بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه ۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

طراحی و ساخت نگهدارنده کریستال KTP لیزر هماهنگ دوم Nd:Yag با استفاده از نتایج شبیه‌سازی توزیع حرارت در آن

سید عباس میرنظامی، مریم ابریشمی و مجتبی مصلحیان

مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران، تهران

چکیده – در این مقاله توزیع حرارت در کریستال KTP لیزر هماهنگ دوم Nd:Yag، با استفاده از روشهای عددی شبیه سازی شده است. محاسبات برای لیزر سبز ساخته شده در مرکز ملی لیزر ایران که دارای سیستم نوسانگر- تقویت کننده Q-switch شده است انجام شده است. در این لیزر توان متوسط ۱۰۰ وات در طول موج ۱۰۶۴ nm بر کریستال KTP وارد شده و پرتوی لیزر در طول موج 532 nm با توان متوسط ۵۰ وات از آن خارج می شود. سپس نتایج حاصل از شبیه سازی در طراحی و ساخت نگهدارنده‌ای که بتواند دمای کریستال را به نحوی کنترل نماید که بیشترین تطبیق فازی را داشته باشد، مورد استفاده قرار گرفته است.

کلید واژه- تطبیق فازی، توزیع حرارت، کریستال KTP، لیزر سبز، نگهدارنده کریستال

Design and Manufacturing of KTP Crystal Mount of Second harmonic Nd:Yag Laser by Using of its Thermal Distribution Simulation Results

Seyed Abbas Mirnezami, Maryam Abrishami, Mojtaba Moslehian

Iranian National Center for Laser Science and Technology

Abstract- In this paper, first the thermal distribution in KTP crystal used in second harmonic Nd:Yag laser, was simulated with numerical methods. Simulations were carried out for the Q-switched oscillator amplifier green laser constructed in INLC. The KTP crystal in this laser is fed with 1064 nm laser beam with average power of 100W and converts it to 532 nm laser beam with average power of 50W. These results were utilized in design and construction of a mount which is able to control the crystal temperature to keep it in the maximum phase matching state.

Keywords: Phase-matching, Thermal distribution, KTP Crystal, Green Laser, Crystal mounts

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۱- مقدمه

در سالهای اخیر لیزرهای پرتوان سبز حالت جامد با پمپاژ دیودی، به خاطر راندمان بالا، کیفیت بالای پرتو و ... کاربردهای فراوانی در بخشهای مختلف علوم و تکنولوژی یافته‌اند [۱و۲]. یکی از کاربردهای عمده این لیزرها در پزشکی بوده و از این لیزرها می توان در بخشهای مختلف پزشکی مخصوصاً جراحی‌های اورولوژی استفاده نمود [۳]. استفاده از سیستم لیزر Nd:YAG با فرکانس دوگانه درون کاواکی یا بیرون کاواکی، بهترین راه برای رسیدن به چشمه لیزر سبز با طول موج ۵۳۲ nm است. کریستالهای غیرخطی که عمدتاً بدین منظور استفاده می شوند، شامل کریستال پتاسیوم تیتانیل فسفات (KTP) یا لیتیوم تری بورات (LBO) هستند. در سالهای اخیر تلاشهای فراوانی برای رسیدن به لیزرهای سبز با توانهای بالای ۱۰۰ وات شده است. چنج و همکاران، لیزرهای سبز حالت جامد با پمپاژ دیودی که میانگین توان خروجی آنها ۳۱۵ وات و ۱۷۰ وات بوده و در آنها از کریستال‌های LBO و KTP استفاده شده است، ساخته‌اند [۴و۵]. هر یک از این کریستالها دارای مزایا و معایب مشخصی هستند. ضریب غیرخطی برای تطبیق فازی بحرانی (نوع دوم) در کریستال KTP سه برابر بزرگتر از تطبیق فازی غیر بحرانی (نوع اول) در کریستال LBO است، اما آستانه تخریب کریستال LBO بطور قابل ملاحظه‌ای بیشتر از کریستال KTP است. علاوه بر این در توانهای بالا، اثرات حرارتی در کریستالهای غیر خطی که در اثر جذب توان لیزر پدید می‌آید، باعث کاهش بازده آنها خواهد شد. لذا تعیین مشخصات حرارتی و تاثیر حرارت بر روی این کریستالها لازم است [۶و۷]. از پارامترهای مهم هر کریستال می توان به ترتیب به پهنای باند دمای کاری کریستال، رسانش حرارتی و ضریب جذب برای طول موج اولیه و هارمونیک دوم اشاره نمود. در جدول (۱) خواص حرارتی این دو مدل کریستال، نشان داده شده است. برای لیزرهای پرتوان، استفاده از کریستال KTP با توجه به پهنای باند بالای دمای کاری کریستال، نسبت به LBO حتی با داشتن رسانش حرارتی بیشتر و ضریب جذب کمتر، مناسب‌تر بنظر می رسد. لذا در سیستم ساخته شده موجود، از لیزر Nd:YAG با پمپاژ دیودی و طول موج خروجی ۱۰۶۴ nm و کریستال KTP در فرآیند تطبیق فازی بحرانی (نوع دوم) استفاده شده است. در فرآیند تطبیق فازی نوع دوم بحرانی، افزایش بازده به دقت دما وابسته است، کنترل دمای کریستال KTP، بسیار دشوار بوده و با تنظیم دمای کریستال در توانهای مختلف، می‌توان بازده بالا را حفظ نمود. لذا بررسی اثرات حرارتی و شبیه سازی توزیع حرارت در این کریستال، به منظور پیش بینی عملکرد آن و ایجاد راهکاری مناسب برای کنترل دمای کاری مطلوب آن، امری ضروری است. بدین منظور برای کریستال KTP، نگهدارنده مسی که همزمان قابلیت خنک سازی و گرم شدن کریستال را داشته و دمای آن را در ۸۰ درجه سانتیگراد با دقت ۰/۱ ± درجه سانتیگراد حفظ می نماید، طراحی و ساخته شده است. با توجه به چگالی توان بالا، دمای درون کریستال به صورت قابل ملاحظه‌ای افزایش یافته و توزیع دما در سطح مقطع عرضی کریستال KTP افزایش می‌یابد. از شبیه سازی انجام شده در این تحقیق می توان جهت کنترل کردن پارامترهای خنک سازی و گرم شدن نگهدارنده کریستال به منظور پایا نمودن توان خروجی از آن استفاده نمود.

۲- تئوری

بازده تبدیل فرآیندهای غیر خطی فرکانس دوگانه، وابسته به پارامتر تطبیق فازی است که این پارامتر توسط عدم تطبیق بردار موجی، به صورت معادله (۱)، تعریف می‌شود:

$$\Delta k = 2k_1 - k_2 \qquad (۱)$$

که k_1 و k_2 به ترتیب بردارهای موج پایه و هارمونیک دوم هستند. بیشترین بازده تبدیل در حالتی رخ می دهد که عدم تطبیق بردار موجی (Δk) صفر شود. تطبیق فازی می‌تواند از طریق انتخاب زاویه برش مناسب برای کریستال غیرخطی یا بوسیله تنظیم دمای کریستال بدست آید.

کریستال غیر خطی مطابق شکل (۱) با قطر $2r_0$ و طول L در تماس حرارتی با جاذب حرارتی در دمای T_0 قرار دارد. انتقال حرارت از کریستال به جاذب حرارتی توسط نواری از جنس ایندیوم بوده و بنابراین دمای کریستال در سطح، ثابت نگه داشته می‌شود. بر روی وجه انتهایی کریستال پرتو لیزری با قطر 2w اعمال می‌شود، که در جهت طولی به کریستال منتقل می‌شود. واگرایی پرتوی لیزر در این تحقیق، بدلیل اینکه برای تولید هارمونیک

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

دوم در لیزرهای Q-Switch شده با توان میانگین بالا، اغلب پرتوهای موازی شده استفاده می شوند، در نظر گرفته نمی‌شود.

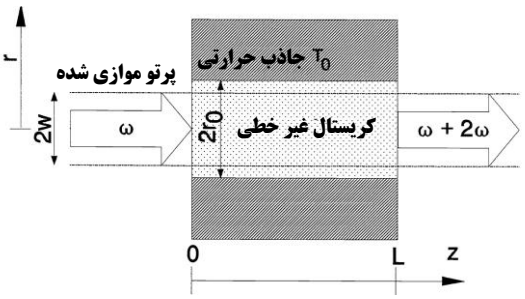
جدول (۱): خواص حرارتی بلورهای KTP و LBO [۶]

پارامتر	KTP	LBO
پهنای باند دمایی $(\Delta T.l)_{fwhm}$ [K.cm]	۲۵	۴/۲
رسانش حرارتی κ $[W.K^{-1}.cm^{-1}]$ متوسط در جهت های مختلف کریستال	۰/۰۱۳	۰/۰۳۵
ضریب جذب در ۱۰۶۴ nm α_{ω} $[\%cm^{-1}]$	۰/۱-۰/۲	۰/۰۰۵-۰/۰۲
ضریب جذب در ۵۳۲ nm $\alpha_{2\omega}$ $[\%cm^{-1}]$	۱/۰-۲/۰	۰/۰۵-۰/۱۵

مختصات z در امتداد جهت انتشار باریکه لیزر و مختصات r عمود بر آن تعریف شده است. به علت جذب توان لیزر، کریستال غیرخطی مطابق رابطه مکانی چگالی حرارتی زیر گرم می شود:

$$h(r,z) = f \int_{pulse} (\alpha_{\omega} I_{\omega}(r,z,t) + \alpha_{2\omega} I_{2\omega}(r,z,t))dt \qquad (۲)$$

که در آن f نرخ تکرار لیزر، $I_{\omega}(r,z,t)$ و $I_{2\omega}(r,z,t)$ به ترتیب شدتهای وابسته مکانی و زمانی موج پایه و هارمونیک دوم هستند. α_{ω} و $\alpha_{2\omega}$ نیز به ترتیب ضرایب جذب امواج پایه و هارمونیک دوم هستند.



شکل(۱): موقعیت کریستال غیر خطی و پرتوهای ورودی و خروجی از آن.

معمولا کریستالهای غیر خطی دارای مقطع عرضی مربعی بوده و تقارن استوانه‌ای ندارند. اما قطر پرتو لیزر معمولاً کوچکتر از ابعاد کریستال است و نور لیزر بصورت مقطع دایره‌ای شکل به آن وارد می شود. بنابراین توزیع دما در کریستال دارای تقارن دورانی است. توزیع دما در کریستال را می‌توان از معادله انتقال حرارت به صورت زیر محاسبه نمود:

$$\Delta T(r,z) = \frac{-h(r,z)}{\kappa} \qquad (۳)$$

که در آن $T(r,z)$ دما، $h(r,z)$ چگالی حرارتی و κ رسانش حرارتی هستند. زمانیکه چگالی حرارتی $h_0(z)$ با قطر ۲w روی مقطع عرضی کریستال در جهت شعاعی ثابت فرض شده و شارش حرارتی در جهت طولی در نظر گرفته نشود، حل تحلیلی معادله (۳) به صورت زیر بدست می‌آید:

$$T(r,z) - T_0 = \begin{cases} \frac{h_0(z)}{4\kappa}(w^2 - r^2) - \frac{h_0(z)w^2}{2\kappa} Ln\left(\frac{w}{r_0}\right) & r \prec w \\ \frac{-h_0(z)w^2}{2\kappa} Ln\left(\frac{r}{r_0}\right) & r \geq w \end{cases} \qquad (۴)$$

جهت اندازه گیری میزان تاثیر توزیع دما بر بازده تبدیل، عدم تطبیق بردار موج Δk به صورت تابعی از دمای T و تنش مکانیکی σ مطابق سری‌هایی به شکل معادله زیر تعریف می شود:

$$\Delta k = \left|\frac{\partial \Delta k}{\partial T}\right| \Delta T + \left|\frac{\partial \Delta k}{\partial \sigma}\right| \Delta\sigma + \cdots \qquad (۵)$$

عبارت اول در معادله (۵)، عدم تطبیق فازی ناشی از تغییر ضریب شکست با دما را تشریح می‌کند. عبارت دوم به طور غیر مستقیم از طریق دما ناشی می‌شود که در کریستال KTP، تنش ناشی از عدم تطبیق فازی کوچک بوده و در مقایسه با بخش اول قابل صرفنظر کردن است [۶]. تغییر عدم تطابق بردار موج با دما می‌تواند به راحتی از طریق بازده تبدیل سیگنال کوچک نرمالیزه‌شده به دما مرتبط شود.

پهنای منحنی (FWHM) از معادله غیر جبری پیروی می‌کند و به صورت رابطه زیر بیان می‌شود[۶]:

$$(\Delta k.l)_{fwhm} \approx 5.56 \qquad (۶)$$

عدم تطابق بردار موج بر اساس میزان پذیرش دمای بلور $(\Delta T.l)_{fwhm}$ به صورت زیر بیان می‌شود:

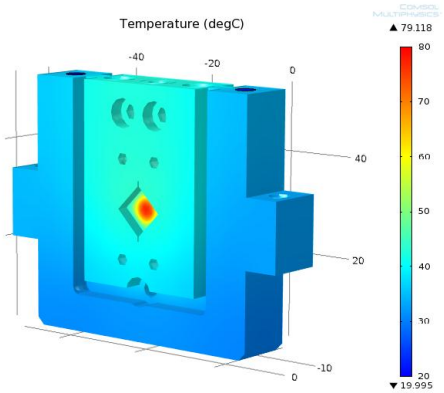
$$\Delta k = 5.56 \frac{\Delta T}{(\Delta T.l)_{fwhm}} \qquad (۷)$$

معادله (۷) رابطه عدم تطابق بردار موج (Δk) با دمای ΔT داده شده در معادله (۴) را بیان می‌کند. با توجه به مقدار پذیرش دما در جدول (۱) و مقدار چگالی حرارتی(ΔT) بدست آمده بلور KTP از شبیه‌سازی، میتوان میزان عدم تطبیق فازی (Δk) بلور را بدست آورد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]

۳- طراحی نگهدارنده کریستال و شبیه سازی حرارتی آن

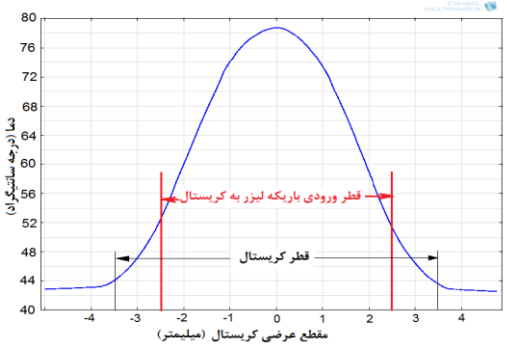
در سیستم لیزر پزشکی ساخته شده در مرکز ملی علوم و فنون لیزر ایران از کریستال KTP با ابعاد ۷×۷×۷ میلیمتر استفاده شده است. به منظور کنترل دمای این کریستال، نگهدارنده‌ای از جنس مس که قابلیت همزمان خنک سازی و گرم نمودن فضای جانبی کریستال را دارد، ساخته شده است. با توجه به اینکه کلیه قطعات استفاده شده در این لیزر در محفظه‌ای قرار می‌گیرند که باید با فضای بیرون محفظه در تماس نباشند، نمی‌توان از سیستمهای خنک سازی همرفتی با هوا استفاده نمود و از یکی از انشعابات آب چیلر که به دستگاه وارد می‌شود، جهت خنک سازی این نگهدارنده استفاده شده است. جهت گرم کردن این نگهدارنده نیز تعدادی المنت برقی بکار برده شده است. دمای فلز مجاور کریستال نیز توسط یک سنسور حرارتی و یک کنترل کننده الکترونیکی دما، با دقت ±۰/۱ درجه سانتیگراد از طریق کنترل جریان المنتها کنترل می شود. با توجه به اینکه دمای مطلوب کارکرد این کریستال حدود ۸۰ درجه سانتیگراد است، با استفاده از این شبیه‌سازی و تکرار نتایج آن می‌توان به پارامترهای بهینه کنترل دمای آن که شامل میزان دبی آب ورودی و توان اعمال شده حرارتی ناشی از المنتهای برقی است، جهت رسیدن به دمای مطلوب استفاده نمود.



شکل(۲): توزیع حرارت در کریستال و نگهدارنده آن.

پس از تکرار و بهینه سازی پارامترهای مربوط به کنترل دما، مقادیری که در شبیه‌سازی نهایی استفاده شده‌اند عبارتند از: توان لیزر ورودی: ۱۰۰ وات، توان حرارتی جذب شده در کریستال: ۵۰ وات، قطر باریکه ورودی به کریستال ۵ میلیمتر، دبی جریان ورودی آب: ۰/۰۱۳ kg/s، مجموع توان المنتهای برقی اعمال شده بر سطوح نگهدارنده: ۱۰۰ وات، دمای ورودی آب: ۲۰ درجه سانتیگراد و دمای محیط: ۲۵ درجه سانتیگراد.

نتایج شبیه سازی سه بعدی نگهدارنده کریستال که توسط نرم افزار Comsol® 4.2 انجام شده، در شکل (۲) نشان داده شده است. در شکل (۳) نیز توزیع دمای مقطع عرضی کریستال مشاهده می شود.



شکل(۳): توزیع دمای مقطع عرضی کریستال.

همانطور که مشاهده می شود اختلاف دمای مرکز و لبه کریستال در این حالت حدود ۳۴ درجه سانتیگراد بوده که مقدار عدم تطبیق فاز، برابر ۷/۵۶ خواهد بود و در این وضعیت لیزر، بیشترین توان خروجی را دارد.

۴- نتیجه‌گیری

توزیع حرارت برای کریستال غیرخطی و نگهدارنده آن که در لیزر پزشکی سبز ساخته شده در مرکز ملی لیزر ایران استفاده شده است، محاسبه گردید. با تنظیم پارامترهای کنترل کننده دمای نگهدارنده کریستال، وضعیت بهینه برای دمای کارکرد کریستال KTP محاسبه شد و میزان اختلاف دما و عدم تطبیق فازی کریستال در حالتی که لیزر بیشترین بازده خروجی را داشته باشد، بدست آمد.

مراجع

[1] Sarady I., Phillipps G., Seidel S and Bostanjoglo G., *Frequency Doubled Nd:YAG-laser With High Average Power in Processing of Ceramics*, Metals and Composites, ICALEO 95, Sandiego, Nov.13-16, 1995

[2] Golden G., *Green Laser Score Good Marks in Semiconductor Material Processing*, pp.75-83, Laser Focus World, June 1990

[3] Heinrich E., Schiefelbein F., Schoen G., *Technique and Short-term Outcome of Green Light (Ktp 80W) Vaporization of the Prostate*, pp.1632-1637,2007

[4] Chang J., Dragon E. and bass I., *Postdeadline paper CPD2 presented at CLEO'98,* San Francisco CA, May.3-8

[5] Chang J., Dragon E., Ebbers C., Bass I., Cochran C., *Advanced Solid-State Laser*, ed Bosenberg W A and Fejer M M OSA Trends in Optics Photonics Series, Vol 19 postdeadline paper PDP-1, Washing-ton, DC

[6] Seidel S., Mann G., *Numerical Modeling of Thermal Effects in Nonlinear Crystals for High Average Power Second Harmonic Generation*, SPIE Vol. 2989

[7] Yao J., YU Y., Chen J., Zhang F., Wang P., Wang T., Zhang B., *Thermal Effect in Ktp Crystals During High Power Laser Operation*, China Physics Letters, Vol.18, No.10, 2001

[Downloaded from www.opsi.ir on 2026-11-05]