

شبیه‌سازی عدسی گرمایی لیزر پیوسته Nd:YAG با دمش دیودی جانبی

محمد نجفی حاجی‌ور^۱، علی یزدانی^۲، و محمود حسینی فرزاد^۱

^۱ بخش فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه شیراز

^۲ گروه فیزیک دانشگاه یزد

چکیده - در این مقاله با استفاده از روش‌های عددی معادله گرما در میله لیزر حل شده است. توزیع دما برای یک میله استوانه‌ای که از ۴ جهت به صورت متقارن توسط آرایه‌های دیود لیزری دمش شده، به دست آمده است. همچنین برای محاسبه فاصله کانونی ایجاد شده، از تکنیک اختلاف مسیر اپتیکی استفاده شده است. سپس با یک برازش منحنی فاصله کانونی به دست آمده است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که این روش یک روش مناسب جهت مطالعه اثرات گرمایی در لیزرهای حالت جامد می‌باشد.

کلیدواژه: اختلاف مسیر اپتیکی، دمش دیودی، دمش از جانب، عدسی گرمایی.

Simulation of thermal lensing in continuous diode side pumped Nd: YAG laser

M. Najafi Hajivar¹, A. Yazdani², and M. Hosseini- Farzad¹

¹ Department of Physics, College of Science, Shiraz University

² Department of Physics, Yazd University

Abstract- In this paper we solved the heat equation in a laser rod using numerical methods. Temperature distribution for a cylindrical rod that pumped symmetrically by 4 arrays of laser diode is obtained. By using optical path difference (OPD) method, we calculated focal length of the thermal lens. The results show that, this method is an appropriate method for studying the thermal effects in solid state lasers.

Keywords: Optical path difference, diode laser pump, side pump, thermal lensing.

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

۱- مقدمه

امروزه لیزرهای حالت جامد پرقدرت در حوزه‌های وسیعی از جمله فرآوری مواد، سنجش از راه دور، مخابرات فضای آزاد، شتاب دهنده ذرات و ... کاربرد دارند. همه این کاربردها ناشی از کم حجم بودن، بازدهی و توان بالا و کیفیت خوب پرتو این لیزر می‌باشد [۱]. فرایند دمش نوری در یک لیزر حالت جامد همواره با تولید گرما در محیط فعال لیزر همراه است. برخی عوامل تولید گرما در لیزرهای حالت جامد را چنین برشمرد: الف) اولین و شاید مهمترین علت تولید گرما را در این نوع لیزرها می‌توان اختلاف انرژی بین فوتون دمش و فوتون خروجی لیزر دانست. ب) واهلش‌های غیر تابشی از تراز بالایی لیزر به حالت پایه عامل دیگری برای تولید گرما می‌باشد. ج) در سیستم‌های با دمش فلش لامپ، توزیع طیفی وسیع منبع دمش باعث یک مقدار مشخص جذب زمینه توسط ماده میزبان می‌شود [۲]. اختلاف (گرادیان)‌های دمایی ایجاد شده در محیط بهره می‌تواند به شکست تنشی منجر شود که حد نهایی توان متوسط قابل حصول از یک محیط لیزر را مشخص می‌کند. به علاوه تولید گرما در محیط لیزر عامل به وجود آمدن پدیده دیگری به نام عدسی گرمایی می‌باشد که باعث می‌شود که نقطه عملیاتی تشدیدگر در نمودار پایداری به صورت تابعی از توان ورودی باشد. انتقال گرمای موثر و کاهش آثار گرمایی که از گرادیان‌های دمایی در ناحیه فعال لیزر ناشی می‌شوند، مهم‌ترین ملاحظات در طراحی لیزرهای حالت جامد با توان میانگین بالا می‌باشند. توانایی پیش‌بینی مقدار گرمای ایجاد شده در محیط لیزر از آن رو مهم است که بتوانیم یک تصور از اثرات گرما-نوری مورد انتظار در یک میله یا تیغه لیزر به دست بیاوریم. هدف اصلی این مقاله شبیه‌سازی عدسی گرمایی ایجاد شده در یک لیزر است که از پهلوی دمش شده است. بدین منظور معادله گرما را با استفاده از روش تفاضل محدود حل کردیم و توزیع دما را برای میله لیزری که به صورت متقارن از چهار جهت دمش می‌شد، به دست آوردیم. سپس کمیت دیگری به نام اختلاف مسیر اپتیکی را محاسبه و با برازش منحنی فاصله کانونی عدسی گرمایی ایجاد شده را به دست آوردیم.

۲- حل معادله گرما و شبیه‌سازی عدسی گرمایی

۱-۲- توزیع توان دمش

در این مقاله محیط فعال لیزر را یک میله استوانه‌ای به شعاع r_0 در نظر گرفتیم که به طور متقارن از چهار جهت توسط آرایه‌های لیزر دیودی دمش می‌شود (شکل ۱). می‌توان پرتو دمش برای یکی از پرتوها مثلاً پرتو سمت چپ را به صورت زیر نمایش داد [۳]:

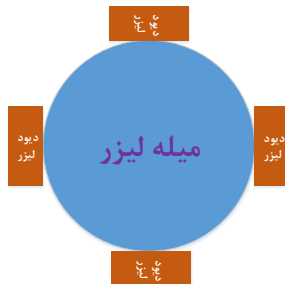
$$I(x, y) = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \frac{I_0}{W_p} \exp\left[-\frac{x^2}{W_p^2} - \alpha d\right] \quad (1)$$

که در آن I_0 توان تولید شده توسط آرایه‌های دیودی بر واحد طول و W_p پهنای باریکه دمش است که به شکل زیر می‌باشد:

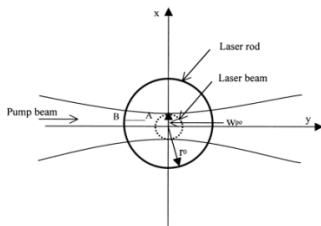
$$W_p^2 = W_{p0}^2 \left[1 + \left(\frac{\lambda_p y}{W_{p0}^2} \right)^2 \right] \quad (2)$$

W_{p0} طول موج دمش و برابر 808 نانومتر، λ_p که در آن cm^{-1} و برابر $Nd:YAG$ کمرباریکه، ضریب جذب بلور طول مؤثر جذب می‌باشد که از رابطه زیر $1/d$ و محاسبه می‌شود:

$$d(x, y) = \sqrt{r_0^2 - x^2} - y \quad (3)$$



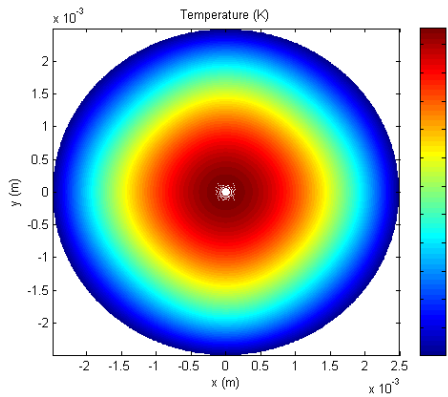
شکل ۱: آرایش دیودهای لیزری



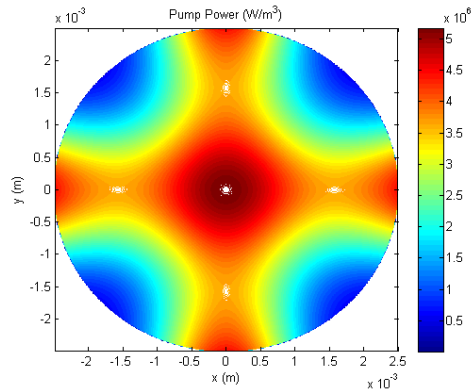
شکل ۲: آرایش دیودهای لیزری

شکل ۳ نمودار توزیع توان دمش را برای آرایش موجود نشان می‌دهد.

می‌توان ملاحظه کرد:



شکل ۴: توزیع دما در سطح مقطع میله لیزر



شکل ۳: توزیع توان دمش در سطح مقطع میله لیزر

۲-۲- حل معادله گرما و محاسبه توزیع دما

برای به دست آوردن توزیع دما در میله لیزر باید معادله گرما را برای این میله حل کنیم [۴]:

$$\rho c \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} - K_c \nabla^2 T(\vec{r}, t) = Q(\vec{r}, t) \quad (۴)$$

که در آن ρ چگالی بلور و c ظرفیت گرمایی و K_c رسانندگی گرمایی بلور Nd:YAG می‌باشد. $T(\vec{r}, t)$ دمای میله در نقطه \vec{r} و زمان t می‌باشد و $Q(\vec{r}, t)$ چشمه گرمایی بر واحد حجم می‌باشد که ضربی از توان دمش در میله می‌باشد. در این مقاله حالت پایا را بررسی می‌کنیم، چشمه گرمایی را ثابت فرض می‌کنیم، هم‌چنین فرض می‌کنیم توان تولید شده توسط آرایه دیودها در طول محور میله یکنواخت باشد، بنابراین مساله به دو بعد کاهش می‌یابد و البته به دلیل فرض حالت پایا جمله نخست را در معادله ۴ نادیده می‌گیریم. شرط مرزی حاکم بر مساله به این شکل می‌باشد [۴]:

$$\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right)_{\text{سطح}} = H(T_s - T_\infty) \quad (۵)$$

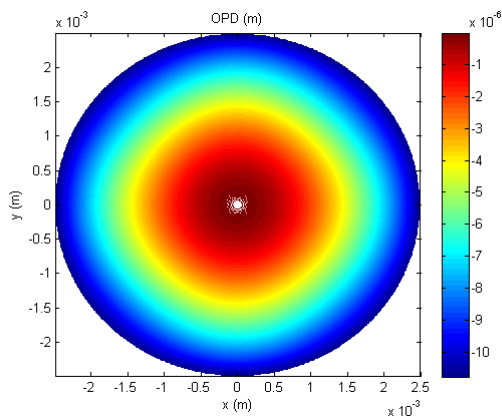
که در آن H ضریب انتقال گرما بین میله لیزر و شاره خنک‌ساز و T_s دمای سطح میله و T_∞ دمای شاره خنک‌ساز می‌باشد. شرط مرزی فوق رابطه بین تغییرات دما در نزدیکی سطح میله لیزر به ضریب انتقال گرما و دمای شاره خنک‌ساز وابسته می‌کند. پس از مشخص شدن شکل نهایی معادله گرما و تعیین شرط مرزی، مساله را با استفاده از روش تفاضل‌های محدود حل کردیم. در واقع از روش فوق تخفیف پی در پی نقطه به نقطه (PSOR) استفاده کردیم [۵]. دمای شاره خنک‌ساز T_∞ را برابر ۲۸۸ کلون (۱۵ درجه سانتیگراد) در نظر گرفتیم. نمودار توزیع دما را در سطح مقطع میله در شکل ۴

۳-۲- محاسبه اختلاف مسیر اپتیکی

به دلیل اینکه دما در میله یکنواخت نمی‌باشد، مسیر اپتیکی نیز برای پرتوهایی که از نقاط با فاصله‌های مختلف از محور میله می‌گذرند، یکسان نخواهد بود. کمیتی به نام اختلاف مسیر اپتیکی (OPD) را به صورت زیر تعریف می‌کنیم [۴]:

$$OPD(r) = \left[\frac{dn}{dT} + (n-1)(1+\nu)\alpha_T \right] (T(r) - T(0)) + 2C_r n^3 \alpha_T \quad (۶)$$

که در آن $\frac{dn}{dT}$ ضریب وابستگی ضریب شکست به دما، n ضریب شکست، ν ضریب پواسون، C_r ضریب فوتوالاستیک، α_T ضریب انبساط خطی و l طول میله است. نمودار تغییرات OPD را در شکل زیر می‌توان مشاهده کرد:



شکل ۵: اختلاف مسیر اپتیکی محاسبه شده

با توجه به وابستگی OPD به دما شباهت نمودار آن به نمودار توزیع دما کاملاً مشهود است. یک تخمین نسبتاً خوب برای به دست آوردن فاصله کانونی عدسی گرمایی ایجاد شده برآزش منحنی است. اگر OPD به صورت تابع

[4] Wang, S., et al. "Diode end pumped Nd: YAG laser at 946 nm with high pulse energy limited by thermal lensing." Applied Physics B 95.4 (2009): 721-730.

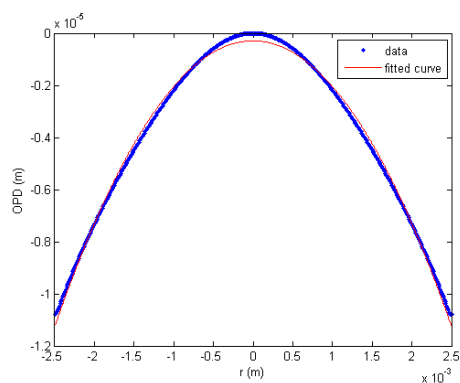
[۵] هافمن ک. ا.، دینامیک سیالات محاسباتی، مرکز نشر دانشگاه صنعتی اصفهان، ۱۳۸۷

درجه دومی از r در نظر بگیریم، ضریب آن با فاصله کانونی به این صورت مرتبط است:

$$OPD(r) = -\frac{r^2}{2f} \quad (7)$$

به دست f حال با برازش منحنی فوق فاصله کانونی می‌آید.

برای میله با ابعاد ذکر شده و توان ورودی ۵۰ وات و کمر باریکه یک میلی‌متری فاصله کانونی تقریباً ۲۸ سانتی‌متر OPD به دست آمده است. در شکل ۶ برازش منحنی با محاسبه شده برای سیستم فوق نشان داده شده است. همانطور که از شکل مشاهده می‌شود، منحنی برازش شده با داده‌های محاسبه شده تطبیق خوبی دارد.



شکل ۶: برازش منحنی OPD

۳- نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور شبیه‌سازی عددی عدسی گرمایی ایجاد شده در لیزر Nd:YAG با دمش دایودی جانبی از روش تفاضل‌های متناهی استفاده شد. همچنین برای تخمین فاصله کانونی عدسی گرمایی ایجاد شده از کمیت بسیار سودمندی به نام OPD استفاده شد که با یک برازش منحنی ساده فاصله کانونی را می‌توان حساب کرد. شایان ذکر است که مربوط به این مقاله با نرم افزار متلب نوشته شده است و از Toolbox مربوط به برازش منحنی این نرم افزار استفاده شده است.

مراجع

- [1] Fujikawa, Shuichi, Tetsuo Kojima, and Koji Yasui. "High-power and high-efficiency operation of a CW-diode-side-pumped Nd: YAG rod laser." Selected Topics in Quantum Electronics, IEEE Journal of 3.1 (1997): 40-44..
- [2] Koechner, Walter. Solid-state laser engineering. Vol. 1. Springer, 2008..
- [3] Xie, Wenjie, et al. "Thermal lensing of diode side-pumped solid-state lasers." Optics & Laser Technology 32.3 (2000): 199-203.