بیست و سومین کنفرانس اپتیک و فوتونیک و نهمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
دانشگاه تربیت مدرس
۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۹۵
23rd Iranian Conference on Optics and Photonics and 9th Conference on Photonics Engineering and Technology
Tarbiat Modares University, Tehran, Iran
January 31- February 2, 2017

بررسی اثر چیدمان چندعبوری بر تخلیه‌ی پرتو دمش در تولید هماهنگ دوم

مریم خیری، سعید قوامی صبوری و علیرضا خورسندی

گروه فیزیک دانشگاه اصفهان، اصفهان

چکیده – در این مقاله به بررسی تأثیر چیدمان چند عبوری بر شرایط جورشدگی فازی و تخلیه‌ی پرتو دمش در یک برپایی تولید هماهنگ دوم پرداخته‌ایم. در بررسی این چیدمان دریافتیم که افزایش غیرمستقیم طول برهم‌کنش از طریق بازتاب‌های متوالی پرتو لیزر دمش و هماهنگ دومش میان دو آینه‌ی غیرموازی تعبیه شده در طرفین بلورغیر خطی *KTP*، بازده‌ی تبدیل را افزایش می‌دهد. چیدمان چند عبوری را برای تولید هماهنگ دوم لیزر پالسی *Nd:YAG* با استفاده از بلور دو محوری *KTP* شبیه‌سازی کرده و با تغییر زاویه‌ی میان آینه و محور بلور توان خروجی هماهنگ دوم را محاسبه کرده‌ایم. در نهایت محدوده‌ی مجاز چرخش آینه‌ها را در دو جهت زاویه‌ی قطبی و سمتی به‌دست آورده، و نمودار های مورد نیاز را از نتایج استخراج کرده‌ایم.

کلید واژه- بازده‌ی تبدیل، تخلیه‌ی پرتو دمش، تولید هماهنگ دوم، جورشدگی فاز، چیدمان چند عبوری.

The effect of multi-pass scheme on the pump beam depletion in second harmonic generation

Mayam Kheyri, Saeed Ghavami Sabouri and Alireza Khorsandi

Department of Physics, University of Isfahan, Isfahan

Abstract- This work is represented to investigate a multi-pass scheme and its effect on both the phase matching condition and the pump beam depletion in a second-harmonic generation scheme. It is found that this arrangement is capable of enhancing the conversion efficiency through indirect increasing of effective interaction length which was reached by using consecutive reflections of the fundamental beam and its second-harmonic wave between two antiparallel mirrors embedded along both sides of the KTP nonlinear crystal. Such multi-pass scheme is simulated for the second-harmonic radiation of a pulsed Nd:YAG laser using a biaxial KTP crystal. By changing the angle between the mirror and the crystal axial, the output power of the second harmonic light is correspondingly computed. Finally, the range of polar and azimuthal angles for mirror rotation is simulated and the required graphs have been carried out from the results.

Keywords: conversion efficiency, pump depletion, second-harmonic generation, multi-pass scheme.

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

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

۱- مقدمه

امروزه امکان دست‌یابی به تابش همدوس لیزری در بخش وسیعی از ناحیه‌ی اپتیکی در اغلب طول موج‌ها امکان‌پذیر شده است. با این وجود نواحی‌ای وجود دارند که در آن طول موج‌ها امکان تولید تابش لیزری وجود ندارد. روش تبدیل بسامد در اپتیک غیرخطی این امکان را فراهم آورده که با استفاده از یک محیط غیرخطی مناسب، تابش‌های همدوس کوک‌پذیر را در ناحیه‌های یاد شده تولید کنیم[۱]. یکی از این روش‌ها تولید هماهنگ دوم است که در آن طول موج پرتوی خروجی از یک لیزر نصف می‌شود. برای تولید این فرایند علاوه بر ویژگی‌های ذاتی و فیزیکی محیط غیرخطی و نیز طول موج و شدت لیزر دمش، جورشدگی فازی میان تابش فرودی و هماهنگ دوم آن، بیشینه‌ی بازده‌ی تبدیل را معین می‌کنند[۲]. برای افزایش این بازده از عبور چندگانه‌ی لیزر دمش و هماهنگ دومش از محیط غیرخطی استفاده شده است. در این چیدمان که بلور غیرخطی میان دو آینه‌ی لایه‌نشانی‌شده‌ی ناموازی قرار می‌گیرد، به دلیل بازتاب‌های متوالی لیزر دمش و هماهنگ دومش میان این دو آینه طول برهم‌کنش افزایش می‌یابد[۳, ۴]. اما در هر بازتاب جورشدگی فازی به هم می‌خورد. از این رو در برپایی این چیدمان محدودیت‌هایی وجود دارد. در این مقاله به بررسی تاثیر یک چیدمان چندعبوری بر جورشدگی فاز پرداخته و نتایج را برای بلور KTP که با لیزر Nd:YAG دمش شده است، شبیه‌سازی کرده‌ایم. به کمک نتایج بدست آمده وابستگی توان هماهنگ دوم تولید شده را به زاویه‌ی میان آینه و محور بلور، برای دوبار عبور پرتوهای لیزر دمش و هماهنگ دومش از میان بلور بررسی کردیم. نتایج نشان می‌دهند که در صورت انتخاب درست زاویه‌ی آینه، بازده‌ی تبدیل هماهنگ دوم تا حد زیادی افزایش خواهد یافت.

۲- مبانی نظری

در تولید هماهنگ دوم و سایر فرایندهای غیرخطی، ایجاد جورشدگی فاز مسأله‌ای اجتناب ناپذیر است. زیرا تنها در این صورت است که می‌توان به بیشترین بازده‌ی تبدیل دست یافت. جورناشدگی فازی، Δk، در تولید هم‌راستای هماهنگ دوم به صورت[۱]

$$\Delta k = 2k_1 - k_2 = \frac{4\pi}{\lambda_1}[n(\omega) - n(2\omega)] \qquad (۱)$$

تعریف می‌شود که در آن λ_1 طول موج اصلی و Δk مقدار جورناشدگی فاز است که با اختلاف ضریب شکست بلور در دو فرکانس ω و 2ω متناسب می‌باشد. با توجه به این رابطه لازمه‌ی برقراری شرط جورشدگی فاز، برابر بودن سرعت فاز موج دمش و هماهنگ دومش در بلور است. در این صورت با انتشار موج دمش در بلور، میدان هماهنگ دوم که در فاز یکسانی با موج اصلی قرار گرفته، به شکل مؤثری تقویت خواهد شد.

روش‌های زیادی برای برقراری جورشدگی فازی وجود دارد. زیرا ضریب شکست به عوامل مختلفی نظیر دما، زاویه‌ی تابش، قطبش میدان الکتریکی و فشار بستگی دارد. بنابراین با تغییر و کنترل هر کدام از این عامل‌ها می‌توان جورشدگی فازی را برقرار نمود[۵]. متداول‌ترین روش برای این کار، جورشدگی فازی زاویه‌ای است. زیرا اثرات محیط روی آن کمتر بوده و در هر دمایی اتفاق می‌افتد.

در این پژوهش جورشدگی فازی را به شکل زاویه‌ای برقرار کرده‌ایم. فرض می‌کنیم جورشدگی فازی در صفحه‌ی xy اتفاق افتد. در این صورت دو موج اصلی و هماهنگ دومش در صفحه‌ی xy با زاویه‌های $\theta = 90^\circ$ و $\varphi = 23.6^\circ$، به صورت هم‌راستا، شرط جورشدگی فاز را برقرار می‌کنند. این زاویه‌ها با استفاده از معادله‌ی فرنل برای بلورهای دومحوری به‌دست آمده و زاویه‌ی تابش پرتوها را نشان می‌دهند[۶].

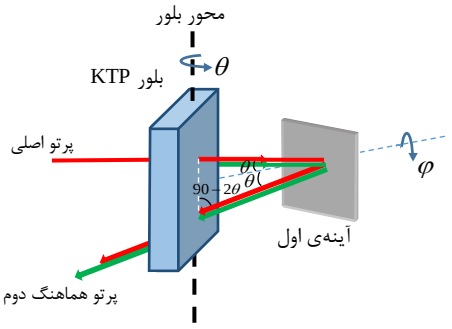
۳- شبیه‌سازی و نتایج

همان‌طور که در شکل ۱ مشخص است، در روش چندعبوری، موج دمش و هماهنگ دومش پس از خروج از بلور به آینه‌ای برخورده کرده و بعد از بازتاب مجددا وارد بلور می‌شوند. بسته به شدت نهایی موج هماهنگ دوم و فاصله بلور از آینه‌ها، در سمت دیگر بلور نیز می‌توان آینه‌ای تعبیه کرده و با افزایش دفعات عبور ضمن تخلیه‌ی کامل انرژی موج دمش، بازده‌ی تبدیل را حتی‌الامکان افزایش داد[۳].

در برپایی چیدمان چندعبوری بلور را به گونه‌ای در مسیر لیزر قرار می‌دهیم که در مرتبه‌ی اول عبور شرط جورشدگی فاز برقرار باشد. اما با توجه به زاویه‌ای که آینه

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

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



شکل۱: طرحواره‌ای از چیدمان چندعبوری هنگامی که زاویه‌ی میان آینه‌ی اول و محور بلور، در جهت زاویه‌ی قطبی برابر با θ است.

با محور بلور می‌سازد، موج دمش و هماهنگ دومش پس از بازتاب از آینه، در مرتبه‌ی دوم عبور از حالت جورشدگی فازی خارج می‌شوند. نظر به این‌که KTP بلوری دو محوری است، چرخش آینه در هر یک از زاویه‌های سمت یا قطبی می‌تواند موجب جورناشدگی فازی شود. در انتخاب زاویه‌ی میان آینه و محور بلور باید توجه داشت که به‌ازای یک زاویه-ی مشخص در جهت θ یا φ، انحراف از زاویه‌ی جورشدگی فاز دو برابر این مقدار خواهد بود.

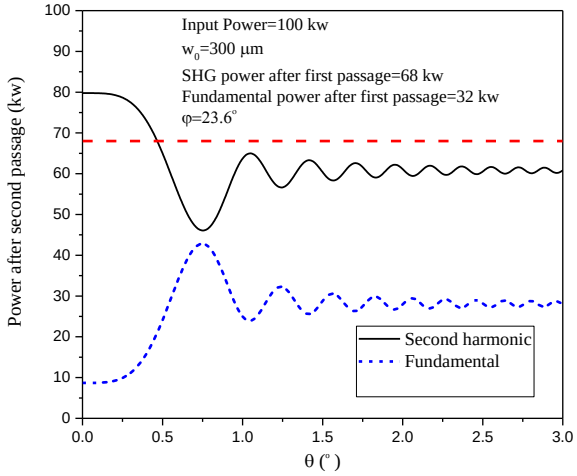
حل عددی معادلات جفت شده‌ی تولید هماهنگ دوم برای بلور یک سانتی‌متری KTP که تحت دمش لیزر پالسی Nd:YAG قرار گرفته، بازده‌ی تبدیل تولید هماهنگ دوم را پس از یک بار عبور از بلور ۶۸ درصد نتیجه می‌دهد. مشخصات پالس لیزر دمش در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱مشخصات پالس لیزر دمش

طول موج	۱۰۶۴ nm
پهنای پالس	۱ns
نرخ تکرار	۱۰ kHz
توان پالس ورودی	۱۰۰ kw

اگر آینه و محور بلور موازی باشند، هم‌چنان شرایط جورشدگی فاز برقرار خواهد بود. در این صورت توان خروجی بعد از دو بار عبور بیش از ۱۰ درصد افزایش یافته و به ۸۰ کیلووات خواهد رسید. با افزایش زاویه‌ی میان آینه و محور بلور، دو موج اصلی و هماهنگ دوم از حالت جور شدگی فاز خارج شده و توان خروجی از مقدار بیشینه‌ی خود کمتر می-شود. با این وجود عبور مجدد موج دمش از بلور موجب تخلیه‌ی بیشتر دمش شده و هم‌چنان نسبت به حالت تک عبوری ارجحیت دارد.

شکل ۲ نشان می‌دهد با انتخاب زاویه‌ی کمتر از ۰/۲ درجه در جهت افزایش یا کاهش زاویه‌ی قطبی θ می‌توان جورناشدگی فازی را به حداقل مقدار خود رساند. این در حالی است که افزایش این زاویه به بیش از ۰/۴۷ درجه توان خروجی پس از دو بار عبور را حتی نسبت به توان خروجی عبور اول هم کاهش می‌دهد.



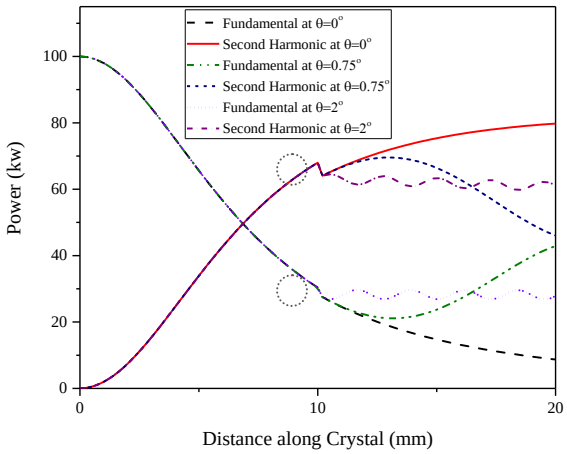
شکل ۲: نمودار تغییرات توان خروجی بعد از دوبار عبور از بلور در اثر افزایش زاویه‌ی قطبی میان آینه و محور بلور.

اگر افزایش زاویه را ادامه دهیم دو موج اصلی و هماهنگ دوم پس از یک بار عبور، به آینه برخورد نکرده و توان خروجی به مقدار ثابتی که نسبت به توان خروجی عبور اول هم کمتر است، میل می‌کند. چرا که این دو موج برای بار دوم به بلور وارد نشده و تنها در اثر انتشار در محیط کاهش شدت خواهند داشت.

برای درک بهتر موضوع تغییرات توان موج دمش و هماهنگ دومش را در طول مسیر انتشار در دو بار عبور از بلور KTP یک سانتی‌متری بررسی می‌کنیم. در این شبیه‌سازی فاصله-ی آینه از بلور را ۱۵ میلی‌متر در نظر گرفته‌ایم. شکل ۳ نمودار تغییرات توان دمش و هماهنگ دوم را در طول مسیر انتشار نمایش می‌دهد. بخش‌هایی از نمودار که با دایره نشان‌گذاری شده است، تغییر تدریجی توان، ناشی از باز شدن پرتوها در مسیر انتشار بین بلور و آینه و کاهش توان ناشی از بازتاب آینه‌ها را نشان می‌دهند. این تغییرات به شکل کاهش آنی در شبیه‌سازی وارد شده است.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

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

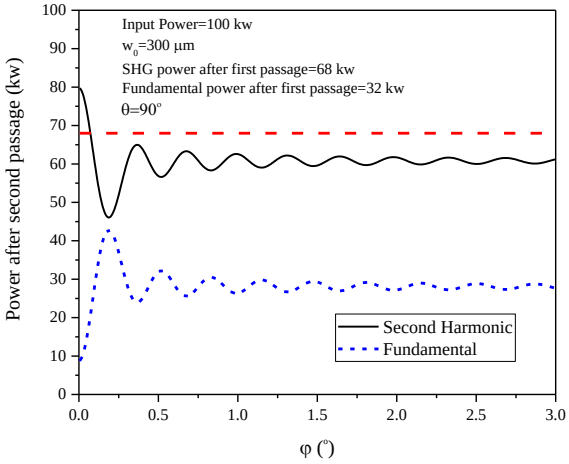


شکل ۳: تغییرات توان خروجی لیزر دمش و هماهنگ دومش در دوبار عبور از بلور KTP یک سانتی‌متری.

همان‌طور که دیده می‌شود، زاویه‌ی میان آینه و محور بلور سبب ایجاد جورناشدگی فازی شده است. این زاویه باعث می‌شود جورناشدگی فازی از حالت $\Delta k = 0$ فاصله گرفته و توان‌های دمش و هماهنگ دوم به شکل نوسانی تغییر کنند. به عنوان مثال، اگر این زاویه را ۲ درجه در نظر بگیریم، توان خروجی هماهنگ دوم نسبت به حالت جورشدگی فاز ۲۰ درصد کاهش یافته و به ۶۰ کیلووات می‌رسد که از توان خروجی حالت تک عبوری ۸ کیلووات کمتر است. با این حال عبور دوم پرتوها از بلور، تخلیه‌ی بیشتر دمش را نتیجه می‌دهد. برای این‌که ضمن تخلیه‌ی دمش، افزایش توان خروجی هماهنگ دوم هم اتفاق افتد، کافی‌ست زاویه‌ای را انتخاب کنیم که کمترین جورناشدگی فازی را نتیجه دهد. انتخاب زاویه‌ای کمتر از ۰/۲ درجه ما را به این مطلوب می‌رساند.

این بار زاویه‌ی میان آینه و محور بلور را در جهت افزایش زاویه‌ی سمتی φ تغییر می‌دهیم.

شکل ۴ تغییرات توان خروجی ناشی از این افزایش زاویه را نشان می‌دهد. آن‌چه مشخص است، جورناشدگی فازی به شدت به تغییر زاویه‌ی سمتی φ حساس بوده و تنها ۰/۱ درجه اختلاف نسبت به حالت جورشدگی فاز می‌تواند توان خروجی مرتبه‌ی دوم عبور را نسبت به توان خروجی بعد از عبور اول ۱۰ درصد کاهش دهد. این در حالی است که هدف از برپایی چیدمان چندعبوری افزایش بازده‌ی تبدیل ضمن تخلیه‌ی دمش می‌باشد. بنابراین در برپایی این چیدمان انتخاب زاویه‌ی میان آینه و محور بلور از اهمیت زیادی برخوردار است.



شکل ۴: نمودار تغییرات توان خروجی بعد از دوبار عبور از بلور در اثر افزایش زاویه‌ی سمتی میان آینه و محور بلور.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله تأثیر چیدمان چند عبوری بر شرایط جورشدگی فاز و تخلیه‌ی موج دمش در فرایند تولید هماهنگ دوم لیزر پالسی Nd:YAG از بلور KTP بررسی شده است. شبیه‌سازی برای دوبار عبور انجام شده است. در برپایی این چیدمان لازم است بین آینه و محور بلور زاویه‌ای در نظر گرفته شود. جورناشدگی فازی نسبت به تغییر زاویه‌ی سمتی φ بسیار حساس است. بنابراین لازم است زاویه‌ی میان آینه و محور بلور در جهت زاویه‌ی قطبی θ و کمتر از ۰/۴۷ درجه انتخاب شود تا ضمن تخلیه‌ی دمش، هم‌چنان افزایش توان هماهنگ دوم را در چیدمان چندعبوری نتیجه دهد.

۵- مراجع

[1] He, G.S., *Nonlinear Optics and Photonics*. 2015: Oxford University Press.

[2] Boyd, R.W., *Nonlinear Optics, 3rd*. 2008: Academic press.

[۳] م.خیری، بهبود بازده تولید هماهنگ دوم با استفاده از ساختار چند عبوری. مقاله نامه چهارمین کنفرانس لیزر و کاربردهای آن، ۱۳۹۵.

[4] Harimoto, T., B. Yo, and K. Uchida, A novel multipass scheme for enhancement of second harmonic generation. Optics express, 2011. **19**(23): p. 22692-22697.

[5] Powers, P.E., *Fundamentals of nonlinear optics*. CRC Press.

[6] Nikogosyan, D.N., *Nonlinear optical crystals: a complete survey*. 2006: Springer Science & Business Media.

این مقاله به شرط در دسترس بودن در وبگاه www.opsi.ir معتبر است.

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