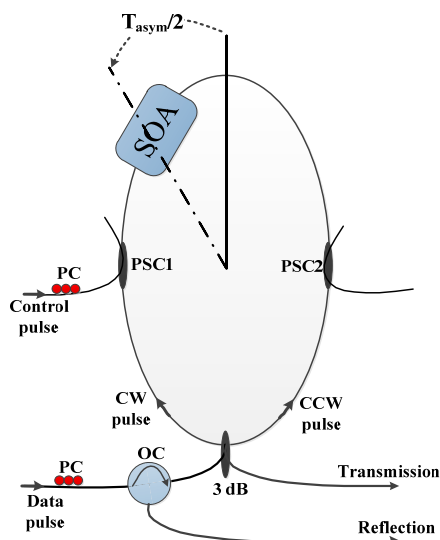
مقاله حاضر به این ترتیب سازماندهی شده است: در بخش دوم ساختار تداخلی کلید و اصول عملکرد آن بررسی شده است. در بخش سوم معادلات حاکم بر SOA برای انتشار پالس‌های زیر قله و ثانیه‌ای، و معادلات تداخلی کلید و در نهایت در بخش چهارم نتایج شبیه‌سازی مورد بحث قرار می‌گیرد. در نهایت نتایج در بخش پنجم ارائه می‌شود.

### ساختار تداخلی و اصول عملکرد کلید

در کلید متقارن ساگناک که ساختار آن در شکل ۱ ارائه شده است، ضریب کوپلینگ کوپلر ورودی ۰/۵ است و دو پالس داده پس از کوپلر بصورت ساعتگرد<sup>۸</sup> (CW) و پادساعتگرد<sup>۹</sup> (CCW) با توان برابر و  $\frac{\pi}{4}$  اختلاف فاز در حلقه ساگناک انتشار می‌یابند. از آنجا که انرژی پالس‌های داده پایین است و تأثیری بر پویایی<sup>۱۰</sup> SOA ندارند، برای تحریک اثرات غیرخطی و ریزش حامل از پالس کنترل پراثری استفاده می‌شود. طول تقویت‌کننده در کنار طول عمر حامل از عوامل اصلی در کاهش آهنگ بیت قابل ارسال توسط کلیدهای حلقوی ساگناک است. جابجایی SOA از مرکز حلقه ( $T_{\text{asym}}$ ) مشابه طول تقویت‌کننده باعث کاهش سرعت کلید می‌شود [۳ و ۲]. دلیل این موضوع این است که وقتی یک رشته بیت به حلقه ساگناک تزریق می‌شود، باید پردازش روی دو جزء یک بیت (پالس‌های CW و CCW) بطور کامل انجام شود و سپس بیت بعدی به عنصر غیرخطی ساختار (SOA) اعمال شود. با جابجا کردن SOA از مرکز حلقه زمان پردازش هر بیت به اندازه جابجایی تقویت‌کننده از مرکز حلقه افزایش می‌یابد که این امر خود باعث کاهش آهنگ بیت قابل ارسال توسط کلید می‌شود. لذا در این مقاله مشخصات کلید را برای SOA در مرکز ( $T_{\text{asym}} = 0$ ) حلقه بررسی خواهد شد. تأخیر اعمال سیگنال کنترل نسبت به پالس داده‌ی CW به تقویت‌کننده، باعث تفاوت بهره‌ی پالس‌های داده (پالس‌های CW و CCW) می‌شود که خود منجر به اختلاف فاز بین پالس‌های داده می‌شود. ترتیب اعمال پالس‌ها بدین طریق است یک بیت از پالس CW و نیمه دیگر

Data<sup>v</sup>  
Clockwise<sup>۸</sup>  
Counter-Clockwise<sup>۹</sup>  
Dynamic<sup>۱۰</sup>

همان بیت در پالس CCW همزمان به دو لبه تقویت کننده می‌رسند و دنباله پالس کنترل نیز با تأخیر مشخصی نسبت به پالس CW و همجهت با آن به SOA تزریق می‌شود. پس از خارج شدن همزمان بیت CW و CCW از تقویت کننده عملیات کلیدزنی برای بیت موردنظر از رشته بیت داده به اتمام می‌رسد و می‌توان بیت بعدی را به ساختار اعمال کرد. در کلیدهای ساگاناک متقارن برای تشخیص پالس کنترل از پالس داده قطبش آنها را عمود بر همدیگر در نظر می‌گیرند. با استفاده از کوپلرهای حساس به قطبش<sup>۱۱</sup> (PSC) پالس کنترل را وارد حلقه و از آن بیرون کشیده می‌شود. خوشبختانه فناوری<sup>۱۲</sup> SOA به جایی رسیده که امکان دستیابی ادوات غیرخطی برای کلیدزنی با بهره واپسته به قطبش<sup>۱۳</sup> (PDG) کمتر از ۰/۵ dB در طول موج ۱۵۵۰ nm بصورت تجاری امکان پذیر است [۸]. برای تنظیم قطبش پالس‌های کنترل و داده از کنترل کننده قطبش (PC) قبل از ورود پالس‌ها به حلقه قطبش آنها را تنظیم می‌کند. انتشار دهنده نوری<sup>۱۴</sup> (OC) نیز مسیر هدایت پالس به سمت حلقه یا درگاه بازتاب را تعیین می‌کند. انتشار دهنده نوری پالس داده‌ی ورودی کلید را به کوپلر ۳dB و پالس خروجی کوپلر ۳dB را به درگاه خروجی عبور کلید هدایت می‌کند.



شکل ۱. ساختار نمای کلید حلقوی ساگاناک متقارن

Polarization Selective Coupler (PSC)<sup>۱۱</sup>  
Technology<sup>۱۲</sup>  
Polarization Dependent Gain (PDG)<sup>۱۳</sup>  
Optical Circulator (OC)<sup>۱۴</sup>

## معادلات حاکم

### معادلات تداخلی کلید

پالس ورودی پس از کوپلر  $-3\text{dB}$  به دو پالس CW و CCW با توان‌های برابر و اختلاف فاز  $\frac{\pi}{4}$  نسبت به یکدیگر تقسیم خواهد شد. روابط زیر دو پالس CW و CCW را قبل از رسیدن به تقویت‌کننده نشان می‌دهند:

$$A_{in,CW} = \sqrt{\frac{P_{in}}{2}} \exp(i\phi_{in}) \quad (۱)$$

$$A_{in,CCW} = \sqrt{\frac{P_{in}}{2}} \exp(i(\phi_{in} + \frac{\pi}{2})) \quad (۲)$$

که  $\phi_{in}$  توان و فاز پالس ورودی هستند. از آنجا که پالس‌های CW و CCW همزمان به SOA تزریق می‌شوند، پالس‌های داده پس از تقویت‌کننده به صورت زیر خواهند بود:

$$A_{out,CW} = \sqrt{\frac{P_{in}}{2} \times G_{CW}(t)} \exp(i(\phi_{in} + \phi_{CW}(t))) \quad (۳)$$

$$A_{out,CCW} = \sqrt{\frac{P_{in}}{2} \times G_{CCW}(t)} \exp(i(\phi_{in} + \frac{\pi}{2} + \phi_{CCW}(t))) \quad (۴)$$

در روابط بالا  $G_{CW}(t)$  و  $G_{CCW}(t)$  بهره‌ی پالس‌های CW و CCW و اختلاف فاز ایجاد شده در آنها توسط SOA هستند. خروجی‌های کلید ناشی از تداخل خروجی‌های کوپلر  $-3\text{dB}$  هستند. با بسط توان، روابط نور خروجی در هریک از درگاه‌های عبور<sup>۱۵</sup> و بازتاب<sup>۱۶</sup> بصورت زیر خواهند بود:

$$T(t) = \frac{P_{in}}{4} \{G_{CW}(t) + G_{CCW}(t) - 2\sqrt{G_{CW}(t)G_{CCW}(t)} \times \cos[\phi_{CW}(t) - \phi_{CCW}(t)]\} \quad (۵)$$

$$R(t) = \frac{P_{in}}{4} \{G_{CW}(t) + G_{CCW}(t) + 2\sqrt{G_{CW}(t)G_{CCW}(t)} \times \cos[\phi_{CW}(t) - \phi_{CCW}(t)]\} \quad (۶)$$

که رابطه بین اختلاف فاز و بهره‌ی پالس‌های داده بصورت زیر است:

$$\Delta\varphi_{NL} = \varphi_{CW}(t) - \varphi_{CCW}(t) = -\frac{\alpha_N}{2} \text{Ln}\left(\frac{G_{CW}(t)}{G_{CCW}(t)}\right) \quad (۷)$$

که  $\alpha_N$  ضریب بهبود پهنای خط مربوط به بهره ناشی از ریزش حامل است. با توجه به روابط تداخلی (۵) و (۶) اگر تقویت‌کننده اختلاف فازی بین دو پالس (بیت) CW و CCW ایجاد نکند (معادل این است که پالس کنترل اعمال نشود) بیت مورد نظر به درگاه بازتاب تزریق خواهد شد و اگر اختلاف فاز  $\pi$  بین دو پالس (بیت) CW و CCW ایجاد کند بیت مورد نظر به درگاه عبور تزریق خواهد شد.

### مدل تقویت‌کننده نوری نیم‌رسانا

با استفاده از معادلات شرودینگر غیرخطی تعمیم یافته قادریم اثرات تمامی مشخصه‌های غیرخطی ظاهرشده در SOA را بصورت همزمان و موثر در عملکرد کلید بررسی کنیم. معادله شرودینگر با مشتقات جزئی بصورت زیر است:

$$\left[ \pm \frac{\partial}{\partial z} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial}{\partial t} \right] A^{CCW}(t, z) = \left\{ \begin{aligned} & \left[ \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \frac{\gamma}{2} - \left( \frac{\gamma_{2p}}{2} + ib_2 \right) I(z, t) + \frac{1}{2} g_N(t) \times \left[ \frac{1}{f(t)} + i\alpha_N \right] + \frac{1}{2} \Delta g_T(t)(1 + i\alpha_T) \right] A^{CW}(t, z) \\ & - i \frac{1}{2} \frac{\partial g(t, \omega)}{\partial \omega} \Big|_{\omega_0} \frac{\partial}{\partial t} - \frac{1}{4} \frac{\partial^2 g(t, \omega)}{\partial \omega^2} \Big|_{\omega_0} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \end{aligned} \right\} A^{CCW}(t, z) \quad (۸)$$

که داریم:

$$g_N(\tau) = g_0 \exp\left(-\frac{1}{E_{sat}} \int_{-\infty}^{+\infty} U(s) e^{-s/\tau_S} I(z, t) ds\right) \quad (۹)$$

$$f(\tau) = 1 + \frac{1}{\tau_{SHB} P_{SHB}} \int_{-\infty}^{+\infty} U(s) e^{-s/\tau_{SHB}} I(z, t) ds \quad (۱۰)$$

$$\Delta g_T(t) = -h_1 \int_{-\infty}^{+\infty} U(s) e^{-s/\tau_{CH}} (1 - e^{-s/\tau_{SHB}}) I(z, t) ds - h_2 \int_{-\infty}^{+\infty} U(s) e^{-s/\tau_{CH}} (1 - e^{-s/\tau_{SHB}}) I'(z, t) ds \quad (11)$$

$$\left. \frac{\partial g(\tau, \omega)}{\partial \omega} \right|_{\omega_0} = A_1 + B_1 [g_0 - g(\tau, \omega_0)] \quad (12)$$

$$\left. \frac{\partial^2 g(\tau, \omega)}{\partial \omega^2} \right|_{\omega_0} = A_2 + B_2 [g_0 - g(\tau, \omega_0)] \quad (13)$$

$$g(\tau, \omega_0) = g_N(\tau, \omega_0) / f(\tau) + \Delta g_T(\tau, \omega_0) \quad (14)$$

در این روابط  $A^{CW}(t, z)$  و  $A^{CCW}(t, z)$  توابع پوش پالس‌های نوری مختلط CW و CCW هستند.  $I(z, t)$  توان چگالی فوتون است که با رابطه  $I(z, t) = |A^{CW}(t, z)|^2 + |A^{CCW}(t, z)|^2$  تعریف می‌شود. همچنین  $I'(z, t)$  بطور مشابه با رابطه  $I'(z, t) = |A^{CW}(t, z)|^4 + |A^{CCW}(t, z)|^4$  تعریف می‌شود.  $\beta_2$  پارامتر نشان دهنده‌ی اثر  $GVD^{IV}$  است.  $\gamma$  تلفات خطی،  $\gamma_{2p}$  ضریب نشان دهنده‌ی اثر جذب دو فوتونی است.  $b_2 = \omega_0 n_2 / cA$  که  $n_2$  نشان‌دهنده‌ی اثر کر<sup>۱۸</sup>،  $\omega_0 = 2\pi f_0$  فرکانس مرکزی پالس نوری،  $c$  سرعت نور و  $A (= wd / \Gamma)$  سطح موثر هستند.  $g_N(\tau)$  بهره اشباع شده بواسطه ریزش حامل‌ها،  $g_0$  بهره سیگنال کوچک یا غیر اشباع تقویت‌کننده،  $E_{sat}$  انرژی اشباع،  $U(s)$  تابع پله واحد و  $\tau_{SHB}$  زمان واهلش سوختگی طیفی<sup>۱۹</sup> (سوختگی طیفی) هستند.  $f(t)$  تابع در برگزیده اثر سوختگی طیفی،  $P_{SHB}$  توان سوختگی طیفی،  $\alpha_N$  و  $\alpha_T$  ضریب بهبود پهنای<sup>۲۰</sup> خط مربوط به بهره بترتیب ناشی از ریزش و گرم شدن حامل‌ها هستند.  $\Delta g_T(t)$  تغییرات بهره در اثر داغ‌شدگی حامل و جذب دو فوتونی،  $h_1$  ضریب وابستگی تابش تحریکی و جذب حامل آزاد به تغییرات بهره،  $h_2$  ضریب وابستگی جذب دو فوتونی به تغییرات بهره و  $\tau_{CH}$  زمان واهلش مربوط به داغ‌شدگی حامل هستند. ضریب‌های  $A_1$  و  $A_2$  به ترتیب شیب و انحنای بهره خطی و  $B_1$  و  $B_2$  نیز به ترتیب تغییرات شیب و انحنای بهره با اشباع بهره را نشان می‌دهند.

<sup>۱۷</sup> Group Velocity Dispersion

<sup>۱۸</sup> Kerr effect

<sup>۱۹</sup> Spectral Hole Burning (SHB) relaxation time

<sup>۲۰</sup> Linewidth enhancement factor

روش شبیه‌سازی در این تحقیق، تفاضل محدود انتشار پرتو بهبود یافته<sup>۲۱</sup> (IFDBPM) است. ابتدا، عبارات شامل مشتقات زمانی در رابطه (۸) با روش<sup>۲۲</sup> تفاضل مرکزی بسط داده می‌شود. حال از روش انتگرال‌گیری دوزنقه‌ای<sup>۲۳</sup> استفاده کرده و از دو طرف رابطه (۸) بر روی گام مکانی کوچک  $\Delta z$  انتگرال‌گیری می‌کنیم. پس از این عملیات ماتریسی سه قطری به دست می‌آید. در نهایت، طی فرآیندی تکراری برای رسیدن به یک دقت خاص ماتریس موردنظر حل می‌شود [۷].

## نتایج شبیه‌سازی و بحث

برای شبیه‌سازی چگونگی عملکرد کلید از تقویت‌کننده‌ای به طول  $100 \mu\text{m}$  (زمان انتشار پالس در تقویت‌کننده  $1/3 \text{ ps}$  است) و انرژی اشباع  $10 \text{ pJ}$  استفاده شده است. با توجه به طول تقویت‌کننده دستیابی به آهنگ بیت  $667 \text{ Gb/s}$  (هر  $1/5 \text{ ps}$  یک بیت) امکان پذیر است. پالس‌های داده و کنترل به شکل گوسی هستند و انرژی پالس داده  $0.1 \text{ fJ}$  و پهنای آن  $200 \text{ fs}$  است. با توجه به فرکانس مرکزی پالس‌های داده و کنترل، تقویت‌کننده‌ای از جنس  $\text{InGaAsP/InP}$  استفاده شده است. در جدول ۱ لیست مشخصه‌های بکار رفته در شبیه‌سازی آورده شده است. مشخصه‌های متداول برای بررسی عملکرد کلید شامل ضریب کیفیت ( $Q^{14}$ )، مدولاسیون دامنه ( $AM^{25}$ )، ضریب خاموشی ( $ER^{16}$ ) و ضریب تفکیک ( $CR^{17}$ ) به ترتیب عبارتند از [۹ و ۱۰]:

$$Q = \frac{P^1_{mean} - P^0_{mean}}{\delta^0 + \delta^1} \quad (15) \quad AM(dB) = 10 \log\left(\frac{P^1_{max}}{P^1_{min}}\right) \quad (16)$$

$$ER(dB) = 10 \log\left(\frac{P^1_{min}}{P^0_{max}}\right) \quad (17)$$

$$CR(dB) = 10 \log\left(\frac{P^1_{mean}}{P^0_{mean}}\right) \quad (18)$$

---

Improved Finite-Difference Beam Propagation Method (IFDBPM)<sup>۲۱</sup>  
 Trapezoidal integration<sup>۲۲</sup>  
 Quality factor<sup>۲۴</sup>  
 Amplitude modulation<sup>۲۳</sup>  
 Extinction ratio<sup>۲۶</sup>  
 Contrast ratio<sup>۲۷</sup>

$P_{min,max}^{1,0}$  بیان‌کننده توان بیشینه و کمینه بیت‌های کلید شده صفر و یک است.  $P_{mean}^{1,0}$  توان متوسط صفر و یک خروجی را نشان می‌دهد. پارامتر  $\delta^{0,1}$  انحراف از معیار بیت‌های صفر و یک را نشان می‌دهد. در حالت عادی محدودیتی بر مقداری مطلق برای مشخصه‌های کلیدزنی اعمال نمی‌شود، ولی در مقالات مرجع [۹ و ۱۰] معمولاً برای  $Q$  مقادیر بزرگتر از ۶، برای AM مقادیر کمتر از ۱ dB و برای ER و CR مقادیر بزرگتر از ۱۰ dB مناسب تلقی می‌شوند. در این مقاله با استفاده از پالس‌های داده‌ی فوق باریک و با انرژی خیلی کم پارامتر  $Q$  کلید به مقادیر بالاتر از ۱۰ نیز رسیده است. به منظور تعیین شرایط بهینه در ادامه تأثیر انرژی و پهنای پالس کنترل و بهره سیگنال کوچک تقویت‌کننده را بر این چهار پارامتر بررسی می‌کنیم.

در شکل ۲ تغییرات مشخصه‌های کلید را با پارامتر  $G_0 (= \exp(g_0.L))$  که بهره خطی و  $L$  طول تقویت‌کننده، بررسی شده است. انرژی و پهنای پالس کنترل به ترتیب ۱۰ fJ و ۲۰۰ fs در نظر گرفته شده‌اند. محور افقی تمامی منحنی‌ها تأخیر بین پالس کنترل و CW را نشان می‌دهد. تأخیر مثبت به این معناست که بیت کنترل بعد از بیت CW ای که باید به درگاه عبور منتقل شود، اعمال می‌شود. به ازای بهره غیر اشباع ۵ dB ( $g_0$  برابر با  $11512 \text{ cm}^{-1}$ ) بهترین عملکرد کلید را داریم

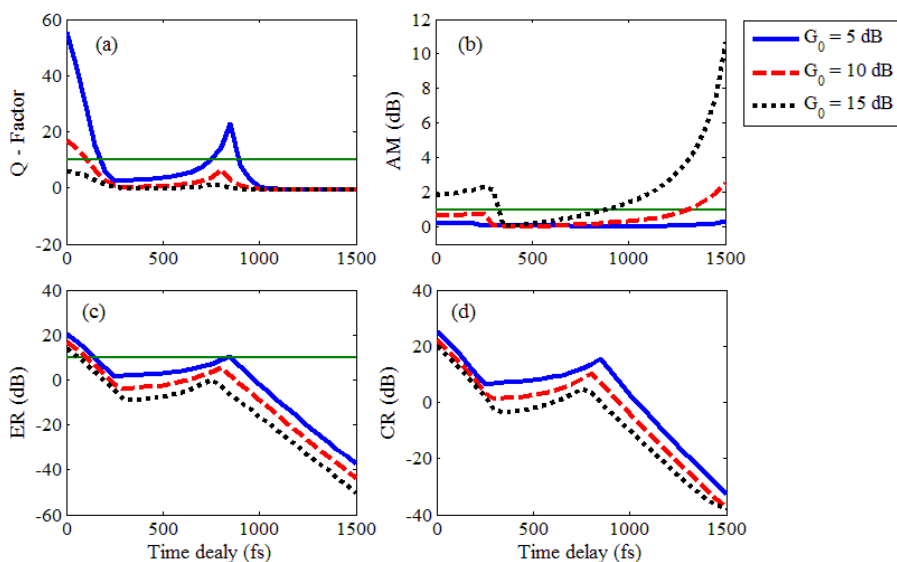
جدول ۱. لیست مشخصه‌های بکار رفته در معادله شرویدینگر غیرخطی برای شبیه‌سازی عملکرد کلید [۱۱]

اندازه	کمیت	
$500 \mu m$	طول تقویت کننده	$L$
$5 \mu m^2$	سطح مقطع موثر	$A$
$193.5 THz$	فرکانس مرکزی پالس	$f_0$
$0.045 ps^2 cm^{-1}$	پاشندگی سرعت گروه	$\beta_2$
$10 pJ$	انرژی اشباع	$W_s$
$7$	ضریب بهبود خط ناشی از تخلیه حامل	$\alpha_N$
$1$	ضریب بهبود خط ناشی از داغ‌شدگی حامل	$\alpha_T$
$0.3 cm^{-1} pJ^{-1}$	ضریب تأثیر جذب حامل آزاد و تابش تحریکی در داغ‌شدگی حامل	$h_1$
$300 fs cm^{-1} pJ^{-2}$	ضریب تأثیر جذب دو فوتونی در داغ‌شدگی حامل	$h_2$
$500 ps$	طول عمر حامل	$\tau_s$
$800 fs$	طول عمر داغ‌شدگی حامل	$\tau_{CH}$
$150 fs$	طول عمر سوختگی طیفی	$\tau_{SHB}$
$11.32 W$	توان ناشی از سوختگی طیفی	$P_{SHB}$
$15 cm^{-1}$	تلفات خطی	$\Gamma$
$-0.6 cm^2 TW^{-1}$	ضریب Kerr	$n_2$
$1.6 cm^{-1} W^{-1}$	ضریب جذب دوفوتونی	$\gamma_{2p}$
$0.8 fs \mu m^{-1}$ $-150 fs$ $-150 fs^2 \mu m^{-1}$ $0 fs^2$	مشخصه‌های توصیف کننده طیف بهره	$A_1$ $A_2$ $B_1$ $B_2$

که به ازای تأخیرهای بین صفر تا  $150 fs$  و  $750 fs$  تا  $900 fs$  مقدار  $Q$  بزرگتر از  $10$  است. پارامتر AM به ازای تمامی مقادیر تأخیر صفر تا  $1/5 ps$  کوچکتر از  $1 dB$  است. مشخصه‌های ER و CR رفتار مشابهی دارند که پارامتر ER در بازه‌ی بین صفر تا  $150 fs$  بزرگتر از  $10 dB$  را دارد. برای بهره‌ی سیگنال کوچک پایین ( $5 dB$  و کمتر) هر چند مشخصه‌های کلید بهبود می‌یابند ولی توان پالس در خروجی درگاه عبور کاهش می‌یابد. با کاهش توان پالس نوری در درگاه عبور به دلیل مشکل شدن آشکارسازی و تشخیص سیگنال از نویز ناچار به افزایش بهره سیگنال کوچک هستیم. با افزایش بهره سیگنال کوچک امکان تقویت پالس‌ها بیشتر می‌شود ولی از طرفی با تقویت بیشتر پالس‌ها آنها از حالت اختلاف فاز بهینه خارج می‌شوند بطوری که برای بهره  $10 dB$  فقط برای تأخیر در بازه صفر تا  $100 fs$  تمامی پارامترها مقدار مطلوبی دارند و برای بهره  $15 dB$  عملکرد ساختار برای کلید بیت‌های مورد نظر به درگاه عبور مناسب نیست. شکستگی منحنی‌ها در تأخیرهای

حدود  $85 \text{ fs}$  به دلیل کاهش  $P_{\text{max}}^0$ ،  $P_{\text{mean}}^0$  و  $\delta^0$  است که منجر به بهبود مشخصه‌های کلید می‌شوند.

برای بررسی عملکرد کلید و تأثیر انرژی پالس کنترل بر مشخصه‌های کلید برای  $G_0 = 10 \text{ dB}$  و پهنای پالس کنترل  $200 \text{ fs}$  نتایج در شکل ۳ نشان داده شده است. انرژی پالس کنترل که انرژی کلیدزنی نیز گفته می‌شود، انرژی لازم برای ایجاد اختلاف فاز  $\pi$  بین بیت‌های پالس‌های CW و CCW است.

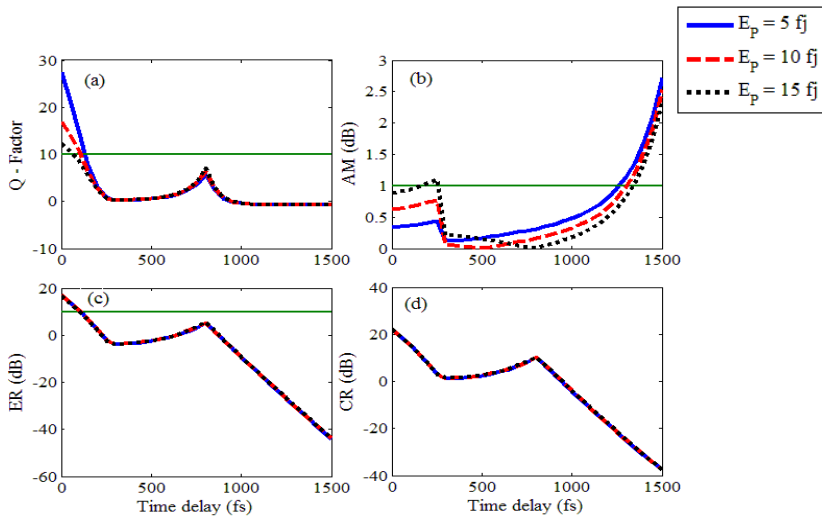


شکل ۳. تغییرات (a) Q، (b) AM، (c) ER و (d) CR برحسب تأخیر بین پالس کنترل و CW به ازای مقادیر مختلف بهره‌ی غیر اشباع (انرژی و پهنای پالس کنترل به ترتیب  $10 \text{ fJ}$  و  $200 \text{ fs}$  هستند).

تغییر انرژی پالس کنترل اختلاف فاز ایجاد شده بین دو پالس را تغییر می‌دهد که این خود منجر به تغییر در عملکرد کلید می‌شود. طبق آنچه که در قسمت (a) شکل ۳ نشان داده شده است افزایش انرژی کنترل فقط باعث کاهش ضریب کیفیت (Q) برای تأخیرهای کمتر از  $150 \text{ fs}$  می‌شود و تأثیری بر مقدار Q به‌ازای تأخیرهای بزرگتر از  $150 \text{ fs}$  ندارد. برای پارامتر AM نیز افزایش انرژی پالس کنترل بازای تأخیرهای کوچکتر از  $300 \text{ fs}$  باعث افزایش مقدار AM می‌شود در حالی که برای تأخیرهای بزرگتر از  $700 \text{ fs}$  باعث کاهش مقدار AM می‌شود. بهترین مقدار AM به‌ازای تأخیر

۵۰۰ و انرژی ۱۰ fJ به دست می‌آید. در نهایت منحنی‌های (c) و (d) نشان می‌دهند که انرژی پالس کنترل تأثیری بر مشخصه‌های ER و CR ندارد.

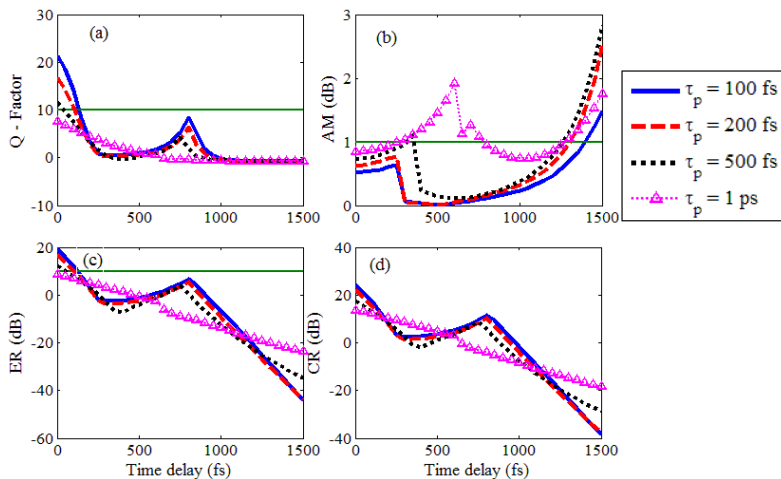
تأثیر پهنای پالس کنترل بر مشخصه‌های کلید در بهره‌ی غیر اشباع ۱۰ dB و انرژی پالس کنترل ۱۰ fJ در شکل ۴ نشان داده شده است. کاهش پهنای پالس کنترل در انرژی ثابت مانند افزایش انرژی آن در پهنای پالس ثابت باعث افزایش توان پالس کنترل ورودی می‌شود. شکل ۴ این موضوع را تأیید می‌کند که با کاهش عرض پالس کنترل در آهنگ بیت بالا عملکرد کلید بهتر می‌شود. طبق شکل ۴ در پهنای پالس‌های ۱۰۰ fs، ۲۰۰ fs و ۵۰۰ fs با افزایش پهنای پالس کنترل، مشخصه‌های کلید خراب می‌شوند. به‌ازای پهنای ۱ ps این تخریب آشکارتر می‌شود. با توجه به اینکه فاصله قله به قله دو پالس مجاور در دنباله داده‌ی ورودی ۱/۵ ps است و زمان انتشار پالس در



شکل ۳. تغییرات (a)  $Q$ ، (b)  $AM$ ، (c)  $ER$  و (d)  $CR$  برحسب تأخیر بین پالس کنترل و CW به ازای مقادیر مختلف انرژی پالس کنترل (بهره سیگنال کوچک و پهنای پالس کنترل به ترتیب ۱۰ dB و ۲۰۰ fs هستند).

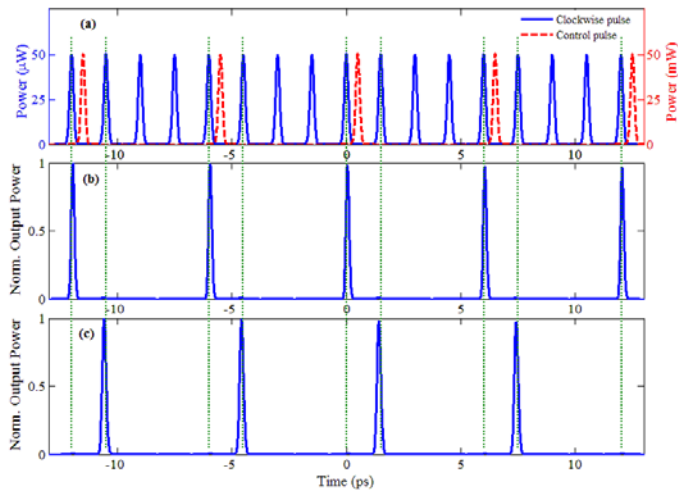
تقویت‌کننده ۱/۳ ps است، برای پهنای پالس ۱ ps تداخل بین پالس‌های مجاور منجر به تخریب مشخصه‌های کلید می‌شود. با توجه به شکل ۴ می‌توان گفت عرض پالس کنترل بیشترین تأثیر را بر عملکرد کلید دارد.

برای بررسی جزئی‌تر بیت‌های کلید شده به درگاه عبور، شکل ۵ دنباله پالس‌های CW و کنترل ورودی، سیگنال خروجی در درگاه عبور برای دو مقدار تأخیر صفر و ۱۲۵۰ fs برای بهره غیراشباع ۵ dB، عرض پالس کنترل ۲۰۰ fs و انرژی پالس کنترل ۱۰ fJ را نشان می‌دهد. قسمت (a) شکل ۵، پالس CW و کنترل ورودی را نشان می‌دهد که کنترل ۵۰۰ fs پس از CW به تقویت‌کننده تزریق می‌شود. بر اساس شکل‌های ۲ تا ۴ و در تأیید آن دنباله بیت خروجی در درگاه عبور در شکل ۵ قسمت (b)، برای تأخیر صفر فمتوثانیه کلیدزنی مناسبی برای بیت‌های مورد نظر در درگاه عبور رخ می‌دهد. در شکل بیت‌هایی که همزمان با کنترل به SOA تزریق می‌شوند به درگاه عبور کلید می‌شوند و مقادیر صفر و یک به وضوح قابل تمایز هستند. نکته جالب برای تأخیر ۱۲۵۰ fs در قسمت (c) است که به دلیل فاصله زیاد پالس کنترل از بیت‌هایی که برای تأخیر صفر به درگاه عبور کلید شده‌اند، یک بیت بعد از بیت‌های مورد نظر به درگاه عبور کلید می‌شود.



شکل ۴. تغییرات (a)  $Q$ ، (b)  $AM$ ، (c)  $ER$  و (d)  $CR$  برحسب تأخیر بین پالس کنترل و CW به ازای مقادیر مختلف پهنای پالس کنترل (بهره سیگنال کوچک و انرژی پالس کنترل به ترتیب ۱۰ dB و ۱۰ fJ هستند).

این انعطاف‌پذیری می‌تواند باعث کاربردهای متعدد و طراحی گیت‌های جدیدی بر پایه‌ای این عملکرد کلید گردد. به دلیل آهنگ بالای پالس داده‌ی بررسی شده در این مقاله می‌توان سرعت عملکرد گیت‌هایی که تاکنون بر پایه این ساختار تعریف شده را افزایش داد [۱۲، ۱۳ و ۱۴].



شکل ۵. (a) پالس‌های CW و کنترل، پالس کنترل ۵۰۰ fs پس از CW به تقویت کننده تزریق می‌شود. خروجی درگاه عبور کلید (شکل ۱) برای تأخیر (b) صفر فمتوثانیه، (c) ۱۲۵۰ fs بین پالس CW و کنترل.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور دستیابی به بیشینه آهنگ بیت در روش تقسیم زمانی، از پالس‌های فوق باریک با لحاظ کردن تمامی اثرات غیرخطی این حوزه اعم از درون بانندی و میان بانندی استفاده شده است. از طرفی دیگر به منظور حداقل کردن تأثیر مشخصات ساختار بر عملکرد کلید، تقویت‌کننده نوری نیم‌رسانا را در مرکز حلقه و با طول  $100\ \mu\text{m}$  میکرومتر در نظر گرفته‌ایم. همین‌طور خواص کلید ساگاناک در حوزه زیر قله و ثانیه، تأثیر مشخصه‌های بهره سیگنال کوچک، انرژی و عرض پالس کنترل بر عملکرد کلید و نیز خروجی نهایی کلید مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت نشان داده شد که اثر عرض پالس کنترل بیشترین تأثیر را بر عملکرد کلید دارد. همین‌طور نشان داده شده می‌توان با تغییر تأخیر بین رشته بیت داده و کنترل یک رشته داده‌ی خاصی را کلید کرد. با این ایده می‌توان دروازه‌های منطقی تمام نوری فوق سریع با استفاده از کلید تداخلی ساگاناک مبتنی بر تقویت‌کننده نوری نیم‌رسانا طراحی کرد.

- [1] S. Kawanishi, "Ultrahigh-speed optical time-division-multiplexed transmission technology based on optical signal processing" *IEEE J. of Quantum Electron*, 1998, vol. 34, no. 11, pp. 2064-2079.
- [2] K. E. Zoiros, J. Vardakas, T. Houbavlis, M. Moysidis, "Investigation of SOA-assisted Sagnac recirculating shift register switching characteristics," *Optik*, 2005, vol. 116, no. 11, pp. 527–541.
- [3] T. Houbavlis, K. E. Zoiros, "SOA-assisted Sagnac switch and investigation of its roadmap from 10 to 40 GHz," *Opt. Quantum Electron*, 2003, vol. 35, no. 13, pp. 1175–1203.
- [4] G. Papadopoulos, K. E. Zoiros, "On the design of semiconductor optical amplifier-assisted Sagnac interferometer with full data dual output switching capability" *Optics & Laser Technology*, 2011, vol. 43, no. 3, pp. 697–710.
- [5] H. J. S. Dorren, G. D. Khoe, D. Lenstra, "All-optical switching of an ultrashort pulse using a semiconductor optical amplifier in a Sagnac-interferometric arrangement" *Optics Communications*, 2002, vol. 205, no. 4-6, pp. 247–252.
- [6] J. Mark, J. Mørk, "Subpicosecond gain dynamics in InGaAsP optical amplifiers: Experiment and theory" *Appl. Phys. Lett.*, 1992, vol. 61, no. 19, pp. 2281-2283.
- [7] M. Razaghi, V. Ahmadi, M. J. Connelly, "Comprehensive Finite-Difference Time Dependent Beam propagation Model of Counter propagation Picosecond Pulses in a Semiconductor Optical Amplifier," *IEEE J. Lightwave Technol.*, 2009, vol. 27, no. 15, pp. 3162–3174.
- [8] <<http://www.ciphotonics.com>>; <<http://www.kamelian.com>>.
- [9] T. Chattopadhyay, J. N. Roy, "Semiconductor optical amplifier(SOA)-assisted Sagnac switch for designing of all-optical tri-state logic gates," *Optik International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, vol. 122, no. 12, pp. 1073-1078.
- [10] S. Bischoff, M. L. Nielsen, and J. Mørk, "Improving the all-optical response of SOAs using a modulated holding signal," *J. Lightwave Technol.*, 2004, vol. 22, pp. 1303–1308.
- [11] Y. H. Kao, I. V. Goltser, M. Jiang, M. N. Islam, and G. Raybon, "Gain dispersion induced subpicosecond pulse breakup in a fiber and semiconductor laser amplifier combined system," *Appl. Phys. Lett.*, 1996, vol. 69, no. 27, pp. 4221-4223.
- [12] D. K. Gayen, J. N. Roy, R. K. Pal, "All-optical carry lookahead adder with the help of terahertz optical asymmetric demultiplexer" *Optik*, 2012, vol. 123, no. 1, pp. 40–45.
- [13] T. Chattopadhyay, "Terahertz optical asymmetric demultiplexer (TOAD) based half-adder and using it to design all-optical flip-flop" *Optik*, 2012, vol. 123, no. 21, pp. 1961–1964.
- [14] T. Chattopadhyay, J. N. Roy, "All-optical ordinary quaternary inverter (QNOT) using binary NOT gate" *Optik*, in press, 2012.