



بیست و پنجمین کنفرانس اپتیک و
فوتونیک ایران و یازدهمین کنفرانس
مهندسی و فناوری فوتونیک ایران،
دانشگاه شیراز،
شیراز، ایران.
۱۱-۹ بهمن ۱۳۹۷



اثر حرارت در تغییرات توان مدهای منتشر شده در تقویت کننده‌های فیبر ایتریومی

آزین شوهانی^۱، امیر سپهوند^۲، مریم کریمی^۳، مهدی امنیت طلب^۱، کاظم جمشیدی قلعه^۲

^۱گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ارومیه

^۲گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان

^۳پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران، ایران

چکیده - لیزرها و تقویت کننده‌های فیبری پر توان کاربردهای فراوانی در صنایع نظامی، آزمایش‌های فیزیک انرژی بالا، پردازش و هموارسازی سطوح، برش و جوشکاری دارند. در تقویت کننده‌های فیبری توان بالا، به دلایل وجود نقص کوانتومی، تلفات و پراکندگی نور دمای محیط افزایش می‌یابد که به نوبه خود باعث تغییرات ضریب شکست محیط می‌شود. تغییرات ضریب شکست باعث کوپل شدگی بین مدها در لیزرها و تقویت کننده‌های پر توان می‌شود در این مقاله معادلات کوپل شده مد با روش رونگ کوتا حل شده و میزان انتقال توان بین مدها تعیین شده است.

کلید واژه- تاثیرات حرارتی، تقویت کننده فیبر ایتربیومی، مدهای انتشاری

Heat Effect on the Power Conversion of the Modes in the Ytterbium-Doped Fiber Amplifiers

Azin Shohani¹, Amir Sepahvand², Maryam Karimi³, Mahdi Amniat-Talab¹, Kazem Jamshidi-Ghaleh²

¹Department of Physics, Urmia University, 11km SERO Road, Urmia, Iran

²Department of Physics, Azarbaijan Shahid Madani University, West Azarbaijan, Tabriz, Iran

³Institute of Nuclear Science and Technology, AEOI, Tehran, Iran

Abstract- High power fiber lasers and amplifiers have many applications in the military industries; high energy physics experiments; surface processing and smoothing; cutting, and welding. In the high power fiber amplifiers; due to the existence of quantum defects, background loss and scattering of light, the ambient temperature increases; which cause to change the refractive index of the environment. The variation of the refractive index causes to mode coupling in the high power fiber lasers and amplifiers. In the present paper; the modes coupled equations are solved using Ronge-Kutta method and transferred power value between modes are determined.

Keywords: Thermal effects, Ytterbium doped amplifiers, transvers modes

مقدمه

لیزرهای توان بالا کاربردهای بسیاری مانند جوشکاری، حفاری و برش دقیق دارند. دلیل محبوبیت این نوع لیزرها پایداری توان خروجی و کیفیت عالی پرتو آنها است. همچنین اندازه این نوع لیزرها کوچک و هزینه نگهداری آنها کم است، این نوع لیزرها اندازه لکه کوچک دارند و نیاز کمی به سرویس و نگهداری در آنها وجود دارد. با توسعه و پیشرفت در ساخت لیزرهای فیبری با توان بالا پدیده‌های نوظهوری در این لیزرها مشاهده شد که عامل اصلی محدودیت در توان خروجی این نوع لیزرها محسوب می‌شود. از آنجا که در فیبرهای نوری، پرتو از یک منطقه محدود کوچک عبور می‌کند، شدت نور در این افزاره می‌تواند بالا باشد روش متداول برای جلوگیری از ظهور این پدیده‌ها استفاده از فیبرهایی با مغزی بزرگ و چند مدی است که منجر به حذف اثرات غیرخطی در لیزرهای فیبری می‌شود، اما با افزایش توان به دلیل نوسانات بین مدها شکل پرتو خروجی تغییر کرده و کیفیت آن کاهش می‌یابد، به این پدیده ناپایداری مدی می‌گویند [۱]. شروع این ناپایداری‌ها نتیجه تعامل بین اثرات حرارتی و تداخل‌های مدی است [۲]. به عبارت دیگر عامل اصلی ناپایداری مدی پراکندگی گرمایی خودبه‌خودی است [۳]، به این صورت که گرمای ایجاد شده در تقویت‌کننده فیبری منجر به تغییر ضریب شکست موضعی در فیبر می‌شود [۴] که یک توری ضریب شکست ایجاد می‌کند، این توری ضریب شکست منجر به انتقال انرژی از مد اصلی Lp_{01} به مد مرتبه بالاتر Lp_{11} می‌شود. کارهای قبلی، گرمای تولید شده و همچنین تغییرات ضریب شکست ناشی از حرارت تولید شده در تقویت‌کننده ایتربیومی توان بالا را محاسبه و بررسی شد [۵ و ۶]. در این مقاله با در نظر گرفتن ضریب جفت شدگی بین مدها توان مدهای Lp_{01} و Lp_{11} را محاسبه خواهیم کرد.

تغییرات توان مد پایه و اولین مد مرتبه بالاتر در

تقویت‌کننده فیبر ایتربیومی

برای محاسبه توان مدها در طول تقویت‌کننده فیبری با در نظر گرفتن معادلات حرارتی و محاسبات مربوط به آن در مرجع [۶] خواهیم داشت [۷]:

$$\varepsilon(r, t) = \varepsilon_f(r_{\perp}) - i \frac{g(r) \sqrt{\varepsilon_f}}{k} + \Delta\varepsilon(r, t) \quad (1)$$

در اینجا ε_f گذردهی حقیقی فیبر، g ضریب بهره تقویت‌کننده ایتربیومی، k عدد موج در خلأ و اندیس $\perp$ نشان دهنده مختصات عرضی است. $\Delta\varepsilon = \eta \Delta T$ تغییرات گذردهی بر اثر حرارت تولید شده در سیستم است که ΔT اختلاف دما نسبت به دمای مرجع، و η ضریب حرارت نوری در مواد فیبر است. برای محاسبه توان مدهای Lp_{01} و Lp_{11} در طول فیبر با در نظر گرفتن معادلات حرارتی و محاسبات مربوط به آن از مرجع [۵] خواهیم داشت [۷]:

$$\rho C \frac{\partial \Delta T}{\partial t} - \kappa \nabla_{\perp}^2 \Delta T(r, t) = Q(r, t) \quad (2)$$

در اینجا ρ چگالی، C ظرفیت ویژه حرارتی و κ رسانندگی حرارت مواد فیبر است. Q منبع تولید حرارت در تقویت‌کننده فیبری است که در مرجع [۵] به طور کامل در مورد آن بحث شده است. با داشتن تغییرات دمایی ΔT در تقویت‌کننده می‌توان مقدار $\Delta\varepsilon(r, t)$ را حاصل کرد که برای محاسبه دامنه مدها در معادلات جفت شدگی مدی به آن نیاز داریم. بنابراین می‌توان معادلات جفت شدگی مدی برای توان مد پایه و اولین مد مرتبه بالاتر را به صورت زیر تعریف کرد [۷]:

$$\frac{\partial P_1}{\partial z} = -\chi_1(\Delta\omega)g(z)P_2P_1 + \Gamma_1g(z)P_1 \quad (3)$$

$$\frac{\partial P_2}{\partial z} = \chi_2(\Delta\omega)g(z)P_2P_1 + \Gamma_2g(z)P_2 \quad (4)$$

در اینجا $g(z)$ ضریب بهره تقویت‌کننده و P_1 و P_2 به ترتیب نشان دهنده توان مد پایه و توان مد مرتبه بالاتر است. $\Delta\omega = \omega_1 - \omega_2$ که اختلاف فرکانس بین دو مد را نشان می‌دهد، ثابت جفت شدگی مدی χ_i به صورت زیر ارائه

نتایج محاسبات عددی

برای محاسبه توان مدهای منتشر شده در تقویت کننده‌های فیبری در ابتدا باید ضریب جفت شدگی مدی بین مدها را محاسبه کرد. برای محاسبه این ضریب با انتخاب تابع گرین مناسب از مرجع [۸] و جایگذاری روابط (۸ و ۹) در رابطه (۶) می‌توان با استفاده از روش‌های انتگرال گیری عددی عددی مقدار A را برای اختلاف فرکانس‌های مشخص محاسبه کرد. سپس با در نظر گرفتن تغییرات حرارتی سیستم و تغییرات ضریب شکست سیستم که در مراجع [۵ و ۶] ارائه شده به همراه بخش موهومی رابطه (۶) در رابطه (۵) جایگذاری کرده و مقدار ضریب جفت شدگی مدی را محاسبه کرد. مقادیر ثابت‌های شبیه‌سازی در این مقاله شامل، شعاع مغزی و غلاف خارجی به ترتیب $20\ \mu m$ و $350\ \mu m$ ، ضریب شکست $n=1.45$ ، طول موج سیگنال و پمپ به ترتیب $1064\ nm$ و $975\ nm$ فرض شده است. همچنین ضریب حرارت نوری و رسانندگی حرارتی به ترتیب $\eta=3/5 \times 10^{-5}\ K^{-1}$ ، $\kappa=1/4\ W/(Km)$ و مقدار $\rho C=1/67 \times 10^6\ J/(Km^3)$ است. شکل (۱) نمودار تغییرات ضریب جفت شدگی مدی در اختلاف فرکانس $50\ KHz$ را نشان می‌دهد. حرارت تولید شده منجر به تغییر ضریب شکست و گذردهی محیط شده و در نهایت خواص موجبری فیبر را تغییر می‌دهد. برای توان ورودی $500\ mW$ ، تغییرات ضریب شکست محاسبه شده از مرتبه 10^{-9} است [۶]. ضریب جفت شدگی مدی به‌ازای این تغییرات قابل ملاحظه نیست و در طول فیبر مقدار ثابتی دارد. شکل (۲)، تغییرات نرمال شده توان مد پایه در طول فیبر برای مقادیر مختلف ضریب جفت شدگی مدی χ_1 را نشان می‌دهد. همان‌طور که از شکل (۲) مشاهده می‌شود به‌ازای کمترین مقدار χ_1 مد پایه بیشترین مقدار خود را دارد و با افزایش ضریب جفت شدگی توان این مد کاهش یافته و به صفر میل می‌کند. شکل (۳)، تغییرات توان نرمال شده مد مرتبه بالاتر Lp_{11} را در امتداد فیبر برای مقادیر مختلف ضریب جفت شدگی مدی را نشان می‌دهد.

می‌شود در این مقاله از روش رونگ کوتاه برای حل معادلات کوپل شده استفاده شده است.

$$\chi_{1,2}(\Delta\omega) = \frac{\eta k^2}{\kappa \beta_{1,2}} \text{Im}[A(\Delta\omega)] \left(1 - \frac{\lambda_s}{\lambda_p}\right) \quad (5)$$

که در اینجا β_i نشان دهنده ثابت انتشار مدها، λ_s و λ_p به ترتیب نشان دهنده طول موج سیگنال و طول موج پمپ در تقویت کننده فیبری است. از طریق انتخاب تابع گرین مناسب [۸] و وارد کردن توابع مد می‌توان مقدار $A(\Delta\omega)$ را از طریق رابطه زیر حاصل کرد [۷]:

$$A = \iint \psi_1(r_\perp) \psi_2(r_\perp) \iint_{\Omega_d} G(r_\perp, r'_\perp, \Delta\omega) \times \psi_1(r'_\perp) \psi_2(r'_\perp) d^2 r'_\perp d^2 r_\perp \quad (6)$$

در اینجا ψ_1 و ψ_2 به ترتیب نشان دهنده تابع توزیع مد پایه و مد مرتب بالاتر و G ، تابع گرین است [۸]. در این رابطه Ω_d نشان دهنده سطح مقطع ناخالصی‌ها در فیبر است و انتگرال بیرونی بر روی تمام سطح مقطع فیبر گرفته می‌شود. ضریب همپوشانی Γ_i که در روابط (۳ و ۴) استفاده شده را از طریق رابطه زیر می‌توان محاسبه کرد.

$$\Gamma_i = \frac{k}{\beta_i} \iint_{\Omega_d} \sqrt{\epsilon_f(r_\perp)} \psi_i(r_\perp)^2 d^2 r_\perp \quad (7)$$

این رابطه همپوشانی بین مد i و ناحیه ناخالصی‌های فیبر را مشخص می‌کند. تابع توزیع مدها را به صورت زیر می‌توان تعریف کرد [۹]:

$$\psi_1 = \begin{cases} \frac{A_0}{J_0(U)} J_0\left(\frac{Ur}{a}\right) & r < a \\ \frac{A_0}{K_0(W)} K_0\left(\frac{Wr}{a}\right) & r > a \end{cases} \quad (8)$$

$$\psi_2 = \begin{cases} \frac{A_0}{J_1(U)} J_1\left(\frac{Ur}{a}\right) \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{bmatrix}, & r < a \\ \frac{A_0}{K_1(W)} K_1\left(\frac{Wr}{a}\right) \begin{bmatrix} \cos(\phi) \\ \sin(\phi) \end{bmatrix}, & r > a \end{cases} \quad (9)$$

در معادلات (۸ و ۹)، J_l و K_l به ترتیب نشان دهنده تابع بسل نوع اول و بسل تعمیم یافته نوع دوم، a ، اندازه مغزی، A_0 ، یک مقدار ثابت و $U = a\sqrt{k_0^2 n_1^2 - \beta^2}$ و $W = a\sqrt{\beta^2 - k_0^2 n_2^2}$ است.

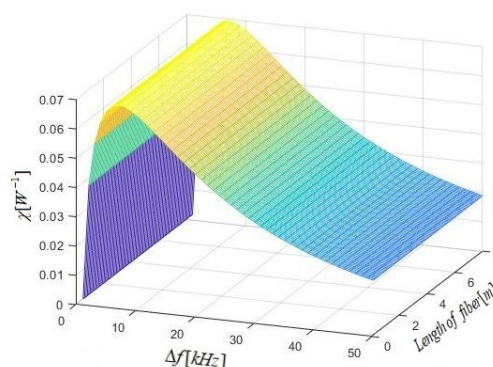
بالاتر انتقال یافته و باعث کاهش توان خروجی این نوع تقویت کننده ها می شود.

نتیجه گیری

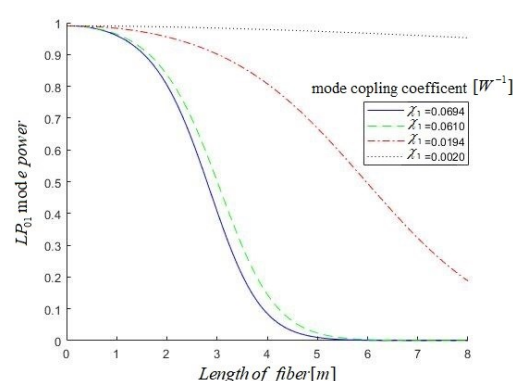
در این مقاله نشان داده شد مقدار عددی ضریب جفت شدگی مدی تاثیر زیادی در انتقال توان مدهای منتشر شده در تقویت کننده فیبری دارد. از آنجا که پرتو سیگنال دقیقاً تک فرکانس نیست و دارای یک پهنای باند فرکانسی است بیشترین انتقال توان از مد پایه به اولین مد مرتبه بالاتر در قله ضریب جفت شدگی بین مدها رخ می دهد و مد پایه انرژی خود را به مدهای مرتبه بالاتر واگذار می کند. این امر خود منجر به ایجاد ناپایداری مدی در تقویت کننده های فیبری می شود.

مرجع ها

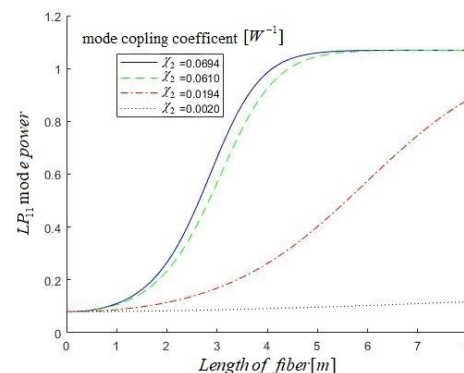
- [1] Y. Y. Fan, C. C. Ye, C. Yuan Wu, Z. P. Cai, "High power narrow line width wavelength tunable Yb^{3+} doped double clad fiber laser, Proc. Of SPIE, Passive component and fiber based devices V, Vol. 7134, P. 71342H1-8, 2008.
- [2] J. A. Alvarez-Chavez, L. DelacruzMay, A. Martinez-Rios, I. Torres-Gomez, F. Martinez-Pinon, "High power $\text{Er}^{3+}/\text{Yb}^{3+}$ doped fiber laser suitable for medical applications, IEEE. Multi conference on Electronics and Photonics, 7-10 Nov, pp. 279-281, 2006.
- [3] A. Tünnermann, T. Schreiber, and J. Limpert, "Fiber lasers and amplifiers: an ultrafast performance evolution," Appl. Opt. 49(25), F71-F78, 2010.
- [4] M. S. Kuznetsov, O. L. Antipov, A. A. Fotiadi, and P. Mégret, "Electronic and thermal refractive index changes in Ytterbium-doped fiber amplifiers", Opt. Express, Vol. 21, 22374- 22388, 2013.
- [5] م. کریمی، ک. جمشیدی قلعه، م. امنیت طلب، ا. سپهوند، آ. شوهانی، "بررسی اثرات حرارتی در تقویت کننده فیبر ایتربیومی دو غلاف"، کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، ص. ۶۸۱-۶۸۴، ۱۳۹۶.
- [6] م. کریمی، ک. جمشیدی قلعه، م. امنیت طلب، ا. سپهوند، آ. شوهانی، "محاسبه تغییرات ضریب شکست در تقویت کننده فیبری با فرض انتشار همرفت و تابشی گرما از سطح فیبر"، کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران و کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران، ص. ۶۷۷-۶۸۰، ۱۳۹۶.
- [7] K. R. Hansen, T. T. Alkeskjold, J. Broeng, and J. Lægsgaard, "Thermally induced mode coupling in rare-earth doped fiber amplifiers", Opt. Lett., Vol. 37, No. 12, pp. 2382-2384, 2012.
- [8] K. D. Cole, and P. E. Crittenden, "Steady-periodic Heating of a cylinder", Vol. 131, No. 9, pp. 09130, 2009.
- [9] A. Kumar and A.K. Ghatak, "Polarization of light with applications in optical fibers", Vol. 246. SPIE press, 2011.



شکل ۱: تغییرات ضریب جفت شدگی مدی در امتداد محور اصلی فیبر برای اختلاف فرکانس $\Delta f = 50 \text{ KHz}$



شکل ۲: تاثیر ضریب جفت شدگی مدی بر توان نرمال شده مد پایه در امتداد محور اصلی فیبر



شکل ۳: تاثیر ضریب جفت شدگی مدی بر توان نرمال شده مد مرتبه بالاتر در امتداد محور اصلی فیبر.

در این شکل تاثیر مقدار ضریب جفت شدگی مدی χ_2 در افزایش توان مد مرتبه بالاتر را نشان می دهد. مشاهده می شود توان مد LP_{11} ، با افزایش ضریب جفت شدگی مدی χ_2 افزایش می یابد. به عبارت دیگر در قله ضریب جفت شدگی توان سیگنال به راحتی از مد اول به اولین مد مرتبه