

All Optical frequency switching of cavity solitons based on localized modulation

Shayesteh Rahmani Anbardan¹, Mansour Eslami², Reza Kheradmand^{1,*}

¹Photonics Group, Research Institute for Applied Physics and Astronomy (RIAPA), University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Department of Physics, University of Guilan, P.O. Box 41335-1914 Rasht, Iran

Received: 04.10.2020 Final revision: 10.05.2023 Accepted: 12.05.2023

Doi: [10.22055/jrmb.2023.18295](https://doi.org/10.22055/jrmb.2023.18295)

Abstract

Local sinusoidal modulation of cavity solitons in an injected Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser¹ above the laser threshold is numerically investigated and their synchronization in a unidirectional interaction regime is discussed. An all-optical frequency switch based on the synchronization of cavity solitons in this regime is proposed and its performance is quantified by two important parameters: 1) external force threshold and 2) response time of the switching. Our study shows that cavity solitons can be used as all-optical frequency switches with a speed that meets the requirements of optical operations.

Keywords: Cavity Soliton, (Vertical-Cavity Surface-Emitting Laser) VCSEL, Self-sustained, Synchronization

* Corresponding Author: r_kheradmand@tabrizu.ac.ir

سوئیچ‌زنی فرکانسی تمام نوری سالیتون‌های کاواک بر پایه مدولاسیون

موضوعی

شایسته رحمانی انباردان^۱، منصور اسلامی^۲، رضا خردمند^{۱*}

گروه فوتونیک، پژوهشکده فیزیک کاربردی و ستاره‌شناسی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
 گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۱۳ ویرایش نهائی: ۱۴۰۲/۰۲/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۲/۱۸

Doi: [10.22055/jrmbms.2023.18295](https://doi.org/10.22055/jrmbms.2023.18295)

چکیده

مدولاسیون سینوسی موضعی سالیتون‌های کاواک در یک لیزر نشرکننده از سطح کاواک بالای حد آستانه لیزرزیایی به‌طور عددی مورد مطالعه قرار گرفته و همزمانی آنها در یک رژیم برهم‌کنشی یک طرفه بحث شده است. در ادامه، سوئیچ فرکانسی تمام نوری مبتنی بر این رژیم همزمانی سالیتون‌های کاواک معرفی شده است و عملکرد آن بر اساس دو شاخص مهم (۱) آستانه نیروی خارجی و (۲) زمان پاسخ سوئیچ‌زنی از نظر کمی بررسی گردیده است. مطالعات ما نشان می‌دهد که استفاده از سالیتون‌های کاواک به‌عنوان سوئیچ‌های فرکانسی تمام نوری که سرعتی متناسب با نیاز ارتباطات نوری دارند امکان‌پذیر می‌باشد.

کلیدواژگان: سالیتون کاواک، لیزر نشرکننده از سطح کاواک، خود تقویت کننده، همزمانی

مقدمه

روش‌های نوری در فناوری اطلاعات از اهمیت خاصی برخوردارند، زیرا استفاده از این روش‌ها امکان عملکرد سریع، کم مصرف و موازی افزاره‌های بسیار کوچک (در ابعاد نانو) را ممکن می‌سازد. به‌عنوان مثال مصونیت فوتون‌ها در برابر ناهمدوسی، که مهمترین دلیل تلفات اطلاعات قلمداد می‌شود، آنها را به‌طور منحصر به‌فرد برای چنین فناوری‌هایی مناسب می‌سازد. با این حال کنترل آنها در چنین مقیاسی یک چالش عمده به‌شمار می‌رود. روش‌های عملی برای دست یافتن به چنین کنترلی به‌واسطه برهمکنش‌های نور با ماده برای هدایت و دستکاری فوتون‌ها (و در نتیجه

اطلاعات) امکان‌پذیر است. فرآیندهای غیرخطی در این برهمکنش‌ها منشأ فیزیکی ساختمان سوئیچ‌ها، گیت‌ها، میانگیرها و دیگر افزاره‌های فوتونیک در مدارات نوری می‌باشند [۱-۳].

یکی از پیشرفت‌های اساسی در زمینه ارتباطات نوری، معرفی سالیتون‌های کاواک به‌عنوان عناصر اطلاعات مستقل و قابل آدرس‌دهی است [۴]. این سالیتون‌ها نقاط موضعی نور هستند که در یک پس‌زمینه کم شدت قرار دارند. امکان شکل‌گیری این سالیتون‌ها در انواع کاواک‌های نوری غیرخطی با ویژگی‌های متفاوت و کاربردهای بالقوه از جمله قابلیت روشن و خاموش شدن به‌صورت منفرد [۵و۶] و یا در حالت دو یا چند قله‌ای [۷] و یا به‌صورت ایستا یا چرخان [۸] و یا حتی



برای توصیف دینامیک سیستم با استفاده از معادلات زیر داده می‌شوند [۱۸ و ۱۹]:

$$\begin{aligned}\dot{E} &= \sigma(P - E_I - (1 + i\theta)E + i\nabla^2 E) \\ \dot{D} &= -b\left[1/2(E^*P + EP^*) + D - J - d\nabla^2 D\right] \\ \dot{P} &= \Gamma(1 + i\Delta)\left[(1 - i\alpha)D(1 - \beta D)E - P\right]\end{aligned}$$

در روابط فوق E و P به ترتیب میدان کاواک و پلاریزاسیون ماده می‌باشند، D چگالی حامل‌ها، σ نرخ واهلش کاواک، b نرخ واهلش حامل‌ها، E_I میدان تزریقی، θ ناکوکی بین کاواک و میدان تزریقی، α فاکتور افزایش پهنای باند، J جریان تزریق، d ثابت پخش حامل‌ها و β ضریب بهره غیرخطی است. پراش توسط عملگر لاپلاس ∇^2 توصیف می‌شود. شاخص زمان، توسط زمان واهلش پلاریزاسیون (که از مرتبه 10^{-13} ثانیه است) و شاخص مکان، توسط ریشه مجذور پارامتر پراش (که از مرتبه ۴-۵ میکرومتر است)، بهنجار شده است. در این مقاله

$$\Gamma(D) = 2.308D + 1.206 / \sqrt{1 + \alpha^2}$$

$$\delta(D) = 0.155D - 0.146$$

$$\Delta = -\alpha + 2\delta / \Gamma$$

که $\Gamma(D)$ پهنای خط بهره است و $\delta(D)$ ناکوکی بین فرکانس مرجع و فرکانسی است که در آن بهره ماکزیمم می‌شود. برای حل معادلات دینامیکی از روش گام مجزا مبتنی بر تبدیل فوریه با شرایط مرزی پرودییک استفاده می‌شود. در این روش قسمت جبری و لاپلاسی معادلات به صورت مجزا و مستقل از هم حل می‌شوند. قسمت جبری با استفاده از الگوریتم رانجه-کاتا حل شده در حالی که برای عملگر لاپلاسی یک تبدیل فوریه سریع پذیرفته شده است. تحلیل پایداری خطی

در تعامل با یکدیگر [۹] وجود دارد. تاکنون مطالعات گسترده‌ای بر روی قابلیت بالقوه سالیتون‌های کاواک در پردازش تمام نوری اطلاعات انجام شده است. به عنوان مثالی در این زمینه می‌توان به بررسی اثر سالیتون‌ها در افزایش پهنای باند مدولاسیون [۱۰] کاربرد سالیتون‌ها به عنوان حافظه‌های فلیپ-فلاپ [۱۱] استفاده از سالیتون‌ها به عنوان گیت‌های AND/OR [۱۲] و شانه‌های فرکانسی^۱ [۱۳-۱۶] اشاره کرد.

در این مقاله با بهره‌گیری از دینامیک همزمانی دو سالیتون کاواک در یک لیزر نشر کننده از سطح کاواک [۱۷] امکان استفاده از سالیتون‌های کاواک را به عنوان سوئیچ‌های فرکانسی تمام نوری مورد مطالعه و بررسی قرار دادیم. پس از بررسی پاسخ مدولاسیونی یک لیزر نشر کننده از سطح کاواک با تزریق خارجی در هنگام میزبانی یک سالیتون کاواک، و با بهره‌گیری از این واقعیت که نوسانات شدت سالیتون‌های کاواک، زمانی که برهم‌کنش آنها یک طرفه است می‌توانند همزمان شوند به این صورت که سالیتون قوی‌تر سالیتون ضعیف‌تر را مجبور به تکرار ریتم نوسانی خود می‌کند [۱۷]، به بحث در مورد قدرت برهم‌کنش و بازده همزمانی به‌ازای فواصل و ناکوکی‌های فرکانسی مختلف پرداخته و یک سوئیچ فرکانسی تمام نوری ارائه داده شد.

مدل

لیزر نیم‌رسانای مورد مطالعه در این مقاله از نوع VCSEL می‌باشد که شامل ساختار چاه کوانتومی چندگانه GaAs/AlAs به عنوان محیط فعال است و انرژی سیستم توسط یک پرتو نگهدارنده ایستا و پهن و همچنین یک جریان الکتریکی که آستانه لیزرزیابی را تأمین می‌کند، فراهم می‌شود. معادلات ماکسول-بلاخ

¹ Frequency comb

قفل‌شدگی تزریقی و قفل نشده را از هم جدا می‌کند را به‌ازای پارامترهای مختلف نشان می‌دهد. برای سوئیچ‌زنی سالیتون‌های کاواک در این سیستم، پرتوهای نویسنده با شدت E_{sw} و با پهنای w در مرکز نقاط (x_i, y_i) به پرتو نگهدارنده اضافه می‌شوند:

۲

$$E_{sw} = e^{-[(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2]/2w}$$

بعد از اینکه سالیتون‌ها با موفقیت روشن شدند، پرتو نگهدارنده با استفاده از یک تابع هارمونیک مدوله می‌شود:

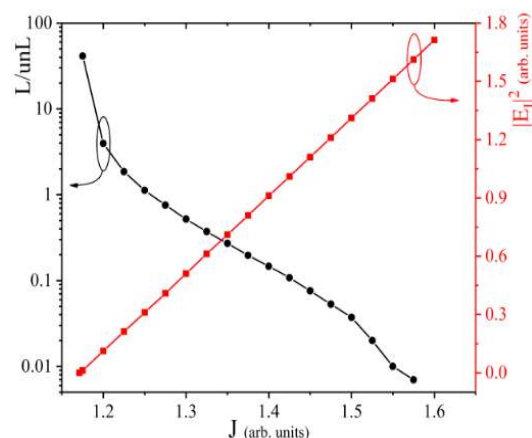
۳

$$E_I(\tau) = E_I \{1 + m \sin(\omega\tau)\}$$

که در رابطه فوق m دامنه یا قدرت مدولاسیون و ω فرکانس مدولاسیون نامیده می‌شوند.

شکل ۲ الف پاسخ مدولاسیون سیستم در یک نقطه دلخواه در پس زمینه و همچنین در قله سالیتون CS_1 را در زمانی که فقط یک سالیتون وجود دارد و همچنین در حضور سالیتون دیگر نشان می‌دهد. طبق نمودار، فرکانس تشدید در هر دو حالت در فرکانس ۱۰۳ گیگاهرتز اتفاق می‌افتد. به‌علاوه این نمودار نشان می‌دهد که پس زمینه نیز در این فرکانس پاسخ بیشتری نشان می‌دهد. نکته قابل توجه در این نمودار این است که تقویت نوسانات ورودی در قله سالیتون کاواک در حضور سالیتون دوم ضعیف‌تر می‌شود. به‌عبارت دیگر حضور سالیتون دوم موجب سرکوب بهره نوری در پاسخ به تحریک تشدید می‌شود.

جواب‌های هموزن و پایا به‌وسیله بررسی پاسخ سیستم به اختلال‌های کوچک حول حالت پایا انجام می‌گیرد. به‌ازای مقادیر $d = 0.052$, $\alpha = 4$, $b = 10^{-4}$, $\sigma = 4 \times 10^{-2}$ و $\theta = -2$ و همچنین قابلیت شکل‌گیری حالت‌های فضایی و سالیتون‌های کاواک در این شرایط وجود دارد. لازم به‌ذکر است که جریان آستانه این سیستم $J_{th} = 1.17$ است. از سوی دیگر، سیستم‌های نیم‌رسانا با تزریق خارجی متحمل ناپایداری زمانی که ناشی از دوشاخگی هوف (Hopf) است، می‌شوند. این ناپایداری منجر به رفتار آشفته در پرو فایل گسیلی لیزر نیم‌رسانا قبل از نقطه قفل‌شدگی تزریق می‌شود. بنابراین سالیتون‌هایی که در این ناحیه شکل



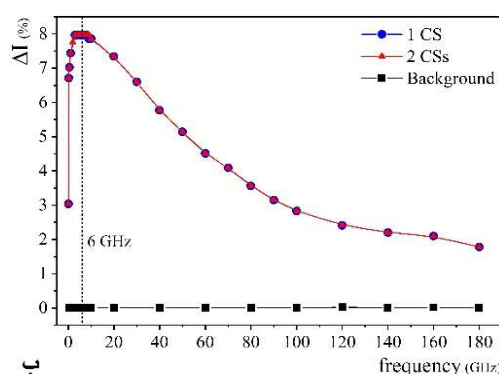
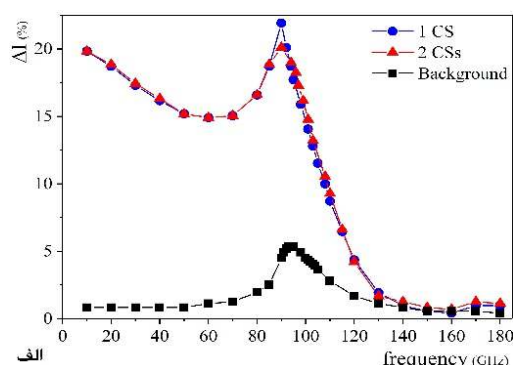
شکل ۱. ناحیه قفل نشده در حال پیشروی در نتیجه ناپایداری هوف (محور سمت راست - مربع‌های قرمز) و منطقه پایدار در حال پسروی که به‌صورت نسبت منطقه قفل شده به قفل نشده نشان داده شده است (محور سمت چپ - دایره‌های مشکی) برحسب افزایش جریان پمپ.

می‌گیرند دارای شدت و فاز نوسانی خواهند بود [۲۰]. از آنجائی که در سیستم مورد مطالعه ما نیاز است که سیستم دور از چرخه‌های حدی، که از انشعاب هوف ناشی می‌شوند، قرار داشته باشد در هنگام انتخاب مقادیر پارامترها باید دقت شود که سیستم در ناحیه قفل‌شدگی تزریق قرار گیرد. شکل ۱، مرز هوف، که ناحیه

نتایج شبیه‌سازی، همان‌طور که در شکل ۲ آورده شده است، نشان می‌دهد که تقویت نوسانات هارمونیک ورودی در قله CS_1 در حضور و بدون حضور سالیتون دوم هیچ تفاوتی ندارد و فرکانس تشدید در فرکانس خیلی کمتری (حدود ۶ گیگاهرتز) نسبت به حالت قبل اتفاق می‌افتد. همان‌طور که انتظار می‌رود نقطه‌ای از پس‌زمینه که در فاصله‌ای بیشتر از طول پخش حاملین قرار دارد هیچ تغییرات شدتی را تجربه نمی‌کند زیرا نوسانات جمعیت ناشی از مدولاسیون موضعی نمی‌تواند مسیر بیشتری را قبل از بازترکیب حاملین طی کند.

هم‌زمانی، تنظیم ریتم اجسام نوسان‌کننده به دلیل برهم‌کنش ضعیف بین آنهاست [۲۱]. در کاری که اخیراً انجام شده [۱۷]، به بررسی همزمانی بین دو سالیتون کاواک با اعمال یک پرتو کنترل‌شده مدوله شده در زمان به هر یک از آنها به صورت مستقل پرداختیم و شرایطی را معرفی کردیم که در آن سالیتون‌ها می‌توانند با فرکانس نوسانی یکسان (همزمان) نوسان کنند. با مطالعه دو حالت مختلف با ناکوکی ($v\Delta = v_1 - v_2$) کم و زیاد نشان دادیم که نیرویی (ϵ_1/ϵ_2) به اندازه کافی قوی لازم است تا نوسانات دو سالیتونی که فرکانس مدولاسیون آنها به مقدار قابل توجهی از هم متفاوت است را همزمان کند. به عبارت دیگر نوسانگر مغلوب مجبور به نوسان با فرکانس نوسانگر غالب می‌شود.

در این مقاله بر اساس تئوری مطرح شده فوق یک سوئیچ فرکانسی تمام نوری مطرح کرده و برای اینکه عملکرد سوئیچ مطرح شده را از نظر کمی بررسی کنیم، دو پارامتر مهم را مورد مطالعه قرار می‌دهیم: ۱- آستانه نیروی خارجی و ۲- زمان پاسخ سوئیچ به‌ازای



شکل ۲. پاسخ مدولاسیون در قله سالیتون، زمانی که سالیتون تنهاست (دایره‌های آبی) و در حضور سالیون دوم (مثلث‌های قرمز) و همچنین در یک نقطه دلخواه در پس‌زمینه (مربع‌های مشکی). الف: پاسخ مدولاسیون پرتو نگهدارنده، قوی‌ترین پاسخ در فرکانس ۱۰۳ گیگاهرتز داده شده و شدت جریان الکتریکی ۱۰ درصد بالای آستانه است. ب: پاسخ مدولاسیون موضعی، قوی‌ترین پاسخ در فرکانس ۶ گیگا هرتز داده شده.

در شبیه‌سازی مشابهی پاسخ سیستم به مدولاسیون موضعی سالیتون نیز بررسی شد، بدین صورت که پرتو نویسنده با استفاده از معادله ۴ مدوله گردید:

$$E_i(\tau) = \epsilon_i \sin(v_i \tau) ; i = 1, 2$$

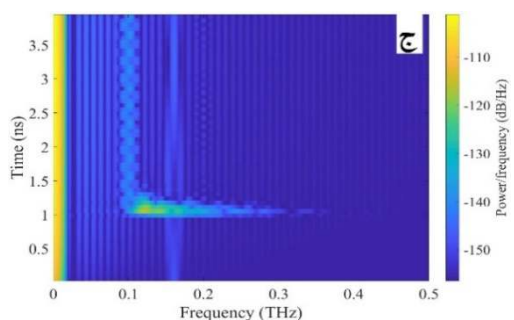
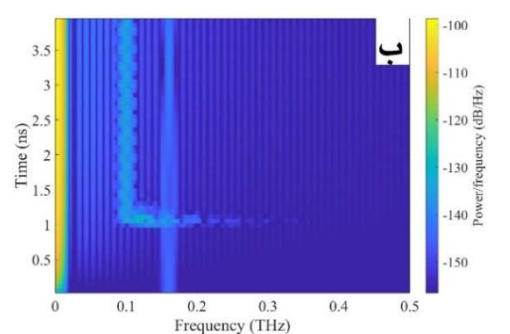
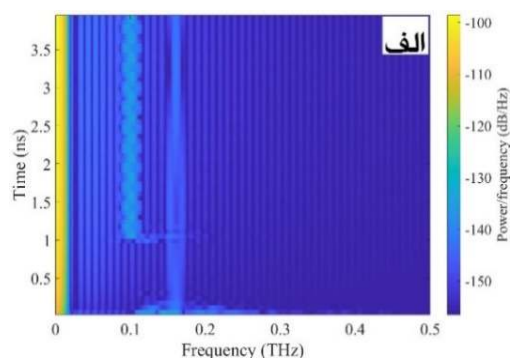
۴

در این معادله ϵ_i و v_i به ترتیب قدرت و فرکانس مدولاسیون موضعی هستند.

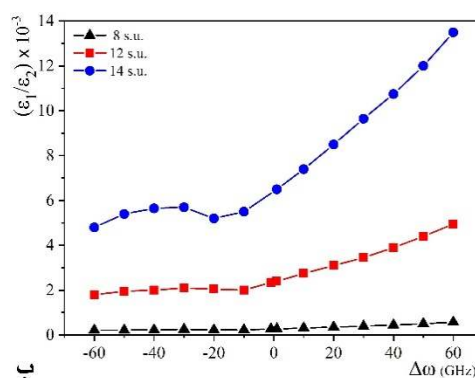
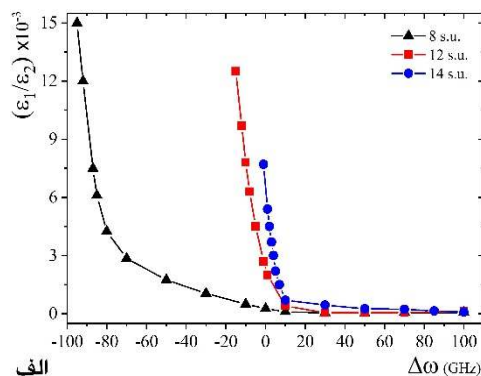
فاصله بیشتر مورد نیاز است. همچنین این نمودار بیان می‌کند که در ناکوکی‌های منفی برای فواصل کمتر نیروی کمتری مورد نیاز است، به عبارتی در ناکوکی‌های منفی، همزمانی فقط در فاصله $8s.u.$ یا کمتر امکان‌پذیر است اگرچه در این فاصله یک پرتو کنترلی با فاز مخالف پرتو نگهدارنده برای جلوگیری از یکی شدن سالیتون‌ها مورد نیاز است. لازم به ذکر است که زمان لازم برای ادغام شدن سالیتون‌ها بسیار بیشتر از زمان سوئیچ‌زنی نانو سوئیچ مورد بررسی است. بنابراین ایده نانو سوئیچ فرکانسی بر پایه سالیتون‌های کاواک جدا از اعمال پرتو کنترلی در مرکز خط واصل دو سالیتون برای جلوگیری از یکی شدن آنها به قوت خود باقی است. شکل ۳ب نموداری مشابه با شکل ۳الف است با این تفاوت که در این نمودار فرکانس مدولاسیون سالیتون غالب ثابت و برابر با ۱۰۰ گیگاهرتز در نظر گرفته شده است. با مقایسه روند مشاهده شده در دو نمودار فوق این نتیجه حاصل می‌شود که همزمانی و سوئیچ‌زنی، هم به قدرت (دامنه مدولاسیون) سالیتون غالب و هم به فرکانس آن بستگی دارد. به عنوان مثال در شکل ۳ب که فرکانس سالیتون غالب ثابت و کافی است، همزمانی برای تمام ناکوکی‌های مثبت و منفی به خصوص در فواصل کم اتفاق می‌افتد. به طوری که در فواصل بیشتر برای برقراری همزمانی فقط نیرو اهمیت پیدا می‌کند. ولی طبق شکل ۳الف زمانی که فرکانس سالیتون غالب متغیر است، علامت ناکوکی اهمیت پیدا می‌کند، به علاوه نیرو به گونه‌ای است که همزمانی در فرکانس‌های منفی، فقط

ناکوکی‌های مختلف و فواصل مختلف دو سالیتون کاواک. اخیراً نشان داده شده که در یک لیزر تزریق قفل شده، نیروی جاذبه‌ای بین دو سالیتون وجود دارد که این نیرو به صورت نمایی با فاصله سالیتون‌ها کاهش می‌یابد و بعد اثر آن بیشتر از قطر سالیتون است. وجود این نیرو در نهایت منجر به ادغام سالیتون‌ها و شکل‌گیری یک سالیتون می‌شود [۲۲]. از طرف دیگر برای برقراری یک هم‌زمانی مؤثر و داشتن یک سوئیچ پربازده، بهتر است که سالیتون‌ها در کمترین فاصله ممکن نسبت به هم قرار گیرند. به همین منظور در این کار برای غلبه بر نیروی جاذبه بین دو سالیتون از یک پرتو با شدت بسیار کم و با فاز مخالف نسبت به پرتو نگهدارنده که در مرکز خط واصل دو سالیتون اعمال می‌شود استفاده می‌کنیم. این کار به ما کمک می‌کند که از یکی شدن سالیتون‌ها جلوگیری کنیم. همچنین این کار اجازه نوشتن سالیتون‌ها در فاصله‌ای کمتر برای داشتن همزمانی مؤثرتر را می‌دهد. ما آستانه همزمانی (سوئیچ‌زنی) را جایی تعریف می‌کنیم که دامنه فرکانس مغلوب در قله سالیتون CS_2 از $1/e$ دامنه فرکانس غالب بیشتر شود. با این تعریف آستانه نیروی خارجی به‌ازای ناکوکی‌های مختلف در شکل ۳الف برای سه فاصله مختلف نمایش داده شده است. در این شکل فرکانس CS_2 (مغلوب) ثابت و برابر با ۱۰۰ گیگاهرتز در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل، زمانی که ناکوکی مثبت است (زمانی که فرکانس مدولاسیون سالیتون غالب بیشتر از فرکانس مدولاسیون سالیتون مغلوب است) نیروی کمتری برای رسیدن به همزمانی حتی برای ناکوکی‌های بالاتر و

نیروی آستانه مربوطه و ناکوکی ۶۰- نشان می‌دهد. واضح است که همزمانی سالیتون‌ها در فواصل دورتر بسیار کندتر اتفاق می‌افتد و این در حالی است که نیروی کافی برای این مقدار ناکوکی وجود دارد. به‌علاوه بر پایه این حقیقت که زمان پاسخ در یک فاصله ثابت، تحت تأثیر نیرو و ناکوکی قرار نمی‌گیرد می‌توان این‌طور نتیجه گرفت که در صورت کافی بودن نیرو برای ناکوکی و فاصله مربوطه همزمانی در چندپیکو ثانیه اتفاق می‌افتد و در صورت ناکافی بودن نیرو همزمانی اصلاً اتفاق نمی‌افتد.



برای فواصل بسیار نزدیک دو سالیتون و به‌ازای نیروی بسیار زیاد ممکن است.



شکل ۳. الف: آستانه همزمانی (سوئیچ زنی) از نظر نیروی خارجی زمانی که فرکانس سالیتون مغلوب ثابت و برابر با ۱۰۰ گیگاهرتز است در حالی که دامنه و فرکانس مدولاسیون سالیتون غالب متغیر است. ب: آستانه همزمانی (سوئیچ زنی) از نظر نیروی خارجی زمانی که فرکانس سالیتون غالب ثابت و برابر با ۱۰۰ گیگاهرتز است.

زمان پاسخ نانو سوئیچ نیز به‌عنوان دومین پارامتر مهم به‌ازای فواصل مختلف دو سالیتون و شدت و فرکانس مدولاسیون مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که زمان پاسخ به‌ازای یک فاصله ثابت، مستقل از نیرو و ناکوکی است. اگرچه این زمان با افزایش فاصله سالیتون‌ها به‌صورت نمایی افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال شکل ۴ طیف گرفته شده از سالیتون مغلوب CS_2 را به‌ازای فواصل مختلف دو سالیتون در

مراجع

[1] J.T. Wolfson, R.W. Boyd, *Nonlinear Optics*, Third Edition, 3rd ed., USA: Academic Press, Inc., Orlando, FL, (2008).

[2] D.A.B. Miller, *Device requirements for digital optical processing* 10257 (1990) 68–76. <https://doi.org/10.1117/12.2283569>

[3] D.A.B. Miller, Are optical transistors the logical next step?, *Nature Photonics* 4 1 (2010) 3–5. <https://www.nature.com/articles/nphoto.n.2009.240>

[4] S. Barland *et al.*, Cavity solitons as pixels in semiconductor microcavities, *Nature* 419 6908 (2002) 699–702. <https://www.nature.com/articles/nature01049>

[5] E. Taghavi, M. Eslami, R. Kheradmand, Coherent and incoherent switching of cavity solitons in an optically injected VCSEL, *Journal of Optics* 21 1 (2019) 015402. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2040-8986/aaf2ab/meta>

[6] M. Eslami, S.Z. Gandomani, F. Prati, H. Tajalli R. Kheradmand, Ultra low-energy switch based on a cavity soliton laser with pump modulation, *Journal of Optics* 19 1 (2017) 015502. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2040-8986/19/1/015502/meta>

[7] M. Eslami, R. Kheradmand, P. Bahari, H. Tajalli, Twin laser cavity solitons in a VCSEL with saturable absorber, *European Physical Journal D* 69 9 (2015). <https://link.springer.com/article/10.1140/epjd/e2015-60261-x>

شکل ۴. طیف نوسانات شدت سالیتون مغلوب که فرکانس نوسانات را برحسب زمان با استفاده از شدت آستانه مربوطه نشان می‌دهد. ناکوکی ۶۰- در نظر گرفته شده و فواصل جدایی سالیتون‌ها الف: ۸ واحد فضایی ب: ۱۲ واحد فضایی ج: ۱۶ واحد فضایی در نظر گرفته شده است. که فرکانس نوسانات سالیتون مغلوب از ۱۶۰ گیگاهرتز به ۱۰۰ گیگاهرتز (فرکانس نوسانات سالیتون غالب) بعد از زمان الف: ۰٫۲۳۷ نانوثانیه ب: ۰٫۴۶۸ نانوثانیه ج: ۰٫۵۴۹ نانوثانیه سوئیچ می‌کند. $J=20\%$

بحث و نتیجه‌گیری

هم‌زمانی سالیتون‌های کاواک در یک لیزر نشر کننده از سطح کاواک با تزریق خارجی مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. در این سیستم تزریق خارجی باعث آزادی فاز نوسانات سینوسی سالیتون‌های مدوله شده می‌شود و زمانی که شدت تزریق خارجی به اندازه کافی قوی باشد سیستم از ناحیه ناپایدار هویف وارد ناحیه پایدار قفل شدگی تزریق می‌شود و امکان هم‌زمانی آنها را فراهم می‌کند. از طرفی زمانی که ناکوکی فرکانسی بین دو سالیتون غیر صفر است، اگر نسبت شدت مدولاسیون یک سالیتون به دیگری به اندازه کافی بالا باشد، فرکانس نوسان دو سالیتون یکی می‌شود. به عبارتی سالیتون مغلوب مجبور به نوسان با فرکانس سالیتون غالب می‌شود. زمان داده شد که برای ناکوکی‌های بزرگتر، زمانی که فرکانس سالیتون غالب ثابت است، نیروی بیشتری برای ایجاد هم‌زمانی لازم است در حالی که با ثابت بودن فرکانس مغلوب نیروی کمتری برای برقراری هم‌زمانی در ناکوکی‌های بیشتر مورد نیاز است. در نهایت با مطالعه پاسخ فرکانسی فرآیند هم‌زمانی یک نانو سوئیچ فرکانسی با زمان سوئیچ‌زنی در حد چند دهم نانوثانیه گزارش شد.

- based on dissipative Kerr and quadratic cavity solitons, *Progress in Quantum Electronics* **86** (2022) 100437. <https://doi.org/10.1016/j.pquantelec.2022.100437>
- [15] G.L. Oppo, D. Grant, M. Eslami, Temporal cavity solitons and frequency combs via quantum interference, *Physical Review A* **105** 1 (2022) L011501. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.105.L011501>
- [16] H. Bao *et al.*, Laser cavity-soliton microcombs, *Nature Photonics* **13** 6 (2019) 384–389. <https://www.nature.com/articles/s41566-019-0379-5>
- [17] S.R. Anbardan, R. Kheradmand, F. Prati, Cavity solitons synchronization, *Journal of Nanophotonics* **13** 1 (2018) 12502. <https://doi.org/10.1117/1.JNP.13.012502>
- [18] X. Hachair *et al.*, Cavity solitons in a driven VCSEL above threshold, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **12** 3 May (2006) 339–350. <https://doi.org/10.1109/JSTQE.2006.872711>
- [19] M. Eslami, R. Kheradmand, G. Hashemvand, The effect of nonlinear gain on the characteristics of an optically injected VCSEL and cavity solitons, *Optical and Quantum Electronics* **46** 2 (2014) 319–329. <https://link.springer.com/article/10.1007/s11082-013-9762-5>
- [20] M. Eslami, R. Kheradmand, K.M. Aghdami, Complex behavior of vertical cavity surface emitting lasers with optical injection, *Physica Scripta*, **T157** T157 (2013) 14038.
- [8] F. Prati, L.A. Lugiato, G. Tissoni, M. Brambilla, Cavity soliton billiards, *Physical Review A atomic, molecular, and optical physics* **84** 5 (2011) 1–6. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.84.053852>
- [9] M. Turconi, F. Prati, S. Barland, G. Tissoni, Excitable solitons in a semiconductor laser with a saturable absorber, *Physical Review A atomic, molecular, and optical physics* **92** 5 (2015) 1–7. <https://doi.org/10.1103/PhysRevA.92.053855>
- [10] S. Ahmadipناه, R. Kheradmand, F. Prati, Enhanced Resonance Frequency and Modulation Bandwidth in a Cavity Soliton Laser, *IEEE Photonics Technology Letters* **26** 10 (2014) 1038–1041. <https://doi.org/10.1109/LPT.2014.2312735>
- [11] S. Ahmadipناه, R. Kheradmand, F. Prati, Scaling law for dynamical hysteresis of cavity solitons, *Journal of Optics* **18** 2 (2016) 025504. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2040-8978/18/2/025504/meta>
- [12] M. Eslami, R. Kheradmand, All optical logic gates based on cavity solitons with nonlinear gain, *Optical Review* **19** 4 (2012) 242–246. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10043-012-0037-3>
- [13] M. Rowley *et al.*, Self-emergence of robust solitons in a microcavity, *Nature* **608** 7922 Aug. (2022) 303–309. <https://www.nature.com/articles/s41586-022-04957-x>
- [14] M. Nie, Y. Xie, B. Li, S.W. Huang, Photonic frequency microcombs

potential of cavity solitons, *Physical Review E* **97** 3 (2018) 1–5.
<https://doi.org/10.1103/PhysRevE.97.032208>

<https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-8949/2013/T157/014038>

[21] A. Pikovsky, M. Rosenblum, Synchronization: A general phenomenon in an oscillatory world, *Nova Acta Leopoldina NF* **88** 332 (2003) 255–268.

[22] S.R. Anbardan, C. Rimoldi, R. Kheradmand, G. Tissoni, F. Prati, Exponentially decaying interaction