بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

جبران پاشندگی مرتبه چهارم سیستم تقویت تپ چرپ‌شده با طراحی بهینه‌ی فشرده‌ساز گریزم

محمد عابدی[۱]، سیدعلی‌اصغر عسکری[۱]، لاله رحیمی‌نژاد[۱]، سید مهدی موسوی[۲]

[۱]پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، اصفهان، ایران

[۲]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، تقویت‌کننده و فشرده‌ساز با استفاده از یک سیستم فشرده‌ساز گریزم (ترکیب جفت توری و جفت منشور) بررسی‌شده 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 محاسبه‌شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده‌ی کاهش قابل‌ملاحظه‌ی ضریب پاشندگی مرتبه سوم و چهارم کل سیستم در طراحی بهینه می‌باشند.

کلید واژه- 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[1], A. A. Askari[1], L. Rahiminejad[1] and M. Mousavi[2]

[1] Institute of Optics and Laser's Sciences and Technology, Malek-Ashtar university of technology, Isfahan, Iran

[2] 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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-08]

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

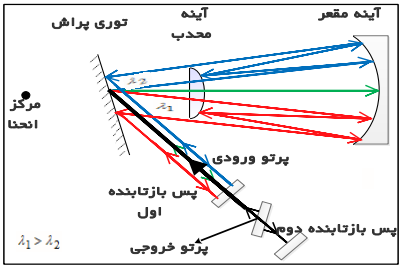
۱- مقدمه

امروزه پژوهش‌های گسترده‌ای درزمینه‌ی تولید و کاربردهای تپ‌های لیزری فمتوثانیه پرتوان، به‌ویژه از مرتبه‌ی پتاوات در حال انجام است. کاربردهای این دسته از لیزرها درزمینه‌ی فیزیک میدان قوی، علم مواد، فیزیک هسته‌ای و پلاسما است [۱]. بروز اثرهای غیرخطی و آسیب به قطعات اپتیکی یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی سیستم‌های تقویت‌کننده‌ی این دسته از تپ‌ها می‌باشند. تقویت تپ چرپ‌شده (CPA[۱]) 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، ازلحاظ زمانی تا مرتبه‌ی پیکوثانیه پهن می‌گردند. تپ پس از عبور از محیط تقویت‌کننده و افزایش انرژی آن توسط یک سیستم فشرده‌ساز به پهنای اولیه‌ی خود بازگردانده می‌شود. یکی دیگر از مهم‌ترین 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 تقویت‌شده‌ی نهایی نشان می‌دهند. تاکنون روش‌های متعددی برای کنترل پاشندگی مرتبه سوم پیشنهادشده است [۳]. یکی از کاربردی‌ترین روش‌ها، تغییر زاویه فرود در فشرده‌ساز نسبت به زاویه فرود در پهن کننده است که در سال ۱۹۹۷ توسط کِین و همکارانش ارائه گردید [۴]. به‌منظور جبران پاشندگی مرتبه چهارم کل لی و همکارانش در سال ۲۰۱۵ یک روش برمبنای استفاده از سیستم گریزم (ترکیب جفت توری و منشور) مابین بخش پهن کننده و فشرده‌ساز و پس از تقویت‌کننده بیان کردند. این روش، به علت نیاز به یک سیستم گریزم علاوه بر بخش فشرده‌ساز و پهن کننده، کنترل پارامترهای سیستم را پیچیده‌تر می‌کند [۵]. در این مقاله یک روش بدیع جهت جبران هم‌زمان پاشندگی مرتبه سوم و چهارم با استفاده از تغییرات جزئی در فشرده‌سازهای گریزم معمولی به‌صورت چرخش منشور نسبت به توری پیشنهاد خواهد گردید.

[۱] Chirped Pulse Amplification

۲- سیستم تقویت‌کننده‌ی تپ چِرپ 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 تقویت‌کننده و فشرده‌ساز است. شکل (۱) یکی از مناسب‌ترین چیدمان‌های بدون ابیراهی برای بخش پهن کننده موسوم به آرایش آفنر [۶] را به‌صورت طرحواره نشان می‌دهد. سیستم آفنر که در اینجا در نظر گرفته‌شده است دارای توری با چگالی خط برابر با ۱۲۰۰ line/mm و شعاع انحنای آیینه‌ی مقعر برابر با ۱۰۲۴ میلی‌متر و دو برابر شعاع انحنای آیینه‌ی محدب و زاویه‌ی فرود به توری ۳۸ درجه است.



شکل ۱: نمایی از سیستم پهن کننده‌ی آفنر.

یکی دیگر از بخش‌های اصلی هر سیستم CPA، بخش فشرده‌ساز تپ آن است. یکی از متداول‌ترین سیستم‌های فشرده‌ساز استفاده از چیدمان جفت توری موازی موسوم به سیستم تریسی [۷] است. در بین بخش پهن کننده و فشرده‌ساز، محیط تقویت‌کننده‌ی تپ قرار دارد. بنابراین فاز کل سیستم CPA به‌صورت مجموع فاز پهن کننده، محیط تقویت‌کننده و فاز فشرده‌ساز است:

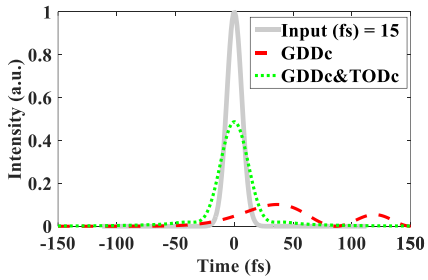
$$\Phi_{tot} = \Phi_{str} + \Phi_{mat} + \Phi_{com} \qquad (۱)$$

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

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-08]

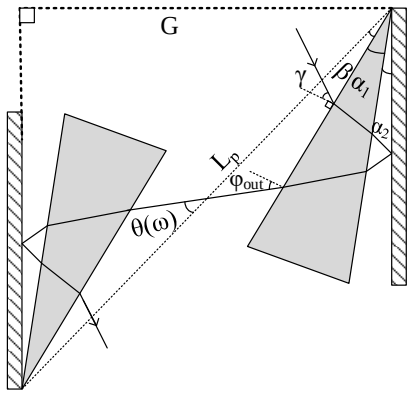
مرتبه دوم تپ خروجی از پهن کننده و تقویت‌کننده با تنظیم فاصله‌ی بین توری‌ها صورت می‌گیرد. با این‌وجود مقداری پاشندگی مرتبه‌ی سوم (TOD) باقی می‌ماند. وجود پاشندگی مرتبه‌ی سوم باقیمانده، زیر تپ‌هایی در دنباله‌ی تپ اصلی به وجود می‌آورد که کیفیت و تباین زمانی تپ خروجی را بسیار کاهش می‌دهند. در نمودار شکل (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 انجام‌گرفته 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. حال‌آنکه در تپ‌های بسیار کوتاه (زیر ۳۰ فمتوثانیه) پاشندگی مرتبه چهارم (FOD) باقیمانده قادر به اعمال تأثیر قابل‌توجهی بر توان قله‌ی تپ و کاهش آن است. همان‌طور که شکل (۲) نشان می‌دهد، درصورتی‌که حتی پاشندگی مرتبه سوم نیز برطرف گردد، برای یک تپ پهن باندِ ۱۵ فمتوثانیه توان قله‌ی تپ در حدود ۰/۴ مقدار ایده‌آلش خواهد بود. در این حالت مقادیر پاشندگی کل برابر با $\Phi_{tot}^{(2)}=-2.82\times10^{-30}s^2$، $\Phi_{tot}^{(3)}=1.15\times10^{-44}s^3$ و $\Phi_{tot}^{(4)}=3.42\times10^{-55}s^4$ می گردد. 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 با (خط‌چین قرمز) جبران پاشندگی مرتبه‌ی دوم، (توپر سبز) جبران هم‌زمان پاشندگی مرتبه‌ی دوم و سوم.

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.



شکل۳: 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

$$\Phi_{Grism}(\omega)=\frac{\omega}{c}L_p\cos(\theta(\omega)) \qquad (۲)$$

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

$$\theta(\omega)=\frac{\pi}{2}-\beta-\varphi_{out}(\omega) \qquad (۳)$$

به دست می‌آید. همان‌طور که شکل (۳) نشان می‌دهد، β زاویه‌ی بین خط L_p و وجه هر منشور و φ_{out} زاویه‌ی خروج باریکه‌ی ω از هر منشور است. مقادیر زاویه‌های β و φ_{out} را می‌توان به‌راحتی، 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

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-08]

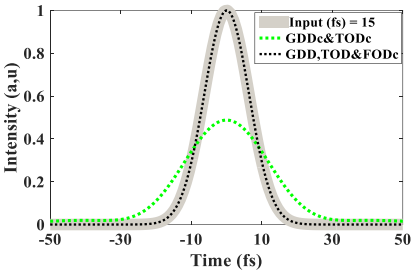
و نیز زاویه‌ی فرود پرتو (γ در شکل (۳)) به‌دست آورد، شرح کامل محاسبات پرتویابی در سیستم گریزم در مرجع [۹] بیان گریده است.

۴- بهینه‌سازی مشخصات طراحی گریزم

در بخش ۲ با استفاده ازجفت 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 می توان 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 استفاده‌شده است. هدف در اینجا یافتن پارامترهای آزاد مسئله به‌گونه‌ای 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

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

موردنظر است. با اجرای الگوریتم ژنتیک، تحت قیود مناسب برای مسئله از جمله حقیقی بودن پارامترهای به دست‌آورده‌شده و هم‌چنین جلوگیری از بازتاب کلی داخلی پرتوها در هنگام خروج آن ها 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 داده‌شده است. مشخصات سیستم بهینه به‌صورت: 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 نظرگرفته شده‌اند. در نتیجه مقادیر پاشندگی کل سیستم در این حالت برابر با $\Phi_{tot}^{(2)}= 4.82\times10^{-30}s^2$، $\Phi_{tot}^{(3)}= -1.30\times10^{-44}s^3$ و $\Phi_{tot}^{(4)}= 4.23\times10^{-59}\ s^4$ می گردد، که مشاهده می گردد پاشندگی مرتبه چهارم نسبت به حالت بخش ۲ که فقط تا پاشندگی مرتبه سوم جبران گریده بود، تا ۴ مرتبه کاهش یافته است. تاثیر این مقدار پاشندگی ها همان طور که 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 به‌صورت گریزم با منشور کج شده مطرح و بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک انجام داده‌شده است. نتایج حاصل‌شده نشان‌گر 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. Osvay, 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, LF. 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.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-01-08]