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

شبیه سازی عددی نوسانگر قفل شده مدی به‌روش عدسی کر با محیط فعال تیتانیوم سفایر در رژیم غیرسالیتونی

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 سفایرارائه می‌شود. ما تاثیر پارامترهای مختلف از جمله طول کریستال، میزان آلایش تیتانیوم و شعاع انحنای آینه‌های 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 پالس‌هایی با پهنای زمانی کمتر از ۲۰ فمتوثانیه و انرژی بالاتر از ۱۹ نانوژول فراهم می‌شود.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

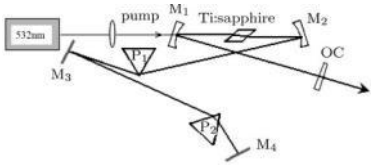
این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

مقدمه

پالس‌های لیزری فوق کوتاه به‌دلیل پهنای زمانی بسیار کم دارای قدرت تفکیک زمانی و فضایی بالا بوده و در حوزه-هایی 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 تصویر-برداری 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 به‌روش 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 به‌روش قفل مدی است. به منظور طراحی نوسانگر برای دستیابی به پالس با پارامترهای مشخص، در سال ۲۰۰۴ برای اولین بار ایلدی[۶] توانست به‌روش عددی، نوسانگر قفل مدی عدسی کر را شبیه سازی کند و نشان دهد امکان دستیابی به پالس‌های با انرژی چندصد نانوژول وجود دارد. در این مقاله به منظور طراحی نوسانگر قفل مدی به‌روش 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 بهینه سازی خروجی نوسانگر نشان می‌دهیم.

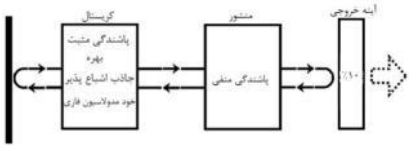
تئوری و معادلات حاکم:

چیدمان کلی نوسانگر قفل مدی عدسی کر، در شکل۱ آمده است[۷]



شکل۱: چیدمان نوسانگر قفل مدی تیتانیوم سفایر به روش عدسی کر

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 معمولا این چیدمان را با درنظر گرفتن نقش اجزای آن می‌توان به‌صورت شکل ۲ مدل کرد.



شکل۲: 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 به‌صورت 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 به‌روش عدسی کر استفاده می‌شود [۷].

$$\frac{\partial A(r,\tau)}{\partial z'}+\frac{j}{2}k_2\frac{\partial^2}{\partial\tau^2}A(r,\tau)=$$
$$\frac{1}{2}(g+\frac{g}{\Delta\omega_{gain}^2}\frac{\partial^2}{\partial\tau^2})A(r,\tau)+$$
$$j\gamma|A|^2A(r,\tau)+qA(r,\tau) \qquad (۱)$$

که در این معادله عبارت اول، تحول دامنه توان کند تغییر A 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 $58 fs^2/mm$ 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

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

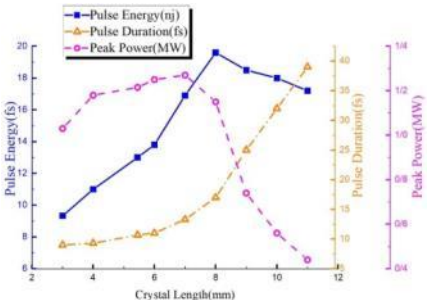
است. از طرفی $g = \frac{g_0}{1+\frac{E_P}{E_S}}$ است که g_0 بهره سیگنال کوچک، E_p انرژی پالس و E_S انرژی اشباع است. معادله (۱) به‌طور کلی حل تحلیلی نداشته و به‌روش عددی حل می شود. در این شبیه سازی یک پالس اولیه ضعیف درون کاواک در نظر گرفته شده و تحولات آن براساس معادله (۱) تا پایدار شدن پالس و همگرا شدن به دامنه مشخص بررسی می‌شود. پارامترهای مفروض در این شبیه سازی در جدول ۱ آمده است.

L_{Cavity}	$L_{short\ arm}$	$L_{Long\ arm}$
180cm	60cm	110cm
$\Delta\omega_{gain}$	F_{Pump}	q_0
270THz	12.5cm	$0.1(mm)^{-1}$

جدول۱: داده های ورودی برای شبیه سازی نوسانگر لیزری تیتانیوم سفایر

نتایج و بحث

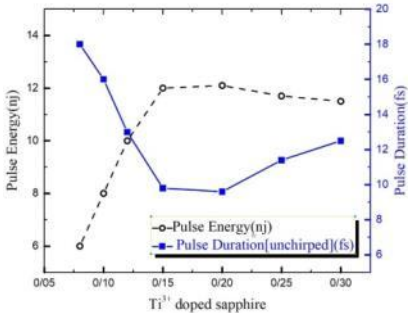
با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی مطابق جدول ۱، $g_0 = 0.15(mm)^{-1}$ و توان پمپ ۵ وات و آینه‌های منحنی کاواک با شعاع انحنای ۱۰ سانتیمتر معادله (۱) به صورت عددی حل شده و مشخصات پالس خروجی کاواک به‌دست می‌آید. برای بررسی اثر طول کریستال لیزری بر پالس خروجی، طول را از ۳ تا ۱۱ میلی‌متر تغییر داده و انرژی،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



شکل۳: 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 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 ۸میلیمتر(برای مقدار آلایش ٪۰/۱۵) انرژی پالس خروجی افزایش می‌یابد و با بلندتر شدن طول کریستال به‌دلیل 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 انرژی های 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 ۴تا ۷ میلیمتر قله توان تقریبا یکسان است.

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



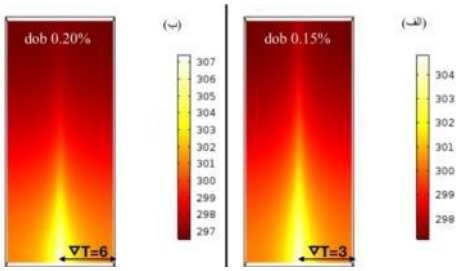
شکل۴: تغییرات انرژی و پهنای زمانی پالس خروجی بر حسب درصد آلایش تیتانیوم

همانطور که از شکل ۴ واضح است انتخاب آلایش ٪۰/۱۵ و ٪۰/۲۰ پالس کوتاه با انرژی بالا را نتیجه می‌دهد. در آلایش های 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 آلایش، شبیه سازی حرارتی برای کریستال ۵ میلیمتری پمپ شده با توان ۵ وات، با آلایش-

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]

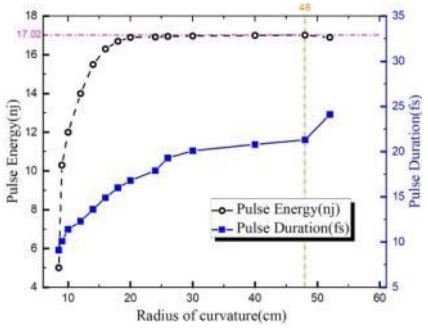
های ۰/۱۵٪ و۰/۲۰٪ انجام شد. در شکل ۵، پروفایل حرارتی یک برش از کریستال لیزری نشان داده شده است.



شکل۵: پروفایل دمایی کریستال تیتانیوم سفایر برای ۱ ثانیه تابش ۵ وات در محیط آزاد. الف: آلایش ۰/۱۵٪ و ب: آلایش ۰/۲۰٪

همانطور که از شکل۵ برمی‌آید گرادیان دمایی برای کریستال با آلایش 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.



شکل۶: 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 ثابت و با افزایش بیشتر شعاع انحنا(۴۸ سانتیمتر)، مقدار انرژی کاهش می‌یابد.

نتیجه گیری

محاسبات نشان می‌دهد که طول کریستال، مقدار آلایش آن و شعاع انحنای آینه‌های تشدیدگر مشخصه‌های موثر در طراحی نوسانگر قفل شده مدی به‌روش 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 Matylitskya, Frank Hendricksa" Industrial femtosecond lasers for micro-machining applicationswith highest quality and efficiency" 9th International Conference onPhotonic Technologies LANE 2016.

[2] Kim S. Frederickson, William E. White, Ronald G. Wheeland, Dennis R. Slaughter" Precise Ablation of Skin With Reduced CollateralDamage Using the Femtosecond-Pulsed, Terawatt Titanium-Sapphire Laser"nUniversity 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-fsecpulse 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

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-04]