

بررسی اثرات حرارتی در تقویت کننده فیبر ایتربیومی دو غلافه

مریم کریمی^{۱*}، کاظم جمشیدی قلعه^۲، مهدی امنیت طلب^۳، امیر سپهوند^۲، آذین شوهانی^۳

^۱پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، انتهای خیابان کارگر شمالی، تهران

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

^۳گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ارومیه

چکیده - تقویت کننده‌های فیبرهای دو غلافه توان بالا به دلیل کاربردهای وسیع در صنعت و پزشکی و افزاره‌های نظامی مورد توجه قرار می‌گیرند. در این مقاله تحلیل انتقال حرارت در تقویت کننده فیبر ایتربیومی دو غلافه با فرض عدم وجود انتقال تابشی گرمایی از سطح فیبر بطور کامل تشریح شد و تاثیر عوامل مختلف مانند توان پمپ ورودی و اندازه غلاف در توزیع و دمای نقاط مختلف نسبت به طول و فاصله از مرکز در تقویت کننده فیبر ایتربیومی محاسبه شده است.

کلید واژه- اثرات حرارتی، تقویت کننده فیبر دو غلافه، فیبر ایتربیومی.

Study of Thermal Effects in Double Clad Ytterbium Doped Fiber Amplifier

Maryam Karimi¹, Kazem Jamshidi-Ghaleh², Mahdi Amniat-Talab³, Amir Sepahvand², Azin Shohani³

¹Institute of Nuclear Science and Technology, AEOI, Tehran, Iran

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

³Department of Physics, Urmia University, 11km SERO Road, Urmia, , Iran

Abstract-Double clad fiber amplifiers because of wide applications at industry, medicine and military equipment's are considered. In this paper the heat transfer analysis in double clad Ytterbium doped fiber amplifier by considering no heat radiation from fiber surface is described and effect of different factors such as input power and the second clad size at heat distribution and temperature was calculated for different points of the fiber length and the core center at Ytterbium doped fiber amplifier.

Keywords: Thermal Effects, Double Clad fiber Amplifier, Ytterbium Doped Fiber

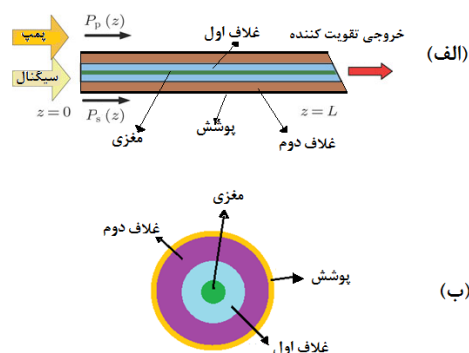
۱- مقدمه

امروزه لیزرها و تقویت‌کننده‌های مبتنی بر فیبر نسبت به سایر لیزرهای حالت جامد بیشتر مورد توجه قرار می‌گیرند که دلیل آن کیفیت بالای پرتو بالا، پایداری مطلوب بهره، نقص‌های کوانتومی کم، انعطاف پذیری آنها، نویز و جیتر پایین، و پایداری نسبت به اثرات محیطی است. به همین دلیل این نوع محیط‌های فعال کاربردهای فراوانی در صنعت، مخابرات، افزاره‌های پزشکی و صنایع دفاعی و نظامی و پردازش بر روی سطوح دارند [۱].

انتقال حرارت در یک محیط از سه طریق رسانشی، همرفت و تابش صورت می‌گیرد که به ترتیب با قانون‌های فوریه، نیوتن و استفان بولتزمن بررسی می‌شوند [۲]. در این مقاله فرض می‌شود انتشار گرما در تقویت‌کننده فیبر دوغلافه فقط از طریق رسانش صورت می‌گیرد و محیط فیبر همگن است. در مرز بین غلاف دوم و هوا، خنک سازی فیبر از طریق مبادله با هوای اطراف و انتقال همرفت گرما صورت می‌گیرد.

۲- تئوری تحلیل انتقال حرارت در تقویت کننده فیبر ایتربیومی دو غلافه

تقویت‌کننده فیبر آلاییده ایتربیومی مورد نظر دوغلافه است که مطابق شکل (۱-الف)، فقط دمش پیشرو در فیبر در نظر گرفته شده است. این فیبرهای چند مد بیشتر در صنعت کاربرد دارند. در شکل (۱-ب)، مقادیر a ، b و c به ترتیب شعاع مغزی، غلاف اول و دوم در فیبر است.



شکل (۱): الف- چیدمان تقویت‌کننده فیبر دو غلافه و ب- سطح مقطع فیبر دوغلافه آلاییده به ایتربیوم.

برش مورب در انتهای تقویت کننده برای جلوگیری از انعکاس پرتو به سمت ورودی و ورود آن به منابع نوری در ابتدای فیبر انجام می‌شود، این کار از آسیب منبع پمپ

مانعت می‌کند. در این مقاله از اثرات پوشش خارجی فیبر در محاسبات صرف نظر شده است. پرتو سیگنال و پمپ ورودی در این مقاله موج پیوسته و شکل سرخ^۱ در نظر گرفته شده است.

۱-۲- معادلات نرخ در تقویت کننده فیبری

تغییرات توان پمپ و سیگنال از معادلات نرخ به دست می‌آید [۳]:

$$\frac{dP_p(z)}{dz} = \Gamma_p \left[(\sigma_a^p + \sigma_e^p) N_2(z) - \sigma_a^p N_T \right] P_p(z) - \alpha_p P_p(z), \quad (1)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz} = \Gamma_s \left[(\sigma_a^s + \sigma_e^s) N_2(z) - \sigma_a^s N_T \right] P_s(z) - \alpha_s P_s(z). \quad (2)$$

که در آن P_p و P_s توان سیگنال و پمپ و σ_a^p ، σ_e^p ، σ_a^s و σ_e^s نشان دهنده سطح مقطع‌های جذب و گسیل در طول موج‌های سیگنال و دمش هستند. Γ_s و $\Gamma_p = \frac{S_D}{S_T}$ ضریب هم‌پوشانی سیگنال و پمپ در مد اصلی فیبر و S_D و S_T به ترتیب سطح مقطع مغزی و غلاف هستند. τ ، طول عمر تراز پایدار، α_p و α_s ضریب تلفات انتشاری، شامل تلفات زمینه و پراکندگی در طول موج‌های پمپ و سیگنال و N_T ، چگالی آلاینده بر حسب ion/m^3 است. چگالی آلاینده در تراز تحریکی N_2 در طول z ، از فیبر از رابطه زیر به دست می‌آید [۳]:

$$N_2(z) = \frac{\left(\frac{P_p(z) \sigma_a^p \Gamma_p \lambda_p}{hcA} + \frac{P_s(z) \sigma_a^s \Gamma_s \lambda_s}{hcA} \right) N_T}{\frac{P_p(z) (\sigma_a^p + \sigma_e^p) \Gamma_p \lambda_p}{hcA} + \frac{P_s(z) (\sigma_a^s + \sigma_e^s) \Gamma_s \lambda_s}{hcA} + \frac{1}{\tau}} \quad (3)$$

که در آن τ ، h و c به ترتیب طول عمر تراز پایدار، ثابت پلانک و سرعت نور است، λ_p و λ_s بسامد در طول موج-های سیگنال و دمش و A مساحت مغزی فیبر است. توزیع آلاینده در مغزی یکنواخت فرض شده و از اثرات گسیل خودبه‌خودی تقویت شده صرف نظر می‌شود.

۲-۲- معادلات توزیع دما در محیط فیبری

با صرف نظر از انتشار گرما در طول فیبر و راستای شعاعی، تغییرات حرارتی در مختصات استوانه‌ای در داخل فیبر دو

^۱Top Hat Profile

$$K_3 \frac{dT_{clad2}(r=c)}{dr} = h(T_c - T_{clad2}(r=c)) \quad (11)$$

در معادلات فوق h ضریب انتقال همرفت^۲، K_1 ، K_2 و K_3 ضریب هدایت گرمایی در ناحیه، مغزی، غلاف اول و دوم است. حل معادلات (۶ - ۷) بر طبق شرایط مرزی (۸-۱۰) در نواحی مغزی و غلافها به صورت زیر خواهد بود:

$$T_{core}(r) = T_0 + \frac{Q(z)r^2}{4K_1} \quad (0 \leq r \leq a) \quad (12)$$

$$T_{clad1}(r) = T_0 - \frac{Q(z)a^2}{4K_1} - \frac{Q(z)a^2}{2K_2} \ln\left(\frac{r}{a}\right) \quad (a \leq r \leq b) \quad (13)$$

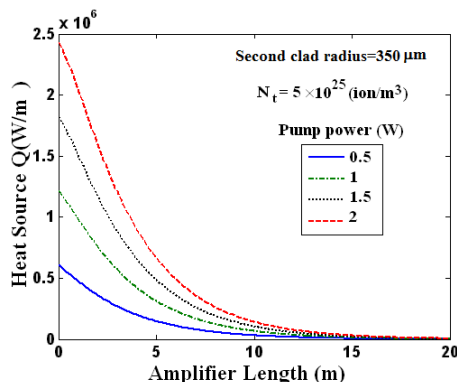
$$T_{clad2}(r) = T_0 - \frac{Q(z)a^2}{4K_1} - \frac{Q(z)a^2}{2K_2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) - \frac{Q(z)a^2}{2K_3} \ln\left(\frac{r}{b}\right) \quad (b \leq r \leq c) \quad (14)$$

در معادلات (۱۱-۱۳) T_0 دمای مرکز فیبر به دمای محیطی که فیبر آن قرار گرفته، T_c وابسته بوده و از رابطه زیر به دست می آید:

$$T_0 = T_c + \frac{Q(z)a^2}{2hc} + \frac{Q(z)a^2}{4K_1} + \frac{Q(z)a^2}{2K_2} \ln\left(\frac{b}{a}\right) + \frac{Q(z)a^2}{2K_3} \ln\left(\frac{c}{b}\right) \quad (15)$$

۳- نتایج شبیه سازی

در جدول (۱) مقادیر پارامترهای مورد استفاده در این شبیه سازی آمده است. با حل معادلات نرخ و قراردادن آن در معادلات (۱۲ تا ۱۴) تغییرات دمایی و انرژی ذخیره شده در هر نقطه از شعاع فیبر به دست می آید.



شکل ۲: تغییرات چگالی گرمایی ذخیره شده در تقویت کننده فیبری بر حسب طول تقویت کننده برای توان های پمپ مختلف.

همان طور که از شکل (۲) مشاهده می شود، با افزایش توان

غلافه از رابطه زیر به دست می آید [۴]:

$$\nabla(-K\nabla T) = Q(z), \quad (4)$$

که برای نواحی مختلف معادله انتشار گرما به صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{core}(r)}{\partial r} \right) = -\frac{Q(z)}{K_1}, \quad (0 \leq r \leq a) \quad (5)$$

و برای ناحیه غلاف داریم:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T_{clads}(r)}{\partial r} \right) = 0, \quad (a \leq r \leq c) \quad (6)$$

در عبات فوق r ، مختصه شعاعی فیبر، K_1 ضریب هدایت گرمایی در محیط (شیشه)، T_{core} و T_{clads} به ترتیب دما در ناحیه مغزی و غلافها است. $Q(z)$ گرمای تولید شده در محیط بهره، منبع گرمای تولید شده در فیبر معمولاً به دلیل نقص های کوانتومی و پراکندگی در ناحیه آلائیده فیبر در نظر گرفته و در مقالات مختلف مقدار تقریبی آن بسته به نوع محیط فعال و سایر شرایط متفاوت در نظر گرفته می شود [۵ و ۶] و مقدار آن از رابطه زیر به دست می آید [۱]:

$$Q(z) = \frac{\alpha P_{abs}(z)}{\pi a^2} (1-S) \quad (7)$$

که در آن $\alpha = \alpha_s(x) + \alpha_p$ ، که در آن α_p تلفات در طول موج دمش و $\alpha_s(x)$ ضریب پراکندگی است. S ضریب بهره کوانتومی است که مقدار آن λ_p/λ_s و $P_{abs}(z)$ توان جذب شده در فیبر است که برای یک تقویت کننده $P_{abs}(z) = P_p(z)$ در نظر گرفته می شود [۱]. با فرض آنکه اتصال بین ناحیه غلاف و مغزی کامل باشد آنگاه طبق شرایط مرزی دما و مشتق آن در مرزها پیوسته است، بنابراین شرایط مرزی در مرکز فیبر به صورت زیر است:

$$dT_{core}(r=0)/dr = 0 \rightarrow T_{core}(r=0) = cte \quad (8)$$

شرایط مرزی در مزر بین غلاف اول و مغزی به صورت:

$$T_{core}(a) = T_{clad1}(a), K_1 \frac{dT_{core}(r=a)}{dr} = K_2 \frac{dT_{clad1}(r=a)}{dr} \quad (9)$$

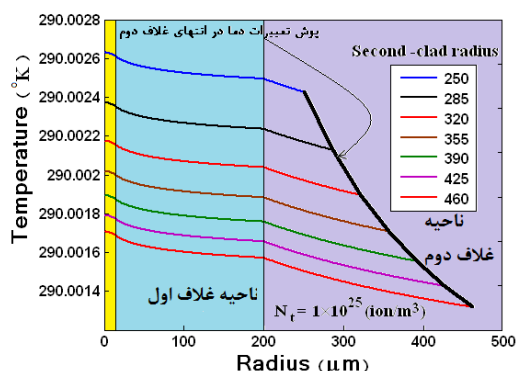
شرایط مرزی در غلاف اول و دوم:

$$T_{clad1}(b) = T_{clad2}(b), K_2 \frac{dT_{clad1}(r=b)}{dr} = K_3 \frac{dT_{clad2}(r=b)}{dr} \quad (10)$$

با صرف نظر از مشخصات گرمایی پوشش نازک خارجی و تبادل گرمایی با محیط شرایط مرزی در انتهای غلاف دوم به صورت زیر خواهد بود:

^۲Convective Heat Transfer

کاهش می‌یابد. این کاهش دمای مرکز فیبر برای اختلاف اندازه غلاف دوم در حدود ۲۰۰ میکرون در حدود ۱ میلی درجه است.



شکل ۴: تغییرات دمای فیبر در تقویت کننده فیبر دو غلافه ایتربیومی بر حسب فاصله از مرکز برای مقادیر مختلف اندازه غلاف دوم.

نتیجه‌گیری

در این مقاله معادلات توزیع گرما در تقویت کننده فیبر ایتربیومی دو غلافه توان بالا با فرض انتقال رسانی گرما و مقادیر مختلف ضریب رسانندگی گرمایی برای سه ناحیه مختلف مغزی و غلاف اول و دوم تشریح شد. محاسبات نشان می‌دهد توزیع گرما در ابتدای تقویت کننده فیبری بیشینه است و با افزایش طول فیبر کاهش می‌یابد. همچنین توزیع چگالی حرارتی به توان دمش ورودی وابسته است. شبیه سازی نشان می‌دهد که بزرگ بودن اندازه غلاف باعث انتشار سریعتر گرما از مغزی شده و دمای مرکز فیبر بطور نسبی کاهش می‌یابد.

مراجع

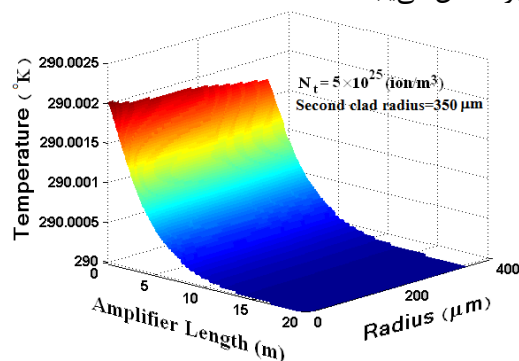
- [1] M. Abouricha, A. Boulezhar, N. Habiballah, "The Comparative Study of the Temperature Distribution of Fiber Laser with Different Pump Schemes", Open J. Metal, Vol. 3, pp. 64-71, 2013.
- [2] جی. پی. هولمن, "انتقال گرما", انتشار مرکز نشر دانشگاهی, ۱۳۷۸.
- [3] مریم کریمی, "طراحی و تحلیل تقویت کننده فیبر حفره دار ایتربیومی با ساختار لانه زنبوری", کنفرانس فیزیک ایران, ۱۳۹۴, دانشگاه فردوسی مشهد.
- [4] M. Abouricha, A. Boulezhar, N. Habiballah, "The Comparative Study of the Temperature Distribution of Fiber Laser with Different Pump Schemes", Open J. Metal, Vol. 3, pp. 64-71, 2013.
- [5] M. André Lapointe, S. Chatigny, M. Piché, M. C. Skaff, J. N. Maran, "Thermal effects in HIGH power cw fiber lasers", Proceedings Vol. 7195, Fiber Lasers VI: Technology, Systems, and Applications, 71951U, 2009.
- [6] J. Li, Y. Chen, M. Chen, H. Chen, X. Jin, Y. Yang, Z. Dai, Y. Liu, "Theoretical analysis and heat dissipation of mid-infrared chalcogenide fiber Raman laser", Opt. Commun., Vol. 284, pp. 1278-1283, 2011.
- [7] H. M. Pask, Robert J. Carman, David C. Hanna, Anne C. Tropper, Colin J. Mackechnie, Paul R. Barber, and Judith M. Dawes, "Ytterbium-Doped Silica Fiber Lasers: Versatile Sources for the 1-1.2 μm Region", IEEE. J. of Quant. Electron. Vol. 1, pp. 2-13, 1995.

پمپ ورودی مقدار گرما در ابتدای فیبر افزایش می‌یابد. در این شکل مشاهده می‌شود در طول بیش از ۱۵ متر عملاً حرارتی وجود ندارد، دلیلی این حالت اشباع فیبر به دلیل توان پمپ و سیگنال بالا است.

جدول (۱): مقادیر پارامترهای مورد استفاده در شبیه سازی اثرات حرارتی در تقویت کننده فیبر ایتربیومی دو غلافه.

مقدار	علامت	پارامتر
۱۵ μm	a	شعاع مغزی
۱۰۱۰ (nm)	λ_s	طول موج سیگنال
۹۷۵ (nm)	λ_p	طول موج پمپ
۰/۸۵ ms	T	طول عمر تراز پایدار
۵ dB/km	α_s	تلفات در طول موج سیگنال
۶ dB/km	α_p	تلفات در طول موج پمپ
$2/5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	σ_p^a	سطح مقطع جذب پمپ [۳]
$2/5 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	σ_p^e	سطح مقطع گسیل پمپ [۳]
$1/4 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	σ_s^a	سطح مقطع جذب سیگنال [۳]
$2 \times 10^{-25} \text{ m}^2$	σ_s^e	سطح مقطع گسیل سیگنال [۳]
۱ W	P_p	توان پمپ ورودی
۱۰۰ mW	P_s	توان سیگنال ورودی
۲۹۰°C	T_c	دمای سطح فیبر
۱/۳۸	k_1	هدایت گرمایی در مغزی
۱/۳۹	k_2	هدایت گرمایی در غلاف اول
۰/۲	k_3	هدایت گرمایی در غلاف دوم
۲۰۰ μm	b	شعاع غلاف اول

در شکل (۳)، تغییرات دما بر حسب طول انتشار تقویت کننده و برای فواصل (نقاط) مختلف از مرکز فیبر ترسیم شده است. همان طور که از شکل مشاهده می‌شود نقطه ورودی (0=z)، در مرکز فیبر بالاترین دما را دارد و با انتشار توان در فیبر و افت توان پمپ ورودی دما در طول فیبر کاهش می‌یابد.



شکل ۳: تغییرات دما بر حسب فاصله از مرکز فیبر و طول تقویت کننده فیبر ایتربیومی.

در شکل (۴)، تغییرات دما بر حسب فاصله از مرکز برای مقادیر مختلف اندازه غلاف دوم بر حسب فاصله از مرکز فیبر ترسیم شده است. هرچه اندازه مغزی دوم بیشتر باشد گرمای بیشتری از فیبر دفع شده و دمای مرکز آن