



## جبران پاشندگی مرتبه چهارم سیستم تقویت تپ چرپ شده با طراحی بهینه‌ی فشرده‌ساز گریزم

محمد عابدی<sup>۱</sup>، سیدعلی اصغر عسکری<sup>۱</sup>، لاله رحیمی‌نژاد<sup>۱</sup>، سید مهدی موسوی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

<sup>۲</sup> گروه فیزیک، دانشگاه شیراز، ایران

چکیده- یکی از مهم‌ترین مسائل سیستم‌های تقویت تپ‌های لیزری فوق کوتاه فمتوثانیه، بروز اثرات مربوط به پاشندگی‌های مرتبه‌ی بالای کل بر نیم‌رخ زمانی تپ نهایی خروجی از بخش فشرده‌ساز سیستم است. در این مقاله امکان کاهش پاشندگی مرتبه‌ی سوم و چهارم کل سیستم پهن کننده، تقویت کننده و فشرده‌ساز با استفاده از یک سیستم فشرده‌ساز گریزم (ترکیب جفت توری و جفت منشور) بررسی شده است. مقادیر بهینه برای پارامترهای مؤثر در گریزم بر میزان تصحیح ضریب پاشندگی مرتبه‌ی سوم و چهارم یک سیستم نوعی، نظیر زاویه‌ی رأس منشور، فاصله‌ی رأس تا رأس منشورها، با استفاده از الگوریتم ژنتیک محاسبه شده‌اند. نتایج به دست آمده نشان دهنده‌ی کاهش قابل ملاحظه‌ی ضریب پاشندگی مرتبه سوم و چهارم کل سیستم در طراحی بهینه می‌باشند.

کلیدواژه- پاشندگی خطی، پهن کننده‌ی تپ، تپ‌های فوق کوتاه، جبران پاشندگی، فشرده‌ساز گریزم.

## Fourth order dispersion compensation of CPA system by using an optimal designed Grism compressor

M. Abedi<sup>1</sup>, A. A. Askari<sup>1</sup>, L. Rahiminejad<sup>1</sup> and M. Mousavi<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institute of Optics and Laser's Sciences and Technology, Malek-Ashtar university of technology, Isfahan, Iran

<sup>2</sup> Physics department, University of Shiraz, Shiraz, Iran

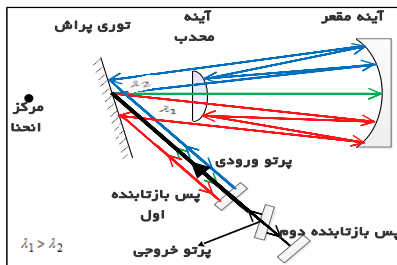
Abstract-Third- and fourth-order dispersions (TOD&FOD) are unavoidable effects in ultra-short chirped pulse amplifier (CPA) systems which can greatly disturb the output pulse shape. Grism- pairs (grating+prism) compressors are currently used for the TOD compensation in CPA systems. In this work the Genetic algorithm optimization method has been used to design an optimal grism-pair compressor with the ability of simultaneous compensation of TOD and FOD of a typical CPA system. Results show a significant reduction in the output pulse peak power by the optimal design of grism-pair compressor.

Keywords: Chirped pulse amplification, Dispersion compensation, Grism, Pulse compression, Ultra-short pulses

## ۱- مقدمه

## ۲- سیستم تقویت کننده‌ی تپ چرپ شده

همان‌طور که در مقدمه بیان گردید، جهت تقویت تپ‌های فمتوثانیه از روش CPA استفاده می‌گردد. این سیستم دارای سه بخش اصلی است که شامل پهن کننده‌ی تپ، محیط تقویت کننده و فشرده ساز است. شکل (۱) یکی از مناسب ترین چیدمان‌های بدون ابیراهی برای بخش پهن کننده موسوم به آرایش آفتر [۶] را به صورت طرح‌واره نشان می‌دهد. سیستم آفتر که در اینجا در نظر گرفته شده است دارای توری با چگالی خط برابر با  $1200 \text{ line/mm}$  و شعاع انحنای آینه‌ی مقعر برابر با  $1024$  میلی‌متر و دو برابر شعاع انحنای آینه‌ی محدب و زاویه‌ی فرود به توری  $38$  درجه است.



شکل ۱: نمایی از سیستم پهن کننده‌ی آفتر.

یکی دیگر از بخش‌های اصلی هر سیستم CPA، بخش فشرده ساز تپ آن است. یکی از متداول ترین سیستم‌های فشرده ساز استفاده از چیدمان جفت توری موازی موسوم به سیستم تریسی [۷] است. در بین بخش پهن کننده و فشرده ساز، محیط تقویت کننده‌ی تپ قرار دارد. بنابراین فاز کل سیستم CPA به صورت مجموع فاز پهن کننده، محیط تقویت کننده و فاز فشرده ساز است:

$$\Phi_{tot} = \Phi_{str} + \Phi_{mat} + \Phi_{com} \quad (1)$$

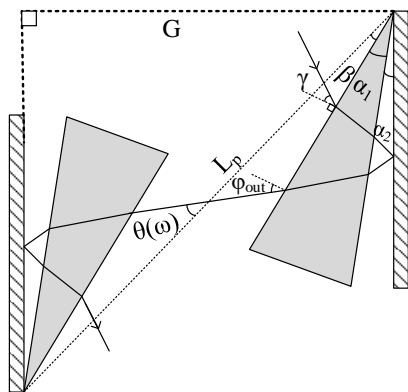
مشتقات مرتبه‌ی دوم به بعد تابع فاز در فرکانس مرکزی تپ را مراتب مختلف پاشندگی می‌نامند که هر یک به گونه‌ای بر نیمرخ زمانی تپ تأثیرگذار هستند. پهن شُدگی تپ نتیجه‌ی پاشندگی مرتبه‌ی دوم یا پاشندگی سرعت گروه (GDD)، است که در صورت مساوی و مختلف‌العلامه بودن پاشندگی مرتبه‌ی دوم سیستم فشرده ساز با مجموع پاشندگی‌های مرتبه‌ی دوم پهن کننده و محیط تقویت کننده، تپ خروجی از CPA همان پهنای زمانی تپ اولیه‌ی ورودی به آن را خواهد داشت. در سیستم جفت توری، جبران پاشندگی

امروزه پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه‌ی تولید و کاربردهای تپ‌های لیزری فمتوثانیه پرتوان، به‌ویژه از مرتبه‌ی پتاوات در حال انجام است. کاربردهای این دسته از لیزرها در زمینه‌ی فیزیک میدان قوی، علم مواد، فیزیک هسته‌ای و پلاسما است [۱]. بروز اثرهای غیرخطی و آسیب به قطعات اپتیکی یکی از مهم ترین چالش‌های پیش روی سیستم‌های تقویت کننده‌ی این دسته از تپ‌ها می‌باشند. تقویت تپ چرپ شده (CPA<sup>۱</sup>) یکی از روش‌های مناسب برای تقویت این تپ‌ها، تا توان‌های قله از مرتبه‌ی تراوات و پتاوات، است [۲]. در این روش تپ‌های لیزری فمتوثانیه قبل از فرآیند تقویت، توسط یک سیستم پهن کننده، از لحاظ زمانی تا مرتبه‌ی پیکوثانیه پهن می‌گردند. تپ پس از عبور از محیط تقویت کننده و افزایش انرژی آن توسط یک سیستم فشرده ساز به پهنای اولیه‌ی خود بازگردانده می‌شود. یکی دیگر از مهم ترین چالش‌های پیش رو در این سیستم‌ها، کنترل پاشندگی‌های کل مرتبه بالا نظیر مرتبه سوم و مرتبه چهارم است. در صورت جبران نشدن این پاشندگی‌ها، تأثیر نامطلوب خود را بر روی شکل زمانی تپ تقویت شده‌ی نهایی نشان می‌دهند. تاکنون روش‌های متعددی برای کنترل پاشندگی مرتبه سوم پیشنهاد شده است [۳]. یکی از کاربردی ترین روش‌ها، تغییر زاویه فرود در فشرده ساز نسبت به زاویه فرود در پهن کننده است که در سال ۱۹۹۷ توسط کین و همکارانش ارائه گردید [۴]. به منظور جبران پاشندگی مرتبه چهارم کل لی و همکارانش در سال ۲۰۱۵ یک روش بر مبنای استفاده از سیستم گریزم (ترکیب جفت توری و منشور) مابین بخش پهن کننده و فشرده ساز و پس از تقویت کننده بیان کردند. این روش، به علت نیاز به یک سیستم گریزم علاوه بر بخش فشرده ساز و پهن کننده، کنترل پارامترهای سیستم را پیچیده تر می‌کند [۵]. در این مقاله یک روش بدیع جهت جبران هم‌زمان پاشندگی مرتبه سوم و چهارم با استفاده از تغییرات جزئی در فشرده سازهای گریزم معمولی به صورت چرخش منشور نسبت به توری پیشنهاد خواهد گردید.

<sup>۱</sup> Chirped Pulse Amplification

### ۳- سیستم فشرده‌ساز گریزم

یکی از سیستم‌هایی که جهت فشرده‌سازی تپ‌ها استفاده می‌گردد، سیستم جفت گریزم است. سیستم جفت گریزم ترکیبی از دو سیستم جفت توری و جفت منشور باقابلیت جبران هم‌زمان پاشندگی مرتبه دوم و سوم است [۸]. در شکل (۳)، شمایی از این سیستم آورده شده است.



شکل ۳: نمایش طرح‌واره از سیستم گریزم بازتابی بهینه‌سازی شده.

در حالت عادی منشور هر گریزم به‌صورت چسبیده به توری قرار داده می‌شود. در این مقاله با استفاده از کج کردن منشور نسبت به سطح توری پراش، یک درجه‌ی آزادی دیگر به سیستم اضافه گردیده است. فاز سیستم گریزم در شکل بالا توسط رابطه‌ی

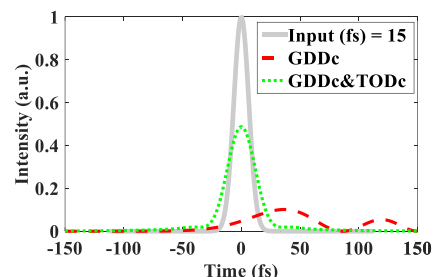
$$\Phi_{Grism}(\omega) = \frac{\omega}{c} L_p \cos(\theta(\omega)) \quad (2)$$

محاسبه می‌گردد [۹]. در رابطه‌ی (۲)،  $\omega$  فرکانس زاویه‌ای،  $c$  سرعت نور در خلأ،  $L_p$  فاصله‌ی رأس تا رأس دو منشور و  $\theta$  زاویه‌ی بین خط واصل رأس‌ها و مسیر باریکه‌ی با فرکانس  $\omega$  بین دو گریزم است که از رابطه‌ی

$$\theta(\omega) = \frac{\pi}{2} - \beta - \varphi_{out}(\omega) \quad (3)$$

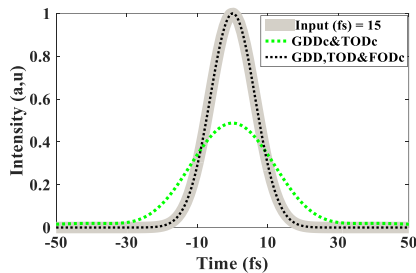
به دست می‌آید. همان‌طور که شکل (۳) نشان می‌دهد،  $\beta$  زاویه‌ی بین خط  $L_p$  و وجه هر منشور و  $\varphi_{out}$  زاویه‌ی خروج باریکه‌ی  $\omega$  از هر منشور است. مقادیر زاویه‌های  $\beta$  و  $\varphi_{out}$  را می‌توان به راحتی، با استفاده چند رابطه‌ی هندسی ساده و نیز بهره‌مندی از قاعده‌ی اسنل و رابطه‌ی توری، برحسب مشخصات سیستم شامل زاویه‌ی رأس منشور، میزان چرخش منشور، ضریب شکست منشور، چگالی خطوط توری

مرتبه دوم تپ خروجی از پهن کننده و تقویت‌کننده با تنظیم فاصله‌ی بین توری‌ها صورت می‌گیرد. با این‌وجود مقداری پاشندگی مرتبه‌ی سوم (TOD) باقی می‌ماند. وجود پاشندگی مرتبه‌ی سوم باقیمانده، زیر تپ‌هایی در دنباله‌ی تپ اصلی به وجود می‌آورد که کیفیت و تباین زمانی تپ خروجی را بسیار کاهش می‌دهند. در نمودار شکل (۲)، نیم‌رخ زمانی یک تپ ۱۵ فمتوثانیه‌ی خروجی از دو سیستم CPA با فشرده‌سازهای تریسی باقابلیت تنها جبران پاشندگی مرتبه دوم و همچنین با قابلیت جبران هم‌زمان پاشندگی مرتبه دوم و سوم شبیه‌سازی و مقایسه شده است. جبران پاشندگی مرتبه‌ی سوم که در این قسمت انجام گرفته است بر مبنای روش مرجع [۴] با افزایش ۱/۵ درجه‌ای زاویه فرود در فشرده‌ساز نسبت به پهن کننده است. محدودیت این روش قابلیت آن در جبران تا پاشندگی مرتبه سوم است. حال آنکه در تپ‌های بسیار کوتاه (زیر ۳۰ فمتوثانیه) پاشندگی مرتبه چهارم (FOD) باقیمانده قادر به اعمال تأثیر قابل توجهی بر توان قله‌ی تپ و کاهش آن است. همان‌طور که شکل (۲) نشان می‌دهد، در صورتی که حتی پاشندگی مرتبه سوم نیز برطرف گردد، برای یک تپ پهن باند ۱۵ فمتوثانیه توان قله‌ی تپ در حدود ۰/۴ مقدار ایده‌آش خواهد بود. در این حالت مقادیر پاشندگی کل برابر با  $\Phi_{tot}^{(3)} = 1.15 \times 10^{-44} \text{s}^3$  و  $\Phi_{tot}^{(2)} = -2.82 \times 10^{-30} \text{s}^2$  و  $\Phi_{tot}^{(4)} = 3.42 \times 10^{-55} \text{s}^4$  می‌گردد. از آنجا که هدف اصلی یک سیستم CPA افزایش توان قله‌ی یک تپ فمتوثانیه است، شکل (۲) به‌وضوح نشان می‌دهد که در صورت کار با تپ‌های با پهنای زمانی بسیار کم، پاشندگی مرتبه چهارم نیز باید جبران گردد. بدین منظور در اینجا استفاده از فشرده‌ساز گریزم بهینه‌سازی شده پیشنهاد گردیده است.



شکل ۲: نیم‌رخ زمانی شدت تپ ۱۵ فمتوثانیه‌ی خروجی از دو سیستم CPA (خط چین قرمز) جبران پاشندگی مرتبه‌ی دوم، (توپر سبز) جبران هم‌زمان پاشندگی مرتبه‌ی دوم و سوم.

کاهش یافته است. تاثیر این مقدار پاشندگی ها همان طور که در شکل ۴ مشخص است موجب می گردد که شکل تپ نهایی به شکل تپ ورودی بسیار نزدیک گردد و هم چنین توان قله‌ی آن نسبت به حالتی که فقط تا پاشندگی مرتبه سوم جبران گردیده است به مقدار ۱ برسد.



شکل ۴: شکل تپ خروجی با جبران تا پاشندگی مرتبه چهارم

## ۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله ایده‌ی طراحی بهینه‌ی بخش جمع‌کننده‌ی سیستم‌های CPA به صورت گریزم با منشور کج شده مطرح و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام داده شده است. نتایج حاصل شده نشان گر امکان جبران هم‌زمان تأثیر پاشندگی مرتبه دوم، سوم و چهارم با استفاده از چنین ساختاری است.

## مراجع

- [1] C. Danson, D. Hillier, N. Hopps, D. Neely, "Petawatt class lasers worldwide", High Power Laser Science and Engineering, Vol. 3, No. 3, pp. 1-14, 2014.
- [2] D. Strickland, G. Mourou, "Compression of amplified chirped optical pulses", Opt. Commun., Vol. 56, pp. 219-221, 1985.
- [3] K. Osvey, K. Varju, G. Kurdi, "High order dispersion control for femtosecond CPA lasers", Applied Physics B, Vol. 89, pp. 565-572, 2007.
- [4] S. Kane, J. Squier, "Fourth-order-dispersion limitations of aberrationfree chirped-pulse amplification systems", J. Opt. Soc. Am. B., Vol. 14, No. 5, pp. 1237-1244, 1997.
- [5] Z. Li, C. Wang, Sh. Li, Y. Xu, L. Chen, Y. Dai, Y. Leng, "Fourth-order dispersion compensation for ultra-high power femtosecond lasers", Optics Communications, Vol. 357, pp. 71-77, 2015.
- [6] G. Cheriaux, B. Walker, L.F. Dimauro, "Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification", Opt. Lett., Vol. 21, pp. 414-416, 1996.
- [7] B. Treacy, "Optical pulse compression with diffraction gratings", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 5, pp. 454-458, 1969.
- [8] S. Kane, J. Squier, "Grism-pair stretcher-compressor system for simultaneous second- and third-order dispersion compensation in chirped-pulse amplification", J. Opt. Soc. Am. B., Vol. 14, No. 3, pp. 661-665, 1997.
- [9] L. Rahimi, A.A. Askari & H. Saghafifar, "Analytical calculation of spectral phase of grism pairs by the geometrical ray tracing method", J. Appl. Phys. B., Vol. 122, No. 7, pp. 195-203, 2016.

و نیز زاویه‌ی فرود پرتو (۷ در شکل (۳)) به دست آورد، شرح کامل محاسبات پرتویابی در سیستم گریزم در مرجع [۹] بیان گردیده است.

## ۴- بهینه‌سازی مشخصات طراحی گریزم

در بخش ۲ با استفاده از جفت توری نشان داده شد که فقط می‌توان تا پاشندگی مرتبه سوم را جبران نمود. در این بخش نشان داده می‌شود که با استفاده از سیستم گریزم شکل ۳ می‌توان به طور هم‌زمان تا پاشندگی مرتبه‌ی چهارم را در سیستم CPA جبران نمود. بهینه‌سازی چنین ساختاری، یک مسئله‌ی چند متغیره شامل زاویه‌ی پرتوی فرودی، زاویه‌ی رأس منشور، زاویه‌ی کج شدگی و فاصله‌ی عمود توری‌هاست. در این کار از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی سیستم استفاده شده است. هدف در اینجا یافتن پارامترهای آزاد مسئله به گونه‌ای است که پاشندگی مرتبه دوم، سوم و چهارم سیستم گریزم با مجموع پاشندگی ناشی از پهن‌کننده و تقویت‌کننده هم‌اندازه و مختلف‌العلامه باشند. بنابراین کمینه‌سازی تابع هدف  $f$  یعنی فاز کل سیستم CPA

$$f = \Phi_{tot}^{(2)} + \Phi_{tot}^{(3)} + \Phi_{tot}^{(4)} \quad (۴)$$

موردنظر است. با اجرای الگوریتم ژنتیک، تحت قیود مناسب برای مسئله از جمله حقیقی بودن پارامترهای به دست‌آورده شده و هم‌چنین جلوگیری از بازتاب کلی داخلی پرتوها در هنگام خروج آن‌ها از منشور به هوا، مشخصات سیستم بهینه به دست آورده شدند. در شکل (۴)، تپ خروجی از سیستم CPA نوعی شامل فشرده‌ساز گریزم طراحی‌شده‌ی بهینه، باقابلیت جبران پاشندگی مرتبه چهارم، نشان داده شده است. مشخصات سیستم بهینه به صورت: زاویه‌ی فرود ۱۹/۹۳ درجه، زاویه رأس منشور ۲۵/۵ درجه، زاویه کج شدگی منشور ۱/۴۸ درجه، فاصله‌ی عمود توری‌ها ۹۳۴/۶ میلی‌متر و فاصله‌ی رأس تا رأس منشورها ۹۸۰/۳ میلی‌متر است. جنس منشورها از شیشه BK7 و توری‌ها در مشابهت با پهن‌کننده ۱۲۰۰ line/mm در نظر گرفته شده‌اند. در نتیجه مقادیر پاشندگی کل سیستم در این حالت برابر با  $\Phi_{tot}^{(3)} = -1.30 \times 10^{-30} \text{ s}^2$ ،  $\Phi_{tot}^{(2)} = 4.82 \times 10^{-30} \text{ s}^2$  و  $\Phi_{tot}^{(4)} = 4.23 \times 10^{-59} \text{ s}^4$  می‌گردد، که مشاهده می‌گردد پاشندگی مرتبه چهارم نسبت به حالت بخش ۲ که فقط تا پاشندگی مرتبه سوم جبران گردیده بود، تا ۴ مرتبه