بررسی اثر توزیع حرارتی بر روی بازده تولید هارمونیک دوم توسط لیزر پیوسته فیبری ۱۰۶۴ نانومتر در کریستال های MgO:PPSLT و MgO:PPLN

حمید امراللهی، آتوسا سادات عربانیان و رضا مسعودی

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

چکیده ـ در این مقاله اثرات توزیع حرارتی بر روی بازده تولید هارمونیک دوم توسط لیزر پیوسته با طول موج ۱۰۶۴ نانومتر داخل کریستال MgO:PPSLT بررسی می شود. نتایج محاسبات عددی نشان میدهد که به ازای توان های فرودی بالای ۳۰ وات، توزیع نا متقارن حرارتی در طول کریستال منجر به عدم تطبیق فازی و کاهش قابل ملاحظه بازده هارمونیک دوم خواهد شد. با مقایسه نتایج بدست آمده برای اثر توزیع حرارتی روی بازده هارمونیک دوم در کریستال های MgO:PPLT و MgO:PPLN در توان های فرودی بالا نتیجه شد که علی رغم وجود ضریب غیر خطی بالاتر MgO:PPLN، بازده کریستال MgO:PPLT بالاتر است.

کلید واژه : تولید هارمونیک دوم، شبه تطبیق فازی، پرتو گوسی، توزیع حرارتی

Investigation of thermal distribution effects on the efficiency of the second harmonic generation by continuous fiber laser at 1064 nm in the crystals of MgO: PPSLT and MgO: PPLN

Hamid Amrollahi, Atoosa Sadat Arabanian and Reza Massudi

Laser and Plasma Research Institute, Shahid Beheshti University, Tehran

In this paper, effects of thermal distribution on the efficiency of the second harmonic generation by a continuous laser with a wavelength of 1064 nm inside a MgO: PPLT crystal is investigated. The results of the numerical calculations show that for the incident power of above 30W the asymmetric thermal distribution along the crystal leads to the phase mismatch and significant reduction of the second harmonic efficiency. By comparing the obtained results for the distribution of temperature on the efficiency of the second harmonic inside the crystals of MgO: PPLT and MgO: PPLN for the high incident powers, it has been found that despite higher nonlinear coefficient of MgO: PPLN crystal, the efficiency of MgO: PPLT crystal is higher.

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

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

مقدمه

تولید لیزر سبز پیوسته با کیفیت باریکه فضایی بالا و توان بالا کاربرد های فراوانی در پزشکی [۱] ، دمش لیزر تیتانیم سفایر [۲] ، نوسانگر های پارامتریک نوری [۳] ، نمایشگر های لیزری [۴] و .... دارد. امروزه تولید لیزر سبز توسط لیزر های فیبری پیوسته با استفاده از تولید هارمونیک دوم در کریستال های فرو الکتریک شبه تطبیق فازی (QPM) به علت بازده بالاتر آنها نسبت به کریستال های دو شکستی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. در میان کریستال‌های شبه تطبیق فازی، کریستال MgO:PPLN به علت ضریب غیر خطی بالا $d_{eff} = 16pm/v$ و طول برهمکنش زیاد (۸۰ میلیمتر) ارجحیت دارند. اما این کریستال ها در محدوده طول موج مرئی آستانه آسیب پایینی دارند اگر چه آلایش MgO تا حدی باعث شده است که آستانه آسیب آنها افزایش پیدا کند [۵]. نمونه دیگر از کریستال های QPM مورد استفاده برای تولید نور سبز، کریستال MgO:PPLT است که ضریب غیر خطی آن کمتر و برابر d_{eff} =10pm/v بوده ولی هدایت گرمایی بسیار بالای آن موجب افزایش آستانه تخریب نسبت به کریستال MgO:PPLN می شود[۶]. بزرگترین مانع دستیابی به بازده بالا در این نوع کریستال ها، توزیع غیر یکنواخت حرارتی در طول کریستال است، که در توان های بالاتر اثر خود را نشان می دهد. این توزیع غیر متقارن در طول کریستال منجر به عدم تطبیق فازی امواج اصلی و هارمونیک دوم می شود. در این مقاله اثر توزیع حرارتی در طول کریستال بر بازده تولید هارمونیک دوم با استفاده از لیزر فیبری پیوسته ۱۰۶۴ نانومتر بررسی خواهد شد. همچنین مقایسه ای بین بازده تولید هارمونیک دوم در کریستال های MgO:PPLN و MgO:PPLT به ازای توان های فرودی مختلف و با درنظر گرفتن اثرات توزیع حرارتی انجام می‌شود.

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 m^{-1} ۱٫۵۷ و برای طول موج ۱۰۶۴ نانومتر برابر m^{-1} ۰٫۱۷ است[۷].

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[۷].

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

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

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

در معادله فوق پارامتر های C و K و h به ترتیب ضریب گرمایی ویژه، ضریب رسانش حرارتی، و ضریب همرفتی هستند. برای بدست آوردن بازده هارمونیک دوم، نسبت توان خروجی هارمونیک دوم به توان فرودی موج اصلی به صورت زیر محاسبه میشود[۸]:

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

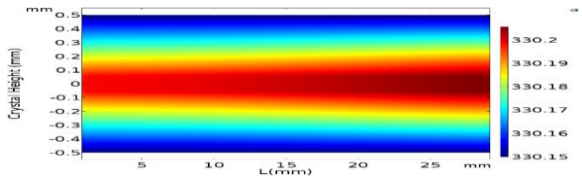
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

$$\eta = \frac{P_{2\omega}(L)}{P_{\omega}(0)} = \frac{8\pi^2 d_{eff}^2}{n_f^2 n_s c \varepsilon_0 \lambda_f^2}\left[\frac{P_{\omega}L^2}{A}\right]\sin c^2\left(\frac{\Delta K(T)L}{2}\right) \quad (۵)$$

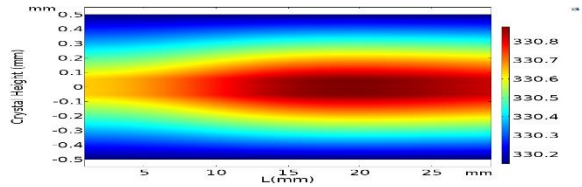
در رابطه فوق تابعیت دما برای مقدار عدم تطبیق فازی و درنتیجه بازده خروجی مشاهده می‌شود.

نتایج

برای بررسی اثر توزیع حرارتی ناشی از جذب باریکه های فرودی و تولیدی روی بازده تولید هارمونیک دوم، معادلات موج جفت شده (۱) و معادله حرارت (۴) به طور همزمان حل شدند. کمره ی پرتو در ورودی کریستال MgO:PPSLT برابر ۳۰ میکرون، و طول کریستال برابر با ۳۰ میلیمتر و تناوب شبکه کریستال $\Lambda = 8\mu m$ فرض شده است. همچنین دمای تطبیق فازی برابر با ۳۳۰,۱۵ کلوین می‌باشد[۷]. شکل (۱) a و b توزیع دما در طول کریستال را به ترتیب به ازای توان فرودی ۵ و ۵۰ وات نشان می‌دهد. همان طور که مشاهده می‌شود به ازای توان فرودی ۵ وات توزیع دما تقریبا یکنواخت بوده و اختلاف دمای بیشینه کریستال نسبت به دمای تطبیق فازی کمتر از ۰,۱ درجه می‌باشد، اما به ازای توان فرودی ۵۰ وات توزیع حرارتی در طول کریستال بسیار غیر یکنواخت شده و اختلاف دمای بیشینه کریستال و دمای تطبیق فازی ۰,۷ درجه را نشان میدهد. مهمترین علت غیر یکنواخت بودن توزیع حرارتی در توان های بالا، جذب هارمونیک دوم در کریستال است. در توان های فرودی بالا به علت اینکه تولید هارمونیک دوم بیشتر است، جذب کریستال نیز بیشتر می‌شود و عدم تطبیق فازی به علت اختلاف دمای زیاد نسبت به دمای تطبیق فازی افزایش میابد و میدان هارمونیک دوم در طول کریستال افت شدیدتری خواهد داشت. به همین علت غیر یکنواختی حرارتی در توان های بالا در طول کریستال محسوس تر است. در شکل (۲)، تغییرات دامنه میدان هارمونیک دوم برای توان فرودی ۵ وات در طول کریستال با و بدون در نظر گرفتن توزیع حرارتی نشان داده شده است. نقاط مربعی / دایروی دامنه میدان ها را بدون/ با در نظر گرفتن توزیع حرارتی نشان می دهند. همان طور که مشاهده می شود، در توان ۵ وات تفاوت قابل ملاحظه ای برای اندازه میدان خروجی هارمونیک دوم با و بدون در نظر گرفتن توزیع حرارتی وجود ندارد. شکل (۳) تغییرات اندازه دامنه هارمونیک دوم در طول کریستال را به ازای توان فرودی ۵۰ وات نشان می دهد. با توجه به شکل، در این حالت دامنه هارمونیک دوم با در نظر گرفتن توزیع حرارتی افت قابل توجهی نسبت به بدون در نظر گرفتن توزیع حرارتی پیدا کرده و بازده هارمونیک دوم از ۱۷ درصد به ۴ درصد کاهش پیدا کرده است.

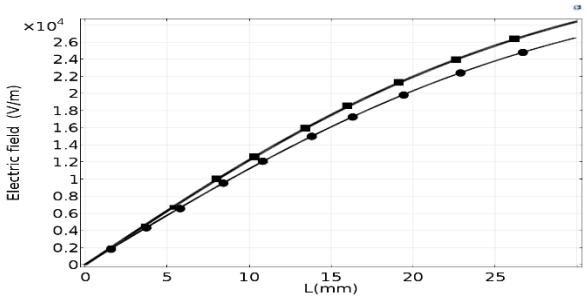


(a)



(b)

شکل ۱) توزیع حرارتی داخل کریستال MgO:PPSLT به ازای توان فرودی a) ۵ وات b) ۵۰ وات

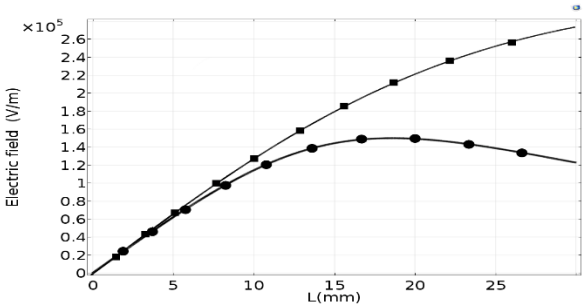


شکل ۲) تغییرات دامنه میدان هارمونیک دوم (نقاط مربعی) و با (نقاط دایروی) در نظر گرفتن اثرات حرارتی به ازای توان فرودی ۵ وات.

علت این پدیده افزایش عدم تطبیق فازی حاصل از تغییر ضریب شکست با تغییر دما می باشد. برای صفر شدن عدم تطبیق فازی (Δk) در معادله (۳) باید $\Lambda = \frac{2\pi}{\Delta k'}$ باشد که در آن $\Delta k' = 2k_1 - k_2$ است. به ازای تناوب شبکه ثابت در طول کریستال، تغییرات ضریب شکست در اثر تغییر دما باعث تغییر مقدار عدم تطبیق فازی Δk می‌شود. در مکان هایی با دمای بالاتر از دمای تطبیق فازی مقدار Δk افزایش پیدا کرده و این عدم تطبیق فازی موجب افت توان هارمونیک دوم تولیدی می‌شود.

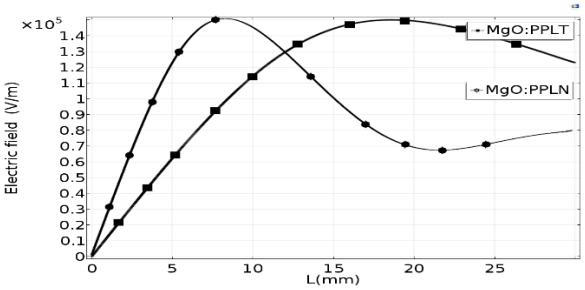
قابل دسترسی باشد www.opsi.ir این مقاله در صورتی دارای اعتبار است که در سایت

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]



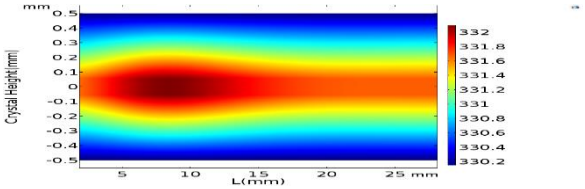
شکل ۳) تغییرات دامنه میدان بدون (نقاط مربعی) و با (نقاط دایروی) در نظر گرفتن اثرات حرارتی به ازای توان فرودی ۵۰ وات.

شکل (۴) مقایسه ای بین دامنه میدان خروجی هارمونیک دوم در کریستال های MgO:PPLT و MgO:PPLN برای توان ورودی ۵۰ وات نشان می‌دهد. همان طور که از شکل نتیجه می‌شود با وجود بالاتر بودن ضریب غیر خطی کریستال MgO:PPLN و رشد سریع تر میدان تولیدی هارمونیک دوم، اندازه دامنه میدان خروجی کریستال MgO:PPLT به ازای طول های کریستال بزرگتر از ۱۲ میلی متر بیشتر است. کاهش دامنه میدان خروجی در کریستال MgO:PPLN بدلیل رسانندگی گرمایی پایین و نتیجتا توزیع حرارتی بسیار نا متقارن آن است. البته برای توان‌های پایین استفاده از کریستال های PPLN به صرفه تر است زیرا تاثیرات گرمایی نا چیز بوده و کاهش بازده قابل توجه نمی‌باشد. در شکل (۵) توزیع حرارتی برای کریستال MgO:PPLN به ازای توان فرودی ۵۰ وات نشان داده شده است.



شکل ۴) تغییرات دامنه میدان در طول کریستال MgO:PPSLT (مربعی) MgO:PPLN (دایروی) به ازای توان فرودی ۵۰ وات.

تفاوت بیشینه دما ایجاد شده نسبت به دمای تطبیق فازی در کریستال حدود ۲ درجه می‌باشد، در حالی که برای کریستال MgO:PPLT این اختلاف حدود ۰,۷ درجه است. این توزیع حرارتی بسیار نامتقارن در کریستال MgO:PPLN موجب کاهش شدیدتر میدان خروجی شده است.



شکل ۵) توزیع حرارتی داخل کریستال MgO:PPLN به ازای توان فرودی ۵۰ وات

جمع بندی

در این مقاله با حل همزمان معادلات انتشار میدان اصلی و هارمونیک دوم و معادله حرارت به بررسی میزان اثرگذاری توزیع حرارتی کریستال روی دامنه میدان هارمونیک دوم تولیدی به ازای توان های فرودی مختلف پرداخته شد. همچنین با مقایسه ی بین بازده کریستال MgO:PPLT و MgO:PPLN نتیجه شد که به ازای توان های فرودی بالا، کریستال های MgO:PPLT به علت رسانندگی بیشتر، بازده بالاتری نسبت به کریستال های MgO:PPLN نشان می‌دهند.

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. *Dermatologic surgery*, 2002, 28.1: 21-25.

[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,” *Appl. Opt.*, vol. 51, no. 1, pp. 15–20, Jan. 2012.

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

[4] X. Chang-Qing, “Periodically poled optical nonlinear crystals for laser display applications,” in *Proc. Opt. Fiber Commun. Optoelectr. Expo. Conf.*, Oct. 2008, pp. 1–3.

[5] T. Volk, N. Rubinina, and M. W¨ohlecke, “Optical-damage resistant impurities in lithium niobate,” *J. Opt. Soc. Amer. B*, vol. 11, no. 9, pp. 1681– 1687, Sep. 1994.

[6] N. E. Yu, S. Kurimura, Y. Nomura, and K. Kitamura, “Stable high-power green light generation with thermally conductive periodically poled stoichiometric lithium tantalate,” *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 43, pp. L1265– L1267, Sep. 2004.

[7] Louchev, Oleg A., et al. "Thermal inhibition of high-power second-harmonic generation in periodically poled Li Nb O 3 and Li Ta O 3 crystals." *Applied Physics Letters* 87.13 (2005): 131101.

[8] FEJER, Martin M., et al. Quasi-phase-matched second harmonic generation: tuning and tolerances. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1992, 28.11: 2631-2654.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]