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

# بررسی تاثیر شکل پالس پمپ در تقویت پارامتری پالس‌های نوری چیرپ شده

زهرا رجب‌لو، فاضل جهانگیری، رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

**چکیده – در این مقاله تاثیر شکل و طول زمانی پالس‌های لیزری برهم‌کنش کننده در روش تقویت پارامتری پالس‌های نوری چیرپ شده بر طول بهینه کریستال، بازده و پهنای باند بهره مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج عددی حاصل نشان می‌دهند استفاده از پروفایل زمانی تخت برای پالس پمپ می‌تواند باعث افزایش بازده و پهنای باند پالس تقویت شده شود.**

کلید واژه- تقویت پارامتری، چیرپ، پهنای باند، پروفایل زمانی.

# The effect of pump pulse shape on the efficiency and bandwidth of optical parametric chirped pulse amplification

Z.Rjabloo, F.jahangiri, R.massudi

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

Abstract-The effect of input laser pulse parameters including its temporal profile and length on the efficiency, gain bandwidth and the optimum crystal length, for an optical parametric chirped pulse amplification, is investigated. The results show that the gain bandwidth and efficiency can be maximized by employing pump pulses with flat-top temporal profiles.

Keywords: parametric amplification, chirp, bandwidth, temporal profile.

[ Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02 ]



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

**مقدمه**

تقویت پارامتری پالس‌های نوری چیرپ شده (OPCPA[1]) امروزه روش شناخته شده‌ای برای تولید پالس های لیزری با قله توان بالا می‌باشد. بالا بردن قله توان پالس تقویت شده از طریق بهینه سازی بازده تبدیل پمپ به سیگنال و ایدلر و یا پهنای باند بهره، توجه ویژه‌ای را در این موضوع به خود جلب کرده‌است. توصیف تحلیلی از این پدیده غیرخطی می‌تواند به شفافیت فیزیکی و رویکردهای جدید بهینه‌سازی و بررسی‌های عددی و تجربی کمک کند. حل دقیق تحلیلی پدیده مخلوط سه موج[2] که توصیف کننده این اثر غیر خطی است با استفاده از توابع بیضوی ژاکوبی ارائه شده است [۱،۲]. اما از آنجا که این حل تحلیلی تنها قادر به توصیف برهم‌کنش‌های شبه تکفام در جایی‌است که اثرات پاشندگی انتشار می‌تواند نادیده-گرفته شود، کاربرد کمی در OPAها با پالس‌های فوق کوتاه داشته اند. با این حال OPCPA فرآیندی‌است که این معادلات در آن معتبر است و دلیل آن اولا چیرپ خطی بالایی است که به پالس سیگنال قبل از ارسال آن به تقویت کننده اعمال می شود و ثانیا ناچیز بودن اختلاف سرعت بین پالس‌های تقویت شده و پمپ در مقایسه با طول پیکوثانیه‌ای آن‌ها می‌باشد. برآورده شدن این ملزومات با عنوان تقریب محلی[3] شناخته شده و در OPCPAهای عظیم به‌کار می‌رود.

در این بررسی تاثیر شکل دهی زمانی پالس بر افزایش قله توان OPCPA را نشان می‌دهیم و مشاهده می‌کنیم تخت بودن پروفایل پالس پمپ منجر به کاهش باریک شدگی بهره و بهبود بازده می شود.

**تئوری**

با شروع از معادلات غیرخطی مرتبه اول برای مخلوط سه موج تخت تکفام در یک محیط دی الکتریک، معادلاتی برای تغییرات شدت پمپ، ایدلر و سیگنال به‌دست می آید که توابعی از فاصله انتشار z می‌باشند[۳].

$$I_s(z) = I_{s0} + \frac{\omega_s}{\omega_p} I'_{p0} cn^2[\sqrt{\frac{I'_{p0}}{I_{p0}}} \frac{\Gamma}{\gamma} z + K(\gamma), \gamma]$$

$$I_i(z) = \frac{\omega_i}{\omega_p} I'_{p0} cn^2[\sqrt{\frac{I'_{p0}}{I_{p0}}} \frac{\Gamma}{\gamma} z + K(\gamma), \gamma] \qquad (۱)$$

$$I_p(z) = I_{p0} - I'_{p0} cn^2[\sqrt{\frac{I'_{p0}}{I_{p0}}} \frac{\Gamma}{\gamma} z + K(\gamma), \gamma]$$

که:

$$I'_{p0} = I_{p0} - (\alpha - \beta)/2, \gamma = \sqrt{\frac{I'_{p0}}{\beta}}$$

$$\beta = \sqrt{\alpha^2 - \frac{\Delta k^2}{\Gamma^2} I_{p0}^2}, \alpha = \frac{\omega_p}{\omega_s} I_{s0} + (1 + \frac{\Delta k^2}{4\Gamma^2}) I_{p0}$$

$$\Gamma = \sqrt{\frac{2\omega_s \omega_i I_{p0} d_{eff}^2}{n_s n_i n_p c^3 \varepsilon_0}}, \Delta k = k_p - k_s - k_i$$

و K(γ) انتگرال بیضوی کامل نوع یک می‌باشد. تابع cn[u,γ] ۰≤γ≤۱, یک تابع Cosinc بیضوی ژاکوبی دو پارامتری متناوب است که در u=۰ ماکزیمم مقدار خود را دارد. بنابراین می‌توان با داشتن اطلاعات اولیه، طولی از کریستال را که در آن میزان شدت سیگنال تقویت شده ماکزیمم می‌گردد به-دست آورد:

$$L_{peak} = K(\gamma) \sqrt{\frac{I_{p0}}{I'_{p0}}} \frac{\gamma}{\Gamma} \qquad (۲)$$

**تاثیر شکل پروفایل‌ها بر فرآیند تقویت پارامتری:**

برای بررسی تاثیر شکل پروفایل پالس‌های برهم‌کنش کننده لازم است دید کلی از مفهوم فیزیکی آن به‌دست آوریم. ابتدا دو پالس پمپ و سیگنال گوسی را در نظر بگیرید و فرض کنید طول پالس سیگنال بسیار کوچکتر از طول پمپ باشد در این حالت تمام قسمت‌های سیگنال شدت یکسانی از پمپ را تجربه خواهند کرد. بنابراین پهنای باند بهره حداکثر و به اصطلاح پهنای باند بهره کامل را خواهیم داشت. با اینحال از آنجا که بخش بسیار زیادی از پمپ بدون استفاده باقی می-ماند، (سیگنالی در آن قسمت‌ها حضور ندارد) بازده کاهش می‌یابد. حال اگر طول پالس سیگنال برابر طول پمپ باشد با وجود اینکه می‌توان از تمام قسمت‌های پمپ استفاده کرد اما

[1] Optical Parametric Chirped Pulse Amplification
[2] Three waves mixing
[3] local approximation



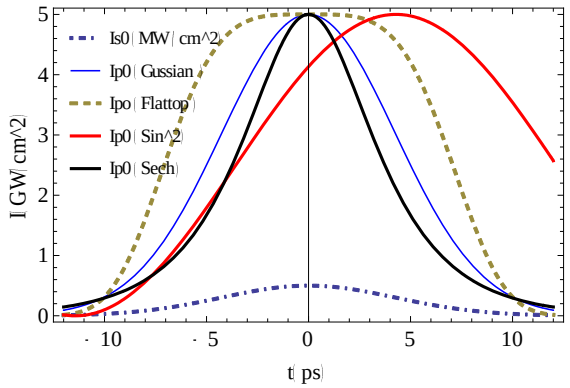
[ Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02 ]

بخش‌های متفاوت سیگنال، شدت‌های متفاوتی از پمپ را خواهند دید و به‌دلیل چیرپ بودن پالس سیگنال، طول موج-های متفاوت به‌میزان متفاوتی تقویت می‌شوند. بنابراین برعکس حالت قبل پهنای باند بهره حداقل و بازده بالایی خواهیم داشت. (بزرگتر بودن طول پالس سیگنال نیز به‌دلیل تقویت نشدن بخش‌هایی از سیگنال به هیچ وجه گزینه مناسبی برای تقویت نمی‌باشد). از آنجا که حداکثر کردن پهنای باند و بازده پارامتری از ملزومات طراحی درOPCPAها می‌باشد، داشتن طول و پروفایل مناسبی از پالس‌های برهم-کنش کننده بسیار مهم خواهد بود. از طرفی با توجه به تاثیر مستقیم پالس پمپ بر بهره پارامتری کارآمدترین گزینه تغییر پروفایل پمپ می‌باشد. بنابراین فاکتور EBP[۴] را که حاصلضرب پهنای باند و بازده پارامتری می‌باشد را تعریف کرده و به‌دنبال حداکثر کردن آن می‌باشیم[۴].

اولین راه حل درمورد حداکثر کردن فاکتور EBP در تقویت کننده‌های با بهره بالا ($I_p./I_s.=10^6$) مانند پیش تقویت کننده‌ها[۵] استفاده از پالس پمپی با پروفایل تخت و طولی تقریبا مشابه با طول پالس سیگنال می‌باشد. با این روش هم از تمام پالس پمپ استفاده می‌ود و هم تمام بخش‌های سیگنال با شدت یکسانی از پمپ تقویت می‌شوند.

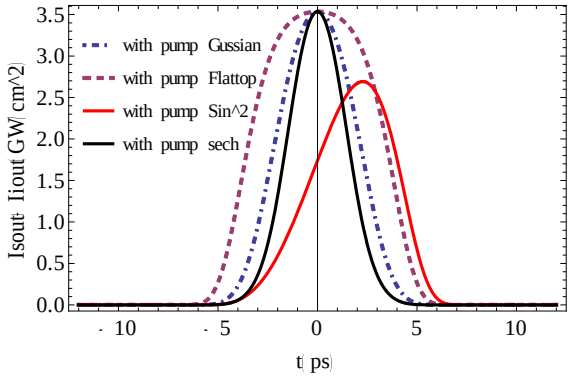
## نتایج محاسبات عددی

برای بررسی مطالب ارائه شده یک سیتم OPCPA تک مرحله ای با طول موج سیگنال ۱۰۶۴nm، طول موج پمپ ۵۳۲nm، طول پالس پمپ ۱۰ps ، شدت پمپ ۱۰Gw/cm$^2$ و شدت سیگنال ۰,۵Mw/cm$^2$ را در نظر می‌گیریم . شکل ۱ نمودار چند پروفایل را که در شبیه سازی‌ها به‌کار گرفته شده است نمایش می‌دهد.




شکل ۱: پروفایل‌های گوسین، تخت، sech و sin$^2$

حال با کمک معادلات به‌دست آمده (معادلات۱) پالس سیگنال و ایدلر تقویت شده را برای پالس‌های پمپ متفاوت به‌دست می‌آوریم(شکل ۲).




شکل ۲: پالس‌های سیگنال و ایدلر تقویت شده برای پمپ‌های متفاوت گوسی، تخت، sech و sin$^2$

نتایج این محاسبات نشان می‌دهد پالس سیگنال و ایدلر تقویت شده برای پروفایل پمپ گوسی و sech با وجود داشتن شدتی برابر، نسبت به پروفایل‌های پمپ تخت باریکتر می‌باشد. همچنین مشاهده می‌کنیم این تقویت برای پروفایل پمپ sin$^2$ هم نامتقارن بوده و هم با کاهش شدید شدت همراه شده است. بنابراین محاسبات را برای سه پروفایل گوسی، تخت و sech ادامه می‌دهیم.

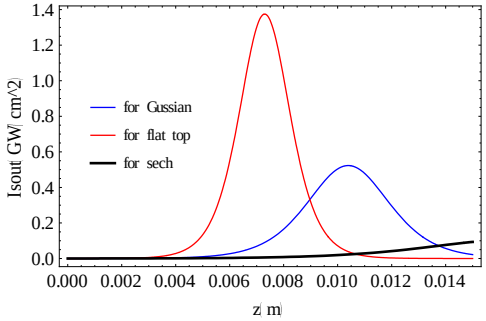
همان‌طور که ذکر شد طول کریستال نیز فاکتور مهمی برای طراحی به‌شمار می‌رود. شکل ۳ میزان تغییر پالس سیگنال تقویت شده را برای طول‌های متفاوت کریستال و درمورد پروفایل‌های مورد بحث نشان می‌دهد:

[۴] Efficiency Bandwidth Product

[۵] Preamplifier



[ Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02 ]




شکل ۳: شدت سیگنال تقویت شده برحسب طول برهم‌کنش و برای پروفایل های گوسی، تخت و sech

مشاهده می‌کنیم برای طول مشخصی از برهم‌کنش، این پالس تخت است که می‌تواند گزینه مناسب باشد، چرا که برای دستیابی به انرژی یکسان نیاز به طول برهم‌کنش کوچکتری نسبت به دو پالس دیگر دارد.

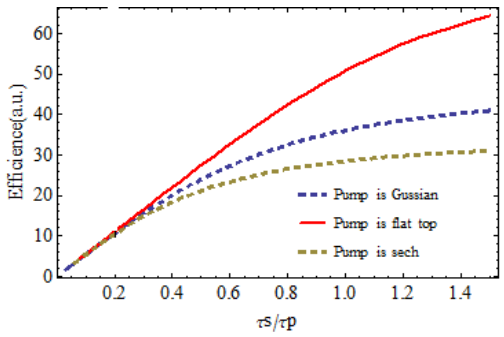
در قسمت بعد با توجه به معادلات زیر میزان پهنای باند و بازده را برای این پروفایل‌ها به‌دست می‌آوریم.

$$\eta = \int \frac{I_s(L) + I_i(L)}{I_{p0}} dt$$

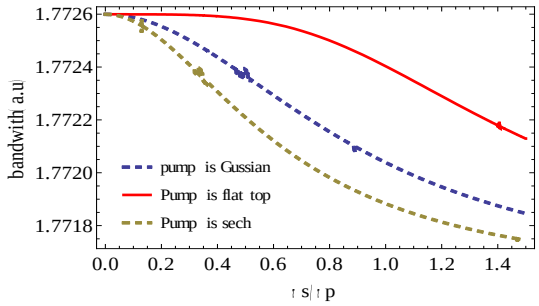
$$\Delta\omega = \left(\frac{\int \omega^2 I_s(\omega) d\omega}{\int I_s(\omega) d\omega}\right)^{0.5} \qquad (۳)$$

شکل ۴ بازده پارامتری(الف) و پهنای باند(ب) پالس سیگنال تقویت شده را نمایش می‌دهد، مشاهده می‌کنیم که هم میزان پهنای باند و هم بازده پارامتری برای پالس تخت ماکزیمم می‌باشد و این به معنی حداکثر شدن فاکتور EBP برای این پروفایل می‌باشد.

الف)




ب)




شکل ۴: الف)بازده و ب)پهنای باند پارامتری برای پالس‌های پمپ تخت sech و گوسی

## نتیجه‌گیری

با توجه به محاسبات عددی انجام شده می‌توان تاثیر پروفایل‌ها و طول پالس‌های برهم‌کنش کننده را در تقویت پارامتری مشاهده کرد. این نتایج بیان می‌کنند داشتن پروفایل تخت می‌تواند تاثیر به‌سزایی در خروجی تقویت کننده و تعیین طول کریستال داشته باشد.

## مراجع


[۱] J.A. ARMSTRONG, N. BLGEMEERGEN.," Interactions between Light Waves in a Nonlinear Dielectric." PH YSI CAL REVIEW, ۱۲۷,(۱۹۶۲).

[۲] R.A. Baumgartner, R. Byer, Optical parametric amplification, Quantum Electronics, IEEE Journal of, ۱۵ (۱۹۷۹) ٤۳۲-٤٤٤.

[۳] J. Moses, S.-W. Huang, Conformal profile theory for performance scaling of ultrabroadband optical parametric chirped pulse amplification, J. Opt. Soc. Am. B.(۲۰۱۱),۲۸،۸۱۲-۸۳۱.

[٤] I.N. Ross, P. Matousek, G.H.C. New, K .Osvay, Analysis and optimization of optical parametric chirped pulse amplification, J. Opt. Soc. Am. B, ۱۹ (۲۰۰۲) ۲۹٤٥-۲۹٥٦.




[ Downloaded from opsi.ir on 2026-07-02 ]