



## کلیدزنی سولیتون کاواک تپنده در لیزر سولیتون کاواک

حمید واحد<sup>۱</sup>، محسن فتح‌اللهی<sup>۲</sup> و علی رستمی<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup> دانشکده مهندسی فن‌آوری نوین، دانشگاه تبریز، تبریز

<sup>۲</sup> پردیس دانشگاه تبریز، تبریز

چکیده - خواص کاربردی سولیتون کاواک، مثل امکان نوشتن و پاک کردن در نقاط اختیاری از سطح مقطع عرضی کاواک و امکان حرکت کنترل شده آنها، سبب ارائه کاربردهایی در خطوط درنگ تمام نوری، پردازش نوری اطلاعات و حافظه‌های نوری شده است. در این مقاله، امکان کلیدزنی نوع جدیدی از سولیتونهای کاواک بنام سولیتون کاواک تپنده در لیزر سولیتون کاواک بررسی شده است. در این راستا، با محاسبات عددی و شبیه‌سازی و با انتخاب مناسب پارامترهای سیستم، کلیدزنی روشن و خاموش یک سولیتون کاواک تپنده در یک نقطه اختیاری از سطح مقطع عرضی کاواک نشان داده شده است.

کلید واژه- کلیدزنی، سولیتون کاواک تپنده، لیزر سولیتون کاواک

## Switching of the Self-Pulsing Cavity Soliton in the Cavity Soliton Laser

Hamid Vahed<sup>1</sup>, Mohsen Fathollahi<sup>2</sup> and Ali Rostami<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Engineering-Emerging Technologies, University of Tabriz, Tabriz

University of Tabriz, Tabriz

Abstract- The applicant properties of the Cavity Soliton(CS) for example, writing and deleting of CS in the arbitrary positions of the transverse cross section in the cavity and the controlled motion of the CS, causes to present the application in the all-optical delay line, all-optical information processing and optical memories. In this paper, we investigated switching ON and OFF of the self-pulsing CSs in the Cavity Soliton Laser (CSL). Therefore, we showed the switching ON and OFF of the Self-pulsing-CS in the arbitrary position of the transverse cross section in the cavity by using of the numerical calculations and simulation and suitable selection of system parameters.

Keywords: Switching, Self-Pulsing Cavity Soliton, Cavity Soliton Laser

## ۱- مقدمه

$$\frac{\partial D}{\partial t} = b_1 [\mu - D(1 + |F|^2) - BD^2] \quad (1-b)$$

$$\frac{\partial d}{\partial t} = b_2 [-\gamma - d(1 + |F|^2) - Bd^2] \quad (1-c)$$

که  $F$ ، دامنه کند تغییر میدان الکتریکی درون کاواک است.  $D$ ، و  $d$ ، متغیرهای مربوط به جمعیت حاملین به ترتیب در محیط فعال و جاذب هستند. پارامترهای  $\alpha$ ، و  $b_1$  ( $b_2, \beta$ )، به ترتیب فاکتور افزایش خط و نسبت طول عمر فوتون در کاواک به طول عمر غیر نوری حاملین  $\tau_{ph}/\tau_{nr}$ ، در محیط بهره (جاذب) هستند.  $B$ ، ضریب بازترکیب نوری حاملین در نیم رسانا و  $s$ ، پارامتر اشباع است.  $\mu$ ، پارامتر دمش جریان الکتریکی در محیط بهره و  $\gamma$ ، پارامتر جذب در محیط جاذب اشباع پذیر را نشان می‌دهد. در این معادلات زمان بر حسب طول عمر فوتون در کاواک خالی ( $\approx 3ps$ ) و مکان بر حسب طول پراش ( $\approx 5\mu m$ ) مقیاس بندی شده است.

از میان جوابهای ممکن معادلات، جوابی ایستا است که تغییرات زمانی نداشته باشد که با صفر قرار دادن مشتقات زمانی بدست می‌آید ( $F=D=d$ ) و جوابی همگن است که متغیرهای سیستم هیچگونه وابستگی به مختصات فضایی عرضی  $x$  و  $y$  نداشته باشند که در اینصورت باید جمله لاپلاسی نیز صفر در نظر گرفته شود. جوابی که هر دو خاصیت ایستایی و همگنی را داشته باشد، جواب ایستای همگن ( $HSS$ ) نامیده می‌شود. بنابراین حل ۳ معادله جفت شده بالا، در شرایط ایستای همگن ( $F=D=d=0, \nabla_{\perp}^2 F=0$ ) منجر به دو دسته جواب بدیهی (حالت غیرلیزرزا) و جواب غیربدیهی (حالت لیزرزا) شده است. تحلیل پایداری خطی جوابهای همگن، مقادیر  $B=0.1$ ،  $\alpha=2$ ،  $\beta=1$ ،  $\gamma=1.6$  و  $s=3$  را برای پارامترهای سیستم نتیجه داده است. در شکل (۱) منحنی شدت همگن ایستا بر حسب پارامتر دمش ( $\mu$ ) رسم شده است و در آن، حالت دوپایایی بین نقاط  $T$  و  $P$  دیده می‌شود.

در ادامه، برای بررسی دینامیک سیستم، این سه معادله جفت شده از طریق شبیه‌سازی عددی و بکارگیری روش گام مجزا، با شرایط مرزی پرپودیک در یک شبکه فضایی دو بعدی  $128 \times 128$  با گام فضایی  $ds=0.25$  و گام

امواج نوری تمایل دارند به علت پاشندگی و پراش در طول مسیر انتشار پهن شوند. حال اگر در محیطهای نوری پهن‌شدگی حاصل از پاشندگی یا پراش، توسط پدیده‌های غیرخطی جبران شود، در آنصورت سولیتون نوری تولید خواهد شد [۱]. سولیتون‌های کاواک، لکه‌های روشن در زمینه تاریک و یا بالعکس (لکه‌های تاریک در زمینه روشن) در صفحه عرضی عمود بر راستای انتشار میدان الکتریکی هستند که در کاواک حاوی ماده غیرخطی به علت اندرکنش غیرخطی نور و ماده شکل می‌گیرند [۲]. با در نظر گرفتن صفحات عرضی عمود بر جهت انتشار پرتو، به عنوان تخته سیاهی می‌توان سولیتون‌های کاواک را در هر نقطه دلخواه روی آن نوشت یا پاک کرد و همچنین امکان حرکت کنترل شده سولیتونهای کاواک نیز تأیید شده است [۳ و ۴]. این خواص منحصر بفرد سولیتون‌های کاواک، انگیزه زیادی را ایجاد کرده است تا تلاشهای گسترده‌ای برای فراهم کردن امکان استفاده از این سولیتون‌ها در فناوری اطلاعات، پردازش کاملاً نوری اطلاعات و نیز اخیراً در گیت‌های منطقی تمام نوری صورت گیرد. قابلیت کلیدزنی و حرکت کنترل شده سولیتونهای کاواک با ایجا گرادیان موضعی در محیط، سولیتون‌های کاواک را به گزینه مناسبی برای استفاده در آرایه‌های شکل‌پذیر در پردازش تمام نوری اطلاعات تبدیل کرده است [۵]. در این مقاله امکان کلیدزنی نوع جدیدی از سولیتون کاواک با خاصیت دامنه تپنده، در لیزر سولیتون کاوک بررسی شده است. نتایج محاسبات عددی و شبیه‌سازیها نشان می‌دهد که میتوان این نوع از سولیتونها را در نقطه اختیاری از سطح عرضی کاواک با انتخاب مقادیر مناسب برای پارامترهای سیستم و باریکه نویسنده نوشت یا با استفاده از باریکه پاک کننده، خاموش کرد.

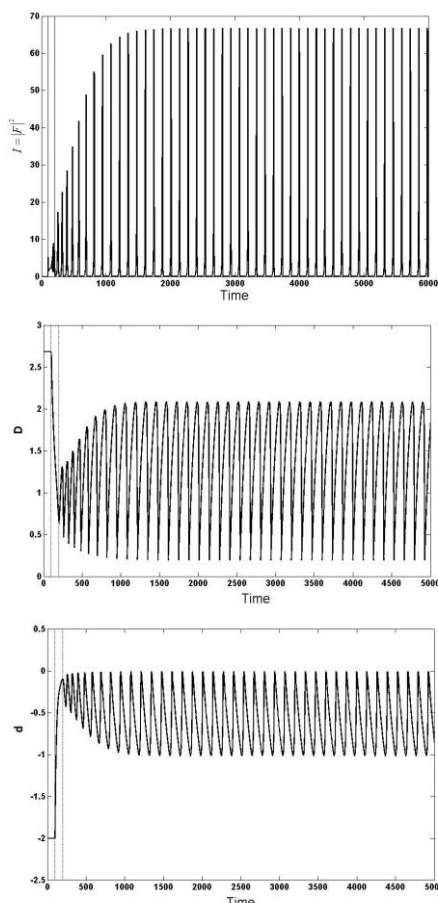
## ۲- معرفی مدل تئوری

دینامیک یک لیزر سولیتون کاواک از نوع VCSEL با جاذب اشباع پذیر با مجموعه معادلات زیر بیان شده است [۶]:

$$\frac{\partial F}{\partial t} = [(1-i\alpha)D + (1-i\beta)d - 1 + i\nabla_{\perp}^2]F \quad (1-a)$$

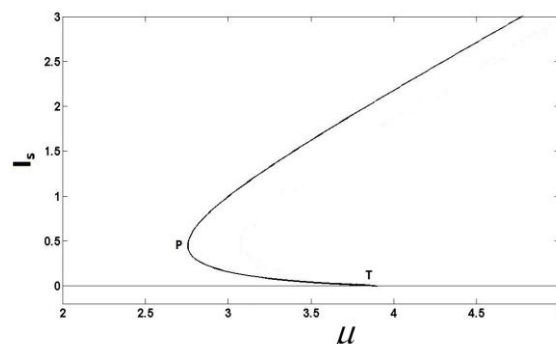
زمانی  $dt = 0.01$  حل شده‌اند.

جمعیت حاملین در محیط فعال ( $D$ ) و جمعیت حاملین در محیط بهره ( $d$ ) را در نقطه  $(x_0 = 0, y_0 = 0)$  در محل شکل گیری سولیتون کاوک تپنده نشان داده است.



شکل ۲) به ترتیب از بالا به پایین، دینامیک شدت میدان الکتریکی ( $I$ )، جمعیت حاملین در محیط بهره ( $D$ ) و جمعیت حاملین در محیط جاذب اشباع پذیر ( $d$ ) در فرایند نوشتن سولیتون کاوک رسم شده است. دو خط عمودی در نقاط ۱۰۰ و ۲۰۰ واحد زمانی، بازه زمانی تزریق باریکه نویسنده گاوس شکل را نشان می‌دهد.

در فرآیند نوشتن سولیتون کاوک تپنده، ابتدا سیستم در شاخه پایینی منحنی دوپایایی در حالت شدت نویزناشی از گسیل خودبخودی قرار دارد، سپس به مدت زمان ۱۰۰ واحد زمانی باریکه نویسنده به مرکز صفحه عرضی کاوک تزریق شده است. بعد از اتمام تزریق، یک قله شدت در محل تزریق ایجاد شده که تا حدود ۱۰۰۰ واحد زمانی این قله شدت ضمن نوسان، مقدار دامنه قله



شکل ۱: منحنی شدت همگن ایستا ( $I_s$ ) بر حسب پارامتر دمش ( $\mu$ ) رسم شده است. مقادیر پارامترها عبارتند از:  $s = 3$  و  $\alpha = 2, \beta = 1, \gamma = 1.6, B = 0.1$ .

### کلیدزنی سولیتون کاوک تپنده

برای کلیدزنی سولیتون کاوک تپنده از روش تزریق نیمه‌همدوس در فرکانس کاوک استفاده شده است. در کلیدزنی نیمه همدوس، یک میدان تکرنگ که در تشدید یا نزدیک تشدید با کاوک است در کاوک تابش شده است. این تابش با اضافه کردن میدان زیر

$$F_{inj}(x, y) = F_0 e^{i\phi_0} e^{[-(x-x_0)^2 - (y-y_0)^2] / 2w^2} \quad (2)$$

به مدت  $t_{inj}$  در معادله  $(1-a)$  شبیه‌سازی شده است که نشانگر این است که پرتو نویسنده با توزیع شدت گاوسی با دامنه  $F_0$ ، پهنای  $w$ ، و فاز  $\phi_0$ ، به نقطه  $(x_0, y_0)$ ، در مدت زمان  $t_{inj}$  تابش شده است. شبیه‌سازیهای انجام گرفته نشان می‌دهد که محدوده پایداری سولیتون کاوک به نسبت نرخ واپاشی حاملین بار در دو محیط بهره و جاذب ( $r = b_2 / b_1$ ) وابستگی زیادی دارد. نتایج ما نشان می‌دهد که برای  $\mu = 3.4$  به ازای مقادیر  $0.88 < r < 0.98$  سولیتون کاوک تپنده خواهیم داشت. ما با انتخاب  $\mu = 3.4$  و  $r = 0.97$  توانستیم به ازای دامنه تزریق  $F_{inj} = 5$ ، زمان تزریق  $t_{inj} = 100$ ، فاز  $\phi_0 = 0$  و پهنای تزریق  $w = 2$  یک سولیتون کاوک تپنده در مرکز صفحه عرضی کاوک روشن کنیم. شکل ۲)، دینامیک شدت میدان الکتریکی ( $I = |F|^2$ )،

جمعیت حاملین در محیط بهره ( $D$ ) و جمعیت حاملین در محیط جاذب اشباع پذیر ( $d$ ) را در نقطه  $(x_0=0, y_0=0)$  در فرآیند پاک کردن سولیتون کاوک تپنده نشان داده است. در شبیه سازیهای انجام گرفته، باریکه پاک کننده گاوسی در بازه زمانی ما بین ۱۰۰۰ تا ۱۰۱۰ واحد زمانی به محل سولیتون کاوک تپنده تزریق شده و سولیتون به سرعت پاک شده است.

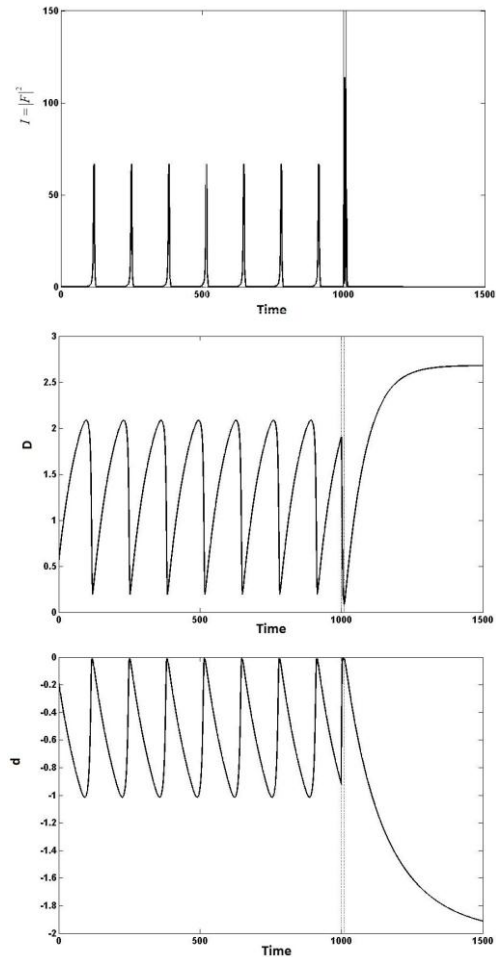
### ۳- نتیجه گیری

امکان نوشتن و پاک کردن سولیتون کاوک تپنده با انتخاب مناسب پارامترهای سیستم و تزریق باریکه های نوری گاوسی با مقادیر پارامترهای مناسب در لیزر سولیتون کاوک نشان داده شد.

### ۴- مراجع

- [1] Boyd R., *Nonlinear Optics*, Elsevier, Third Ed. 2008
- [2] Lugiato L. *Introduction to the feature section on cavity solitons: An overview* **IEEE J. Quantum Electron.** 39 (2003) 193.
- [3] Barbay S., Kuszelewicz R. and Tredicce J., *Cavity Solitons in VCSEL Devices* **Advances in Optical Technologies**, 2011 (2011) 628761.
- [4] Hachair X., Pedaci F., Caboche E., Barland S., Giudici M., Tredicce J. R., Prati F., Tissoni G., Kheradmand R., Lugiato L. A., Protsenko I. and Brambilla M., *Cavity solitons in a driven VCSEL above threshold*, **IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.** 12 (2006) 339.
- [5] Barland S., Tredicce J. R., Brambilla M., Lugiato L. A., Balle S., Giudici M., Maggipinto T., Spinelli L., Tissoni G., KnÄodel T., Miller M., JÄager R., *Cavity solitons as pixels in semiconductors*, **Nature** 419 (2002) 699.
- [6] Prati F., Caccia P., Tissoni G., Lugiato L. A., Aghdami K. and Tajalli H., *Effects of carrier radiative recombination on a VCSEL-based cavity soliton laser* **Appl. Phys. B: Lasers Opt.** 88 (2007) 405.

خود را نیز افزایش می دهد تا اینکه از ۱۰۰۰ واحد زمانی به بعد ما شاهد یک قله نوسانی با پریود حدود ۱۲۵ واحد زمانی هستیم، که این یک سولیتون کاوک تپنده است که در داخل کاوک شکل گرفته است.



شکل ۳) به ترتیب از بالا به پایین، دینامیک شدت میدان الکتریکی ( $I$ )، جمعیت حاملین در محیط بهره ( $D$ ) و جمعیت حاملین در محیط جاذب اشباع پذیر ( $d$ ) در فرآیند پاک کردن سولیتون کاوک تپنده رسم شده است. دو خط عمودی در نقاط ۱۰۰۰ و ۱۰۱۰ واحد زمانی، بازه زمانی تزریق باریکه پاک کننده را نشان می دهد.

همچنین، ما توانستیم سولیتون کاوک تپنده در مرکز صفحه عرضی را با تزریق یک باریکه پاک کننده با مشخصات دامنه تزریق  $F_{inj}=10$ ، زمان تزریق  $t_{inj}=10$  و پهنای تزریق  $w=2$  خاموش کنیم. شکل (۳) دینامیک شدت میدان الکتریکی ( $I=|F|^2$ ).