بررسی اثرات حرارتی در تقویت‌کننده فیبر ایتربیومی دو غلافه

مریم کریمی[۱*]، کاظم جمشیدی قلعه[۲] ، مهدی امنیت طلب[۳]، امیر سپهوند[۲]، آذین شوهانی[۳]

[۱]پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی، انتهای خیابان کارگر شمالی ، تهران
[۲]گروه فیزیک، دانشکده علوم پایه، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان
[۳]گروه 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 Karimi[1], Kazem Jamshidi-Ghaleh[2], Mahdi Amniat-Talab[3], Amir Sepahvand[2], Azin Shohani[3]

[1]Institute of Nuclear Science and Technology, AEOI, Tehran, Iran
[2]Department of Physics, Azarbaijan Shahid Madani University, West Azarbaijan, Tabriz, Iran
[3]Department 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

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

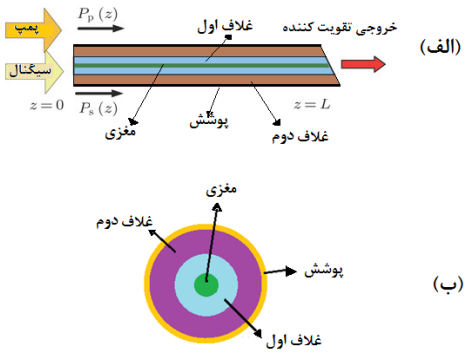
۱- مقدمه

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 کوانتمی 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 به‌ترتیب 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 ممانعت می‌کند. در این مقاله از اثرات پوشش خارجی فیبر در محاسبات صرف‌نظر شده است. پرتو سیگنال و پمپ ورودی در این مقاله موج پیوسته و شکل سرپخ[۱] در نظر گرفته شده است.

۲-۱- معادلات نرخ در تقویت کننده فیبری

تغییرات توان پمپ و سیگنال از معادلات نرخ به‌دست می آید [۳]:

$$\frac{dP_p(z)}{dz}=\Gamma_p\left[\left(\sigma_a^p+\sigma_e^p\right)N_2(z)-\sigma_a^p N_T\right]P_p(z)-\alpha_p P_p(z), \quad (۱)$$

$$\frac{dP_s(z)}{dz}=\Gamma_s\left[\left(\sigma_a^s+\sigma_e^s\right)N_2(z)-\sigma_a^s N_T\right]P_s(z)-\alpha_s P_s(z). \quad (۲)$$

که در آن P_s و P_p توان سیگنال و پمپ و σ_a^s، σ_a^p و σ_e^s و σ_e^p نشان دهنده سطح مقطع‌های جذب و گسیل در طول‌موج‌های 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 به‌دست می‌آید [۳]:

$$N_2(z)=\frac{\left(\frac{(P_p(z))\sigma_a^p\Gamma_p\lambda_p}{hcA}+\frac{(P_s(z))\sigma_a^s\Gamma_s\lambda_s}{hcA}\right)N_T}{\frac{P_p(z)(\sigma_a^p+\sigma_e^p)\Gamma_p\lambda_p}{hcA}+\frac{P_s(z)(\sigma_a^s+\sigma_e^s)\Gamma_s\lambda_s}{hcA}+\frac{1}{\tau}} \quad (۳)$$

که در آن τ، h و c به‌ترتیب طول عمر تراز پایدار، ثابت پلانک و سرعت نور است، λ_s و λ_p بسامد در طول‌موج‌های سیگنال و دمش و A مساحت مغزی فیبر است. توزیع آلاینده در مغزی یکنواخت فرض شده و از اثرات گسیل خودبه‌خودی تقویت شده صرف‌نظر می‌شود.

۲-۲- معادلات توزیع دما در محیط فیبری

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

[۱] Top Hat Profile

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

غلافه از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۴]:

$$\nabla(-K\nabla T)=Q(z), \qquad (۴)$$

که برای نواحی مختلف معادله انتشار گرما به‌صورت زیر خواهد بود:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_{core}(r)}{\partial r}\right)=-\frac{Q(z)}{K_1}, \qquad (0\le r\le a) \qquad (۵)$$

و برای ناحیه غلاف داریم:

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r\frac{\partial T_{clads}(r)}{\partial r}\right)=0 \qquad ,(a\le r\le c) \qquad (۶)$$

در عبات فوق r، مختصه شعاعی فیبر، K_1، ضریب هدایت گرمایی در محیط (شیشه)، T_{core} و T_{clads}، به‌ترتیب دما در ناحیه مغزی و غلاف‌ها است. $Q(z)$، گرمای تولید شده در محیط بهره، منبع گرمای تولید شده در فیبر معمولاً به دلیل نقص‌های کوانتمی و پراکندگی در ناحیه آلاییده فیبر در نظر گرفته و در مقالات مختلف مقدار تقریبی آن بسته به نوع محیط فعال و سایر شرایط متفاوت در نظر گرفته می‌شود [۵ و ۶] و مقدار آن از رابطه زیر به‌دست می‌آید [۱]:

$$Q(z)=\frac{\alpha P_{abs}(z)}{\pi a^2}(1-S) \qquad (۷)$$

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 کوانتمی 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 می‌شود [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 به‌صورت زیر است:

$$dT_{core}(r=0)/dr=0 \;\rightarrow T_{core}(r=0)=cte \qquad (۸)$$

شرایط مرزی در مرز بین غلاف اول و مغزی به‌صورت:

$$T_{core}(a)=T_{clad1}(a),\; K_1\frac{dT_{core}(r=a)}{dr}=K_2\frac{dT_{clad1}(r=a)}{dr} \qquad (۹)$$

شرایط مرزی در غلاف اول و دوم:

$$T_{clad1}(b)=T_{clad2}(b), K_2\frac{dT_{clad1}(r=b)}{dr}=K_3\frac{dT_{clad2}(r=b)}{dr} \qquad (۱۰)$$

با صرف‌نظر از مشخصات گرمایی پوشش نازک خارجی و تبادل گرمایی با محیط شرایط مرزی در انتهای غلاف دوم به‌صورت زیر خواهد بود:

$$K_3\frac{dT_{clad2}(r=c)}{dr}=h\left(T_c-T_{clad2}(r=c)\right) \qquad (۱۱)$$

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 به‌صورت زیر خواهد بود:

$$T_{core}(r)=T_0+\frac{Q(z)r^2}{4K_1} \quad (0\le r\le a) \qquad (۱۲)$$

$$T_{clad1}(r)=T_0-\frac{Q(z)a^2}{4K_1}-\frac{Q(z)a^2}{2K_2}Ln\left(\frac{r}{a}\right)(a\le r\le b) \qquad (۱۳)$$

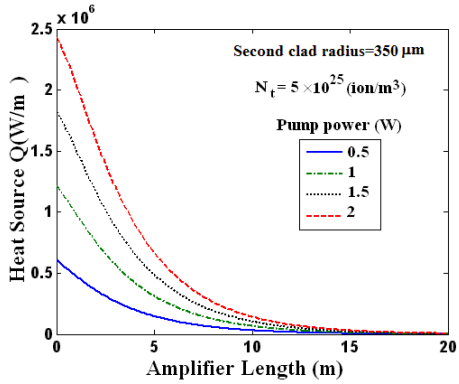
$$T_{clad2}(r)=T_0-\frac{Q(z)a^2}{4K_1}-\frac{Q(z)a^2}{2K_2}Ln\left(\frac{b}{a}\right)-\frac{Q(z)a^2}{2K_3}Ln\left(\frac{r}{b}\right) \qquad (b\le r\le c) \qquad (۱۴)$$

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

$$T_0=T_c+\frac{Q(z)a^2}{2hc}+\frac{Q(z)a^2}{4K_1}+\frac{Q(z)a^2}{2K_2}Ln\left(\frac{b}{a}\right)+\frac{Q(z)a^2}{2K_3}Ln\left(\frac{c}{b}\right) \qquad (۱۵)$$

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 به‌دست می‌آید.



شکل ۲: تغییرات چگالی گرمایی ذخـــیره شده در تقویت‌کننده فیبری بر حسب طول تقویت کننده برای توان‌های پمپ مختلف.

همان‌طورکه از شکل (۲) مشاهده می‌شود، با افزایش توان

[۲] Convective Heat Transfer

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

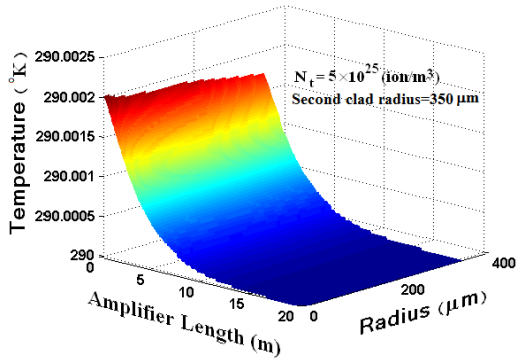
[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]

پمپ ورودی مقدار گرما در ابتدای فیبر افزایش می‌یابد. در این شکل مشاهده می‌شود در طـــــول 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.

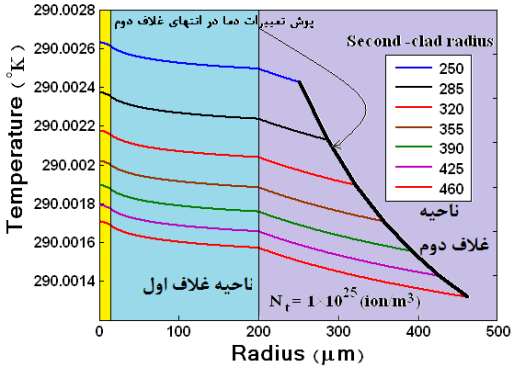
پارامتر	علامت	مقدار
شعاع مغزی	a	۱۵ µm
طول موج سیگنال	λ_s	۱۰۱۰ (nm)
طول موج پمپ	λ_p	۹۷۵ (nm)
طول عمر تراز پایدار	T	۰/۸۵ ms
تلفات در طول موج سیگنال	α_S	۵ dB/km
تلفات در طول موج پمپ	α_P	۶ dB/km
سطح مقطع جذب پمپ [۳]	σ_p^a	$۲/۵\times۱۰^{-۲۴}$ m^2
سطح مقطع گسیل پمپ [۳]	σ_p^e	$۲/۵\times۱۰^{-۲۴}$ m^2
سطح مقطع جذب سیگنال [۳]	σ_s^a	$۱/۴\times۱۰^{-۲۷}$ m^2
سطح مقطع گسیل سیگنال [۳]	σ_s^e	۲×۱۰^{-۲۵} m^2
توان پمپ ورودی	P_p	۱ W
توان سیگنال ورودی	P_s	۱۰۰ mW
دمای سطح فیبر	T_c	۲۹۰°C
هدایت گرمایی در مغزی	k_1	۱/۳۸
هدایت گرمایی در غلاف اول	K_2	۱/۳۹
هدایت گرمایی در غلاف دوم	K_3	۰/۲
شعاع غلاف اول	b	۲۰۰ µm

در شکل(۳)، تغییرات دما بر حسب طول انتشار تقویت کننده و برای فواصل (نقاط) مختلف از مرکز فیبر ترسیم شده است. همان‌طور که از شکل مشاهده می‌شود نقطه ورودی (z=0)، 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 اریتربیومی.

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 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 رسانشی گرما و مقادیر مختلف ضریب رسانندگی گرمایی برای سه ناحیه مختلف مغزی و غلاف اول و دوم تشرح شد. محاسبات نشان می‌دهد توزیع گرما در ابتدای تقویت‌کننده 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.

[۲] جی. پی. هولمن، "انتقال گرما"، انتشار مرکز نشر دانشگاهی، ۱۳۷۸.

[۳] مریم کریمی، "طراحی و تحلیل تقویت‌کننده فیبر حفره‌دار 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 pm Region", IEEE. J. of Quant. Electron. Vol. 1, pp. 2-13, 1995.

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

[Downloaded from opsi.ir on 2026-02-07]