بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

# طراحی پهن‌کننده ۸ بار عبور با محاسبه پاشندگی پهن‌کننده به روش ردیابی پرتو

زهرا رجب لو، سمیه نجفی، فاضل جهانگیری و رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

**چکیده- در این مقاله پاشندگی ناشی از سیستم پهن‌کننده تمام بازتابنده Offner را با استفاده از روش ردیابی پرتو محاسبه کرده و چگونگی تنظیم پارامترها برای دستیابی به فاکتور پاشندگی موردنظر و کاهش ابیراهی را بررسی می‌کنیم. مبتنی بر نتایج محاسبات، پارامترهای لازم به منظور دستیابی به فاکتور پهن‌شدگی ۸۰۰۰ برای یک پالس 100fs به دست می‌آید.**

کلید واژه- ابیراهی، پهن‌کننده، پاشندگی، چیرپ، ردیابی پرتو

# Design of 8 pass stretcher by calculating the dispersion of stretcher with ray-tracing model

Z.Rjabloo, S.Najafi, F.jahangiri, R.massudi

Laser and plasma research institute, University of Shahid beheshti, Evin, Tehran

Abstract- In this paper, dispersion effect in an Offner all-reflective stretcher is calculated through ray tracing. To obtain the desired dispersion factor and reduce the aberration of system, the optimum parameters are investigated. Based on calculations, parameters required for a stretching factor of 8000 for 100fs laser input pulses is proposed.

Keywords: Aberration, stretcher, dispersion, chirp, ray- tracing

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]

## ۱- مقدمه

امروزه پالس‌های فوق‌کوتاه، حوزه گسترده‌ای از تحقیقات اپتیکی و لیزری در زمینه ثبت فرایندهای سریع فیزیکی و شیمیایی، بررسی و انجام فرایندهای غیرخطی با قدرت تفکیک مکانی و زمانی بالا و همچنین گستره وسیعی از کاربردها را در پزشکی و صنعت به خود اختصاص داده است. از مهمترین محدودیت‌های تقویت این پالس‌ها، تخریب محیط فعال در حین تقویت به‌دلیل قله شدت بالا می‌باشد. روش معمول برای رفع این مشکل روش تقویت پالس‌های چیرپ[1] (CPA) می‌باشد. در این روش پس از ایجاد چیرپ مثبت در پالس و افزایش پهنای زمانی (کاهش قله شدت) آن، پالس را تقویت نموده و پس از تقویت با حذف چیرپ پالس، پهنای زمانی آن را کاهش می‌دهند. در سیستم CPA معمولاً برای پهن‌کردن[2] زمانی پالس‌ها، از یک تاخیرانداز زمانی خطی مثبت، شامل یک جفت توری پراش که نسبت به سیستم‌های دیگر پاشندگی زاویه‌ای بالایی دارند و با تلسکوپ ۱/۱ از هم جدا شده است، استفاده می‌شود [1]. در میان طرح‌های مختلف پهن‌کردن پالس، طرح Offner تک توری، که به پهن‌کننده بدون ابیراهی نیز معروف است، مزایای متعددی در پهن‌کردن پالس‌های کمتر از 100fs دارد. از جمله این مزایا می‌توان به ابیراهی ناچیز، استفاده از یک توری، تنظیم پذیری آسان و نیاز به فضای کمتر اشاره کرد. در این مقاله به بررسی پاشندگی ناشی از این سیستم پهن-کننده به روش ردیابی پرتو [2-3] می‌پردازیم. از آنجا که اکثر چیدمان‌های موجود، چهار بار عبور بوده و برای پالس‌های کمتر از 50fs طراحی شده‌اند، در این مقاله، چگونگی تنظیم پارامترها برای کاهش ابیراهی‌ها و دستیابی به فاکتور پاشندگی بالاتر به منظور افزایش پهنای زمانی پالس 100fs با ۸ عبور را بررسی می‌کنیم. اهمیت این مساله از آن جهت است که هر چه پهنای زمانی پالس بیشتر باشد، امکان تقویت پالس تا انرژی‌های بالاتری فراهم خواهد شد.

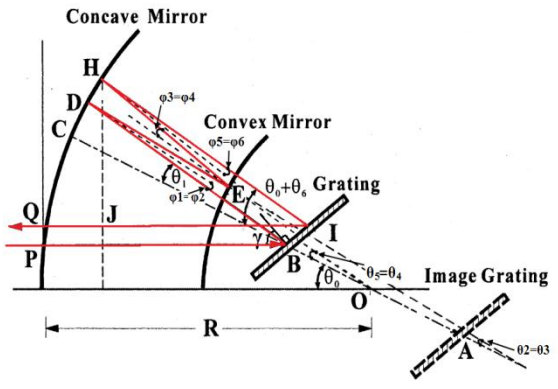
## ۲- تئوری

این طراحی ترکیب سه تایی دو آینه هم‌مرکز کروی و یک توری بازتابی است. آینه اول مقعر و دیگری محدب به نسبت شعاعی ۱/۲ می‌باشند. ارزیابی مبتنی بر ردیابی پرتو برای تمام طول موج‌های طیف نشان می‌دهد که پهن‌کننده Offner همیشه بدون ابیراهی نیست و این ابیراهی باعث ایجاد پاشندگی‌های مرتبه بالاتر و در نتیجه تاثیرگذاری بر عملکرد سیستم CPA می‌باشد.

این سیستم همان‌طور که در شکل ۱ نشان‌داده‌شده‌است، دارای یک محور ثابت با زاویه $\theta_0$ با خط افقی مرجع می‌باشد. این زاویه، اختلاف بین زوایای فرودی و پراش در طول موج مرکزی است. برای یک باریکه دلخواه، زاویه پراش توسط توری که زاویه $\theta_1$ را با محور سیستم می‌سازد، برابر با $\gamma-\theta = \gamma-(\theta_0+\theta_1)$ خواهد بود.

باریکه با عبور از نقطه P با زاویه $\gamma$ در نقطه B وارد سیستم شده و پس از پراشیده شدن، بین دو آیینه کروی محدود و مسیر PB+BD+DE+EH+HI را طی می‌کند، سپس برای بار دوم از توری با زاویه $\theta_0$ پراشیده و از نقطه Q خارج می‌شود (تمام طول موج‌ها با زاویه ای مشابه با زاویه فرودی و به‌صورت موازی با باریکه فرودی خارج می‌شوند). کل مسیر را می‌توان به صورت زیر با روش ردیابی پرتو محاسبه کرد.

$$X = PB + BD + DE + EH + HI + IQ \qquad (۱)$$




شکل۱-ردیابی پهن‌کننده تمام بازتابنده Offner که مسیر PB , BD , DE , EH , HI , IQ را با زاویه فرودی $\gamma$ طی می کند. محور سیستم با خط افق زاویه $\theta_0$ می سازد.

[1] Chirped Pulse Amplification
[2] Stretched



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]

بنابراین کل مسیر طی شده به‌صورت X = C + A – D به‌دست می‌آید، که:

$$C = 2R - (R - s_1)\cos\theta_0 \qquad (۲)$$

$$A = R\,[\sin(\theta_1 - \varphi_1)\left(\frac{1}{\sin\theta_1} + \frac{1}{\sin\theta_2}\right) - \frac{1}{2}\sin(\theta_3 + \varphi_3)\left(\frac{1}{\sin\theta_3} + \frac{1}{\sin\theta_4}\right) + \sin(\theta_5 - \varphi_5)\left(\frac{1}{\sin\theta_5} + \frac{1}{\sin\theta_6}\right)] + \mathrm{R}\,\frac{\sin\varphi_6}{\sin\theta_6}\cos\theta_0$$

$$D = b[1 + \cos(\theta_0 + \theta_6)].$$

که b فاصله عمودی توری تا تصویرش، $s_1$ و $s_6$ فاصله عمودی توری و تصویرش تا آینه مقعر می‌باشد. A در واقع مقدار ابیراهی آینه‌های کروی و D مسیر اپتیکی‌ای است که تعیین کننده تاخیر گروه پهن‌کننده می‌باشد. معادلات بالا نشان می‌دهد که این طراحی، زمانی بدون ابیراهی خواهد بود که توری در مرکز انحنا آینه‌ها قرار گیرد. از طرفی طراحی این سیستم باید به‌گونه‌ای باشد که توری حتماً خارج از مرکز آینه‌ها قرار گیرد تا طول موج‌های متفاوت دارای اختلاف مسیر باشند. بنابراین هرچه توری به آینه‌ها نزدیکتر شود همراه با افزایش طول مسیر، ابیراهی نیز افزایش خواهد یافت و برای دست یابی همزمان به فاکتور پهن‌شدگی بالا و ابیراهی پائین باید توری را در محل مناسب قرار داد.

بنابراین می‌توان فاز کلی پهن‌کننده را با در نظر گرفتن ترم فاز تصحیحی توری به‌صورت زیر به‌دست آورد[4]:

(۳)

$$\varphi_s = \frac{\omega}{c}X + \frac{2\pi[(s_6 - s_1)\cos(\gamma - \theta_0)]}{d}[\tan(\gamma - \theta_0 - \theta_6) - \tan(\gamma - \theta_0)] + \frac{2\pi[(2R - 2s_1)\cos(\gamma - \theta_0)]}{d}\tan(\gamma - \theta_0)$$

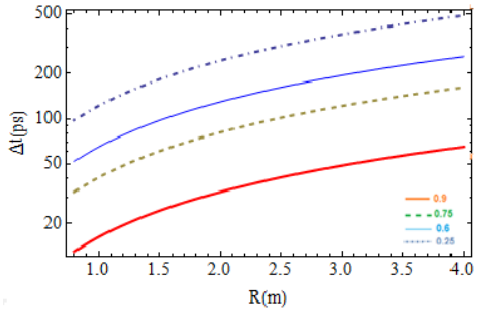
## ۳- بررسی عددی پهن‌کننده Offner:

پهنای زمانی پالس خروجی را می‌توان به دو روش:

۱- محاسبه طول مسیر برای بلندترین و کوتاهترین طول موج در پالس فرودی و به‌کارگیری رابطه t=Δx/c.

۲- محاسبه پاشندگی تاخیر گروه[3] (GDD) ناشی از سیستم و به‌کارگیری رابطه $t = t_0\sqrt{1 + \alpha\frac{GDD^2}{t_0^4}}$، که در آن α وابسته به شکل اولیه پالس می‌باشد، محاسبه کرد. معادله ۲ نشان می‌دهد، این مقدار با فاکتورهای شعاع آینه‌ها، محل قرارگیری توری، طول پالس اولیه و شیارهای توری تغییر خواهدکرد.

هر دو روش میزان پهن‌شدگی پالس 100fs برحسب شعاع آینه مقعر و برای محل‌های متفاوت قرارگیری توری پراش ۱۲۰۰ خط در میلی‌متر نتایج یکسانی را به‌دست می‌دهند که در شکل ۲ آمده‌است.




شکل ۲- طول پالس خروجی یک پالس ۱۰۰fs نسبت به شعاع آینه مقعر برای قرارگیری توری در محل‌های 0.25R، 0.6R، 0.75R و 0.9R از آینه مقعر (در یک عبور)

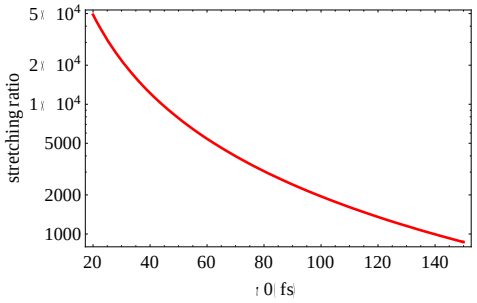
این شکل طول پالس حاصل از دو بار برخورد به توری را نشان می‌دهد. چنین پالسی دارای چیرپ فضایی بوده و مولفه‌های طیفی متفاوت در مکان‌های متفاوت قرار می‌گیرند. از آنجا که پالس مطلوب برای ورود به سیستم تقویت کننده نباید چیرپ فضایی داشته باشد، با قرار دادن یک آینه تخت در خروجی سیستم شکل ۱، باریکه دوباره از همان مسیر برگشته تا علاوه بر دو برابر شدن پاشندگی اعمال شده روی پالس، چیرپ فضایی نیز جبران شود. همان‌طورکه مشاهده می‌شود، طول پالس با افزایش شعاع آینه‌ها و فاصله گرفتن توری از مرکز آینه‌ها افزایش می‌یابد.

همچنین می‌توان فاکتور پهن‌شدگی برای طول پالس‌ها و در نتیجه پهناهای طیفی متفاوت، برای پهن‌کننده ای با شعاع‌های ۳۰۰۰ و ۱۵۰۰- میلی‌متر و با قرار دادن توری در0.6R، به‌دست آورد (شکل ۳).

[3] Group Delay Dispersion



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]




شکل۳- نرخ فاکتور پهن‌شدگی نسبت به طول پالس فرودی

این شکل نشان می‌دهد میزان فاکتور پهن‌شدگی با افزایش طول پالس اولیه به‌شدت کاهش می‌یابد که به‌دلیل کاهش پهنای طیفی پالس فرودی می‌باشد.

برای بررسی رفتار یک پهن‌کننده تک توری ۸ بار عبور ابتدا یک پالس فوق کوتاه غیرچیرپ را از پهن‌کننده ۴ بار گذر عبور داده و مقدار پهن‌شدگی پالس با چیرپ مثبت را محاسبه می‌کنیم. سپس این پالس چیرپ شده را بار دیگر از سیستم عبور می‌دهیم و فاکتور پهن‌شدگی آن را به‌دست می‌آوریم.

شکل زمانی پالس گوسی غیرچیرپ ورودی به‌صورت زیر در نظر گرفته می‌شود:

$$E_0(t) \approx \exp(-\frac{2\ln(2)}{\tau_0^2}t^2) \qquad (۳)$$

با اعمال فاز وابسته به فرکانس:

$$\varphi(\omega) \approx B(\omega-\omega_0)+\frac{D}{2}(\omega-\omega_0)^2 \qquad (۴)$$

که $B$ پاشندگی مرتبه اول و $D$ پاشندگی تاخیر گروه می‌باشد، شکل زمانی پالس به‌صورت زیر تغییر می‌کند:

$$E_1(t) \approx \exp(-\frac{2\ln(2)\tau_0^2}{\tau_0^4+16(\ln(2))^2D^2}t^2) \cdot \exp(-i\frac{8(\ln(2))^2D}{\tau_0^4+16(\ln(2))^2D^2}t^2) \qquad (۵)$$

بنابراین فاکتور پهن‌شدگی $M_1$ به‌صورت:

$$M_1=\frac{\tau_1}{\tau_0}=(1+\frac{16(\ln(2))^2D^2}{\tau_0^4})^{1/2} \qquad (۶)$$

خواهد بود. حال اگر در ۴ عبور دوم، پالس چیرپ شده حاصل از ۴ عبور اول زیر را وارد پهن‌کننده کنیم، داریم:

$$E_1(t) \approx \exp(-\frac{1}{2}(1+iC)\frac{t^2}{T^2}) \qquad (۷)$$

بنابراین خروجی ۸ بار عبور با تکرار مراحل قبل برابر با:

$$E_2(t) \approx \exp(-\frac{(1+iC)t^2}{2(T^2-iD\ (1+iC))}) \qquad (۸)$$

و در نتیجه فاکتور پهن‌شدگی ۴ عبور دوم با:

$$M_2=\frac{\tau_2}{\tau_1}=((1+\frac{16(\ln(2))^2D^2}{\tau_0^2\tau_1^2})^2+(\frac{4\ln(2)D}{\tau_1^2})^2)^{1/2} \qquad (۹)$$

محاسبه خواهد شد. با جایگذاری این معادله در فاکتور پهن‌شدگی اول خواهیم داشت:

$$M_2=\frac{\tau_2}{\tau_1}=(4-3\frac{1}{M_1^2})^{1/2} \qquad (۱۰)$$

از آنجاکه فاکتور پهن‌شدگی $M_1$ بسیار بزرگتر از یک می‌باشد، با تقریب می‌توان انتظار داشت پهن‌شدگی سیستم ۸ گذر ۲ برابر پهن‌شدگی ناشی از سیستم ۴ گذر باشد.

## ۵- نتیجه گیری

نتایج حاصل از ردیابی پرتو در سیستم تمام بازتابنده نشان می‌دهد فاکتور پهن‌شدگی نسبت مستقیم با شعاع آینه‌ها، تعداد شیارهای توری، محل قرارگیری توری و تعداد عبور از سیستم دارد. محاسبات نشان می‌هد یکی از راه‌ها برای پهن‌کردن پالس 100fs تا حدود 800ps استفاده از پهن‌کننده‌ی هشت بار عبور متشکل از یک توری ۱۲۰۰ خط در فاصله 0.6R از آینه مقعر و آینه‌هایی به شعاع ۳۰۰۰ و ۱۵۰۰- میلی‌متر می‌باشد.

## مراجع

[1] O.MARTINEZ,3000 Times Grating Compressor with Positive Group Velocity Dispersion: Application to Fiber Compensation in 1.3-1.6 prn Region,IEEE journal of quantum Electronic, 1987.

[2] G.Cheriaux, P.Rousseau, *Aberration-free stretcher design for ultrashort-pulse amplification*, OPTICS LETTERS / Vol. 21, No. 6, 1996.

[3] J.Jiang, *Evaluation of chirped-pulse-amplification systems with Offner triplet telescope stretchers*, J. Opt. Soc. Am. B/Vol. 19, No. 4, 2002.

[4] E. B. Treacy, ‘‘Optical pulse compression with diffraction gratings,’’ IEEE J. Quantum Electron. 5, 454–458 (1969).



[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]