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

بررسی اثر استفاده از کریستال CdSe برای کاهش نوفه باله در پالس فمتوثانیه در تقویت‌کننده‌های لیزری

آزیتا یوسفی، سمیه نجفی، فاضل جهانگیری و رضا مسعودی

تهران –اوین-پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی

چکیده – در این مقاله به عوامل مؤثر بر ظهور باله در شکل پالس‌های لیزری فمتوثانیه در طی عبور از تقویت کننده چند بار گذر با در نظر گرفتن اثر خودمدولاسیون فازی می‌پردازیم. با در نظر گرفتن یک سیستم لیزر تیتانیوم سفایر نوعی با طول پالس ۱۰۰ فمتوثانیه، چگونگی حذف باله را با استفاده از نیمه‌رسانای *CdSe* دارای ضریب شکست غیر خطی منفی، بررسی می‌کنیم.

کلید واژه- باله، خودمدولاسیون فازی، ضریب شکست غیر خطی منفی، انتگرالB

Study the influences using CdSe crystal on removing the wing noise of femtosecond pulse in laser amplifiers

Azita Yousefi, Somayeh najafi, Fazel Jahangiri, and Reza Massudi

Shahid Beheshti university

Abstract- In this paper, the time evolution of femtosecond laser pulses is studied during the amplification process in a multipass power amplifier. By considering self phase modulation effect as the main origin of wing noise, in a typical Ti:Sapphire laser system with a pulse duration of 100 femtosecond, the feasibility of employing a CdSe semiconductor wafer with negative nonlinear refraction index for removing the wing noise is investigated.

Keywords: Wing, Spm, negative nonlinear refraction index, B Integral

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

۱-مقدمه

روش تقویت پالس چیرپ شده (CPA[1]) امکان تولید پالس‌های فوق کوتاه لیزری با توان بالا درمحیط‌های لیزری را می‌دهد. در این روش پالس قبل از تقویت توسط دستگاه استرچر پهن و بعد از تقویت فشرده می‌شود. اما بعد از تقویت، شکل پالس دچار تغییر شده، نوفه و باله‌هایی که اصطلاحاً به آن‌ها پیش‌پالس می‌گوییم، در شکل زمانی پالس ظاهر می‌گردد. اهمیت این پیش‌پالس‌ها در برهم‌کنش لیزر با ماده نمایان می‌شود. به طوری‌که این پیش‌پالس‌ها می‌توانند قبل از برخورد با هدف، آن را پیش یونیزه کنند [1]. در نتیجه قسمت اصلی پالس به جای هدف جامد مورد بررسی، با پلاسمای ایجاد شده برهم‌کنش می‌کند و میزانی از انرژی قله پالس قبل از رسیدن به هدف از بین می‌رود. از این رو حذف این پیش‌پالس‌ها بسیار ضروری می‌باشد. نوفه‌هایی که به همراه پالس‌های لیزری فوق‌کوتاه ظاهر می‌شوند را می‌توان بر اساس سطح کنتراست به چهار دسته wing، pedestal، replica و ASE تقسیم‌بندی کرد [۲]. کنتراست به صورت شدت قله اصلی پالس به شدت قله نوفه و پیش‌پالس تعریف می‌شود. نوفه pedestal، نوفه‌ای است که در اسیلاتور ایجاد می‌شود و به عواملی نظیر پایداری کاواک، پروفایل بهره، پهنای طیفی، پایداری کاواک و ... وابسته است. نوفه replica به سطوح فرنل در تقویت کننده‌ها و سلول‌های پاکلز در سیستم وابسته می‌باشد. گسیل خود به خودی تقویت شده (ASE[2])، نوعی نوفه نوری می‌باشد که به وسیله گسیل خود به خودی، زمانی که ماده فعال برای تولید وارونی جمعیت پمپ می‌شود، به‌وجود می‌آید. این نوفه در حین تقویت به سیگنال نوری اضافه می‌گردد. نوفه باله[3]، نوفه‌ای است که منشأ آن اثر خود مدولاسیون فازی(SPM[4]) می‌باشد. سطح کنتراست نوعی نوفه‌های ASE، pedestal، replica وباله به ترتیب برابر 10^9، 10^7 ، 10^8 و 10^4 می‌باشد [2]. در این مقاله به بررسی چگونگی ایجاد و روش‌های رفع نوفه دارای کمترین کنتراست یعنی نوفه باله می‌پردازیم. اولین بار شیخ بهایی در سال ۱۹۹۱ ضریب‌شکست غیر-خطی منفی مواد را مورد بررسی قرار داد و Kenoplev در سال ۲۰۰۰ با استفاده از این مواد به‌روش‌های حذف نوفه باله پرداخت.

۲-تئوری

اگر شکل پالس ورودی به محیط تقویت را گوسی در نظر بگیریم، می‌توان نشان داد شکل پالس بعد از تقویت کاملاً گوسی نبوده و با باله‌هایی همراه خواهد بود. شدت بالای پالس‌های لیزری فوق‌کوتاه می‌تواند منجر به اثرات غیر خطی وابستگی ضریب شکست به شدت و در نتیجه آن، اثر خود مدولاسیون فازی شود. در این مقاله با در نظر گرفتن اثر خود مدولاسیون فازی در معادلات انتشار پالس فوق کوتاه، تحولات زمانی و فرکانسی آن را مورد بررسی قرار می‌دهیم و سپس به بررسی چگونگی ظهور باله در پالس ورودی در نتیجه این اثر می‌پردازیم. در نهایت با بررسی روش‌های حذف اثرات ناشی از خود مدولاسیون فاز، روش حذف باله‌های ظاهر شده در شکل زمانی پالس را از طریق تعیین مشخصات بهینه برای یک تقویت کننده نوعی ارائه می‌کنیم. برای پالس در عبور از تقویت کننده، معادله موج با در نظر گرفتن اثر خود مدولاسیون فاز از حل معادله شرودینگر غیر خطی به‌دست می‌آید [3]:

$$\frac{\partial E_0(z,t)}{\partial z}=\frac{\alpha(\omega_i(t))}{2}E_0(z,t)-i\frac{\beta}{2}\left|[E_0])^2E_0(z,t)\right| \quad (۱)$$

λ_0 و $\beta=\frac{2\pi n_{2E}}{\lambda_0}$ طول موج خلأ می‌باشد. یک جواب امتحانی معادله (۱) را به صورت زیر در نظر می‌گیریم [4]:

$$E_0(z,t)=E_0(0,t)e^{\alpha(\omega_i(t)))/2]}e^{-i\phi_{spm}(z,t)} \quad (۲)$$

که مدولاسیون فاز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\phi_{spm}(z,t)=\frac{1}{2}\frac{\beta}{\alpha(\omega_i(t))}|E_0(0,t)|^2e^{\alpha(\omega_i(t))z-1} \quad (۳)$$

برای تقویت‌کننده چند بار گذر به طول L با اتلاف توان 1-R (R ضریب بازتابندگی سطح آینه در تقویت کننده می‌باشد)، در صورتی که M تعداد عبور از تقویت‌کننده باشد، معادله (۲) به صورت زیر تغییر خواهد کرد:

$$E_0(t)=E_0(0,t)(RG(t))^2e^{-i\phi_{spm}} \quad (۴)$$

$$\phi_{spm}=\frac{1}{2}\frac{\beta}{\alpha(\omega_i(t))}|E_0|^2(G(t)-1)\frac{[[RG(t)]^M-1]}{RG(t)-1} \quad (۵)$$

[1] Chirp pulse amplification
[2] Amplified spontaneous emission
[3] wing
[4] Self-phase modulation

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

G(t) بهره توان یک‌بارعبور برابر با $G(t) = Exp[\alpha(\omega_i(t))]$ می‌باشد. تاکنون در معادله شماره (۱) فقط اثر خود مدولاسیون فاز را اعمال کردیم. همان‌طور که می‌دانیم چیرپ‌شدگی در قسمت فازی وارد می‌شود و با در نظر گرفتن پالس ورودی چیرپ به تقویت‌کننده معادله میدان به صورت $E(0,t) = A_1 e^{-\frac{1}{2}(\frac{t}{\tau})^{2m}} e^{\omega_0 t + \frac{1}{2}b(\frac{t}{\tau})^2 + \phi_{nl}}$ می‌باشد که b پارامتر چیرپ خطی $b = 2\pi n_f$ و n_f عدد فرنل می‌باشد. پارامتر m در معادله (۶) بیانگر شکل زمانی پالس است بطوریکه اگر برابر ۱ باشد شکل گوسین است و اگر برابر دو و بالاتر باشد، سوپرگوسین خواهد بود. در نتیجه می‌توان پالس خروجی از تقویت‌کننده را با توجه به رابطه (۴) به صورت زیر بدست آورد:

$$E(t) = A_2 e^{-\frac{1}{2}(\frac{t}{\tau})^2 - \frac{1}{2}(\frac{t}{\tau_{eff}})^2} e^{\omega_0 t + \frac{1}{2}b(\frac{t}{\tau})^2 + \phi_{nl}(t) - \phi_{spm}(t)} \quad (۶)$$

که $\tau_{eff} \equiv ((2\tau^4)/(M\alpha'' L b^2))^{\frac{1}{2}}$ و دامنه بعد از تقویت $A_2 \equiv (RG_O)^{\frac{M}{2}} A_1$ می‌باشد. در رابطه (۵) شیفت فازی خود مدولاسیون فاز تغییر می‌کند.

$$G(t) = G_0 e^{-\frac{1}{m}(\frac{t}{\tau})^2} \quad (۷)$$
$$G_0 = e^{\alpha_0 L}$$

برای بررسی اثر خود مدولاسیون فاز، انتگرال B را به صورت جمع فاز غیر خطی کل برای یک نقطه از پالس (معمولاً پیک پالس) در طول گذر پالس از محیط تقویت تعریف می‌کنیم [5]:

$$B(t,r) = \frac{2\pi}{\lambda_{vac}} \int_0^l n_2 I(t,r,z) \quad (۸)$$

انتگرال B در عبور از محیط تقویت و محیط‌های اپتیکی دیگر به صورت زیر تعریف می‌شود،

$$B_1(r,t) = B_{1MAX} \frac{I(r,t)}{I_0(0,0)} \quad (۹)$$

که B_{1MAX} مقدار قله انتگرال B می‌باشد. در لیزرهای با انرژی بالا، حذف انتگرال B دارای اهمیت زیادی می‌باشد. از این رو محاسبات برای تعیین ماده‌ای نیمه رسانا به عنوان جبران کننده صورت گرفت. مقدار انتگرالB در یک لایه نیمه رسانا به الکترون‌های‌باند ($B_{bnd}(r,t)$) و حامل‌های‌آزاد تحریکی ($B_{exc}(r,t)$) وابسته می‌باشد [5].
مقدار انتگرال را از حل معادلات کوپل شده شدت و معادلات چگالی حامل‌های آزاد بدست آورد:

$$\frac{dI(r,t,z)}{dz} = -\alpha I - \beta_2 I^2 - \sigma_{ex} N I$$
$$\frac{dN(r,t,z)}{dt} = -\frac{N(r,t,z)}{\tau_{rel}} + \frac{\beta_2 I^2(r,t,z)}{2\hbar\omega}$$
$$\frac{dB(r,t,z)}{dz} = \frac{\omega}{c}(n_2 I - \sigma_r^2) \quad (۹)$$

در نهایت با حل سه معادله بالا برای طول کریستال Z=L خواهیم داشت:

$$B_{ex}(r,t) = \frac{-2\pi\sigma_r\beta_2}{2\hbar\omega\lambda_{vac}} \times \int_0^L e^{-\frac{t}{\tau_{rel}}} dz[\int_{-\infty}^{t} e^{\frac{t'}{\tau_{rel}}} I^2(r,t',z)dt'] \quad (۱۰)$$

$$B_{bnd}(r,t) = \frac{2\pi n_2}{\lambda_{vac}\beta_2} Ln[1 + \beta_2 I_0(r,t)(1-R)L_{eff}]$$
$$L_{eff} = \frac{1-\exp[-\alpha L]}{\alpha} \quad (۱۱)$$

L طول کریستال، α ضریب جذب خطی در نیمه‌رسانا، β_2 ضریب جذب دو فوتونی، σ_{ex} سطح مقطع جذب برای بارهای حامل، n چگالی بارتحریکی، τ_{rel} زمان واهلش نیمه‌رسانا ، ω فرکانس زاویه‌ای می‌باشد.
و در نهایت انتگرال B کل به صورت زیر بدست می‌آید:

$$B_{tot}(r,t) = B_1(r,t) + B_{bnd}(r,t) + B_{ex}(r,t) \quad (۱۲)$$

باتوجه به معادلات انتگرال B در یک محیط تقویت مثبت است و در لایه نیمه‌رسانا با ضریب شکست غیرخطی منفی، منفی می‌باشد. بنابراین برای رفع نوفه باله از موادی با ضریب شکست منفی می‌توان استفاده کرد. در یک لایه نیمه رسانا در صورتی‌که $\hbar\omega < E_g < 1.42\hbar\omega$ ($\hbar\omega$طول موج فوتون فرودی است)، ضریب شکست غیر خطی منفی خواهد بود. مقدار ضریب شکست غیر منفی به صورت تئوری با معادلات کرامرز کرونیک و به صورت تجربی با تکنیک اسکن z بدست می‌آید.

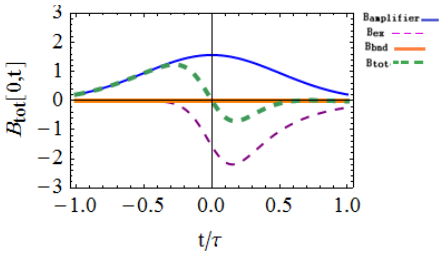
۳-نتایج

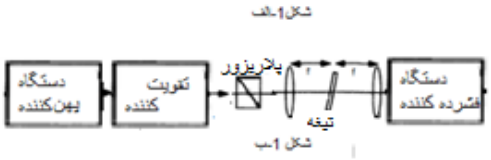
با توجه به ویژگی‌های پالس لیزری (طول موج و ...) می‌توان با استفاده از یک تیغه جبران کننده، نوفه باله را کاهش داد. در اینجا به بررسی نحوه رفع نوفه باله در یک تقویت کننده نوعی تیتانیوم سفایر می‌پردازیم. سیستم لیزری را با مشخصات طول پالس ۱۰۰ فمتوثانیه و طول کریستال ۱ سانتی‌متر با ضریب شکست خطی ۱.۷۴ و ضریب شکست غیر خطی $n_2 = 3\times10^{-20}\left(\frac{W}{m^2}\right)$ در نظر می-

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

گیریم. نوع ماده جبران کننده با توجه به طول موج لیزری، تعیین می‌شود. ضرب شکست غیر خطی برای نیمه‌رساناهایی CdSe، GaAs، AlGaAs، ZnTe و ... در طول موج‌های مشخصی منفی می‌باشد. با توجه به این‌که طول موج لیزر تیتانیوم سفایر ۸۰۰ نانومتر است، با توجه به ضریب شکست غیر خطی منفی مناسب‌ترین ماده برای این لیزر CdSe می‌باشد. تیغه جبران کننده CdSe دارای ضریب شکست غیرخطی $n_2 = -5*10^{-17}\left(\frac{W}{m^2}\right)$ می‌باشد.

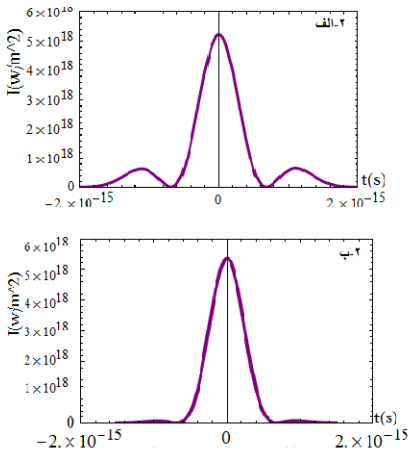
در شکل (۱-الف) نمودار انتگرالB برای تقویت کننده، تیغه جبران کننده و انتگرال B کل نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل (۱) می‌بینیم در وسط پالس (t=0) با استفاده از تیغه جبران کننده، میزان میانگین انتگرال B کل صفر می‌شود ($\int B_{tot}\,dt = 0$). که با نتایج گزارش شده در کارهای مشابه مطابقت دارد. در شکل (۱-ب) چیدمان تجربی ساده‌ای از کاربرد تیغه جبران کننده نشان داده شده‌است.





شکل۱:الف-انتگرالBکل- ب:چیدمان حذف نوفه باله

اگر تعداد عبور پرتو از کریستال را ۸ بار در نظر بگیریم، پروفایل زمانی پالس گوسی پس از تقویت با در نظرگرفتن اثرات غیرخطی به صورت شکل (۲-الف) و بعد از استفاده از تیغه جبران کننده به صورت نمودار (۲-ب) درمی‌آید. هرچه میزان انتگرال B بزرگ‌تر باشد، میزان نوفه باله بیشتر و میزان کنتراست نوفه کمتر خواهد بود. بنابراین با استفاده از تیغه جبران کننده نیمه‌رسانا با ضریب شکست منفی، می‌توان میزان انتگرال B و در نتیجه اثر خود مدولاسیون فاز را کاهش و میزان کنتراست نوفه باله را افزایش داد.



شکل۲ الف) پروفایل زمانی پالس لیزری با طول پالس ۱۰۰fs بعد از عبور از تقویت کننده ۸ بارگذر با ماده فعال تیتانیوم سفایر به طول ۱cm با در نظر گرفتن اثر خود مدولاسیون فازی؛ ب) پروفایل زمانی پالس لیزری به طول ۱۰۰فمتوثانیه بعد از عبوراز تقویت کننده ۸ بار گذر با ماده فعال تیتانیوم سفایر به طول ۱ cm و عبور از تیغه جبران کننده CdSe

۴-نتیجه‌گیری

میزان نوفه باله با افزایش فاز خودمدولاسیون افزایش می‌یابد و فاز خودمدولاسیون رابطه مستقیم با طول پالس، طول محیط تقویت و تعداد گذر و رابطه معکوس با عدد فرنل خواهد داشت. هر سیستم تقویت پالس چیرپ لیزری دارای خود مدولاسیون فازی و انتگرال B منحصر به فردی است که می‌توان آن را با موادی با ضریب شکست منفی رفع کرد. با توجه به چیدمان آزمایشگاهی مورد نظربا ماده فعال تیتانیوم سفایر بهترین ماده برای رفع نوفه باله، CdSe می‌باشد.

مراجع

[1] Laszlo Veisz, Dr. F. J. Duarte (Ed.), ISBN: 978-953-307-242-5, InTech(2010)

[2] Konoplev,OlegAlexander,Thesis(Phd).THE UNIVERSITY OF ROCHESTER,Source DAI-B 61/05,P.2605,N0V 2000

[3]Y. -H. Chuang, D. D. Meyerhofer, S. Augst, H. Chen, 1. Peatross, and S. Uchida, 1. Opt. Soc. Am. B 8, 1226 (1991)

[4] M. D. Perry, F. G. Patterson, and J. Weston, Optics Letters, Vol. 15, Issue 7, pp. 381-383 (1990)

[5] Claudiu M. Cirloganu, Lazaro A. Padilha, Dmitry A. Fishman, Scott Webster,David J. Hagan, and Eric W. Van Stryland, (2011)

[۵]A.Said,sheik J.Opt.Soc.Am.B,9,405-414(1992)

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