

شکل ۱ - هندسه دمش عرضی سه سویه دیسک نازک

شعاع پرتو دمش به صورت تابعی از فاصله نسبت به کمره باریکه به صورت رابطه (۱) تعریف می‌شود [۱۴]:

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 + \left(\frac{M^2 \lambda_p X}{n \pi \omega_0^2} \right)^2} \quad (۰)$$

که در آن ω_0 شعاع کمره باریکه پرتو دمش، λ_p طول موج دمش در فضای آزاد (۹۴۱ نانومتر) و n ضریب شکست قطعه بلوری است. گرمای تولید شده در ماده فعال لیزر از سطوح جانبی یا انتهای ماده فعال لیزر دفع می‌شود. قسمتی از توان دمش شده که به گرما تبدیل می‌شود به عنوان منبع چگالی به صورت $Q(r, \varphi, z)$ در حجم واحد بلور توزیع می‌یابد. در حالت کلی معادله دیفرانسیل برای دما به صورت معادله (۲) و (۳) بیان می‌گردد:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} - h \nabla \cdot (k(T) \nabla T) = Q(r, \varphi, z) \quad (۰)$$

در حالت پایدار و با فرض اینکه k مقدار ثابتی دارد و ماده فعال لیزری تحت دمش پیوسته قرار می‌گیرد معادله (۲) به صورت معادله (۳) نوشته می‌شود:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \frac{-Q(r, \varphi, z)}{k} \quad (۰)$$

در اینجا منبع چگالی گرما که به صورت بار گرمایی کل بر ماده اعمال می‌شود به صورت معادله (۴) نوشته می‌شود:

$$\begin{aligned} x &= r \cos \theta \\ y &= r \sin \theta \end{aligned} \quad (۰)$$

$$d = \sqrt{(a^2 - y^2)} - x$$

$$Q(r, \varphi, z) = Q_0 \exp \left[\frac{-2z^2}{\omega^2(x)} - ad \right] \quad (۰)$$

که x و y با استفاده از مختصات قطبی بدست می‌آیند، r شعاع دیسک نازک، a ضریب جذب ماده، a شعاع پرتو دمش و همچنین Q_0 با استفاده از رابطه (۶) تعیین می‌شود:

$$Q_0 = \frac{\eta P_{ab}}{\int_0^r \int_0^\theta \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} \exp \left[\frac{-2z^2}{\omega^2(x)} - ad \right] dr d\theta dz} \quad (۰)$$

که در آن η بازده تولید حرارت ماده و P_{ab} توان دمش کل جذب شده است.

چند ده میلی‌متر دارد که از طرف یکی از سطوحش که بازتاباننده کامل است سرد می‌شود [۶].

ویژگی اصلی لیزر دیسکی تولید خروجی لیزر با توان بالا و در عین حال با کیفیت پرتو مناسب است. در این مقاله محیط فعال لیزری به شکل یک دیسک نازک با ضخامت چند میلی‌متر و از جنس Yb:YAG است. در مقایسه با لیزرهای میله‌ای شکل، ضخامت دیسک خیلی کمتر از قطر آن است این مسئله منجر به خنک‌سازی بهتر ماده فعال شده و باعث کاهش بروز خواص اپتیکی نامطلوب همچون عدسی‌شدگی حرارتی و پدیده دوشکستی در ماده فعال می‌شود. در پدیده عدسی‌شدگی حرارتی، ضریب شکست به گونه‌ای تغییر می‌کند که نور در داخل ماده همگرا یا واگرا می‌شود. اگر ضریب شکست ماده در راستاهای مختلف باهم فرق می‌کند، که در نتیجه موجب عوض شدن قطبش میدان نور می‌شوند پدیده دوشکستی رخ داده است. به همین دلیل علاوه بر قابلیت دسترسی به توان‌های بالا، لیزرهای دیسک قابلیت دستیابی به کیفیت پرتو بسیار مناسبی را نیز دارند [۷-۸].

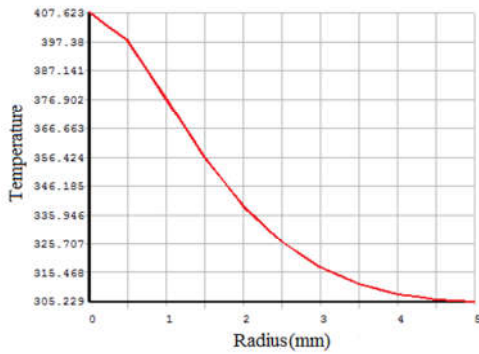
لیزرهای حالت جامد به طور معمول به دو روش عرضی و طولی دمش می‌شوند که در دمش طولی جهت نور پمپاژ و لیزر خارج شده در یک جهت هستند ولی در دمش عرضی جهت نور پمپاژ و لیزر خارج شده، عمود برهم هستند. نور دمش به صورت عرضی به سطح جانبی بلور لیزری برخورد می‌کند در نتیجه مقیاس‌بندی توان دمش و توان خروجی بسیار ساده‌تر از سیستم‌های دمش طولی است [۹-۱۰]. برای رسیدن به توان‌های بالا از سیستم دمش عرضی استفاده می‌شود ولی سیستم دمش طولی برای دستیابی به لیزرهایی با بازدهی و کیفیت پرتو مناسب می‌باشد [۱۱].

ماده Yb:YAG در مقایسه با Nd:YAG ضریب جذب بالاتری دارد و جایگزین مناسبی می‌تواند باشد. مطالعات متعددی بر روی تعیین تابع توزیع دما و توزیع تنش بر روی بلور لیزری Nd:YAG، Yb:YAG با محیط‌های لیزری میله‌ای و بره‌ای تحت دمش طولی و دمش عرضی انجام گرفته است [۱۲-۱۹]. در این مقاله ما با استفاده از روش عددی دقیق اجزاء محدود به تعیین تابع توزیع دما و توزیع تنش در بلور دیسکی Yb:YAG تحت دمش عرضی سه سویه می‌پردازیم.

۲- شرح مسئله

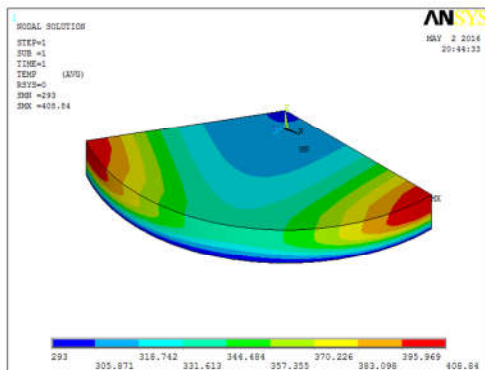
در این پژوهش دیسک نازکی از بلور Yb:YAG در نظر گرفته شده است که توسط لیزر پیوسته کار (cw) با طول موج ۹۴۱ نانومتر تحت دمش قرار می‌گیرد.

هندسه دمش عرضی سه سویه که به وسیله سه دیود لیزر پمپ می‌شود در شکل ۱ نشان داده شده است. این بلور دارای شعاع ۵ میلی‌متر و ضخامت ۱ میلی‌متر است و دمش از سه جهت توسط لیزرهای دیودی صورت می‌گیرد. جهت پرتو خروجی لیزر عمود بر جهت پرتو دمش است و همچنین دمش و خنک‌سازی از سطوح مختلف صورت می‌پذیرد که عمود برهم‌اند.

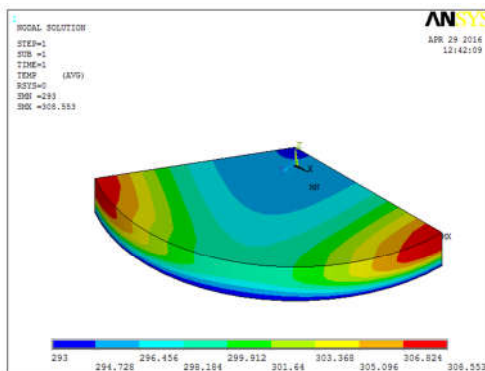


شکل ۲- نمودار توزیع دمای مرکزی (کلوین) در راستای شعاع دیسک (میلی متر) در $Z=0$

شکل‌های ۳ و ۴ توزیع گرافیکی دما برای توان دمشی کل ۲۴۰ وات و ۳۰ وات که به دیسک اعمال می‌شوند را نمایش می‌دهد که دمای بلور برای هر توان به ۴۰۸ و ۳۰۸ کلوین می‌رسد.



شکل ۳- توزیع گرافیکی دما بر حسب کلوین برای توان ۲۴۰ وات (۸۰ وات از هر طرف)



شکل ۴- توزیع گرافیکی دما بر حسب کلوین برای توان ۳۰ وات (۱۰ وات از هر طرف)

در شکل ۵ حداکثر دما برای ۸ توان مختلف دمشی برای بلور Yb:YAG نمایش داده شده است و با افزایش توان ورودی دمای بلور

حرارت ایجاد شده در اثر اعمال بار گرمایی و خنک‌سازی سطحی باعث ایجاد گرادیان‌های حرارتی شده و تنش‌هایی را در ماده ایجاد می‌کند. تنش‌ها، کرنش‌ها و دمای بلور توسط روابط عمومی هوک به شکل زیر با هم ارتباط پیدا می‌کنند:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r(r) &= \frac{1}{E} [\sigma_r - \nu(\sigma_\phi + \sigma_z)] + \alpha T \\ \varepsilon_\phi(r) &= \frac{1}{E} [\sigma_\phi - \nu(\sigma_z + \sigma_r)] + \alpha T \\ \varepsilon_z(r) &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_r + \sigma_\phi)] + \alpha T \end{aligned} \quad (7)$$

که در آن E مدول یانگ، ν نسبت پواسون، α ضریب انبساط گرمایی، σ_r ، σ_ϕ و σ_z به ترتیب تنش شعاعی، زاویه‌ای و محوری، ε_r ، ε_ϕ و ε_z به ترتیب کرنش شعاعی، زاویه‌ای و محوری را نشان می‌دهند. همچنین در اینجا فرض می‌کنیم که سطح پایینی دیسک در تماس با یک چاهک گرمایی که با آب خنک‌سازی می‌شود قرار دارد. با استفاده از شرایط مرزی، توزیع دما و توزیع تنش حرارتی را با حل معادلات (۳) و (۷) بدست می‌آوریم. با داشتن توزیع دما و تنش می‌توان تغییرات ضریب شکست را برای هر نقطه از بلور بدست آورد.

$$n(r) = n_0 + \Delta n(r)_T + \Delta n(r)_\varepsilon \quad (8)$$

که در رابطه فوق n_0 ضریب شکست ذاتی، $\Delta n(r)_T$ تغییر ضریب شکست وابسته به دما و $\Delta n(r)_\varepsilon$ تغییر ضریب شکست وابسته به تنش می‌باشند. که با جایگذاری در رابطه (۸)، تغییرات ضریب شکست شعاعی، زاویه‌ای و محوری به این صورت بدست می‌آیند:

$$n(r)_{r,\phi,z} = n_0 - \frac{1}{4} \left(\frac{Qr^2}{k} \frac{dn}{dT} \right) - \frac{1}{2} n_0^3 \Delta B_{r,\phi,z} \quad (8)$$

که ΔB ضرایب اپتیکی تنش، $\frac{dn}{dT}$ تغییر ضریب شکست نسبت به دما برای ماده Yb:YAG و k رسانایی گرمایی بلور می‌باشد.

۳- نتایج عددی

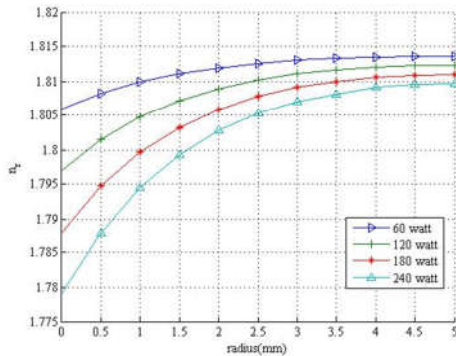
مباحث نظری و شرایط مرزی در بخش قبل آورده شده است در اینجا به دلیل شرایط متقارن دیسک و پمپاژ در محاسبات عددی، یک سوم را برای مشبندی در نرم افزار Ansys در نظر گرفتیم. خصوصیات مکانیکی و فیزیکی ماده Yb:YAG در جدول ۱ آورده شده است.

جدول ۱- خواص فیزیکی و مکانیکی بلور Yb:YAG [۳۰]

$E=31 \cdot Gpa$	مدول یانگ
$\nu=0.3$	نسبت پواسون
$\lambda p=94 \cdot nm$	طول موج دمش
$n=1.815$	ضریب شکست
$\alpha=7.8 \times 10^{-6} K^{-1}$	ضریب گرمایی
$K=1.4 W/m \cdot K$	رسانایی گرمایی
$a=5.95 \cdot 10^{-6} cm^{-1}$	ضریب جذب
$T_0=293 K$	دمای خنک‌سازی

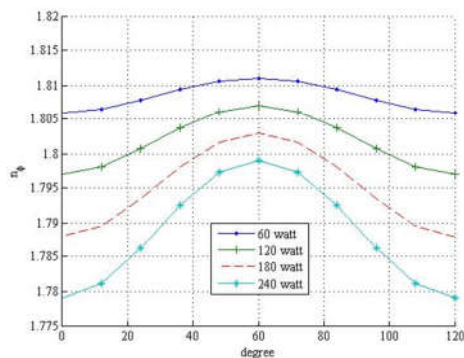
توزیع دمای دیسک نازک Yb:YAG که تحت دمش سه سوپه ۲۴۰ وات (۱۰ وات از هر طرف) قرار گرفته در شکل ۲ دیده می‌شود. در محل ورودی پمپ دمای دیسک به بیشترین مقدار می‌رسد.

نیز افزایش می‌یابد.

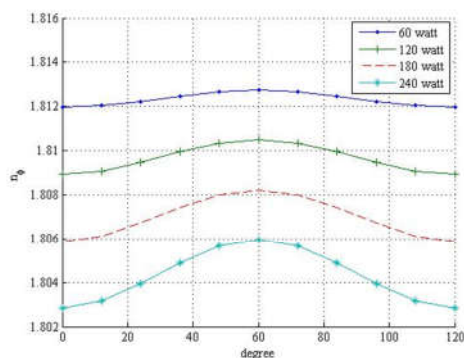


شکل ۷- تغییرات ضریب شکست شعاعی در راستای شعاع در $z=0$ برای توان‌های دمشی ۶۰، ۱۸۰، ۲۴۰ وات

شکل های ۸ و ۹ تغییرات ضریب شکست زاویه‌ای را در شعاع‌های ۳ و ۵ میلی‌متر برای چندین توان مختلف نمایش می‌دهند. به علت وجود تقارن در توزیع دما و تنش در بلور، زاویه صفر تا ۱۲۰ درجه مورد مطالعه قرار گرفت و با مقایسه دو نمودار دیده می‌شود که ضریب شکست زاویه‌ای در شعاع ۳ میلی‌متر بیشتر تغییر یافته است.

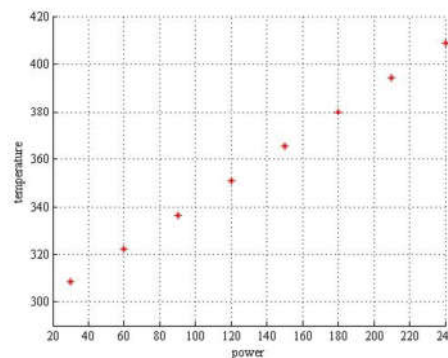


شکل ۸- تغییرات ضریب شکست زاویه‌ای در $r=3$ و $z=0$ برای توان‌های ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ وات



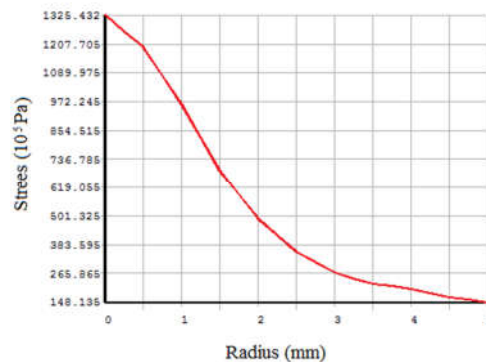
شکل ۹- تغییرات ضریب شکست زاویه‌ای در $r=5$ و $z=0$ برای توان‌های ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ وات

تغییرات ضریب شکست محوری در امتداد پرتو لیزر خروجی در شکل



شکل ۵- حداکثر توزیع دما (کلوین) برای توان های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰ و ۲۴۰ وات

وقتی تنش اعمال شده توسط گرادیان حرارتی بیشتر از قدرت کششی ماده باشد بلور خواهد شکست و حد شکست مقدار نهایی توان دمشی را مشخص می‌کند که به این میزان تنش، تنش شکست^۱ گفته می‌شود که مقدار تنش شکست برای ماده Yb:YAG ۱۳۰ مگا پاسکال می‌باشد در شکل ۶ توزیع تنش برای توان ۲۴۰ وات از برنامه Ansys بدست آمده که با توجه به نمودار دیده می‌شود که بلور در آستانه شکست قرار دارد و برای توان های بالاتر دیسک می‌شکند.



شکل ۶- نمودار توزیع تنش (پاسکال) محوری (σ_r) بر روی سطح خنک کننده (میلی متر) تحت توان جذب شده ۲۴۰ وات

با استفاده از تنش‌های بدست آمده از نرم افزار Ansys، می‌توان تغییرات ضرایب شکست و فاصله کانونی بلور را برای توان‌های مختلف بدست آورد.

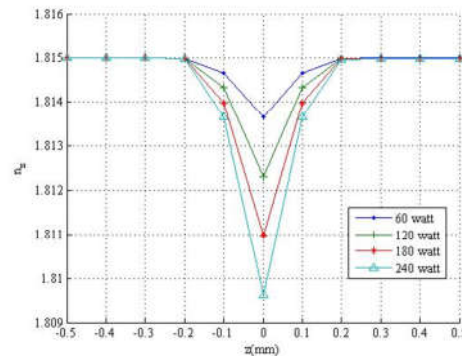
نمودار ۷ تغییرات ضریب شکست شعاعی را نشان می‌دهد که ضرایب شکست شعاعی در نقطه ورود دمش به داخل بلور، بیشترین کاهش را دارند.

^۱ Stress fracture

۵- منابع

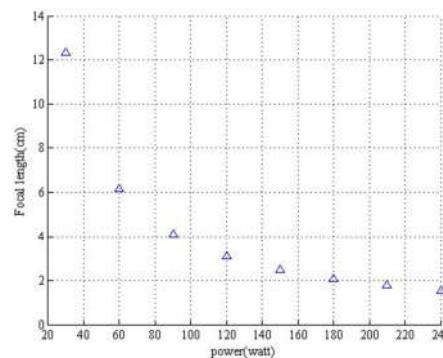
- [1] Hutton D.V., *Fundamentals of Finite Element Analysis*. The MacGraw-Hill companies, 2004.
- [2] Silfvast W.T., *Fundamentals of Photonics Lasers*, University of Central Florida Orlando, Florida, 2003.
- [3] Singh S.CH., Zeng H., Guo C., and Cai W., *Lasers: Fundamentals, Types and Operations*, 2012.
- [4] Kochener W., *Solid-State Laser Engineering*. Springer-Verlag, 6th ed, New York, pp. 340-342, 2006.
- [5] Svelto O., *Principles of Lasers*. Springer, New York, USA, 5th ed, 2010.
- [6] Takeno K., Development of a 100-W Nd:YAG laser using the injection locking technique for gravitational wave detectors, *January*, 2006.
- [7] Liu Q., Fu X., Ma D., Gong M., Edge-pumped asymmetric Yb:YAG/YAG thin disk laser. *Laser Phys, Lett.* 4(10), pp. 719-721, 2007.
- [8] Liu Q., Fu X., Ma D., Gong M., Edge-pumped asymmetric Yb:YAG/YAG thin disk laser. *Laser Phys, Lett.* 4(10), pp. 719-721, 2007.
- [9] Esser M.J.D., *diod -end -pumped solid -state lasers*, university of Stellenbosch, April 2005.
- [10] Chen B., Dong J., Patel M., Chen Y., Kar A., and Bass I M., Modeling of High Power Solid-State Slab Lasers, *School of Optics/CREOL, University of Central Florida, Orlando, FLUSA* 32816-2700, Vol. 4968, 2003.
- [11] Jones W.B., Goldman L.M., Chemoch J.P., Martian W.S., The mini-FPL-A face pumped laser: Concept and implementation. *IEEE JQE*, Vol. 8, pp. 534-535, 1972.
- [12] Osterink L.M., Foster J.D., Thermal effect and transverse mode control and Nd:YAG laser. *Appl. Phys, Lett.* 12, pp. 128-131, 1968.
- [13] Foster J.D., Osterink L.M., Thermal effect in a Nd:YAG rod laser. *Appl. Phys, Lett.* 41, pp. 3656-3663, 1970.
- [14] Koechner W., Thermal lensing in a Nd:YAG rod laser. *Apple. Opt.*, pp. 2548-2553, 1972.
- [15] Sueda K., Tsujioka Y., Takahashi H., Kawato S., Kobayashi T., High-power and high-efficiency LD pumped Yb:YAG micro-thickness slab laser. *Advanced Solid-State Photonics*, paper MB15, 2004.
- [16] Fan T. Y., Heat generation in Nd :YAG and Yb :YAG. *IEEE J. Quantum Electron.*, Vol. 29, pp. 1457-1459, 1993.
- [17] Linford G. J., L. W. Hill., Nd: YAG long lasers. *Appl. Opt.*, Vol. 13, pp. 1387-1394, 1974.
- [18] Bibeau C., Beach R.J., Mitchell S.C., Emanuel M.A., Skidmore J., High-Average-Power 1- μ m Performance and Frequency Conversion of a Diode-End-Pumped Yb:YAG Laser. *IEE J. Quantum Electron.*, Vol. 34, No 10, pp 2010 -2019, 1998.
- [19] Fan Sh., Zhang X., Wang Q., Li Sh., Ding Sh., Su F., More Precise Determination of Thermal Lens Focal Length for End-Pumped Solid-State Lasers. *Optics Communications*, Vol. 266, pp. 620-626, 2006.

۱۰ نشان داده شده است که ضریب شکست محوری بر روی سطح ورودی و خروجی پرتو لیزری تقریباً با ضریب شکست ماده یکسان است.



شکل ۱۰- تغییرات ضریب شکست محوری در امتداد پرتو لیزر برای توان‌های ۶۰، ۱۲۰، ۱۸۰ و ۲۴۰ وات

فاصله کانونی در راستای ضخامت دیسک را می‌توان با استفاده از تنش-های بدست آمده از روش اجزاء محدود محاسبه کرد. در شکل ۱۱ تغییرات فاصله کانونی برای چندین مختلف نشان داده شده است که با توجه به آن دیده می‌شود که فاصله کانونی با افزایش توان دمشی کاهش می‌یابد.



شکل ۱۱- فاصله کانونی در امتداد پرتو لیزر برای توان‌های ۳۰، ۶۰، ۹۰، ۱۲۰، ۱۵۰، ۱۸۰، ۲۱۰ و ۲۴۰ وات

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش با استفاده از نرم افزار Ansys به بررسی رفتار حرارتی و تنشی دیسک نازکی از بلور Yb:YAG که تحت دمش عرضی سه سویه قراردارد، پرداخته شده است. بیشینه توان دمش عرضی سه سویه در آستانه شکست بلور ۲۴۰ وات بدست آمده است. در مطالعه پدیده دو شکستی در بلور مشاهده شد که با افزایش توان، اختلاف ضرایب شکست از ضریب شکست ذاتی افزایش می‌یابد، ولی با توجه به شکل‌ها تغییرات ضرایب شکست در بلور از مرتبه پایینی است که نشان دهنده کوچک بودن دوشکستی در بلور می‌باشد و بیانگر این است که بلور Yb:YAG در توان های بالا همسانگرد باقی می‌ماند و عملکرد مناسبی در بین ماده‌های فعال لیزری دارد.