

بهینه‌سازی پاشندگی مرتبه‌ی سوم کل سیستم پهن‌کننده-فشرده‌ساز تپ‌های لیزری فوق‌کوتاه به روش وردشی

محمد عابدی^۱، علی‌اصغر عسکری^۱، لاله رحیمی نژاد^۱ و حسین ثقفی فر^۱

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

چکیده - یکی از مهم‌ترین مسائل سیستم‌های تقویت تپ‌های لیزری بسیار کوتاه تصحیح اثرات مربوط به پاشندگی‌های مرتبه‌ی بالای بخش پهن‌کننده بر نیم‌رخ زمانی تپ نهایی خروجی از بخش فشرده‌ساز سیستم است. در این مقاله امکان کاهش پاشندگی مرتبه‌ی سوم کل سیستم پهن‌کننده-فشرده‌ساز با افزودن یک تیغه‌ی شیشه‌ای به بخش فشرده‌ساز بررسی شده است. مقادیر بهینه برای پارامترهای مؤثر تیغه بر میزان تصحیح ضریب پاشندگی مرتبه‌ی سوم یک سیستم نوعی، نظیر ضخامت و زاویه‌ی قرارگیری تیغه، با استفاده از روش وردشی محاسبه شده‌اند. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده‌ی کاهش قابل‌ملاحظه‌ی ضریب پاشندگی مرتبه سوم کل سیستم در طراحی بهینه می‌باشند.

کلیدواژه- پاشندگی خطی، پهن‌کننده‌ی تپ، تپ‌های فوق‌کوتاه، جبران پاشندگی، فشرده‌ساز تپ.

Optimization of the total third order dispersion of a stretcher-compressor system for ultra-short laser pulses by variational method

Mohammad Abedi¹, Ali Asghar Askary¹, Lale Rahim¹ and Hossein Saghaififar¹

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

Abstract- Third order dispersion (TOD) is an unavoidable effect in ultra-short chirped pulse amplifier (CPA) systems which can greatly disturb the output pulse shape. A glass slab with the aim of reduction of TOD was located inside the compressor unit and its parameters such as thickness and angle of the slab, gained through the variational optimization method. It is shown that the significant reduction in third-order dispersion on the output pulse can be obtained in the optimal design.

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

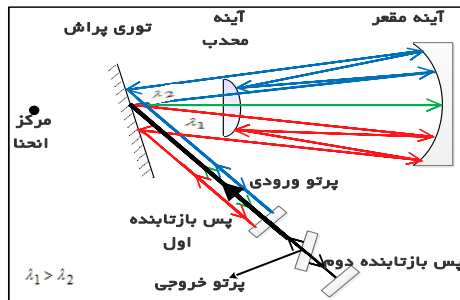
۱- مقدمه

امروزه تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تولید و کاربردهای تپ‌های لیزری فوق کوتاه (از مرتبه فمتوثانیه) پرانرژی انجام می‌گیرد. بروز اثرهای غیرخطی و آسیب به قطعات اپتیکی یکی از مهم‌ترین چالش‌های پیش روی سیستم‌های تقویت‌کننده این دسته از تپ‌ها می‌باشند. تقویت تپ چرپ شده (CPA)^۱ یکی از روش‌های مناسب تقویت این تپ‌ها تا توان‌های قله از مرتبه تراوات و پتاوات، می‌باشد [۱]. در این روش تپ‌های لیزری فمتوثانیه قبل از فرآیند تقویت، توسط یک سیستم پهن کننده، از لحاظ زمانی تا مرتبه پیکو و یا نانوثانیه پهن می‌گردند. مجدداً تپ پس از تقویت توسط یک سیستم فشرده‌ساز به پهنای اولیه خود بازگردانده می‌شود. سیستم پهن کننده و فشرده‌ساز به گونه‌ای طراحی می‌گردند تا پاشندگی‌های مرتبه دوم مختلف علامه داشته باشند و سیستم فشرده‌ساز بتواند تپ‌های پهن شده را فشرده کند. در این بین یکی از مسائل مهم، کنترل پاشندگی‌های مرتبه بالاتر کل سیستم و از همه مهم‌تر پاشندگی مرتبه سوم هست. در صورت جبران نشدن این پاشندگی، تأثیر نامطلوب خود را بر روی شکل زمانی تپ تقویت‌شده‌ی نهایی نشان می‌دهد. تاکنون روش‌های متعددی برای کنترل پاشندگی مرتبه سوم پیشنهاد شده است [۲ و ۳]. در این مقاله، با قرار دادن یک تیغه شیشه‌ای درون سیستم فشرده‌ساز، نشان داده خواهد شد که پاشندگی مرتبه سوم باقیمانده‌ی کل سیستم پهن کننده-فشرده ساز تا حد زیادی کاهش داده می‌شود. همچنین مقادیر بهینه‌ی مشخصه‌های مهم تیغه نظیر ضخامت و زاویه قرارگیری آن جهت کاهش هرچه بیش‌تر میزان پاشندگی مرتبه سوم، توسط روش بهینه‌سازی وردشی به دست آورده خواهند شد.

۲- سیستم پهن کننده و فشرده‌ساز تپ

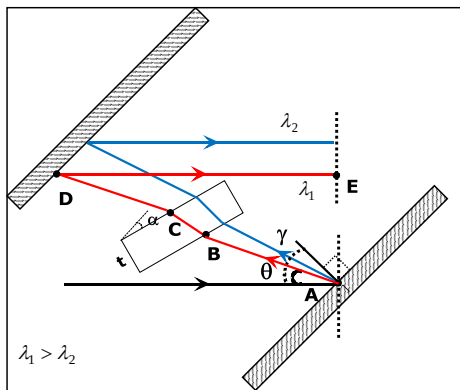
همان‌طور که در مقدمه بیان گردید، یکی از بخش‌های هر سیستم CPA، بخش پهن کننده آن است. شکل (۱) یکی از مناسب‌ترین چیدمان‌های بخش پهن کننده موسوم به آرایش آفتر [۴] را به صورت طرح‌واره نشان می‌دهد. این

چیدمان به علت استفاده از عناصر بازتابی، شامل یک آینه‌ی مقعر با شعاع انحنای دو برابر یک آینه‌ی محدب با چیدمان هم‌مرکز، دارای ابیراهی بسیار کمی می‌باشد.



شکل (۱): نمایی از سیستم پهن کننده آفتر

یکی دیگر از بخش‌های اصلی هر سیستم CPA، بخش فشرده‌ساز تپ آن می‌باشد. یکی از متداول‌ترین سیستم‌های فشرده‌ساز استفاده از چیدمان جفت توری موازی موسوم به سیستم تریسی [۵] می‌باشد. شکل (۲) سیستم جفت توری موازی با افزودن یک تیغه را نمایش می‌دهد که در این مقاله باهدف کاهش پاشندگی مرتبه سوم کل طراحی و بهینه‌سازی شده است.



شکل (۲): سیستم فشرده‌ساز تپ جفت توری با تیغه

فاز کل سیستم جفت توری به همراه تیغه توسط رابطه‌ی (۱) به دست می‌آید.

$$\Phi(\omega) = \omega \frac{p}{c} + R(\omega) \quad (1)$$

که در آن، p ، طول مسیر فیزیکی طی شده توسط پرتو، ω ، فرکانس زاویه‌ای و c سرعت نور می‌باشد. $R(\omega)$ ، جمله‌ی تصحیحی است که برای تعریف یک فاز سازگار برای سیستم جفت توری لازم می‌باشد. طول مسیر فیزیکی طی شده توسط پرتو، برابر با رابطه‌ی (۲) است:

$$p = \overline{AB} + n(\omega)\overline{BC} + \overline{CD} + \overline{DE} \quad (2)$$

¹ Chirped Pulse Amplification

برطرف کردن این زیر تپ‌ها، در لیزرهای پرتوان فموتونانی‌های فوق کوتاه و افزایش کیفیت تپ خروجی از سیستم دارای اهمیت زیادی هست.

۳- بهینه‌سازی سیستم به روش وردشی

یکی از دقیق‌ترین روش‌های پیدا کردن نقاط بهینه در یک مسئله استفاده از روش وردشی [۶] است. مسئله اصلی در اینجا پیدا کردن مقادیر ضخامت و زاویه قرارگیری تیغه و همچنین فاصله‌ی جفت توری است، به گونه‌ای که علاوه بر جبران پاشندگی مرتبه‌ی دوم سیستم پهن‌کننده، پاشندگی مرتبه سوم کل سیستم هم کمینه شود. در روش وردشی لازم است که ابتدا یک تابع هدف مناسب برای مسئله تعریف شود که در طی فرایند بهینه‌سازی نقطه‌ی کمینه‌ی آن تعیین می‌شود. در این مسئله تابع هدف به صورت رابطه‌ی (۹) می‌باشد

$$f = (\Phi_{str}^{(3)} + \Phi_{com}^{(3)})^2 \quad (9)$$

که لازم است تحت قیود مناسب کمینه گردد. روابط (۱۰) تا (۱۳) قیدهای حاکم بر مسئله را نشان می‌دهند. رابطه‌ی (۱۰)، تابع هدف را مقید می‌کند تا پاشندگی کل مرتبه دوم پهن کننده-فشرده‌ساز برابر با صفر باشد.

$$g_1(G, \alpha, t) = \Phi_{str}^{(2)} + \Phi_{com}^{(2)} = 0 \quad (10)$$

رابطه‌های (۱۱) و (۱۲) تابع هدف را مقید می‌کنند تا ضخامت تیغه (t) از یک مقدار حداکثر قابل قبول (t_{max}) کمتر و مثبت باشد.

$$g_2(t, q) = t_{max} - t - q^2 = 0 \quad (11)$$

$$g_3(t, o) = t - o^2 = 0 \quad (12)$$

رابطه‌ی (۱۳)، قیدی برای مثبت بودن مقدار G است.

$$g_4(G, m) = G - m^2 = 0 \quad (13)$$

با ترکیب تابع هدف اصلی و قیدهای مسئله یک تابع هدف تعمیم‌یافته، J تعریف می‌شود، معادله (۱۴):

$$J(G, \alpha, t, q, o, m, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4) = f + \lambda_1 g_1 + \lambda_2 g_2 + \lambda_3 g_3 + \lambda_4 g_4 \quad (14)$$

که با کمی دست ورزی ریاضی و هندسی، مقدار p با توجه به شکل (۲)، طبق رابطه‌ی (۳) به دست می‌آید.

$$p = \frac{1}{\cos(\gamma - \theta)} \left(G - t \frac{\cos(\theta_r - \alpha)}{\cos(\theta_r)} + G \cos(\theta) - t \sin(\gamma) \frac{\sin(\theta_i - \theta_r)}{\cos(\theta_r)} \right) + n(\omega) \frac{t}{\cos(\theta_r)} \quad (3)$$

و جمله‌ی تصحیحی نیز، به صورت 2π برابر تعداد خطوط توری که بین نقطه‌ی D و پای عمود از نقطه‌ی A به توری دوم قرار گرفته‌اند، از رابطه‌ی (۴)، به دست می‌آید:

$$R(\omega) = -\frac{2\pi}{d} (G \tan(\gamma - \theta) - t \frac{\sin(\theta_i - \theta_r)}{\cos(\theta_r) \cos(\gamma - \theta)}) \quad (4)$$

که در آن‌ها:

$$\theta_r = \arcsin\left(\frac{\sin(\theta_i)}{n(\omega)}\right) \quad (5)$$

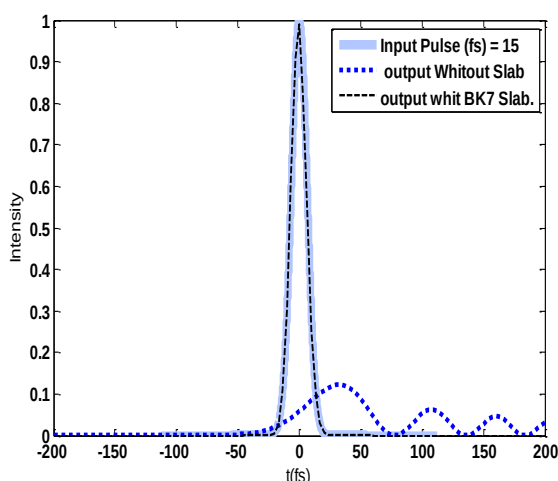
$$\theta_i = (\gamma - \theta) + \alpha \quad (6)$$

در روابط (۳) تا (۶)، G فاصله‌ی عمود بین دو توری، γ زاویه فرود پرتو نسبت به خط عمود بر توری، θ زاویه‌ی بین پرتو فرودی و پراشیده، t ضخامت تیغه، θ_r زاویه‌ی شکست پرتو داخل تیغه، θ_i زاویه فرود پرتو به تیغه، α زاویه قرارگیری تیغه نسبت به سطح توری (در جهت ساعت‌گرد مثبت)، d فاصله‌ی بین خطوط توری و $n(\omega)$ ضریب شکست وابسته به فرکانس تیغه‌ی شیشه‌ای است. در سیستم‌های پهن کننده-فشرده‌ساز، فاز کل سیستم به صورت مجموع فاز پهن کننده و فاز فشرده‌ساز است:

$$\Phi_{tot} = \Phi_{str} + \Phi_{com} \quad (7)$$

$$\Phi_{tot}^{(n)} = \Phi_{str}^{(n)} + \Phi_{com}^{(n)} \quad (8)$$

در سیستم جفت توری، فاصله‌ی بین توری‌ها به گونه‌ای محاسبه می‌گردند که پاشندگی مرتبه دوم تپ خروجی از پهن کننده جبران شود و تپ به پهنای اولیه برگردد. ولی مقداری پاشندگی مرتبه‌ی سوم باقی می‌ماند که بر روی شکل تپ تأثیر می‌گذارد و مشاهده می‌گردد که زیر تپ‌هایی در دنباله‌ی تپ اصلی به وجود می‌آیند که کیفیت و تباین زمانی تپ خروجی را کاهش می‌دهند.



شکل (۳): شکل تپ خروجی ۱۵ فمتوثانیه با تیغه BK7، و بدون تیغه

۵- نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا سیستم پهن کننده-فشرده ساز تپ‌های لیزری فوق کوتاه بررسی گردید، سپس فاز کل سیستم جفت توری فشرده‌ساز شامل یک تیغه‌ی شیشه‌ای به دست آورده شد. همچنین طراحی بهینه‌ی فشرده‌ساز باهدف کاهش پاشندگی مرتبه‌ی سوم کل سیستم با استفاده از روش وردشی صورت گرفت. محاسبات بهینه‌سازی برای یک سیستم نوعی با یک تیغه‌ی شیشه‌ای از جنس BK7 انجام شد. نتایج به‌دست‌آمده نشان می‌دهد که با انتخاب مناسب پارامترهایی نظیر ضخامت و زاویه تیغه‌ی شیشه‌ای و فاصله‌ی بین جفت توری می‌توان مقدار پاشندگی مرتبه سوم کل سیستم را تا حد زیادی کاهش و کیفیت تپ نهایی را افزایش داد.

مراجع

- [1] Strickland, D., Mourou, G., Compression of amplified chirped optical pulses, Opt. Commun., Vol. 56, pp. 219-221, 1985.
- [2] Osvay, K., Varju, K., Kurdi, G., High order dispersion control for femtosecond CPA lasers, Applied Physics B, Vol. 89, pp. 565-572, 2007
- [3] Osvay, K., Mero, M., Borzsonyi, A., Kovacs, A.P., Kalashnikov, M.P., Spectral phase shift and residual angular dispersion of an acousto-optic programmable dispersive filter, Vol. 107, pp. 125-130, 2012
- [4] Cheriaux, G., Walker, B., Dimauro, L.F., Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification, Opt. Lett., Vol. 21, pp. 414-416, 1996.
- [5] Treacy, B., Optical pulse compression with diffraction gratings, IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 5, pp. 454-458, 1969.
- [6] M. Lundstrom, MATHEMATICAL METHODS FOR PHYSICISTS, chap. 22, Elsevier Press, 2013.

در معادله‌ی بالا پارامترهای λ_1 تا λ_4 ضرایب نامعین لاگرانژ نام دارند. با مساوی صفر قرار دادن تغییرات کل تابع J ، معادلات حاکم بر حالت بهینه به دست می‌آیند:

$$\delta J(G, \alpha, t, q, o, m, \lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4) = 0 \quad (15)$$

طبق رابطه‌ی بالا و قیود (۱۰) تا (۱۳)، یک دستگاه معادلات غیرخطی به‌صورت (۱۶) به دست خواهد آمد:

$$\begin{cases} \frac{\partial f}{\partial G} + \lambda_1 \frac{\partial \Phi_{com}^{(2)}}{\partial G} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial \alpha} + \lambda_1 \frac{\partial \Phi_{com}^{(2)}}{\partial \alpha} = 0 \\ \frac{\partial f}{\partial t} + \lambda_1 \frac{\partial \Phi_{com}^{(2)}}{\partial t} = 0 \\ \Phi_{str}^{(2)} + \Phi_{com}^{(2)} = 0 \\ t_{max} - t - q^2 = 0 \\ t - o^2 = 0 \\ G - m^2 = 0 \end{cases} \quad (16)$$

دستگاه معادله‌ی (۱۶)، نقاط کمینه‌ی مطلق تابع هدف f تحت قیود تعریف‌شده بر مسئله و یا به عبارتی مقادیر بهینه‌ی ضخامت تیغه، زاویه‌ی تیغه و فاصله‌ی عمودی توری‌ها به دست خواهند آمد.

۴- نتایج

با حل دستگاه معادلات (۱۶)، به روش عددی، برای یک تیغه‌ی شیشه‌ای از جنس BK7 که بین جفت توری قرار گرفته است، با پارامترهای معلوم $d=1200$ line/mm، $\gamma=38^\circ$ ، $\phi_{str}^{(3)}=-5.1057 \times 10^{-39} \text{ s}^3$ ، $\lambda=800$ nm، طول موج، $G=0.9987$ m، $\alpha=42^\circ$ و $t=50$ mm که پاشندگی مرتبه سوم کل سیستم را کاهش می‌دهد، به دست آورده شدند. در شکل (۳)، تأثیر پاشندگی مرتبه سوم بر شکل تپ خروجی در دو حالت بدون تیغه که فقط پاشندگی مرتبه دوم جبران گردیده است، و با تیغه که در آن، هر دو پاشندگی مرتبه دوم و مرتبه سوم جبران شده‌اند، نمایش داده شده است. مشاهده می‌گردد در اثر وجود تیغه پاشندگی مرتبه سوم بسیار کاهش می‌یابد و شکل تپ خروجی بسیار شبیه تپ ورودی است.