



تاثیر پروفایل زمانی پالس پمپ بر طیف سیگنال تقویت شده در OPCPA

سپیده غفاری، فاضل جهانگیری، غلامرضا محمدی، رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده - تقویت پارامتری پالس‌های نوری چیرپ شده (OPCPA) را با در نظر گرفتن پروفایل زمانی برای پالس‌های برهمکنش کننده به طور عددی مورد مطالعه قرار داده و به بررسی تاثیر پروفایل زمانی پمپ بر پروفایل زمانی و طیفی سیگنال تقویت شده می‌پردازیم. همچنین وابستگی طیف سیگنال تقویت شده به طول موثر برهمکنش را مورد بررسی قرار می‌دهیم.

کلید واژه- پروفایل زمانی، تقویت پارامتری، چیرپ، طیف، طول موثر

Influence of temporal profile of pump pulse on spectrum of amplified signal in OPCPA

Sepideh Ghaffari, Fazel Jahangiri, Gholamreza Mohammadi, Reza massudi

Laser and plasma research institute, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran

Abstract- Optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA) is numerically investigated by considering temporal profiles of interacting pulses. The effects of temporal profile of pump pulse on the spectrum of amplified signal are discussed and dependence of amplified signal's spectrum on crystal effective length is studied.

Keywords: chirp, effective length, parametric amplification, spectrum, temporal profile

مقدمه

پمپ، مورد بررسی قرار می‌گیرد.

تحلیل عددی

طبق تئوری اولیه‌ی OPCPA، پدیده تقویت پارامتری نوری با فرض تقریب موج تخت و دامنه کند تغییر توسط سه معادله کوپل شده زیر بیان می‌شود [۵]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial A_s}{\partial z} + \frac{n_s}{c} \frac{\partial A_s}{\partial t} &= \frac{-i\omega_s d_{eff}}{n_s c \cos^2 \rho_s} A_i^* A_p e^{-i\Delta k z} \\ \frac{\partial A_i}{\partial z} + \frac{n_i}{c} \frac{\partial A_i}{\partial t} &= \frac{-i\omega_i d_{eff}}{n_i c \cos^2 \rho_i} A_s^* A_p e^{-i\Delta k z} \\ \frac{\partial A_p}{\partial z} + \frac{n_p}{c} \frac{\partial A_p}{\partial t} &= \frac{-i\omega_p d_{eff}}{n_p c \cos^2 \rho_p} A_s A_i e^{i\Delta k z} \end{aligned} \quad (1)$$

که A_s ، A_i و A_p دامنه‌های میدان الکتریکی n_s ، n_i و n_p ضرایب شکست و ω_s ، ω_i و ω_p فرکانس‌های به ترتیب سیگنال، ایدلر و پمپ هستند. همچنین c سرعت نور در خلا، d_{eff} ضریب غیرخطی موثر و Δk عدم تطابق فازی می‌باشد. علاوه بر این ρ_s ، ρ_i و ρ_p به ترتیب زاویه بین سیگنال و پمپ، ایدلر و پمپ و زاویه کنارگذر عرضی پمپ می‌باشند. تولید موج ایدلر برقرار ماندن بقای انرژی و تکانه موج پمپ در حین تقویت را تضمین می‌کند. از آن‌جا که محیطی که فرایند غیرخطی در آن اتفاق می‌افتد برای امواج پمپ، سیگنال و ایدلر شفاف است می‌توان از جمله مربوط به افت میدان صرف‌نظر کرد.

میدان الکتریکی وابسته به زمان باریکه سیگنال و پمپ یک پالس سوپرگاوسی مرتبه n به صورت زیر فرض می‌شوند:

$$\begin{aligned} A_s(t) &= A_{s0} e^{-2\ln 2(1+jb)\left(\frac{t}{\tau_s}\right)^n} e^{j\omega_s t} \\ A_p(t) &= A_{p0} M(t) e^{-2\ln 2\left(\frac{t}{\tau_p}\right)^m} e^{j\omega_p t} \end{aligned} \quad (2)$$

که در آن b پارامتر چیرپ خطی و τ_s و τ_p به ترتیب طول زمانی پالس سیگنال و پمپ می‌باشد. کمیت‌های m و n مراتب سوپرگاوسی برای پمپ و سیگنال و $M(t)$ تابع مدولاسیون زمانی پمپ را نشان می‌دهد. از آن‌جا که پالس سیگنال دارای چیرپ زمانی (در این‌جا خطی) می‌باشد، فرکانس لحظه‌ای پالس سیگنال با فرض پروفایل زمانی گاوسی، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\omega_s(t) = \frac{\partial \Phi}{\partial t} = \omega_s - 4\ln 2 \, b \, \frac{t}{\tau_s^2}$$

پالس‌های لیزری پر شدت فوق کوتاه در کنار کاربردهای بسیار متنوع، امکان مطالعات فیزیکی فراوانی را فراهم آورده‌اند که از جمله آنها بررسی‌های غیرخطی در فیزیک اتمی، ملکولی و حالت جامد به منظور دسترسی به حالات کشف نشده‌ی ماده است [۱]. از جمله تکنیک‌های در حال گسترش برای تولید پالس‌های لیزری فوق کوتاه پراثری، روش تقویت پارامتری پالس‌های نوری چیرپ شده^۱ است. این تکنیک با ترکیب دو نوع روش تقویت پارامتری نوری (OPA)^۲ و تقویت پالس چیرپ شده (CPA)^۳، از مزایای هر دو روش به طور همزمان استفاده می‌کند. تا به حال روش‌های تولید پالس‌های کم چرخه نوری چند میلی‌ژولی عمدتاً مبتنی بر این تکنیک بوده است [۲]. همچنین افزایش دسترسی به لیزرهای پرشدت با کمک این تکنولوژی، استفاده از آن را در کاربردهایی نظیر مطالعات تفکیک زمانی بالا امکان‌پذیر کرده است. از دیگر مزایای این روش می‌توان به پهنای باند بهره‌گسترده، بهره‌تک عبور بالا، بارگیری ناچیز حرارتی و بازدهی بالا اشاره کرد.

اما در کنار مزایای بیشمار OPCPA، پیچیدگی‌هایی در این روش تقویت وجود دارد که همزمانسازی پالس‌های پمپ و سیگنال، پهن و فشرده کردن زمانی پالس سیگنال، شرایط دقیق تطابق فازی، سوپرفلوئورسانس زمینه، باریکه پمپ پرتوان با طول پالس کوچک، پروفایل زمانی تمیز و کیفیت باریکه بالا، از جمله‌ی آن‌ها است [۱].

در این تکنیک، شکل دهی طیفی برای تقویت پالس‌های چیرپ شده از اهمیت زیادی برخوردار است و مانع پدیده باریک شدگی در حین تقویت به‌ویژه در تقویت‌کننده‌های Nd:glass و Ti:sapphire می‌شود [۳]. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای کنترل شکل طیفی خروجی در سیستم‌های OPCPA و CPA از طریق بهره‌اشباع‌پذیر، کنترل عدم تطابق فازی و ... مورد مطالعه قرار گرفته‌اند؛ ولی به کارگیری این روش‌ها برای سیستم‌های لیزری مقیاس کوچک با پیچیدگی همراه است [۴]. در این مقاله با شبیه‌سازی عددی فرایند OPCPA، امکان کنترل شکل زمانی و طیفی سیگنال خروجی توسط شکل زمانی پالس

^۱ optical parametric chirped pulse amplification

^۲ optical parametric amplification

^۳ chirped pulse amplification

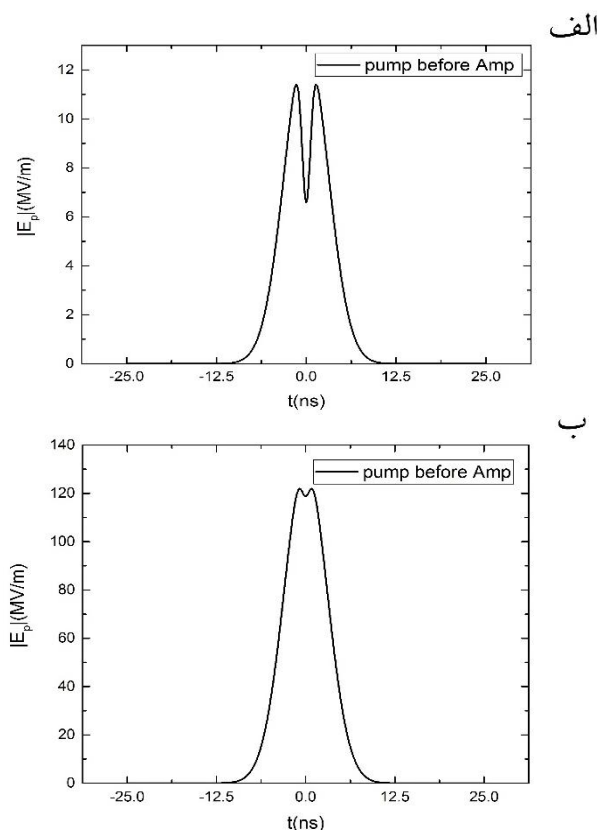
نزدیک شدن به پروفایل دلخواه برای سیگنال، دارای اهمیت باشد.

به منظور بررسی دقیق تر میزان تاثیرپذیری پروفایل سیگنال از پروفایل پمپ، به اعمال تغییرات دلخواه در پروفایل پمپ می پردازیم. این کار را با فرض $M(t)$ به صورت:

$$M(t) = \left(1 + ae^{-b2\ln2\left(\frac{t}{\tau_p} - c\right)^2} e^{2\ln2\left(\frac{t}{\tau_p}\right)^2} \right) \quad (4)$$

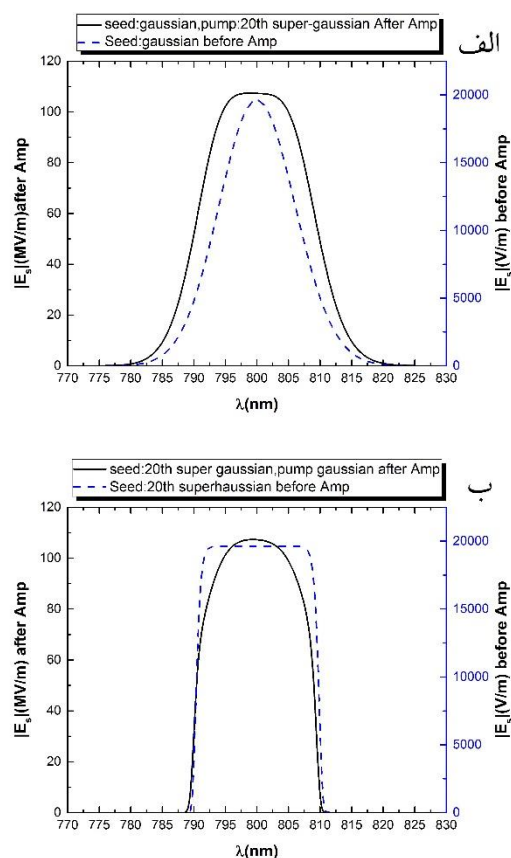
و سپس تغییر پارامترهای a ، b و c انجام می دهیم. تغییر این پارامترها می تواند به ظهور دره و قله هایی مطابق شکل (۲) در پروفایل پمپ منجر شود. انتظار می رود که اعمال تغییر در پروفایل پمپ به تغییر در پروفایل زمانی سیگنال خروجی و به دلیل چیرپ بودن پالس سیگنال، به تغییر در طیف سیگنال تقویت شده منجر شود. لذا این روش امکان کوک پذیری پالس سیگنال روی طول موج مورد نظر را فراهم می آورد.

شکل ۲: پروفایل زمانی میدان پمپ الف) با اعمال دره عمیق در پروفایل گاوسی ب) با اعمال دره کم عمق در پروفایل گاوسی



که در آن Φ فاز تند تغییر میدان پالس می باشد. در این شبیه سازی، انرژی اولیه سیگنال و پمپ را به ترتیب برابر ۲ نانوذول و ۲۰۰ میلی ژول، زاویه غیرهمخط را برابر با 2.39° ، زاویه تطابق فازی را 23.84° و طول پالس سیگنال و پمپ را به ترتیب برابر ۱،۵ و ۵ نانوثانیه فرض می کنیم. همچنین فرض می کنیم باریکه های سیگنال و پمپ با طول موج های به ترتیب ۸۰۰ و ۵۳۲ نانومتر در کریستال BBO با طول ۱۱،۳ میلی متر برهمکنش می کنند.

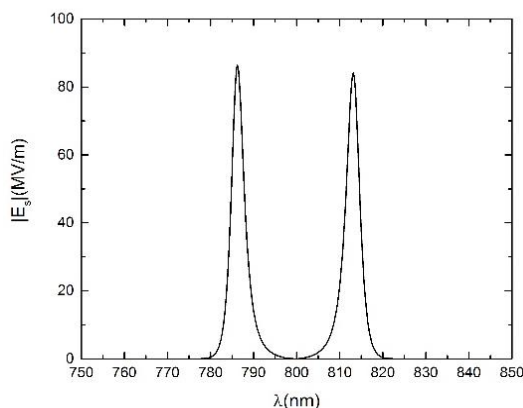
شکل ۱: پروفایل سیگنال قبل و بعد از فرایند تقویت برای حالتی که در آن از پروفایل سوپرگاوسی مرتبه بیستم برای پالس پمپ و گاوسی برای



پالس سیگنال (الف) و برعکس (ب) استفاده شده است.

با در نظر گرفتن پروفایل زمانی گاوسی سوپرگاوسی مرتبه بیستم برای پالس های پمپ و سیگنال به بررسی نقش پروفایل زمانی بر فرایند تقویت می پردازیم. پارامتر $M(t)$ را در این مرحله برابر یک قرار می دهیم. همان طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، پروفایل سیگنال تقویت شده بیشتر متمایل به پروفایل پالس پمپ مورد استفاده می باشد، که با آنچه از تئوری برهمکنش انتظار می رود همخوانی دارد. این تابعیت می تواند در انتخاب نوع پروفایل اولیه پمپ برای

بیشتر از طول موثر کریستال، پروفایل سیگنال تغییر می‌کند. دلیل این تغییر، تغییر همپوشانی پالس‌های برهمکنش کننده در طول‌های بزرگ‌تر از طول موثر کریستال می‌باشد که به تقویت طول موج‌های غیر از طول موج مرکزی منجر می‌شود.



شکل ۴: طیف سیگنال به ازای طول بزرگ‌تر از طول موثر

نتیجه‌گیری

با حل عددی معادلات کوپل شده OPCPA با در نظر گرفتن پروفایل زمانی برای پالس‌ها مشاهده نمودیم پروفایل زمانی و همین‌طور طیف سیگنال تقویت شده شدیداً از پروفایل زمانی پالس پمپ تبعیت می‌کند. این وابستگی امکان دستیابی به طیف خروجی دلخواه با کنترل پروفایل پمپ را فراهم می‌آورد. همچنین نشان داده شد تنها به ازای طول‌های کمتر از طول موثر تقویت منجر به بازه طیفی درست می‌شود.

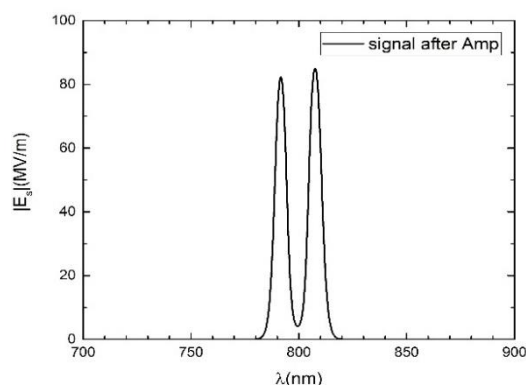
مراجع

- [1] M. D. Perry, and G. Mourou, Terawatt to petawatt subpicosecond lasers, *Science* **264**, 917 (1994).
- [2] D. Herrmann, L. Veisz, R. Tautz, F. Tavella, K. Schmid, V. Pervak, and F. Krausz, Generation of sub-three-cycle, 16 TW light pulses by using noncollinear optical parametric chirped-pulse amplification, *Optics letters* **34**, 2459 (2009).
- [3] H. Cao, X. Lu, and D. Fan, Numerical simulation of gain narrowing control by hybrid amplifiers chain based on Ti: sapphire and Ti: chrysoberyl. *Optics Communications* **284**, 1622 (2011).
- [4] X. Lu, C. Li, Y. Leng, C. Wang, C. Zhang, X. Liang, R. Li, and Z. Xu, Birefringent plate design for broadband spectral shaping in a Ti: sapphire regenerative amplifier, *Chinese optics letters* **5**, 493 (2007).
- [5] J. Wen, X. Zeng, S. Zhou, Y. Zuo, and K. Zhou, Spectral shaping of the amplified signal in optical parametric chirped pulse amplification, *XX International Symposium on High Power Laser Systems and Applications* (pp. 925514-925514) (2015).

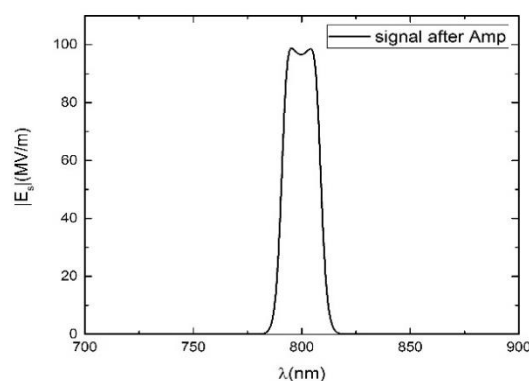
شکل (۳) تغییرات میدان سیگنال تقویت شده را به ازای پروفایل پمپ نشان داده شده در شکل (۲) ارائه می‌دهد. در حالت (الف) سیگنال با پمپی که در آن دره عمیقی ایجاد شده تقویت گردیده است، حال آنکه در نمودار (ب) سیگنال با پمپی با دره کم عمق، تقویت شده است. تغییر پروفایل پمپ به وضوح در شکل قابل مشاهده است. بنابراین با مدولاسیون پروفایل پمپ، می‌توان به بیشینه بهره در طول موج‌هایی غیر از طول موج مرکزی دست یافت.

شکل ۳: طیف میدان سیگنال تقویت شده در اثر تغییر اعمال شده در

الف



ب



پروفایل پمپ (مطابق شکل (۲))، به ازای (الف) پمپ با دره عمیق (ب) پمپ با دره کم عمق.

در راستای تغییر طیف سیگنال پس از تقویت، به بررسی طیف سیگنال به ازای طول‌هایی بیشتر از طول موثر می‌پردازیم. طول موثر طولی است که به ازای آن بیشینه تقویت برای سیگنال و در طول‌های بزرگ‌تر از آن پدیده تبدیل به عقب صورت می‌گیرد.

شکل (۴) تغییرات میدان سیگنال نسبت به طول موج را به ازای طول بیشتر از طول موثر کریستال که پدیده تبدیل به عقب (تبدیل سیگنال و ایدلر به پمپ) صورت گرفته است، نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در طول‌هایی