



بیست و هفتمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و سیزدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.  
۱۴-۱۶ بهمن ۱۳۹۹



کد مقاله : ۱-۲۳۹۲-۱۰-A

## بررسی عددی تاثیر پاشندگی خالص و پاشندگی هر یک از اجزای کاواک بر پهنای زمانی پالس خروجی لیزر تار نوری قفل شده مدی

معصومه میرزایی مقدم<sup>۱</sup>، فاطمه شهشهانی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده فیزیک و شیمی، گروه فیزیک، دانشگاه الزهرا، خیابان ونک، تهران، ایران

[mirzae.tmu@gmail.com](mailto:mirzae.tmu@gmail.com)

[f\\_shahshahani@alzahra.ac.ir](mailto:f_shahshahani@alzahra.ac.ir)

چکیده - در این مقاله تاثیر پاشندگی خالص و پاشندگی هر یک از اجزای کاواک لیزر تار نوری قفل شده مدی روی پهنای پالس خروجی لیزر بررسی شده است. یکی از پارامترهای تاثیرگذار در پهنای زمانی پالس لیزر، عمق مدولاسیون جاذب اشباع پذیر است که محاسبه عددی نشان می دهد با افزایش عمق مدولاسیون، پهنای زمانی پالس کاهش می یابد. اجزای بکار گرفته شده در ساختار لیزر تارنوری نیز تاثیرات بسزایی در پهنای زمانی پالس دارند. در این مقاله تحولات پهنای زمانی پالس در طول انتشار و در بخش های مختلف کاواک در حالتی که مقدار پاشندگی خالص نزدیک به صفر باشد، مدلسازی شد. محاسبات نشان می دهد که پهنای زمانی مینیمم شده و پالس در طول انتشار به صورت تناوبی فشرده و پهن می شود در این صورت بعضی از اجزا نقش جبران کننده در کاهش پهنای زمانی پالس دارند. نتایج براساس حل عددی معادله غیرخطی شرودینگر و با استفاده از روش تقسیم گام فوری به انجام شده است.

کلید واژه- پاشندگی، قفل شدگی مد، لیزر تار نورباربیوم، معادله غیرخطی شرودینگر، نانولوله های کربن

## Numerical analysis of the effect of net cavity dispersion and dispersion of each cavity components on the output pulse width of the mode-locked fiber laser

M.Mirzaei Moghadam<sup>1</sup>, F.Shahshahani<sup>2</sup>

Department of Physics and Chemistry, Alzahra University, Tehran

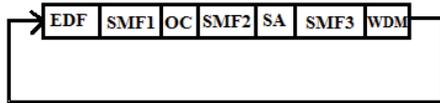
**Abstract-** in this paper the effect of net cavity dispersion and dispersion of each cavity components on the pulse width of the mode locked fiber laser is investigated. one of the effective parameters on pulse width is the modulation depth of saturable absorber. Numerical study shows that with increasing modulation depth, the pulse width decreases. The components used in fiber laser cavity also have significant effects on pulse width. in this paper the Intra-cavity pulse evolution is also modeled when the net cavity dispersion approaches zero. It is shown that the pulse width is minimized and compresses and stretches periodically per cavity round-trip and some components have a compensatory role in reducing the pulse time width. The results are based on the numerical solution of nonlinear Schrödinger equation using split step Fourier method.

Keywords: dispersion, mode locking, Erbium doped fiber laser, nonlinear Schrödinger Equation, carbon nanotube

داد. در بخش دوم مقاله به تئوری مدلسازی و روابط لازم برای شبیه سازی پرداخته و در قسمت سوم نتایج شبیه سازی بررسی و در پایان مقاله نتیجه گیری کوتاهی ارائه شده است.

### مبانی فیزیکی و مدلسازی

در شکل (۱) دیاگرام ساختار مورد نظر نشان داده شده است [۶]. تار آلاییده به یون اربوم (EDF) به عنوان محیط فعال ایجاد پالس است که دمش آن با طول موج ۹۸۰ nm انجام می شود. SMF تار نوری تک مد را نشان می دهد که در کاواک به منظور تنظیم پاشندگی و کنترل شکل پالس خروجی قرار داده شده است. SA نشان دهنده جاذب اشباع پذیر است. خروجی لیزر از ناحیه OC با خروجی ۲۰٪ گرفته می شود.



شکل (۱): نمای ساده ای از ساختار مورد بررسی [۶]

تحلیل انتشار پالس های نوری درون ساختار با استفاده از معادله غیرخطی شرودینگر، که شامل اثرات غیرخطی و پاشندگی است انجام می شود [۶]. این معادله به صورت:

$$\frac{\partial A}{\partial z} + i \frac{\beta_2}{2} \frac{\partial^2 A}{\partial T^2} + \frac{g}{2} = i \gamma |A|^2 A \quad (1)$$

است که در آن  $A$  پوش میدان الکتریکی پالس نوری کند تغییر،  $\beta_2$  پاشندگی سرعت گروه،  $\gamma$  ضریب غیرخطی نوری مربوط به اثر کر،  $z$  مکان پالس و  $T$  مرجع زمانی متحرک با پالس است که به صورت  $T = t - \beta_1 z$  تعریف می شود که در آن  $\beta_1$  پاشندگی مرتبه اول است. در این رابطه  $g$  ضریب بهره در EDF است و طبق رابطه زیر تعریف می شود [۶]:

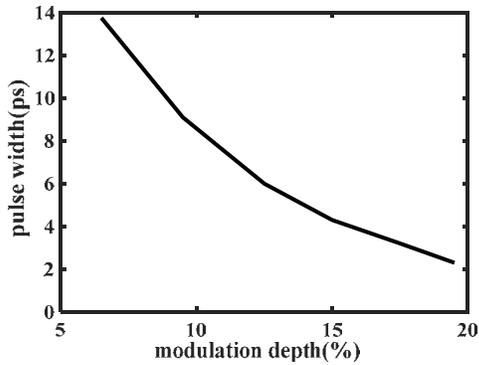
$$g = \frac{g_0 P}{1 + \frac{P}{P_{sat}}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)،  $g_0$  بهره سیگنال کوچک و  $P$  توان متوسط پالس و  $P_{sat}$  توان اشباع محیط بهره است. ضریب عبور جاذب اشباع پذیر به صورت رابطه (۳) مدلسازی می شود [۶].

### مقدمه

لیزرهای تار نوری قفل شده مدی غیر فعال به عنوان یکی از بهترین منابع نوری پالسی در طیف گسترده ای از کاربردها از جمله مخابرات نوری، صنعت و پزشکی و نظامی ظاهر شده اند [۱]. یکی از روش های ایجاد قفل شدگی مد غیرفعال در لیزرها استفاده از جاذب های اشباع پذیر است. با قرار دادن این جاذب ها درون کاواک، اتلاف توسط خود پالس مدوله شده و پالس های کوتاه ایجاد می شوند [۲]. یکی از انواع مختلف پالس های تولید شده در لیزرهای تارنوری قفل شده مدی پالس های سالیونی است. تعامل متقابل بین پاشندگی غیرعادی و اثر خود مدولاسیون فازی منجر به ایجاد پالس های سالیونی می شود. با وجود آنکه این پالس ها شکل زمانی و طیفی خود را در طول انتشار حفظ می کنند، اما معایبی نیز دارند. انرژی این نوع پالس ها قابل افزایش نیست. ماکزیمم انرژی بدست آمده در حدود ۱/۰ نانوزول است و در صورتی که انرژی آن افزایش یابد پالس شکافته شده و پالس چندگانه ایجاد می کند. در این نوع پالس ها کاهش پهنای زمانی نیز مشکل است [۳]. یکی از راه های موثر در کاهش پهنای زمانی پالس و افزایش انرژی، تنظیم پاشندگی در کاواک است. با بکارگیری کاواک هایی متشکل از بخش هایی با پاشندگی عادی و غیرعادی، می توان پاشندگی خالص کاواک را نزدیک به صفر تنظیم کرد. در این حالت پهن شدگی و فشرده سازی پالس به صورت تناوبی در یک بار عبور از کاواک صورت می گیرد. در این حالت پهنای زمانی و طیفی پالس در نقاط مختلف کاواک به طور چشمگیری تغییر می کند. این رژیم تولید پالس، پالس کشیده نام گذاری شده است [۴]. برای طراحی لیزر تار نوری فوق کوتاه علاوه بر طراحی کاواک، پارامترهای مختلف جاذب همچون زمان واهلش، عمق مدولاسیون که اختلاف در میزان جذب در شدت های بالا و پایین است، اهمیت دارند. برای ایجاد پالس های کوتاه تر وجود جاذب با عمق مدولاسیون بالاتر لازم است [۵].

در این مقاله مدلی عددی برای بررسی تاثیر عمق مدولاسیون جاذب بر پهنای زمانی پالس خروجی یک لیزر تارنوری در یک ساختار حلقه ای متشکل از جاذب اشباع پذیر و تارهای نوری تک مد و تاثیر هر یک از اجزای ساختار روی پهنای پالس ارائه شده است. با مدل ارائه شده می توان با تنظیم مناسب پاشندگی خالص کاواک، پهنای زمانی پالس را تنظیم و بهینه سازی انجام



شکل (۲): پهنای زمانی پالس بر حسب عمق مدولاسیون جاذب

پارامتر مهم دیگر در پهنای زمانی پالس، کمیت پاشندگی خالص ساختار است. پاشندگی خالص به صورت  $L_i$  و  $\beta_i^{(2)}$  در آن  $\beta_{net}^{(2)} = \sum_i \beta_i^{(2)} L_i$  پاشندگی مرتبه دوم و طول مربوط به EDF و دیگر تارهای نوری در کاواک است. با افزایش طول تار نوری SMF3 از ۰/۱ تا ۲ متر پاشندگی خالص از  $2 ps^2$  تا  $0/02 ps^2$  تغییر می‌کند. با انتخاب مقدار عمق مدولاسیون ۱۹/۵٪ که با توجه به شکل (۲) پهنای زمانی پالس برابر با ۲/۳ پیکوثانیه است، تغییرات پهنای زمانی پالس با تغییر پاشندگی خالص کاواک بررسی شده است. در شکل (۳) تغییرات پهنای زمانی پالس بر حسب پاشندگی خالص کاواک رسم شده است. با توجه به شکل (۳) پهنای زمانی پالس به ازای  $\beta_{net}^{(2)} = -0/002$  دارای کمینه مقدار و در حدود  $0/25 ps$  است. از سوی دیگر در حالت پاشندگی عادی ( $\beta_{net}^{(2)} > 0$ ) تغییرات پهنای زمانی پالس خروجی بسیار شدیدتر است و مقدار آن تا  $2/3 ps$  افزایش یافته است. در صورتیکه پاشندگی خالص کاواک نزدیک صفر شود، پاشندگی کاملاً جبران می‌شود. در واقع می‌توان نتیجه گرفت پهن شدن پالس که در برخی قسمت‌های کاواک به علت پاشندگی صورت می‌گیرد، توسط قسمت‌های دیگر کاواک که دارای پاشندگی با علامت مخالف هستند، جبران شده است. برای آنکه تاثیر هر یک از اجزای ساختار مورد نظر را روی پهنای زمانی پالس بررسی کنیم، پهنای زمانی پالس را در مکان‌های مختلف ساختار لیزر تارنوری بدست آورده و نتیجه بدست آمده در شکل (۴) نشان داده شده است.

$$T = T_0 + \Delta T \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{P}{P_{sat,A}}} \right) \quad (3)$$

در رابطه (۳)  $\Delta T$  عمق مدولاسیون،  $T_0$  میزان عبور نور با توان کم و  $P_{sat,A}$  توان اشباع جاذب و  $P$  توان پالس است. به منظور بررسی تحول زمانی پالس در کاواک از روش تقسیم گام فوریه (SSF) برای حل معادله غیرخطی شرودینگر استفاده شده است.

## نتایج شبیه سازی

پالس گوسی با پهنای زمانی  $ps$  به عنوان ورودی معادله غیرخطی شرودینگر در نظر گرفته شده است. طول تار SMF3 متغیر است. مقادیر عددی پارامترهای به کار برده شده برای شبیه سازی عبارت است از:  $W.L = 1/35$   $\beta_2 = 28 ps^2/km$  و  $EDF$  برای  $g_0 = 6/9$ ،  $\gamma = 5/3^4 km^{-1}$ ،  $W.L = 1/18$   $km^{-1}$ ،  $SMF1$ ،  $SMF2$  و  $WDM$  به ترتیب ۰/۳، ۰/۹۵ و ۰/۲۵ متر و توان اشباع جاذب  $22W$  و  $T_0 = 25$  در نظر گرفته شده است. مقدار کمیت‌های مربوط به جاذب اشباع‌پذیر در محاسبه عددی معادل مقادیر آن برای نانولوله‌های کربن است [۷]. در شکل (۲) تغییرات پهنای زمانی پالس خروجی بر حسب عمق مدولاسیون جاذب اشباع‌پذیر نشان داده شده است. در تعیین این نمودار عمق مدولاسیون از ۰/۶/۵ تا ۱۹/۵٪ تغییر می‌کند. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش عمق مدولاسیون، پهنای زمانی پالس کاهش می‌یابد. بطوریکه در عمق مدولاسیون ۱۹/۵٪  $\Delta T = 0/195$  پهنای زمانی پالس به  $2/3 ps$  می‌رسد. به طور کلی کاهش پهنای زمانی در صورتی رخ می‌دهد که قسمت مرکزی پالس که دارای شدت بالایی است، با جذب کمتری توسط  $SA$  عبور کرده و در حالیکه کناره‌های پالس که شدت کمتری دارد، توسط  $SA$  جذب شود. هرچه عمق مدولاسیون افزایش یابد جذب در کناره‌های پالس بیشتر بوده و قسمت مرکزی پالس با جذب کمتری خارج می‌شود. از این رو کاهش پهنای زمانی پالس با بکارگیری جاذب‌های با عمق مدولاسیون بالاتر، بیشتر است.

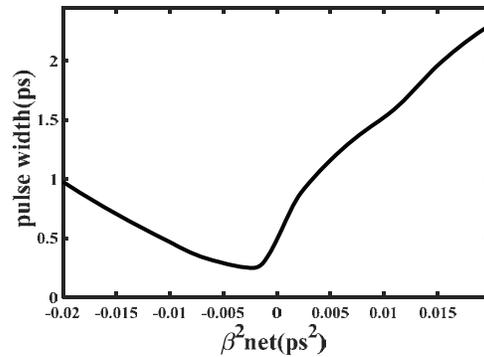
اصطلاحاً *transform limited* می‌شود. این رفتار از مشخصات پالس کشیده به شمار می‌آید.

### نتیجه گیری

در این مقاله با استفاده از حل عددی معادله غیرخطی شرودینگر که انتشار پالس در محیط‌های غیرخطی را توصیف می‌کند، تاثیر عمق مدولاسیون جاذب و پاشندگی خالص کاواک بر پهنای زمانی پالس بررسی شده است. نشان داده شد که افزایش عمق مدولاسیون موجب کاهش پهنای زمانی پالس می‌شود. در عمق مدولاسیون  $0.19/5$  پهنای زمانی پالس به  $2/3 ps$  می‌رسد. همچنین تاثیر پاشندگی خالص کاواک روی پهنای زمانی پالس مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که کوتاه‌ترین پالس با پهنای زمانی  $0.25$  پیکوثانیه در  $0.02$  - می‌شود.  $\beta_{net}^{(2)}$  ایجاد می‌شود. بررسی تغییرات پهنای زمانی پالس در طول کاواک نشان داد که اجزای مختلف کاواک اثرهای مختلفی روی پهنای زمانی پالس دارند. بعضی از اجزا سبب کشیدگی و بعضی سبب فشردگی زمانی پالس شده و خاصیت جبران‌کننده دارند.

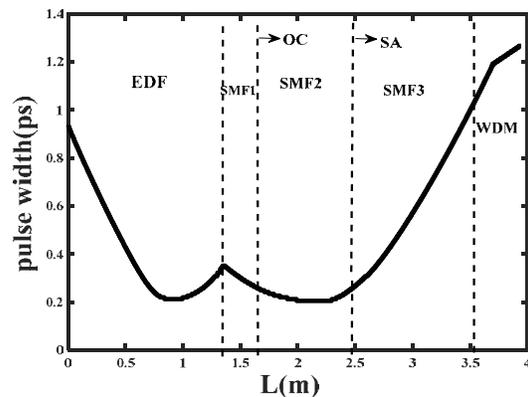
### مراجع

- [1] ME Fermann, I Hartl, "Ultrafast Fiber Laser Technology", IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 15 (1), 191-206, 2009
- [2] Z. Sun, T. Hasan, F. Wang, G. Rozhin, H. White, and C. Ferrari, "Ultrafast Stretched Pulse Fiber Laser Mode-Locked by Carbon Nanotubes", Nano Research, 3(6), pp.404-411, 2010
- [3] D. Popa, Z. Sun, T. Hasan, W. B. Cho, F. Wang, F. Torrisi, and A. C. Ferrari, "74-fs nanotube-mode-locked fiber laser", Phys. Lett. 101(15), 153107, 2012.
- [4] R. I. Woodward, "Dispersion engineering of mode-locked fiber laser", Journal of Optics, Vol. 20, 033002, 2018
- [5] Ch. Maa, X. Tian, Bo Gao b, GeWua, "Numerical simulations on influence of the saturable absorber in Er-doped fiber laser", Optics Communications, Vol. 410, 941-946, 2018
- [6] J. Wang, ZH. Cai, P. Xu, G. Du, F. Wang, SH. Ruan, ZH. Sun and T. Hasan, "Pulse dynamics in carbon nanotube mode-locked fiber lasers near zero cavity dispersion", Optical Society of America, Vol. 23, No. 8, 2015
- [7] H. H. Liu and K. K. Chow, "Enhanced stability of dispersion managed mode-locked fiber lasers with near-zero net cavity dispersion by high-contrast saturable absorbers", Optics Letters, Vol. 39, No. 1, 2014.



شکل (۳): تغییرات پهنای زمانی پالس بر حسب پاشندگی خالص

تحولات پهنای زمانی پالس داخل کاواک در  $0.02$  - می‌شود.  $\beta_{net}^{(2)}$  ، که برای این مقدار طول تار  $SMF3$   $1/1$  متر است، رسم شده. در این شکل تارهای نوری و نقاط  $OC, SA$  به تفکیک نشان داده شده است.



شکل (۴): پهنای زمانی پالس بر حسب مکان آن در کاواک

نتایج نشان داده شده در شکل (۴) پس از رسیدن لیزر به حالت پایدار بدست آمده است. با توجه به شکل دو نقطه وجود دارد که در آن پهنای زمانی پالس کمینه است. یک نقطه در ناحیه با پاشندگی عادی در  $Z=0/9$  و نقطه دیگر در ناحیه با پاشندگی غیرعادی و در  $Z=2/1$  است. پالس پس از خروج از *WDM* چرپ (*chirp*) می‌شود. این پالس چرپ شده وارد محیط *EDF* با پاشندگی عادی شده است. مجموع چرپ شدگی مربوط به *SPM* و پاشندگی در *EDF* به گونه‌ای است که در جهت جبران چرپ شدگی پالس ورودی عمل میکند و موجب کاهش پهنای زمانی پالس می‌شود و در نقطه  $Z=0/9$  چرپ شدگی کاملاً خنثی شده و پالس در این نقطه