بیست و ششمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و دوازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه خوارزمی،
تهران، ایران.
۱۶-۱۵ بهمن ۱۳۹۸

کاهش استرس حرارتی کریستال لیزری نئودیمیوم یاگ پمپ شده از انتها با تنظیم موقعیت کریستال در نگهدارنده

عارف ایمانی، سمیه نجفی و رضا مسعودی*

پژوهشکده لیزر و پلاسما دانشگاه شهید بهشتی (r-massudi@sbu.ac.ir)

چکیده – در این مقاله با مطالعه حرارتی کریستال لیزری نئودیمیوم-یاگ پمپ شده از انتها، استرس ناشی از گرادیان حرارتی با هدف کاهش آن بررسی می شود. نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد که موقعیت کریستال درون نگهدارنده آن، تاثیر مهمی بر بیشینه استرس القایی دارد. بر این اساس موقعیت بهینه کریستال در نگهدارنده برای کمترین استرس القا شده برای اولین بار معرفی و نشان داده می‌شود که در وضعیت ۴۰۰ میکرون بیرون از نگهدارنده، استرس القایی به کمترین مقدار می‌رسد و این موقعیت از توان لیزر پمپ شده مستقل می‌باشد. همچنین ثابت می شود که قرارگیری در موقعیت بهینه برای کریستال لیزری دارای چمفر از اهمیت بیشتری برخوردار است.

کلید واژه- استرس حرارتی، پمپ از انتها، کریستال نئودیمیوم یاگ، لیزرهای حالت جامد

Thermal stress reduction of end-pumped Nd: YAG laser crystal by adjusting the crystal position in the holder

Aref Imani , Somayeh Najafi, Reza Massudi*

Laser and Plasma research institute, shahid beheshti university (r-massudi@sbu.ac.ir)

Abstract- In this paper, the stress induced by the thermal gradient in the end-pumped Nd: YAG laser crystal is investigated to reduce the stress. Our simulation results show that the position of the crystal inside its holder has a significant impact on the maximum induced stress. Accordingly, the optimum position of the crystal in the holder is first introduced and, it is shown, induction stress reaches the lowest value at 400 microns outside the holder that this position is independent of the pump laser power. It is also proven that optimum positioning is more important for chamfered laser crystals.

Keywords: End-pumped, Nd:YAG crystal , Solid state lasers, Thermal stress

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-06-11]

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

مقدمه

افزایش توان متوسط لیزرهای حالت جامد پمپ شده دیودی از انتها، یکی از حوزه های تحقیقاتی بسیار فعال می باشد[۱و۶]. عامل اصلی محدود کننده افزایش توان این لیزرها، حرارت ایجاد شده در کریستال لیزری بواسطه جذب نور پمپ می‌باشد، که سبب گرادیان دمایی و در نتیجه، القای استرس حرارتی در کریستال شده و منجر به شکست کریستال می‌شود[۲]. از این‌رو می‌بایست توان لیزر پمپ طوری تنظیم شود که استرس حرارتی القا شده از حد شکست مربوط به کریستال کمتر باشد. بنابراین کاهش استرس حرارتی یک چالش جدی برای محققان و مهندسان لیزری است. در این مقاله با مطالعه حرارتی کریستال لیزری و استرس القا شده در آن، روشی برای کاهش استرس ارائه می‌شود. مطالعات ما نشان می دهد مکان کریستال درون نگهدارنده سرد شده، تاثیر مهمی در استرس حرارتی القا شده دارد و با بررسی طرح استرس القا شده، مکان بهینه برای کریستال لیزری معرفی می شود. در این مطالعه اثر چمفر کریستال بر استرس القا شده نیز بررسی می گردد.

تئوری و معادلات حاکم

مقدار گرمای ایجاد شده توسط باریکه پمپ جذب شده در کریستال با پارامتر بارگذاری حرارتی کسری[۱] (η_h) به صورت زیر بیان می شود.

$$\eta_h = 1 - \eta_Q\,\eta_s \qquad (۱)$$

که η_s، فاکتور استوکس و η_Q، بازده کوانتومی می‌باشد[۳]. پارامتر بارگذاری حرارتی کسری ناشی از دمش برای کریستال نئودیمیوم یاگ، برابر ۰/۳۲ محاسبه می شود. با در نظر گرفتن فاکتور η_h و پروفایل باریکه پمپ، توزیع حرارت ایجاد شده ناشی از جذب باریکه لیزری پمپ در واحد حجم با Q(x,y,z) داده می‌شود. با توجه به اینکه سطح کریستال لیزری با ضریب انتقال حرارت k(T) سرد می‌شود، توزیع دمایی کریستال T(x,y,z)، توسط معادله ۲ بدست می‌آید[۴] .

$$\rho c_p \frac{\partial T(x.y.z)}{\partial t} = \nabla \cdot [\mathrm{k(T)} \cdot \nabla \mathrm{T(x.y.z)}] + \mathrm{Q(x.y.z)} \qquad (۲)$$

که ρ چگالی و c_p گرمای ویژه در فشار ثابت هستند. گرادیان دمایی در ناحیه داغ سبب ایجاد جابجایی و استرس در ماده می‌شود که استرس ناشی از بردار جابجایی به واسطه تغییرات دما در ماده به صورت معادله تانسوری ۳ داده می‌شود[۵].

$$\begin{bmatrix}\sigma_x\\ \sigma_y\\ \sigma_z\\ \tau_{xy}\\ \tau_{yz}\\ \tau_{xz}\end{bmatrix} = D\left(\begin{bmatrix}\varepsilon_x\\ \varepsilon_y\\ \varepsilon_z\\ \gamma_{xy}\\ \gamma_{yz}\\ \gamma_{xz}\end{bmatrix} - \alpha\begin{bmatrix}T-T_{ref}\\ T-T_{ref}\\ T-T_{ref}\\ 0\\ 0\\ 0\end{bmatrix}\right) \qquad (۳)$$

که σ_i ها و τ_{ij} ها مولفه‌های تانسور استرس، ε_i ها و γ_{ij} ها مولفه‌های تانسور کشیدگی[۲]، α ضریب انبساط حرارتی و T دمای لحظه‌ای می باشد. همچنین D ماتریسی ۶*۶ است که شامل پارامترهای مکانیکی سیستم مانند مدول یانگ و نسبت پواسون می‌باشد. بر این اساس برای کریستال لیزری Nd:YAG پمپ شده با لیزر دیود در طول موج ۸۰۸ نانومتر و با مشخصات ارائه شده در جدول ۱، شبیه سازی حرارتی و استرس انجام شده و توزیع دمایی و استرس القا شده برای حالت‌های متفاوت محاسبه شده است.

جدول ۱: مشخصات نئودیمیوم یاگ مفروض برای شبیه‌سازی

پارامتر	مقدار
Young's modulus	3.1×10^9 g/cm^2
Poisson's ratio	0.25
Specific heat	0.59 J/g · °C
Heat transfer coefficient	6.9×10^{-3} (W/cm^2 · °C)
Thermal conductivity	14 W/m K
Absorption coefficient	3.58 cm^{-1}

نتایج و بحث

در این شبیه سازی، کریستال لیزری Nd:YAG میله ای به قطر ۳ و طول ۱۱ میلی متر، درون هولدر مسی در نظر گرفته شده است که خنک‌سازی توسط آب ۱۸ درجه جاری در یک لوله آب تعبیه شده درون نگهدارنده، انجام می‌شود. این کریستال توسط

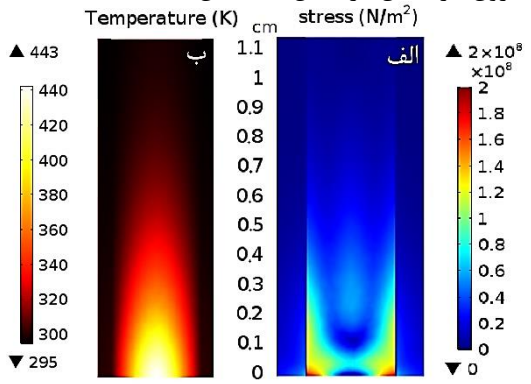
[۱] Fractional Thermal Loading

[۲] Strain Tensor

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

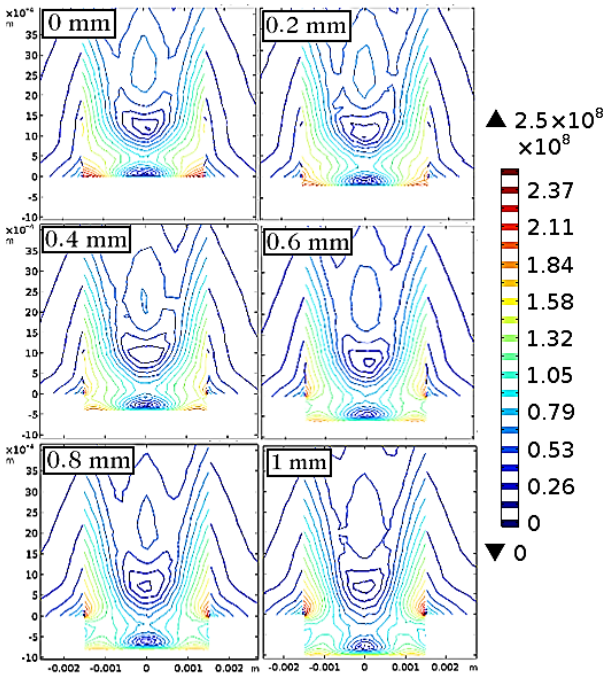
[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-06-11]

لیزر ۱۵۰ وات و شعاع ۶۰۰ میکرون با پروفایل گاوسی روی سطح کریستال پمپ می شود. پروفایل حرارتی و استرس ایجاد شده درون کریستال در شکل ۱ نمایش داده شده است.



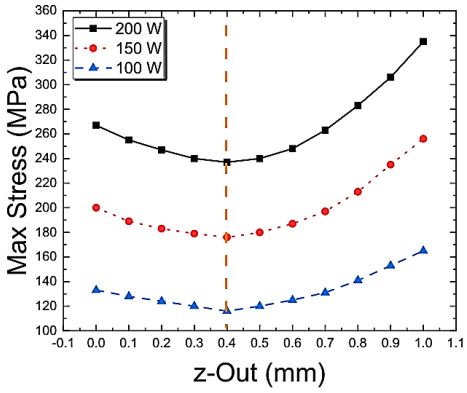
شکل ۱: الف - پروفایل استرس و ب- پروفایل دما برای پمپ ۱۵۰ وات

در شکل ۱- ب توزیع دمای کریستال پمپ شده نشان داده شده است. در این شرایط قله دما در سطح کریستال بوده و به مقدار ۴۴۳ کلوین می‌باشد. همانطور که گفته شد، گرادیان دمایی سبب جابجایی و استرس در ماده شده که پروفایل آن در شکل ۱- الف مشاهده می‌شود. جابجایی به سمت خارج ماده در ناحیه پمپ شده منجر به ایجاد موج تنش رو به خارج می شود. از طرف دیگر، نگهدارنده کریستال که با آب خنک می شود، مانع از جابجایی بیشتر ماده شده و نیرویی به سمت داخل وارد می‌کند. بدین ترتیب همانطور که در شکل مشاهده می‌شود، بیشترین مقدار استرس در لبه کریستال است که ۲۰۰ مگاپاسکال می باشد. از آنجا که بیشینه جذب باریکه پمپ در جلوی کریستال بوده، بیشترین استرس مربوط به سطح کریستال می‌باشد. به همین دلیل با بیرون قرار دادن لبه کریستال از صفر تا ۱ میلی متر خارج از نگهدارنده آن، تاثیر مکان قرارگیری کریستال بر استرس حرارتی القا شده برای سه توان پمپ، مورد بررسی قرار گرفته شد. شکل ۲ استرس القایی در صفحه عبوری از مرکز کریستال را برای موقعیت‌های مختلف کریستال نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با فاصله گرفتن لبه کریستال از نگهدارنده آن، استرس روی سطح کم شده و در مقابل، استرس نقطه تماس کریستال با لبه نگهدارنده به تدریج بیشتر می‌شود. در فاصله ۴۰۰ میکرونی، بیشینه استرس به مقدار کمینه ۱۶۷ مگاپاسکال می‌رسد. با گذر از این موقعیت و فاصله گرفتن بیشتر لبه کریستال، استرس در نقطه تماس کریستال و لبه نگهدارنده به تدریج از استرس سطح بیشتر شده تا آنجا که در فاصله ۱میلی‌متری استرس بیشینه به مقدار ۲۵۰ مگاپاسکال افزیش پیدا می‌کند. مقادیر عددی استرس بیشینه برحسب فواصل صفر تا ۱ میلی‌متری لبه کریستال از



شکل ۲: پروفایل استرس در حالت‌های ۰، ۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸ و ۱ میلی‌متر، کریستال خارج از هولدر در توان ۱۵۰ وات

نگهدارنده آن، برای سه توان پمپ ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ وات در شکل ۳ نشان داده شده است. همانطور که در بخش قبل توضیح داده شد با بیرون آوردن لبه کریستال از نگهدارنده آن، بیشینه استرس القایی کاهش می‌یابد، تا اینکه در فاصله ۴۰۰ میکرونی، به کمینه مقدار خود می‌رسد و سپس رشد مقدار بیشینه استرس برای فواصل بیشتر مشاهده می شود. نکته جالب توجه آنست که برای پمپ با توان های ۱۰۰ وات و ۲۰۰ وات نیز مناسب‌ترین مکان برای قرارگیری کریستال، همان فاصله ۴۰۰ میکرونی است و موقعیت بهینه مستقل از توان پمپ می‌باشد. نکته دیگر آن که شیب تغییرات بیشینه استرس در مجاورت موقعیت ۴۰۰ میکرونی کم می‌باشد و این نکته در عمل بسیار مفید است.

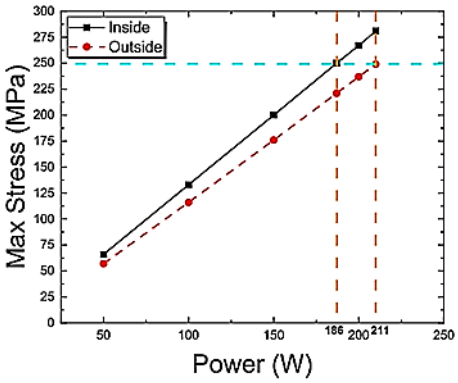


این مقاله درصورتی دارای اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-06-11]

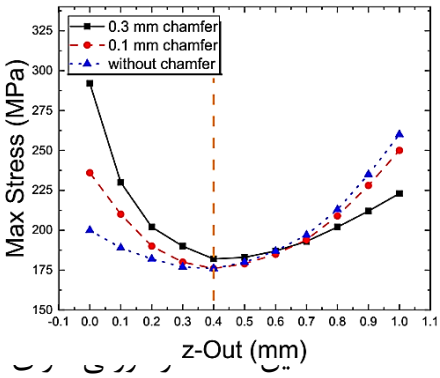
شکل ۳: نمودار بیشینه استرس بر حسب مکان قرار گیری کریستال برای سه توان ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ وات

در مطالعه‌ای دیگر، بیشینه استرس القایی بر حسب توان لیزر پمپ برای دو حالت کریستال کاملا درون نگهدارنده، و حالت بهینه ۴۰۰ میکرون خارج از نگهدارنده، محاسبه و نتایج آن در شکل ۴ ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد شیب افزایش بیشینه استرس با افزایش توان پمپ، هنگامی که کریستال درون نگهدارنده قرار دارد، بیشتر از موقعیت بهینه کریستال (۴۰۰میکرون خارج از لبه نگهدارنده) می‌باشد. از این‌رو قراردادن کریستال در موقعیت بهینه معرفی شده برای توان‌های بالاتر الزامی‌تر است. با توجه به نمودار شکل ۴ می‌توان دریافت که اختلاف استرس ایجاد شده بدلیل قرار دادن کریستال در موقعیت بهینه، باعث می‌شود که بتوان توان فرودی را به اندازه ۲۵ وات برای شرایط مورد مطالعه افزایش داد.



شکل ۴: بیشینه استرس بر حسب توان برای دو حالت کریستال داخل و ۰/۴ میلی‌متر بیرون هولدر

در ادامه، این مطالعه برای کریستال های دارای چمفر نیز انجام شد. چمفر برش موربی است که روی لبه کریستال برای افزایش مقاومت آن داده می شود. همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، موقعیت بهینه معرفی شده برای کریستال های معمول و کریستال‌های چمفر زده شده، مستقل از مقدار چمفر می‌باشد.



شکل۵: بیشینه استرس بر حسب مکان کریستال برای سه حالت بدون چمفر و دارای چمفر ۱۰۰ و ۳۰۰

نکته دیگر این که، کریستال چمفر زده با الزام بیشتری باید خارج از نگهدارنده و در موقعیت بهینه قرار گیرد، زیرا استرس بیشینه برای کریستال دارای چمفر که کاملا درون نگهدارنده قرار گرفته بسیار بیشتر از کریستال بدون چمفر می‌باشد.

نتیجه‌گیری

نتایج شبیه سازی نشان می‌دهد برای کریستال لیزری پمپ شده از انتها که بطور کامل درون نگهدارنده قرار گرفته است، بیشینه استرس در لبه کریستال القا می‌شود و با قرار دادن لبه کریستال به اندازه ۴۰۰ میکرون خارج از نگهدارنده، استرس القایی به کمترین مقدار خود می‌رسد که این موقعیت بهینه، مستقل از توان پمپ می‌باشد. این مطالعه نشان می‌دهد، نمودار افزایش بیشینه استرس با افزایش توان پمپ برای کریستال لیزری در موقعیت بهینه، دارای شیب کمتری نسبت به نمودار مربوط به دیگر موقعیت‌ها می‌باشد. همچنین ثابت شد که موقعیت ۴۰۰ میکرون برای کریستال لیزری دارای چمفر نیز بهینه می‌باشد و قرارگیری در موقعیت بهینه برای کریستال لیزری چمفردار الزامی‌تر است.

مرجع‌ها

[1] Ma, Qinglei, Haiding Mo, and Jay Zhao. "High-energy high-efficiency Nd: YLF laser end-pump by 808 nm diode." *Optics Communications* 413 (2018): 220-223.

[2] Shen, Yu, et al. "Experimental and theoretical investigation of pump laser induced thermal damage for polycrystalline ceramic and crystal Nd: YAG." *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 21.1 (2014): 160-167.

[3] Koechner, Walter, and Michael Bass. *Solid-State Lasers: A Graduate Text*. Springer Science & Business Media, 2006.

[4] R. Weber, B. Neuenschwander, H.P. Weber. “Thermal effects in solid-state laser materials”. Optical Materials 11 (1999) 245–254

[5] https://doc.comsol.com/5.3/doc/com.comsol.help.heat/HeatTransferModuleUsersGuide.pdf

[۶] صفری، ابراهیم، مینا بابایی باویل، و محمد تقی احمدیان، ۱۳۹۲، وابستگی تحت دمش Nd:YAG زمانی تغییرات درجه حرارت و تنش در یک میله لیزری ضربانی طولی، سومین همایش ملی مهندسی اپتیک و لیزر ایران، اصفهان، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، پژوهشکده علوم و فناوری اپتیک و لیزر

[Downloaded from www.opsi.ir on 2025-06-11]

این مقاله در روزی [illegible] اعتبار است که در سایت www.opsi.ir قابل دسترسی باشد.