

Research Paper

## Simulation of Second Harmonic Generation of a Pulsed Nd:YAG Laser Using Nonlinear Crystals: with the Approach of Efficiency Investigation<sup>1</sup>

Rasoul Pashaie<sup>2</sup>, Nader Amiri Rad<sup>3\*</sup>

Received: 2020.02.27

Accepted: 2020.07.27

### Abstract

Second harmonic generation of Nd:YAG laser, as one of the most applicable and popular solid-state lasers, has been widely used in different fields of military applications and in diverse fields of medicine and industry *etc.*, in last few decades. Non-linear crystals are mentioned as one of the most efficient and common methods for harmonic generating of lasers. In this research, we performed the simulation of the second and fourth harmonic generation of pulsed Nd:YAG laser with characteristics of 1064nm wavelength, 1joule/cm<sup>2</sup> energy density, and 10ns pulse width, and considering the effects of temperature and divergence angle of the incident beam. The conversion efficiency of the second harmonic generation of this laser was investigated using KTP, BBO and LBO crystals. The simulation results suggested the KTP crystal as the most efficient crystal with 89.59% conversion efficiency. Formerly, achieving 80% efficiency using Nd: YAG laser with similar characteristics of the simulated specifications presented in this paper by using KTP crystal in an experimental configuration had been presented. In addition, the conversion efficiency of the fourth harmonic generation of this laser was investigated using BBO, CLBO and DKDP crystals. The simulation results suggested the BBO crystal as the most efficient crystal with 19.21% conversion efficiency. For the sake of comparison, 12% efficiency in the experimental layout with similar Nd:YAG laser specifications, presented in this article, had been presented in another article.

**Keywords:** *Conversion Efficiency, Nonlinear Crystals, Second Harmonic Generation (SHG), Fourth Harmonic Generation (FHG), Nd:YAG Laser.*

---

<sup>1</sup> DOI: 10.22051/jap.2020.30493.1156

<sup>2</sup> PhD Student in atomic and molecular physics, Physics Department, Iran University of Sciences and Technology, Tehran, Iran. Email: rasoulpashaie1993@gmail.com

<sup>3</sup> Researcher, Physics Department, Imam Hussein University, Tehran, Iran. (Corresponding Author). Email: naderamiri@ihu.ac.ir

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران، دانشگاه الزهرا  
سال نهم، پیاپی ۱۹، زمستان ۱۳۹۸

## مقاله پژوهشی

# شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: با رویکرد بررسی بازده<sup>۱</sup>

رسول پاشایی<sup>۲</sup>، نادر امیری‌راد<sup>۳\*</sup>

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۱۲/۰۸

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۰۷

### چکیده

در چند دهه اخیر، از هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر Nd:YAG به عنوان یکی از پرکاربردترین و محبوب‌ترین لیزرهای حالت جامد، به طور گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف نظامی و در زمینه‌های مختلف پزشکی و صنعتی و ... استفاده شده است. از روش‌های پر بازده و متداول در تولید هماهنگ لیزرها می‌توان به استفاده از بلورهای غیرخطی اشاره کرد. در این مقاله، شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با ویژگی‌های طول موج ۱۰۶۴ نانومتر، چگالی انرژی ۱ ژول در سانتی‌متر مربع و نیز پهنای زمانی تپ ۱۰ نانوثانیه با در نظر گرفتن آثار دمایی و زاویه واگرایی پرتوی فرودی انجام شده است. بازدهی تبدیل تولید هماهنگ دوم این لیزر با استفاده از بلورهای KTP و

<sup>۱</sup> DOI: 10.22051/jap.2020.30493.1156

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری فیزیک اتمی و مولکولی، دانشکده فیزیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران.

rasoulpashaei1993@gmail.com

<sup>۳</sup> پژوهشگر، دانشکده و پژوهشکده علوم پایه، دانشگاه جامع امام حسین (ع)، تهران، ایران. (نویسنده مسئول).

naderamiri@ihu.ac.ir

BBO و LBO بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی، بلور KTP را با بازدهی ۸۹,۵۹ درصد به عنوان پربازده‌ترین بلور پیشنهاد می‌کند. پیش‌تر به دست آوردن بازدهی ۸۰ درصد با استفاده از چیدمان تجربی از لیزر Nd:YAG با ویژگی‌های مشابه مشخصات شبیه‌سازی شده در این مقاله با استفاده از بلور KTP ارائه شده بود. هم‌چنین بازدهیتبدیل تولید هماهنگ چهارم این لیزر با استفاده از بلورهای BBO و CLBO و DKDP بررسی شده است. نتایج شبیه‌سازی حاضر، بلور BBO را با بازدهی ۱۹,۲۱ درصد به عنوان پربازده‌ترین بلور پیشنهاد می‌کند. این در حالی است که بازدهی ۱۲ درصدی در چیدمان تجربی با مشخصات لیزر Nd:YAG مشابه طی مقاله‌ای ارائه شده بود.

**واژگان کلیدی:** بازدهی تبدیل، بلورهای غیرخطی، تولید هماهنگ دوم، تولید هماهنگ چهارم، لیزر Nd:YAG.

## ۱. مقدمه

شاخه‌ای از فیزیک که به مطالعه ویژگی‌های نوری مواد در حضور میدان‌های پرشدت می‌پردازد، اپتیک غیرخطی نام دارد [۱]. وقتی مواد دی‌الکتریک تحت میدان الکترومغناطیسی قرار می‌گیرند، پاسخی از خود نشان می‌دهند. این پاسخ به صورت تغییر گشتاور دوقطبی اتم‌ها در این مواد نمایان می‌شود که موجب ایجاد قطبش در مواد دی‌الکتریک می‌شود. اگر شدت میدان ضعیف باشد رابطه قطبش با میدان اعمالی خطی است [۱]:

$$P(t) = \epsilon_0 c^{(1)} E(t) \quad (1)$$

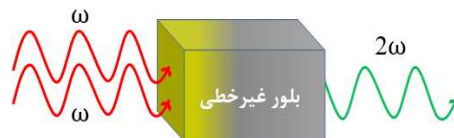
که در آن،  $\square^{(1)}$  پذیرفتاری خطی و  $\epsilon_0$  ثابت گذردهی خلأ است. در صورت شدید بودن میدان، این رابطه غیرخطی است [۱]:

$$P(t) = \epsilon_0 [c^{(1)} E(t) + c^{(2)} E^2(t) + c^{(3)} E^3(t) + \dots] \quad (2)$$

که در آن،  $\square^{(2)}$  و  $\square^{(3)}$  و ... به ترتیب پذیرفتاری‌های الکتریکی مراتب دوم و سوم و ... هستند [۱]. در میان پذیرفتاری‌های غیرخطی، پذیرفتاری مرتبه دوم، وقوع پدیده‌هایی همچون تولید هماهنگ دوم را موجب می‌شود که موضوع مورد بحث این مقاله است [۱].

از هماهنگ دوم این لیزر به صورت گسترده‌ای در زمینه‌های مختلف نظامی [۲]، پزشکی، صنعتی [۳] و ... استفاده می‌شود. از کاربردهای نظامی هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر Nd:YAG، می‌توان به استفاده از آن‌ها به منظور نشانه‌گذاری هدف اشاره کرد که یکی از دقیق‌ترین شیوه‌های هدایت بمب‌ها و موشک‌هاست؛ مسافت‌یابی و تعیین دقیق فاصله با هدف نیز

از دیگر کاربردهای هم‌هنگ دوم لیزر Nd:YAG است. همچنین، بسیاری از ادوات و سلاح‌های نظامی با قرار گرفتن در معرض لیزر پرتوان ۵۳۲ نانومتر و ۲۶۶ نانومتر از کار افتاده، یا در عملکرد آن‌ها خلل ایجاد می‌شود که از این خاصیت برای متفرق نمودن افراد شرکت‌کننده در اغشاشات استفاده می‌کنند. به طور کلی، از لیزرهای با طول موج‌های ۵۳۲ و ۲۶۶ نانومتر جهت از کار انداختن یا به اشباع رساندن حساسه‌های الکترواپتیک استفاده می‌شود. یکی دیگر از کاربردهای نظامی مهم هم‌هنگ دوم این لیزر، به کارگیری آن‌ها در شناسایی مواد منفجره به کمک روش بیناب‌نمایی لیزری است. از کاربردهای پزشکی طول موج‌های ۵۳۲ و ۲۶۶ نانومتر لیزر Nd:YAG می‌توان به استفاده در زمینه‌های: آندوسکوپی، جراحی بافت‌های حساس دهان، جراحی زخم‌مثانه و قطع خونریزی مربوط به معده و روده، درمان ضایعات سطحی پوستی و جوانسازی پوست اشاره کرد. فناوری‌های علامت‌گذاری در تولید صنعتی نیز از قابلیت‌های جذاب هم‌هنگ دوم لیزر Nd:YAG است. فلزات، پلاستیک، سرامیک و سایر مواد را می‌توان با تابش اشعه لیزر در طول موج‌های ۵۳۲ و ۲۶۶ نانومتر مشخص کرد. از روش‌های مختلفی مانند استفاده از فراماده‌های مغناطیسی [۴، ۵]، بلورهای پیزوالکتریک [۶]، مواد پلیمری [۷] به منظور تولید هم‌هنگ دوم این لیزر استفاده می‌شود. یکی از مرسوم‌ترین روش‌ها استفاده از بلورهای غیرخطی است. از دلایل استفاده از این روش می‌توان به: مقرون به صرفه بودن، پیچیده نبودن چیدمان، بازدهی عالی تبدیل تولید هم‌هنگ اشاره کرد. طرحی از فرایند تولید هم‌هنگ دوم با استفاده از بلور غیرخطی در شکل (۱) کشیده شده است که در آن ۲ فوتون با بسامد  $\omega$  جذب بلور شده و فوتونی با بسامد  $2\omega$  تولید می‌شود.



شکل ۱ طرحی از فرایند غیرخطی تولید هم‌هنگ دوم.

در خصوص ویژگی‌های بلور غیرخطی، به منظور دستیابی به بیشینه بازدهی تبدیل باید پارامترهایی همچون: ضریب غیرخطی مؤثر بلور ( $d_{eff}$ )، آستانه تخریب<sup>۱</sup>، اندازه بلور، زاویه-walk-off، پذیرفتاری زاویه‌ای، پذیرفتاری دمایی ( $DT$ ) و پذیرفتاری طیفی ( $D/I$ ) را مدنظر قرار داد [۸]. بلورهای KTP و BBO و LBO از جمله بلورهای غیرخطی پربازده در تولید هم‌هنگ دوم و

<sup>1</sup> Damage Threshold



۲۰ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...

نیز BBO و CLBO و DKDP از جمله بلورهای غیرخطی پربازده در تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG هستند. دو روش برای تولید هماهنگ دوم متداول است: در روش اول، بلور غیرخطی را در درون کاواک قرار می‌دهند. این روش بازدهی خوبی دارد، اما نمی‌توان در انرژی‌های زیاد از این روش استفاده کرد و طبیعتاً دست‌یابی به طول موج هماهنگ‌ها با توان خوب با مشکل مواجه خواهد شد. در روش دوم، بلور غیرخطی را خارج از کاواک در مسیر پرتو قرار می‌دهند [۸]. در این روش به انرژی بالا نیز می‌توان دست یافت. در این مقاله، از روش دوم به منظور شبیه‌سازی تولید هماهنگ دوم استفاده کرده‌ایم.

از پارامترهای مهم در دست‌یابی به بازدهی عالی تولید هماهنگ‌ها می‌توان به زاویه واگرایی پرتو، توان لیزر فرودی، نرخ تکرار تپ و پهنای زمانی تپ اشاره کرد. هر قدر زاویه واگرایی پرتو کمتر باشد، بازدهی به دست آمده به دلیل واگرایی کمتر پرتو در بلور از زاویه تطابق فاز بیشتر خواهد بود. در خصوص توان لیزر، هرچه توان بیشتر باشد بازدهی کمتری را به دلایل آستانه تخریب بلور، حد اشباع بازدهی بلور باید انتظار داشت. نرخ تکرار تپ و پهنای زمانی نیز در توان لیزر اثر می‌گذارند که در هر بلور باید به تناسب آستانه تخریب آن بلور از لیزر با توان‌های متناسب استفاده کرد. در ادامه، نمونه‌هایی از کارهای تجربی را که پیش‌تر انجام شده است، گزارش خواهیم کرد که بازدهی هریک به تناسب مشخصات لیزر و بلور، نوع درون و برون کاواکی بودن چیدمان و شرایط محیطی و ادوات اپتیکی استفاده شده در چیدمان آزمایشگاهی متفاوت است.

از جمله کارهای تجربی انجام شده در این زمینه هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG: دست‌یابی به بازدهی ۵۰ درصدی با استفاده از بلور KTP توسط توماس و همکاران در یک چیدمان برون کاواکی با بهره‌گیری از لیزر تپی Q سوئیچ شده Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر، توان قله ۶۰ مگاوات (معادل انرژی قله ۱۸۰۰ میلی ژول) و پهنای زمانی تپ ۳۰ نانوثانیه و نیز طول بلور ۹ میلی متر [۹]، ارائه گزارش دست‌یابی به بازدهی ۵۹ درصد توسط فان و همکاران در یک چیدمان برون کاواکی با استفاده از بلور KTP به طول ۳٫۹ میلی متر، لیزر Q سوئیچ شده Nd:YAG با مشخصات توان قله ۶۰ مگاوات (معادل انرژی قله ۲۷۰۰ میلی ژول)، پهنای زمانی تپ ۴۵ نانوثانیه و نرخ تکرار تپ ۱۰ هرتز [۱۰]، حصول بازدهی ۸۰ درصدی با به کارگیری بلور KTP توسط براون و همکاران در یک چیدمان برون کاواکی با به کارگیری لیزر تپی Q سوئیچ شده Nd:YAG با مشخصات انرژی ۹۰۰ میلی ژول و نرخ تکرار تپ ۱۰ هرتز و نیز طول بلور ۱۰ میلی متر [۱۱]، دست‌یابی به بازدهی ۱۳ درصدی با استفاده از بلور KTP توسط خانم حاج اسماعیل بیگی و همکاران در یک چیدمان درون کاواکی با استفاده از لیزر تپی Q سوئیچ شده ۱۰ کیلوهرتز

Nd:YAG با توان قله ۱,۵ مگاوات (معادل انرژی قله ۱۰,۵ میلی ژول)، پهنای زمانی آن ۹۰ نانوثانیه و نیز طول بلور ۷ میلی متر [۲]، ارائه مقاله دست یابی به بازدهی ۷۵ درصدی بهره بردن از بلور BBO به طول ۶ میلی متر توسط وو و همکاران در یک چیدمان درون کاواکی با بهره گیری از لیزر تپی Nd:YAG با توان قله ۲,۶ مگاوات (معادل انرژی قله ۴۲۱,۲ میلی ژول)، پهنای زمانی تپ ۱۷ نانوثانیه و نیز نرخ تکرار تپ ۲۵۰ هرتز [۱۲]، گزارش حصول بازدهی ۹,۶۴ درصدی با به کارگیری بلور BBO به طول ۱۲ میلی متر توسط یوان و همکاران در یک چیدمان درون کاواکی به کمک لیزر Nd:YAG دارای مشخصات توان قله ۱,۴ مگاوات (معادل انرژی قله ۷۵,۴ میلی ژول)، پهنای زمانی تپ ۵۴ نانوثانیه و نرخ تکرار تپ ۲۰ کیلوهرتز [۱۳]، دست یابی به بازدهی ۵۳,۴ درصدی با استفاده از بلور LBO به طول ۲۵ میلی متر در یک چیدمان درون کاواکی توسط ژانگ و همکاران با بهره گیری از لیزر تپی Nd:YAG با مشخصات توان قله ۵۴ مگاوات (معادل انرژی قله ۲۷۰ میلی ژول)، پهنای زمانی تپ ۵ نانوثانیه و نیز نرخ تکرار تپ ۵۰۰ هرتز [۱۴]، ارائه گزارش حصول بازدهی ۳۵,۷ درصدی با بهره گیری از بلور LBO به طول ۲۰ میلی متر توسط دادلی و همکاران در یک چیدمان درون کاواکی با استفاده از لیزر تپی Nd:YAG با مشخصات توان قله ۰,۹ مگاوات (معادل انرژی قله ۷۰ میلی ژول)، پهنای زمانی تپ ۷۰ نانوثانیه و نیز نرخ تکرار تپ ۱۰ کیلوهرتز [۱۵] اشاره کرد.

از جمله کارهای تجربی انجام شده در زمینه هماهنگ چهارم این لیزر نیز می توان به: ارائه گزارش دست یابی به بازدهی ۹,۶ درصد با استفاده از بلور BBO به طول ۶ میلی متر توسط بهانداری و همکاران به کمک لیزر تپی Nd:YAG با مشخصات توان قله ۲,۶ مگاوات (معادل انرژی قله ۱,۳ میلی ژول)، پهنای زمانی تپ ۵۳۰ پیکوثانیه و نرخ تکرار تپ ۱ کیلوهرتز [۱۶]، رسیدن به بازدهی ۹,۷۴ درصد با به کارگیری بلور BBO با طول ۸ میلی متر توسط ژو و همکاران با بهره گیری از لیزر تپی Nd:YAG با مشخصات توان قله ۱۷,۳ مگاوات (معادل انرژی قله ۱ میلی ژول)، پهنای زمانی تپ ۶۰ نانوثانیه و نرخ تکرار تپ ۱۲,۵ کیلوهرتز [۱۷]، گزارش حصول بازدهی ۳۵ درصدی با به کارگیری بلور BBO به طول ۱۰ میلی متر توسط کومار و همکاران با استفاده از لیزر تپی Nd:YAG با ویژگی های توان قله ۱۲,۵ مگاوات (معادل انرژی قله ۰,۱ میلی ژول)، پهنای زمانی تپ ۱۲,۵ نانوثانیه و نرخ تکرار تپ ۸۰ مگاهرتز [۱۸]، رسیدن به بازدهی ۱۹,۵ درصد با استفاده از بلور BBO با طول ۷ میلی متر توسط یانگ و همکاران به کمک لیزر تپی Nd:YAG با مشخصات توان قله ۱۴ مگاوات (معادل انرژی قله ۰,۱۴ میلی ژول)، پهنای زمانی تپ ۱۰,۷ نانوثانیه و نرخ تکرار تپ ۱۵ کیلوهرتز [۱۹]، ارائه گزارش دست یابی به بازدهی ۶۸,۹ درصدی با بهره گیری از بلور DKDP با طول ۱۵۰ میلی متر توسط چای و همکاران با بهره گیری از لیزر تپی Nd:YAG

مشخصات توان قله ۰٫۸ گیگاوات (معادل انرژی قله ۴۰ میلی ژول)، پهنای زمانی تپ ۵۰ پیکوثانیه و نرخ تکرار تپ ۱ هرتز [۲۰]، ارائه مقاله دست‌یابی به بازدهی ۴۸ درصدی بهره بردن از بلور CLBO با طول ۹ میلی‌متر توسط لیو و همکاران با استفاده از لیزر تپی Nd:YAG استفاده شده با مشخصات توان قله ۴۰۰ مگاوات (معادل انرژی قله ۴۰۰ میلی ژول)، پهنای زمانی تپ ۱ نانوثانیه و نرخ تکرار تپ ۱۰ هرتز [۲۱] اشاره کرد. در این مقاله، شبیه‌سازی تولید هماهنگ دوم لیزر تپی Nd:YAG با ویژگی‌های طول موج ۱۰۶۴ نانومتر، چگالی انرژی ۱ ژول بر سانتی‌متر مربع و پهنای زمانی تپ ۱۰ نانوثانیه با در نظر گرفتن آثار دمایی و زاویه واگرایی پرتو فرودی با استفاده از بلورهای غیرخطی KTP و BBO و LBO و نیز هماهنگ چهارم بلورهای BBO و CLBO و DKDP به منظور مشخص شدن پربازده‌ترین بلورها انجام شده است.

## ۲. بازدهی تبدیل تولید هماهنگ

پدیده‌های تولید هماهنگ در جامدات دی‌الکتریک به خوبی بررسی شده‌اند و با وسعت زیادی در فیزیک پیشرفته استفاده شده‌اند و در همه آن‌ها با استفاده از نور لیزر با بسامد  $\omega$  و انرژی  $\hbar\omega$ ، بسامدهای جدیدی با انرژی  $n\hbar\omega$  تولید می‌شود [۱]. در این قسمت، ریاضیات حاکم بر تولید هماهنگ دوم را بیان می‌کنیم. با در نظر گرفتن رابطه قطبش با پذیرفتاری غیرخطی مرتبه دوم [۱]:

$$\vec{P}_i = \epsilon_0 c_{ijk}^{(2)} E_j E_k (i, j, k = 1, 2, 3) \quad (3)$$

که در آن،  $\epsilon_{ijk}^{(2)}$  تانسور مرتبه سوم با ۲۷ عضو مستقل و  $i$  و  $j$  و  $k$  مؤلفه‌های متعامد هستند، اگر میدان فرودی را به صورت  $\vec{E}(t) = Ee^{i\omega t} + c.c$  نشان دهیم، رابطه زیر را به دست خواهیم آورد [۱]:

$$\vec{P}^I(t) = \epsilon_0 2c^{(2)} EE^* + (c^{(2)} E^2 e^{-2i\omega t} + c.c) \quad (4)$$

اگر فرض کنیم میدان گندتغییر باشد و در راستای  $Z$  بلور غیرخطی انتشار یابد، پس از حل معادله موج برای این میدان به معادلات جفت‌شده زیر می‌رسیم:

$$\frac{dE_w}{dz} = \frac{2i\omega^2 d_{eff}}{k_w c^2} E_w^* E_{2w} e^{-iDkz} \quad (5)$$

$$\frac{dE_{2w}}{dz} = \frac{2i(2\omega)^2 d_{eff}}{k_{2w} c^2} E_w^2 e^{iDkz} \quad (6)$$

که در آن،  $Dk$  تطبیق فازی است که به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Dk = 2k_w - k_{2w} \quad (7)$$

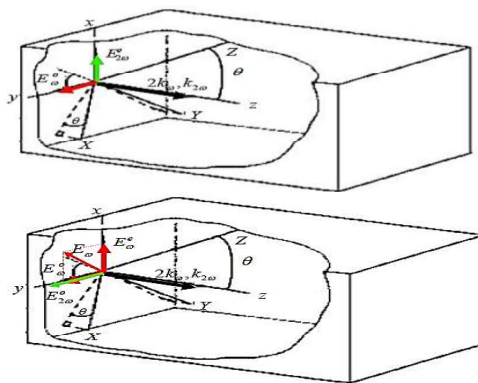
در این رابطه،  $k_w$  بردار موج میدان فرودی و  $k_{2w}$  بردار موج هماهنگ دوم تولید شده است. جمله  $\Delta k$  نقش اساسی در بازدهی تبدیل فرایندهای غیرخطی دارد. اغلب رسیدن به شرط تطبیق فاز  $\Delta k=0$  به دلیل بروز اثر پاشندگی ضریب شکست که «پاشندگی معمولی» نامیده می شود، مشکل است. اصولاً رسیدن به شرط تطبیق فاز با استفاده از پاشندگی نابهنجار یعنی کاهش ضریب شکست با افزایش بسامد که در نزدیکی خط جذب روی می دهد، ممکن می شود. اما متداول ترین کار، استفاده از بلورهای دارای خاصیت دوشکستی است [۱]. اگر بتوان ضریب شکست پرتو اولیه ( $n_\omega$ ) و هماهنگ تولید شده ( $n_{2\omega}$ ) را مساوی کرد، می توان به بازده های عالی برای تولید هماهنگ دست یافت. با انتخاب مناسب جهت انتشار و قطبش پرتو، می توان شروط دستیابی به بازدهی خوب را به دو روش تطبیق فاز زاویه ای و دمایی تقسیم کرد [۲۲]. برای داشتن تطبیق فاز باید سرعت انتشار موج اولیه و هماهنگ دوم با هم مساوی باشد، بنابراین [۲۲]:

$$c_w = \frac{c_0}{n_w} = \frac{c_0}{n_{2w}} = c_{2w} \quad (۸)$$

و از آنجا تطبیق فاز به صورت [۲۲]:

$$Dk = 2k_w - k_{2w} = \frac{4p}{l_0}(n_w - n_{2w}) \quad (۹)$$

تعریف می شود، که  $n_\omega$  ضریب شکست در پرتو اولیه و  $n_{2\omega}$  ضریب شکست در هماهنگ دوم تولید شده است [۲۲]. دسته بندی دیگری که می توان برای تطبیق فازی انجام داد، بر اساس نوع قطبش امواج است و بدین صورت است: تطبیق فاز نوع I (دو موج فرودی دارای قطبش یکسان) و تطبیق فاز نوع II (دو موج فرودی دارای قطبش عمود) (شکل ۲) [۲۲].



شکل ۲ طرحی از جهت های انتشار و قطبش امواج اولیه و هماهنگ دوم در حالت تطبیق فاز نوع I (ooe) (تصویر چپ) و نوع II (eoo یا oeo) (تصویر راست) [۲۲].

۲۴ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...

در واقع تطبیق فاز دور از حالت آرمانی است. به این معنی که واگرایی، تک طول موج بودن و دمای بلور در تولید هماهنگ نسبت به شرایط اولیه یکسان باقی نخواهد ماند. بنابراین، باید پارامترهای مؤثر در تولید هماهنگ بررسی و محاسبه شوند. این پارامترها پهنای نوار زاویه‌ای، پهنای نوار طیفی و پهنای نوار دمایی می‌باشند [۲۲]. مقدار  $\Delta K$  تابعی از دمای بلور  $T$ ، فرکانس موج برهم کنش  $\nu$ ، انحراف از زاویه تطبیق فازی  $\delta\theta$  است. وابستگی  $\Delta K$  به این پارامترها با تقریب مرتبه اول به صورت زیر است:

$$DK(T, dq, u) = DK(0) + g_T dT + g_q dq + g_u du \quad (10)$$

که در آن،  $\Delta K(0)$  را عدم تطابق فازی می‌نامند.  $\gamma_T$  و  $\gamma_\nu$  را به ترتیب، حساسیت دمایی و زاویه‌ای و بسامدی می‌گوییم که با روابط زیر بیان می‌شوند [۲۶-۲۲]:

$$g_{ang} = 1.772 \frac{P}{LD q} \quad (11)$$

$$g_{temp} = 1.772 \frac{P}{LD T} \quad (12)$$

$$g_{freq} = 1.772 \frac{P}{LD u} \quad (13)$$

در این رابطه‌ها،  $\Delta\theta$  و  $\Delta\nu$  و  $\Delta T$  به ترتیب پهنای نوار زاویه‌ای و بسامدی و دمایی می‌باشند و  $L$  طول بلور غیرخطی است. بازدهی تبدیل در فرایند تولید هماهنگ عبارت است از نسبت شدت پرتوهای هماهنگ ایجادشده به پرتوهای اولیه، یعنی  $h = I_{HG}/I_{FW}$ . حداکثر بازده در حداقل عدم تطبیق بردار موج  $\Delta k=0$  میسر است و با افزایش  $\Delta k$  بازدهی تبدیل نیز کاهش می‌یابد. مطالعه این پارامتر برای تولید هماهنگ دوم، توسط افراد زیادی به صورت تحلیلی [۱، ۲۷-۲۸] و عددی [۲۹-۳۱] و آزمایشگاهی [۳۲-۳۴] انجام شده است. در این موارد، در نظر گرفتن میرایی موج اولیه ( $dE_\omega/dz \neq 0$ ) و همچنین عدم تطبیق فاز ( $\Delta k \neq 0$ ) برای توصیف پدیده‌های تجربی الزامی است. آرمسترانگ و همکاران [۲۷] معادله نهایی بازده را با حل تحلیلی معادلات جفت‌شده (۵ و ۶)، با در نظر گرفتن عدم تطبیق فازی و همچنین میرایی پرتو اولیه حل کرده‌اند (معادله ۴)، که این معادله بدین صورت است [۳۵]:

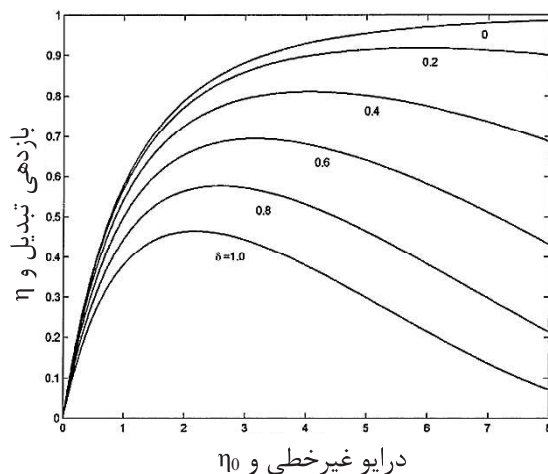
$$h = h_m \sin^2 \left[ \sqrt{h_0/h_m}, h_m^2 \right] \quad (14)$$

که در آن [۳۵]:

$$h_m = 1 + (d^2/2h_0) - \sqrt{[1 + (d^2/2h_0)]^2 - 1} \quad (15)$$

$$d = DKL/2$$

و  $sn[u, m]$  تابع بیضوی ژاکوبی با شناسه  $u$  و پیمانه نوسانات  $m$  است.



شکل ۳ بازدهی تبدیل هماهنگ دوم به صورت تابعی از درایو غیرخطی [۸].

به طور کلی بازدهی تبدیل در رابطه ۱۴ برحسب دو متغیر  $\eta_0$  و  $\delta$  است که  $\eta_0 = (5,46d_{eff}/\lambda_{\omega}n_{\omega})^{3/2}I_{\omega}L^2$  و  $\delta$  همان تطابق فازی است.  $I_{\omega}$  شدت پرتو فرودی و  $L$  طول بلور است. شکل (۳) تغییرات بازدهی تبدیل برحسب  $\eta_0$  برای مقادیر مختلف  $\delta$  را نشان می‌دهد. وقتی تطبیق فاز کامل داریم، تبدیل پرتو اولیه به هماهنگ تولیدشده در بیشینه حالت ممکن قرار دارد. هرگاه عدم تطبیق فاز و میرایی موج اولیه برقرار باشند، بازدهی تولید هماهنگ با افزایش  $\eta_0$  زیاد شده تا به یک مقدار بهینه برسد، پس از آن تبدیل بازگشتی موجب کاهش بازده می‌شود [۸].

### ۳. بلورهای غیرخطی به کاررفته در هماهنگ دوم

#### ۳-۱ بلور KTP

بلور پتاسیم تیتانیل فسفات (KTP: KTiOPO) یکی از مواد اپتیکی غیرخطی منحصربه‌فرد است که به طور وسیعی برای تولید هماهنگ دوم در لیزرهای نئودیمیوم استفاده می‌شود. از ویژگی‌های مهم این بلور، ضریب غیرخطی مؤثر عالی، پهنای نوار پذیرش زاویه‌ای زیاد، پهنای نوار طیفی خوب، پهنای نوار دمایی زیاد، زاویه walk-off کوچک، آستانه تخریب بزرگ، پایداری شیمیایی و مکانیکی خوب را می‌توان نام برد [۳۶].

۲۶ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...

### جدول ۱ ویژگی‌های اپتیکی بلور KTP برای تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG

با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر [۱۰، ۲۴-۲۲، ۳۶].

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
۳,۱۸	ضریب غیرخطی مؤثر ((Pm/V)) $d_{eff}$	$\theta_{PM}=90$ $\varphi_{PM}=35$	زوایای تطبیق فاز نوع II (دمای ۲۹۳ کلوین)
۱۵,۹	پذیرفتاری زاویه‌ای ( $L\Delta\theta$ (mrad.cm))	$0,26^\circ$	زاویه $\rho$ (deg) walk-off
۲۵	پذیرفتاری دمایی (( $L\Delta T$ (cm.°C))	۰,۵۶	پذیرفتاری طیفی ( $L\Delta\lambda$ (cm.nm))
$0,1 \times 10^{-8}$	پاشندگی مرتبه صفرم $\beta_0$ (1/m)	۰,۰۰۵	ضریب جذب خطی (( $\alpha$ (cm <sup>-1</sup> ))
۱۱۸,۶۹	پاشندگی مرتبه دوم $\beta_2$ (fs <sup>2</sup> /mm)	$0,5 \times 10^{-8}$	پاشندگی مرتبه اول $\beta_1$ (s/m)
۲-۳	شدت آستانه <sup>۱</sup> ( $I_{thr}$ (GW/cm <sup>2</sup> ))	۰,۳۴۹	پارامتر $\beta_0/n_0$ (1/mrad.cm)

از معایب این بلور می‌توان از پدیده‌ای نام برد که به Grey tracking معروف است. پهنای نوار دمایی فوق‌العاده این بلور موجب پایداری انرژی تپی پرتو تولیدشده می‌شود. هم‌چنین، کوچک بودن زاویه walk-off آن امکان استفاده از طول‌های بیشتر این بلور را نسبت به بلورهای دیگر فراهم می‌کند [۳۶]. ویژگی‌های اپتیکی این بلور در تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG در جدول (۱) آمده است [۱۰، ۲۴-۲۲، ۳۶].

### ۲-۳ بلور BBO

بلور بتا باریم بورات ( $BaB_2O_4$  - BBO) بلور تک‌محوره منفی با گروه تقارنی 3m است. این بلور نیز جزء یکی از مهم‌ترین بلورهای غیرخطی به شمار می‌آید [۲۵] و یکی از رایج‌ترین بلورها در تولید امواج فرابنفش و مرئی است. ویژگی‌های اپتیکی این بلور شامل ضریب غیرخطی عالی، آستانه تخریب بزرگ، پهنای پذیرش دمایی عالی، همگنی اپتیکی خوب، پذیرفتاری زاویه‌ای کم، زاویه walk-off بزرگ، نم‌گیری و نرمی سطح است.

<sup>۱</sup> شدت آستانه برای لیزر پالسی ۱۰ هرتز با پهنای زمانی ۱۰ نانوثانیه

**جدول ۲** ویژگی‌های اپتیکی بلور BBO برای تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG

با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر [۱۰، ۲۴-۲۲، ۳۶].

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
$\theta_{PM}=22,8$ $\varphi_{PM}=0$	زوایای تطبیق فاز نوع I (دمای ۲۹۳ کلوین)	۱,۹۴	ضریب غیرخطی مؤثر ((Pm/V)) $d_{eff}$
نوع I: ۰,۸۴ نوع II: ۱,۲۵	پذیرفتاری زاویه‌ای ( $L\Delta\theta$ (mrad.cm))	$\theta_{PM}=22,4$ $\varphi_{PM}=30$	زوایای تطبیق فاز نوع II (دمای ۲۹۳ کلوین)
نوع I: ۲,۷ نوع II: ۳,۲	زاویه walk-off $\rho$ (deg)	۵۵	پذیرفتاری دمایی (( $\Delta T$ (cm.°C))
کمتر از ۰,۰۰۱	ضریب جذب خطی (( $\alpha$ (cm <sup>-1</sup> ))	نوع I: ۰,۶۶ نوع II: ۱,۰۲	پذیرفتاری طیفی (( $L\Delta\lambda$ (nm.cm))
$0,55 \times 10^{-8}$	پاشندگی مرتبه اول $\beta_1$ (s/m)	$0,009 \times 10^9$	پاشندگی مرتبه صفرم $\beta_0$ (s/m)
نوع I: ۶,۶۱ نوع II: ۴,۴۴	پارامتر $\beta_0/n_0$ (1/mrad.cm)	۳۸,۵۳۶	پاشندگی مرتبه دوم $\beta_2$ (fs <sup>2</sup> /mm)
		۲-۳	شدت آستانه (( $I_{thr}$ (GW/cm <sup>2</sup> ))

با توجه به نم گیر بودن، این بلور باید در محیطی خشک نگهداری شود و محیطی مناسب جهت جلوگیری از آسیب برای آن فراهم کرد. هنگام استفاده از این بلور، با توجه به پذیرفتاری زاویه‌ای کم و بزرگ بودن زاویه walk-off، باید از لیزرهایی با کیفیت اپتیکی خوب جهت تابش بر این بلور استفاده کرد، که واگرایی کمی دارند، چرا که در غیر این صورت بازدهی خوبی به دست نخواهد آمد. تطابق فازی (در بخش ۳ معرفی شده است) نوع I و II برای امکان پذیر است. ویژگی‌های اپتیکی این بلور در تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG در جدول (۲) [۱۰، ۲۴-۲۲، ۳۶] آمده است.

**۳-۳ بلور LBO**

بلور لیتیم تری بورات (LBO: LiB<sub>3</sub>O<sub>5</sub>) در قیاس با BBO برای تولید هماهنگ دوم در تابش فرسرخ نزدیک و برای OPO در ناحیه نور مرئی و فرسرخ نزدیک کاربرد دارد. این بلور از خروجی پایدارتر نسبت به KTP برخوردار است زیرا اثر Gray tracking ندارد.



۲۸ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...

### جدول ۳ ویژگی‌های اپتیکی بلور LBO برای تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG

با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر [۱۰، ۲۴-۲۲، ۳۶].

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
$\theta_{PM}=90$ $\varphi_{PM}=11,7$	زوایای تطبیق فاز نوع I (دمای ۲۹۳ کلوین)	$\theta_{PM}=20$ $\varphi_{PM}=90$	زوایای تطبیق فاز نوع II (دمای ۲۹۳ کلوین)
نوع I: ۰٫۶ نوع II: ۰٫۱۲	زاویه $\rho$ (deg) walk-off	۱٫۱۶	ضریب غیرخطی مؤثر ((Pm/V)) $d_{eff}$
نوع I: ۱ نوع II: ۱٫۳	پذیرفتاری طیفی ( $L\Delta\lambda$ (nm.cm))	نوع I: ۸٫۵ نوع II: ۱۵٫۲	پذیرفتاری زاویه‌ای ( $L\Delta\theta$ (mrad.cm))
۰٫۰۰۰۳۵	ضریب جذب خطی ( $\alpha$ (cm <sup>-1</sup> ))	۵	پذیرفتاری دمایی (( $L\Delta T$ (cm.°C))
$0,52 \times 10^{-8}$	پاشندگی مرتبه اول $\beta_1$ (s/m)	$0,009 \times 10^9$	پاشندگی مرتبه صفرم $\beta_0$ (1/m)
نوع I: ۰٫۶۵ نوع II: ۰٫۳۶	پارامتر $\beta_0/n_0$ (1/mrad.cm)	۱۵٫۲۷۴	پاشندگی مرتبه دوم $\beta_2$ (fs <sup>2</sup> /mm)
		بیشتر از ۰٫۹	شدت آستانه (( $I_{thr}$ (GW/cm <sup>2</sup> ))

بلور LBO ویژگی‌های اپتیکی هم‌چون: پهنای شفافیت زیاد (۱۵۰ نانومتر تا ۱٫۶ میکرومتر)، ضریب غیرخطی عالی، آستانه تخریب بزرگ، زاویه walk-off بسیار کوچک، پذیرش زاویه‌ای بزرگ، همگنی نوری خوب، ناحیه تطابق فازی نوع I و II (۰٫۹۵ میکرومتر تا ۱٫۸ میکرومتر) دارد. به دلیل بزرگ بودن ضریب غیرخطی و آستانه تخریب و هم‌چنین زاویه walk-off بسیار کوچک و پذیرش زاویه‌ای بزرگ، این بلور برای تولید هماهنگ دوم لیزرها استفاده می‌شود. ویژگی‌های اپتیکی این بلور در تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG در جدول (۳) [۱۰، ۲۴-۲۲، ۳۶] آمده است.

### ۴. نتایج شبیه‌سازی تولید هماهنگ دوم

در این بخش، تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG را برای بلورهای KTP و BBO و LBO بررسی و شبیه‌سازی می‌کنیم. لیزر فرودی به بلور غیرخطی ما لیزر تپی با شکل تپ پرتو گاوسی و طول موج ۱۰۶۴ نانومتر، چگالی انرژی ۱ ژول در سانتی‌متر مربع، پهنای زمانی تپ ۱۰ نانوثانیه است. با توجه

به این ویژگی‌های لیزر فرودی، در ابتدا دو پدیده مهم پراش و پاشندگی را برای پرتو فرودی به بلور غیرخطی بررسی می‌کنیم. لازم است ذکر کنیم که تمام شبیه‌سازی‌های موجود در این مقاله با استفاده از نرم‌افزار متلب انجام شده است. رابطه پراش برای پرتو لیزری با شعاع  $1/e\omega_0$  و طول موج  $\lambda_0$  که در یک بلور غیرخطی با ضریب شکست خطی  $n_0$  در حال انتشار است، از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۳۷]:

$$L_{diff} = \frac{p(1/e v_0)n_0}{I_0} \quad (16)$$

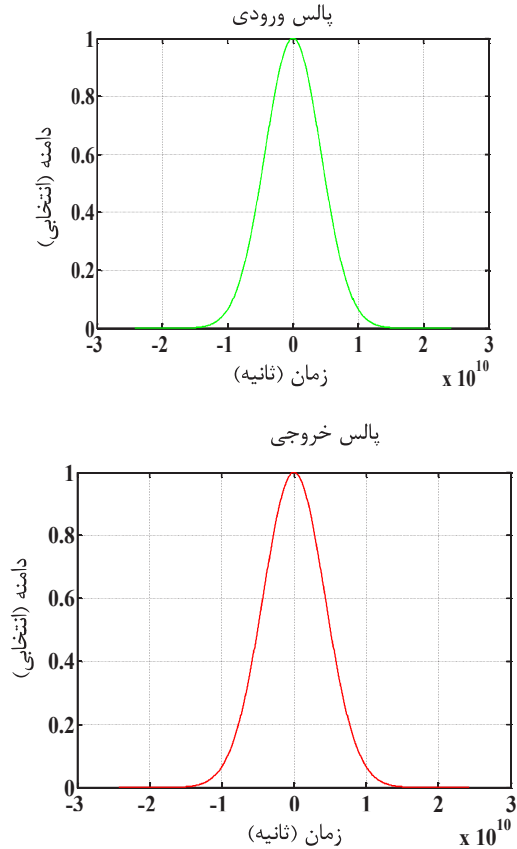
اگر ضخامت بلور کمتر از طول پراش باشد، پراش پرتو از طریق بلور نادیده گرفته می‌شود. اگر ضخامت نمونه بزرگتر از  $L_{diff}$  باشد، پراش پرتو چشمگیر است. با توجه به رابطه فوق و با انجام محاسبات طول پراش برای یک بلور غیرخطی، برای مثال KTP (جدول ۱)، ۴ متر خواهد بود. با توجه به آنکه طول بلور به طور متداول از مرتبه سانتی‌متر است، این اثر نیز ناچیز است. اثر دیگری که بررسی می‌شود، اثر پاشندگی است. طول پاشندگی پرتو در داخل بلور از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود [۲]:

$$L_{dis} = 2t^2 \left[ \left( \frac{k}{w} \right)_{w=w_0} \right]^{-1} \quad (17)$$

که در آن،  $\tau$  پهنای زمانی پ و  $\omega_0$  بسامد نور روانه شده به بلور است. زمانی که  $L_{dis} > L$  باشد، آثار پاشندگی پ مهم خواهد شد. با توجه به مقادیر پاشندگی مرتبه دوم یعنی پاشندگی سرعت گروه برای هر یک از ۳ بلور که در جداول (۱ تا ۳) آمده‌اند، به این نتیجه می‌رسیم که آثار پاشندگی نیز نادیده گرفته می‌شود. با وجود این، ما آثار پاشندگی را برای پ ۱۰ نانوثانیه با استفاده از روش فوریه تقسیم گام<sup>۱</sup> بررسی کرده‌ایم. نتیجه شبیه‌سازی اثر پاشندگی در شکل (۴) آمده است که با توجه به این شکل، پاشندگی اثری در پ ۱۰ نانوثانیه نخواهد گذاشت. بعد از مطمئن شدن از عدم بازدهی آثار پراش و پاشندگی بر روی پ ۱۰ نانوثانیه، بازدهی تبدیل هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG با استفاده از بلورهای KTP و BBO و LBO را در چیدمان برون‌کاواکی مفروض بررسی می‌کنیم. درخور ذکر است که افزایش دمای بلور در نتیجه نرخ تکرار پ ورودی لحاظ شده است.

<sup>1</sup> Split-Step Fourier Method

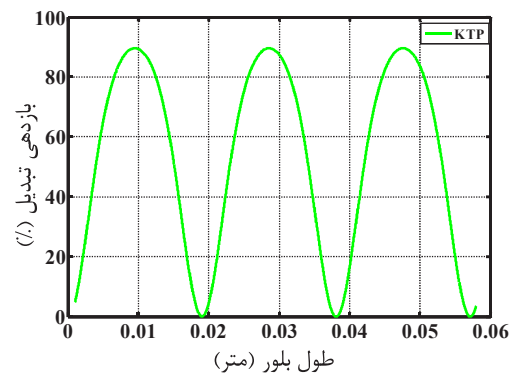
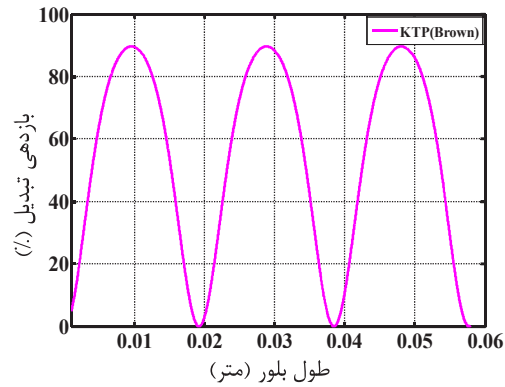
۳۰ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...



شکل ۴ اثر پاشندگی در تپ ۱۰ نانوثانیه.

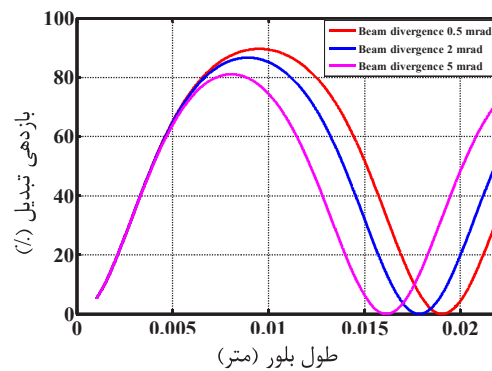
#### ۱-۴ بلور KTP

شکل (۵) بازدهی تولید هماهنگ دوم را برحسب طول بلور KTP به تصویر می‌کشد. در این شکل، زاویه واگرایی لیزر ۰٫۵ میلی‌رادیان و افزایش دمای ۲ درجه سلسیوس لحاظ شده است. مطابق با این نمودار، بازدهی بلور در طول‌های ۹٫۵ میلی‌متر، ۲۸ میلی‌متر و ۴۷ میلی‌متر بیشینه و دارای مقدار ۸۹٫۵۹ درصد است، که سازگاری خوبی با یکی از پژوهش‌های انجام شده توسط براون و همکاران [۱۱] دارد. در این مقاله، محقق از لیزر ورودی با انرژی قلّه ۹۸۰ میلی‌ژول، زاویه واگرایی ۰٫۴۵ میلی‌رادیان و نرخ تکرار تپ ۱۰ هرتز استفاده کرده است. مقدار بازدهی به دست آمده در این مقاله ۸۰ درصد گزارش شده است که با انجام شبیه‌سازی‌های لازم مقدار بازدهی ۸۷٫۵ درصد به دست آمد که با توجه شبیه‌سازی بودن نتایج و نزدیک بودن مقادیر نرخ تکرار، توان ورودی و نیز زاویه واگرایی، مطابقت بسیار خوبی حاصل شده است.



شکل ۵ بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور KTP: نتایج شبیه‌سازی (تصویر بالا) و نیز شبیه‌سازی پژوهش آزمایشگاهی براون و همکاران با مشخصات لیزر با چگالی انرژی ۱ ژول در سانتی‌متر مربع و زاویه واگرایی ۰٫۵ میلی‌رادیان و نرخ تکرار ۱۰ هرتز (تصویر پایین) [۱۱].

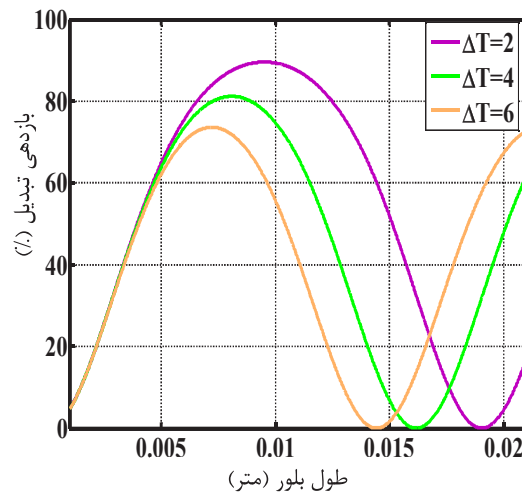
شکل ۶ (بازدهی بلور KTP را با لحاظ کردن زوایای واگرایی نشان می‌دهد.



شکل ۶ بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور KTP با در نظر گرفتن زوایای واگرایی ۰٫۵ میلی‌رادیان، ۲ میلی‌رادیان، ۵ میلی‌رادیان.

۳۲ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...

لیزر ۰/۵ میلی‌رادیان، ۲ میلی‌رادیان و ۵ میلی‌رادیان به تصویر می‌کشد که در آن افزایش دمای ایجادشده ۲ درجه سلسیوس در بلور لحاظ شده است. مطابق با این نمودار، با افزایش زاویه واگرایی بازدهی تولید هماهنگ دوم کاهش می‌یابد و دلیل آن افزایش عدم تطابق فازی است. به دلیل پذیرفتاری زاویه‌ای عالی این بلور، این کاهش شدید (تا ۸۰ درصد) نیست. به عنوان یک نتیجه، هر قدر کیفیت پرتو فرودی بیشتر باشد، بازدهی تولید هماهنگ نیز بیشتر خواهد بود. شکل (۷) بازدهی بلور KTP را این بار با لحاظ کردن افزایش دمای ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس نمایش می‌دهد و زاویه واگرایی لیزر نیز ۰/۵ میلی‌رادیان در نظر گرفته شده است.

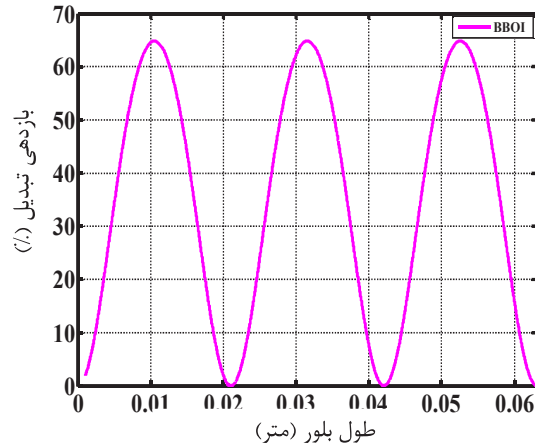


شکل ۷ بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور KTP با در نظر گرفتن افزایش دمای بلور ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس.

افزایش دمای بلور افزایش عدم تطابق فازی و در نتیجه کاهش بازدهی تولید هماهنگ دوم تا مقدار ۷۲ درصد را در پی خواهد داشت.

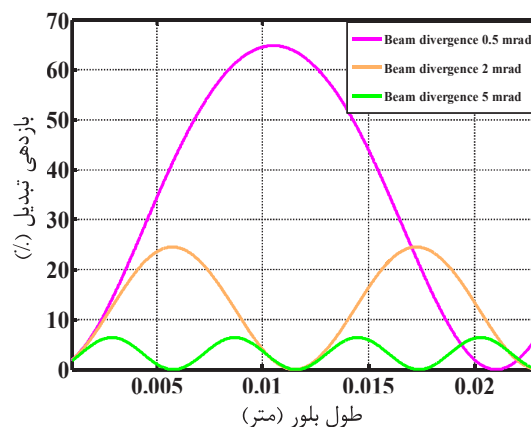
#### ۲-۴ بلور BBO

شکل (۸) بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور BBO با تطابق فاز از نوع I (BBOI) را نشان می‌دهد که در آن، زاویه واگرایی لیزر ۰/۵ میلی‌رادیان و افزایش دمای ۲ درجه سلسیوس اعمال شده است. مطابق با این نمودار بازدهی بلور در طول‌های ۱۰ میلی‌متر و ۳۱ میلی‌متر و ۵۲ میلی‌متر بیشینه و مقدار ۶۴/۸۵ درصد دارد.



شکل ۸ بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور BBOI.

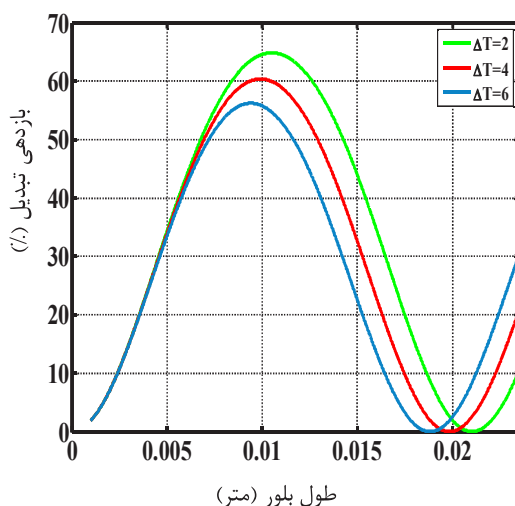
شکل ۹، بازدهی تولید هماهنگ دوم را با لحاظ کردن زوایای واگرایی لیزر ۰٫۵ میلی رادیان، ۲ میلی رادیان و ۵ میلی رادیان و نیز افزایش ۲ درجه سلسیوس دمای بلور به تصویر می کشد. مطابق با این نمودار با افزایش زاویه واگرایی، بازدهی تولید هماهنگ دوم به صورت چشمگیری تا ۷ درصد کاهش می یابد و دلیل آن پذیرفتاری زاویه ای بسیار کم این بلور است. بنابراین، اگر بخواهیم در چیدمان آزمایشگاهی با این بلور کار کنیم، باید لیزر فرودی از کیفیت اپتیکی بسیار مطلوبی برخوردار باشد و زاویه واگرایی کمی داشته باشد تا اینکه بازدهی خوبی به دست آید.



شکل ۹ بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور BBOI با در نظر گرفتن زوایای واگرایی ۰٫۵ میلی رادیان، ۲ میلی رادیان، ۵ میلی رادیان.

۳۴ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...

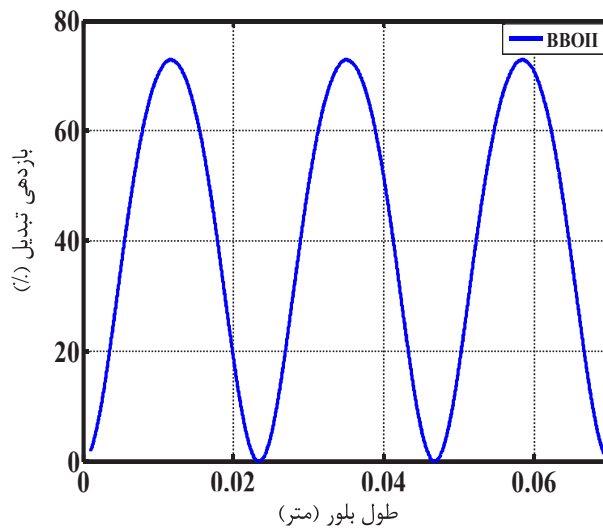
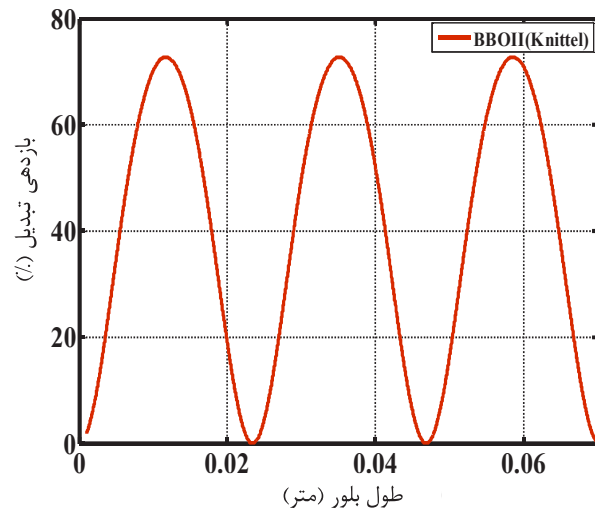
شکل (۱۰)، بازدهی تولید هماهنگ دوم را برحسب طول بلور BBOI با لحاظ کردن تغییرات دمای ۲، ۴ و ۶ درجه سلسیوس نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل، افزایش دما به دلیل پذیرفتاری دمایی مناسب و بالای این بلور بازدهی چشمگیری در بازدهی خروجی تولید هماهنگ دوم (کاهش بازدهی تا مقدار ۵۶ درصد) ندارد.



شکل ۱۰ بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور BBOI با در نظر گرفتن افزایش دمای بلور ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس.

از بلور BBOII نیز به عنوان بلوری پرکاربرد به منظور تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG استفاده می‌کنند. بازدهی بلور BBOII برحسب طول بلور با در نظر گرفتن زاویه واگرایی لیزر ۰/۵ میلی‌رادیان و افزایش دمای ۲ درجه سلسیوس به صورت ۰ شکل (۱۱) است.

مطابق با این نمودار، بازدهی بلور در طول‌های ۱۱ میلی‌متر و ۳۵ میلی‌متر و ۵۸ میلی‌متر بیشینه بوده و دارای مقدار ۷۲/۸۴ درصد است که این مقدار بیشتر از بازدهی BBOI است. نتایج آزمایش بر این بلور سازگاری خوبی با یکی از پژوهش‌ها توسط نایتل و همکاران [۳۸] برای بلور BBOII دارد. در این مقاله، از لیزر ورودی با انرژی قله ۳۳۱/۵ میلی‌ژول و زاویه واگرایی ۰/۵ میلی‌رادیان و نرخ تکرار ۳۰ هرتز استفاده شده است. مقدار بازدهی به دست آمده در این مقاله ۷۰ درصد گزارش شده است که با شبیه‌سازی‌های لازم مقدار بازدهی ۷۲/۵۸ درصد به دست آمد که تطابق خوبی با در نظر گرفتن توان و نرخ تکرار که مقداری نزدیک به ۱ ژول است و نیز زاویه واگرایی ۰/۵ میلی‌رادیان حاصل شده است.

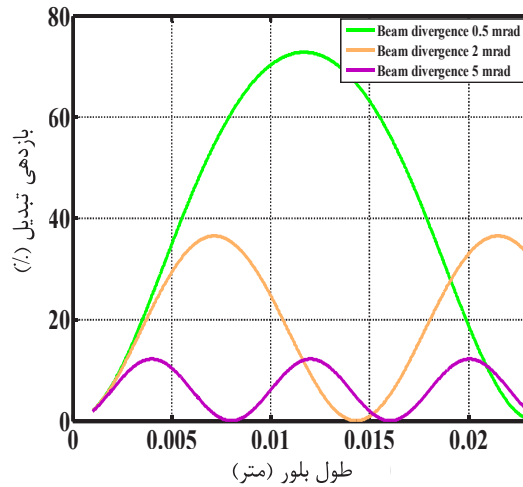


شکل ۱۱ بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور BBOII: نتایج شبیه‌سازی (تصویر بالا) و نیز شبیه‌سازی پژوهش آزمایشگاهی نایتل با مشخصات لیزر با انرژی قله ۳۳۱٫۵ میلی ژول در سانتی متر مربع و زاویه واگرایی ۰٫۵ میلی رادیان (تصویر پایین) [۳۸].

شکل (۱۲)، بازدهی تولید هماهنگ دوم را برحسب طول بلور BBOII با لحاظ کردن زوایای واگرایی ۰٫۵ میلی رادیان، ۲ میلی رادیان و ۵ میلی رادیان و نیز افزایش دمای ۲ درجه سلسیوس به تصویر می کشد. همانند BBOI، زاویه واگرایی نیز تأثیر چشمگیری در میزان بازدهی هماهنگ دوم بلور BBOII (کاهش بازدهی تا مقدار ۱۳ درصد) دارد.

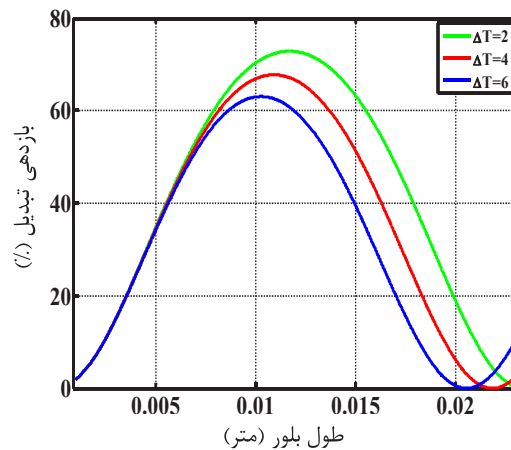


۳۶ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...



شکل ۱۲ بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور BBOII با در نظر گرفتن زوایای واگرایی ۰٫۵ میلی‌رادیان، ۲ میلی‌رادیان و ۵ میلی‌رادیان.

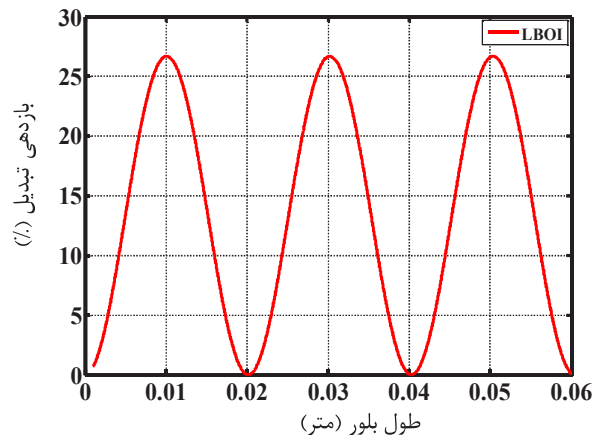
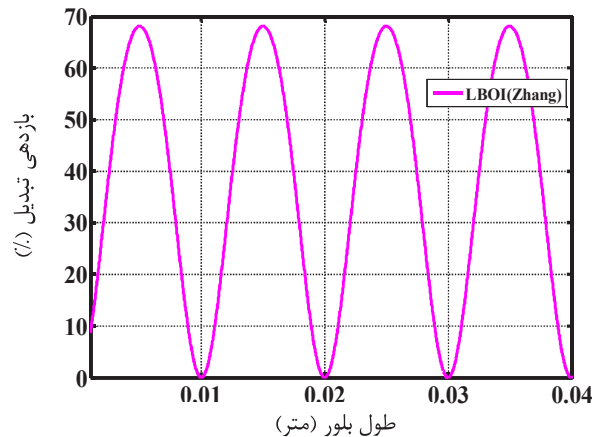
شکل (۱۳)، بازدهی تولید هماهنگ دوم را برحسب طول بلور BBOII با لحاظ کردن افزایش دماهای ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس نشان می‌دهد که در آن زاویه واگرایی لیزر ۰٫۵ میلی‌رادیان در نظر گرفته شده است. اگر به مقدار بازده‌های به دست آمده در شکل نگاه کنیم متوجه خواهیم شد که افزایش دمای بلور تأثیر زیادی در بازدهی این بلور در مقایسه با بلوری مانند KTP ندارد (کاهش تا ۶۲/۵ درصد) که این نیز به دلیل پذیرفتاری دمایی نسبتاً خوب این نوع بلور است.



شکل ۱۳ بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور BBOII با در نظر گرفتن افزایش دمای بلور ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس.

### ۳-۴ بلور LBO

نمودارهای بازدهی بلور LBO و نیز وابستگی این پارامتر به پارامترهای زاویه واگرایی پرتو فرودی و نیز دمای بلور برحسب طول بلور به ترتیب در شکل‌های (۱۴) و (۱۵) آمده است. در شکل (۱۴)، زاویه واگرایی لیزر ۰/۵ میلی‌رادیان و افزایش دمای ۲ درجه سلسیوس لحاظ شده است.

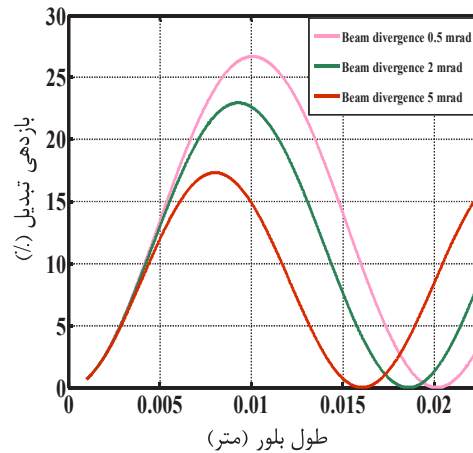


شکل ۱۴ بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور LBO: نتایج شبیه‌سازی (تصویر بالا) و نیز شبیه‌سازی پژوهش آزمایشگاهی گروه ژانگ و همکاران [۱۴] با مشخصات لیزر با انرژی قله ۲۷۰ میلی‌ژول و زاویه واگرایی ۰/۵ میلی‌رادیان (تصویر پایین).

مطابق با این نمودار بازدهی بلور در طول‌های ۱۰ میلی‌متر و ۳۰ میلی‌متر و ۵۰ میلی‌متر بیشینه و مقدار ۲۶/۶۹ درصد را دارد. یکی از کارهای تجربی انجام شده با این بلور، متعلق به گروه ژانگ و همکاران [۱۴] است. در این مقاله، بازدهی ۵۳/۴ درصدی تبدیل تولید هماهنگ دوم با استفاده از

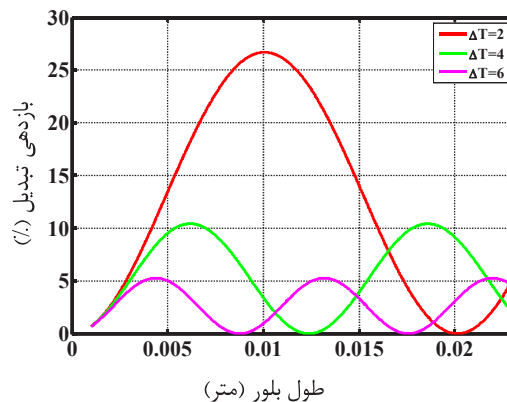
۳۸ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...

بلور LBOI به طول ۲۵ میلی‌متر گزارش شده است. لیزر استفاده‌شده با مشخصات انرژی قله ۲۷۰ میلی‌ژول، پهنای زمانی تب ۵ نانوثانیه و نیز نرخ تکرار تب ۵۰۰ هرتز معرفی شده است [۱۴].



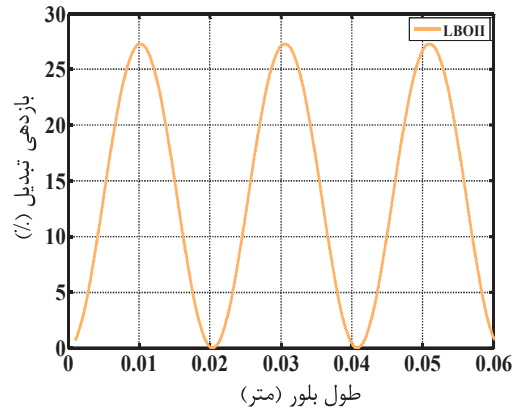
شکل ۱۵ بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول LBOI با در نظر گرفتن زوایای واگرایی ۰/۵ میلی‌رادیان، ۲ میلی‌رادیان، ۵ میلی‌رادیان.

با شبیه‌سازی پارامترهای ورودی و در نظر گرفتن زاویه واگرایی ۰/۵ میلی‌رادیان در این پژوهش تجربی، بازدهی ۶۸/۱۲ درصدی به دست آمد که در شکل (۱۴) به نمایش در آمده است. شکل (۱۵)، بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور LBOI با لحاظ کردن واگرایی ۰/۵ میلی‌رادیان، ۲ میلی‌رادیان و ۵ میلی‌رادیان نمایش می‌دهد که در آن افزایش زاویه واگرایی ۵ میلی‌رادیان، کاهش بازدهی تا مقدار ۱۷ درصد را در پی خواهد داشت.



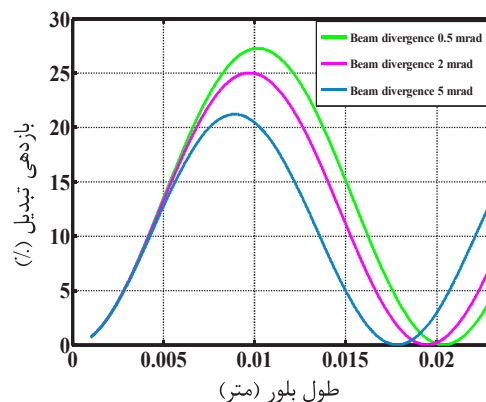
شکل ۱۶ بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور LBOI با در نظر گرفتن افزایش دمای بلور ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس.

شکل (۱۶) نیز بازدهی تولید هماهنگ دوم را برحسب طول بلور LBOI با لحاظ کردن افزایش دمای ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس و زاویه واگرایی لیزر ۰/۵ میلی رادیان نمایش می دهد. مطابق با این نمودار با افزایش تغییرات دمایی، بازدهی تولید هماهنگ دوم به شکل چشمگیری تا ۵ درصد کاهش می یابد.



شکل ۱۷ بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور LBOII.

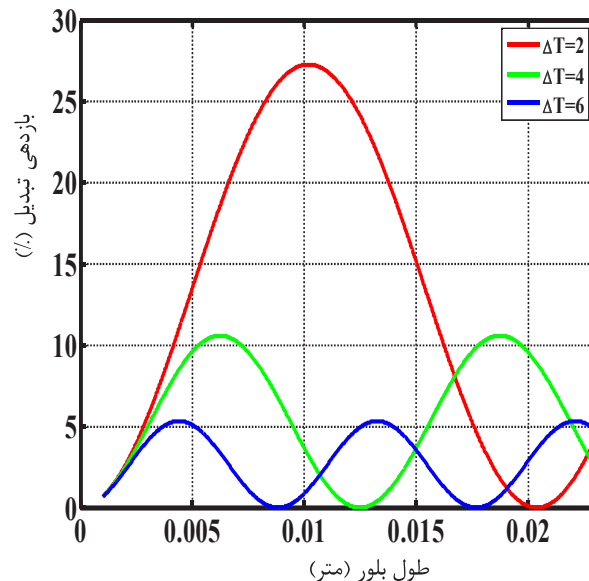
یکی دیگر از بلورهای مناسب برای تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG، بلور LBOII است. بازدهی بلور LBOII برحسب طول بلور به صورت شکل (۱۷) است. در این شکل، زاویه واگرایی لیزر ۰/۵ میلی رادیان و افزایش دمای ۲ درجه سلسیوس لحاظ شده است. مطابق با این نمودار، بازدهی بلور در طول های ۱۰ میلی متر و ۳۰ میلی متر و ۵۱ میلی متر بیشینه و دارای مقدار ۲۷/۳۰ درصد است.



شکل ۱۸. بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور LBOII با در نظر گرفتن زوایای واگرایی ۰/۵ میلی رادیان، ۲ میلی رادیان و ۵ میلی رادیان.

۴۰ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...

شکل (۱۸) بازدهی تولید هماهنگ دوم بلور LBOII را با لحاظ کردن زوایای واگرایی لیزر ۰/۵ میلی‌رادیان و ۲ میلی‌رادیان و ۵ میلی‌رادیان و نیز افزایش دمای ۲ درجه سلسیوس به تصویر می‌کشد. افت بازدهی این بلور در مقایسه با بلورهای LBOI و به خصوص بلورهای BBOI و BBOII کمتر است، که نشان از پذیرفتاری زاویه‌ای بهتر این بلور دارد. شکل (۱۹) بازدهی تولید هماهنگ دوم را برحسب طول بلور LBOII با لحاظ کردن افزایش دمای ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس و نیز زاویه واگرایی لیزر ۰/۵ میلی‌رادیان نشان می‌دهد. همانند سایر بلورها، با افزایش تغییرات دمایی، بازدهی تولید هماهنگ دوم کاهش می‌یابد و این تغییر نیز همانند نوع I این بلور، به دلیل پذیرفتاری دمایی اندک این بلور چشمگیر است.



شکل ۱۹. بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول LBOII با افزایش دمای بلور ۲، ۴ و ۶ درجه سلسیوس.

## ۵. بلورهای غیرخطی به کاررفته در هماهنگ چهارم

### ۵-۱ بلور BBO

ویژگی‌های اپتیکی بلور BBO در تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG در جدول (۴) آمده است

[۳۶، ۲۴-۲۲، ۱۰]

**جدول ۴** ویژگی‌های اپتیکی بلور BBO برای تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG

با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر [۱۰، ۲۴-۲۲، ۳۶].

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
$\theta_{PM}= ۴۷,۳$ $\varphi_{PM}=۰$	زوایای تطبیق فاز نوع I (دمای ۲۹۳ کلوین)	۱,۷۵	ضریب غیرخطی مؤثر ((Pm/V)) $d_{eff}$
نوع I: ۰,۳ نوع II: ۰,۴۵	پذیرفتاری زاویه‌ای ( $L\Delta\theta(\text{mrad.cm})$ )	$\theta_{PM}= ۸۱$ $\varphi_{PM}=۰$	زوایای تطبیق فاز نوع II (دمای ۲۹۳ کلوین)
نوع I: ۴,۹ نوع II: ۵,۳	زاویه walk-off $\rho(\text{deg})$	۴,۵	پذیرفتاری دمایی ( $L\Delta T(\text{cm.}^\circ\text{C})$ )
کمتر از ۰,۰۱	ضریب جذب خطی ( $\alpha(\text{cm}^{-1})$ )	نوع I: ۰,۴۵ نوع II: ۰,۶۹	پذیرفتاری طیفی ( $L\Delta\lambda(\text{nm.cm})$ )
$۰,۵۷ \times ۱۰^{-۸}$	پاشندگی مرتبه اول $\beta_1(\text{s/m})$	$۰,۰۰۹ \times ۱۰^۹$	پاشندگی مرتبه صفرم $\beta_0(\text{s/m})$
نوع I: ۱۸,۵۳ نوع II: ۱۲,۳۵	پارامتر $\beta_0/n_0(1/\text{mrad.cm})$	۱۳۲,۵۶	پاشندگی مرتبه دوم $\beta_2(\text{fs}^2/\text{mm})$
		بیشتر از ۰,۵	شدت آستانه ( $I_{thr}(\text{GW}/\text{cm}^2)$ )

**۲-۵ DKDP بلور**

بلور پتاسیم دوتریم فسفات (DKDP:  $\text{KD}_2\text{PO}_4$ ) بلوری تک‌محوره منفی با گروه تقارنی  $42m$  است. این بلور یکی از ایزومرهای KDP است، با این تفاوت که شفافیت بیشتری در ناحیه فروسرخ دارد. از ویژگی‌های اپتیکی آن می‌توان به ضریب غیرخطی نسبتاً اندک، آستانه تخریب بزرگ، شفافیت خوب در ناحیه فرابنفش، دوشکستی خوب و پذیرفتاری زاویه‌ای عالی آن اشاره کرد. DKDP ضریب مؤثر غیرخطی کوچکی دارد. این بلور به دلیل رشد آسان با کیفیت خوب در ابعاد بزرگ و قیمت مناسب مصرف تجاری بیشتری دارد. پذیرفتاری زاویه‌ای مطلوب و walk-off اندک از مزایای این بلور است. DKDP برای طول موج‌های ۲۰۰ نانومتر تا ۱۲۵۰ نانومتر شفاف است. ویژگی‌های اپتیکی این بلور در تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG در جدول (۵) آمده است [۱۰، ۲۴-۲۲، ۳۶].

۴۲ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...

**جدول ۵** ویژگی‌های اپتیکی بلور DKDP برای تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر [۳۶، ۲۴-۲۲، ۱۰].

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
$\theta_{PM}=90$ $\varphi_{PM}=45$	زوایای تطبیق فاز نوع I (دمای ۲۹۳ کلوین)	۰٫۴	ضریب غیرخطی مؤثر ((Pm/V)) $d_{eff}$
۷٫۴	پذیرفتاری دمایی ( $L\Delta T(\text{cm} \cdot ^\circ\text{C})$ )	۰٫۹۴	پذیرفتاری زاویه‌ای ( $L\Delta\theta(\text{mrad} \cdot \text{cm})$ )
۳۲	پذیرفتاری طیفی ( $L\Delta\lambda(\text{nm} \cdot \text{cm})$ )	۱٫۴	زاویه walk-off $\rho(\text{deg})$
$0,008 \times 10^9$	پاشندگی مرتبه صفرم $\beta_0(\text{s/m})$	۰٫۰۰۱	ضریب جذب خطی ( $\alpha(\text{cm}^{-1})$ )
۷۱٫۴۳	پاشندگی مرتبه دوم $\beta_2(\text{fs}^2/\text{mm})$	$0,514 \times 10^{-8}$	پاشندگی مرتبه اول $\beta_1(\text{s/m})$
بیشتر از ۳	شدت آستانه ( $I_{thr}(\text{GW}/\text{cm}^2)$ )	۵٫۹۱	پارامتر $\beta_0/n_0(1/\text{mrad} \cdot \text{cm})$

### ۳-۵ بلور CLBO

بلور سزیم لیتیوم بورات (CLBO: CsLiB6O10)، بلوری تک‌محوره منفی با گروه تقارنی  $42m$  است. این ماده غیرخطی خیلی راحت‌تر از LBO و BBO رشد داده می‌شود. از جمله ویژگی‌های اپتیکی این بلور می‌توان به ضریب غیرخطی بالا، پهنای نوار پذیرش دمایی، طیفی و زاویه‌ای بالا، زاویه walk-off کوچک، آستانه تخریب بزرگ و شفافیت تا طول موج ۱۸۰ نانومتر اشاره کرد. بلور CLBO دارای ضریب غیرخطی کمتر از BBO است، اما به دلیل ویژگی دوشکستی متوسط آن از BBO برتر است. همچنین پهنای نوار پذیرش دمایی و زاویه‌ای بالایی دارد. متأسفانه این بلور نم‌گیر است، به عبارت دیگر با رطوبت موجود در هوا واکنش داده و لذا ویژگی‌های اپتیکی آن افت می‌کند. برای غلبه بر این مشکل باید بلور را در دماهای بالا ۱۴۰-۱۶۰ درجه سلسیوس نگهداری کرد. ویژگی‌های اپتیکی این بلور در تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG در جدول (۶) آمده است [۳۶، ۲۴-۲۲، ۱۰].

### جدول ۶ ویژگی‌های اپتیکی بلور CLBO برای تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG

با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر [۱۰، ۲۴-۲۲، ۳۶].

مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
$\theta_{PM}=62$ $\varphi_{PM}=38$	زوایای تطبیق فاز نوع I (دمای ۲۹۳ کلوین)	۱،۰۱	ضریب غیرخطی مؤثر ((Pm/V)) $d_{eff}$
۸،۳	پذیرفتاری دمایی ( $L\Delta T(\text{cm}.\text{°C})$ )	۰،۴۹	پذیرفتاری زاویه‌ای ( $L\Delta\theta(\text{mrad.cm})$ )
۰،۱۳	پذیرفتاری طیفی ( $L\Delta\lambda(\text{nm.cm})$ )	۱،۸۳	زاویه walk-off $\rho(\text{deg})$
$0.008 \times 10^{-9}$	پاشندگی مرتبه صفرم $\beta_0(\text{s/m})$	۰،۰۰۱	ضریب جذب خطی (( $\alpha(\text{cm}^{-1})$ ))
۷۷،۷۷۸	پاشندگی مرتبه دوم $\beta_2(\text{fs}^2/\text{mm})$	$0.509 \times 10^{-8}$	پاشندگی مرتبه اول $\beta_1(\text{s/m})$
بیشتر از ۰،۹	شدت آستانه (( $I_{thr}(\text{GW}/\text{cm}^2)$ ))	۱۱،۳۴	پارامتر $\beta_0/n_0(1/\text{mrad.cm})$

### ۶. نتایج شبیه‌سازی تولید هماهنگ چهارم

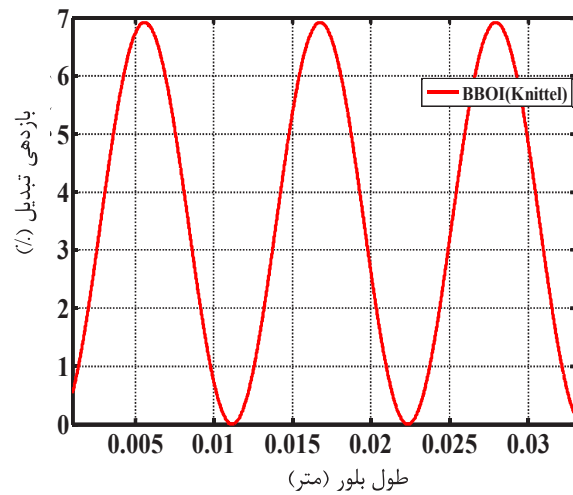
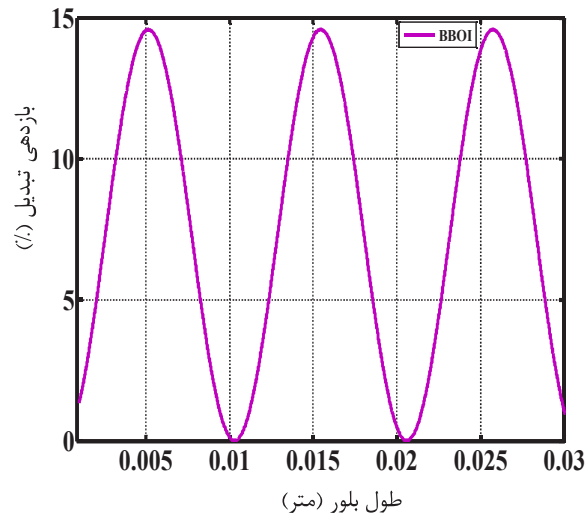
در این بخش، تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG را با استفاده از بلورهای BBO و DKDP و CLBO بررسی و شبیه‌سازی می‌کنیم. هم‌چنین، از هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG به‌دست آمده از بلور KTP با چگالی انرژی ۰/۸۹۵ ژول به عنوان لیزر ورودی لحاظ شده است.

### ۶-۱ بلور BBO

شکل (۲۰) بازدهی تولید هماهنگ چهارم را برحسب طول بلور BBOI نشان می‌دهد که در آن، زاویه واگرایی لیزر ۰/۵ میلی‌رادیان و افزایش دمای ۲ درجه سلسیوس اعمال شده است. مطابق با این نمودار، بازدهی بلور در طول‌های ۵ میلی‌متر و ۱۵ میلی‌متر و ۲۵ میلی‌متر بیشینه و دارای مقدار ۱۴/۵۸ درصد است. نتایج از این بلور سازگاری خوبی با یکی از پژوهش‌های انجام‌شده توسط نایتل و همکاران [۳۸] برای بلور BBOII دارد. در این مقاله، از لیزر ورودی با مشخصات لیزر با چگالی انرژی ۳۳۱،۵ میلی‌ژول در سانتی‌متر مربع و زاویه واگرایی ۰،۵ میلی‌رادیان و نرخ تکرار ۱۰ هرتز استفاده شده است. مقدار بازدهی به‌دست آمده در این مقاله ۳۹/۵ درصد گزارش شده است که با انجام شبیه‌سازی‌های لازم مقدار بازدهی ۶/۹۲ درصد به دست آمد. دلیل این اختلاف میان بازدهی ۱۴/۵۸ درصد و ۳۹/۵ درصد، توان لیزرهای ورودی است.

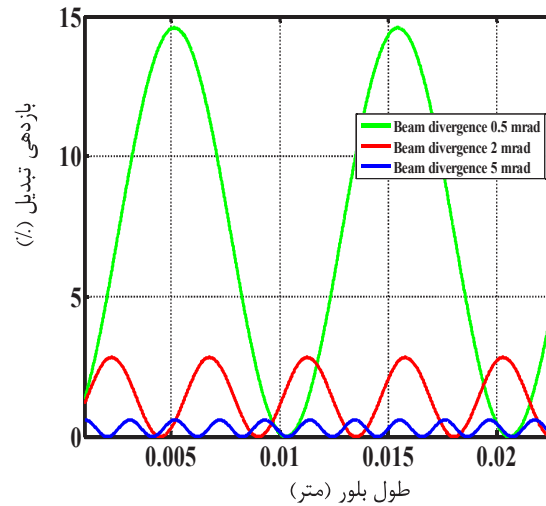


۴۴ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...



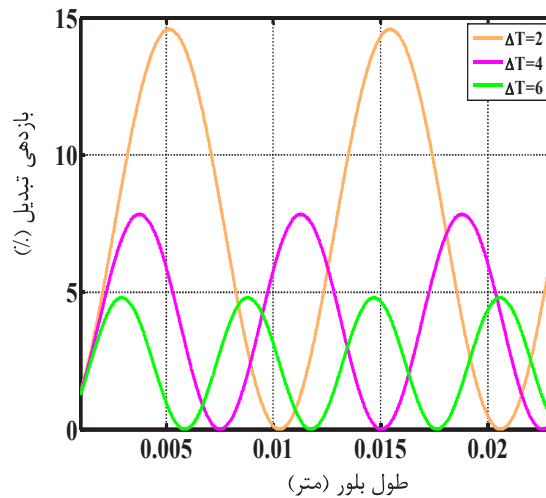
شکل ۲۰ بازدهی تولید هماهنگ چهارم برحسب طول بلور BBOI: نتایج شبیه‌سازی (تصویر بالا) و نیز شبیه‌سازی پژوهش آزمایشگاهی گروه نایتل و همکاران [۳۸] با مشخصات لیزر با چگالی انرژی ۳۳۱٫۵ میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع و زاویه واگرایی ۰٫۵ میلی‌رادیان (تصویر پایین).

شکل (۲۱) بازدهی تولید هماهنگ چهارم برحسب طول بلور BBOI را با لحاظ کردن زوایای واگرایی لیزر ۰٫۵ و ۲ و ۵ میلی‌رادیان و نیز افزایش دمای ۲ درجه سلسیوس به تصویر می‌کشد. با توجه به شکل، افزایش زاویه واگرایی لیزر کاهش چشم‌گیری در بازدهی هماهنگ چهارم این بلور به دلیل پذیرفتاری زاویه‌ای کم را به همراه دارد.



شکل ۲۱ بازدهی تولید هماهنگ چهارم برحسب طول بلور BBOI با در نظر گرفتن زوایای واگرایی ۰٫۵ میلی رادیان، ۲ میلی رادیان، ۵ میلی رادیان.

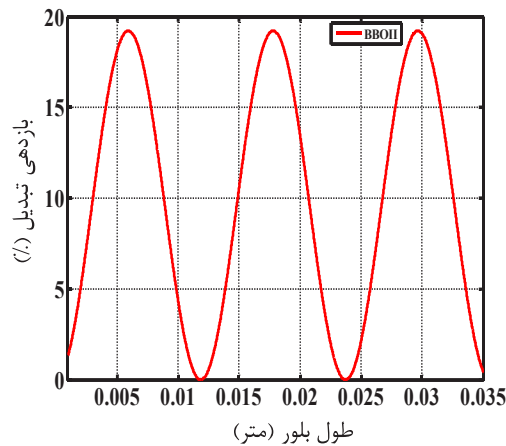
شکل (۲۲) بازدهی تولید هماهنگ چهارم را برحسب طول بلور BBOI با لحاظ کردن تغییرات دمای ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس و نیز زاویه واگرایی لیزر ۰٫۵ میلی رادیان نمایش می دهد که کاهش این پارامتر نیز شدید است.



شکل ۲۲ بازدهی تولید هماهنگ چهارم برحسب طول BBOI با افزایش دمای بلور ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس.

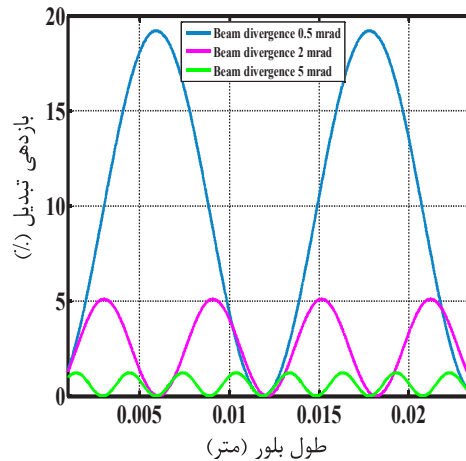
۴۶ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...

شکل (۲۳) بازدهی تولید هماهنگ دوم را برحسب طول بلور BBOII نشان می‌دهد که در آن، زاویه واگرایی لیزر ۰/۵ میلی‌رادیان و افزایش دمای ۲ درجه سلسیوس اعمال شده است. مطابق با این نمودار، بازدهی بلور در طول‌های ۵/۸ میلی‌متر و ۱۷ میلی‌متر و ۲۹ میلی‌متر بیشینه و دارای مقدار ۱۹/۲۱ درصد است.



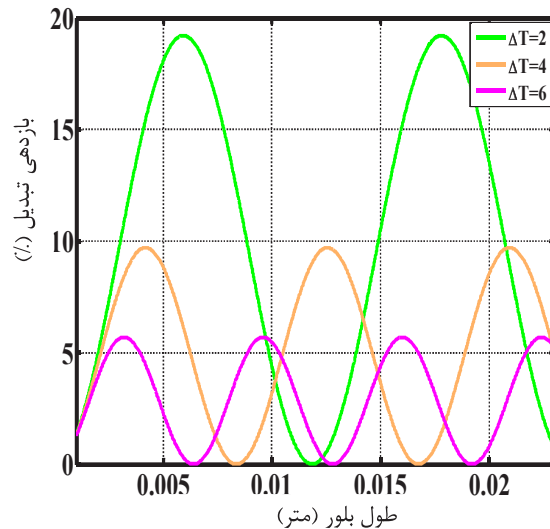
شکل ۲۳ بازدهی تولید هماهنگ چهارم بلور BBOII برحسب طول بلور.

شکل (۲۴) بازدهی تولید هماهنگ دوم را برحسب طول بلور BBOII با لحاظ کردن زوایای واگرایی لیزر ۰/۵ و ۲ و ۵ میلی‌رادیان و تغییر دمای ایجادشده ۲ درجه سلسیوس نشان می‌دهد.



شکل ۲۴. بازدهی تولید هماهنگ چهارم برحسب طول بلور BBOII با در نظر گرفتن زوایای واگرایی ۰/۵ میلی‌رادیان، ۲ میلی‌رادیان و ۵ میلی‌رادیان.

شکل (۲۵) نیز بازدهی تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور BBOII را با لحاظ کردن تغییرات دمای ۲، ۴ و ۶ درجه سلسیوس و زاویه واگرایی لیزر ۰/۵ میلی رادیان نمایش می دهد.

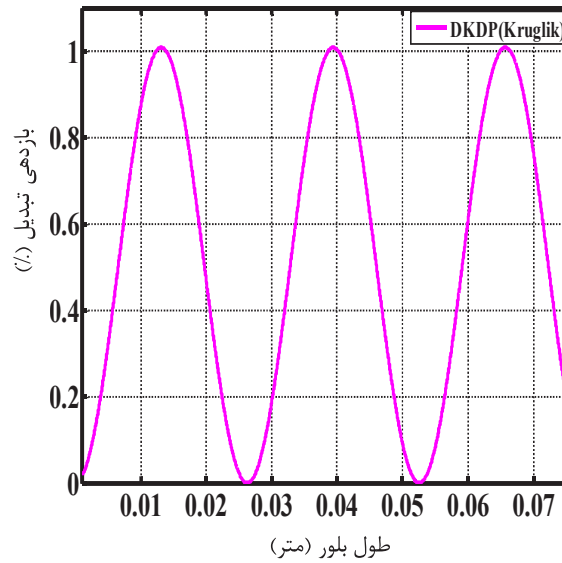
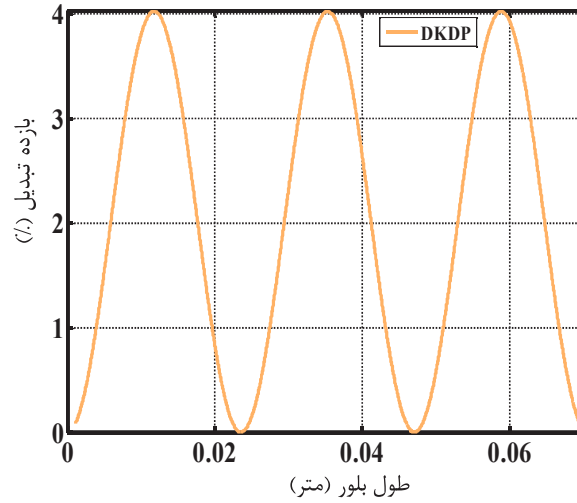


شکل ۲۵ بازدهی تولید هماهنگ چهارم برحسب طول BBOII با افزایش دمای بلور ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس.

### ۶-۱ بلور DKDP

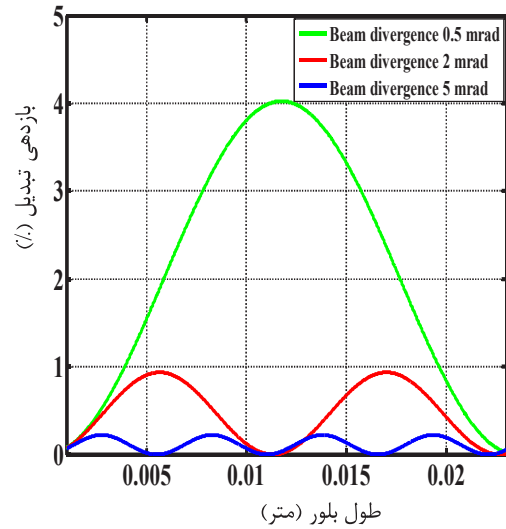
شکل (۲۶) بازدهی تولید هماهنگ چهارم را برحسب طول بلور DKDP نشان می دهد که در آن، زاویه واگرایی لیزر ۰/۵ میلی رادیان و افزایش دمای ۲ درجه سلسیوس اعمال شده است. مطابق با این نمودار، بازدهی بلور در طول های ۱۱ میلی متر و ۳۵ میلی متر و ۵۸ میلی متر بیشینه و دارای مقدار ۴ درصد است. یکی از کارهای تجربی انجام شده با مشخصات لیزر ورودی نزدیک به لیزر ما متعلق به کروگلیک و همکاران است. در این مقاله، از لیزر ورودی با توان ۳۳۱/۵ میلی ژول و زاویه واگرایی ۰/۵ میلی رادیان و نرخ تکرار تپ ۱۰ هرتز استفاده شده است. مقدار بازدهی به دست آمده در این مقاله ۵۰ درصد گزارش شده است، که با انجام شبیه سازی های لازم مقدار بازدهی ۲ درصد به دست آمد، که دلیل این اختلاف پذیرفتاری دمایی بسیار کم این بلور است و شاید توان ورودی کم لیزر استفاده شده در این مقاله سبب این اختلاف شده است.

۴۸ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...



شکل ۲۶ بازدهی تولید هماهنگ چهارم برحسب طول بلور DKDP: نتایج شبیه‌سازی (تصویر بالا) و نیز شبیه‌سازی پژوهش آزمایشگاهی گروه کروگلیک و همکاران [۲۸] با مشخصات لیزر با چگالی انرژی ۳۳۱٫۵ میلی‌ژول در سانتی‌متر مربع و زاویه واگرایی ۰٫۵ میلی‌رادیان (تصویر پایین).

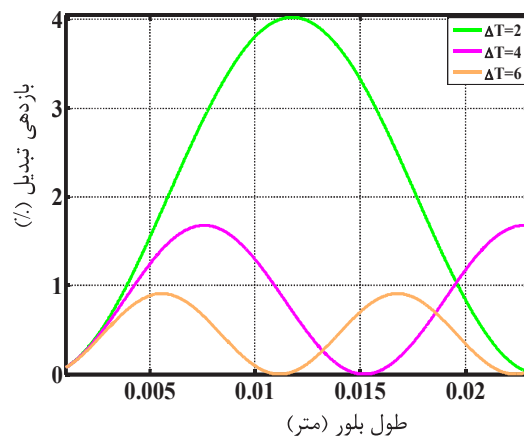
شکل (۲۷) بازدهی تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG را برحسب طول بلور DKDP با لحاظ کردن زوایای واگرایی لیزر ۰٫۵ و ۲ و ۵ میلی‌رادیان و تغییر دمای ایجادشده ۲ درجه سلسیوس نشان می‌دهد.



شکل ۲۷ بازدهی تولید هماهنگ چهارم برحسب طول بلور DKDP با در نظر گرفتن زوایای واگرایی ۰/۵ میلی رادیان، ۲ میلی رادیان، ۵ میلی رادیان.

شکل (۲۹) بازدهی تولید هماهنگ دوم را برحسب طول بلور DKDP با لحاظ کردن تغییرات دمای ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس و نیز زاویه واگرایی لیزر ۰/۵ میلی رادیان نمایش می دهد.

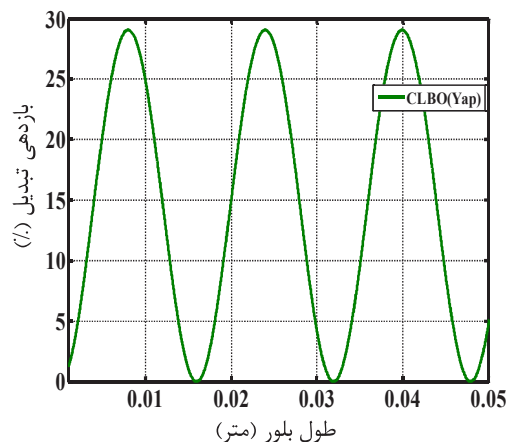
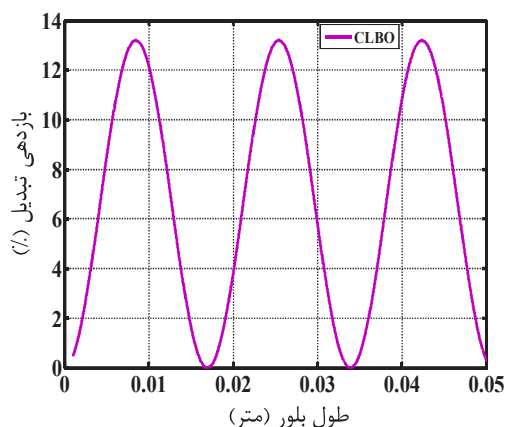
### ۳-۶. بلور CLBO



شکل ۲۸ بازدهی تولید هماهنگ چهارم برحسب طول DKDP با افزایش دمای بلور ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس.

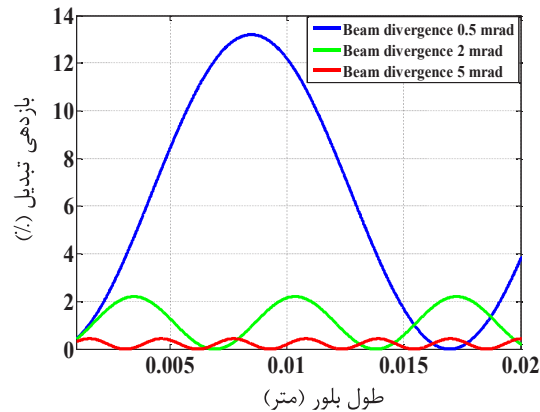
۵۰ / شبیه‌سازی تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با استفاده از بلورهای غیرخطی: ...

شکل (۲۹) بازدهی تولید هماهنگ چهارم را برحسب طول بلور CLBO نشان می‌دهد که در آن، زاویه واگرایی لیزر ۰/۵ میلی‌رادیان و افزایش دمای ۲ درجه سلسیوس اعمال شده است. مطابق با این نمودار، بازدهی بلور در طول‌های ۸/۴ میلی‌متر و ۲۵ میلی‌متر و ۴۲ میلی‌متر بیشینه و دارای مقدار ۱۳/۲ درصد به دست آمد، که سازگاری خوبی با یکی از پژوهش‌های انجام‌شده توسط یاپ [۳۱] دارد. در این مقاله، از لیزر ورودی با توان ۲۳۰۰ میلی‌ژول، زاویه واگرایی ۰/۴ میلی‌رادیان و نرخ تکرار تپ ۱۰ هرتز استفاده شده است. مقدار بازدهی به دست آمده در این مقاله ۲۰ درصد گزارش شده است که با شبیه‌سازی‌های لازم مقدار بازدهی ۲۹/۰۵ درصد به دست آمد که مطابقت بسیار خوبی حاصل شد.



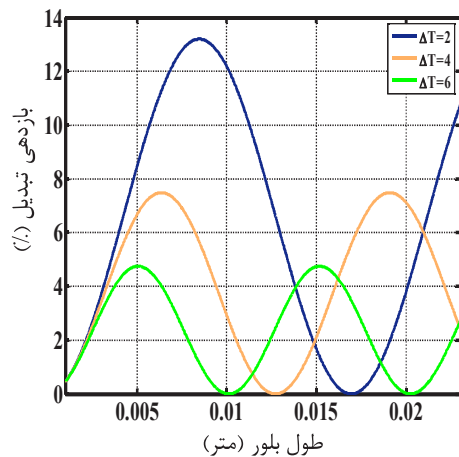
شکل ۲۹ بازدهی تولید هماهنگ چهارم برحسب طول بلور CLBO: نتایج شبیه‌سازی (تصویر بالا) و نیز شبیه‌سازی پژوهش آزمایشگاهی گروه یاپ و همکاران [۳۱] با مشخصات لیزر با چگالی انرژی ۲۳۰۰ میلی‌ژول بر سانتی‌متر مربع و زاویه واگرایی ۰/۵ میلی‌رادیان (تصویر پایین).

شکل (۳۰) بازدهی تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG را برحسب طول بلور CLBO با لحاظ کردن زوایای واگرایی لیزر ۰/۵ و ۲ و ۵ میلی رادیان و افزایش دمای ایجادشده در بلور ۲ درجه سلسیوس نشان می دهد.



شکل ۳۰ بازدهی تولید هماهنگ چهارم برحسب طول بلور CLBO با در نظر گرفتن زوایای واگرایی ۰/۵ میلی رادیان، ۲ میلی رادیان، ۵ میلی رادیان.

شکل (۳۱) بازدهی تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG را برحسب طول بلور CLBO با لحاظ کردن تغییرات دمای ۲ و ۴ و ۶ درجه سلسیوس نیز زاویه واگرایی لیزر ۰/۵ میلی رادیان نمایش می دهد.

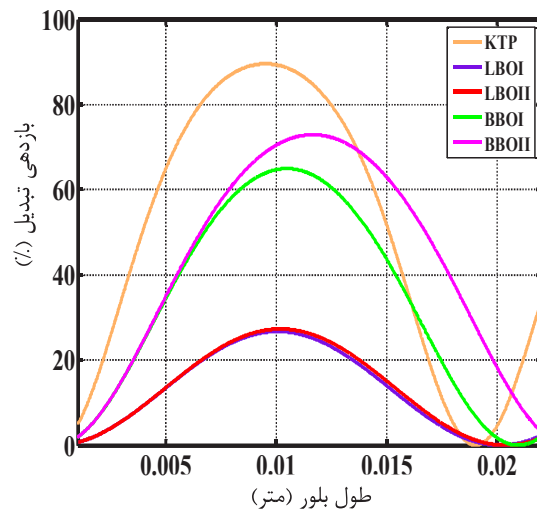


شکل ۳۱ بازدهی تولید هماهنگ چهارم برحسب طول بلور CLBO با در نظر گرفتن زوایای واگرایی ۰/۵ میلی رادیان، ۲ میلی رادیان، ۵ میلی رادیان.



## ۷. نتیجه‌گیری

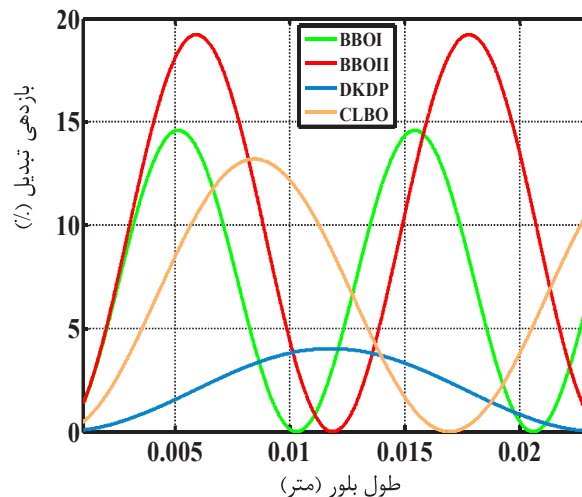
در این مقاله، تولید هماهنگ‌های دوم و چهارم لیزر تپی Nd:YAG با ویژگی‌های طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و چگالی انرژی ۱ ژول در سانتی‌متر مربع و نیز پهنای زمانی تپ ۱۰ نانوثانیه با در نظر گرفتن آثار دمایی و زاویه واگرایی پرتو فرودی و نیز با رویکرد بررسی بازدهی شبیه‌سازی شد. بازدهی تبدیل تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG با استفاده از بلورهای KTP، BBO و LBO و نیز بازدهی تبدیل هماهنگ چهارم این لیزر به بهره‌گیری از بلورهای BBO، DKDP، CLBO ارائه شد. مطابق با شکل (۳۲)، بلور KTP بیشترین بازدهی را از میان بلورهای مذکور به ارمغان آورد و دلیل آن ضریب غیرخطی مؤثر و پهنای نوار پذیرش زاویه‌ای و پهنای نوار دمایی بزرگ‌تر از بقیه بلورها و زاویه walk-off کوچک این بلور در قیاس با بلورهای دیگر است. آستانه تخریب بزرگ که سبب تحمل توان بالای لیزر و نیز پایداری شیمیایی و مکانیکی خوب می‌شود که به تطبیق‌پذیری بسیار مناسبی با پرتو لیزر و شرایط محیطی آزمایش می‌انجامد از دیگر دلایل بازدهی بیشتر این بلور است. بلورهای BBOII و BBOI نیز در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند. ضریب غیرخطی مؤثر کمتر و نیز پذیرفتاری زاویه‌ای کمتر این بلور در قیاس با بلور KTP سبب ایجاد بازدهی کمتر این بلور شده است. بلورهای LBOII و LBOI به دلیل ضریب غیرخطی مؤثر و نیز پذیرفتاری دمایی کمتر از دو بلور دیگر، عدم تطبیق فاز زیادی را ایجاد کردند کمترین بازدهی تولید هماهنگ دوم را به خود اختصاص دادند.



شکل ۳۲ بازدهی بلورهای KTP، BBOI، BBOII، LBOI و LBOII به منظور تولید هماهنگ دوم برحسب طول بلور.

بنابراین، انتخاب ما از فهرست مذکور، KTP است که از نظر تهیه مناسب تر و نیز از لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه تر است. اما در صورتی که پرتو لیزر فرودی از کیفیت اپتیکی خوب و زاویه واگرایی کمتر برخوردار باشد، بلور BBO نیز انتخاب مناسبی خواهد بود. در صورت مد نظر بودن آستانه بزرگ بلور، بلور LBO نامزد خوبی برای این منظور است. بدین ترتیب، بلور منتخب به منظور تولید هماهنگ دوم لیزر Nd:YAG با مشخصات ذکر شده، KTP به دلیل ایجاد بیشترین میزان بازده یعنی ۸۹/۵۹ درصد است.

مطابق با شکل (۳۳)، بلور BBO بیشترین بازده را از میان بلورهای بررسی شده برای تولید هماهنگ چهارم دارد و یکی از دلایل آن دارا بودن ضریب غیرخطی مؤثر بسیار بیشتر از دو بلور دیگر است و تطبیق فاز نوع II این بلور نیز بازدهی بیشتری را نسبت به نوع I آن به دلیل پذیرفتاری زاویه ای بیشتر نشان داد که به واگرایی کمتر پرتو می انجامید. بلورهای BBOI، CLBO نیز در رتبه های بعدی قرار دارند که کم تر بودن بازدهی بلور CLBO به دلیل ضریب غیرخطی مؤثر کوچک تر این بلور نسبت به بلور BBO است. بلور DKDP نیز به دلیل ضریب غیرخطی مؤثر بسیار کمتر در قیاس با دو نوع بلور دیگر کمترین بازدهی تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG را به خود اختصاص داد. بدین ترتیب، نتایج شبیه سازی بلور KTP را به عنوان بلور مناسب به منظور تولید هماهنگ دوم و بلور BBOII را نیز به عنوان بلوری پربازده به منظور تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر به ما پیشنهاد کرد.



شکل ۳۳ بازدهی بلورهای BBOI، BBOII، DKDP، CLBO در تولید هماهنگ چهارم لیزر Nd:YAG بر حسب طول بلور.

## منابع

- [1] Boyd, R.W., *Nonlinear Optics*, Academic press, 1992.
- [2] Hajiesmaeilbaigi, F.; Razzaghi, H.; Mahdizadeh, M.; Moghaddam, M. R. A.; Ruzbehani, M. "Design and Construction of a 110 W Green Laser for Medical Application"; OPT LASER TECHNOL. 2011, 43, 1428-1430.
- [3] Hopkins, F. K. "Military Laser Applications: Providing Focus to Nonlinear Optics R&D"; OPT PHOTONICS NEWS. 1998, 9, 32.
- [4] Klein, M. W.; Wegener, M.; Feth, N.; Linden, S. "Experiments on Second-and Third-Harmonic Generation from Magnetic Metamaterials"; OPT EXPRESS. 2007, 15, 5238-5247.
- [5] Klein, M. W.; Enkrich, C.; Wegener, M.; Linden, S. "Second-Harmonic Generation from Magnetic Metamaterials"; SCIENCE. 2006, 313, 502-504.
- [6] Miller; Robert C. "Optical Second Harmonic Generation in Piezoelectric Crystals"; APPL PHYS LETT. 1964, 5, 17-19.
- [7] Bergman Jr, J. G.; McFee, J. H.; Crane, G. R. "Pyroelectricity and Optical Second Harmonic Generation in Polyvinylidene Fluoride Films"; APPL PHYS LETT. 1971, 18, 203-205.
- [8] Koehner, W., *Solid-State Laser Engineering*, SPRINGER. 2006.
- [9] Driscoll, T. A.; Hoffman, H. J.; Stone, R. E.; Perkins, P. E. "Efficient Second-Harmonic Generation in KTP Crystals"; J OPT SOC AM. B 3, 1986, 5, 683-686.
- [10] Fan, T. Y.; Huang, C. E.; Hu, B. Q.; Eckardt, R. C.; Fan, Y. X.; Byer, R. L.; Feigelson, R. S. "Second Harmonic Generation and Accurate Index of Refraction Measurements in Flux-Grown  $\text{KTiOPO}_4$ "; APPL OPTICS. 1987, 26, 2390-2394.
- [11] Brown, A. J.; Bowers, M. S.; Kangas, K. W.; Fisher, C. H. "High-energy, High-Efficiency Second-Harmonic Generation of 1064-nm Radiation in KTP"; OPT LETT. 1992, 17, 109-111.
- [12] Ruikun, Wu. "High-Efficiency and Compact Blue Source: Intracavity Frequency Tripling by Using LBO and BBO Without the Influence of Birefringence"; APPL OPTICS. 1993, 32, 971-975.
- [13] Yuan, X.; Wang, J.; Chen, Y.; Wu, Y.; Qi, Y.; Sun, M.; Wang, Q. "Laser at 532 nm by Intracavity Frequency-Doubling in BBO"; J SEMICON. 2017, 38, 064007.
- [14] Zhang, Zilong, Qiang, Liu, and Mali Gong. "32.5 mJ 4.6 ns 532 nm Q-switched Nd:YAG Laser at 500 Hz"; APPL OPTICS. 2013, 52, 2735-2738.
- [15] Dudley, D. R.; Mehl, O.; Wang, G. Y.; Allee, E. S.; Pang, H. Y., Hodgson, N. "Q-switched Diode-Pumped Nd:YAG Rod Laser With Output Power of 420W at 532nm and 160W at 355nm"; P SOC PHOTO-OPT INS: Vol. 7193, INT SOC PHOTO-OPT, 2009.
- [16] Bhandari, R.; T. Taira. "0.5 MW peak power, kHz repetition rate at 266 nm using cut Nd: YAG microchip laser"; CLEO: IEEE, 2014.
- [17] Zhu, S. "A LD side-pumped deep ultraviolet laser at 266 nm by using a Nd: YAG/Cr<sup>4+</sup>: YAG/YAG composite crystal"; OPT LASER TECHNOL. 63, 24-28, 2014.
- [18] Kumar, S. "High-power, high-repetition-rate performance characteristics of  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> for single-pass picosecond ultraviolet generation at 266 nm"; OPT EXPRESS. 23.21, 28091-28103, 2015.
- [19] Yang, H. "Improved beam profile of a 266 nm deep ultraviolet laser employing a multi-mirror-reflected cavity"; LASER PHYS LETT. 13.4, 045002, 2016.
- [20] Chai, X. "Noncritical phase-matched fourth harmonic generation properties of traditional grown large-size DKDP crystal"; OPT COMMUN. 392, 162-166, 2017.
- [21] Liu, Q. "High-energy single longitudinal mode 1 ns all-solid-state 266 nm lasers" APPL PHYS B. 89.2-3, 155-158, 2007.
- [22] Sutherland, R.L., *Handbook of Nonlinear Optics*, CRC press. 2003.
- [23] Polyanskiy, M. N. "Refractive Index Database"; <https://refractiveindex.info>, 2019.

- [24] Beijing Gospel OptoTech Co. "Crystal, Laser and Optics"; [http://www.bjgot.com/index\\_home.html](http://www.bjgot.com/index_home.html), 2019.
- [25] Chen, C.; Wu, B.; Jiang, A.; You, G.; "A New Type Ultraviolet SHG Crystal  $\hat{\alpha}$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>7</sub>"; SCI SINICA. 1985, B 28, 235-243.
- [26] Drnitriev, V. G.; Gurzadyan, G. G.; Nikogosyan, D. N. "Handbook of Nonlinear Optical Crystals"; Vol. 64, SPRINGER SERIES OPTI. 1999.
- [27] Armstrong, J.; Bloembergen, N.; Ducuing, J.; Pershan, P. "Interactions Between Light Waves in a Nonlinear Dielectric"; PHYS REV. 1962, 127, 1918.
- [28] Kruglik, G., N.; Kondratyuk, Shagov, A. A.; "Efficient Fourth Harmonic Generation of Nd: YAG Laser in DKDP Crystals"; ICONO 2001: P SOC PHOTO-OPT INS. Vol. 4751, INT SOC PHOTO-OPT. 2002, 137-144.
- [29] Sabaieian, M.; Mousave, L.; Nadgaran, H.; "Investigation of Thermally-Induced Phase Mismatching in Continuous-Wave Second Harmonic Generation: a Theoretical Model"; OPT EXPRESS. 2010, 18, 18732-18743.
- [30] Mohammad-Rezaee, M.; Sedaghat Jalil abadi, F.; Motazedian, A.; Sabaian, M. "Investigation of Temperature-Induced Phase Mismatching Effect in Efficiency and Temperature Band Width of Second Harmonic Generation in Double-Pass KTP Type II Crystal"; IRAN CONF PHOTO-OPT. 2012, 253-258.
- [31] Yap, Y. K.; Inagaki, M.; Nakajima, S.; Mori, Y.; Sasaki, T. "High-Power Fourth-and Fifth-Harmonic Generation of a Nd: YAG Laser by Means of a CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub>"; OPT LETT. 1996, 21, 1348-1350.
- [32] Zheng, J.; Zhao, S.; Wang, Q.; Zhang, X.; Chen, L. "Influence of Thermal Effect on KTP type-II Phase-Matching Second-Harmonic Generation"; OPT COMMUN. 2001, 199, 207-214.
- [33] DeSalvo, R.; Hagan, D. J.; Sheik-Bahae, M.; Stegeman, G.; Van Stryland, E. W.; Vanherzeele, H. "Self-Focusing and Self-Defocusing by Cascaded Second-Order Effects in KTP"; OPT LETT. 1992, 17, 28-30.
- [34] Zhang, L.; Zhang, F.; Xu, M.; Wang, Z.; Sun, X. "Rapid Growth of a Large Size, Highly Deuterated DKDP Crystal and Its Efficient Noncritical Phase Matching Fourth-Harmonic-Generation of a Nd: YAG Laser"; RSC ADV. 2015, 5, 74858-74863.
- [35] Eimerl, D. "High Average Power Harmonic Generation"; IEEE J QUANTUM ELECT. 1987, 23, 575-592.
- [36] Nikogosyan, D. N., *Nonlinear Optical Crystals*, SPRINGER, 2005.
- [37] <http://www.simphotech.net/bckg/bckg.diffraction.html>, 2014.
- [38] Knittel, J.; Kung, A. H. "39.5% Conversion of Low-Power Q-switched Nd: YAG Laser Radiation to 266 nm by Use of a Resonant Ring Cavity"; OPT LETT. 1997, 22, 366-368.