مجلهٔ پژوهش فیزیک ایران، جلد ۲۰، شمارهٔ ۴، زمستان ۱۳۹۹
DOI: 10.47176/ijpr.20.4.37381

بررسی عوامل مؤثر بر بازده تولید هماهنگ دوم از باریکهٔ گوسی لیزر پیوستهٔ ۱۰۶۴ نانومتر کانونی شده داخل کریستال‌های غیر خطی متناوباً قطبیده

حمید امرالهی و آتوسا سادات عربانیان

پژوهشکدهٔ لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، تهران

پست الکترونیکی: a_arabanian@sbu.ac.ir

(دریافت مقاله: ۱۳۹۸/۰۱/۱۵ ؛ دریافت نسخهٔ نهایی: ۱۳۹۹/۰۶/۳۱)

چکیده

در این پژوهش، معادلات انتشار غیر خطی امواج پایه و هماهنگ دوم جفت شده با معادلهٔ گرما، برای باریکهٔ گوسی کانونی شده داخل دو کریستال شبه تطبیق فازی متناوباً قطبیده MgO:PPLN و MgO:PPLT حل می‌شوند تا مکان و شعاع کانونی بهینه باریکهٔ لیزر پیوسته با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر و با پروفایل گوسی تعیین و نیز پارامتر عدم تطبیق فازی بهینه به ازای شعاع‌های کانونی مختلف محاسبه و وابستگی بازده هماهنگ دوم به این پارامترها نشان داده می‌شود. همچنین اثرات توزیع حرارتی داخل کریستال بر روی بازده تولید هماهنگ دوم بررسی و نشان داده می‌شود که چطور توزیع حرارتی منجر به کاهش بازده هماهنگ دوم می‌شود و بر این اساس طول بهینه کریستال به ازای توان‌های فرودی مختلف بررسی و نشان داده می‌شود که به ازای توان‌های فرودی بالاتر، باید طول کریستال کمتر انتخاب شود. در نهایت مقایسه‌ای بین بازده هماهنگ دوم در دو کریستال متناوباً قطبیده MgO:PPLN و MgO:PPLT با در نظر گرفتن توزیع حرارتی، به ازای توان‌های فرودی مختلف انجام و نشان داده می‌شود که به ازای توان‌های فرودی پایین‌تر/ بالاتر از ۲۱ وات، کریستال MgO:PPLN / MgO:PPLT برای تولید هماهنگ دوم، پربازده‌تر و مناسب‌تر است.

واژه‌های کلیدی: تولید هماهنگ دوم، شبه تطبیق فازی، توزیع حرارتی، کریستال متناوباً قطبیده، عدم تطبیق فازی

۱. مقدمه

لیزرهای پیوستهٔ توان بالا در محدودهٔ طول موج مرئی، کاربردهای فراوانی در حوزهٔ نمایشگرهای لیزری [۱]، طیف سنجی [۲]، پردازش مواد، تحقیقات زیست‌شناسی، جراحی‌های لیزری [۳] و منابع دمش برای لیزرهای تیتانیوم سفایر [۴]، لیزرهای رنگینه [۵] و یا نوسانگرهای پارامتری نوری [۶] دارند. با این وجود تا نیم قرن بعد از اختراع لیزر، بسیاری از محدوده‌های طیف نور در گسترهٔ فرابنفش تا فروسرخ متوسط، به ویژه محدودهٔ مرئی، به دلیل فقدان محیط بهرهٔ مناسب برای لیزرها، غیر قابل دسترس بوده است. البته عملکرد مستقیم لیزر در محدودهٔ طول موج‌های مرئی با به کار بردن منابع لیزر دیود گالیوم نیترات گزارش شده است، ولی توان‌های خروجی از این

لیزرها به دلیل بازده پایین و فقدان منبع دمش توان بالا، محدود شده است [۷]. تبدیل غیر خطی بسامد لیزری به خصوص تولید هماهنگ دوم از لیزرهای فروسرخ نزدیک با استفاده از بلورهای غیر خطی، رایج‌ترین روش برای دستیابی به محدودهٔ طول موج مرئی بوده است و باعث گسترش منابع نور همدوس به محدوده‌های طیفی ای می‌شود که با استفاده از لیزرهای متداول قابل دستیابی نیست [۵]. برای لیزرهای پیوسته به علت کوچک بودن ضریب غیرخطی مرتبهٔ دوم بلورهای غیر خطی (مانند کریستال‌های BBO، LBO و...)، بازده تبدیل هماهنگ دوم ناچیز است. با این وجود با گسترش تکنولوژی ساخت بلورهای متناوباً قطبیده با ضریب غیر خطی بالا و با استفاده از روش شبه تطبیق فازی، تولید هماهنگ دوم با بازده بالا برای لیزرهای پیوسته، توسط آرایش تک گذر از این کریستال‌ها فراهم شده است. در میان کریستال‌های موجود شبه تطبیق فازی، کریستال لیتیوم نیوبات متناوباً قطبیده (PPLN) [۸] و کریستال لیتیوم تنتلیت متناوباً قطبیده (PPLT) [۹] بیشترین ضرایب غیر خطی را داشته و پرکاربرد هستند. اخیراً با عبور تک گذر باریکهٔ لیزری پیوسته با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر از کریستال PPLT با طول ۳۰ میلی‌متر، به توان خروجی ۶/۹ وات و بازده ۷/۳۲ درصد رسیده‌اند [۱۰]. همچنین با عبور تک گذر لیزر پیوسته با توان ۹/۴ وات از کریستال PPLN به توان سبز خروجی ۱/۳۹ وات دست یافته‌اند [۱۱]. اما مشکلی که در این دستگاه‌ها وجود دارد این است که توان تولیدی هماهنگ دوم توسط بلورهای متناوباً قطبیده، اغلب با جذب سبز و گرم شدن کریستال محدود می‌شود [۱۲]. این اثرات شدیداً وابسته به نسبت اجزای تشکیل دهندهٔ ماده بوده و درطول موج‌های کوتاه‌تر بارزتر هستند و توان خروجی هماهنگ دوم را به ویژه در توان‌های فرودی بالا محدود می‌سازند. به همین دلیل در سال‌های اخیر، شبیه‌سازی آرایش‌های مختلف کوره برای کاهش اثرات جذب نور سبز و کم شدن تأثیرات گرما در توان‌های بالا و افزایش بازده تولید هماهنگ دوم، انجام شده است [۱، ۱۲ و ۱۳]. در این مقاله با حل معادلات انتشار غیر خطی موج پایه و هماهنگ دوم جفت شده با معادلهٔ حرارت به بررسی عددی اثر مکان کانون، شعاع کانونی و مقدار عدم تطبیق فازی و نیز توزیع حرارت ایجاد شده داخل این نوع کریستال‌ها روی بازده تولید هماهنگ دوم پرداخته می‌شود. به علاوه با در نظر گرفتن توزیع حرارتی در توان‌های فرودی بالا نشان داده می‌شود که چگونه می‌توان طول کریستال را طوری انتخاب کرد که تحت شرایط توان بالا، که اثرات حرارتی نیز غالب می‌شود، بتوان به بازده هماهنگ دوم بالا در این کریستال‌ها دست یافت. در انتها مقایسه‌ای بین اثر توزیع حرارتی بین دو کریستال MgO:PPLN و MgO:PPLT در توان‌های بالا و پایین انجام می‌شود و نشان داده می‌شود که کدام یک از این کریستال‌ها به ویژه در توان‌های فرودی بالا، با در نظر گرفتن توزیع حرارتی ایجاد شده، پربازده‌تر و مناسب‌تر هستند.

۲. تئوری و روش محاسبات عددی

کریستال‌های فروالکتریک، ضریب غیر خطی بالاتری نسبت به کریستال‌های دو شکستی دارند ولی به علت جذب بالای نور مرئی، افزایش توان هماهنگ دوم در توان‌های فرودی بالا در این کریستال‌ها محدود می‌شود. ضریب جذب برای نور سبز در کریستال MgO:PPLT برابر با ۱/۵۷ m^{-1} و برای طول موج ۱۰۶۴ نانومتر برابر ۰/۱۷ m^{-1} است [۴]. همچنین این ضرایب جذب برای کریستال MgO:PPLN در طول موج ۵۳۲ نانومتر برابر با ۱/۶۸ m^{-1} و برای طول موج ۱۰۶۴ نانومتر برابر ۰/۱۸ m^{-1} است. برای تعیین بازده تولید هارمونیک دوم، معادلات جفت شده (۱) با در نظر گرفتن جملات مربوط به جذب خطی میدان‌ها، حل می‌شوند تا تغییرات دامنهٔ میدان‌های اصلی و هماهنگ دوم طی انتشار در طول کریستال به دست آید [۴].

$$\frac{dE_f}{dz} = -\frac{i}{2k_f}\nabla_T^2 E_f + i\frac{2d_z\omega_f}{n_f(T)c}E_s E_f^* \times exp(-i\Delta k(T)z) - \frac{1}{2}\alpha_f E_f, \qquad (1)$$

$$\frac{dE_s}{dz} = -\frac{i}{2k_s}\nabla_T^2 E_s + i\frac{2d_z\omega_s}{n_s(T)c}E_f^2 \times exp(-i\Delta k(T)z) - \frac{1}{2}\alpha_s E_s,$$

که در آن ضرایب $E_{f,s}$ و $n_{f,s}(T)$ و $\alpha_{f,s}$ به ترتیب دامنه‌های میدان، ضرایب شکست متغیر با دما و ضرایب جذب مربوط به

امواج اصلی و هارمونیک دوم هستند. در کریستال‌های شبه تطبیق فازی مقدار ضریب غیر خطی d_z برابر است با:

$$d_z = d_{eff}\, sign[cos(۲\pi z / \Lambda)], \qquad (۲)$$

همچنین عدم تطبیق فازی Δk برابر است با:

$$\Delta k(T) = ۲\pi(\frac{۲n_f(T)}{\lambda_f} - \frac{n_s(T)}{\lambda_s} - \frac{۱}{\Lambda}), \qquad (۳)$$

که در آن Λ دورهٔ تناوب کریستال شبه تطبیق فازی است. با توجه به وابستگی ضرایب شکست و در نتیجه مقدار عدم تطبیق فازی Δk به دما، تغییرات دامنهٔ میدان‌ها در طول کریستال نیز به تغییرات دما وابسته است. بنابراین معادلهٔ حرارت (۴) برای به دست آوردن توزیع دمایی در طول کریستال به صورت جفت شده با معادلات ۱ باید حل شوند، تا تغییرات دامنهٔ میدان‌های اصلی و هماهنگ دوم با درنظر گرفتن توزیع حرارتی داخل کریستال به دست آیند.

$$\begin{aligned} &\nabla^۲ T(r) = Q(r)/K \\ &Q(r) = -\frac{۲C\varepsilon_\circ}{K}(\alpha_f n_f |E_f(r)|^۲ + \alpha_s n_s |E_s(r)|^۲) \\ &-K\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial z}\Big|_{z=\circ} = h[T(x,y,z=\circ) - T_\circ], \end{aligned} \qquad (۴)$$

در معادلهٔ فوق پارامترهای C و K و h به ترتیب ضریب گرمایی ویژه، ضریب رسانش حرارتی، و ضریب همرفتی هستند و $T_\circ$ دمای محیط اطراف کریستال است.

دورهٔ تناوب کریستال با توجه به طول همدوسی l_c داده می‌شود که به صورت مقدار طول انتشاری تعریف می‌شود که اختلاف فاز دو موج (موج هماهنگ دوم تولید شده ابتدای کریستال و موج هماهنگ دوم داخل کریستال) به π برسد و برابر است با:

$$l_c = \frac{\lambda_\omega}{۴(n(۲\omega,T) - n(\omega,T))}, \qquad (۵)$$

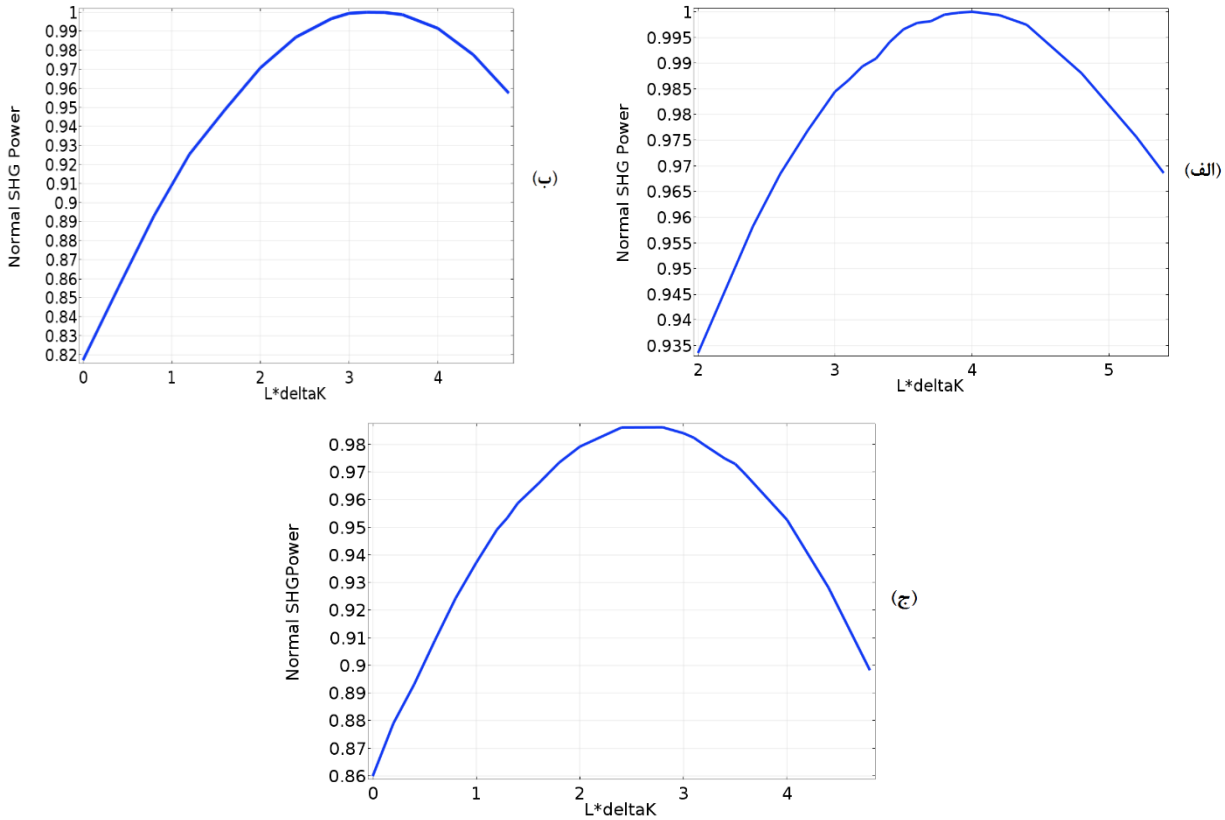
برای به دست آوردن بیشترین بازده هماهنگ دوم در این کریستال‌ها، باید دورهٔ تناوب کریستال دقیقاً دو برابر طول همدوسی $\Lambda = ۲l_c$ انتخاب شود. این طول همدوسی برای موج فروقرمز (هماهنگ اصلی) و موج مرئی (هماهنگ دوم)، بین ۱ تا ۱۰ میکرون است. نکتهٔ قابل توجه این است که برای باریکهٔ گوسی کانونی شده، مقدار بهینه عدم تطبیق فازی برابر با صفر نیست و این مقدار باید بزرگ‌تر از صفر انتخاب شود تا جابه‌جایی فازی ناشی از عبور باریکهٔ گوسی از کانون را جبران کند. بنابراین تعیین مقدار عدم تطبیق فازی بهینه، تحت شرایط هندسهٔ کانونی مختلف برای دستیابی به بازده تبدیل بالا اهمیت فراوان دارد که در بخش بعد مورد بررسی قرار می گیرد.

۳. نتایج شبیه‌سازی

۱.۳. محاسبهٔ مقدار عدم تطبیق فازی بهینه

ابتدا با حل معادلات جفت شدهٔ موج پایه و هماهنگ دوم (۱) با پروفایل گوسی، بدون در نظر گرفتن جذب آنها در کریستال (بدون در نظر گرفتن تاثیرات توزیع حرارتی) نشان خواهیم داد که بازده تولید هماهنگ دوم در مقدار عدم تطبیق فازی مثبت $\Delta k > \circ$ رخ خواهد داد. همچنین شعاع و مکان بهینه کانون برای بیشینه میدان تولیدی هماهنگ دوم محاسبه خواهد شد. شکل ۱ تغییرات توان هماهنگ دوم بهنجار شده را بر حسب مقادیر مختلف عدم تطبیق فازی در کریستال MgO:PPLN به طول ۳۰ میلی‌متر و دورهٔ تناوب کریستال ۶.۹۸ میکرون و به ازای سه شعاع کانون مختلف ۲۰، ۲۹و ۴۰ میکرون نشان می‌دهد.

همان طور که در شکل ۱. ب دیده می‌شود به ازای شعاع کانونی ۲۹ میکرون، بیشینهٔ تولید هماهنگ دوم در مقدار عدم تطبیق فازی Δk=۳/۲/L به دست می‌آید. این مقدار شعاع کانونی بهینه با پارامتر بوید کلینمن L_c/b=۲/۸۴ که به ازای مقدار عدم تطبیق فازی Δk=۳/۲/L و برای طول کریستال L_c=۳۰ mm و پارامتر هم کانون $b = ۲\pi w_\circ^۲ / \lambda$ به دست آمده است، تطابق خوبی دارد. اما با توجه به نمودارهای شکل ۱. الف و ج، بیشینهٔ تولید هماهنگ دوم به ازای شعاع کانونی ۲۰ میکرون در مقدار عدم تطبیق فازی Δk=۴/۱/L و به ازای شعاع کانون ۴۰ میکرون در مقدار عدم تطبیق فازی Δk=۲/۵/L به دست می‌آید. بنابراین هرچه شعاع کانون داخل کریستال بیشتر شود مقدار عدم تطبیق فازی بهینه کوچک‌تر خواهد بود. بنابراین بر اساس شعاع کانونی باید مقدار بهینهٔ عدم تطبیق فازی تعیین شود. شکل ۲ نیز تغییرات توان هماهنگ دوم بهنجار شده را بر حسب شعاع کانونی موج پایه، به ازای مقدار عدم تطبیق فازی Δk=۳/۲/L نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود



شکل ۱. نمودار توان هماهنگ دومبهنجار شده بر حسب مقدار عدم تطبیق فازی به ازای شعاع‌های کانون (الف) ۲۰، (ب) ۲۹ و (ج) ۴۰ میکرون.

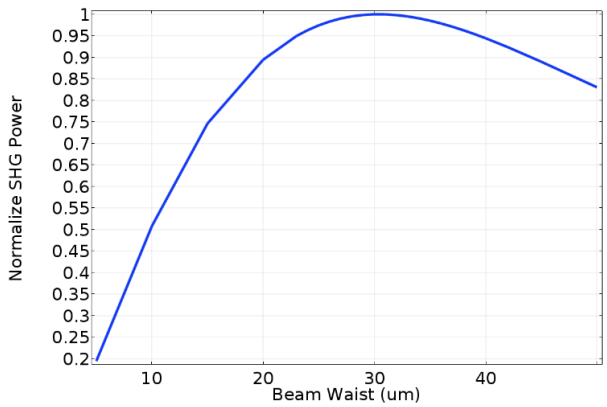
بیشترین توان تولید هماهنگ دوم در این مقدار عدم تطبیق فازی، در شعاع ۲۹ میکرون رخ می‌دهد.

۲.۳. تعیین محل کانونی بهینهٔ موج پایه داخل کریستال

در این بخش محل کانون بهینه داخل کریستال MgO:PPLN برای دستیابی به بیشینه بازده هماهنگ دوم تعیین می‌شود. شکل ۳ تغییرات دامنهٔ میدان هماهنگ دوم تولید شده روی محور را بر حسب مکان‌های کانون مختلف داخل کریستال نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود بیشینهٔ تولید هماهنگ دوم در مرکز کریستال رخ می‌دهد. در اینجا توان موج پایه برابر ۱۰ وات، شعاع کانون ۲۹ میکرون و مقدار عدم تطبیق فازی برابر با $\Delta k=۳/۲/L$ در نظر گرفته شده است. شکل ۳ نیز تغییرات دامنهٔ میدان هماهنگ دوم تولید شده روی محور را در طول انتشار داخل کریستال به ازای سه فاصلهٔ کانونی مختلف از سطح فرودی کریستال برابر ۱۵، ۸ و ۲۲ میلی‌متر نشان می‌دهد. همان طور که دیده می‌شود بیشینهٔ دامنهٔ تولید هماهنگ دوم برای حالتی که محل کانون در مرکز کریستال است رخ می‌دهد. محاسبات نشان می‌دهد که این مکان بهینه با فرض مقدار عدم تطبیق فازی $\Delta k=۳/۲/L$ به دست آمده است در صورتی که برای هر مکان کانون در کریستال باید عدم تطبیق فازی بهینه مربوطه محاسبه شود. به طور مثال طبق شبیه سازی های انجام شده، برای موج پایه با شعاع ۲۹ میکرون اگر مقدار عدم تطبیق فازی برابر $\Delta k=۱/۷/L$ در نظر گرفته شود می‌توان بیشینهٔ هماهنگ دوم را در محلی غیر از مرکز کریستال و در محل ۸ میلی‌متری از سطح ورودی به دست آورد.

۳.۳. تأثیر توزیع حرارتی بر بازده توان تولیدی هماهنگ دوم و تعیین طول بهینهٔ کریستال

با وجود پارامتری بودن فرایند غیر خطی تولید هماهنگ دوم، جذب امواج پایه و هماهنگ دوم به مقدار ناچیز در کریستال وجود دارد. این جذب با وجود مقادیر بسیار کم برابر $۰/۱۷۱\ m^{-1}$ برای



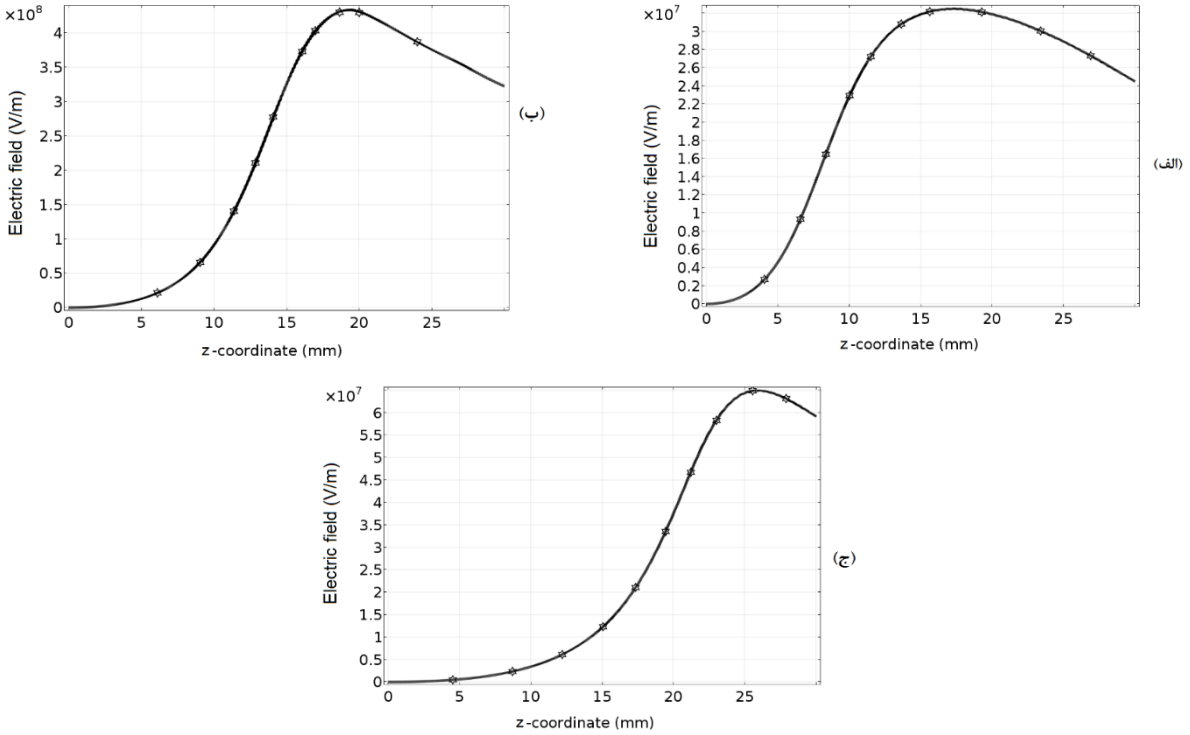
شکل ۲. تغییرات توان هماهنگ دوم بهنجار شده بر حسب شعاع کانون موج پایه در کریستال MgO:PPLN به ازای عدم تطبیق فازی $\Delta k=۳/۲/L$.

موج پایه و $۱/۵۷۱\ m^{-۱}$ برای موج هماهنگ دوم، می‌تواند باعث گرم شدن کریستال و فاصله گرفتن از دمای تطبیق فازی بهینه (به دست آمده از معادلهٔ ۳) و افت توان هماهنگ دوم تولیدی شود. شکل ۴ توزیع دمایی در داخل کریستال را طی فرایند تولید هماهنگ دوم و به ازای توان‌های فرودی ۱ و ۳۰ وات نشان می‌دهد. همان طور که در شکل ۴. الف مشاهده می‌شود تغییرات دمایی در انتهای کریستال بیشتر است. زیرا شدت هماهنگ دوم تولیدی در انتهای کریستال بیشتر از نقاط دیگر است و به دلیل جذب هماهنگ دوم بیشتر نسبت به موج پایه، دما در انتهای کریستال بیشتر است. افزایش دما در ابتدای کریستال بیشتر به دلیل جذب موج پایه است. برای توان فرودی ۱ وات، بیشترین دمای کریستال MgO:PPLN ، برابر با ۳۳۰/۱۸ کلوین بوده که تنها به اندازهٔ ۰/۱۸ کلوین گرم تر از دمای تطبیق فازی (۳۳۰ کلوین) است. اما همان طور که برای توزیع حرارتی به ازای توان فرودی ۳۰ وات نشان داده شده در شکل ۴. ب مشاهده می‌شود، بیشینهٔ دمای کریستال برابر با ۳۳۱/۱۳ کلوین بوده و در مرکز کریستال قرار دارد. در اینجا اختلاف دمای ۱/۱۳ درجه نسبت به دمای تطبیق فازی وجود دارد که این اختلاف دما نسبت به حالت با توان موج پایهٔ فرودی ۱ وات، بسیار بیشتر است.

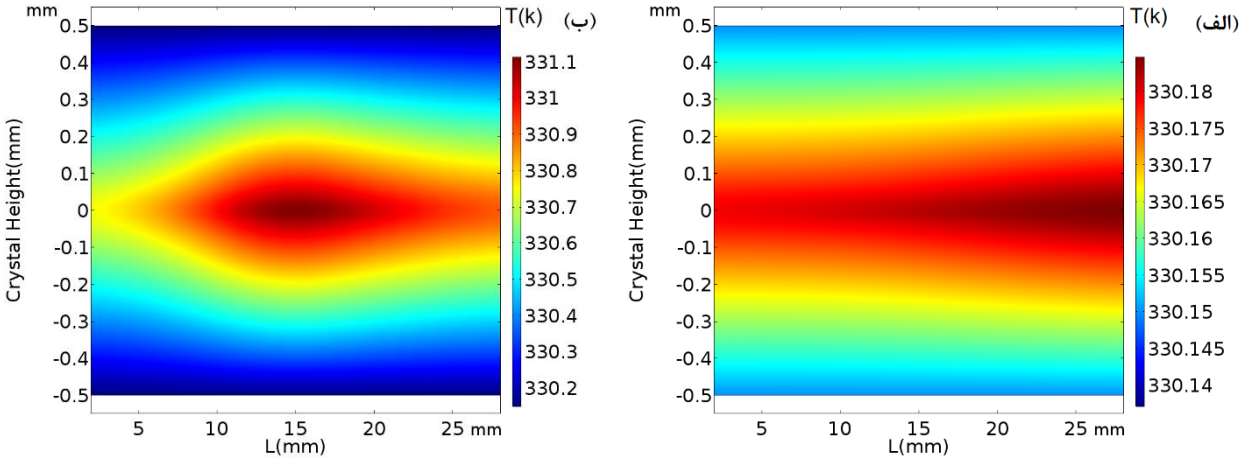
در شکل ۵ تغییرات دامنهٔ میدان هماهنگ دوم تولیدی روی محور در طول انتشار داخل کریستال را برای توان‌های فرودی ۱ و ۳۰ وات با در نظر گرفتن توزیع حرارتی (نمودار خط کامل) و بدون در نظر گرفتن آن (نمودار خط‌چین) نشان داده شده است. همان طور که در شکل ۵. الف مشاهده می‌شود به ازای توان فرودی ۱ وات، دامنهٔ میدان هماهنگ دوم تولیدی در انتهای کریستال در اثر توزیع حرارت داخل کریستال (شکل ۴. الف) به مقدار ناچیز افت کرده است. اما در صورتی که توان فرودی موج پایه به مقدار ۳۰ وات افزایش یابد با توجه به توزیع حرارتی داخل کریستال نشان داده شده در شکل ۴. ب، به ویژه در مرکز کریستال اختلاف دمای کریستال از دمای تطبیق فازی افزایش زیادی پیدا خواهد کرد، که منجر به تغییر ضریب شکست کریستال و به تبع آن تغییر مقدار عدم تطبیق فازی و فاصله گرفتن از مقدار بهینهٔ آن می‌شود که همین امر موجب کاهش بیشتر تولید هماهنگ دوم پس از عبور از مرکز کریستال می‌شود.

به طور خاص در توان فرودی ۳۰ وات، چون با توجه به شکل ۴. ب، بیشینهٔ دمای کریستال نزدیک مرکز آن قرار دارد، در نتیجه کاهش توان هماهنگ دوم از مرکز کریستال آغاز شده است. همان طور که در شکل ۵. ب برای توان فرودی ۳۰ وات نشان داده شده است بازده تولید هماهنگ دوم از ۹۲ درصد برای حالتی که گرما در نظر گرفته نشده است به ۱۰ درصد با در نظر گرفتن اثر گرما کاهش یافته است. بنابراین نتیجه می‌شود که به دلیل اثرات گرمایی، طول بهینهٔ کریستال به ازای توان فرودی ۳۰ وات ۱۶ میلی‌متر است که در این فاصله به بیشینه تولید هماهنگ دوم می‌رسد.

نکتهٔ مهم دیگر که از این شکل نتیجه می‌شود این است که به ازای توان فرودی ۳۰ وات، به دلیل اثر توزیع حرارتی روی کاهش بازده تولید هماهنگ دوم، بهتر است طول کریستال ۱۵ میلی‌متر انتخاب شود تا بیشینه توان هماهنگ دوم از آن استخراج شود. همان طور که در شکل ۵ دیده می‌شود برای طول‌های کریستال بزرگ‌تر از ۱۵ میلی‌متر، کاهش دامنه میدان هماهنگ دوم رخ می‌دهد. طبق معادلات ۱، به دلیل جفت‌شدگی دامنهٔ میدان‌های اصلی و هماهنگ دوم، میدان‌ها در طول محیط غیر خطی می‌توانند به یکدیگر



شکل ۳. نمودار تغییرات دامنهٔ میدان هماهنگ دوم تولیدی روی محور در طول کریستال MgO:PPLN برای شعاع کانون ۲۹ میکرون و برای محل‌های کانون (الف) ۸ میلی‌متر، (ب) ۱۵ میلی‌متر و (ج) ۲۲ میلی‌متر.

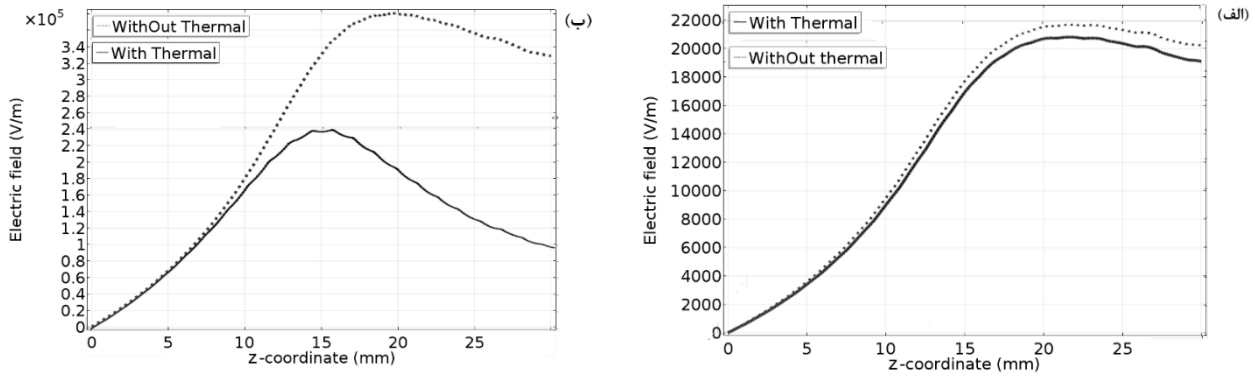


شکل ۴. توزیع حرارتی داخل کریستالMgO:PPLN برای توان‌های فرودی (الف) ۱ وات و (ب) ۳۰ وات.

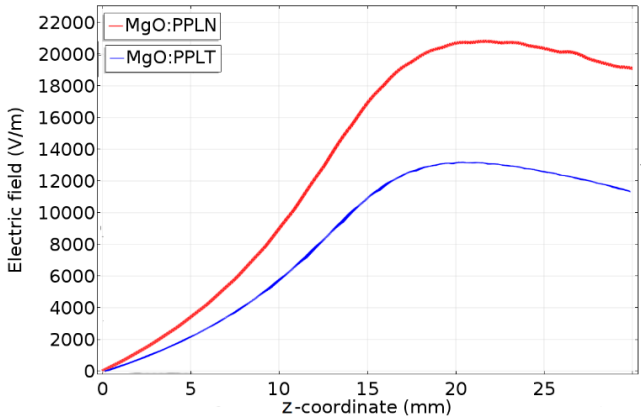
تبدیل شوند به طوری که اگر طول کریستال بیشتر از مقدار بهینه انتخاب شود به دلیل وجود عدم تطبیق فازی ایجاد شده ناشی از اثرات حرارتی، بخشی از انرژی میدان هماهنگ دوم به هماهنگ اصلی انتقال یافته و به دلیل این تبادل انرژی، دامنهٔ میدان هماهنگ اصلی افزایش و دامنهٔ میدان هماهنگ دوم کاهش می‌یابد.

۴.۳. مقایسهٔ توان هماهنگ دوم تولیدی داخل کریستال‌های متناوباً قطبیده MgO:PPLN و MgO:PPLT با در نظر گرفتن توزیع حرارتی

برای انجام مقایسه‌ای بین توان تولیدی هماهنگ دوم در کریستال MgO:PPLT و MgO:PPLN با در نظر گرفتن اثرات توزیع



شکل ۵. دامنهٔ میدان هماهنگ دوم تولیدی روی محور در طول کریستال، بدون در نظر گرفتن توزیع حرارت (نمودار خطچین) و بـا در نظـر گـرفتن تأثیر توزیع حرارت (نمودار خط کامل.) برای توان‌های فرودی (الف) ۱ وات و (ب) ۳۰ وات.

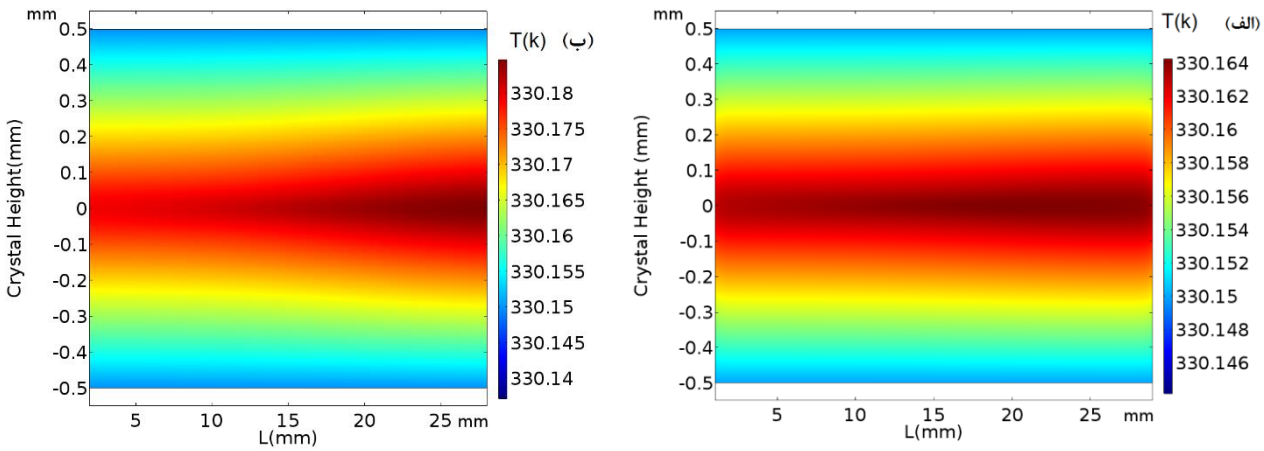


شکل ۶. تغییرات دامنهٔ میدان هماهنگ دوم روی محور تولیـد شـده در طـول کریسـتال (الـف) MgO:PPLN (نمـودار قرمـز) و (ب) MgO:PPLT (نمودار آبی)، به ازای توان فرودی ۱ وات.

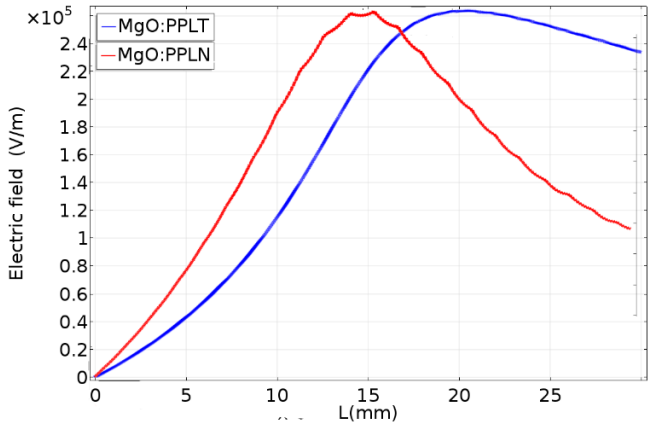
حرارتی، دمای تطبیق فازی برای هر دو کریستال یکسان و برابر با ۳۳۰ کلوین (۷۵ درجه سانتی‌گراد) در نظر گرفته شده است. در نتیجه تناوب کریستال MgO:PPLN برابر با ۶/۹۸ میکرومتر و برای کریستال MgO:PPLT برابر با ۱۱/۸ میکرومتر است. همچنین از آنجا که ضریب مؤثر غیر خطی کریستال MgO:PPLN، ۱/۶ برابر بزرگ‌تر از کریستال MgO:PPLT است، انتظار می‌رود با شرایط اولیهٔ یکسان برای میدان فرودی، توان تولیدی هماهنگ دوم داخل کریستال MgO:PPLN بیشتر باشد. شکل ۶ دامنهٔ میدان هماهنگ دوم تولیدی روی محور در طول کریستال را با در نظر گرفتن توزیع حرارتی برای هر دو کریستال نشان می‌دهد. توان فرودی موج پایه برابر با ۱ وات و شعاع موج فرودی ۲۹ میکرومتر است.

همان طور که مشاهده می‌شود رشد هماهنگ دوم تولید شده در طول کریستال MgO:PPLN بیشتر از کریستال دیگر است. در نتیجه در توان‌های فرودی حدود ۱ وات، کریستال MgO:PPLN به علت ضریب غیر خطی موثر (d_{eff}) بیشتر، توان تولید هماهنگ دوم بیشتری دارد.

شکل ۷ توزیع دمایی داخل کریستال‌های MgO:PPLN و MgO:PPLT را به ازای توان فرودی ۱ وات نشان می‌دهد. ضریب جذب هر دو کریستال برای موج پایه و هماهنگ دوم تقریباً با هم برابر است. در نتیجه مهم‌ترین عامل در تفاوت توزیع دمایی دو کریستال به تفاوت ضریب انتقال حرارت آنها برمی‌گردد، که برای کریستال MgO:PPLN برابر با W/m.K ۴ و برای کریستال



شکل ۷. توزیع حرارت داخل کریستال (الف) MgO:PPLT و (ب) MgO:PPLN برای توان فرودی ۱ وات.

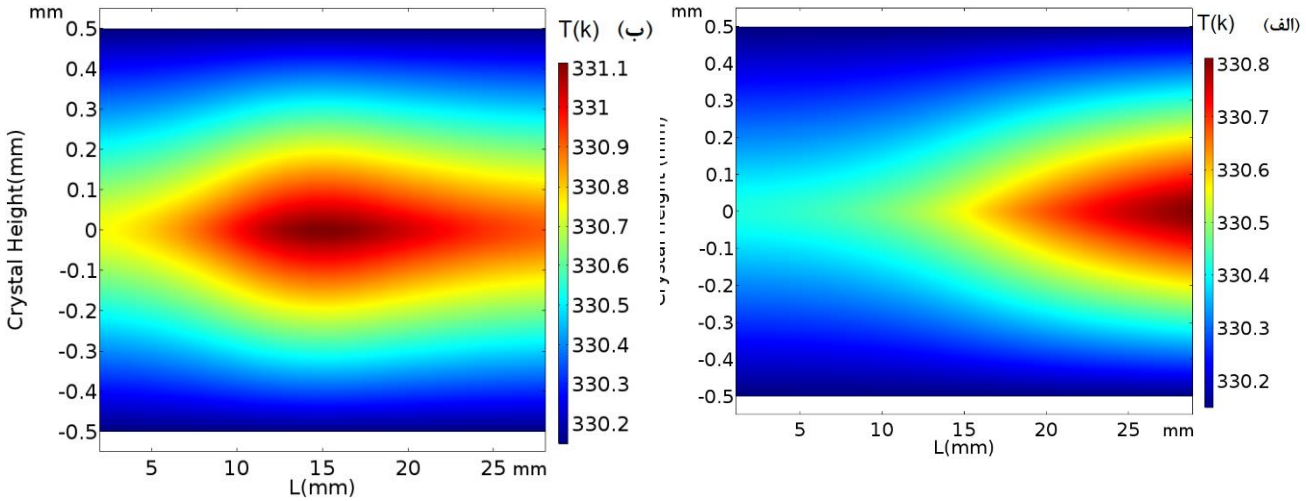


شکل ۸. تغییرات دامنهٔ میدان هماهنگ دوم تولیدی روی محور در طول کریستال (الف) MgO:PPLN (نمودار قرمز) و (ب) MgO:PPLT (نمودار آبی)، به ازای توان فرودی ۳۰ وات.

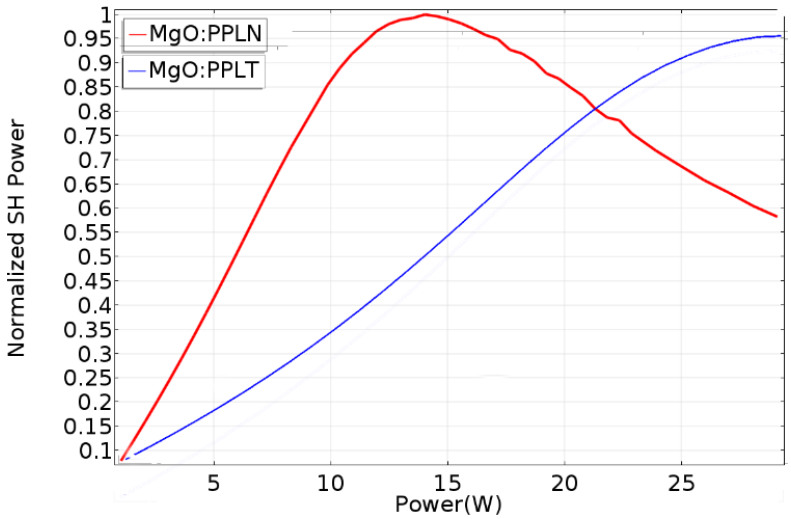
MgO:PPLT برابر با W/m.K ۴/۸ است. بنابراین به دلیل مقدار بالاتر ضریب حرارتی، کریستال MgO:PPLT بهتر از کریستال دیگر، گرمای انباشته شده در حجم خود را به سطح و از آنجا به هوای اطراف انتقال می‌دهد و در نتیجه افزایش دمای کمتری داخل کریستال حاصل می‌شود. بیشینهٔ دما برای کریستال MgO:PPLT برابر با ۳۳۰/۱۶۴ و برای کریستال MgO:PPLN برابر با ۳۳۰/۱۸۵ کلوین است. بنابراین تفاوت دمای کریستال MgO:PPLN با دمای تطبیق فازی، بیشتر از کریستال MgO:PPLT است.

شکل ۸ تغییرات دامنهٔ میدان هماهنگ دوم تولیدی روی محور در طول کریستال را برای توان فرودی ۳۰ وات و با در نظر گرفتن تأثیر توزیع حرارتی داخل کریستال‌های MgO:PPLN (نمودار قرمز) و MgO:PPLT (نمودار آبی)، نشان می‌دهد. بر خلاف شکل ۶، دامنهٔ میدان خروجی هماهنگ دوم برای کریستال MgO:PPLN از کریستال MgO:PPLT کمتر بوده و افت دامنهٔ آن در طول کریستال MgO:PPLN به مراتب بیشتر است. بازده تولید هماهنگ دوم برای کریستال MgO:PPLN برابر با ۹ درصد و برای کریستال MgO:PPLT برابر با ۳۰ درصد است. نتیجه می‌شود که با وجود ضریب غیر خطی بیشتر کریستال MgO:PPLN، بازده تولید هماهنگ دوم آن کمتر است؛ زیرا به علت ضریب انتقال حرارت کمتر کریستال MgO:PPLN دمای بیشینه آن بیشتر از کریستال MgO:PPLT شده و در نتیجه به دلیل اختلاف بیشتر با دمای تطبیق فازی، تولید هماهنگ دوم در کریستال MgO:PPLN کاهش بیشتری نسبت به کریستال MgO:PPLT دارد.

بنابراین به ازای توان فرودی ۳۰ وات، به دلیل اثرات حرارتی، طول‌های بهینه به ترتیب برای کریستال MgO:PPLN حدود ۱۵ میلی‌متر و برای کریستال MgO:PPLT حدود ۲۰ میلی‌متر است تا بیشترین استخراج توان هماهنگ دوم ممکن از



شکل ۹. توزیع دمایی داخل کریستال (الف) MgO:PPLT و (ب) MgO:PPLN برای توان فرودی ۳۰ وات.



شکل ۱۰. تغییرات توان هماهنگ دوم بهنجار شده برحسب توان‌های فرودی مختلف برای کریستال MgO:PPLN (نمودار قرمز) و MgO:PPLT (نمودار آبی).

کریستال حاصل شود. در اینجا نیز برای هر دو کریستال، به ازای طول‌های بزرگ‌تر از طول بهینه، کاهش دامنهٔ میدان هماهنگ دوم ناشی از انتقال انرژی از میدان هماهنگ دوم به میدان هماهنگ اصلی به واسطهٔ عدم تطبیق فازی ایجاد شده توسط اثرات حرارتی دیده می‌شود.

شکل ۹ توزیع دمایی داخل کریستال‌ها را برای توان فرودی ۳۰ وات نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که دمای بیشینهٔ کریستال MgO:PPLN و MgO:PPLT به ترتیب برابر با ۳۳۱/۱۱ و ۳۳۰/۸ است. بنابراین اختلاف دمای بیشینهٔ کریستال با دمای تطبیق فازی برای کریستال MgO:PPLN بیشتر از MgO:PPLT است.

شکل ۱۰ توان هماهنگ دوم بهنجار شدهٔ خروجی از کریستال را بر حسب توان فرودی برای کریستال‌های MgO:PPLN (نمودار قرمز) و MgO:PPLT (نمودار آبی) به طول ۳۰ میلی‌متر نشان می‌دهد. شعاع کانون ۲۹ میکرومتر و محل کانون در وسط کریستال در نظر گرفته شده است. برای کریستال MgO:PPLN به ازای توان‌های فرودی بالاتر از ۱۴ وات، به دلیل اثرات بیشتر توزیع حرارتی و تفاوت دمایی بیشتر با دمای تطبیق فازی، توان

هماهنگ دوم خروجی از کریستال کاهش پیدا می‌کند. به علت ضریب انتقال حرارت کمتر کریستال MgO:PPLN ، اختلاف دمای بیشینه آن از دمای تطبیق فازی، بیشتر از کریستال MgO:PPLT بوده و در نتیجه به دلیل اختلاف بیشتر با دمای تطبیق فازی، تولید هماهنگ دوم در کریستال MgO:PPLN کاهش بیشتری نسبت به کریستال MgO:PPLT به ازای طول کریستال یکسان دارد. همچنین مشاهده می‌شود که به ازای توان‌های فرودی پایین، توان هماهنگ دوم تولیدی در کریستال MgO:PPLN بالاتر از کریستال دیگر است. در صورتی که به ازای توان‌های بالاتر از ۱۴ وات، توان هماهنگ دوم خروجی از کریستال MgO:PPLN کاهش پیدا می‌کند، مقدار آن به ازای توان فرودی ۲۱ وات با توان هماهنگ دوم خروجی از کریستال MgO:PPLT برابر می‌شود و سپس برای توان‌های فرودی بالای ۲۱ وات، کریستال MgO:PPLT قادر به تولید هماهنگ دوم بیشتری نسبت به کریستال MgO:PPLN خواهد بود.

۴. نتیجه‌گیری

در این مقاله معادلات انتشار موج پایه و هماهنگ دوم با پروفایل گوسی به طور جفت شده با معادلهٔ حرارت، برای فرایند غیر خطی تولید هماهنگ دوم داخل کریستال‌های متناوباً قطبیده نظیر MgO:PPLN و MgO:PPLT حل شدند. پارامترهای مختلف نظیر مکان و شعاع کانون و طول کریستال و عدم تطبیق فازی بهینه برای تولید هماهنگ دوم با بازده بالا بررسی شد. ابتدا مقدار عدم تطبیق فازی بهینه برای تولید هماهنگ دوم در کریستال MgO:PPLN، به ازای شعاع کانونی مختلف بررسی شد و نشان داده شد که مقدار عدم تطبیق فازی بهینه بسته به شعاع کانونی باریکهٔ گوسی باید تعیین شود، به طوری که هرچه میزان کانونی کردن بیشتر شود مقدار عدم تطبیق فازی بهینه بزرگ‌تر خواهد بود. به علاوه نشان داده شد که بسته به مقدار شعاع کانونی و مقدار عدم تطبیق فازی بهینه، محل کانون بهینه در طول کریستال می‌تواند مشخص شود. محاسبات نشان داد که برای کریستال با طول ۳۰ میلی‌متر و شعاع بهینه برابر با ۲۹ میکرومتر و مقدار عدم تطبیق فازی برابر $\Delta k=3/2/L$، محل کانون بهینه در مرکز کریستال است. سپس با در نظر گرفتن مقدار عدم تطبیق فازی بهینه $\Delta k=3/2/L$ و شعاع کانونی ۲۹ میکرون، اثر توزیع حرارتی روی بازده تولید هماهنگ دوم در هر دو کریستال MgO:PPLN و MgO:PPLT بررسی شد و مشاهده شد که به ازای توان بالا اثر توزیع حرارتی بسیار شدید شده و باید طول کریستال کوچک‌تری به کار رود تا به بازده تولید هماهنگ دوم بالا بتوان دست یافت. همچنین با مقایسهٔ بین بازده هماهنگ دوم تولید شده در کریستال MgO:PPLT و MgO:PPLN با در نظر گرفتن توزیع حرارتی، نتیجه شد که به ازای توان‌های فرودی بالا، کریستال‌های MgO:PPLT به علت رسانندگی بیشتر، بازده بالاتری نسبت به کریستال‌های MgO:PPLN نشان می‌دهند و بنابراین برای توان‌های بالا مناسب‌تر هستند. اما در توان‌های فرودی پایین که اثر توزیع حرارتی قابل صرف نظر است کریستال‌های MgO:PPLN پر بازده‌تر هستند.

مراجع

1. C Q Xu, "*Periodically poled optical nonlinear crystals for laser display applications,"* in Asia Optical Fiber Communication and Optoelectronic Exposition and Conference, p. SuJ4, Optical Society of America, (2008).
2. K H Ko, K H Lee, H Park, J Han, Y H Cha, G Lim, T S Kim, and D Y Jeong, "*2nd and 4th harmonic generations of a diode-oscillator fiber-amplifier for atomic spectroscopy,"* in CLEO: Science and Innovations, p. CMC5, Optical Society of America, (2011).
3. P Zeil, A Zukauskas, S Tjörnhammar, C Canalias, V Pasiskevicius, and F Laurell, *Optics express* **21**, 25 (2013) 30453.
4. G Samanta, S C Kumar, K Devi, and M Ebrahim-Zadeh, *Optics and Lasers in Engineering* **50**, 2 (2012) 215.
5. J Kim, J Jeong, K Lee, and S Lee, *Applied Physics B* **108**, 3 (2012) 539.
6. G Samanta, S C Kumar, R Das, and M Ebrahim-Zadeh, *Optics letters* **34**, 15 (2009) 2255.
7. H Okamoto, K Kasuga, I Hara, and Y Kubota, *Optics Express* **17**, 22 (2009) 20227.
8. M G Pullen, J J Chapman, and D Kielpinski, *Applied optics* **47**, 10 (2008) 1397.
9. S Kurimura, N E Yu, Y Nomura, M Nakamura, K

Kitamura, and T Sumiyoshi, *"Qpm wavelength convertersbased on stoichiometric lithium tantalate,"* in Advanced Solid-State Photonics, Optical Society of America (2005) 92.

10. G Samanta, S C Kumar, and M Ebrahim-Zadeh, *Optics letters* 34, 10 (2009) 1561.
11. A Sahm, M Uebernickel, K Paschke, G Erbert, and G Tränkle, *Optics Express* **19**, 23 (2011) 23029.
12. O A Louchev, N E Yu, S Kurimura, and K Kitamura, *Applied Physics Letters* 87, 13 (2005) 131101.
13. S G Sabouri, S C Kumar, A Khorsandi, and M Ebrahim-Zadeh, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* **20**, 5 (2014) 563.