

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، شاهین شهر، اصفهان

چکیده – در این مقاله نتایج حاصل از طراحی یک سیستم پهنکنندهی آفنر دوبار عبور با پهنای عبور mn ۵۰ و قدرت افزایش پهنای پالس fs به ۷۵۰ به 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.

۱– مقدمه

تحقیقات نظری و تجربی مربوط به پالسهای لیزری فوق کوتاه (۱ ps-۱۰ fs) یکی از زمینه های بسیار گسترده و کاربردی علم اپتیک میباشد. در اغلب مطالعات اپتیک فوق سريع به استفاده از پالسهاي كمعرض تقويتشده تا سطح انرژیهای بسیار بالا (با توانهای قلهی مرتبهی ترا و یا حتی پتاوات) احتیاج می باشد. در حالی که این سطح بالای انرژی میتواند منجر به آسیبدیدگی قطعات اپتیکی تقویت کننده و نیز بروز آثار غیرخطی در آن گردد. برای حل این مشکل از تکنیک تقویت پالس چرپشده استفاده می شود [۱]. بدین تر تیب که ابتدا پهنای زمانی پالس لیزر را با استفاده از یک سیستم پاشنده (بخش پهن کننده) افزایش داده و سیس پالس پهنشده را به قسمت تقویت کننده هدایت می کنند. درنهایت پهنای زمانی پالس تقویتشده با عبور از یک سیستم پاشندهی دیگر (بخش جمع کننده) به مقدار اولیه بازگردانده می شود. لازمه ی این روش استفاده از دو سیستم پاشنده با ضرایب چرپشدگی مختلف العلامه می باشد. پیکربندی های مارتینز [۱] و آفنر [۳]، با ضرایب چرپ شدگی مثبت، و پیکربندی تریسی [۴]، با ضریب چرپشدگی منفی، بهترتیب چیدمانهای متعارف مورد استفاده در پهن کننده و جمع کننده 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 مناسب تری برای دستیابی به یک پالس پهنشده با ضریب پهنشدگی بزرگ و نیز كيفيت بالا مىباشد. جز چند سيستم ساده، مطالعهى کاملاً تحلیلی اغلب سیستمهای پاشنده (از جمله سیستم آفنر) امکانپذیر نمیباشد. به همین دلیل بررسیها غالباً با استفاده از روش عددی ردیابی پرتو صورت می گیرد [۵]. در این مقاله نتایج حاصل از طراحی یک پهنکنندهی آفنر دوبار عبور آورده شده است. طراحی انجام شده مربوط به یک پهنکننده ی پالس fs و با ضریب پهنکنندگی ۱۵۰۰۰ میباشد. ضریب یهن کنندگی سیستم با استفاده

از روش ردیابی پرتو محاسبه شده است. علاوه بر ضریب پهن کنندگی مورد نظر، پهنای عبور پهن کننده و کیفیت پالس خروجی (از لحاظ چرپ شدگی فضایی و واگرایی طیفی) نیز از پارامترهای مورد توجه در این کار بودهاند. همچنین نتایج ارائه شده شامل اندازهی هریک از قطعات سیستم نیز می باشد که امکان برپایی عملی سیستم از لحاظ ابعاد و هزینه را معین می کند.

## ۲- اصول طراحی

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

بالس ورودی جداکنده فاراده بالس غروبی ا

شکل ۱: نمای جانبی پهن کنندهی آفنر دوبار عبور.

حذف آینه راست گوشه ۲ چیدمان شکل ۱ را به پهن کننده ی یکبار عبور تبدیل و ضریب پهن کنند گی آن را نصف خواهد کرد. بالعکس با قرار دادن آینه های پهن شد گی 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 پهن کننده (از عنوان مثال در یک سیستم دوبار عبور هشت مرتبه برخورد پالس به سطح توری و، با فرض راندمان معمول بالس را خواهیم داشت. به همین دلیل در این کار به طراحی یک سیستم دوبار عبور است کار به

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 ( $\Lambda e \ 2 \wedge$ ) را نشان میدهند. اختلاف بین دو طولموج  $\Lambda e \ 2 \wedge$ 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

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 پهن کننده به صورت یک پالس گاوسی با تابیدگی:

$$I_{in}(t) = I_{0in} e^{-2a_{in}t^2}$$
(1)

درنظر گرفته شده است. پهنای زمانی پالس ورودی (FWHM) برابر با 
$$au_{in} = \sqrt{2 \ln 2 / a_{in}}$$
 میباشد. به سادگی می توان نشان داد که پالس خروجی از پهن کننده یک پالس گاوسی چرپ شده به صورت:

$$I_{out}(t) = I_{0out} e^{-2(a_{out} - ib_{out})t^2}$$
(Y)

خواهد بود [۶] که  $a_{out}$  از معادلهی:

$$a_{out} = \frac{a_{in}}{1 + (2a_{in}\psi^{"}(\omega_{0}))^{2}}$$
(٣)

و از آن پهنای زمانی پالس خروجی ،  $\tau_{out} = \sqrt{2 \ln 2 / a_{out}}$  ، بهدست آورده می شود. در معادلهی (۳) (۳) س مقدار معدایت آورده می شود. در معادلهی (۳) (۳) می مقدار مشتق دوم تابع تغییرفاز ایجاد شده در فرکانس ۳ موسط پهن کننده ((۳)) در فرکانس مرکزی  $\omega_0$  می باشد.  $b_{out} = \varphi(w)$  از سیستم آفنر (اسلهی:  $b_{out} = \frac{2a_{in}^2\psi(\omega_0)}{1+(2a_{in}\psi(\omega_0))^2}$  (۴)

محاسبه می شود. همان طور که معادلات (۳) و (۴) نشان می دهند، برای دانستن پهنا و نیز ضریب چرپ شدگی پالس خروجی از یک پهن کننده به محاسبه یتابع (۵) $\psi$ نیاز داریم. اگر ( $\omega$ ) طول راه طی شده توسط فر کانس  $\omega$ از یک نقطه روی مسیر ورودی تا همان نقطه به هنگام خروج از سیستم باشد، تغییر فاز ( $\omega$ ) به صورت:

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

خواهد بود. جملهی دوم معادلهی (۵) تصحیحی است که

بهدلیل تغییر فاز حاصل از پراکندگی از سطح توری وارد راطهی ( $\omega$ )  $\psi$  شده است [ $\Phi$ ]. در معادلهی ( $\Delta$ )  $\theta$  و  $\theta(\omega)$  بهترتیب فاصلهی عمود توری با تصویرش و زاویهی پراش مرتبهی اول فرکانسهای مختلف نسبت به خط عمود بر توری میباشند. تابع ( $\omega$ )  $\eta$  را میتوان با استفاده از رابطهی پراش توری و قواعد بازتابش از سطح آینهها محاسبه نمود [ $\Delta$ ].

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 اسطلاحاً 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 فوق کوتاه گاوسی با پهنای زمانی fs ۵۰ و طول موج مرکزی ۸۰۰ nm پرداخته شده است. شکل (۲) میزان افزایش پهنای زمانی پالس در اثر حذف بخشی از فرکانسهای آن توسط پهن کننده را به ازاء مقادیر مختلف پهنای عبور نشان میدهد.



شکل ۲: پهنای زمانی پالس خروجی به صورت تابعی از پهنای عبور. همان طور که در شکل ۲ می بینیم، با افزایش پهنای عبور سیستم اندازهی بخش بریده شدهی طیف کوچک تر شده و پالس خروجی سالم تر می ماند. در طراحی انجام شده پهنای عبور برابر با ۸۰ nm در نظر گرفته شده است که ، همان طور که شکل ۲ نشان می دهد، منجر به افزایش پهنای پالس از ۲۵ به ۵۶ ۵۳/۵ خواهد شد. به عبارت دیگر در بهترین شرایط حداکثر پهنای ۲۵ ۵۳/۵ در جمع کننده قابل حصول خواهد بود.

جدول ۱ مقادیر حاصل از طراحی نهایی سیستم را برای

#### کمیتهای مختلف نشان میدهد.

	فنر دوبار غبور.
مقدار	كميت
۱۵۰۰ mm	شعاع انحناء آينهي مقعر
۸۵۰ mm	فاصلهی توری و آینهی مقعر
۴۲ <sup>0</sup>	زاویهی فرود نسبت به خط عمود بر توری
۱۴۸۰ line/mm	چگالی خطوط توری
$(19 \times 1)$ cm <sup>2</sup>	ابعاد تورى
۲۰ cm	قطر آینهی مقعر
$(1 \cdot \times 7) \text{ cm}^2$	ابعاد آینهی محدب

جدول ۱: مقادیر کمیتهای مختلف در طراحی نهایی پهنکنندهی آفنه دمار عبور.

(R) 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 می گیرند. درحالی که تمامی کمیتهای نمایش داده شده در جدول ۱ در اندازهی پهنای عبور سیستم موثر هستند، اندازهی قطعات (سه سطر انتهای جدول) بر قدرت پهن کنندگی سیستم تاثیری ندارند. ضریب پهن کنندگی سیستم با استفاده از به روش ردیابی پرتو محاسبه شده و برابر با مقدار موردنظر ۱۵۰۰۰ (معادل با افزایش پهنای fs ۵۰ به ۷۵۰ (معادل با افزایش پهنای fs

رامیان با ارزیمان پهتای دا شبه دو سب کیبست. همان طور که قبلاً نیز گفته شد، چرپ شدگی فضایی یکی از پدیده های مهم کاهنده یکیفیت پالس خروجی میباشد. در شکل ۳ چرپ شدگی فضایی پهن کننده ی یک بار عبور در مقایسه با دو چیدمان اندکی متفاوت یک بار عبور در مقایسه با دو چیدمان اندکی متفاوت یک بار عبور در مقایسه با دو چیدمان اندکی متفاوت محاد می مسیر خروج فرکانس مرکزی ( $(0_0)$  می باشد.



شکل ۳: چرپشدگی فضایی حاصل از ردیابی پرتو فرکانسهای مختلف در پهنکنندهی (الف) یک بار عبور (ب) دوبار عبور با آینههای راست گوشهی موازی (ج) دوبار عبور با آینههای راست گوشهی متعامد. همان طور که شکل ۳ (الف) نشان می دهد، هر بار عبور از پهنکننده موجب تفاوت مسیر فرکانس ها در خروجی

می گردد، به طوری که 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 به کار ببریم که فرکانس های جابه جا 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 آینه یراست گوشه ی موازی (شکل ۱)، و شکل ۳ (ج) تخفیف این مشکل را در یک ییکربندی با آینههای راستگوشهی متعامد نشان میدهد. مطالعات مربوط به واگرایی طیفی نیز حکایت از برتری قابل ملاحظهی چیدمان متناظر با آینههای راست گوشهی متعامد نسبت به پیکربندی شکل ۱ دارد. بطوریکه با متعامد قرار دادن دو آینهی راست گوشه واگرایی طیفی از ۷/۰میلی رادیان به ۰/۰۳۶ میلی رادیان کاهش می یابد.

#### ۴- نتیجهگیری

در این مقاله نتایج حاصل از طراحی یک پهنکنندهی آفنر دوبار عبور پالس fs ۵۰ با ضریب پهنکنندگی ۱۵۰۰۰ و پهنای عبور ۵۰ ما 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 راست گوشه میتوان میزان چرپشدگی فضایی و نیز واگرایی طیفی را تا حد قابل توجهی کاهش داد.

#### مراجع

- 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 groupvelocity 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 ultrashortpulse 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 chirpedpulse-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.