

## شبیه سازی عددی تحول طیفی پالس در کاواک حلقوی لیزر فیبری فمتوثانیه با پاشندگی تمام عادی

مهدی سلمانیان، آتوسا سادات عربانیان و رضا مسعودی

دانشگاه شهید بهشتی - پژوهشکده لیزر و پلاسما

در این مقاله به شبیه سازی عددی تحول طیفی پالس در کاواک حلقوی لیزر فیبری فمتوثانیه با پاشندگی تمام عادی، پرداخته شده است. فیلترسازی طیفی پالس چیرپ شده در کاواک لیزر، مولفه اصلی قفل مدی و شکل دهی پالس در این نوع از لیزرهای فیبری فمتوثانیه است. با بررسی پارامترهای اثرگذار مختلف درون کاواک نتیجه می شود که جابه جایی فاز غیرخطی انباشته شده، پهنای باند فیلتر طیفی و پاشندگی سرعت گروه خالص کاواک، پارامترهای کلیدی در تعیین شکل و پهنای طیفی خروجی از این نوع لیزرهای فیبری فمتوثانیه هستند. نتایج به دست آمده می تواند برای طراحی بهینه لیزر فیبری فمتوثانیه مورد استفاده قرار بگیرد.

کلید واژه- پاشندگی سرعت گروه، پهنای باند فیلتر، چیرپ، جابه جایی فاز غیرخطی، قفل شدگی مدی، لیزر فیبری فمتوثانیه

### **Numerical simulation of pulse spectral evolution in ring cavity of femtosecond fiber laser cavity with all normal dispersion**

Mahdi Salmanian, Atoosa Sadat Arabanian, Reza Massudi

Shahid Beheshti university - laser & plasma research institute

In this paper, numerical simulation of pulse spectrum evolution in ring cavity of femtosecond fiber laser with all normal dispersion has been performed. In these kind of femtosecond fiber lasers spectral filtering of the chirped pulse in laser ring cavity, is the major component of mode locking and pulse shaping. Investigating of different effective parameters in the cavity results in accumulated nonlinear phase shift, the bandwidth of spectral filter and the cavity net group velocity dispersion are key parameters in determination of the shape and band width of output spectrum of these type of femtosecond fiber lasers. The result can be used for optimized design of femtosecond fiber lasers.

Keyword- Group velocity dispersion, Filter bandwidth, Chirp, Nonlinear phase shift, Mode locking, Femtosecond fiber laser

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت [www.opsi.ir](http://www.opsi.ir) قابل دسترسی باشد.

ANDi , nj 107 می باشد [۳]. به دلیل اهمیت این رژیم قفل مدی از لیزرهای فیبری فمتوثانیه، در این مقاله، ابتدا تحول طیفی پالس در یک کاواک لیزر فیبری ANDi شبیه سازی می گردد، سپس میزان اثرگذاری پارامترهای کلیدی کاواک، از جمله جابه جایی فاز غیرخطی ( $\Phi_{NL}$ )، پهنای باند فیلتر طیفی (BW) و GVD خالص کل کاواک روی پهنای باند طیفی پالس خروجی مورد بررسی قرار می گیرد، نتایج به دست آمده می تواند در طراحی بهینه کاواک لیزر ANDi مورد استفاده قرار گیرد.

## ۲- روش تئوری و مدل عددی

مدل سازی کاواک لیزر فیبری فمتوثانیه در رژیم ANDi نشان داده شده در شکل (۱) توسط حل معادله شرودینگر غیرخطی (۱) و به وسیله روش فوریه تقسیم بازه<sup>۵</sup> انجام می شود [۲]. کاواک شامل فیبر تک مد اولیه (SMF1) به طول ۳ متر، فیبر بهره آلابیده به ایتربیوم (Yb) به طول ۶۰ سانتی متر و فیبر تک مد ثانویه (SMF2) به طول ۱ متر، جاذب اشباع پذیر، فیلتر طیفی و کوپلر خروجی، است.

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

در این معادله  $A(z, \tau)$  پوش میدان الکتریکی،  $z$  فاصله انتشار و  $\tau$  طول زمانی پالس است. ضرایب پاشندگی و غیرخطی فیبر تک مد بکار رفته در شبیه سازی به ترتیب  $g(E_{pulse})$  است،  $\beta_2 = 230 \frac{fs^2}{cm}$  و  $\gamma = 0.0047 (wm)^{-1}$  است، تابع بهره فیبر آلابیده به ایتربیوم (Yb) است که توسط رابطه مدل می شود، در اینجا  $g_0$  متناظر با بهره سیگنال کوچک و برابر با 30 dB در نظر گرفته شده است. شکل طیفی محیط بهره لیزر، لورنتسی و دارای پهنای باند 100 nm می باشد.  $E_{sat}$  انرژی اشباع محیط بهره است که مطابق با توان پمپ تغییر می کند. در محاسبات، انرژی اشباع محیط بهره را از 0.5 تا 3 nj تغییر می دهیم. انرژی پالس نیز توسط رابطه  $E_{pulse} = \int_{-\frac{T_R}{2}}^{\frac{T_R}{2}} |A(z, \tau)|^2 d\tau$  داده می شود که  $T_R$  زمان یک دور گردش داخل کاواک است. تابع عبور جاذب اشباع پذیر به صورت

در سالهای اخیر لیزرهای فیبری فمتوثانیه به دلیل داشتن بسیاری مزایا در مقایسه با لیزرهای حالت جامد نظیر انعطاف پذیری بالا، کاهش اثرات گرمایی ناشی از نسبت سطح به حجم بزرگ فیبر، کیفیت پرتو در حد پراش ناشی از خاصیت موجبری فیبر اپتیکی، پایداری ذاتی بالا، بازده بالا، حساسیت کمتر به هم ترازای المان های اپتیکی و طراحی فشرده تر، بسیار مورد توجه قرار گرفته اند. لیزرهای فیبری فمتوثانیه با توان متوسط بالا دارای کاربردهای متعددی از قبیل میکروماشین کاری دقیق [۱]، لایه نشانی، تصویربرداری پزشکی، اپتیک غیرخطی و طیف سنجی، می باشند. اغلب لیزرهای فیبری فمتوثانیه در ساختار کاواک خود دارای بخش هایی با پاشندگی سرعت گروه (GVD) عادی و غیرعادی هستند و بسته به مقدار GVD خالص کل کاواک به چهار رژیم سالیوتونی<sup>۱</sup>، پالس کشیده<sup>۲</sup>، خود متشابه<sup>۳</sup> و پاشندگی تمام عادی<sup>۴</sup> تقسیم می شوند. مقدار GVD خالص کل کاواک در رژیم سالیوتونی منفی است. در رژیم پالس کشیده، GVD خالص کل کاواک تقریباً صفر است. در رژیم خود-متشابه میزان GVD خالص کاواک مثبت و از مرتبه یک هزارم  $ps^2$  بوده و شکل زمانی پالس سهموی می باشد. در لیزر ANDi میزان GVD خالص کاواک، مثبت و از مرتبه  $ps^2$  0.1 بوده و پهنای زمانی پالس خروجی از مرتبه پیکوثانیه می باشد [۲]. لیزرهای فیبری طراحی شده در رژیم سالیوتون، دارای پالس هایی با انرژی 0.1nj بوده [۲]، در حالیکه توسط لیزرهای پالس کشیده به انرژی 2.7nj و پهنای پالس 100 fs رسیده اند [۲]، از سوی دیگر بالاترین انرژی به دست آمده توسط رژیم خود-متشابه بیش از 10nj و با پهنای پالس 210 fs می باشد [۲]، اخیراً تلاش برای دست یابی به لیزرهای فیبری فمتوثانیه با انرژی بسیار بالاتر توسط کاواک هایی با پاشندگی تمام عادی و پارامتر GVD خالص بزرگ حاصل شده است، بالاترین انرژی گزارش شده از کاواک های

<sup>1</sup> Soliton laser

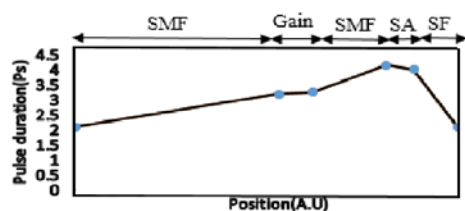
<sup>2</sup> Stretched pulse laser

<sup>3</sup> Similariton or self-similar laser

<sup>4</sup> All normal dispersion laser (ANDi)

<sup>5</sup> Split step fourier method

که باعث به وجود آمدن لبه های تیز یا به طور کلی ساختار نوسانی در لبه های پالس و کاهش شدت بیشینه پالس، می گردد. در شکل (e) با عبور پالس از جاذب اشباع پذیر و با توجه به اینکه جاذب 70٪ از دامنه پالس را عبور می دهد، دامنه پالس عبوری، کاهش می یابد و سرانجام با عبور پالس از فیلتر گاوسی، قسمت مرکزی طیف عبور کرده و قسمت کناری با لبه های تیز حذف می شوند در نتیجه پهنای طیفی کاهش یافته و شکل طیفی (a) دوباره حاصل می شود. همان طور که در شکل (2) دیده می شود پهنای زمانی پالس با عبور از SMF1، محیط بهره و SMF2 به دلیل اثر GVD افزایش می یابد، اما میزان افزایش طول پالس به دلیل تفاوت در



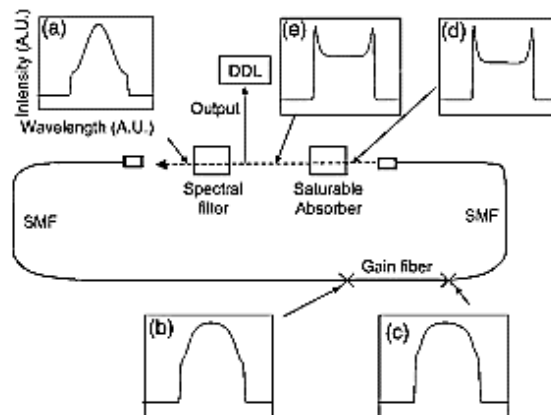
شکل (2): تغییرات پهنای زمانی پالس حین انتشار در کاواک

طول فیبرها، متفاوت است. بعد از عبور پالس از جاذب اشباع پذیر، با توجه به اینکه جاذب تنها قسمت مرکزی پالس که دارای شدت بیشینه است، را عبور می دهد (این امر لازمه قفل مدی پالس است)، لبه های پالس حذف می شود که منجر به کاهش پهنای پالس می گردد، در قسمت آخر نیز فیلتر طیفی گاوسی قرار دارد که باعث حذف مؤلفه های فرکانسی بالا و پایین واقع در دنباله های پالس می شود بواسطه حذف مؤلفه هایی که به دلیل سرعت های مختلف شان در طی انتشار، عامل افزایش پهنای زمانی پالس بودند، پهنای زمانی پالس کاهش یافته و به مقدار اولیه اش باز می گردد. در ادامه به بررسی اثر پارامترهای مختلف کاواک روی تحول شکل طیفی پالس در طول کاواک می پردازیم. با استفاده از شبیه سازی ها نتیجه شد که، سه پارامتر اصلی شامل جابه جایی فاز غیرخطی ( $\phi_{NL}$ )، پهنای باند فیلتر طیفی (BW) و GVD خالص کل کاواک، پارامترهای تعیین کننده برای تحول طیفی پالس درون کاواک می باشند. با تغییر هر یک از این کمیت ها و ثابت نگه داشتن دو کمیت دیگر، اثر هر یک را روی تحول طیفی پالس خروجی بررسی می کنیم.

در نظر گرفته می شود، در این رابطه  $T = 1 - \frac{I_0}{P_{sat}}$  تلفات اشباع نشده، توان لحظه ای پالس و  $P_{sat}$  توان اشباع جاذب است. در شبیه سازی از یک فیلتر طیفی با پروفایل گاوسی و پهنای باند طیفی در گستره 6nm تا 10nm استفاده شده است که بعد از جاذب اشباع پذیر قرار گرفته است. کوپلر خروجی که بین جاذب اشباع پذیر و فیلتر طیفی قرار دارد، دارای ضریب جفت شدگی به خارج کاواک 30٪ می باشد.

### ۳- نتایج شبیه سازی

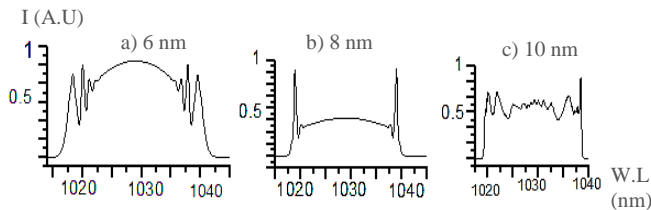
شکل (1) تحول طیفی پالس را در بخش های مختلف کاواک نشان می دهد. مقدار GVD خالص کل کاواک  $(0.1058 \text{ ps}^2)$ ،  $16\pi \phi_{NL}$ ، انرژی خروجی حدود 3.5 nJ، نرخ تکرار 44 MHz و توان متوسط خروجی 154 mW می



شکل (1): تحول طیفی بخشهای مختلف کاواک لیزر شبیه سازی شده

باشد. طیف پالس نشان داده شده در شکل (a) بعد از عبور از SMF اولیه، دچار چیرپ فرکانسی ناشی از پدیده خود مدولاسیون فازی (SPM) شده و به صورت شکل (b) متحول می گردد، در شکل (c) بعد از عبور پالس از محیط بهره، اثر SPM منجر به پهن شدن طیفی می شود، اما به دلیل کوتاه بودن طول فیبر بهره، مقدار پهن شدن ناچیز است. در شکل (d) به دلیل تقویت پالس در فیبر بهره و افزایش شدت بیشینه پالس هنگام انتشار پالس داخل SMF ثانویه به واسطه چیرپ ناشی از SPM و GVD، فرکانس های بالا (آبی) در لبه جلو پالس و فرکانس های پایین (قرمز) در لبه عقب پالس تداخل کرده

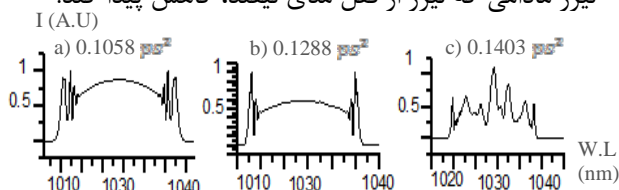
<sup>6</sup> Self-phase modulation



شکل (۴): طیف خروجی لیزر به ازای طیفی مختلف

### ۳-۳ اثر پاشندگی سرعت گروه خالص کاواک

آخرین پارامتر تعیین کننده پهنای باند طیف خروجی لیزر، مقدار GVD خالص کل کاواک است. پهنای باند طیفی خروجی به ازای مقادیر مختلف GVD 0.1058  $ps^2$ ، 0.1288  $ps^2$  و 0.1403  $ps^2$  که به ترتیب برابر 37nm، 30nm و 22nm است، در شکل (۵) نشان داده شده است. با افزایش GVD، برای افزایش طول فیبر SMF1 را افزایش می دهیم) پهنای باند طیفی خروجی کاهش می یابد. در واقع افزایش GVD باعث افزایش پهنای زمانی پالس، کاهش شدت بیشینه و نهایتاً کاهش فاز غیرخطی  $\phi_{NL}$  می شود، پس انتظار داریم پهنای طیفی خروجی لیزر مادامی که لیزر از قفل مدی نیفتد، کاهش پیدا کند.



شکل (۵): طیف خروجی لیزر به ازای مقادیر مختلف GVD کاواک

### نتیجه گیری

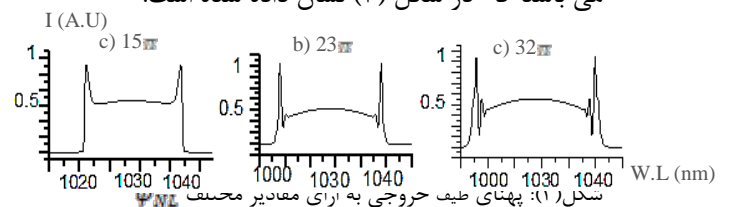
در این مقاله به شبیه سازی کاواک حلقوی لیزر فیبری فمتوثانیه با پاشندگی تمام عادی (ANDi) پرداخته است. تحول شکل طیف خروجی پالس لیزر به ازای پارامترهای اساسی کاواک لیزر نظیر پهنای باند فیلترطیفی، جابه جایی فاز غیرخطی و پاشندگی سرعت گروه خالص کاواک بررسی شده و نشان داده شد که با انتخاب مناسب این پارامترها می توان پالس با قفل مدی و پهنای باند طیف خروجی دلخواه به دست آورد.

### مراجع

- [1] P K MUKHOPADHYAY, Femtosecond pulse generation and amplification in Yb-doped fibre oscillator–amplifier system, Pramana – J. Phys., Vol. 75, No. 5, November 2010
- [2] A. Chong, J. Buckley, W. Renninger, and F. Wise, All-normal-dispersion femtosecond fiber laser with pulse energy above 20nJ, Opt.Express 14, 10095 (2006)
- [3] H G Liu, J H Huang, J H Li, W Weng, H Zheng, Y Ge, S T Dai, F Shi, K M Ruan, J Deng, H C Wu and W X Lin, Above 100nJ all-normal-dispersion femtosecond pulse generation from large-core multi-mode fiber laser; Laser Phys. Lett. 10 (2013)

### ۱-۳ اثر جابه جایی فاز غیرخطی

تغییرات زمانی  $\phi_{NL}$  منجر به چیرپ غیرخطی می شود، که این چیرپ غیرخطی عامل تشکیل مؤلفه های فرکانسی جدید در کاواک لیزر شده و نهایتاً منجر به پهن شدن طیف لیزر می گردد. در سیستم مورد بررسی افزایش  $\phi_{NL}$  با افزایش توان پمپ، کاهش میزان عبور کوپلر خروجی یا افزایش طول SMF2 حاصل می شود (ما در این مقاله اثر کاهش نرخ کوپلر را بررسی کرده ایم)، مقادیر دو پارامتر دیگر یعنی GVD و پهنای باند فیلتر طیفی ثابت نگه داشته شده و به ترتیب برابر با 0.1058  $ps^2$  و 8 nm فرض می باشند. مقدار  $\phi_{NL}$  به ازای کاهش نرخ کوپلر خروجی  $R=0.8$ ،  $R=0.1$  و  $R=0.01$  به ترتیب برابر  $15\pi$ ،  $23\pi$  و  $32\pi$  است و پهنای باند طیف خروجی متناظر، از چپ به راست برابر 26nm، 35nm و 41nm می باشد که در شکل (۳) نشان داده شده است.



شکل (۳): پهنای طیف خروجی به ازای مقادیر مختلف  $\phi_{NL}$

### ۲-۳ اثر پهنای باند فیلتر طیفی

در هر دور گردش پالس لیزر داخل کاواک، میزان چیرپ فرکانسی GVD و SPM تحمیل شده به پالس، در لبه جلویی و عقبی پالس بیشتر از قسمت مرکزی پالس است. مؤلفه های جدید فرکانسی بالا و پایین وجود آمده در لبه های پالس به واسطه چیرپ ناشی از SPM، به دلیل اثر GVD، منجر به افزایش پهنای زمانی پالس می شوند، پس با حذف این مؤلفه های فرکانسی از میزان چیرپ تحمیل شده به پالس تا حد زیادی کاسته شده و از پهن شدن پالس به واسطه اثر GVD و SPM جلوگیری می شود. شکل (۴)، تغییر پهنای باند طیفی خروجی لیزر را به ازای پهنای باند مختلف فیلتر طیفی نشان می دهد. با توجه به شکل (۴) با افزایش پهنای باند فیلتر طیفی از 6 تا 10nm، پهنای باند طیف خروجی لیزر کاهش یافته به ترتیب 35nm، 26nm و 22nm می باشد، دلیل آن این است که افزایش پهنای باند فیلتر باعث افزایش پهنای زمانی پالس لیزر و بنابراین کاهش شدت بیشینه  $\phi_{NL}$  و نهایتاً کاهش پهنای طیف خروجی لیزر می شود.