رخداد انفجارهای سالیتونی در لیزرهای فیبری فمتوثانیه قفل مدی 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 سالیتونی 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 سالیتونی در طول گردش های مختلف خواهد شد.

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

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.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-18]

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

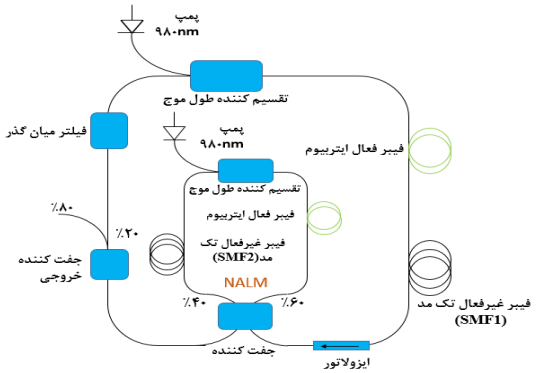
۱- مقدمه

توانایی تولید پالس های کوتاه با انرژی بالا توسط لیزرهای فیبری فمتوثانیه آنها را برای بسیاری از کاربردهای صنعتی مناسب کرده است[1]. قفل مدی در لیزرهای فیبری اصولا به واسطه یک تعامل پیچیده بین اثرات خطی و غیرخطی حاصل می شود. برهم کنش پیچیده اثرات خطی و غیرخطی در طی سالیان گذشته منجر به رخداد پدیده های جالبی در لیزرهای قفل مدی، مانند انفجارهای سالیتونی[۱] شده است. در این پدیده به دلیل کاهش یا افزایش بیش از حد فاز غیر خطی پالس انتشاری در کاواک، پالس از هم پاشیده و شبیه نویز می شود و بعد از چند گردش درون کاواک، دوباره به حالت پایدار اولیه خود بر می گردد و این روند در طول رفت و برگشتهای بعدی تکرار می شود. در واقع انفجارهای سالیتونی همواره در ناحیه گذار بین حالت پایدار و حالت نویزی هستند. این پدیده نخستین بار با حل عددی معادله پیچیده گینزبرگ- لاندائو[۲] مشاهده شد[2]. در سال ۲۰۰۲ این رخداد برای اولین بار در لیزر تیتانیوم سفایر[۳] دیده شد[3]. در سال ۲۰۱۴ نیز آنتوئین اف . جی .رانگ[۴] به همراه همکارانش برای اولین بار این پدیده را در لیزرهای قفل مدی بر پایه آینه های حلقوی تقویتگر غیرخطی[۵] (NALM) به صورت تجربی مشاهده کردند[4]. آنها این رفتار را به ازای پارامترهای ثابتی از لیزر مشاهده کردند. در این مقاله اثر پارامترهایی مانند توان و طول فیبر غیرفعال حلقه اصلی بر انفجارهای سالیتونی در لیزرهای قفل مدی بر پایه NALM بررسی می شود. شبیه سازی عددی کاواک درک بهتری از پایداری قفل مدی به ازای پارامترهای مختلف کاواک بدست می دهد. نتایج نشان می دهد که با تنظیم دقیق این پارامترها می توان به یک کاواک بهینه با پایداری طولانی مدت و بدون انفجارهای سالیتونی دست یافت.

[۱] Soliton explosions
[۲] complex Ginzburg-landau
[۳] Ti:Sapphire
[۴] Antoine F.J. Runge
[۵] Nonlinear amplifying loop mirror

۲- تئوری

شکل ۱ شمایی از لیزر فیبری فمتوثانیه قفل مدی شده بر پایه NALM را نشان می دهد. کاواک از دو بخش حلقه اصلی و حلقه NALM تشکیل شده است. حلقه اصلی متشکل از یک تکه فیبر فعال ایتربیوم که توسط یک لیزر دیود ۹۸۰ nm پمپ می شود، یک بخش فیبر غیرفعال تک مد(SMF 1)، یک ایزولاتور، یک جفت کننده نوری که بخشی از توان درون کاواک را به خارج جفت می کند و یک فیلتر میان گذر[۶]است. حلقه NALM نیز شامل یک تکه فیبر فعال ایتربیوم، که توسط یک لیزر دیود ۹۸۰nm پمپ می شود و یک بخش فیبر غیرفعال تک مد (SMF 2) که توسط یک جفت کننده به حلقه اصلی متصل شده است، می باشد.



شکل ۱: چیدمان لیزر فیبری فمتوثانیه قفل مدی شده بر پایه آینه حلقوی تقویتگر غیرخطی.

انفجارهای سالیتونی در طول گردشهای مختلف داخل کاواک می تواند با بررسی تحول طیفی پوش میدان الکتریکی مختلط در کاواک از طریق حل معادله غیرخطی شرودینگر(۱) توسط روش عددی تبدیل فوریه تقسیم بازه[۷]بررسی شود [5]:

$$\frac{\partial A}{\partial z}-\frac{g(\omega,z)}{2}A+i\beta_2\frac{\partial^2}{\partial T^2}A= i\gamma(1+\frac{i}{\omega_0}\frac{\partial}{\partial T})(A(z,T)\int_{-\infty}^{+\infty}R(T')|A(Z,T-T')|^2\,dT') \quad (۱)$$

در معادله بالا $A(z,T)$ دامنه میدان الکتریکی، β_2 ضریب پاشندگی مرتبه دوم، و $\gamma=\omega_0 n_2(\omega_0)/cA_{eff}$ ضریب

[۶] Band pass filter
[۷] Fourier transform split-step

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-18]

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:

$$g(\omega)=\frac{1}{1+(\frac{\omega-\omega_0}{\Delta\omega})^2} \qquad (۲)$$

$$g_m(z)=\frac{1}{p_s(z)}\frac{dp_s(z)}{dz} \qquad (۳)$$

ω_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:

$$p_p(z)=p_p(0)\exp(-\alpha_p z+\frac{p_p(0)-p_p(z)}{p_p^{Is}}+\frac{p_s(0)-p_s(z)}{p_p^{cs}}) \qquad (۴)$$

$$p_s(z)=p_s(0)\exp(-\alpha_s z+\frac{p_s(0)-p_s(z)}{p_s^{Is}}+\frac{p_p(0)-p_p(z)}{p_s^{cs}}) \qquad (۵)$$

اندیس های s و p، به ترتیب، به سیگنال و پمپ اشاره دارد، α جذب خطی، p^{Is} 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 α 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 نهی میدانها در جفت کننده محاسبه می شود. به منظور حل معادلات بهره برای پمپ در خلاف جهت سیگنال در حلقه NALM از روش شوتینگ[۸] 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 سالیتونی 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

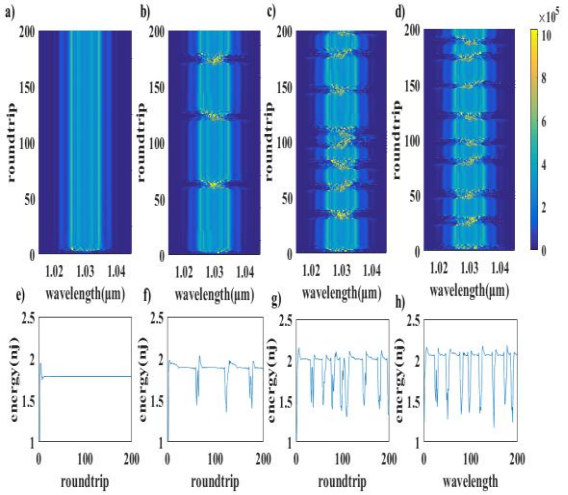
در این بخش به بررسی اثر توان پمپ حلقه اصلی بر ناپایداری های کاواک و تشکیل سالیتونهای انفجاری در پالس خروجی خواهیم پرداخت. شکل ۲ تحول شکل طیفی و انرژی پالس خروجی به ازای ۲۰۰ دور گردش در کاواک را به ازای توانهای پمپ مختلف نشان می دهد. همانطور که از شکل مشاهده می شود به ازای توان پمپ ۵۰mW پالس خروجی کاملا پایدار بوده و هیچ گونه انفجار سالیتونی در آن مشاهده نمی شود به طوری که شکل طیفی و انرژی آن در طول ۲۰۰ دور گردش در کاواک کاملا 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[۹] خود تیز شدگی[۱۰] و رامان[۱۱] افزایش یافته و در نتیجه وارد یک رژیم ناپایدار خواهد شد و سالیتونهای انفجاری در پالس خروجی تشکیل می شود به طوری که در دورهای 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 سالیتونی در پالس نیز افزایش میابد. به این ترتیب با توجه به نتایج درمی یابیم که کاواک لیزری در توان های پمپ

[۸] Shooting methode
[۹] Self-phase modulation
[۱۰] Self steepening
[۱۱] Raman

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-18]

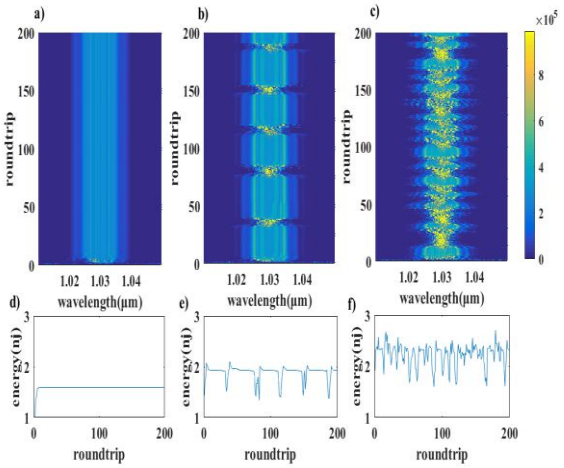
بالا در رژیم های ناپایداری عمل می کند و پالس در حال گذار از رژیم های پایدار به رژیم های شبه نویز است.



شکل ۲: تحول شکل طیفی و انرژی پالس خروجی به ازای توانهای پمپ مختلف، a,e) ۵۰mW، b,f) ۶۰mW، c,g) ۷۰mW، d,h) ۸۰mW.

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 کاملا 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 سالیتونی به ازای دورهای۴۰، ۸۰، ۱۲۰، ۱۵۰ و ۱۹۰ مشاهده می شود و دذ 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).



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

۵- نتیجه گیری

شبیه سازی لیزرهای فمتوثانیه 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 سالیتونی تشکیل می شود. از سوی دیگر افزایش طول فیبر غیرفعال حلقه اصلی نیز منجر به افزایش فاز غیرخطی پالس و رخداد انفجارهای سالیتونی 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

این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-12-18]