

Research Paper

Compensation of Thermal Phase Mismatch Effects in The High Power Second Harmonic Generation Using a Chirped Periodically Poled Non-linear Crystal¹

Saeed Ghavami Sabouri²

Received: 2022.04.05

Revised: 2022.06.04

Accepted: 2022.07.05

Abstract

Thermal effects strongly influence the process of second harmonic generation, especially at high fundamental powers. The generation of non-uniform temperature distribution in the crystal due to the absorption of fundamental and second harmonic waves leads to significant degradation of the efficiency of the second harmonic generation process. This absorption acts as a heat source in the crystal and prevents the crystal from remaining at the phase matching temperature, resulting in a phenomenon called thermal phase mismatch in the crystal. In this paper, first, a theoretical model to simulate the thermal effects in the second harmonic generation is introduced. Then, by considering a periodically poled crystal as a nonlinear crystal and adding a chirp to its periodicity, a solution to compensate for the thermal phase mismatch is presented. Simulation results show that the chirp of a periodically poled crystal compensates for the thermal effects on the nonlinear crystal and largely offsets the efficiency degradation in the second harmonic generation. For example, at the fundamental power of 20 W, the thermal effects reduce the second-harmonic conversion efficiency from 74% to 18% and using the chirped periodically poled crystal increases the efficiency to 50%.

Keywords: *Second Harmonic Generation, Thermal Effects, Periodically Poled Crystal.*

¹ DOI: 10.22051/ijap.2022.40161.1277

² Associate Professor, Faculty of Physics, University of Isfahan, Isfahan, Iran. Email: ghavami@sci.ui.ac.ir

<https://jap.alzahra.ac.ir>



جبران اثرات نبود همسانی فاز گرمایی در تولید هماهنگ دوم توان بالا با استفاده از چرپ‌شدگی بلور غیرخطی قطبیده دوره‌ای^۱ سعید قوامی صبوری^۲

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۱/۱۶

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۳/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۴

فصلنامه علمی فیزیک کاربردی ایران

دانشکده فیزیک، دانشگاه الزهرا

سال دوازدهم، پیاپی ۳۱، زمستان ۱۴۰۱

صص ۶۲ - ۷۵

چکیده:

اثرات حرارتی تاثیرات نامطلوبی در فرآیند تولید هماهنگ دوم^۳ به ویژه در توان‌های بالای لیزر دمش می‌گذارد. تولید توزیع دمایی نایکنواخت در بلور از راه جذب پرتوهای دمش و هماهنگ دوم منجر به افت شدید بازده تبدیل هماهنگ دوم می‌شود. این جذب به عنوان چشمه گرما در بلور عمل کرده و از باقی ماندن بلور در دمای همسانی فاز^۴ جلوگیری می‌کند، در نتیجه پدیده‌ای به نام نبود همسانی فاز گرمایی در بلور ایجاد می‌شود. در این مقاله ابتدا یک مدل نظری برای شبیه‌سازی اثرات حرارتی در تولید هماهنگ دوم شناسانده شده است. سپس با در نظر گرفتن یک بلور قطبیده دوره‌ای^۵ به عنوان بلور غیرخطی و افزودن چرپ‌شدگی به دوره تناوب آن، راهکاری برای جبران نبود همسانی فاز گرمایی بیان شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که چرپ‌شدگی یک بلور قطبی دوره‌ای سبب جبران اثرات گرمایی در بلور غیرخطی شده و تا حد زیادی افت بازده هماهنگ دوم را جبران می‌کند. به عنوان مثال، در توان دمش ۲۰ وات اثرات حرارتی موجب کاهش بازده تبدیل هماهنگ دوم از ۷۴ درصد به ۱۸ درصد شده و با به کار بردن بلور قطبیده دوره‌ای چرپ‌شده بازده به ۵۰ درصد رسیده است.

واژگان کلیدی: تولید هماهنگ دوم، اثرات حرارتی، بلور قطبیده دوره‌ای.

¹ DOI: 10.22051/ijap.2022.40161.1277

² دانشیار، دانشکده فیزیک، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران. Email: ghavami@sci.ui.ac.ir

³ Second harmonic generation

⁴ Phase matching

⁵ Periodically poled



۱. مقدمه

نور همدوس در ناحیه بینایی سبز را اغلب با تولید هماهنگ دوم پرتوهای لیزر در ناحیه فرسرخ نزدیک تولید می کنند. این چشمه ها دارای کاربردهای فراوانی در زمینه های متفاوت پزشکی [۱]، صنعت [۲، ۳] و پژوهش های بنیادی در زمینه های فیزیک و شیمی [۴، ۵] هستند. همچنین از این چشمه ها برای دمش نوسانگرهای پارامتریک نوری [۶] و لیزرهای حالت جامد چون تیتانیوم سافایر^۱ [۷] استفاده می شود. به صورت رایج برای تولید هماهنگ دوم از بلورهای غیرخطی متنوعی از قبیل؛ KTiOPO_4 و $\beta\text{-BaB}_2\text{O}_4$ ، LiB_3O_5 استفاده می شود [۸، ۹]. اگرچه این بلورها دارای اشکالاتی چون ویژگی غیرخطی کم و نبود امکان تولید در طول های بیش از یک یا دو سانتی متر هستند که موجب محدودیت بسیار بازده تبدیل پرتوی دمش به هماهنگ دوم در این بلورها می شود. از این گذشته، آستانه تخریب پایین برخی از این بلور امکان استفاده از آنها در توان های بالای دمش را غیرممکن می سازد [۱۰]. برای از بین بردن این محدودیت ها در تولید بلورهای غیرخطی، روش شبه همسانی فازی و استفاده از بلورهای قطبیده دوره ای بیان و دگرگونی شگرفی در دستیابی به بازده و توان های بالای هماهنگ دوم ایجاد شد. از معروف ترین این بلورها برای تولید نور سبز با دمش لیزرهای حالت جامد همچون نئودیمیوم- یاگ و یا لیزرهای فیبری آلاییده به اربیوم^۲ می توان به بلور لیتیوم نیوبات اشاره کرد. این بلور با ضریب موثر غیر خطی 17 pm/V نسبت به بلور غیرخطی بسیار رایج KTiOPO_4 با ضریب موثر غیرخطی حدود 3 pm/V امکان دستیابی به بازده هماهنگ دوم بیش از ۷۰ درصد را فراهم آورده است [۱۱]. از این گذشته امروزه بلور لیتیوم نیوبات^۳ قطبیده دوره ای را می توان با طول هایی بیش از ۵ سانتی متر تهیه کرد که نسبت به بلورهایی چون KTP و BBO، که بیشینه طول رشد آنها به حدود ۲ سانتی متر می رسد، امکان تخلیه کامل لیزر دمش و تبدیل بخش زیادی از توان آن به هماهنگ دوم را فراهم آورده است [۱۲]. برتری دیگر بلور لیتیوم نیوبات قطبیده دوره ای در مقایسه با سایر بلورها، آستانه تخریب بیش از 2 MW/cm^2 است و به همین دلیل این بلورها را می توان برای تولید هماهنگ دوم در روش پیوسته به کار گرفت. با وجود این برتری ها، دستیابی به توان های بالای هماهنگ دوم در روش پیوسته با مشکلی جدی به نام نبود همسانی فاز گرمایی روبرو شده است [۱۳]. این پدیده سبب کاهش بازده تبدیل هماهنگ دوم در

¹ Ti- Sapphire

² Erbium

³ Lithium niobate



توان‌های بالا در روش پیوسته شده و از این رو نمی‌توان این بلورها را برای دمش با توان‌هایی بیش از ۲۰ وات به کار گرفت [۱۴]. اثرات حرارتی در بلورهای غیرخطی برای تولید هماهنگ دوم افزون بر کاهش بازده تبدیل، سبب کاهش کیفیت پرتو نیز می‌گردند [۱۵]. تاکنون راهکارهای گوناگونی برای مقابله با پدیده نبود همسانی فاز گرمایی بیان گردیده است. به عنوان مثال، بهینه‌سازی سامانه دمش [۱۶]، استفاده از اجاق‌های چندبخشی [۱۷]، بلورهای با ساختار مهندسی شده [۱۸] و مدیریت فعال دمای اجاق بلور [۱۹] از روش‌های مقابله با نبود همسانی فاز گرمایی است. این روش‌ها بیشتر برای بلورهای قطبیده دوره‌ای قابل پیاده‌سازی هستند. ویژگی امکان دستکاری ساختار متناوب بلورهای قطبیده دوره‌ای سبب می‌شود که بتوان تغییرات مدیریت شده‌ای را در حین فرآیند ساخت بر روی دوره تناوب آن‌ها اعمال کرد. به این دسته از بلورهای قطبیده دوره‌ای که دوره تناوب آن‌ها در طول بلور یکنواخت نیست در اصطلاح بلورهای چرپ^۱ شده می‌گویند [۲۰]. بلورهای قطبیده دوره‌ای چرپ شده در تولید هماهنگ مرتبه‌های بالا [۲۱]، تولید فشرده‌سازی هماهنگ دوم تپ‌های بسیار کوتاه [۲۲] و تولید هماهنگ دوم با پهنای باندی وسیع [۲۳] به صورت گسترده به کار گرفته شده‌اند.

در پژوهش‌های گذشته، بلور قطبیده دوره‌ای که در طول‌های مشخصی از آن یک دوره تناوب بلور به عنوان جبران‌ساز فاز گرمایی، اندکی بزرگتر در نظر گرفته می‌شد، برای رویارویی با اثرات غیرخطی بیان شده است [۱۸]. در این مقاله، برای نخستین بار، بلورهای قطبیده دوره‌ای چرپ شده که در آن دوره تناوب بلور به صورت خطی در طول بلور تغییر می‌کند برای برداشتن همسانی فاز گرمایی پیشنهاد شده است. در کار حاضر، ابتدا اثرات حرارتی در بلور لیتیوم نیوبات قطبیده دوره‌ای شبیه‌سازی شده است. سپس با افزودن چرپ‌شدگی به ساختار بلور قطبیده دوره‌ای لیتیوم نیوبات ضریب چرپ‌شدگی بهینه برای رویارویی و برداشتن نبود همسانی فاز گرمایی بدست آمده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که اگر چه اثرات حرارتی سبب کاهش بیش از ۶۰ درصدی بازده در توان‌های بالای دمش می‌شوند، روش پیشنهادی نیز می‌تواند تاثیرات نامطلوب گرمایی بر بازده تبدیل هماهنگ دوم را تا حد بسیاری بهبود ببخشد. به صورتی که در توان دمش ۲۰ وات، بازده تبدیل در نبود اثرات حرارتی ۷۵ درصد برآورد شده و با وجود اثرات حرارتی این بازده به ۱۸ درصد کاهش یافته است. در نهایت، با استفاده از روش پیشنهادی و افزودن چرپ‌شدگی به بلور غیرخطی، بازده تبدیل تا ۵۰ درصد افزایش یافته است.

¹ Chirp



۲. مدل نظری

برای شبیه‌سازی اثرات حرارتی در فرآیند تولید هماهنگ دوم، معادلات جفت‌شده حاکم بر بلور غیرخطی که از معادله موج پیرامحوری هلمهلتز در حضور قطبش غیرخطی بدست می‌آید به شکل زیر معرفی شده است [۱۳، ۱۴]:

$$\frac{dE_f}{dz} = -\frac{i}{2k_f} \nabla_T^2 E_f + i \frac{2d_{eff} \omega_f}{n_f c} E_s E_f^* e^{-i\Psi(x,y,z)} - \frac{1}{2} \alpha_f E_f, \quad (1)$$

$$\frac{dE_s}{dz} = -\frac{i}{2k_s} \nabla_T^2 E_s + i \frac{2d_{eff} \omega_s}{n_s c} E_f^2 e^{i\Psi(x,y,z)} - \frac{1}{2} (\alpha_s + \beta |E_s|^2) E_s, \quad (2)$$

که در آن، E_s و E_f ، n_s ، n_f به ترتیب ضرایب شکست بلور غیرخطی در طول موج‌های دمش و هماهنگ دوم و دامنه‌های امواج پرتوهای دمش و هماهنگ دوم هستند. راستای انتشار امواج در بلور غیرخطی Z و لاپلاسیان عرضی در مختصات X و Y با ∇_T^2 نشان داده شده است. این جمله نشانگر پراش آزاد پرتوها با انتشار در طول بلور است. همچنین، d_{eff} ضریب موثر غیرخطی، ω_s و ω_f فرکانس‌های زاویه‌ای امواج دمش و هماهنگ دوم را نشان می‌دهند و $k_{f,s} (= 2\pi n_{f,s} / \lambda_{f,s})$ بردارهای موج این امواج است. جذب خطی بلور در طول موج‌های دمش و هماهنگ دوم به ترتیب با α_s و α_f و ضریب جذب غیرخطی هماهنگ دوم با β در روابط (۱) و (۲) نشان داده شده‌اند. برخلاف معادلات رایج مورد استفاده در محاسبات هماهنگ دوم، پارامتر در معادلات بیان شده نبود همسانی فاز Ψ به صورت تابعی از مکان در نظر گرفته شده است. این تابع به صورت زیر بیان می‌شود [۱۹]:

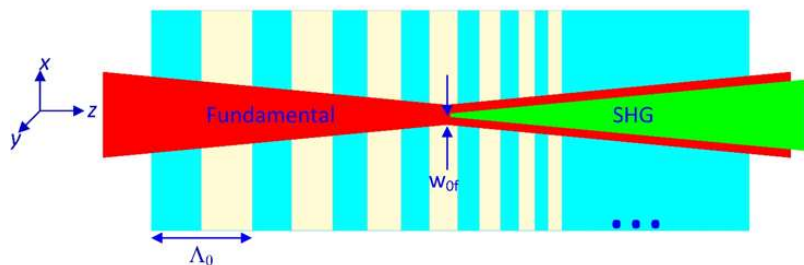
$$\Psi(x, y, z) = 2\pi \int_{z=0}^{z=z'} \left(\frac{2n_f(T(x, y, z'))}{\lambda_f} - \frac{n_s(T(x, y, z'))}{\lambda_s} - \frac{1}{\Lambda(z')} \right) dz' \quad (3)$$

که در آن Λ دوره تناوب بلور قطبیده دوره‌ای است و برای بلورهای دارای چرپ‌شدگی در طول‌های مختلف بلور مقادیر متفاوتی دارد. نرخ تغییر دوره تناوب به تابع چرپ‌شدگی دوره تناوب بستگی دارد. چرپ‌شدگی خطی دوره تناوب بلور که از مهمترین و پرکاربردترین انواع چرپ‌شدگی است، به صورت زیر بیان می‌شود:

¹ Laplacian

$$\Lambda(z) = \Lambda_0 + \gamma z \quad (4)$$

که در آن Λ_0 دوره تناوب اصلی بلور و γ پارامتر چرپ شدگی تناوب بلور و Z فاصله از ابتدای بلور را نشان می دهند. پارامتر γ می تواند مقادیر مثبت یا منفی داشته باشد. بلور بدون چرپ شدگی ($\gamma < 0$) برابر با صفر) یعنی دوره تناوب در تمام طول بلور یکسان و برابر Λ_0 ، مقدار بهینه برای تولید بیشینه هماهنگ دوم در نبود اثرات حرارتی است. شماتیکی از بلور قطبیده دوره ای برای تولید هماهنگ دوم در شکل (۱) نشان داده شده است.



شکل ۱ شماتیکی از بلور غیرخطی قطبیده دوره ای با پارامتر چرپ شدگی منفی ($\gamma < 0$) برای تولید هماهنگ دوم.

از آنجا که توزیع حرارتی در بلور غیرخطی نایکنواخت است، بنابراین همسانی فاز به موقعیت مکانی بلور بستگی پیدا می کند و به ازای هر نقطه از بلور باید محاسبه گردد. برای محاسبه توزیع دمایی در حجم بلور که در معادله (۳) به آن نیاز است، معادله انتقال حرارت که به صورت زیر نوشته می شود بایستی حل گردد. که در آن C و K گرمای ویژه و رسانندگی حرارتی بلور غیرخطی و Q گرمای تولید شده در بلور را نشان می دهد [۲۴].

$$\nabla^2 T(r) = Q(r) / K \quad (5)$$

که در آن [۱۴]،

$$Q(r) = -\frac{2C\epsilon_0}{K} (\alpha_f n_f |E_f(r)|^2 + \alpha_s n_s |E_s(r)|^2 + \beta n_s |E_s(r)|^4) \quad (6)$$

همانگونه که از معادله (۶) پیداست، چشمه گرمایی در بلور شامل جذب خطی برای امواج دمش و هماهنگ دوم و جذب غیرخطی در طول موج هماهنگ دوم است. لازم به یادآوری است که جذب غیرخطی در طول موج دمش برای بلور لیتیوم نیوبات ناچیز و قابل چشم پوشی است. همانگونه که از رابطه (۳) پیداست، نبود همسانی فاز به توزیع دمایی بستگی دارد و توزیع دمایی به شدت امواج



هماهنگ دوم و دمش وابسته است. به بیانی دیگر، معادلات (۱) تا (۶) به هم وابسته بوده و حل جداگانه آنها امکان پذیر نیست.

برای حل معادلات یاد شده و انجام شبیه سازی، ابتدا بلور بدون اثرات حرارتی فرض شده و با حل معادلات جفت شده (۱) و (۲) با روش عددی تبدیل فوریه با گام جداگانه^۱ شدت پرتوهای دمش و هماهنگ دوم در طول بلور محاسبه می گردد. در روش عددی تبدیل فوریه با گام جداگانه، در یک مرحله از اثرات غیرخطی در معادلات (۱) و (۲) چشم پوشی شده (یعنی $d_{eff}=0$) است و با استفاده از تبدیل فوریه از میدانهای برهمکنش کننده، معادلات جفت شده به صورت جداگانه حل و پاسخ آن با یک تبدیل فوریه وارون دوباره به فضای مکان برگشت. پاسخ بدست آمده به عنوان ورودی به همین گام محاسباتی قرار گرفت. با این تفاوت که اینبار از جمله لاپلاسین چشم پوشی و تنها اثرات غیرخطی در محاسبات در نظر گرفته شد. در این حالت با استفاده از روش رانگ کوتای^۲ مرتبه ۴، میدان نهایی در انتهای گام مورد نظر بدست آمد. همین روند تا انتهای بلور ادامه پیدا می کند تا میدانهای امواج برهمکنش کننده در انتهای بلور بدست آید.

پس از آن با در اختیار داشتن شدت امواج به عنوان چشمه های گرمایی، معادله انتقال حرارت با استفاده از روش المان محدود حل شد. برای حل معادله انتقال حرارت فرض شد که بلور در یک اجاق است و دمای آن در دمای همسانی فاز در نبود اثرات حرارتی نگه داشته شده است. سطح ورودی و خروجی پرتوها در بلور، از راه همرفت با محیط اطراف انتقال حرارت انجام می دهد. وجه های کناری بلور در تماس با اجاق بوده و دمای آنها و در نتیجه دمای حجم بلور از راه رسانش ثابت نگه داشته شده است. پس از حل معادله انتقال حرارت، توزیع دمایی بدست آمده در معادله (۳) قرار داده و نبود همسانی فاز محاسبه شد و با استفاده از آن معادلات (۱) و (۲) دوباره محاسبه شد. این چرخه تکرار می شود تا توان هماهنگ دوم به حالت پایا رسیده و جواب پایای معادلات بدست آید.

لازم به یادآوری است که نبود همسانی فاز در رابطه (۳) با حل انتگرال به روش عددی ذوزنقه ای حل شده است. برای محاسبه نبود همسانی فاز، ضرایب شکست از معادله سلمایر وابسته به دمای بلور لیتیوم نیوبات بیان شده در منبع [۲۵] استفاده شده است. مش بندی بلور غیرخطی برای حل معادلات جفت شده و معادله انتقال حرارت در صفحه $x-y$ ، 256×256 و در راستای انتشار z ، ۵۱۲ انتخاب شد. با انتخاب این مش بندی برای انجام محاسبات عددی، بیشینه دقت در توان هماهنگ دوم در

¹ Split-Step Fourier Transform

² Runge-Kutta



حالت پایا بدست آمد. در صورتی که با مش بندی $512 \times 512 \times 1024$ تغییری در مقدار توان هماهنگ دوم بدست آمده، پدیدار نشد. برای شتاب بخشیدن به محاسبات از پردازش موازی در یک رایانه ۱۶ هسته‌ای با سرعت پردازش هر هسته $4/6$ گیگاهرتز و 64 گیگابایت حافظه موقت استفاده شده است. پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی در جدول (۱) آمده‌اند. در شبیه‌سازی فرض شده تا مشابه آنچه که در چیدمان‌های عملی انجام می‌شود، پرتوی دمش در وسط بلور کانونی شود. همچنین، شعاع لکه لیزر دمش به گونه‌ای تنظیم شده که پارامتر کانونی، که به صورت نسبت طول بلور تقسیم بر دو برابر طول رایلی پرتوی کانونی شده دمش تعریف می‌شود، مقدار بهینه خود یعنی $2/84$ را دارا باشد [۲۶].

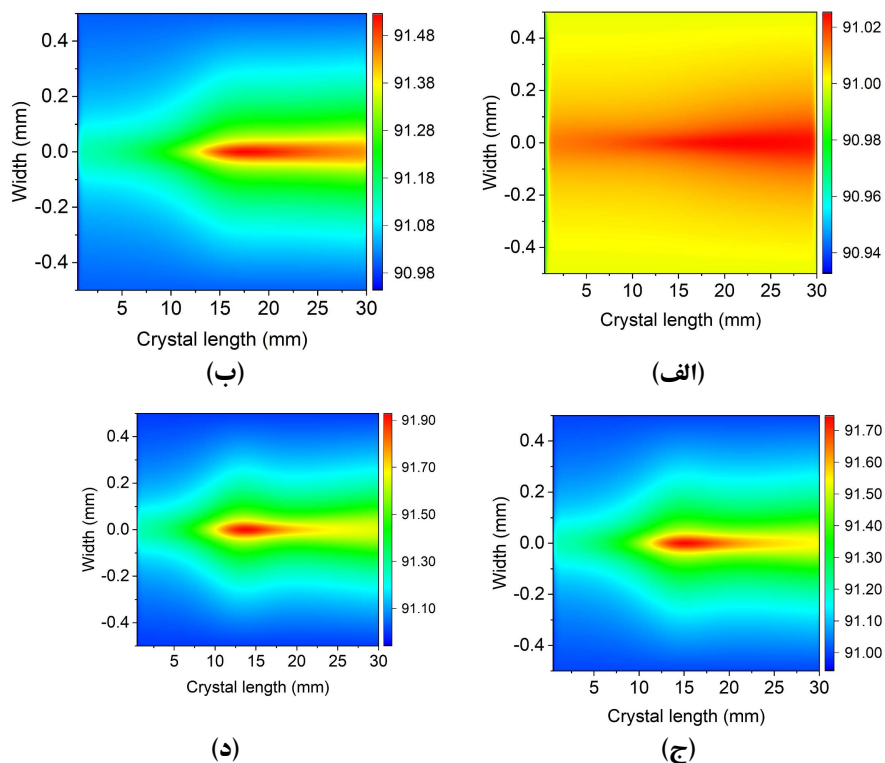
جدول ۱ پارامترهای مورد استفاده در شبیه‌سازی اثرات حرارتی در بلور لیتیوم نیوبات قطبیده دوره‌ای.

پارامتر	مقدار
ابعاد بلور	$1 \times 1 \times 30 \text{ mm}^3$
طول موج لیزر دمش، λ_f	1064 nm
ضریب موثر غیر خطی بلور، d_{eff}	17 pm/V
ضریب جذب خطی در طول موج دمش، α_f	$0/2 \text{ m}^{-1}$ [14]
ضریب جذب خطی در طول موج هماهنگ دوم، α_s	$1/9 \text{ m}^{-1}$ [14]
ضریب جذب غیر خطی در طول موج هماهنگ دوم، β	$5 \times 10^{-11} \text{ m/W}$ [14]
دوره تناوب اصلی بلور، Λ_0	$7/9 \mu\text{m}$
کمر پرتو در وسط بلور، W_{of}	$29 \mu\text{m}$
رسانندگی گرمایی، K	$4/8 \text{ W/mK}$ [9]
ضریب انتقال حرارت به روش همرفت، h	$10 \text{ W/m}^2\text{K}$ [24]

۳. نتایج شبیه‌سازی و بحث

همانگونه که از جدول (۱) پیداست، ضریب جذب بلور برای پرتوی هماهنگ دوم بیش از ۹ برابر ضریب جذب پرتوی دمش است. از طرفی پرتوی هماهنگ دوم بیشتر در فاصله بین وسط تا انتهای بلور به شکل موثری تولید می‌گردد. همین موضوع سبب ایجاد یک نایکنواختی در توزیع گرمایی در بلور می‌شود به صورتی که نیمه دوم بلور به دلیل توان بیشتر هماهنگ دوم دارای دمایی بیشتر نسبت به نیمه اول است. توزیع دمایی در بلور غیرخطی در صفحه‌ای که از محور بلور عبور می‌کند به ازای توان‌های متفاوت دمش در شکل (۲) نمایش داده شده است.

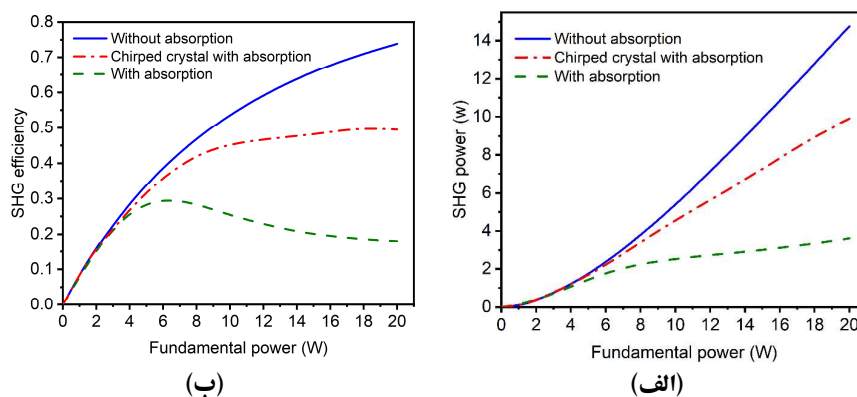




شکل ۲ توزیع دمایی در بلور لیتیوم نیوبات قطبیده دوره‌ای در توان‌های الف) ۱ وات ب) ۱۰ وات ج) ۱۵ وات و د) ۲۰ وات. ستون رنگ دما بر حسب درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهد.

باتوجه به شکل (۲)، با افزایش توان، دمای مرکز بلور جایی که پرتوی لیزر دمش کانونی شده است، افزایش می‌یابد. این موضوع موجب می‌شود که پارامتر نبود همسانی فاز تا حد زیادی افزایش پیدا کند و در مناطق گسترده‌ای دمای محلی بلور از دمای همسانی فاز که برای بلور با دوره تناوب $\lambda_0 = 7/9 \mu\text{m}$ برابر 91°C بدست آمده است، فاصله دارد. این فاصله دمایی با دمای همسانی فاز منجر به افت بازده تبدیل هماهنگ دوم می‌گردد. همانطور که از شکل (۲) پیداست، برای توان دمش ۲۰ وات اختلاف دمای داغ‌ترین نقطه بلور با دمای بلور در حالتی که توان دمش ۱ وات باشد، حدود ۰/۹ درجه سانتی‌گراد است. این یکنواختی دمایی به صورت تجربی برای بلور لیتیوم نیوبات قطبیده دوره‌ای اندازه‌گیری شده است و اختلاف دمای بین ۱ تا ۲ درجه سانتی‌گراد میان ابتدا و وسط بلور که بیشترین دما را دارد، در بلوری به طول ۴۰ میلی‌متر بدست آمده است [۱۷]. مهمترین و بیشترین

تأثیر نبود همسانی فاز گرمایی بر روی بازده تولید هماهنگ دوم رخ می‌دهد. برای درک بهتر این موضوع، توان و بازده تبدیل پرتوی دمش به هماهنگ دوم بر حسب توان دمش در حالتی که بلور بدون جذب و بنابراین بدون اثرات حرارتی باشد و همچنین برای حالتی که بلور دارای جذب است در شکل (۳) نمایش داده شده است.



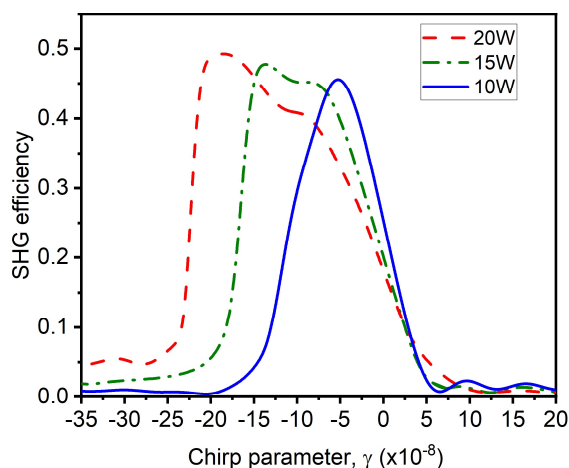
شکل ۳ (الف) توان هماهنگ دوم و (ب) بازده تولید هماهنگ دوم بر حسب توان دمش برای حالتی که بلور بدون جذب فرض شده است (خط پیوسته)، برای حالتی بلور دارای جذب و در نتیجه اثرات حرارتی در آن وجود دارد (خط چین) و بلور چرپ‌شده‌ای که در آن اثرات حرارتی وجود دارد (خط نقطه).

همانطور که از شکل (۳) پیداست، نبود همسانی فاز گرمایی تأثیر بسیار نامطلوبی بر بازده تولید هماهنگ دوم گذاشته و در توان دمش ۲۰ وات بازده تبدیل را از ۷۴ درصد به ۱۸ درصد کاهش می‌دهد. مقایسه این میزان افت در بازده تولید هماهنگ دوم با چیدمان‌های تجربی که دارای بلور و توان مشابه دمش هستند، سازگاری خوبی را نشان می‌دهد. به عنوان مثال، بازده تبدیل حدود ۲۰ درصد به ازای دمش ۲۰ وات در حضور اثرات حرارتی که در بالا بدست آمده است، در منبع [۲۷] برای بلور KTP قطبیده دوره‌ای به صورت تجربی اندازه‌گیری شده است. همچنین مقدار بازده بیشینه قابل دستیابی در توان دمش ۳۰ وات برای بلور LiTaO_3 قطبیده دوره‌ای با ابعادی برابر با بلور بررسی شده در این شبیه‌سازی، حدود ۲۱ درصد بدست آمده که همخوانی بسیار خوبی با نتایج شبیه‌سازی (۲۰ درصد) نشان می‌دهد [۲۸]. در توان‌های پایین دمش تا حدود ۴ وات، اثرات حرارتی قابل چشم‌پوشی است ولی با افزایش آن بازده تبدیل به شدت کاهش می‌یابد. از این گذشته در حضور اثرات حرارتی رفتاری اشباع‌گونه در توان هماهنگ دوم مشاهده می‌شود به این معنی که بر



خلاف آنچه که در نبود اثرات حرارتی انتظار داریم، که با افزایش شدت لیزر دمش بازده افزایش پیدا کند، اثرات حرارتی از این افزایش جلوگیری می کنند.

در شکل (۳) برای مقابله با کاهش بازده تولید هماهنگ دوم، ایده استفاده از بلورهای قطبیده دوره‌ای با چرپ شدگی در دوره تناوب مورد آزمون قرار گرفته است. برای بررسی تاثیر چرپ شدگی بر روی بهبود بازده تبدیل تولید هماهنگ دوم به ازای هر توان دمش، پارامتر چرپ شدگی (γ) آن اندازه تغییر داده شده است تا بازده هماهنگ دوم بیشینه گردد. از این رو، در هر توان دمش، یک پارامتر چرپ شدگی بهینه وجود دارد. این نکته را می توان در شکل (۴) که وابستگی بازده هماهنگ دوم با تغییر پارامتر چرپ شدگی را نشان می دهد، مشاهده نمود. در شکل (۴)، ضریب چرپ شدگی γ به ازای هر توان دمش در بازه‌ای مناسب تغییر داده شده و تاثیر آن بر روی بازده هماهنگ دوم مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین تغییرات بازده هماهنگ دوم به ازای تغییر ضریب چرپ شدگی برای توان‌های دمش ۱۰، ۱۵ و ۲۰ وات نمایش داده شده است.



شکل ۴ تغییرات بازده هماهنگ دوم بر حسب پارامتر چرپ شدگی γ برای توان‌های دمش ۱۰، ۱۵ و ۲۰ وات.

همانطور که از شکل (۴) پیداست به ازای مقادیری ویژه از پارامتر چرپ شدگی در دوره تناوب بلور غیرخطی بازده تولید هماهنگ دوم افزایش قابل ملاحظه‌ای پیدا می کند. بیشینه مقدار هماهنگ دوم به ازای مقدار بهینه پارامتر چرپ شدگی بدست می آید. همانطور که از مقایسه توان‌های مختلف دمش در شکل (۴) دیده می شود با افزایش توان بیشینه بازده هماهنگ دوم نیز افزایش می یابد.

برای آنکه میزان بهبود بازده تبدیل هماهنگ دوم نسبت به بلور با دوره تناوب یکنواخت ($\tau=0$) مشخص گردد، در شکل (۳) بیشینه بازده قابل تولید در بلورهای چرپ شده رسم گردیده است. همانطور که در شکل (۳) دیده می‌شود، با استفاده از بلور چرپ شده بازده تبدیل به ازای توان دمش ۲۰ وات در حضور اثرات حرارتی از ۱۸ درصد به ۵۰ درصد افزایش پیدا کرده است و همین افزایش برای توان دمش ۱۰ وات از ۲۵ درصد به ۴۶ درصد قابل مشاهده است. نتایج بدست آمده از شبیه‌سازی برای مقایسه و ارزیابی در جدول (۲) آمده است.

جدول ۲ مقایسه بازده تولید هماهنگ دوم برای بلور قطبیده دوره‌ای بدون جذب و اثرات گرمایی، دارای جذب و تحت تاثیر اثرات گرمایی و چرپ شده تحت تاثیر اثرات گرمایی.

بازده تولید هماهنگ دوم	توان دمش			
	۵ وات	۱۰ وات	۱۵ وات	۲۰ وات
بلور بدون اثرات گرمایی	۳۴٪	۵۴٪	۶۶٪	۷۴٪
بلور در حضور اثرات گرمایی	۲۸٪	۲۵٪	۲۰٪	۱۸٪
بلور چرپ شده در حضور اثرات گرمایی	۳۲٪	۴۵٪	۴۸٪	۵۰٪

با توجه به جدول (۲) پیداست که اثرات گرمایی سبب کاهش شدید بازده تولید هماهنگ دوم به بیش از نصف برای توان دمش ۱۰ وات و یک سوم برای توان‌های دمش ۱۵ و ۲۰ وات نسبت به بلور بدون اثرات حرارتی می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که با چرپ کردن بلور قطبیده دوره‌ای برای توان‌های دمش ۱۵ و ۲۰ وات، بازده تبدیل هماهنگ دوم به بیش از دو برابر حالتی که بلور بدون چرپ شدگی است، افزایش یافته است. اگرچه چرپ شدگی دوره تناوب بلور نمی‌تواند به صورت کامل نبود همسانی فاز را خنثی کند ولی تا حد زیادی امکان دستیابی به بازده‌های بالای هماهنگ دوم را فراهم می‌آورد. دلیل این ناتوانی در خنثی‌سازی کامل نبود همسانی فاز، توزیع حرارتی نایکنواخت با توزیع غیرخطی در طول بلور است. این نکته را می‌توان از شکل (۲) دریافت که تغییرات دما در طول بلور از یک توزیع خطی پیروی نمی‌کند. از این رو، بدیهی است که جبران کامل آن با یک چرپ شدگی با تابع خطی غیرممکن باشد. ولی به دلیل اینکه از نظر فرآیند تولید بلورهای چرپ شده، چرپ شدگی خطی بسیار رایج است در کار حاضر از این نوع چرپ شدگی استفاده شد.



۴. نتیجه گیری

در این مقاله ابتدا زمینه‌ای نظری برای شبیه‌سازی اثرات حرارتی و نبود همسانی فاز در یک بلور غیرخطی قطبیده دوره‌ای بیان شد. سپس با انجام محاسبات مورد نیاز، توزیع حرارتی در بلور غیرخطی بدست آمد. بر اساس نتایج بدست آمده، مشاهده شد که به دلیل ضرایب جذب متفاوت برای امواج هماهنگ دوم و دمش، توزیع گرمایی در بلور شکلی نایک‌نواخت دارد. همچنین نشان داده شد که نبود همسانی فاز گرمایی سبب افت شدید بازده تولید هماهنگ دوم به ویژه در توان‌های بالای دمش می‌گردد. برای مقابله با اثرات حرارتی، بلوری با چرپ‌شدگی در دوره تناوب به عنوان محیط غیرخطی شناسانده شد. این چرپ‌شدگی به صورت خطی بوده و تاثیر پارامتر چرپ‌شدگی بر بازده تولید هماهنگ دوم بررسی شد. نتایج نشان داد که با انتخاب چرپ‌شدگی مناسب می‌توان تا حد زیادی با نبود همسانی فاز گرمایی رویارویی کرد و بازده تبدیل هماهنگ دوم را تا حد زیادی بهبود داد.

منابع

- [1] Son S., Song J.-J., Kang J., and Kim C.-S., "Simultaneous Second Harmonic Generation of Multiple Wavelength Laser Outputs for Medical Sensing," *Sensors (Basel, Switzerland)* **11**, 6125-6130, 2011.
- [2] Cattaneo S. and Kauranen M., "Application of second-harmonic generation to retardation measurements," *J. Opt. Soc. Am. B* **20**, 520-528, 2003.
- [3] Dwi Astuti W., Matsukuma H., Nakao M., Li K., Shimizu Y., and Gao W., "An Optical Frequency Domain Angle Measurement Method Based on Second Harmonic Generation," *Sensors* **21**, 670, 2021.
- [4] Shao M., Liang F., Yu H., and Zhang H., "Angular engineering strategy of an additional periodic phase for widely tunable phase-matched deep-ultraviolet second harmonic generation," *Light: Science & Applications* **11**, 31, 2022.
- [5] Li J., Hu G., Shi L., He N., Li D., Shang Q., Zhang Q., Fu H., Zhou L., Xiong W., Guan J., Wang J., He S., and Chen L., "Full-color enhanced second harmonic generation using rainbow trapping in ultrathin hyperbolic metamaterials," *Nature Communications* **12**, 6425, 2021.
- [6] Vengelis J., Stasevičius I., Stankevičiūtė K., Jarutis V., Grigonis R., Vengris M., and Sirutkaitis V., "Characteristics of optical parametric oscillators synchronously pumped by second harmonic of femtosecond Yb:KGW laser," *Optics Communications* **338**, 277-287, 2015.
- [7] Kumar S.C., Samanta G.K., Devi K., Sanguinetti S., and Ebrahim-Zadeh M., "Single-frequency, high-power, continuous-wave fiber-laser-pumped Ti:sapphire laser," *Appl. Opt.* **51**, 15-20, 2012.
- [8] McDonagh L. and Wallenstein, R" Low-noise 62 W CW intracavity-doubled TEM00 Nd:YVO4 green laser pumped at 888 nm," *Opt. Lett.* **32**, 802-804, 2007.



- [9] Gurzadian G.G., *Handbook of nonlinear optical crystals / V.G. Dmitriev, G.G. Gurzadyan, D.N. Nikogosyan*, Springer series in optical sciences ; v. 64. (Springer-Verlag, Berlin ; New York, 1991.
- [10] Mu X. and Ding Y.J., "Investigation of damage mechanisms of KTiOPO4 crystals by use of a continuous-wave argon laser," *Appl. Opt.* **39**, 3099-3103, 2000.
- [11] Meetei T.S., Chandrasekaran R., Prasath R K., Boomadevi S., and Pandiyan K., "Estimation of second harmonic generation efficiency of various quasi-phase matching grating structures," *Journal of Nonlinear Optical Physics & Materials* **26**, 1750043, 2017.
- [12] Kashak T., Flannigan L., and Xu C.-q., "A systematic study of PPLN length dependence in intracavity SHG," *Scientific Reports* **11**, 22246, 2021.
- [13] Sabouri S.G., Kumar S.C., Khorsandi A., and Ebrahim-Zadeh M., "Thermal Effects in High-Power Continuous-Wave Single-Pass Second Harmonic Generation," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **20**, 563-572, 2014.
- [14] Louchev O.A., Yu N.E., Kurimura S., and Kitamura K., "Thermal inhibition of high-power second-harmonic generation in periodically poled LiNbO3 and LiTaO3 crystals," *Applied Physics Letters* **87**, 131101, 2005.
- [15] Hashemi S.S., Sabouri S.G., and Khorsandi A., "The effect of thermal de-phasing on the beam quality of a high-power single-pass second harmonic generation," *Journal of Optics* **20**, 045502, 2018.
- [16] Sabouri S.G., Suddapalli C.K., Khorsandi A., and Ebrahim-Zadeh M., "Focusing Optimization for High-Power Continuous-Wave Second-Harmonic Generation in the Presence of Thermal Effects," *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **21**, 185-192, 2015.
- [17] Ivanov G.Y., Cherpak P.S., Konyashkin A.V., and Ryabushkin O.A., "Accurate measurements of longitudinal temperature distribution of PPLN crystal in the process of second-harmonic generation," *Appl. Opt.* **59**, 7330-7337, 2020.
- [18] Sabouri S.G. and Khorsandi A., "Engineered aperiodically poled nonlinear crystal for high-power second-harmonic generation," *J. Opt. Soc. Am. B* **33**, 2493-2501, 2016.
- [19] Sabouri S.G. and Khorsandi A., "Active Control of Thermal Dephasing Effect in High Power Continuous Wave Single-Pass Second Harmonic Generation," *IEEE Journal of Quantum Electronics* **51**, 1-8, 2015.
- [20] Peng L., Hong L., and Li Z., "Theoretical solution of second-harmonic generation in periodically poled lithium niobate and chirped periodically poled lithium niobate thin film via quasi-phase-matching," *Physical Review A* **104**, 053503, 2021.
- [21] Chen B.-Q., Zhang C., Hu C.-Y., Liu R.-J., and Li Z.-Y., "High-Efficiency Broadband High-Harmonic Generation from a Single Quasi-Phase-Matching Nonlinear Crystal", *Physical Review Letters* **115**, 083902, 2015.
- [22] Imeshev G., Arbore M. A., Fejer M. M., Galvanauskas A., Fermann M., and Harter D., "Ultrashort-pulse second-harmonic generation with longitudinally nonuniform quasi-phase-matching gratings: pulse compression and shaping," *J. Opt. Soc. Am. B* **17**, 304-318, 2000.
- [23] Chen B.-Q., Ren M.-L., Liu R.-J., Zhang C., Sheng Y., Ma B.-Q., and Li Z.-Y., "Simultaneous broadband generation of second and third harmonics from chirped nonlinear photonic crystals," *Light: Science & Applications* **3**, e189-e189, 2014.
- [24] Kraus A.B. a. A.D., *Heat Transfer Handbook* (Wiley, USA, 2003).
- [25] Jundt D.H., "Temperature-dependent Sellmeier equation for the index of refraction, ne, in congruent lithium niobate," *Opt. Lett.* **22**, 1553-1555, 1997.



- [26] Boyd G.D. and Kleinman D.A., "Parametric Interaction of Focused Gaussian Light Beams," *Journal of Applied Physics* **39**, 3597-3639, 1968.
- [27] Samanta G.K., Kumar S.C., Mathew M., Canalias C., Pasiskevicius V., Laurell F., and Ebrahim-Zadeh M., "High-power, continuous-wave, second-harmonic generation at 532 nm in periodically poled KTiOPO₄," *Optics Letters* **33**, 2955-2957, 2008.
- [28] Shukla M.K., Kumar S., and Das R., "High-power, single-frequency, single-pass second-harmonic-generation by optimally focused Yb-fiber laser," in *Advanced Solid State Lasers*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2014), ATTh2A.22.

© 2022 Alzahra University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC 4.0 license) (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

