

بررسی تاثیر توزیع فضایی پالس بر تقویت پارامتری نوری چیرپ شده

سپیده غفاری، فاضل جهانگیری، رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسمای دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده - با مطالعه‌ی عددی تقویت پارامتری نوری پالس‌های چیرپ شده با در نظر گرفتن پروفایل فضایی برای هر دو باریکه پمپ و سیگنال نشان می‌دهیم بیشترین بهره تقویت در حالتی به دست می‌آید که پمپ و سیگنال هر دو سوپرگوسی باشند. همچنین بررسی اثرات قطر باریکه اولیه بر تقویت، باریک شدگی قطر باریکه در حین تقویت را نشان می‌دهد.

کلید واژه- اسپلیت- استپ، تقویت پارامتری، پروفایل عرضی، قطر باریکه، گاوسی و سوپرگاوسی

Studying the effect of pulse shape on optical parametric chirped pulse amplification

Sepideh Ghaffari, Fazel Jahangiri, Reza Massudi

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

Abstract- Optical parametric chirped pulse amplification is studied numerically by taking into account spatial profiles of input pulses. It is shown that maxium energy gain is obtained utilizing super Gaussian signal and pump pulses. Moreover, studying the effect of initial beam waist on amplification process reveals the transverse narrowing of amplified signal.

Keywords: Parametric amplification, spatial profile, spot size, Gaussian and supergaussian

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

مقدمه

تقویت پارامتری نوری پالس چیرپ شده (OPCPA)^۱ تکنیکی قدرتمند برای دستیابی به پالس‌های با طول پالس کوتاه و توان بالا است که اولین بار توسط Dubietis به طور تجربی به کار گرفته شد [۱]. در این روش، تقویت در کریستال‌های غیرخطی و با بهره‌گیری همزمان از مزایای CPA^۲ و OPA^۳ صورت می‌گیرد [۴-۲].

OPCPA نسبت به سایر روشهای تقویت از مزایایی برخوردار است که از جمله آنها عبارتند از بهره تک عبور بالاتر در طول برهمکنش کوتاهتر، پهنای باند تقویت وسیع [۵]، کنتراست زمانی بالا، کوک پذیری شکل طیفی و انباشتگی حرارتی پایین در کریستال تقویت کننده [2]. در کنار این، حساسیت بالای OPCPA به زاویه تطابق فازی و افت و خیز شدت باریکه پمپ نیازمند دقت تجربی بالایی است.

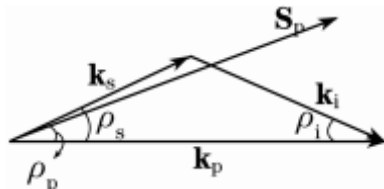
تا کنون کارهای تئوری فراوانی به شبیه‌سازی OPCPA به منظور بهینه‌سازی خواص باریکه تقویت شده پرداخته‌اند. نشان داده شده است که در نظر گرفتن پروفایل فضایی برای باریکه‌های ورودی منجر به نتایج دقیق‌تری شده و می‌تواند باریک شدگی عرضی و شیف طول موجی در حین تقویت پیش‌بینی کند [۶]. همچنین نشان داده شده است که چیرپ (مدولاسیون فرکانس) فضایی سیگنال می‌تواند بر روی کیفیت باریکه خروجی موثر باشد [۷]. در این مقاله با در نظر گرفتن پروفایل فضایی برای هر دو باریکه پمپ و سیگنال، به بررسی عددی تقویت OPCPA می‌پردازیم. با در نظر گرفتن زوایای کنارگذر عرضی^۴ و جابجایی‌های عرضی نشان می‌دهیم بیشترین بهره تقویت در حالتی به دست می‌آید که پمپ و سیگنال هر دو سوپرگوسی مرتبه ده (نزدیک به پروفایل top-flat) باشد. همچنین نشان می‌دهیم که با کاهش قطر لکه باریکه سیگنال ورودی، بهره و پهنای باند تقویت افزایش می‌یابد.

تحلیل عددی

در مقاله حاضر تحلیل فرایند OPCPA را در هندسه غیرهم‌خط انجام می‌دهیم که مناسب برای دستیابی به پهنای باند پهن تطابق فازی است. شکل (۱) شماتیک هندسه مورد استفاده را نشان می‌دهد. به دلیل اضافه شدن اثرات عرضی و همچنین برای لحاظ کردن زوایای کنارگذر فضایی، حل معادلات موج کوپل شده را در سه بعد انجام می‌دهیم. با فرض دامنه کندتغییر، معادلات کوپل شده به شکل زیر در می‌آیند [۹، ۱۰]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E_s}{\partial z} + \tan \rho_s \frac{\partial E_s}{\partial y} - \frac{1}{2jn_s k_s \cos \rho_s} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_s = \\ - j \frac{\omega_s d_{eff}}{cn_s \cos \rho_s} E_i^* E_p \exp(-j\Delta kz) \\ \frac{\partial E_i}{\partial z} + \tan \rho_i \frac{\partial E_i}{\partial y} - \frac{1}{2jn_i k_i \cos \rho_i} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_i = \\ - j \frac{\omega_i d_{eff}}{cn_i \cos \rho_i} E_s^* E_p \exp(-j\Delta kz) \\ \frac{\partial E_p}{\partial z} + \tan \rho_p \frac{\partial E_p}{\partial y} - \frac{1}{2jn_p k_p \cos \rho_p} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) E_p = \\ - j \frac{\omega_p d_{eff}}{cn_p \cos \rho_p} E_s E_i \exp(j\Delta kz) \end{aligned} \quad (1)$$

که ضرایب s, i و p به ترتیب بیانگر موج‌های سیگنال، ایدلر و پمپ، d_{eff} ضریب موثر غیرخطی کریستال، Δk عدم تطابق فازی و c سرعت موج در خلا، E_j دامنه میدان الکتریکی، ω_j فرکانس زاویه‌ای و n_j ضرایب شکست ($s, i, p=j$) هستند. همچنین ρ_s ، ρ_i و ρ_p به ترتیب زاویه بین بردار موج ایدلر و پمپ، زاویه کنارگذر فضایی پمپ و زاویه بین بردار موج سیگنال و پمپ می‌باشند.



شکل ۱: هندسه غیرهم‌خط برای OPCPA

برای به دست آوردن زاویه غیرهم‌خط از شرط تطابق فازی بقای انرژی به صورت زیر استفاده می‌کنیم:

$$\omega_p = \omega_s + \omega_i \quad (2)$$

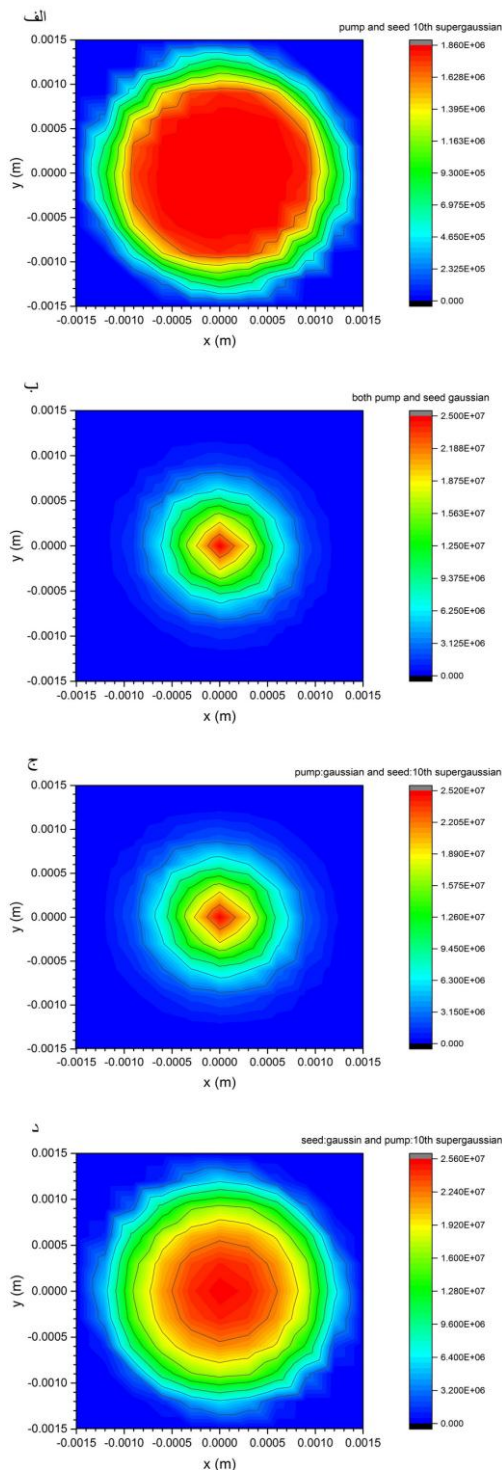
¹ optical parametric chirped pulse amplification

² chirped pulse amplification

³ optical parametric amplification

⁴ walk-off

با پروفایل ورودی باقی می‌ماند. اما شکل (ج) و (د) نشان



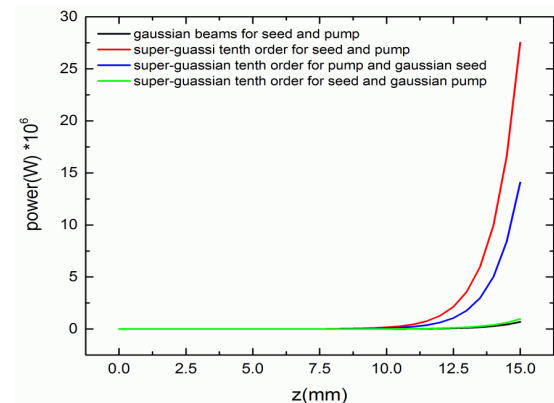
شکل ۳: پروفایل فضایی سیگنال تقویت شده در انتهای کریستال به طول ۱۵ میلی متر برای پروفایل‌های سیگنال و پمپ (الف) هر دو سوپرگوسی، (ب) هر دو گوسی، (ج) به ترتیب سوپرگوسی مرتبه ده و گوسی، (د) به ترتیب گوسی و سوپرگوسی مرتبه ده

می‌دهد که پروفایل فضایی سیگنال تقویت شده، با اغماض از اعوجاج در لبه ها، توسط پروفایل پمپ تعیین می‌شود.

سپس معادلات کوپل شده سه بعدی موج را به صورت عددی با استفاده از روش اسپلیت-استپ^۱ و رانگ کوتا^۲ حل می‌کنیم [۱۱]

مقادیر اولیه مورد استفاده در شبیه سازی عبارتند از: طول موج پمپ و سیگنال به ترتیب برابر ۵۳۲ و ۸۰۰ نانومتر، طول زمانی پالس سیگنال پهن شده و پمپ به ترتیب برابر ۲ و ۶ نانوثانیه، انرژی سیگنال ۵ نانوژول، انرژی پمپ ۳۰۰ میلی ژول و سائز کمر باریکه^۳ سیگنال و پمپ ۱.۵ میلی متر. همچنین کریستال غیرخطی مورد استفاده در شبیه سازی BBO با طول ۱۵ میلی متر و سطح مقطع ۱.۵×۱.۵ میلی متر مربع می‌باشد. در محاسبات این مقاله از اثر کنارگذر فضایی پمپ صرف نظر نمودیم.

همانطور که شکل (۲) نشان می دهد انتخاب‌های مختلف پروفایل فضایی برای باریکه اولیه سیگنال و پمپ، با حفظ تقویت نمایی می‌تواند به تقویت‌های متفاوتی منجر شود. با انتگرال گیری روی توزیع فضایی شدت در هر حالت و محاسبه توان کل برای پروفایل‌های مختلف، درمی‌یابیم که بیشترین توان خروجی با استفاده از پروفایل سوپرگوسی مرتبه دهم برای پمپ و سیگنال به دست می‌آید. لازم به ذکر است که در این محاسبات انرژی کل پالس ورودی با تغییر پروفایل ثابت نگه داشته شده است.



شکل ۲: توان سیگنال در حین تقویت در راستای Z برای پروفایل های پمپ و سیگنال متفاوت

در ادامه به بررسی تاثیر نوع پروفایل پالس‌های سیگنال و پمپ روی پروفایل سیگنال تقویت شده می‌پردازیم. شکل (۳) نشان می‌دهد که پروفایل خروجی در حالتی که پروفایل پمپ و سیگنال یکسان است (الف و ب) منطبق

¹ Split-step

² Runge-kutta

³ Beam waist size

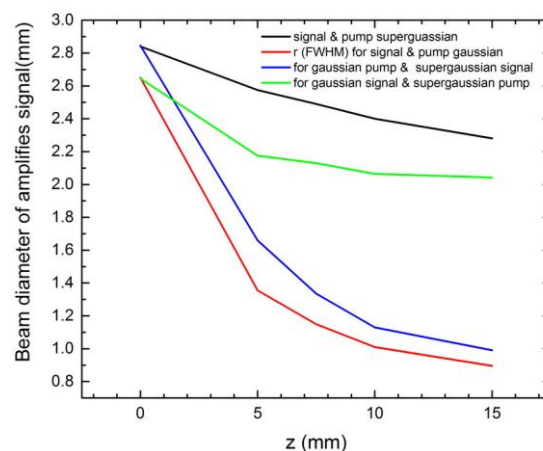
نتیجه گیری

در این مقاله با حل عددی معادلات کوپل شده موج با در نظر گرفتن اثرات عرضی پروفایل های اولیه به بررسی تقویت پارامتری پالس چیرپ شده نوری پرداختیم. با اعمال پروفایل های اولیه متفاوت برای پالس های سیگنال و پمپ، تاثیر نوع پروفایل را در مقدار توان پالس تقویت شده بررسی کردیم. پالس های سیگنال و پمپ با پروفایل فضایی سوپرگوسی مرتبه ده بیشترین توان خروجی را نشان دادند. همچنین اثر باریک شدگی پروفایل باریکه سیگنال تقویت شده را در پروفایل های مختلف مشاهده کردیم و دریافتیم پالس های با پمپ گاوسی بیشترین باریک شدگی را دارا می باشند. در نتیجه نوع پروفایل پالس پمپ در تعیین پروفایل پالس خروجی نقش بسیار تعیین کننده ای دارد. علاوه بر این، نشان دادیم که با کاهش مقدار قطر لکه، بهره و پهنای باند تقویت افزایش می یابد.

مراجع

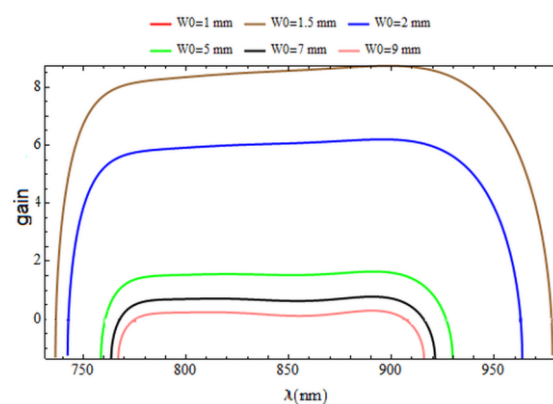
- [1] A. Dubietis, G. Jonusauskas, A. Piskarskas, Opt. Commun. 88 (4-6) (1992) 437-440.
- [2] Zhizhan Xu, Xiaodong Yang, Yuxin Leng, Haihe Lu, Lihuang Lin, Zhengquan Zhang, Ruxin Li, Wenqi Zhang, Dingjun Yin, Shiqi Jin, Jiahui Peng, Bin Tang, Baozhen Zhao, Chin. Opt. Lett. 1(1) (2003) 24-27.
- [3] I.N. Ross, P. Matousek, M. Towrie, A.J. Langley, J.L. Collier, Opt. Commun. 144 (1997) 125-133.
- [4] I.N. Ross, P. Matousek, G.H.C. New, K. Osvey, J. Opt. Soc. Am. B 19 (12) (2002) 2945-2956.
- [5] A. Dubietis, R. Butkus, A. Piskarskas, IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron 12, 163 (2006)
- [7] Tetsuo Harimoto a., Koichi Yamakawa, Optics Communications 256 (2005) 373-380
- [8] Qibing Sun, Hongjun Liu, Nan Huang and Wei Zhao, Journal of Modern Optics, Vol. 59, No. 7, 10 April 2012, 628-635
- [9] Jin Woo Yoon, Seong Ku Lee, Tae Jun Yu, Jae Hee Sung, Tae Moon Jeong, Jongmin Lee, Current Applied Physics 12 (2012) 648e653
- [10] Guardalben, M.J. Keegan, J. Waxer, L.J. Bagnoud, V. Begishev, I.A. Puth, J. Zuegel, J.D. Opt. Express 2003, 11, 2511-2524.
- [11] Harimoto, T. Yamakawa, K. Opt. Commun. 2005, 256, 373-380
- [12] Govind P. Agrawal, Nonlinear Fiber Optics, p.41, Academic press, 2007
- [۱۳] "تقویت پارامتری غیرمخط پالس های لیزری چیرپ شده"، زهر رجب لو، پایان نامه کارشناسی ارشد، پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی، ۱۳۹۳

هر چند که پروفایل خروجی مشابه پروفایل سیگنال یا پمپ ورودی باقی می ماند، اما همانطور که در شکل (۴) نشان داده شده است، قطر لکه سیگنال تقویت شده برای پروفایل های سیگنال و پمپ اولیه مختلف متفاوت است. برای حالتی که پمپ گاوسی دارند (رنگ آبی و قرمز)، کاهش محسوس تر قطر لکه و در نتیجه باریک شدگی بیشتر را پس از تقویت در کریستال شاهد خواهیم بود. این تغییر ناشی از تاثیر زیاد پروفایل پمپ روی پروفایل تقویت شده است و همانطور که می دانیم در پروفایل سوپرگوسی مراتب بالاتر، حجم بیشتری از کریستال پالس را می بیند.



شکل ۴: تغییر قطر لکه در حین تقویت برای پروفایل های مختلف سیگنال و پمپ

علاوه بر این، اندازه قطر لکه باریکه ورودی بر بهره و پهنای باند تقویت نیز موثر می باشد. شکل (۵) نشان می دهد که با کاهش مقدار قطر لکه، بهره و پهنای باند تقویت افزایش می یابد.



شکل ۵: نمودار بهره نسبت به طول موج در حالت غیرتبهنگ