بیست و یکمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و هفتمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۲۳ تا ۲۵ دی ماه ۱۳۹۳، دانشگاه شهید بهشتی

طراحی پهن‌کننده دوبار عبور لیزر فمتوثانیه با چرپ‌شدگی فضایی و واگرایی طیفی کم بر اساس پیکربندی آفنر

لاله رحیمی‌نژاد و سید علی‌اصغر عسکری

پژوهشکده اپتیک و لیزر، دانشگاه صنعتی مالک‌اشتر، شاهین‌شهر، اصفهان

چکیده - در این مقاله نتایج حاصل از طراحی یک سیستم پهن‌کننده‌ی آفنر دوبار عبور با پهنای عبور *nm* ۵۰ و قدرت افزایش پهنای پالس *fs* ۵۰ به *ps* ۷۵۰ ارائه شده است. روش ردیابی پرتو برای محاسبه‌ی ابعاد و بررسی چگونگی چیدمان قطعات سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات انجام گرفته در این کار نشان‌دهنده‌ی امکان بهبود کیفیت پالس خروجی تنها با ایجاد تغییر کوچکی در پیکربندی می‌باشند. در نتیجه بهترین چیدمان با کمترین چرپ‌شدگی فضایی و واگرایی طیفی ارائه گردیده است.

کلید واژه- پهن‌کننده‌ی آفنر، روش ردیابی پرتو، چرپ‌شدگی فضایی، واگرایی طیفی.

A Double-pass femtosecond Offner Stretcher Design with Minimized Spatial Chirping and Spectral Divergence

Lale Rahimi, and Ali Asghar Askari

Optics & laser research center, University institute of applied science, Malek-Ashtar university of technology, Isfahan, Iran

Abstract- In this paper we describe the design of a double-pass Offner stretcher with 50 nm bandpass which stretches a 50 fs pulse to 750 ps. Optical elements dimensions and the system design have been analyzed by using ray tracing method. The results of our investigation show that the output pulse quality can easily be improved by making a little change in design. The best design, with minimum spatial chirping and spectral divergence, has been found.

Keywords: Offner stretcher, Ray tracing method, Spatial chirping, Spectral divergence.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

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

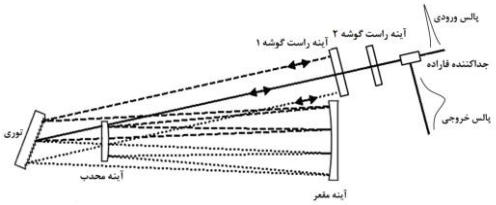
۱- مقدمه

تحقیقات نظری و تجربی مربوط به پالس‌های لیزری فوق‌کوتاه (۱ ps-۱۰ fs) یکی از زمینه‌های بسیار گسترده و کاربردی علم اپتیک می‌باشد. در اغلب مطالعات اپتیک فوق سریع به استفاده از پالس‌های کم‌عرض تقویت‌شده تا سطح انرژی‌های بسیار بالا (با توان‌های قله‌ی مرتبه‌ی ترا و یا حتی پتاوات) احتیاج می‌باشد. درحالی‌که این سطح بالای انرژی می‌تواند منجر به آسیب‌دیدگی قطعات اپتیکی تقویت‌کننده و نیز بروز آثار غیرخطی در آن گردد. برای حل این مشکل از تکنیک تقویت پالس چرپ‌شده استفاده می‌شود [۱]. بدین‌ترتیب که ابتدا پهنای زمانی پالس لیزر را با استفاده از یک سیستم پاشنده (بخش پهن‌کننده) افزایش داده و سپس پالس پهن‌شده را به قسمت تقویت‌کننده هدایت می‌کنند. درنهایت پهنای زمانی پالس تقویت‌شده با عبور از یک سیستم پاشنده‌ی دیگر (بخش جمع‌کننده) به مقدار اولیه بازگردانده می‌شود. لازمه‌ی این روش استفاده از دو سیستم پاشنده با ضرایب چرپ‌شدگی مختلف‌العلامه می‌باشد. پیکربندی‌های مارتینز [۱] و آفنر [۳]، با ضرایب چرپ شدگی مثبت، و پیکربندی تریسی [۴]، با ضریب چرپ‌شدگی منفی، به‌ترتیب چیدمان‌های متعارف مورد استفاده در پهن‌کننده و جمع‌کننده می‌باشند. در تمامی این پیکربندی‌ها از توری به‌عنوان یک عنصر پاشنده‌ی بسیار موثر استفاده می‌شود. در چیدمان مارتینز توری را به همراه یک عدسی محدب و یک آینه‌ی تخت و در پیکربندی آفنر آن را با دو آینه‌ی کروی محدب و مقعر مورد استفاده قرار می‌دهند. استفاده از المان‌های بازتابشی سبب کاهش ابیراهی و نیز تلفات انرژی درسیستم آفنر نسبت به چیدمان مارتینز می‌گردد. بنابراین سیستم آفنر انتخاب مناسب‌تری برای دستیابی به یک پالس پهن‌شده با ضریب پهن‌شدگی بزرگ و نیز کیفیت بالا می‌باشد. جز چند سیستم ساده، مطالعه‌ی کاملاً تحلیلی اغلب سیستم‌های پاشنده (از جمله سیستم آفنر) امکان‌پذیر نمی‌باشد. به همین دلیل بررسی‌ها غالباً با استفاده از روش عددی ردیابی پرتو صورت می‌گیرد [۵].

در این مقاله نتایج حاصل از طراحی یک پهن‌کننده‌ی آفنر دوبار عبور آورده شده است. طراحی انجام شده مربوط به یک پهن‌کننده‌ی پالس ۵۰ fs و با ضریب پهن‌کنندگی ۱۵۰۰۰ می‌باشد. ضریب پهن‌کنندگی سیستم با استفاده از روش ردیابی پرتو محاسبه شده است. علاوه بر ضریب پهن‌کنندگی مورد نظر، پهنای عبور پهن‌کننده و کیفیت پالس خروجی (از لحاظ چرپ‌شدگی فضایی و واگرایی طیفی) نیز از پارامترهای مورد توجه در این کار بوده‌اند. همچنین نتایج ارائه شده شامل اندازه‌ی هریک از قطعات سیستم نیز می‌باشد که امکان برپایی عملی سیستم از لحاظ ابعاد و هزینه را معین می‌کند.

۲- اصول طراحی

شکل ۱ نمای جانبی ساختار کلی یک پهن‌کننده‌ی آفنر دوبار عبور را به‌صورت طرح‌وار نشان می‌دهد.



شکل ۱: نمای جانبی پهن‌کننده‌ی آفنر دوبار عبور.

حذف آینه‌ی راست‌گوشه‌ی ۲ چیدمان شکل ۱ را به پهن‌کننده‌ی یک‌بار عبور تبدیل و ضریب پهن‌کنندگی آن را نصف خواهد کرد. بالعکس با قرار دادن آینه‌های راست‌گوشه‌ی دیگر در مسیر پرتو خروجی می‌توان ضریب پهن‌شدگی را به چندین برابر رساند. البته باید توجه داشت که هربار برخورد پالس لیزر به توری به معنی از دست رفتن درصد قابل توجهی از انرژی آن می‌باشد، که با توجه به انرژی پایین پالس ورودی به پهن‌کننده (از مرتبه‌ی نانوژول) عامل محدودکننده‌ای خواهد بود. به عنوان مثال در یک سیستم دوبار عبور هشت مرتبه برخورد پالس به سطح توری و، با فرض راندمان معمول ۹۰ درصد برای توری، بیش از ۳۵ درصد تلفات انرژی پالس را خواهیم داشت. به همین دلیل در این کار به طراحی یک سیستم دوبار عبور پرداخته شده است.

در شکل ۱ خط پیوسته مسیر پالس ورودی و خروجی و خطوط خط‌چین و نقطه‌چین به‌ترتیب مسیر بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین طول‌موج موجود در پالس پهن‌شده (λ_1 و λ_2) را نشان می‌دهند. اختلاف بین دو طول‌موج λ_1 و λ_2 کمیت بسیار مهمی است که پهنای عبور پهن‌کننده نامیده می‌شود. کمیت‌های موثر در پهنای عبور قطر آینه‌ی مقعر، ابعاد آینه‌ی محدب ،ابعاد توری، فاصله‌ی خطوط توری، زاویه‌ی فرود بر توری و نیز فاصله‌ی توری تا آینه‌ی مقعر

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

می‌باشند. انتخاب یک پهنای عبور کوچک موجب حذف بخش قابل توجهی از پهنای فرکانسی پالس لیزر توسط پهن‌کننده و انتخاب مقدار بزرگ آن باعث افزایش بی‌دلیل ابعاد و نیز هزینه‌ی تمام‌شده‌ی سیستم خواهد شد. بنابراین علاوه بر ضریب پهن‌کنندگی موردنظر، پهنای عبور مناسب نیز کمیتی است که باید در فرایند طراحی سیستم پهن‌کننده مورد توجه قرار گیرد.

در این مقاله ورودی پهن‌کننده به‌صورت یک پالس گاوسی با تابیدگی:

$$I_{in}(t) = I_{0in}\, e^{-2a_{in}t^2} \qquad (۱)$$

درنظر گرفته شده است. پهنای زمانی پالس ورودی (FWHM) برابر با $\tau_{in} = \sqrt{2\ln 2 / a_{in}}$ می‌باشد. به‌سادگی می‌توان نشان داد که پالس خروجی از پهن‌کننده یک پالس گاوسی چرپ شده به‌صورت:

$$I_{out}(t) = I_{0out}\, e^{-2(a_{out} - ib_{out})t^2} \qquad (۲)$$

خواهد بود [۶] که a_{out} از معادله‌ی:

$$a_{out} = \frac{a_{in}}{1 + (2a_{in}\psi''(\omega_0))^2} \qquad (۳)$$

و از آن پهنای زمانی پالس خروجی، $\tau_{out} = \sqrt{2\ln 2 / a_{out}}$، به‌دست آورده می‌شود. در معادله‌ی (۳) $\psi''(\omega_0)$ مقدار مشتق دوم تابع تغییرفاز ایجاد شده در فرکانس ω توسط پهن‌کننده ($\psi(\omega)$) در فرکانس مرکزی ω_0 می‌باشد. ضریب چرپ‌شدگی پالس خروجی از سیستم آفنر (b_{out} در معادله‌ی (۳)) مقدار مثبتی خواهد بود که از رابطه‌ی:

$$b_{out} = \frac{2a_{in}^2\psi''(\omega_0)}{1 + (2a_{in}\psi''(\omega_0))^2} \qquad (۴)$$

محاسبه می‌شود. همان‌طور که معادلات (۳) و (۴) نشان می‌دهند، برای دانستن پهنا و نیز ضریب چرپ‌شدگی پالس خروجی از یک پهن‌کننده به محاسبه‌ی تابع $\psi(\omega)$ نیاز داریم. اگر $p(\omega)$ طول راه طی شده توسط فرکانس ω از یک نقطه روی مسیر ورودی تا همان نقطه به هنگام خروج از سیستم باشد، تغییر فاز $\psi(\omega)$ به‌صورت:

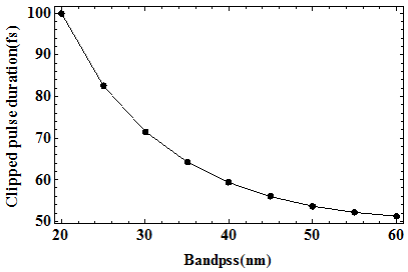
$$\psi(\omega) = \frac{\omega p(\omega)}{c} - \frac{2\pi G}{d}\tan\theta(\omega) \qquad (۵)$$

خواهد بود. جمله‌ی دوم معادله‌ی (۵) تصحیحی است که به‌دلیل تغییر فاز حاصل از پراکندگی از سطح توری وارد رابطه‌ی $\psi(\omega)$ شده است [۴]. در معادله‌ی (۵) G و $\theta(\omega)$ به‌ترتیب فاصله‌ی عمود توری با تصویرش و زاویه‌ی پراش مرتبه‌ی اول فرکانس‌های مختلف نسبت به خط عمود بر توری می‌باشند. تابع $p(\omega)$ را می‌توان با استفاده از رابطه‌ی پراش توری و قواعد بازتابش از سطح آینه‌ها محاسبه نمود [۵].

کیفیت پالس پهن شده مشخصه‌ی مهم دیگری است که باید در طراحی مورد توجه قرار گیرد. وجود ابیراهی، هرچند جزئی، در پهن‌کننده‌ی آفنر باعث جدایی مسیر خروج فرکانس‌های مختلف موجود در پالس پهن‌شده و اصطلاحاً چرپ‌شدگی فضایی آن می‌گردد. همچنین با انتشار پالس خروجی فاصله‌ی این مسیرهای متفاوت به‌تدریج افزایش می‌یابد که به آن واگرایی طیفی پهن‌کننده می‌گویند.

۳- نتایج طراحی

در این کار به طراحی سیستم آفنر برای پهن کردن یک پالس فوق‌کوتاه گاوسی با پهنای زمانی ۵۰ fs و طول‌موج مرکزی ۸۰۰ nm پرداخته شده است. شکل (۲) میزان افزایش پهنای زمانی پالس در اثر حذف بخشی از فرکانس‌های آن توسط پهن‌کننده را به ازاء مقادیر مختلف پهنای عبور نشان می‌دهد.



شکل ۲: پهنای زمانی پالس خروجی به‌صورت تابعی از پهنای عبور.

همان‌طور که در شکل ۲ می‌بینیم، با افزایش پهنای عبورِ سیستم اندازه‌ی بخش بریده شده‌ی طیف کوچک‌تر شده و پالس خروجی سالم‌تر می‌ماند. در طراحی انجام شده پهنای عبور برابر با ۵۰ nm در نظر گرفته شده است که همان‌طور که شکل ۲ نشان می‌دهد، منجر به افزایش پهنای پالس از ۵۰ fs به ۵۳/۵ fs خواهد شد. به‌عبارت دیگر در بهترین شرایط حداکثر پهنای ۵۳/۵ fs در جمع‌کننده قابل حصول خواهد بود.

جدول ۱ مقادیر حاصل از طراحی نهایی سیستم را برای

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]

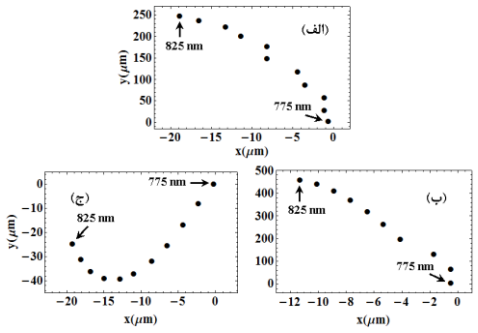
کمیت‌های مختلف نشان می‌دهد.

جدول ۱: مقادیر کمیت‌های مختلف در طراحی نهایی پهن‌کننده‌ی آفنر دوبار عبور.

کمیت	مقدار
شعاع انحناء آینه‌ی مقعر	۱۵۰۰ mm
فاصله‌ی توری و آینه‌ی مقعر	۸۵۰ mm
زاویه‌ی فرود نسبت به خط عمود بر توری	42^{o}
چگالی خطوط توری	۱۴۸۰ line/mm
ابعاد توری	$(۱۹ \times ۱۰)\ cm^2$
قطر آینه‌ی مقعر	۲۰ cm
ابعاد آینه‌ی محدب	$(۱۰ \times ۲)\ cm^2$

به منظور کاهش ابیراهی شعاع انحناء آینه‌ی محدب (R) را نصف شعاع انحناء آینه‌ی مقعر و فاصله‌ی دو آینه را برابر با R در نظر می‌گیرند. درحالی‌که تمامی کمیت‌های نمایش داده شده در جدول ۱ در اندازه‌ی پهنای عبور سیستم موثر هستند، اندازه‌ی قطعات (سه سطر انتهای جدول) بر قدرت پهن‌کنندگی سیستم تاثیری ندارند. ضریب پهن‌کنندگی سیستم با استفاده از به روش ردیابی پرتو محاسبه شده و برابر با مقدار موردنظر ۱۵۰۰۰ (معادل با افزایش پهنای fs ۵۰ به ps ۷۵۰) می‌باشد.

همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، چرپ‌شدگی فضایی یکی از پدیده‌های مهم کاهنده‌ی کیفیت پالس خروجی می‌باشد. در شکل ۳ چرپ‌شدگی فضایی پهن‌کننده‌ی یک‌بار عبور در مقایسه با دو چیدمان اندکی متفاوتِ پهن‌کننده‌ی دوبار نمایش داده شده است. در این شکل صفحه‌ی xy صفحه‌ای عمود بر مسیر خروج فرکانس مرکزی (ω_0) می‌باشد.



شکل ۳: چرپ‌شدگی فضایی حاصل از ردیابی پرتو فرکانس‌های مختلف در پهن‌کننده‌ی (الف) یک‌بار عبور (ب) دوبار عبور با آینه‌های راست‌گوشه‌ی موازی (ج) دوبار عبور با آینه‌های راست‌گوشه‌ی متعامد.

همان‌طور که شکل ۳ (الف) نشان می‌دهد، هر بار عبور از پهن‌کننده موجب تفاوت مسیر فرکانس‌ها در خروجی می‌گردد، به‌طوری‌که بیشترین اختلاف مسیر را در راستای عمود بر مسیر خروجی (محور y) شاهد خواهیم بود.

بنابراین چرپ‌شدگی فضایی در این راستا کاهش خواهد یافت، اگر آینه‌ی راست‌گوشه‌ی ۲ را به‌نحوی در دوبار عبور کردن سیستم به‌کار ببریم که فرکانس‌های جابه‌جا شده به سمت پایین را به بالا و فرکانس‌های منحرف شده به سمت بالا را به پایین برگرداند. بنابراین لازم است که محور آینه‌ی راست‌گوشه ۲ در راستای محور x (عمود بر محور آینه‌ی راست‌گوشه‌ی ۱) قرار گیرد. شکل ۳ (ب) افزایش تقریباً دوبرابری چرپ‌شدگی فضایی در راستای محور y را در چیدمانی با دو آینه‌ی راست‌گوشه‌ی موازی (شکل ۱)، و شکل ۳ (ج) تخفیف این مشکل را در یک پیکربندی با آینه‌های راست‌گوشه‌ی متعامد نشان می‌دهد.

مطالعات مربوط به واگرایی طیفی نیز حکایت از برتری قابل ملاحظه‌ی چیدمان متناظر با آینه‌های راست‌گوشه‌ی متعامد نسبت به پیکربندی شکل ۱ دارد. بطوری‌که با متعامد قرار دادن دو آینه‌ی راست‌گوشه واگرایی طیفی از ۰/۷میلی رادیان به ۰/۰۳۶ میلی رادیان کاهش می‌یابد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله نتایج حاصل از طراحی یک پهن‌کننده‌ی آفنر دوبار عبور پالس fs ۵۰ با ضریب پهن‌کنندگی ۱۵۰۰۰ و پهنای عبور nm ۵۰ ارائه شده است. نتایج طراحی شامل ابعاد و مشخصه‌های تمامی قطعات و همچنین نحوه‌ی چینش سیستم می‌باشند. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که تنها با به‌کار بستن یک تکنیک ساده در چیدمان و متعامد قرار دادن دو آینه‌ی راست‌گوشه می‌توان میزان چرپ‌شدگی فضایی و نیز واگرایی طیفی را تا حد قابل توجهی کاهش داد.

مراجع

[1] Backus S., Durfee C. D., Murnane M. M., Kapteyn H. C., *High power ultrafast lasers*, **Rev. Sci. Instrum.** 69 (1998) 1207-1223.

[2] Martinez O. E., Gordon J. P., Fork R. L., *Negative group-velocity dispersion using refraction*, **J. Opt. Soc. Am. A** 1 (1984) 1003-1006.

[3] Cheriaux G., Rousseau P., Salin F., Chambaret J. P., Walker B., *Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification*, **Opt. Lett.** 21 (1996) 414-416.

[4] Treacy B., *Optical pulse compression with diffraction gratings*, **J. Quantum Electron.** 5 (1969) 454-458.

[5] Jiang J., Zhang Z., Hasama T., *Evaluation of chirped-pulse-amplification systems with Offner triplet telescope stretchers*, **J. Opt. Soc. Am. B** 19 (2002) 678-683.

[6] Siegman A. E., *Lasers*, p. 344, University Science Books, 1987.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-01]