# تاثیر پدیده انحراف پرتو بر نیمرخ پرتوهای خروجی در OPCPA در مواد دومحوری

غلامرضا محمدی، فاضل جهانگیری و رضا مسعودی

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

**چکیده - تقویت پارامتری پالس‌های نوری چیرپ شده (OPCPA) را با در نظر گرفتن اثر انحراف پرتو در یک بلور غیرخطی دارای دو محور نوری به صورت عددی مورد مطالعه قرار می‌دهیم. با در نظر گرفتن باریکه سیگنال ورودی دارای نیمرخ گوسی و طول موج ۸۰۰ نانومتر و باریکه پمپ دارای نیمرخ سوپرگوسی مرتبه ۳ و طول موج ۵۳۲ نانومتر، تاثیر پدیده انحراف پرتو بر نیمرخ فضایی پرتو تقویت شده را بررسی کرده و شرایطی را که در آن تاثیر منفی ناشی از این پدیده کمینه می‌شود، استخراج می‌کنیم. در نتیجه‌ی این محاسبات، طول مناسب بلور مورد نیاز برای دستیابی به بیشترین بهره تقویت انرژی به دست آمده و همچنین بهترین کیفیت ممکن برای پرتو سیگنال تقویت شده حاصل می‌شود. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که با انتخاب مناسب شرایط اولیه می‌توان پدیده انحراف پرتو را که اثر قابل ملاحظه‌ای بر انتقال انرژی از پرتو پمپ به سینگال دارد محدود کرده و میزان تقویت حاصل را بهبود بخشید.**

کلید واژه- تقویت پارامتری، انحراف پرتو، نیمرخ پرتو، بلور دومحوری.

# The influence of the walk-off effect on the output beam profile in OPCPA in biaxial materials

Gholamreza Mohammadi, Fazel Jahangiri, and Reza massudi

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

Abstract- Optical parametric chirped pulse amplification (OPCPA) is numerically investigated in a nonlinear biaxial crystal by taking into account the walk-off effect. By considering a Gaussian signal beam with the wavelength of 800 nm and a third-order super-Gaussian pump beam at the wavelength of 532 nm, the influence of the walk-off effect on the spatial profile of the amplified beam is investigated and the conditions under which the influence of walk-off effect is minimized are extracted. Based on the calculations, the optimum crystal length for maximum energy gain is obtained and the best possible beam quality for the amplified signal is achieved. Our results reveal that the unwanted influence of the walk-off effect on the energy conversion from pump beam to the signal would be minimized under the properly chosen conditions and leads to an improved amplification gain.

Keywords: parametric amplification, walk-off, beam profile, biaxial crystal.

## ۱- مقدمه

با گذشت نزدیک به سه دهه از پیشنهاد روش تقویت پارامتری



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

پالس‌های لیزری چیرپ‌شده(OPCPA) توسط دوبیتس[۱]، این روش به یک فناوری حیاتی در سیستم‌های لیزری فوق کوتاه و شدت بالا تبدیل شده و امکان دستیابی به توان‌های بسیار بالا از مرتبه پتاوات[۲] را فراهم آورده است. علت توسعه این فناوری، مزایای نسبی آن در مقایسه با روش استاندارد تقویت پالس‌های لیزری چیرپ‌شده(CPA) است که از جمله آنها عبارتند از پهنای باند تقویت بیشتر، بهره یک‌بار عبور بالاتر، به حداقل رسیدن اثرات حرارتی، کوک‌پذیری طول موجی و تولید باریکه‌ای پر شدت در طول موجی غیر از طول موج‌های ورودی. این مزایا در کاربردهای روز افزون پالس‌های لیزری فوق کوتاه و پرشدت نظیر تولید تابش‌های اشعه X فوق سریع، تحقیق و مطالعه در زمینه برهمکنش‌های لیزر با مواد، شتاب ذرات باردار و ایجاد ساختارهای داخلی درون مواد دارای اهمیت می‌باشد. از این رو، این فناوری توجه بسیاری از فعالان این حوزه را به خود جلب کرده و در بسیاری از سیستم‌های لیزری توان بالا مورد استفاده قرار گرفته است [۱][۳].

در کنار مزایای قابل توجه این روش، OPCPA نیز مانند هر روش دیگری ایرادها و چالش‌های خاص خود را دارد که از جمله مهمترین آنها عبارتند از وابستگی شدید به زاویه تطبیق فاز، همزمان‌سازی بین پالس‌ها، وجود پالس پمپ با توان بالا و سوپر فلورسانس پارامتری زمینه[۴].

از دیگر چالش‌های این روش می‌توان به مشخصات فضایی باریکه تقویت شده اشاره کرد که از نظر کاربردی دارای اهمیت فراوان می‌باشد. در این روش، بارگیری حرارتی ناچیز محیط تقویت می‌تواند به بهبود نیمرخ عرضی پالس تقویت شده کمک کند؛ اما پدیده انحراف پرتو[۳] که منشأ خطی دارد باعث کاهش کیفیت باریکه خروجی می‌شود. در نتیجه، بررسی میزان تاثیر همزمان این دو پدیده بر کیفیت باریکه خروجی و پیش‌بینی نحوه کنترل آن با کمک پارامترهای اولیه پالس از اهمیت تجربی برخوردار است که موضوع مقاله حاضر است. در این مقاله به شبیه‌سازی پدیده انحراف پرتو در طی فرآیند OPCPA در بلورهای غیرخطی دو محوری می‌پردازیم و تاثیر آن بر کیفیت باریکه خروجی را مورد بررسی قرار می‌دهیم. نتایج بررسی‌های ما نشان دهنده تأثیر شدید پدیده انحراف پرتو بر نیمرخ سیگنال تقویت شده است که می‌توان با تامین شرایط مناسب آن را به کمترین مقدار ممکن کاهش داد.

## ۲- اصول و مدل تئوری

فرآیند غیرخطی تقویت پارامتری اپتیکی(OPA)[۴] تکنیکی متداول برای تولید یک باریکه تقویت‌شده‌است که توسط شرایط تطبیق فازی، شامل اصل بقای اندازه حرکت خطی و اصل بقای انرژی، تعیین می‌شود. در این فرآیند، قطبش میدان‌ها از اهمیت برخوردار است به طوری‌که از میان تمام قطبش‌های ورودی به ماده، تنها یک قطبش در فرآیند غیرخطی شرکت کرده و تقویت می‌شود. محیط‌هایی که برای OPCPA استفاده می‌شوند، بلورهای خنثی، عایق و غیرمغناطیسی هستند که در جهت‌های مختلف بسته به قطبش فرودی ضرایب شکست متفاوتی دارند. این بلورها نسبت به مرکز نامتقارن‌اند، در طیف نسبتاً وسیعی از طول موج‌ها شفاف‌اند و ضرایب غیرخطی به نسبت بزرگی دارند.

در اپتیک خطی دوقطبی‌های ایجاد شده در ماده، با استفاده از یک تانسور رتبه دو به میدان الکتریکی مرتبط می‌شود. این رابطه باعث می‌شود که در حالت کلی بردارهای D و E هم جهت نباشند. در شرایط دور از جذب (که فرآیندهای پارامتری چنین‌اند) می‌توان دستگاه مختصاتی انتخاب کرد که در آن تانسور پذیرفتاری قطری باشد؛ این دستگاه را دستگاه اصلی می‌نامند. شبیه‌سازی‌های این مقاله برای بلورهای دومحوری انجام شده‌است که در دستگاه اصلی، سه عضو قطری تانسور پذیرفتاری از یکدیگر مستقل‌اند.

با استفاده از نظریه پوینتینگ و با فرض هم جهت نبودن بردارهای D و E، جهت انتشار انرژی و بردار موج متفاوت خواهد بود که پدیده انحراف پرتو را به وجود می‌آورد. به دلیل تفاوت در قطبش‌های ورودی، حتی در حالت هم‌خط نیز پرتوها از یکدیگر باز شده و بر فرآیند اثری منفی می‌گذارند.

با شروع از معادلات ماکسول و فرض موج تخت، معادله موج به صورت زیر در می‌آید:

$$\vec{\nabla} \times \vec{\nabla} \times \vec{\boldsymbol{E}}_m - k_{0m}^2 \vec{\varepsilon}_m \vec{\boldsymbol{E}}_m = 0 \qquad (۱)$$

در معادله فوق $k_{0m}$ اندازه بردار موج فرکانس $\omega_m$ در خلاء و $\vec{\varepsilon}_m$ تانسور قطری پذیرفتاری نسبی ماده است، مقادیر قطر اصلی، ضرایب شکست اصلی بلور هستند که از رابطه سلمایر به دست آمده‌اند. با ضرب ماتریس دوران در معادله (۱)، جهت Z بر جهت بردار موج منطبق می‌شود. برای راحتی محاسبات، مؤلفه میدان الکتریکی درون صفحه X-Y را در جهت یکی از محورهای اصلی دستگاه مختصات دوران یافته قرار می‌دهیم. از آن‌جا که میدان الکتریکی هر مولفه‌ی فرکانسی در مد قطبشی خاصی نوسان می‌کند، می‌توان میدان الکتریکی دوران یافته را به صورت زیر بازنویسی کرد.

$$\vec{\boldsymbol{E}}_m(x,y,z) = E_m(x,y,z)\, e^{ik_{0m}N_m z}\, \hat{u}_m \qquad (۲)$$

با قرار دادن معادله (۲) در معادله (۱) و ضرب کردن $\hat{u}_m$ به صورت ضرب داخلی در آن، معادله زیر به دست می‌آید:

---

۱ Optical Parametric Chirped Pulse Amplification
۲ Chirped Pulse Amplification
۳ Walk-off
۴ Optical Parametric Amplification



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

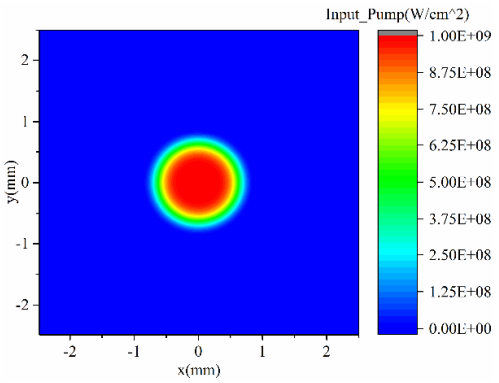
[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

$$\left(\hat{u}_m \cdot \vec{\nabla}\right)^2 E_m - \nabla^2 E_m - k_{0m}^2 s_m E_m = 0 \quad (۳)$$

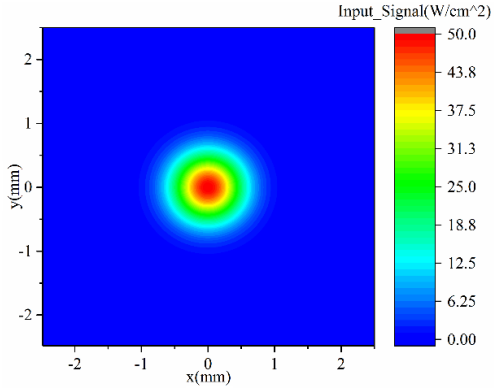
که در آن عدد $s_m$ حاصل قرار گرفتن تانسور دوران یافته پذیرفتاری نسبی در میان یکه‌های بردار میدان الکتریکی ($\hat{u}_m$) است. همچنین می‌توان برای ساده‌تر شدن محاسبات از تقریب کند تغییر[۵](SVA) در جهت انتشار استفاده کرد[۵].

برای حل عددی معادله (۳) از طول موج ۸۰۰nm و ۵۳۲nm برای پالس‌های سیگنال و پمپ استفاده شده‌است. انتشار در دستگاه اصلی، در صفحه X-Y (به جهت کمینه کردن زاویه انحراف پرتو) و در زاویه ۱۱٫۲° نسبت به محور X انتخاب شده که در رابطه تطبیق فازی نوع اول صدق می‌کنند. به منظور دستیابی به بهره تقویت مناسب، برای باریکه سیگنال از توزیع عرضی گوسی و برای باریکه پمپ از توزیع سوپر گوسی مرتبه سوم استفاده شده است که هر دو قطری به اندازه ۱٫۵ mm داشته‌اند. قله شدت برای پرتو پمپ برابر با ۱ $GW/cm^2$ و برای باریکه سیگنال برابر با ۵۰ $W/cm^2$ انتخاب شده است. محیط تقویت یک بلور دو محوری LBO است که رآیند تقویت پارامتری با بازده خوبی در آن اتفاق می‌افتد. به منظور حفظ کیفیت پرتو تقویت‌شده، عدم تولید پمپ توسط سیگنال و ایدلر را به عنوان شرط محدود کننده‌ی محاسبات در نظر می‌گیریم. اعمال این شرط در محاسبات معادل آن است که طول بلور غیرخطی را برابر با ۲۱mm فرض کنیم.

شکل (۱) و (۲) لکه ورودی (شرایط اولیه) برای پرتو پمپ و سیگنال را نشان می‌دهد. با حل عددی معادله (۳) در شرایط فوق، لکه پمپ کمی به راست متمایل می‌شود؛ اما پرتو سیگنال به دلیل هم جهتی بردارهای D و E دچار جابه‌جا نمی‌شود.

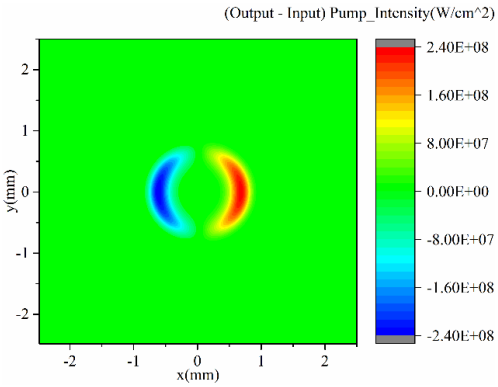



شکل ۱: نیمرخ پرتو پمپ در ورود به بلور




شکل ۲: نیمرخ پرتو سیگنال در ورود به بلور

شکل (۳) میزان تغییرات شدت باریکه پمپ خروجی نسبت به ورودی را در سطح مقطع آنها نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که اختلاف شدت بین نیمرخ ورودی و خروجی پمپ پس از تقویت، در سمت راست آن بیشتر است که حاکی از انحراف پرتو به سمت راست می‌باشد. این انحراف هرچند ناچیز، برکیفیت پرتو تقویت شده اثر گذار است.




شکل ۳: اختلاف بین نیمرخ پرتو پمپ در ورودی و خروجی بلور

به جهت بررسی فرآیند OPCPA از تئوری OPA که بر پایه‌ی فرآیند تولید فرکانس تفاضلی بنا شده است استفاده می‌کنیم. با قرار دادن جمله دوقطبی غیرخطی ماده در معادله (۳) این کار انجام می‌شود. با اعمال شرط تطبیق فاز کامل، دسته معادلات غیرخطی فرآیند تقویت اپتیکی به دست می‌آیند:

$$\begin{aligned}
\left(\hat{u}_p \cdot \vec{\nabla}\right)^2 E_p - \nabla^2 E_p - k_{0p}^2 s_p E_p &= 4k_{0p}^2 d_{eff} E_s E_i \\
\left(\hat{u}_s \cdot \vec{\nabla}\right)^2 E_s - \nabla^2 E_s - k_{0s}^2 s_s E_s &= 4k_{0s}^2 d_{eff} E_p E_i^* \quad (۴) \\
\left(\hat{u}_i \cdot \vec{\nabla}\right)^2 E_i - \nabla^2 E_i - k_{0i}^2 s_i E_i &= 4k_{0i}^2 d_{eff} E_p E_s^*
\end{aligned}$$

در معادلات فوق $d_{eff}$ ضریب اسکالر غیرخطی مرتبه دوم و اندیس‌های i ، s و p مربوط به پرتوهای ایدلر[۶]، سیگنال و پمپ هستند. با وارد کردن شرایط اولیه بخش قبل، با استفاده از روش تقسیم گام

[۵] Slowly Varying Approximation

[۶] Idler

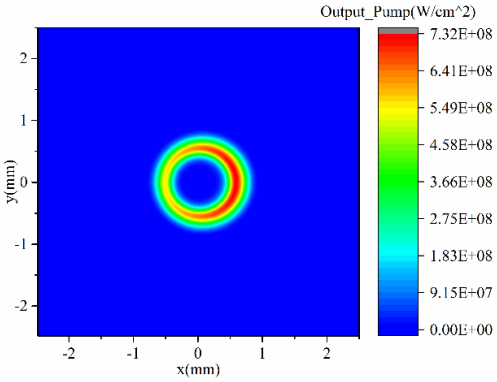


این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد

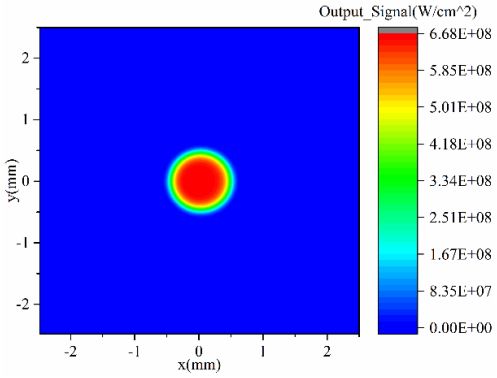
[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]

فوریه[۷](SSFM) به حل عددی معادلات انتشار غیرخطی می‌پردازیم.

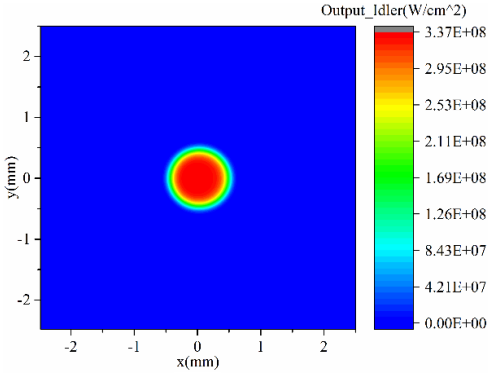
آن‌گونه که اشاره شد، در فرآیند تقویت، پدیده انحراف پرتو پرتو پمپ را کمی از مسیر خود منحرف می‌کند، این امر باعث از دست رفتن تقارن سمتی لکه پمپ خروجی می‌شود (شکل۳و۴). به دلیل متمایل شدن نیمرخ پرتو سیگنال به پمپ بایستی اثر پدیده انحراف پرتو کمینه شود. این کار پرتو سیگنال تقویت شده‌ای با کیفیت بالا به وجود می‌آورد که بیشینه شدت آن به $۶۶۸\ MW/cm^2$ می‌رسد (شکل۵). در فرآیند تقویت، باقی‌مانده‌ی انرژی در فرکانسی دیگر تابش می‌شود. این پرتو (پرتو ایدلر) خود با پرتو پمپ برهمکنش کرده و به تقویت پرتو سیگنال کمک می‌کند. پرتو ایدلر به دلیل کیفیت و شدت بالا می‌تواند در کاربردهای زیادی مورد استفاده قرار بگیرد (شکل ۶).




شکل ۴: نیمرخ لکه پمپ در انتهای بلور با اعمال تقویت غیرخطی




شکل ۵: نیمرخ لکه سیگنال در انتهای بلور با اعمال تقویت غیرخطی




شکل ۶: نیمرخ لکه‌ی ایدلر تولید شده در خروجی بلور

## ۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله، تقویت پرتو سیگنال با رسیدن بیشینه شدت از $۵۰\ W/cm^2$ به $۶۶۸\ MW/cm^2$ نمایان است. بهره یکبار عبور بالا، کیفیت پرتو خوب، پرتو ایدلر پر شدت، با کیفیت بالا مواردی قابل ملاحظه از مزایای این روش است که در این شبیه‌سازی به خوبی دیده می‌شوند. با کم‌کردن اثر پدیده انحراف پرتو به کمترین مقدار، باز هم تأثیر آن قابل مشاهده است. از آن جمله می‌توان به باقی ماندن بخش قابل ملاحظه‌ای از انرژی در پرتو پمپ اشاره کرد.

## مراجع


[۱] X.-D. Liu, L. Xu, and X.-Y. Liang, *Optics Communications*, vol. 383, pp. 197-207, 2017.

[۲] V. Lozhkarev, G. Freidman, V. Ginzburg ,E. Katin, E. Khazanov, A. Kirsanov, G. Luchinin, A. Mal'Shakov, M. Martyanov, and O. Palashov, *Laser Physics Letters*, vol. 4, no. 6, pp. 421, 2007.

[۳] W. Li, L. Yu, C. Peng, and X. Liang, *Optics Communications*, vol. 403, pp. 81-86, 2017.

[۴] غفاری. سپیده، جهانگیری. فاضل، محمدی. غلامرضا، مسعودی. رضا، بیست وسومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران ، ۱۳۹۵.

[۵] M. Dreger, *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, vol. 1, no. 5, pp. 601, 1999.


[۷] Split Step Fourier Method



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-03 ]