بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
15-16 بهمن ۱۳۹۸

بهینه سازی پارامترهای موثر در بهره تقویتگر پارامتریک نوری غیرهمراستا با پالس‌های فمتوثانیه و قابل تنظیم در ناحیه طول موجی ۵۲۰-۷۰۰ nm

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 بررسی عددی پارامترهای موثر در بهره تقویتگر پارامتریک نوری غیرهمراستا (NOPA) در گستره طول موجی ۵۲۰-۷۰۰ nm پرداخته شده است. برای این منظور مقادیر زاویه تطبیق فازی، زاویه غیرهمراستایی و ضخامت کریستال غیرخطی BBO بهینه خواهند شد. محاسبات عددی نشان می‌دهدکه زاویه غیرهمراستایی و تطبیق فازی بهینه برای تقویت یکنواخت کل گستره طیفی ۵۲۰-۷۰۰ nm، به ترتیب برابر ۳/۹۱ و ۳۲/۲۷ درجه می‌باشد. همچنین اثر کنار گذر داخل کریستال به واسطه این هندسه غیرهمراستا کاهش می‌یابد.

کلید واژه-NOPA ، پالس فمتو ثانیه، زاویه غیرهمراستایی

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.

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

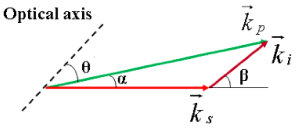
مقدمه

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 (۰/۸ µm) یا حول هارمونیک دوم آن (۰/۴ µm) صورت می‌گیرد. برای گسترش بازه طیفی این منابع خصوصا به ناحیه مرئی، از روش غیرخطی تقویتگر پارامتریک نوری (OPA) استفاده می‌کنند 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 می‌شود. به همین دلیل روش OPA با هندسه‌ی غیرهمراستا (NOPA) که در آن امواج پمپ و سیگنال در یک هندسه غیرهم‌خط داخل کریستال برهمکنش می‌کنند، به کار برده می‌شود. 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، دستیابی به نواحی فروسرخ هم امکان پذیر است [۳] و [۴].

هدف پژوهش حاضر به دست آوردن بهره مناسب برای تقویت طول موج‌های موجود در بازه طول موجی ۵۲۰-۷۰۰ nm 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.

تئوری تقویتگر پارامتریک نوری غیرهمراستا

تقویتگر پارامتریک نوری (OPA) یک اثر غیرخطی مرتبه دوم است که در آن یک باریکه پر شدت با فرکانس ω_p، مقداری از 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 $\omega_p = \omega_s + \omega_i$ داده می‌شود. در فرآیند OPA اصل بقای تکانه 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 غیرهم‌خط یا NOPA مطابق شکل (۱) به کار گرفته شده است. که در آن باریکه‌های پمپ و سیگنال با زاویه غیرهمراستایی α وارد کریستال می شوند. زاویه تطبیق فازی θ در کریستال دو شکستی NOPA، به انتخاب زاویه‌ی α بستگی دارد. بنابراین NOPA 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.

$$\Delta k_{\parallel} = k_s + k_i \cos\beta - k_p \cos\alpha$$
$$\Delta k_{\perp} = k_i \sin\beta - k_p \sin\alpha \qquad (۱)$$

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]:

$$G = I_{out} / I_{in} = 1 + ((\Gamma / g)\sinh(gL))^2$$
$$g^2 = \Gamma^2 - \frac{|\Delta k|}{4}, \Gamma^2 = \frac{2 d_{eff}\,\omega_s \omega_p I_p}{c^3 \varepsilon_0 n_s n_p n_i} \qquad (۲)$$

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

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

محدود کننده طول همدوسی و طول جدایی پالس باید در نظر گرفته شود. 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 $L_c = 2\pi / \Delta k$ می‌باشد[۵]. سرعت‌های گروه متفاوت سه موج برهمکنش کننده موجب می‌شود که باریکه‌ها بعد از فاصله‌ی انتشار معینی از هم جدا شوند. این فاصله با عنوان طول جدایی پالس با رابطه $l_{jp} = \tau / ((1/\upsilon_{gj}) - (1/\upsilon_{gp}))$ داده می‌شود که در آن τ طول $FWHM$ موج پمپ بوده و $j = s, i$ است[۲]. بنابراین پالس‌های کوتاه‌تر فمتوثانیه در تعیین ضخامت کریستال محدودیت بیشتری ایجاد می‌کنند.

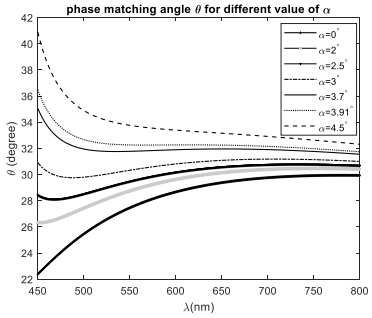
از طرفی موج غیر عادی در کریستال دو شکستی حتی در فرود عمود هم می‌شکند و طبق رابطه (۳) تحت زاویه کنارگذر ρ نسبت به موج عادی داخل کریستال انتشار می‌یابد[۲]:

$$\rho(\theta) = \arctan((n_o / n_e)^2 \tan(\theta)) - \theta \qquad (۳)$$

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

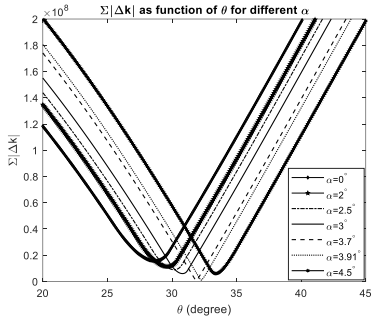
نتایج شبیه سازی

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 α با پمپ ۳۹۰ nm

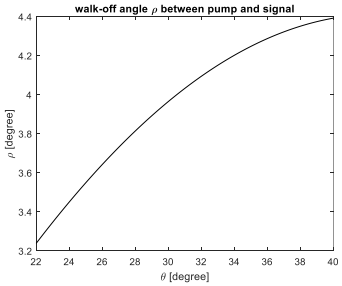
با توجه به شکل (۲) زاویه تطبیق فازی θ در یک زاویه غیرهمراستایی معین α، با طول موج تغییر می‌کند. بنابراین زاویه α بهینه، باید طوری انتخاب شود که در بازه‌ی طول موجی مطلوب یعنی ۷۰۰-۵۲۰ nm، به اندازه کافی یکنواخت باشد. بنابراین با توجه به شکل، زاویه غیرهمراستایی۳/۹۱ درجه، مناسب‌ترین زاویه برای دستیابی به این گستره طول موجی است. برای تعیین دقیق‌تر منحنی تطبیق فازی بهینه، عدم تطابق بردار موج Δk، روی ۵۰۰ نقطه طول موجی بین ۷۰۰-۵۲۰ nm در θ و α مختلف به صورت عددی جمع زده شد و نتیجه به صورت منحنی $\sum|\Delta k|$ 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 $\sum|\Delta k|$ را در گستره طیفی مطلوب دارند، زاویه‌های مناسب‌تری هستند.



شکل ۳: تغییرات $\sum|\Delta k|$ بر حسب طول موج برای ۵۰۰ نقطه‌ی طول موجی بین ۷۰۰-۵۲۰ nm

شکل (۳) نشان می‌دهد که $\sum|\Delta k|$ برای $\alpha = 3.91^\circ$ و $\theta = 32.27^\circ$ حداقل مقدار خود را دارد.

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

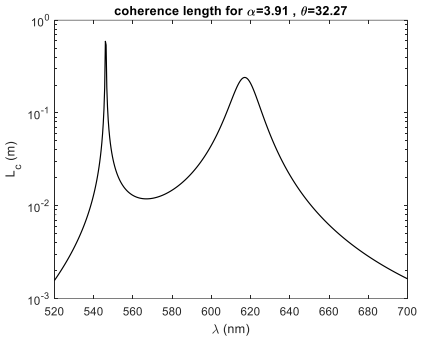


این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

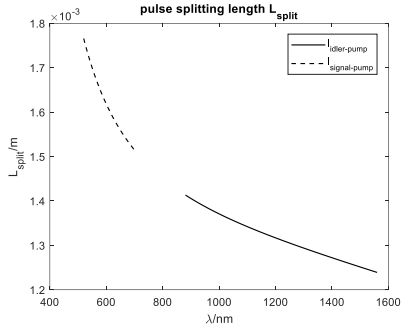
[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]

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.



(الف)

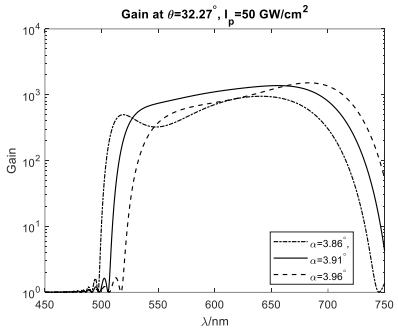


(ب)

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 nm و ۶۱۷ nm 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 ۱/۶ mm است. از طرفی در شکل ۵(ب) مشاهده می‌کنیم که طول جدایی پالس باریکه ایدلر در طول موج ۱۵۷۰ nm برابر ۱/۲ mm است. بنابراین ضخامت کریستال باید کمتر از 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 $50\ GW/cm^2$ در سه زاویه غیرهمراستایی حول مقدار بهینه ۳/۹۱ درجه در شکل (۶) رسم شده است.



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

با مقایسه‌ی منحنی‌های شکل (۶) مشاهده می‌شود که در زاویه غیرهمراستایی ۳/۹۱ درجه، بهره در بیشتر بازه طول موجی مورد نظر یکنواخت‌تر بوده و کل ناحیه طیفی را می‌پوشاند.

نتیجه گیری

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 ۵۲۰-۷۰۰ nm حاصل می‌شود. ضخامت بهینه کریستال با در نظر گرفتن اثرات محدود کننده طول همدوسی و طول جدایی پالس تعیین و برابر ۱ mm تخمین زده شد. به علاوه نشان داده شد که با وجود این زاویه غیرهمراستایی اثر کنار گذر داخل کریستال تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

منابع

۱. Cerullo, G., et al., *Mirror-dispersion-controlled sub-10-fs optical parametric amplifier in the visible.* Optics letters, 1999. **24**(21): p. 1529-1531.
۲. Manzoni, C. and G. Cerullo, *Design criteria for ultrafast optical parametric amplifiers.* Journal of Optics, 2016. **18**(10): p. 103501.
۳. 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.
۴. Grupp, A., et al., *Broadly tunable ultrafast pump-probe system operating at multi-kHz repetition rate.* Journal of Optics, 2018. **20**.(۱)
۵. Saleh, B.E. and M.C. Teich, *Fundamentals of photonics*. 2019: John Wiley & Sons.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-11-18]