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

کاهش تاثیر توزیع حرارتی روی بازده تولید هماهنگ دوم در داخل کریستال MgO:PPLN با استفاده از طراحی کریستال با دوره تناوب بطور پیوسته متغیر

حمید امراللهی، آتوسا سادات عربانیان، رضا مسعودی

پژوهشکده لیزر و پلاسما، دانشگاه شهید بهشتی، اوین، تهران

چکیده – در این مقاله با حل معادلات جفت شده انتشار امواج غیر خطی و معادله گرما، اثرات توزیع حرارتی و همچنین اثرات پروفایل گوسی بر روی بازده تولید هماهنگ دوم توسط لیزر پیوسته با طول موج ۱۰۶۴نانومتر داخل کریستال های شبه تطبیق فازی متناوبا قطبیده MgO:PPLN برر سی شده و اثبات می شود که به ازای توان های فرودی بالای ۱۰وات، توزیع نا متقارن حرارتی در طول کریستال منجر به عدم تطابق فازی و کاهش قابل ملاحظه بازده هارمونیک دوم خواهد شد. روش پیشنهادی برای بالا بردن بازده هماهنگ دوم و کاهش اثر توزیع حرارتی، استفاده از دوره ی تناوب متغیر در طول کریستال می باشد که با استفاده از این روش میتوان تاثیر توزیع حرارتی را به حداقل رسانده و بازده هماهنگ دوم، نزدیک به مقداری باشد که تاثیرات توزیع حرارتی صرف نظر شده است.

کلید واژه- تولید هارمونیک دوم، شبه تطبیق فازی، پرتو گوسی، توزیع حرارتی، دوره تناوب بطور پیوسته متغیر.

Reducing the effect of thermal distribution on the second harmonic generation efficiency inside a MgO:PPLN crystal using a design of crystal with continuously variable period

Hamid Amrollahi, Atoosa Sadat Arabanian, and Reza Massudi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran

Abstract- In this paper, by solving coupled equations of nonlinear propagation of waves and heat equation, the effects of thermal distribution and also the effects of Gaussian profiles on the second harmonic generation efficiency by continuous laser with a wavelength of 1064 nm inside a periodically poled quasi phase-mached MgO:PPLN crystal has been investigated and it has been proved that for the incident powers above 10 watts, the asymmetric thermal distributions along the crystal will result a phase mismatching and a significant reduction in the second harmonic efficiency. The proposed method for increasing the second harmonic efficiency and reducing the thermal distribution effect is the use of the continuously varying period along the crystal so that which by this method one can minimize the effect of thermal distribution and enhance the second harmonic efficiency is close to the value that the effects of thermal distribution has been discarded.

Keywords: Second Harmonic Generation, Quasi Phase Matching, Gaussian Beam, Thermal Distribution, continuously variable period.

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-19]

مقدمه

لیزرهای پیوسته ی توان بالا در محدوده ی طول موجی مرئی، کاربرد های فراوانی در حوزه نمایشگر های لیزری، طیف سنجی، پردازش مواد، تحقیقات زیست شناسی، جراحیهای لیزری [۱] و منابع دمش برای لیزر های تیتانیوم سفایر [۲]، لیزرهای رنگینه و یا نوسانگر های پارامتریک نوری[۳] دارند. تبدیل غیرخطی فرکانس لیزری به خصوص تولید هماهنگ دوم از لیزرهای فروسرخ نزدیک با استفاده از بلورهای غیرخطی، رایج ترین روش برای دستیابی به محدوده طول موج مرئی بوده است و باعث گسترش منابع نور همدوس به محدوده های طیفی ای میشود که با استفاده از لیزرهای متداول قابل دستیابی نیست. آرایش تولید هماهنگ دوم تک گذر خارجی، آسان ترین روش تولید هماهنگ دوم است. در این آرایش پرتوی لیزر مستقیماً به بلور تابانده میشود. برای لیزرهای پیوسته به علت کوچک بودن ضریب غیرخطی مرتبه دوم بلورهای غیرخطی، بازده تبدیل هماهنگ دوم ناچیز است با این وجود با گسترش تکنولوژی ساخت بلورهای متناوبا قطبیده با ضریب غیر خطی بالا و استفاده از روش شبه تطبیق فازی، امکان تولید هماهنگ دوم با بازده بالا برای لیزرهای پیوسته توسط آرایش تک گذر از این کریستالها فراهم شده است. مشکلی که در این سیستم ها وجود دارد این است که توان تولیدی هماهنگ دوم توسط بلورهای متناوباً قطبیده، اغلب با جذب سبز و گرم شدن کریستال و همچنین پدیده ی فوتوشکست محدود می شود. اخیرا شبیه سازی آرایش های مختلف کوره برای کاهش اثرات جذب نور سبز و کم شدن تاثیرات گرما در توان های بالا، و افزایش بازده تولید هماهنگ دوم، انجام شده است که به جای استفاده از کوره های متداول، فرض شده ا ست که سطح پایینی کریستال با کوره در تماس است و سطح بالای کریستال با هوا تبادل گرما میکند و با انتقال گرمای کریستال به محیط بیرون، بازده هماهنگ دوم مقداری افزایش پیدا کند. ولی از معایب این کار کاهش کیفیت باریکه خروجی میباشد. زیرا توزیع حرارتی در عرض کریستال متفاوت بوده و پروفایل عرضی هماهنگ دوم تولیدی تغییر می یابد. در این مقاله با پیشنهاد طراحی خاصی از این نوع کریستالها، با تغییر پیوسته دوره تناوب، نشان داده می شود که می توان اثر توزیع حرارتی را کاهش و بازده هماهنگ دوم را افزایش داده و اثبات می شود که می توان بدون کاهش کیفیت باریکه به مقدار بازده بدون در نظر گرفتن تاثیر توزیع حرارتی، دست یافت.

معادلات و تئوری

کریستال های فروالکتریک ضریب غیر خطی بالاتری نسبت به کریستال های دو شکستی دارند ولی به علت جذب بالای نور مرئی، امکان آسیب کریستال در توان های بالا وجود دارد. 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]. برای تعیین بازده تولید هارمونیک دوم، معادلات جفت شده(۱) با در نظر گرفتن جملات مربوط به جذب خطی میدان ها حل می شود تا تغییرات دامنه میدان های اصلی و هارمونیک دوم طی انتشار در طول کریستال بدست آید[۴].

$$\frac{dE_f}{dz} = i\,\frac{2d_z\omega_f}{n_f(T)c}E_S E_f^{*}\times\exp(-i\,\Delta k(T)\times z)-\frac{1}{2}\alpha_f E_f \qquad (۱)$$
$$\frac{dE_s}{dz} = i\,\frac{2d_z\omega_s}{n_s(T)c}E_f^{\,2}\times\exp(i\,\Delta k(T)\times z)-\frac{1}{2}\alpha_s E_s$$

که در آن ضرایب $E_{f,s}$ و $n_{f,s}(T)$ و $\alpha_{f,s}$ به ترتیب دامنه های میدان، ضرایب شکست متغیر با دما و ضرایب جذب امواج اصلی و هارمونیک دوم می باشد. در کریستال های شبه تطبیق فازی مقدار ضریب غیر خطی d_z برابر با :

$$d_z = d_{eff}\,sign[\cos(2\pi z/\Lambda)] \qquad (۲)$$

همچنین عدم تطبیق فازی Δk برابر است با :

$$\Delta k(T) = 2\pi\left(\frac{2n_f(T)}{\lambda_f}-\frac{n_s(T)}{\lambda_s}-\frac{1}{\Lambda}\right) \qquad (۳)$$

است که در آن Λ دوره تناوب کریستال شبه تطبیق فازی (QPM) می‌باشد. با توجه به وابستگی ضرایب شکست و در نتیجه تطبیق فازی Δk به دما، تغییرات دامنه میدان ها در طول کریستال به تغییرات دما وابسته می‌باشد. بنابراین معادله حرارت (۴) برای بدست آوردن توزیع دمایی در طول کریستال بصورت جفت شده با معادلات

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-19]

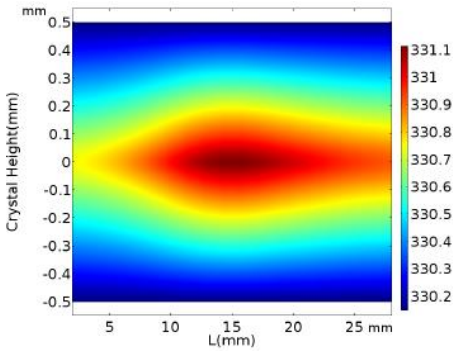
(۱) باید حل شوند، تا تغییرات دامنه میدان های اصلی و هارمونیک دوم با درنظر گرفتن توزیع حرارتی داخل کریستال بدست آیند.

$$\nabla^2 T(r) = Q(r)/K$$
$$Q(r) = -\frac{2C\varepsilon_0}{K}(\alpha_f n_f |E_f(r)|^2 + \alpha_s n_s |E_s(r)|^2) \quad (۴)$$
$$-K\left.\frac{\partial T(x,y,z)}{\partial z}\right|_{z=0} = h[T(x,y,z=0) - T_0]$$

در معادله فوق پارامتر های C و K و h به ترتیب ضریب گرمایی ویژه، ضریب رسانش حرارتی، و ضریب همرفتی هستند.

نتایج شبیه سازی

ابتدا با حل معادلات جفت شده انتشار امواج غیر خطی و معادله گرما، توسط نرم افزار کامسول، اثرات توزیع حرارتی بر روی بازده تولید هماهنگ دوم برای لیزر پیوسته فرودی یا پروفایل گوسی با طول موج ۱۰۶۴نانومتر داخل کریستال های شبه تطبیق فازی متناوبا قطبیده MgO:PPLN بررسی می شود. شکل ۱ توزیع حرارتی در طول کریستال را به ازای توان فرودی ۳۰ وات نشان می دهد.

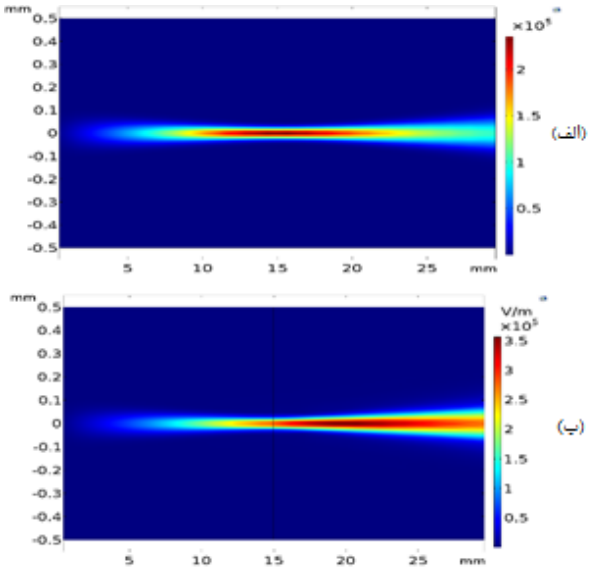


شکل۱:توزیع حرارتی داخل کریستال PPLN به ازای توان فرودی ۳۰ وات

به علت اینکه ابتدای کریستال از مکان کانونی موج فرودی دور بوده و تولید هماهنگ دوم کم است دمای ابتدای کریستال از دمای تطبیق فازی تفاوت چندانی ندارد. در صورتی که با رشد توان هماهنگ دوم هر چه به سمت انتهای کریستال حرکت میکنیم دمای کریستال از تطبیق فازی بیشتر فاصله میگیرد. به عنوان طرح ابتدایی کریستال با دو نیمه با دوره تناوب متفاوت مطابق شکل ۲ را شبیه سازی می کنیم. دوره تناوب کریستال در نیمه دوم آن بر اساس دمای بدست آمده در مرکز کریستال حاصل از حل معادلات جفت شده انتشار و گرما به ازای دوره تناوب نیمه اول محاسبه میشود. نیمه اول کریستال دارای دوره تناوب برابر با Λ=6.98um معادل با دمای تطبیق فازی بدون تاثیرات حرارتی برابر با ۵۷ درجه سانتی گراد می باشد، با این فرض در مرکز کریستال دمای تطبیق فازی حدود ۱درجه تغییر میکند. به ازای این دما دوره تناوب بهینه کریستال برای نیمه دوم برابر با Λ = 7um در نظر گرفته می شود. سپس معادلات جفت شده انتشار و گرما برای این آرایش جدید با دو دوره تناوب متفاوت، مجددا حل شده تا توزیع میدان هماهنگ دوم بدست آید. شکل ۳ توزیع دامنه میدان هماهنگ دوم داخل کریستال MgO:PPLN را برای الف) یک دوره تناوب ثابت در طول کریستال و ب) دو دوره تناوب متفاوت در دو نیمه کریستال نشان

میدهد. همان طور که مشاهده میشود در شکل ب تولید هماهنگ دوم در انتهای کریستال بواسطه تاثیر توزیع حرارتی کاهش پیدا نکرده است. بازده هماهنگ دوم در این روش ۲ برابر بیشتر از زمانی است که مقدار دوره تناوب در طول کریستال ثابت است(شکل الف).

شکل ۲: شمایی از کریستال شبیه سازی شده با دو نیمه با دوره تناوب متفاوت



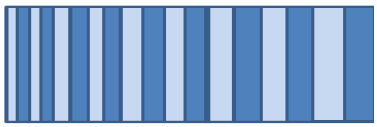
شکل ۳: توزیع دامنه میدان هماهنگ دوم برای الف) یک دوره تناوب ثابت در طول کریستال وب) دو دوره تناوب متفاوت در دو نیمه کریستال

محا سبات نـشان می دهد که هر چه تعداد تغییرات دوره تناوب در طول کریستال افزایش پیدا کند، بازده هماهنگ دوم میتواند بیشـتر شـده و به مقدار بدون تاثیرات حرارتی نزدیک تر شـود. بنابراین میتوان کریسـتال را به جای دو بخش به بخش های بیشـتری با دوره تناوب های متفاوت تقسـیم کرد در این شرایط میتوان کریستالی با دوره تناوب به طور پیو سته متغیر در طول کریستال ساخت. شکل ۴ شمایی از یک کریستال با دوره تناوب متغیر را نشان میدهد که دوره آن به صورت پیوسته

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

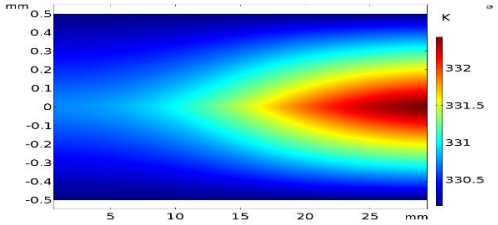
[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-19]

خطی از ابتدا تا انتهای کریســـتال بزرگتر میشـــود. (چنین کریستال هایی بطور تجاری در دسترس هستند).



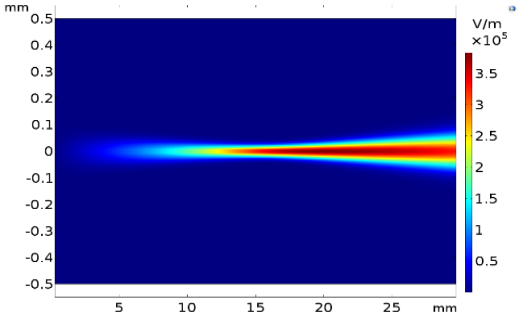
شکل ۴: شمایی از کریستال شبیه سازی شده با دوره تناوب بطور پیوسته متغیر.

برای چنین آرایشی سوال اساسی این است که مقدار دوره تناوب کمینه و بیشینه به ترتیب در ابتدا و انتهای کریستال چه مقدار باشد تا بیشترین بازده تولید هماهنگ دوم بدست آید. بر خلاف حالت قبل که در آنجا دوره تناوب کریستال برای نیمه دوم با توجه به دمای وسط کریستال (که پس از آن افت بازده را داشتیم) بدست می آمد. در اینجا دوره تناوب در دو انتهای کریستال طوری تعیین می شود که دامنه میدان هماهنگ دوم، مشابه با حالت بدون تاثیر توزیع حرارتی بوده و تا انتهای کریستال افزایش یابد. بنابراین برای بدست آوردن این دوره های تناوب، ابتدا معادلات امواج پایه و هماهنگ دوم بدون در نظر گرفتن تاثیر گرما در کریستال MgO:PPLNحل شده و سپس با در نظر گرفتن جذب این میدان ها دمای ابتدا و انتهای کریستال با استفاده از معادله گرما به ترتیب برابر ۳۳۰/۱۵ کلوین (دمای تطبیق فازی) و ۳۳۲/۴۷ کلوین بدست آمده است (شکل ۵)



شکل ۵: توزیع حرارتی داخل کریستال به ازای توان فرودی ۳۰ وات بدون نظر گرفتن تاثیر توزیع حرارتی بر دامنه های میدان

سپس دوره تناوب معادل این دو دما محاسبه شده و به عنوان دوره تناوب در ابتدا و انتهای کریستال در نظر گرفته میشود. در نتیجه مقدار تناوب ابتدای کریستال برابر با ۶/۹۸ میکرومتر و در انتهای کریستال برابر با ۷/۰۶ میباشد و در طول کریستال این تناوب به طور پیوسته خطی تغییر پیدا میکند. سپس معادلات جفت شده انتشار و گرما مجددا برای کریستال با آرایش جدید با دوره تناوب بطور پیوسته متغیر فوق حل میشوند. شکل ۶، توزیع دامنه میدان هماهنگ دوم داخل کریستال MgO:PPLN با دوره تناوب بطور پیوسته متغیر را نشان می دهد. همانطور که دیده می شود با این آرایش پیشنهادی کاهش دامنه میدان در انتهای کریستال بسیار ناچیز بوده و نزدیک به حالتی است که تاثیر توزیع حرارتی در نظر گرفته نمی شد.



شکل ۶: توزیع دامنه میدان هماهنگ دوم داخل کریستال MgO:PPLN با دوره تناوب بطور پیوسته متغیر

نتیجه گیری

با حل معادلات جفت شده انتشار امواج غیر خطی و معادله گرما، اثرات توزیع حرارتی و همچنین اثرات پروفایل گوسی بر روی بازده تولید هماهنگ دوم توسطط لیزر پیوسته با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر داخل کریستال های شبه تطبیق فازی متناوبا قطبیده MgO:PPLN بررسی شد و مشاهده شد که به ازای توان های فرودی بالای ۱۰وات، توزیع نا متقارن حرارتی در طول کریستال منجر به عدم تطبیق فازی و کاهش قابل ملاحظه بازده هارمونیک دوم خواهد شد. روش پیشنهادی برای بالا بردن بازده هماهنگ دوم با وجود اثرات گرما استفاده از دوره ی تناوب متفاوت در طول کریستال میباشد که با استفاده از این روش میتوان تاثیر توزیع حرارتی را به حداقل رسانده و بازده هماهنگ دوم، نزدیک به مقداری باشد که تاثیرات توزیع حرارتی صرف نظر شده است.

مراجع

[1] SADICK, NEiL S.; WEISS, RoBERT. The utilization of a new yellow light laser (578 nm) for the treatment of class I red telangiectasia of the lower extremities", Dermatol Surg. 28(1):21-5 (2002).

[2] S. C. Kumar, G. K. Samanta, K. Devi, S. Sanguinetti, and M. Ebrahim-Zadeh, "Single-frequency, high-power, continuous-wave fiber-laserpumped Ti:sapphire laser," Vol. 51, Issue 1, pp. 15-20 (2012).

[3] G. K. Samanta, S. C. Kumar, R. Das, and M. EbrahimZadeh,"Continuous-wave optical parametric oscillator pumped by a fiber laser green source at 532 nm," *Opt. Lett.*, vol. 34, no. 15, pp. 2255–2257 (2009).

[4] Louchev, Oleg A., et al. "Thermal inhibition of highpower second-harmonic generation in periodically poled LiNbO3 and LiTaO3 crystals." *Applied Physics Letters* 87.13 ,131101 (2005).

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

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-06-19]