



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.  
۱۳۹۷ بهمن ۹-۱۱



## شبیه سازی عددی نوسانگر قفل شده مدی به روش عدسی کر با محیط فعال تیتانیوم سفایر در رژیم غیرسالیتمونی

حسین شهبازی، سمیه نجفی، رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی

چکیده - در این مقاله نتایج شبیه سازی عددی نوسانگر قفل شده مدی عدسی کر با محیط بهره تیتانیوم سفایر ارائه می شود. ما تاثیر پارامترهای مختلف از جمله طول کریستال، میزان آلایش تیتانیوم و شعاع انحنای آینه های منحنی نوسانگر لیزری را بر مشخصات پالس خروجی بررسی کرده و مقادیر بهینه برای این پارامترها را محاسبه نمودیم. دریافتیم که برای میزان آلایش ۰/۱۵٪ و طول کریستال کمتر از ۸ میلی متر امکان دستیابی به پالس هایی با پهنای زمانی کمتر از ۲۰ فمتوثانیه و انرژی بالاتر از ۱۹ نانوجول فراهم می شود.

کلید واژه- نوسانگر لیزری، اثر غیرخطی کر، قفل مدی، پالس لیزری فوق کوتاه، تیتانیوم سفایر

## Numerical simulation of Kerr lens mode-locked Ti: sapphire oscillator in non-soliton regime

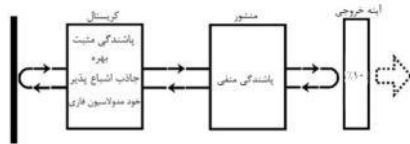
Hosein Shahbazi, Somayeh Najafi, Reza Massudi

Laser and Plasma research institute, shahid beheshti university

**Abstract-** In this paper, the numerical simulation results of Kerr lens mode-locked Ti: sapphire oscillator are reported. We investigated the effect of the different parameters such as crystal length, titanium doping and radius of curve of the mirrors of laser oscillator on the characterizations of output ultra-short laser pulses and introduced optimized values of these parameters. It is found that for the amounts of doping 0.15% and crystal length less than 8mm, it is possible to generate the ultra-short pulses with duration of less than 20fs and energy of more than 19nJ.

Keywords: Laser oscillator, Nonlinear Kerr effect, Mode locking, Ultra-short laser pulse, Titanium sapphire

که شامل کریستال لیزری با نقش محیط فعال و اعمال کننده اثرات غیر خطی کر، آینه‌های تشدیدگر لیزری سازنده مد کاواک و منشورها برای جبران پاشندگی مثبت بوده و معمولاً این چیدمان را با در نظر گرفتن نقش اجزای آن می‌توان به صورت شکل ۲ مدل کرد.



شکل ۲: مدل نوسانگر قفل مدی کر

انتشار امواج الکترومغناطیسی در یک محیط با معادلات ماکسول توصیف می‌شود. با ترکیب چهار معادله ماکسول و در نظر گرفتن پاسخ دو قطبی ماده و تقریب‌های لازم معادله شرودینگر غیر خطی به صورت معادله (۱) بدست می‌آید. این معادله شامل تمامی فرآیندهایی است که در کاواک فوق کوتاه رخ داده و برای انتشار پالس در نوسانگر قفل مدی به روش عدسی کر استفاده می‌شود [۷].

$$\frac{\partial A(r, \tau)}{\partial z'} + \frac{j}{2} k_2 \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} A(r, \tau) = \frac{1}{2} \left( g + \frac{g}{\Delta \omega_{gain}^2} \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \right) A(r, \tau) + j \gamma |A|^2 A(r, \tau) + qA(r, \tau) \quad (1)$$

که در این معادله عبارت اول، تحول دامنه توان کند تغییر در طول ماده، عبارت دوم، پاشندگی سرعت گروه (GVD)، عبارت سوم، بهره ماده فعال لیزری، عبارت چهارم، خودمدولاسیون فازی (SPM) و عبارت پنجم نقش خودکانونی کنندگی کریستال تیتانیوم سفایر را که با جاذب اشباع پذیر سریع [۷] مدل‌سازی شده، بیان می‌کند. در معادله (۱)،  $K_2$  معرف ضریب پاشندگی سرعت گروه است و برای کریستال تیتانیوم سفایر  $58 \text{ fs}^2/\text{mm}$  است.

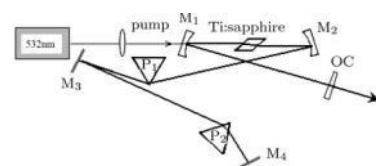
همچنین  $q = \frac{q_0}{1 + |A|^2 / q_{Sa}}$  بوده که  $q_0$  ضریب جذب اولیه و در خارج از کریستال صفر است و  $q_{Sa}$  توان اشباع

## مقدمه

پالس‌های لیزری فوق کوتاه به دلیل پهنای زمانی بسیار کم دارای قدرت تفکیک زمانی و فضایی بالا بوده و در حوزه‌هایی از قبیل پردازش مواد بدون ایجاد گرمای قابل ملاحظه در ماده [۱]، در حوزه پزشکی در بخش درمانی و تشخیصی بدون آسیب به بافت‌های سالم [۲] و تصویربرداری با رزولوشن عمقی میکرومتری از مواد و بافت‌ها [۳] و ... کاربرد فراوان دارد. بنابراین، امروزه تولید این پالس‌ها بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در سال ۱۹۹۱ اولین بار اسپنس [۴] توانست به روش قفل مدی عدسی کر در کریستال Ti:Sa به پالس‌هایی با طول زمانی ۶۰ فمتوثانیه دست یابد و همچنین مورگنر [۵] در سال ۲۰۰۱ با اصلاح پاشندگی نوسانگر به طول پالس ۵ فمتوثانیه دست یافت که تاکنون کوتاه‌ترین طول پالس ممکن تولید شده به روش قفل مدی است. به منظور طراحی نوسانگر برای دستیابی به پالس با پارامترهای مشخص، در سال ۲۰۰۴ برای اولین بار ایلدی [۶] توانست به روش عددی، نوسانگر قفل مدی عدسی کر را شبیه‌سازی کند و نشان دهد امکان دستیابی به پالس‌های با انرژی چندصد نانوذول وجود دارد. در این مقاله به منظور طراحی نوسانگر قفل مدی به روش عدسی کر، ابتدا معادلات حاکم بر تولید پالس‌های فوق کوتاه در نوسانگر لیزری را بررسی کرده و سپس با حل عددی معادلات به روش اسپلیت استپ تاثیر آینه‌های کاواک، مشخصات کریستال لیزری و دیگر پارامترها را در بهینه‌سازی خروجی نوسانگر نشان می‌دهیم.

## تئوری و معادلات حاکم:

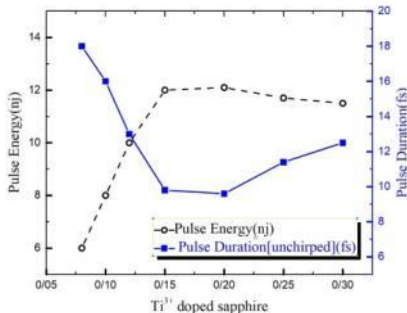
چیدمان کلی نوسانگر قفل مدی عدسی کر، در شکل ۱ آمده است [۷]



شکل ۱: چیدمان نوسانگر قفل مدی تیتانیوم سفایر به روش عدسی کر

پالس کوتاهتر باشد مانند تصویربرداری‌ها و تشخیص فرآیندهای فوق سریع، و همچنین برای تولید پالس‌های با توان قله بالا در حد پتاوات می‌بایست از کریستال لیزری با طول کمتر از ۷ میلی‌متر در نوسانگر لیزری استفاده کرد تا با تعداد مراحل تقویت کمتر به توان بالا دست یافت. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود با افزایش طول کریستال تا ۸ میلی‌متر (برای مقدار آرایش ۰/۱۵٪) انرژی پالس خروجی افزایش می‌یابد و با بلندتر شدن طول کریستال به دلیل کاهش توان پمپ جذب شده در انتهای کریستال و جذب طول موج لیزری در آن، انرژی پالس خروجی کاهش می‌یابد. بنابراین در کاربردهایی نظیر پردازش پلیمرها که از پالس‌های با پهنای زمانی چند صد فمتوثانیه اما با انرژی‌های بالاتر استفاده می‌شود، این نتیجه مفید است. همچنین منحنی قله توان پالس تولید شده بر حسب طول کریستال نشان می‌دهد که برای طول کریستال از ۴ تا ۷ میلی‌متر قله توان تقریباً یکسان است.

در مطالعه دیگر، برای کریستال به طول ۵ میلی‌متر، درصد آرایش تیتانیوم تغییر داده شد که نتایج این محاسبات در شکل ۴ ارائه شده است.



شکل ۴: تغییرات انرژی و پهنای زمانی پالس خروجی بر حسب درصد آرایش تیتانیوم

همانطور که از شکل ۴ واضح است انتخاب آرایش ۰/۱۵٪ و ۰/۲۰٪ پالس کوتاه با انرژی بالا را نتیجه می‌دهد. در آرایش‌های بیشتر به دلیل اینکه انتهای کریستال پمپ نمی‌شود جذب لیزر توسط کریستال بیشتر بوده و انرژی پالس کاهش می‌یابد و که در این شرایط با کاهش اثر غیر خطی SPM طول پالس نیز افزایش خواهد یافت. برای انتخاب مناسب مقدار آرایش، شبیه سازی حرارتی برای کریستال ۵ میلی‌متری پمپ شده با توان ۵ وات، با آرایش-

است. از طرفی  $g = \frac{g_0}{1 + \frac{E_p}{E_s}}$  است که  $g_0$  بهره سیگنال کوچک،  $E_p$  انرژی پالس و  $E_s$  انرژی اشباع است. معادله (۱)

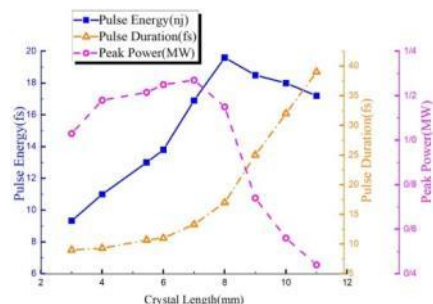
به‌طور کلی حل تحلیلی نداشته و به‌روش عددی حل می‌شود. در این شبیه سازی یک پالس اولیه ضعیف درون کاواک در نظر گرفته شده و تحولات آن براساس معادله (۱) تا پایدار شدن پالس و همگرا شدن به دامنه مشخص بررسی می‌شود. پارامترهای مفروض در این شبیه سازی در جدول ۱ آمده است.

$L_{\text{Cavity}}$	$L_{\text{short arm}}$	$L_{\text{Long arm}}$
180cm	60cm	110cm
$\Delta\theta_{\text{gain}}$	$F_{\text{Pump}}$	$q_0$
270THz	12.5cm	0.1(mm) <sup>-1</sup>

جدول ۱: داده های ورودی برای شبیه سازی نوسانگر لیزری تیتانیوم سفایر

## نتایج و بحث

با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی مطابق جدول ۱،  $g_0 = 0.15(\text{mm})^{-1}$  و توان پمپ ۵ وات و آینه‌های منحنی کاواک با شعاع انحنای ۱۰ سانتیمتر معادله (۱) به صورت عددی حل شده و مشخصات پالس خروجی کاواک به دست می‌آید. برای بررسی اثر طول کریستال لیزری بر پالس خروجی، طول را از ۳ تا ۱۱ میلی‌متر تغییر داده و انرژی، قله توان و پهنای زمانی پالس خروجی محاسبه و نتیجه آن در شکل ۳ ارائه شد.



شکل ۳: تغییرات انرژی، پهنای زمانی، و قله توان پالس خروجی بر حسب طول کریستال

شکل ۳ نشان می‌دهد که با افزایش طول کریستال، پهنای زمانی پالس افزایش می‌یابد. بنابراین در کاربردهایی که قدرت تفکیک زمانی مهم است و می‌بایست پهنای زمانی

ثابت و با افزایش بیشتر شعاع انحنای (۴۸ سانتیمتر)، مقدار انرژی کاهش می‌یابد.

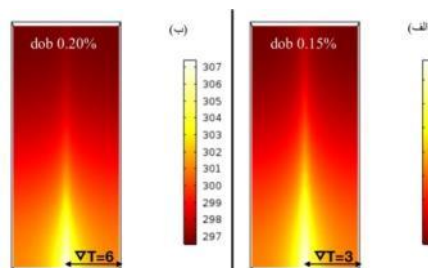
### نتیجه گیری

محاسبات نشان می‌دهد که طول کریستال، مقدار آرایش آن و شعاع انحنای آینه‌های تشدیدگر مشخصه‌های موثر در طراحی نوسانگر قفل شده مدی به روش عدسی کر بوده و با توجه به نوع کاربرد مورد نظر برای پالس‌های خروجی، می‌توان با انتخاب مناسب مشخصه‌های نوسانگر، پالس خروجی با انرژی بالاتر و یا پهنای زمانی کوتاه‌تر تولید کرد.

### مرجع‌ها

- [1] Victor Matylytskya, Frank Hendricksa” Industrial femtosecond lasers for micro-machining applications with highest quality and efficiency” 9th International Conference on Photonic Technologies LANE 2016.
- [2] Kim S. Frederickson, William E. White, Ronald G. Wheeland, Dennis R. Slaughter” Precise Ablation of Skin With Reduced Collateral Damage Using the Femtosecond-Pulsed, Terawatt Titanium-Sapphire Laser” University of California.
- [3] S. Bourquin, A. D. Aguirre, I. Hartl, P. Hsiung, T. H. Ko and J. G. Fujimoto” Ultrahigh resolution real time OCT imaging using a compact femtosecond Nd:Glass laser and nonlinear fiber” Optical Society of America.
- [4] D.E.Spence, P.N. Kean, and W. Sibbett” 60-fs pulse generation from a self-mode-locked Ti:sapphire laser” OPTICS LETTERS / Vol. 16, No. 1 / January 1, 1991.
- [5] U. Morgner, F. X. Kärtner, S. H. Cho, Y. Chen, H. A. Haus, J. G. Fujimoto, E. P. Ippen, V. Scheuer, G. Angelow, and T. Tschudi” Sub-two-cycle pulses from a Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser” optic letters. vol.24, pp.411-413, 1999.
- [6] F. O. Ilday, F. W. Wise, and F. X. Kaertner” Possibility of self-similar pulse evolution in a Ti:sapphire laser” Optical Society of America
- [7] Liu Hua Gang, Hu Ming-Lie” Operation of Kerr-lens mode-locked Ti:sapphire laser in the non-soliton regime” Chin. Phys. B

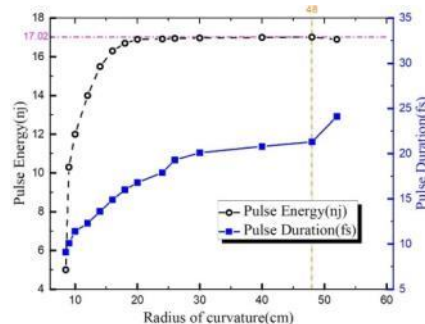
های ۰/۱۵٪ و ۰/۲۰٪ انجام شد. در شکل ۵، پروفایل حرارتی یک برش از کریستال لیزری نشان داده شده است.



شکل ۵: پروفایل دمایی کریستال تیتانیوم سفایر برای ۱ ثانیه تابش ۵ وات در محیط آزاد. الف: آرایش ۰/۱۵٪ و ب: آرایش ۰/۲۰٪

همانطور که از شکل ۵ برمی‌آید گرادیان دمایی برای کریستال با آرایش ۰/۱۵٪، کمتر از دیگری است و طراحی سیستم خنک کننده برای آن ساده‌تر بوده و بنابراین انتخاب مناسب‌تری است.

در ادامه، برای آینه‌های با شعاع انحنای متفاوت انرژی و پهنای زمانی پالس خروجی محاسبه شد که نتایج آن به ترتیب در شکل ۶ آمده است.



شکل ۶: تغییرات انرژی پالس خروجی بر حسب شعاع انحنای آینه

همانطور که از شکل ۶ برمی‌آید، با بلند شدن شعاع انحنای آینه‌های منحنی، اندازه مد نوسانی در کاواک بزرگتر شده، ضریب SPM کاهش یافته و بنابراین پهنای زمانی پالس افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش حجم مد نوسانی و استفاده بیشتر از ناحیه پمپ شده، انرژی پالس خروجی نیز افزایش می‌یابد. اما برای شعاع انحنای بیشتر از ۲۰ سانتیمتر با توجه به بزرگ شدن مد نوسانی و گسترش آن به نواحی پمپ نشده و همچنین کاهش چگالی فوتونی پالس لیزری، انرژی پالس خروجی ابتدا