

بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران. ۱۳۹۸ بهمن ۱۳۹۸



بهینه سازی پارامترهای موثر در بهره تقویتگر پارامتریک نوری غیرهمراستا با پالسهای فمتوثانیه و قابل تنظیم در ناحیه طول موجی ۸۳۰–۷۲۰

فاطمه کمندی، آتوسا سادات عربانیان*، رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران(*a_arabanian@sbu.ac.ir)

چکیده – در این مقاله به برر سی عددی پارامترهای موثر در بهره تقویتگر پارامتریک نوری غیرهمرا ستا (NOPA) در گ ستره طول موجیma ۷۰۰–۷۲۰ پرداخته شده ا ست. برای این منظور مقادیر زاویه تطبیق فازی، زاویه غیرهمرا ستایی و ضخامت کری ستال غیرخطی BBO بهینه خواهند شــد. محاســبات عددی نشــان میدهدکه زاویه غیرهمراســتایی و تطبیق فازی بهینه برای تقویت یکنواخت کل گ ستره طیفی nm ۷۰۰–۷۲۰، به ترتیب برابر ۳/۹۱ و ۳۲/۲۷ درجه میبا شد. همچنین اثر کنار گذر داخل کری ستال به واسطه این هندسه غیرهمراستا کاهش می یابد.

كليد واژه-NOPA ، پالس فمتو ثانيه، زاويه غيرهمراستايي

Optimization of effective parameters on the Non-collinear Optical Parametric Amplifier gain with femtosecond pulses and tunable in the wavelength range of 520-700 nm

Fateme Kamandi, Atoosa sadat Arabanian*, Reza Massudi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Evin, Tehran

Abstract- In this paper the effective parameters on the non-collinear optical parametric amplifier (NOPA) gain in the wavelength range of 520-700 nm have been numerically investigated. For this purpose, the phase matching and non-collinear angle and the thickness of the crystal is optimized. Therefore, the numerical calculation show that the optimum non-collinear and phase matching angles for uniform amplification on whole spectrum range of 520-700 nm are equal to 3.91 and 32.27 degree, respectively. Also, by using this non-collinear geometry the walk-off effect inside the crystal is reduced.

Keywords: NOPA, femtosecond pulse, non-collinear angle

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

انرژی خود را به باریکه ضعیفتر با فرکانس ω_s انتقال میدهد. برای برقراری اصل بقای انرژی باریکه سومی با فرکانس ω_i تولید میشود. در این حالت رابطهی بین فرکانسها به صورت میشود. در این حالت رابطهی بین فرکانسها به صورت $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ یا به عبارت دیگر شرط تطبیق فازی موجب میشود که بردارهای سه موج به صورت $k_p = k_s + k_i$ با یکدیگر رابطه داشته باشند. اگر در فرآیند OPA، بردارهای موج با هم موازی نباشند، هندسه اگر در آن باریکههای بردارهای موج با هم موازی نباشند، هندسه غیرهمخط یا NOPA مطابق شکل (۱) به کار گرفته شده است. وارد کریستال می شوند. زاویه تطبیق فازی θ در کریستال دو شکستی NOPA، به انتخاب زاویهی α بستگی دارد. بنابراین MOPA امکان وجود یک درجه آزادی بیشتر را فراهم میکند.



شکل ۱: بردارهای موج در هندسه غیرهمراستا

مطابق با شکل (۱)، عدم تطابق بردارهای موج در دو راستای موازی و عمود بر راستای انتشار باریکه سیگنال با رابطه (۱) داده شده است.

$$\Delta k_{\perp} = k_s + k_i \cos \beta - k_p \cos \alpha$$

$$\Delta k_{\perp} = k_i \sin \beta - k_p \sin \alpha$$
(1)

با نادیده گرفتن افت پمپ و سایر اثرات، مانند جذب نور در کریستال، بهره برای محیطی به طول L با رابطه (۲) به دست آمده است[۲]:

$$G = I_{out} / I_{in} = 1 + \left(\left(\Gamma / g\right) \sinh(gL)\right)^{2}$$

$$g^{2} = \Gamma^{2} - \frac{\left|\Delta k\right|}{4}, \Gamma^{2} = \frac{2d_{eff} \omega_{s} \omega_{p} I_{p}}{c^{3} \varepsilon_{0} n_{s} n_{p} n_{i}}$$

$$(\Upsilon)$$

در رابطه (۲)، ضریب غیرخطی موثر در کریستال BBO با رابطهی در رابطه (۲)، ضریب غیرخطی موثر در کریستال BBO با رابطهی $d_{eff} = d_{31} \sin(\theta) - d_{22} \cos(\theta) \sin(\Phi)$ که در آن $// d_{21} = 0.04 pm$ و $// d_{22} = 2.2 pm$ هستند[۵]. با توجه به معادلهی (۲)، بهره علاوه بر Δk به ضخامت کریستال هم بستگی دارد. برای تخمین ضخامت کریستال، دو معیار مقدمه

بسیاری از مطالعات جدید روی برهمکنش نور-ماده به پالسهای اپتیکی با پهنای زمانی کوتاه و گستره طیفی قابل تنظیم نیاز دارند. هر دو عامل در حوزههای فیزیک انرژیهای بالا و اسپکتروسکوپی بسیار پر اهمیت هستند. گستره طیفی قابل تنظیم در منابعی مانند تقویت پالسهای چیرپ (CPA) در ناحیهی کمی حول فرکانس اصلی (ν/۸ μm) یا حول هارمونیک دوم آن (۰/۴ µm) صورت می گیرد. برای گسترش بازه طیفی این منابع خصوصا به ناحیه مرئی، از روش غیرخطی تقویتگر پارامتریک نوری (OPA) استفاده می کنند تا علاوه بر تقویت انرژی پالسهای فوق کوتاه، ناحیه طول موجی قابل تنظیم را افزایش دهند. روش OPA با هندسه همراستا برای پالسهای بسیار کوتاه (> ۲۰ فمتوثانیه) به دلیل پهنای باند وسیعشان، دچار محدودیتهایی در رسیدن به شرط تطابق فازی مناسب می شود. به همین دلیل روش OPA با هندسه ی غیرهمراستا (NOPA) که در آن امواج پمپ و سیگنال در یک هندسه غیرهمخط داخل کریستال برهمکنش میکنند، به کار برده می شود. از سال ۱۹۹۸ تا کنون گزارشات تجربی متعددی روی دستیابی به پالسهایی در ناحیه طیف مرئی با استفاده از هندسه NOPA ارائه شده است [۱] و [۲]. در سال های اخیر نشان دادند که با استفاده از ساختار NOPA علاوه بر نواحی طیف مرئی، دستيابي به نواحي فروسرخ هم امكان پذير است [۳] و [۴].

هدف پژوهش حاضر به دست آوردن بهره مناسب برای تقویت طول موجهای موجود در بازه طول موجی ۸۳۰ -۷۰۰ با استفاده از هندسه غیرهمخط OPA است. در این پژوهش پارامترهای بهینه اثرگذار در بهره تقویتگر پارامتریک نوری غیرهمراستا نظیر زوایای تطبیق فازی و غیرهمراستایی و طول کریستال غیرخطی BBO به صورت عددی تعیین میشود و اثبات میشود که هندسه غیرهمراستا در کاهش اثر کنارگذر موثر خواهد بود.

تئورى تقويتگر پارامتريک نورى غيرهمراستا

تقویتگر پارامتریک نوری (OPA) یک اثر غیرخطی مرتبه دوم است که در آن یک باریکه پر شدت با فرکانس w_p ، مقداری از

محدود کننده طول همدوسی و طول جدایی پالس باید در نظر \mathcal{R} نقرد. در اینجا طول همدوسی طولی است که در آن اختلاف فاز بین دو موج برهمکنش کننده به مقدار π برسد و رابطه آن به صورت $\Delta k / \Delta k$ میباشد[۵]. سرعتهای گروه متفاوت سه موج برهمکنش کننده موجب میشود که باریکهها متفاوت سه موج برهمکنش کننده موجب میشود که باریکهها معداز فاصله یا عنوان بعد از فاصلهی انتشار معینی از هم جدا شوند. این فاصله با عنوان طول جدایی پالس با رابطه ($(qy) - (1/v_{gg}) - (1/v_{gg})$ داده میشود که در آن τ طول جدایی پالس با رابطه ($(qy) - (1/v_{gg}) - (1/v_{gg})$ داده میشود که در آن τ طول FWHM موج پمپ بوده و i = s, i میشود که در آن τ طول FWHM موج پمپ بوده و i = s, i است.

از طرفی موج غیر عادی در کریستال دو شکستی حتی در فرود عمود هم میشکند و طبق رابطه (۳) تحت زاویه کنارگذر *p* نسبت به موج عادی داخل کریستال انتشار مییابد[۲]:

$$\rho(\theta) = \arctan((n_o / n_e)^2 \tan(\theta)) - \theta \qquad (\Upsilon)$$

با کاهش اثر کنار گذر انتقال انرژی بین باریکهها بیشتر شده و همپوشانی فضایی بین آنها افزایش مییابد.

نتایج شبیه سازی

با استفاده از رابطه (۱) منحنی های تطبیق فازی برای زاویههای غیرهمراستایی مختلف در کریستال BBO با موج پمپ با طول موج ۳۹۰nm در شکل (۲) نمایش داده شده است.



شکل ۲: زاویه تطابق فازی در کریستال BBO بر حسب طول موج برای زاویههای غیرهمراستایی مختلف ۵ با پمپ ۳۹۰ m

با توجه به شکل (۲) زاویه تطبیق فازی heta در یک زاویه غیرهمراستایی معین α ، با طول موج تغییر میکند. بنابراین

زاویه α بهینه، باید طوری انتخاب شود که در بازه ی طول موجی مطلوب یعنی nm ۲۰۰–۲۰۰۵، به اندازه کافی یکنواخت باشد. بنابراین با توجه به شکل، زاویه غیرهمراستایی ۳/۹۱ درجه، مناسب ترین زاویه برای دستیابی به این گستره طول موجی است. برای تعیین دقیق تر منحنی تطبیق فازی بهینه، عدم تطابق بردار موج ΔA ، روی ۵۰۰ نقطه طول موجی بین nm ۲۰۰–۵۲۰ در θ و α مختلف به صورت عددی جمع زده شد و نتیجه به صورت منحنی $|\Delta k| \propto 1$ بر حسب زاویه تطبیق فازی θ به ازای زوایای غیرهمراستایی مختلف مطابق شکل (۳) ترسیم شده است. تلفیقی از θ و α هایی که کمترین $|\Delta k| \propto 1$ در گستره طیفی مطلوب دارند، زاویههای مناسب تری هستند.



شکل ۳: تغییرات | ∆ | ∑ بر حسب طول موج برای ۵۰۰ نقطه ی طول موجی بین ۲۰۰ ۵۲۰-۵۲۰

شکل (۳) نشان میدهد که $|\Delta k|$ برای lpha=3.91 و $lpha^{\circ}=32.27$

از سوی دیگر با ترسیم زاویه کنار گذر ρ بر حسب زاویه تطبیق فازی مطابق شکل (۴) مشاهده می شود که زاویه کنار گذر در زاویه ۳۲/۲۷ درجه برابر با ۴/۱ درجه بوده که نزدیک به زاویه غیرهمراستایی ۳/۹۱ درجه می باشد. بنابراین بخش قابل ملاحظه ای از اثر کنار گذر با تنظیم زاویه غیرهمراستایی می تواند جبران شود.



٨٧٩

شکل ۴: تغییرات زاویهی کنار گذر بر حسب زاویه تطبیق فازی برای تعیین ضخامت کریستال منحنیهای طول همدوسی و طول جدایی پالس به ترتیب مطابق شکلهای ۴ (الف) و (ب) در گستره طول موجی مورد نظر رسم شدهاند.



شکل ۵: تغییرات (الف) طول همدوسی و (ب) طول جدایی پالس بر حسب طول موج در کریستال BBO در $\theta = 32.27^\circ$

دو قله موجود در شکل ۵(الف) نشان میدهد که تطبیق فازی کامل در طول موجهای ۵۴۵ m ۵۴۵ و ۶۱۷ وجود دارد که با دور شدن از این طول موجها طول همدوسی به سرعت کاهش مییابد. مشاهده میشود که طول همدوسی در کل ناحیه طیفی مورد نظر بیشتر از ۳m ۱/۶ است. از طرفی در شکل ۵(ب) مشاهده میکنیم که طول جدایی پالس باریکه ایدلر در طول موج مشاهده میکنیم که طول جدایی پالس باریکه ایدلر در طول موج مشاهده میکنیم که طول جدایی پالس باریکه ایدلر در طول موج مشاهده میکنیم که طول جدایی پالس باریکه ایدلر در طول موج مشاهده میکنیم که طول جدایی پالس باریکه ایدلر در طول موج مدا در این مقدار باشد. در این شکل طول پالس پمپ ۴۰۰ fs در نظر گرفته شده است.

در نهایت شبیه سازی بهره به ازای پارامترهای بهینه به دست آمد. منحنی بهره برای کریستال BBO به ضخامت ۱ mm و زاویه تطبیق فازی بهینه ۳۲/۲۷ درجه و موج پمپ با طول موج

۳۹۰nm و شدت ² *GW / cm* و شدت ² GW / cm در سه زاویه غیرهمراستایی حول مقدار بهینه ۳/۹۱ درجه در شکل (۶) رسم شده است.



شکل ۶: تغییرات بهره برای L = 1mm ، $heta = 32.27^{\circ}$ و شدت L = 1mm ، σ^{2} و شدت $50GW \ / cm^{2}$

با مقایسهی منحنیهای شکل (۶) مشاهده می شود که در زاویه غیرهمراستایی ۳/۹۱ درجه، بهره در بیشتر بازه طول موجی مورد نظر یکنواخت تر بوده و کل ناحیه طیفی را می پوشاند.

نتيجه گيرى

در این پژوهش به بررسی عددی پارامترهای موثر تقویتگر پارامتریک نوری غیرهمراستا پرداخته شد. نتایج محاسبات نشان داد که با انتخاب زوایای غیرهمراستایی و تطبیق فازی بهینه به ترتیب ۳/۹۱ و ۳۲/۲۷ درجه، تقویت یکنواخت در کل گستره طیفی ۳۸ ۷۰۰–۵۲۰ حاصل می شود. ضخامت بهینه کریستال با در نظر گرفتن اثرات محدود کننده طول همدوسی و طول جدایی پالس تعیین و برابر ۱ mm ۲ تخمین زده شد. به علاوه نشان داده شد که با وجود این زاویه غیرهمراستایی اثر کنار گذر داخل کریستال تا حد زیادی کاهش می یابد.

منابع

- .' Cerullo, G., et al., Mirror-dispersion-controlled sub-10-fs optical parametric amplifier in the visible. Optics letters, 1999. 24(21): p. 1529-1531.
- .Y Manzoni, C. and G. Cerullo, *Design criteria for ultrafast optical parametric amplifiers*. Journal of Optics, 2016. 18(10): p. 103501.
- Nienhuys, H.-K. and H.J. Bakker, Noncollinear optical parametric amplification in potassium titanyl phosphate pumped at 800 nm. Applied optics, 2008. 47(15): p. 2870-2873.
 Grupp, A., et al., Broadly tunable ultrafast pump-probe
 - Grupp, A., et al., *Broadly tunable ultrafast pump-probe* system operating at multi-kHz repetition rate. Journal of Optics, 2018. **20**.(1)
 - Saleh, B.E. and M.C. Teich, *Fundamentals of photonics*. 2019: John Wiley & Sons.

.0