

## رخداد انفجارهای سالیتمونی در لیزرهای فیبری فمتوثانیه قفل شده بر پایه آینه حلقوی تقویتگر غیرخطی

سحر حاجی زاده نظری، آتوسا سادات عربانیان و رضا مسعودی

تهران، اوین، دانشگاه شهید بهشتی، پژوهشکده لیزر و پلاسما

چکیده - در این مقاله به مطالعه رخداد انفجارهای سالیتمونی در لیزرهای فیبری فمتوثانیه قفل مدی بر پایه آینه حلقوی تقویتگر غیرخطی به ازای تغییر پارامترهای مختلف کاواک لیزری از جمله توان پمپ حلقه اصلی و طول فیبر غیرفعال حلقه اصلی پرداخته می شود. با حل عددی معادله شرودینگر غیرخطی تحول شکل طیفی و انرژی پالس خروجی به ازای گردش های مختلف در کاواک بدست خواهد آمد و با بررسی این نتایج، گستره تنظیم هر یک از پارامترهای مورد بررسی جهت دستیابی به پالس خروجی پایدار بدست می آید. نتایج حاصله درک بهتری از میزان اثر گذاری هر یک از پارامترهای مورد بررسی کاواک را به ارمغان می آورد و نشان خواهد داد که تا چه اندازه انحراف از مقادیر بهینه منجر به رخداد انفجارهای سالیتمونی در طول گردش های مختلف خواهد شد.

کلید واژه- لیزر فیبری فمتوثانیه، آینه حلقوی تقویتگر غیرخطی، انفجارهای سالیتمونی.

## Soliton Explosions in Femtosecond Lasers Mode-locked with Nonlinear Amplifying Loop Mirror

Sahar Hajizadeh Nazari, Atoosa Sadat Arabanian and Reza Massudi

Tehran, Evin, Shahid Beheshti University, Laser and Plasma Research Institute

Abstract- soliton explosion in mode-locked femtosecond lasers based on a nonlinear amplifying loop mirror for different laser parameters, such as the pump power and the length of the passive fiber of the main loop is studied. By numerical solving of the nonlinear Schrödinger equation the spectral shape evolution and the output pulse energy are obtained for various cycles in the cavity. By examining these results, the appropriate range of each parameter for achieving a stable output pulse are acquired. The results provide better understanding of the extent of the effect of each of the cavity parameter and show how deviation from optimal values may lead to the occurrence of soliton explosions for different rounds.

Keywords: femtosecond fiber laser, nonlinear amplifying loop mirror, soliton explosions.



شوتینگ<sup>۸</sup> استفاده شده است [8]. با استفاده از مدل عددی فوق بررسی اثر هر کدام از پارامترهای کاواک نظیر توان پمپ حلقه اصلی و طول فیبر غیرفعال حلقه اصلی بر تشکیل انفجارهای سالیتمونی و میزان پایداری پالسهای خروجی کاواک طی گردش های مختلف کاواک پرداخته می شود.

### ۳- اثر توان پمپ حلقه اصلی بر پایداری قفل مدی کاواک

در این بخش به بررسی اثر توان پمپ حلقه اصلی بر ناپایداری های کاواک و تشکیل سالیتمونهای انفجاری در پالس خروجی خواهیم پرداخت. شکل ۲ تحول شکل طیفی و انرژی پالس خروجی به ازای ۲۰۰ دور گردش در کاواک را به ازای توانهای پمپ مختلف نشان می دهد. همانطور که از شکل مشاهده می شود به ازای توان پمپ ۵۰mW پالس خروجی کاملاً پایدار بوده و هیچ گونه انفجار سالیتمونی در آن مشاهده نمی شود به طوری که شکل طیفی و انرژی آن در طول ۲۰۰ دور گردش در کاواک کاملاً ثابت است. با افزایش توان پمپ حلقه اصلی به ۶۰mW (شکل b) به دلیل افزایش شدت پالس، فاز غیر خطی اعمالی بر پالس ناشی از اثرات خود مدولاسیون فازی؛ خود تیز شدگی<sup>۹</sup> و رامان<sup>۱۰</sup> افزایش یافته و در نتیجه وارد یک رژیم ناپایدار خواهد شد و سالیتمونهای انفجاری در پالس خروجی تشکیل می شود به طوری که در دوره های ۶۰ و ۱۲۵ و ۱۷۵ پالس از هم می پاشد و شبه نویز (رژیمی بین رژیم پالس پایدار و رژیم نویزی) می شود. همانطور که از شکل f نیز مشخص است در این تعداد دورها که پالس شبه نویز می شود انرژی پالس کاهش میابد که این به دلیل ناهم فازی مولفه های فرکانسی نوسانی در کاواک تحت شرایط شبه نویز می باشد. با افزایش بیشتر توان پمپ به ۷۰mW و ۸۰mW (شکل c و d) فاز غیرخطی اعمالی و در نتیجه انفجارهای سالیتمونی در پالس نیز افزایش میابد. به این ترتیب با توجه به نتایج درمی یابیم که کاواک لیزری در توان های پمپ

غیرخطی است.  $R(T) = (1 - f_R)\delta(T) + f_R h_R(T)$ . تابع پاسخ غیرخطی رامان است که در آن  $f_R = 0.18$  و  $h_R(T)$  در یک اندازه گیری تجربی سطح مقطع رامان برای فیوزسیلیکا بدست می آید [6].  $g(z, \omega)$  ترم بهره برای فیبر فعال کاواک است و به طور کلی به صورت  $g(z, \omega) = g_m(z)g(\omega)$  تعریف می شود که  $g(\omega)$  پروفایل طیفی بهره و  $g_m(z)$  دامنه بهره بوده که به ترتیب به صورت معادلات ۲ و ۳ در نظر گرفته می شوند:

$$g(\omega) = \frac{1}{1 + \left(\frac{\omega - \omega_0}{\Delta\omega}\right)^2} \quad (2)$$

$$g_m(z) = \frac{1}{p_s(z)} \frac{dp_s(z)}{dz} \quad (3)$$

$\omega_0$  فرکانس مرکزی و  $\Delta\omega$  پهنای فرکانسی محیط بهره است.  $p_s(z)$  توان سیگنال در طول انتشار در فیبر فعال است (که بر پایه یک مدل تحلیلی بدست می آید) [7]. طبق این مدل تحول توان های پمپ و سیگنال در طول انتشار در فیبر فعال به صورت زیر بدست می آید:

$$p_p(z) = p_p(0) \exp(-\alpha_p z + \frac{p_p(0) - p_p(z)}{P_p^{fs}} + \frac{p_s(0) - p_s(z)}{P_p^{cs}}) \quad (4)$$

$$p_s(z) = p_s(0) \exp(-\alpha_s z + \frac{p_s(0) - p_s(z)}{P_s^{fs}} + \frac{p_p(0) - p_p(z)}{P_s^{cs}}) \quad (5)$$

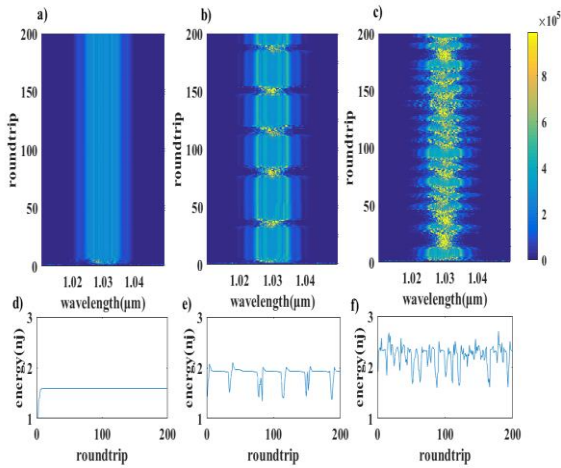
اندیس های  $s$  و  $p$ ، به ترتیب، به سیگنال و پمپ اشاره دارد،  $\alpha$  جذب خطی،  $P^{fs}$  توان اشباعی ذاتی، که چگونگی اشباع توانهای پمپ و سیگنال توسط خودشان، و  $P^{cs}$  توان اشباعی، که چگونگی اشباع توان سیگنال توسط پمپ و برعکس را توصیف می کنند، می باشد.  $g(z, \omega)$  در بخش فیبرهای غیرفعال کاواک با  $-\alpha(\omega)$  جایگزین می شود که  $\alpha$  ضریب اتلاف در فرکانسهای مختلف در فیبرهای غیرفعال است. همچنین در بخش محاسبات NALM انتشار دو میدان ساعتگرد و پاد ساعتگرد به طور جداگانه در نظر گرفته شده و برهم نهد میدانها در جفت کننده محاسبه می شود. به منظور حل معادلات بهره برای پمپ در خلاف جهت سیگنال در حلقه NALM از روش

<sup>۸</sup>Shooting methode

<sup>۹</sup>Self-phase modulation

<sup>۱۰</sup>Self steepening

<sup>۱۱</sup>Raman



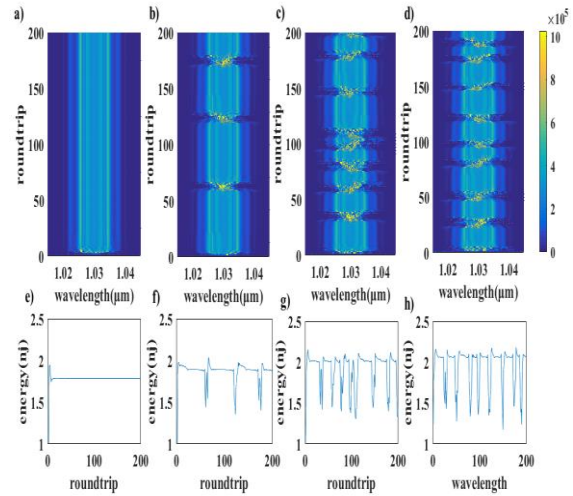
شکل ۳: تحول شکل طیفی و انرژی پالس خروجی در طول ۲۰۰ دور گردش در پالس به ازای طول فیبرهای غیرفعال SMF1 مختلف به طول، (a,d) ۱۰ متر، (b,e) ۲۰ متر، (c,f) ۳۰ متر.

### ۵- نتیجه گیری

شبهه سازی لیزرهای فموتونانیه قفل مدی شده بر پایه NALM نشان داد که با افزایش توان پمپ حلقه اصلی، به دلیل افزایش فاز غیرخطی، کاواک وارد یک رژیم ناپایدار شده و انفجارهای سالیوتونی تشکیل می شود. از سوی دیگر افزایش طول فیبر غیرفعال حلقه اصلی نیز منجر به افزایش فاز غیرخطی پالس و رخداد انفجارهای سالیوتونی می شود. در نتیجه با بهینه سازی طول فیبر غیرفعال و توان پمپ حلقه اصلی می توان به پالس های خروجی پایدار دست یافت.

[1] P. K. Mukhopadhyay, "Femtosecond pulse generation and amplification in Yb-doped fibre oscillator - Amplifier system," *Pramana - J. Phys.*, vol. 75, no. 5, pp. 787-805, 2010.  
 [2] Deissler, Robert J., and Helmut R. Brand. "Periodic, quasiperiodic, and chaotic localized solutions of the quintic complex Ginzburg-Landau equation." *Physical review letters* 72.4 (1994): 478  
 [3] Cundiff, Steven T., Jose M. Soto-Crespo, and Nail Akhmediev. "Experimental evidence for soliton explosions." *Physical review letters* 88.7 (2002): 073903.  
 [4] Runge, Antoine FJ, et al. Observation of soliton explosions in a passively mode-locked fiber laser. *Optica*, 2(1), (2015):36-39.  
 [5] Agrawal, Govind P. *Nonlinear fiber optics*. Academic press, 2007.  
 [6] Stolen, Roger H., et al. "Raman response function of silica-core fibers." *JOSA B* 6.6 (1989): 1159-1166.  
 [7] Barnard, C., et al. "Analytical model for rare-earth-doped fiber amplifiers and lasers." *IEEE Journal of Quantum Electronics* 30.8 (1994): 1817-1830.  
 [8] Lali-Dastjerdi, Zohreh, Feisal Kroushavi, and Mohammad Hosein Rahmani. "An efficient shooting method for fiber amplifiers and lasers." *Optics & Laser Technology* 40.8 (2008): 1041-1046

بالا در رژیم های ناپایداری عمل می کند و پالس در حال گذار از رژیم های پایدار به رژیم های شبه نویز است.



شکل ۴: تحول شکل طیفی و انرژی پالس خروجی به ازای توانهای پمپ مختلف، (a,e) ۵۰ mW (b,f) ۶۰ mW (c,g) ۷۰ mW (d,h) ۸۰ mW

### ۴- اثر طول فیبر غیرفعال حلقه اصلی بر پایداری قفل مدی کاواک

با افزایش طول فیبر غیرفعال (SMF1) حلقه اصلی، فاز خطی و فاز غیرخطی ناشی از اثرات غیرخطی خود مدولاسیون فازی، خود تیز شدگی و رامان افزایش میابد. در نتیجه کاواک در یک رژیم ناپایدار عمل کرده و دستیابی به حالت قفل مدی پایدار مشکل خواهد بود. شکل ۳ اثر طول فیبر غیرفعال حلقه اصلی بر شکل طیفی و انرژی پالس خروجی در طی ۲۰۰ دور گردش در کاواک را نشان می دهد. همانطور که از شکل مشاهده می کنید به ازای طول فیبر غیرفعال ۱۰ متر پالس خروجی کاملاً پایدار است و در طی ۲۰۰ دور گردش در کاواک هیچ گونه تغییری در شکل طیفی و انرژی پالس خروجی مشاهده نمی شود (شکل a و d). با افزایش طول فیبر به ۲۰ متر انفجارهای سالیوتونی به ازای دورهای ۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۹۰ مشاهده می شود و دز انرژی پالس خروجی افت و خیز شدیدی ایجاد می شود (شکل b و e). با افزایش بیشتر طول فیبر SMF1 به ۳۰ متر فاز غیرخطی پالس افزایش بیشتری یافته و در نتیجه ناپایداری های کاواک نیز افزایش می یابد و پالس خروجی شبه نویزی خواهد شد (شکل c و f).