بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۹-۱۱ بهمن ۱۳۹۷

# تحلیل و بررسی بازدهی لیزرOPO کوک‌پذیر در بازه‌ی ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر

**احسان شهنانی، محمدحسن یوسفی و مهدی دهقان**

**اصفهان، شاهین شهر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر**

**چکیده – هدف از این پژوهش طراحی لیزر کوک‌پذیر در بازه‌ی ۴۰۰ تا ۲۰۰۰ نانومتر می‌باشد. لیزر پمپ مورد استفاده در این نوسانگر، هارمونیک سوم لیزر Nd-YAG با طول‌موج ۳۵۵ نانومتر و بلورغیرخطی مورد استفاده در کاواک این نوسانگر باریم بورات(BBO) است، برای ایجاد بازدهی محسوس، زاویه‌های تطبیق فاز مورد نیاز برای این نوسانگر به کمک نرم افزارMATLAB محاسبه شده است. عامل مؤثر در بازدهی نوسانگر پارامتری نوری، نسبت شدت پرتو پمپ ورودی به شدت آستانه مورد نیاز برای آغاز فرایند پارامتری است. به کمک محاسبات عددی مقدار بهینه این عامل برای نوسانگر محاسبه و با استفاده از آن طول بهینه برای بلور غیرخطی در نوسانگر پارامتری تعیین شده است. طول مناسب برای بلور BBO در این پژوهش ۱۰ تا ۱۵ میلی متر می‌باشد.**

کلید واژه-نوسانگر پارامتری نوری، زاویه‌های تطبیق فاز،.بازدهی بیشینه نوسانگر، طول بهینه بلور

# Analysis OPO laser efficiency in the range of 400 to 2000 nm

**Ehsan Shahnani , M.H Yousefi, and Mahdi Dehghan**

**Esfahan, Shahin Shahr, Malek Ashtar university**

**,ehsan.shahnaee@gmail.com,mhyphd1@gmail.com,dehghan.mahdi@gmail.com**

**Abstract-The purpose of this study is to design a tunable laser in the range of 400 to 2000 nm. The laser pump used in this oscillator is the third harmonic of a Nd-YAG laser with a wavelength of 355 nm and a nonlinear crystal used in the cavity of this oscillator is BBO. In order to produce tangible efficiency, the phase matching angles required for this oscillator with the help of software MATLAB is calculated.The effective factor in the efficiency of the optical parametric oscillator is the intensity ratio of the input pump beam to the pump threshold required to initiate the parametric process. With the help of numerical calculations, the optimal value for this factor is calculated and using that optimum length for the nonlinear crystal in the parametric oscillator is determined. The suitable length for BBO crystals in this research is 10 to 15 mm.**

Keywords: Optical parametric oscillator, phase matching angles, Maximum oscillator efficiency, optimal crystal length

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]



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

## مقدمه

ابزارهای اپتیک غیرخطی مانند تولیدکننده‌ی هارمونیک و نوسانگرپارامتری‌نوری (OPO) قابلیت گسترش فرکانس-های منابع لیزری را دارند. از ویژگی‌های منحصر به فرد نوسانگر پارامتری نوری می‌توان به کوک‌پذیری در محدوده‌ی وسیع فرکانسی اشاره کرد[۱, ۲]. عدم تطبیق فاز تاثیر منفی در بازدهی نوسانگر پارامتری نوری دارد. روش اصلاح عدم تطبیق فاز، استفاده از بلور با خاصیت شکست دوگانه است. این بلورها دو ضریب شکست برای یک جهت معین انتشار دارند که ضرایب شکست، متناظر با دوجهت قطبش متعامد است. با انتخاب جهت انتشار و قطبش مناسب برای امواج، به دست آوردن تطبیق فاز ممکن است[۱, ۳, ۴]. از عوامل بسیار مؤثر در بازدهی نوسانگر پارامتری نوری می‌توان به طول بلور مورد استفاده در کاواک نوسانگر اشاره کرد. در این پژوهش به محاسبه طول بهینه بلور پرداخته خواهد شد[۴].

## محاسبه زاویه های تطبیق فاز

در این قسمت قطبش مناسب برای امواج پمپ ، سیگنال و ایدلر در نوسانگر پارامتری نوری تعیین شده است و با استفاده از آن زاویه‌های مناسب انتشار پرتو نسبت به بلور محاسبه شده است، زاویه‌های محاسبه شده در واقع زاویه های تطبیق فاز هستند. روش تطبیق فاز انتخاب شده در این طراحی (ooe) نام دارد. در این نوع تطبیق فاز امواج سیگنال و ایدلر از نوع قطبش عادی(o) و موج پمپ از نوع قطبش غیر عادی(e) می باشد. برای دست یافتن به تطبیق فاز، رابطه‌ی پایستگی تکانه برای امواج پمپ، سیگنال و ایدلر باید برقرار باشد. به طور کلی عدم تطبیق فاز بین امواج به صورت زیر بیان می‌شود[۱]

$$\Delta k = k_p - k_s - k_i \qquad (۱)$$

در نتیجه برای تطبیق فاز نوع (ooe) خواهیم داشت[۲]

$$\Delta k = 2\pi\left[\frac{n_p^e(\lambda_p,\theta)}{\lambda_p} - \frac{n_s^o(\lambda_s)}{\lambda_s} - \frac{n_i^o(\lambda_i)}{\lambda_i}\right] = 0 \qquad (۲)$$

در رابطه (۲) ضرایب شکست عادی یعنی $n_s^o$ و $n_i^o$ برای هر طول موج مقدار ثابتی دارند، پس کافی است بتوانیم $n_p^e(\lambda_p,\theta)$ را برحسب ضرایب شکست عادی و زاویه $\theta$ محاسبه کنیم . برای این منظور از رابطه‌ی (۳) استفاده می کنیم که در واقع رابطه فرنل برای بلورهای دوشکستی تک‌محور است[۱].

$$\frac{1}{(n_p^e(\theta))^2} = \frac{\cos^2(\theta)}{(n_p^o)^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{(n_p^e)^2} \qquad (۳)$$

با استفاده از رابطه (۳) وابستگی ضریب شکست به زاویه برای موج پمپ به شکل رابطه (۴) خواهد بود

$$n_p^e(\lambda_p,\theta) = \pm\left[\frac{n_p^o(\lambda_p)}{\left[1-\sin^2\theta\left(1-\frac{n_p^o(\lambda_p)^2}{n_p^e(\lambda_p)^2}\right)\right]^{1/2}}\right] \qquad (۴)$$

با جایگذاری رابطه (۴) در رابطه‌ی (۲) خواهیم داشت

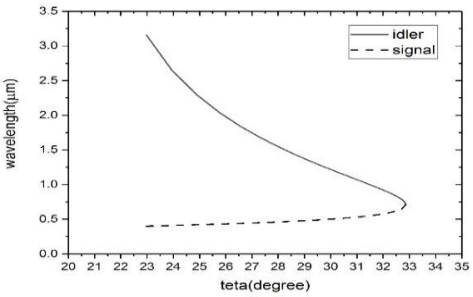
$$\frac{1}{\lambda_p}\left[\frac{n_p^o(\lambda_p)}{\left[1-\sin^2\theta\left(1-\frac{n_p^o(\lambda_p)^2}{n_p^e(\lambda_p)^2}\right)\right]^{1/2}}\right] = \frac{n_s^o(\lambda_s)}{\lambda_s} + \frac{n_i^o(\lambda_i)}{\lambda_i} \qquad (۵)$$

باتوجه به رابطه‌ی (۵) می‌توان زاویه‌های تطبیق فاز را بر فرکانس‌های مختلف پمپ ورودی به دست آورد. نکته قابل توجه این است که در بلورهای مورد نظر ما پاشندگی وجود دارد، در نتیجه هر طول موجی ضریب شکست خاص خود را دارد. ضرایب شکست متناظر با طول‌موج های مختلف را می‌توان با استفاده از ضرایب سلمایر مربوط به آن بلور محاسبه کرد. در ابتدا به کمک نرم افزار MATLAB زاویه‌های تطبیق فاز بر حسب طول‌موج‌های سیگنال و ایدلر برای بلور BBO محاسبه شده است. نمودار زاویه‌های تطبیق فاز بر حسب طول موج‌های سیگنال و ایدلر برای نوسانگری که بلور مورد استفاده در کاواک آن از جنس BBO می‌باشد و با طول‌موج ۳۵۵ نانومتر پمپ می-شود به صورت زیر می‌باشد.



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]

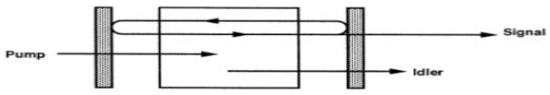



شکل۱: زاویه های تطبیق فاز نوع (ooe) نسبت به طول موج های سیگنال و ایدلر برای طول‌موج پمپ ۳۵۵ نانومتر

همان‌طور که در شکل(۱) مشاهده می‌شود، هر زاویه تطبیق فاز متناظر بایک طول موج سیگنال و یک طول موج ایدلر است. زاویه‌های تطبیق فاز در این ناحیه از ۲۳ تا ۳۳ درجه امتداد دارد. طول موج سیگنال از ۴۰۰ تا ۷۱۰ نانومتر و طول موج ایدلر از ۷۱۰ تا حدود ۳۰۰۰ نانومتر امتداد دارد. نکته قابل توجه این است که در بازه طول موج ۲۰۰۰ نانومتر تا ۳۰۰۰ نانومتر و بالاتر میزان جذب پرتو در بلورقابل توجه است .

## محاسبه بازدهی SRO در تقریب موج تخت

نوسانگر تشدید شده تکی(SRO)، به علت طراحی آسان آینه‌ها و رزوناتور ، بازدهی تبدیل خوب و پایداری ، رایج-ترین پیکربندی نوسانگر پارامتری نوری است.




شکل۲: نوسانگر تشدید شده تکی (SRO).

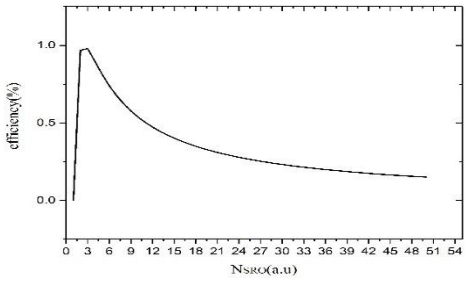
نکته قابل توجه این است که بهره‌ی نوسانگر تشدید شده تکی باید در عملکرد حالت پایا، در آستانه مهار شود. بنابراین به کمک معادلات جفت شده که با استفاده از معادلات ماکسول حاصل می گردند، بازدهی تبدیل برای SRO در تقریب موج تخت به صورت زیر محاسبه می شود[۴]. $\Gamma$ یک کمیت غیر فیزیکی و در واقع یک متغیر ریاضی است.

$$\eta = \frac{P_1 + P_2}{P_3} = \sin^2 \Gamma \qquad (۶)$$

$$\frac{\sin^2 \Gamma}{\Gamma^2} = \frac{1}{N_{SRO}} \qquad (۷)$$

$$N_{SRO} = \frac{I_0}{I_{th}} \qquad (۸)$$

روابط (۶) تا (۸) نشان می‌دهند که $N_{SRO}$ عامل تعیین کننده بازدهی در SRO است. $N_{SRO}$ نسبت شدت پمپ ورودی به شدت پمپ آستانه است. مقدار شدت پمپ آستانه به جنس بلور غیرخطی و ویژگی‌های کاواک نوسانگر بستگی دارد. در این قسمت، بازدهی تبدیل SRO نسبت به $N_{SRO}$ با استفاده از نرم افزار MATLAB به طور عددی محاسبه و ترسیم شده است که نمودار آن به صورت زیر می‌باشد.




شکل۳: بازدهی SRO بر حسب $N_{SRO}$ در تقریب موج تخت

با استفاده از شکل (۳) می‌توان مقداری از $N_{SRO}$ که در آن بازدهی بیشینه است را یافت و با استفاده از آن پارامترهای مورد نیاز برای طراحی SRO را به دست آورد. بازدهی تبدیل در $N_{SRO} = (\frac{\pi}{2})^2$ به بیشینه ۱۰۰٪ می-رسد.

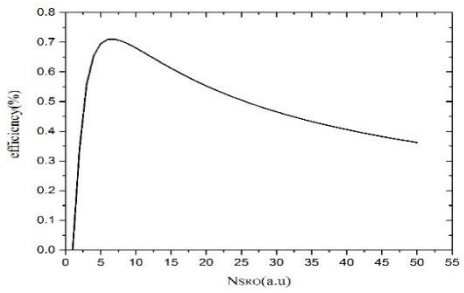
## محاسبه بازدهی SRO در تقریب موج گاوسی

نتایج فوق برای پرتوهای نوری واقعی و یا به عبارت دیگر پرتوهایی که وابستگی شعاعی دارند، اصلاح شده است. در واقع با استفاده از تخمین امواج تقریبا تخت برای پرتو پمپ بازدهی برای امواج گاوسی محاسبه شده است. بازدهی تبدیل SRO در تقریب موج گاوسی نسبت به $N_{SRO}$ با استفاده از نرم افزار MATLAB به طور عددی محاسبه و ترسیم شده است که نمودار آن به صورت زیر می باشد.



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

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]

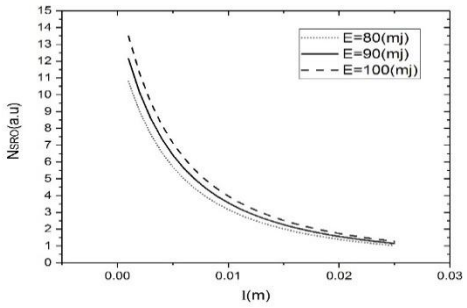



شکل۴: بازدهی SRO بر حسب $N_{SRO}$ در تقریب موج گاوسی.

در شکل(۴) مشاهده می کنیم که، بیشینه بازدهی برابر با ٪ ۷۱ می‌باشد و در $N_{SRO}=۶/۵$ اتفاق می‌افتد در صورتی که قانون کلی سرانگشتی (قانونی که با تجربه سازگاری بیشتری دارد) بیان می‌کند که برای طراحی یک SRO با بازدهی خوب حداقل میزان شدت پمپ باید ۴ برابر آستانه شدت باشد[۱].

## محاسبه طول بهینه‌ی بلور BBO در SRO در تقریب موج تخت

در این قسمت نمودار $N_{SRO}$ برحسب طول بلور با استفاده از نرم‌افزار MATLAB رسم و با استفاده از آن طول بهینه‌ی بلور محاسبه گردیده است.

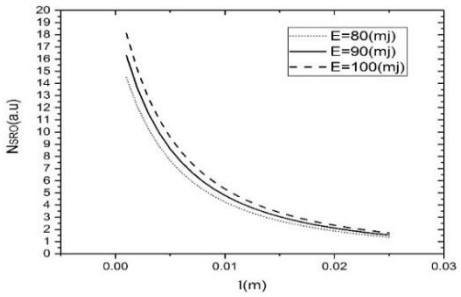



شکل ۵ :طول بلور BBO برحسب $N_{SRO}$ در تقریب موج تخت.

شکل(۵) نشان می دهد که برای انرژی‌های ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ میلی‌ژول به ترتیب طول بهینه‌ی بلور BBO برابر با ۱۳، ۱۴و ۱۵میلی‌متر می‌باشد که این نتیجه با نتایج به دست آمده توسط آقای باپنا و همکاران توافق دارد [۳].

## محاسبه طول بهینه‌ی بلور BBO در SRO در تقریب موج گاوسی

در این قسمت نمودار $N_{SRO}$ برحسب طول بلور در تقریب موج گاوسی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB رسم و به کمک آن طول بهینه‌ی بلور محاسبه گردیده است.




شکل ۶ :طول بلور BBO برحسب $N_{SRO}$ در تقریب موج تخت

شکل(۶) نشان می دهد که برای انرژی‌های ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ میلی‌ژول به ترتیب طول بهینه‌ی بلور BBO برابر با ۱۱، ۱۲و ۱۳میلی‌متر می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

در این پژوهش، لیزر کوک پذیری طراحی شده است که زاویه‌های تطبیق فاز آن برای ایجاد بازدهی مناسب از ۲۳ تا ۳۳ درجه می باشد. طول بهینه محاسبه شده برای بلور BBO در کاواک نوسانگر از ۱۰ تا ۱۵ میلی متر می باشد.

## مرجع‌ها

[1] W. Koechner, *Solid-state laser engineering*. Springer, 2013.
[2] P. E. Powers, *Fundamentals of Nonlinear Optics*. Taylor & Francis, 2011.
[3] R. Bapna, C. Rao, and K. Dasgupta, "Low-threshold operation of a 355-nm pumped nanosecond β-BaB2O4 optical parametric oscillator," *Optics & Laser Technology*, vol. 40, no. 6, pp. 832-837, 2008.
[4] Y. R. Shen, *The principles of nonlinear optics*. Wiley-Interscience, 2003.

[ Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05 ]



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