

Capítulo 5 Diseño de un Amplificador de Tulio a 2 μm Mediante el Método ASE

Chapter 5 2 μm Thulium Amplifier Design with ASE Method

PÉREZ-SÁNCHEZ, Grethell Georgina†, BERTOLDI-MARTINS, Indayara y MIRANDA-TELLO, José Raúl

Universidad Autónoma Metropolitana, Depto. Electrónica-Unidad Azcapotzalco

ID 1^{er} Autor: *Grethell Georgina, Pérez-Sánchez* / **ORC ID:** 0000-0002-5505-6226, **Researcher ID Thomson:** C-8641-2018, **Open ID:** 55850680000, **CVU CONACYT-ID:** 230934

ID 1^{er} Coautor: *Indayara, Bertoldi-Martins* / **ORC ID:** 0000-0002-9158-3680, **arXiv Author ID:** 2417356, **CVU CONACYT-ID:** 597864

ID 2^{do} Coautor: *José Raúl, Miranda-Tello* / **ORC ID:** 0000-0002-5888-5732, **Researcher ID Thomson:** S-5878-2018, **CVU CONACYT-ID:** 101411

G. Pérez, I. Bertoldi y J. Miranda

ggps@correo.azc.uam.mx

A. Marroquín, H. Corres y L. Carpio. (Dir.) Ciencias de la Ingeniería y Tecnología. Handbooks-©ECORFAN-Mexico, Queretaro, 2018.

Abstract

Current fiber optic communication systems demand greater bandwidth, which is possible using longer wavelength bands. This article shows the results of the design of a Thulium doped fiber amplifier (TDFA) with operation at 2 μm . For the proposed design, the analytical solution of the amplified spontaneous emission (ASE) model was implemented. In the optimization of the amplifier, the intrinsic physicochemical values of the doped fiber were fixed, and both, the length of the optical fiber and the pumping power were varied. The results show the output power of the signal and the gain response of the amplifier with respect to the length of the fiber for different pump powers, as well as the power response of the amplifier with respect to the wavelength. It is observed that for greater fiber length, a greater signal power is obtained; however, a higher pumping power is required. The amplifier has a spectral range from 1900 to 2100 nm showing its maximum gain at 2010 nm.

TDFA, 2 μm , ASE

1. Introducción

En 2012 A.D. Ellis publicó un trabajo en donde muestra la necesidad de utilizar nuevas fibras ópticas basándose en el límite de capacidad que se tiene en los sistemas de comunicaciones actuales con las fibras ópticas utilizadas, proponiendo diferentes opciones de fibra para los sistemas de comunicaciones como son: múltiples fibras monomodo estándar, fibras multinúcleo, fibras de pocos modos con múltiples entradas y múltiples salidas y fibras fotónicas con núcleo hueco [1]. En 2012 se hizo la primera demostración de transmisión de datos utilizando una nueva banda de longitudes de onda centrada en 2 μm , banda en la cual se incrementaría la capacidad en los sistemas de comunicaciones ópticas [2, 3], también se han demostrado transmisiones de datos de 100 Gbps con fibras de núcleo sólido y núcleo hueco operando a 2 μm [4]. Sin embargo, cuando se propone una nueva banda de longitudes de onda en los sistemas de comunicaciones, es necesario diseñar dispositivos que operen en esta banda de manera eficiente. Uno de los dispositivos más recurrentes en los sistemas de comunicaciones de mediano y largo alcance son los amplificadores, ya que estos permiten enlaces de cientos de kilómetros sin necesidad de regeneración de la señal.

Amplificadores de Fibra dopada con Tulio (TDFA)

El Tulio (Tm) es un elemento activo clasificado dentro de los lantánidos (tierras raras), el cual cuenta con varias transiciones energéticas, lo cual reduce su eficiencia energética de conversión.

Existen metodologías de diseño de amplificadores que utilizan como principio de funcionamiento la Emisión Espontánea Amplificada (ASE). Las fibras ópticas dopadas con Tulio se emplearon en un inicio para diseñar TDFA en las bandas alrededor de 1470 nm y 1650 nm [5, 6] utilizadas en los sistemas de comunicaciones ópticas actuales. Sin embargo, una fibra dopada con Tulio con la excitación correcta puede operar a longitudes de onda mayores, alrededor de 2 μm , que es una banda de longitudes de onda que se ha vislumbrado como la posible siguiente ventana de comunicaciones ópticas. Se han encontrado en la literatura los resultados experimentales de Amplificadores de Tulio para operar en la banda centrada en 2 μm [7].

En este capítulo se muestra una metodología de diseño de un TDFA para que opere de manera óptima en la banda de 2 μm usando una fibra comercial y tomando como parámetros variables de diseño únicamente, la potencia de entrada y la longitud de la fibra, con la finalidad de obtener una máxima ganancia del amplificador, para el diseño se utiliza la solución analítica de las ecuaciones de razón de Einstein mostrada en [8 y 9]. En la primera sección de este capítulo se presentan las características espectrales de absorción y emisión de una fibra óptica dopada con Tulio, así como las ecuaciones en las cuales basaremos nuestro diseño, y la descripción de cada una de las variables de éstas.

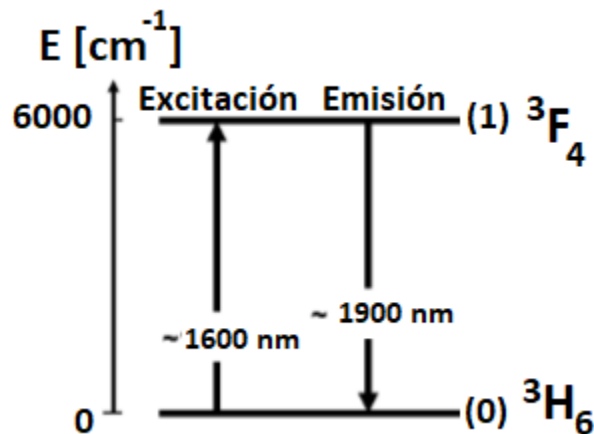
En la siguiente sección se muestran los resultados del diseño de un amplificador de fibra, variando la potencia de entrada, así como la longitud de la fibra para el diseño óptimo de un amplificador TDFA a 2 μm .

2. Diseño del Amplificador

Las fibras dopadas son elementos activos, que al ser excitados con una cierta longitud de onda producen diferentes transiciones energéticas, una de ellas se presenta cuando los electrones que se encuentran en estado basal en el nivel energético (E_0) pasan a un nivel energético superior (E_i), y después de permanecer un cierto tiempo de vida (τ) en el estado excitado, los iones excitados decaen espontáneamente emitiendo fotones a una longitud de onda mayor que con la que se excitó al dopante, a esta interacción se le denomina ASE.

Al ocurrir esta emisión de forma espontánea, los fotones generados no tienen coherencia entre sí y la longitud de onda de emisión puede variar alrededor de una longitud de onda central. En la figura 5.1 se observan las transiciones de los iones de Tulio para el diseño del TDFA a $2 \mu\text{m}$.

Figura 5.1 Transiciones de los niveles energéticos de los iones de Tm^{3+}

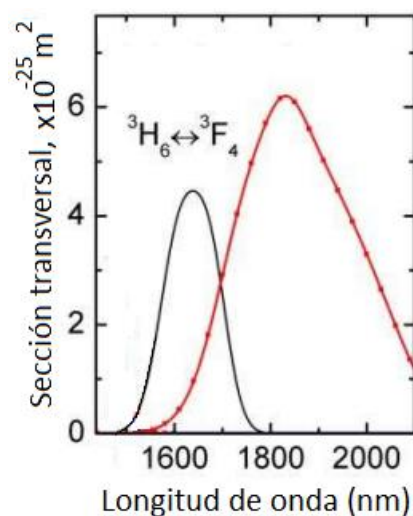


Fuente: Elaboración Propia

Tanto las longitudes de onda de absorción y de emisión, como la eficiencia de conversión energética en la transición dependerán de las características intrínsecas de cada dopante. Para el diseño del TDFA es necesario conocer las características espectrales de la fibra dopada con Tulio con la cual se diseñará el amplificador, así como la geometría de esta.

En la figura 5.2 se muestran las secciones transversales de absorción y emisión de la fibra óptica dopada con Tulio obtenidas de [10]. Se puede observar que, entre 1500 nm y 1750 nm se encuentra la sección transversal de absorción de la fibra, la cual indica las longitudes de onda de excitación de la fibra para obtener una emisión entre 1600 y 2100 nm , por lo que es necesario emplear una fuente de bombeo (láser) que opere a la longitud de onda adecuada para obtener la emisión deseada.

Figura 5.2 Secciones transversales de absorción (negro) y emisión (rojo) de la fibra dopada con Tulio [8]



Fuente: Elaboración Propia

Se utilizará el método propuesto en [11] para el diseño de amplificadores utilizando ASE, con base en las ecuaciones de razón de Einstein, el cual se describe a continuación:

$$\frac{dP_b(z)}{dz} = -\gamma_a(z)P_b(z) \quad (1)$$

$$\frac{dP_{s_{\pm}}^+(z, \lambda_i)}{dz} = \pm \{Emi(z, \lambda_i)[P_{s_{\pm}}^+(z, \lambda_i) + P_0] - Abs(z, \lambda_i)P_{s_{\pm}}^+(z, \lambda_i)\} \quad (2)$$

Donde:

$P_b(z)$: Es la potencia de la excitación o bombeo que se propaga en dirección longitudinal de la fibra (z).

$\gamma_a(z)$: Indica el coeficiente de absorción.

$Emi(z, \lambda_i)$: Es la amplificación de emisión espontánea.

$Abs(z, \lambda_i)$: Es el coeficiente de la absorción de emisión espontánea.

$P_{s_{\pm}}^+(z, \lambda_i)$: Es la potencia de la señal de salida de la fibra, en dirección de copropagación (P_+) y contrapropagación (P_-).

P_0 : Indica la cantidad de potencia equivalente de ruido a la entrada.

Para poder realizar el cálculo analítico de las ecuaciones 1 y 2 se toman en cuenta las consideraciones de [9]. La potencia equivalente de ruido a la entrada se expresa como:

$$P_0 = 2hf_e\Delta_s \quad (3)$$

$$\Delta_s = \frac{c}{\lambda_s^2} \Delta\lambda_s \quad (4)$$

Donde:

f_e : Frecuencia de emisión.

h : Es la constante de Planck.

λ_s : Representa la longitud de onda de emisión.

Δ_s : Representa el incremento del barrido, calculada con la ecuación 4.

c : Es la constante de la velocidad de la luz en el vacío.

$\Delta\lambda_s$: Indica el incremento de barrido a lo largo de la longitud onda.

Conociendo estos parámetros podemos entonces calcular $\gamma_a(z)$ que es el coeficiente de absorción.

$$\gamma_a(z) = \frac{N_T\sigma_b}{\frac{P_b(z)}{P_u+1}} \quad (5)$$

Donde:

N_T Es la concentración total de iones del dopante por cm^3 .

σ_b Es la sección transversal de potencia de bombeo.

P_u Representa la potencia de umbral.

En el caso particular que la potencia de bombeo sea menor que la potencia de umbral: $P_b(z) < P_u$, será tomado como la potencia de umbral. Para el cálculo de la potencia de umbral se considera la ecuación 6:

$$P_u = \pi r^2 \frac{hf_b}{\sigma_b\tau} \quad (6)$$

Donde:

f_b Indica la frecuencia de bombeo.

r^2 Representa el radio del núcleo de la fibra

τ Representan el tiempo de vida del dopante.

En el caso que $P_b(z) > P_u$, se considerará el cálculo de la ecuación 1 como:

$$\frac{dP_b(z)}{dz} = -N_T \pi r^2 \frac{hf_b}{\tau} \quad (7)$$

Para resolver la ecuación 7 se establece la condición inicial $P_b(0) = P_{in}$ donde P_{in} es la potencia inicial de bombeo acoplada a la fibra.

$$P_b(z) = P_{in} - \left(N_T \pi r^2 \frac{hf_b}{\tau} \right) z \quad (8)$$

Ahora para la solución de la ecuación 2 se considera:

$$Emi(z, \lambda_i) = \frac{N_T \sigma_e(\lambda_i)(1-\Gamma) \left(\frac{P_u(z)}{P_b} \right)}{\frac{P_u(z)}{P_b} + 1} \quad (9)$$

$$Abs(z, \lambda_i) = \frac{N_T \sigma_a(\lambda_i)(1-\Gamma)}{\frac{P_u(z)}{P_b} + 1} \quad (10)$$

$$EmiAbs(z, \lambda_i) = Emi(z, \lambda_i) - Abs(z, \lambda_i) \quad (11)$$

Donde el factor de superposición Γ para la propagación de emisión espontánea amplificada descrito en la ecuación 12.

$$\Gamma = \exp\left(\frac{-r^2}{\omega_s^2}\right) \quad (12)$$

σ_e Representa la sección transversal de emisión

σ_a Representa la sección transversal de absorción

ω_s^2 Indica el tamaño de apertura de la fibra (spot size)

$$P_{s+}(z, \lambda_i) = \left(\frac{Emi(z, \lambda_i)}{EmiAbs(z, \lambda_i)} P_0 e^{zEmiAbs(z, \lambda_i)} - \frac{Emi(z, \lambda_i)}{EmiAbs(z, \lambda_i)} P_0 \right) \quad (13)$$

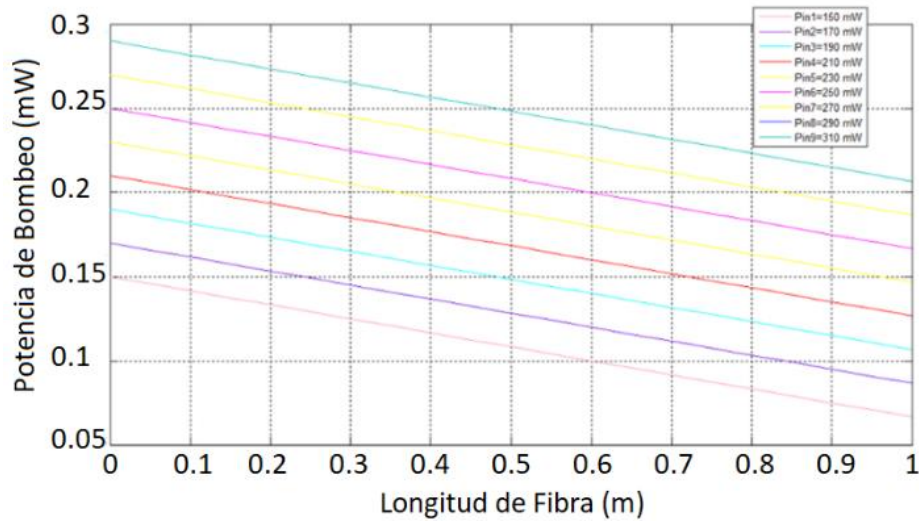
$$P_{s-}(z, \lambda_i) = \left(\frac{Emi(z, \lambda_i)}{EmiAbs(z, \lambda_i)} P_0 e^{(L-z)EmiAbs(z, \lambda_i)} - \frac{Emi(z, \lambda_i)}{EmiAbs(z, \lambda_i)} P_0 \right) \quad (14)$$

De las expresiones anteriores del método de diseño de un amplificador basado en ASE, los únicos parámetros que se pueden modificar para obtener el amplificador deseado en una fibra dopada una vez fabricada, son: la frecuencia de la fuente de bombeo (f_b), la potencia de bombeo inicial acoplada a la fibra (P_{in}) y la longitud total de la fibra (L), esto debido a que los demás son valores intrínsecos de la fibra.

3. Método de Optimización de Diseño para TDFA a 2 μ m

En esta sección se realiza una comparativa de la respuesta en potencia de salida del TDFA con la modificación de las variables de diseño (potencia de entrada y longitud la fibra).

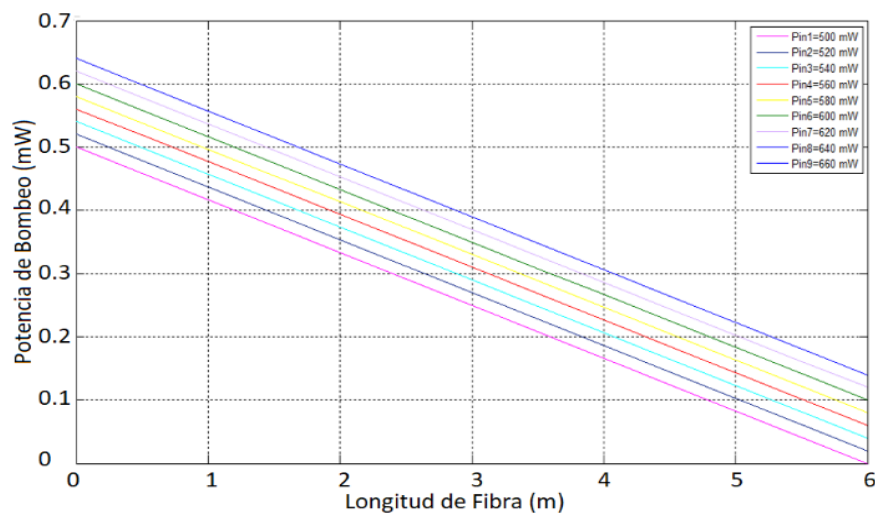
Los parámetros fijos que se establecieron para el diseño son: σ_e y σ_a conforme figura 5.2 $N_T=1.9 \times 10^{25}$ ion/cm³; $r=2 \mu$ m; $\tau=3.35 \times 10^{-3}$ s y $f_b=1.764647 \times 10^{15}$ Hz. De la ecuación (8) podemos observar que, la respuesta lineal de la potencia de bombeo a lo largo del amplificador está determinada por la potencia de entrada, la concentración del dopante en la fibra, el radio del núcleo de la fibra, la frecuencia a la cual estamos excitando al dopante y el tiempo de vida que permanece el ion Tm^{3+} en su estado excitado 3F_4 . De todos estos parámetros, los que podemos variar si usamos fibras comerciales son, la potencia de entrada y la longitud de la fibra. En el gráfico 5.1 se muestra la respuesta de la potencia de bombeo a lo largo de la fibra, se propusieron potencias de bombeo desde (150 mW hasta 310 mW) con una longitud de fibra de 1 m. Se logra observar que la potencia de bombeo se absorbe de manera lineal a lo largo de la fibra, lo que significa que, en la longitud inicial de la fibra existe mayor potencia para la conversión de señal que al final de la fibra, esto provocará que la respuesta en potencia de nuestro amplificador no sea constante longitudinalmente en la fibra, por lo que es importante encontrar la relación óptima entre potencia de entrada y longitud de la fibra, con el fin de que sea posible excitar la mayor cantidad de iones a lo largo de la fibra y exista la suficiente potencia de bombeo al final de esta.

Gráfico 5.1 Respuesta de la potencia de bombeo del Tulio vs longitud de la fibra (1 m)

Fuente: Elaboración Propia

En el gráfico 5.2 se eligió arbitrariamente una longitud de fibra mayor (6 m), con la finalidad de comparar la respuesta del TDFA entre dos longitudes de fibra, y se observa el comportamiento de la potencia de bombeo, en este caso es necesario incrementar la potencia de entrada, de lo contrario no sería posible excitar los iones al final de la fibra, lo cual reduce la eficiencia del amplificador.

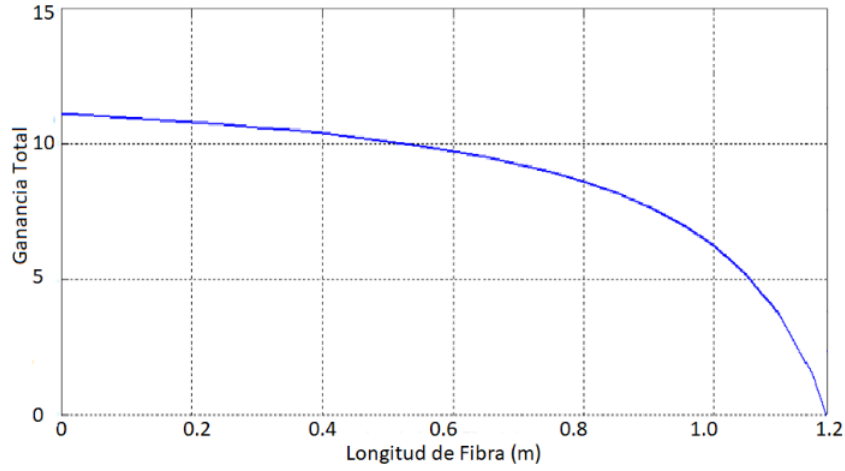
Comparando los gráficos 5.1 y 5.2 se ve claramente el compromiso que existe entre potencia de entrada y longitud de la fibra, ya que, de no existir potencia a final de la fibra, en esta sección del TDFA no se aportaría excitación al amplificador.

Gráfico 5.2 Respuesta de la potencia de bombeo del Tulio vs longitud de la fibra (6 m)

Fuente: Elaboración Propia

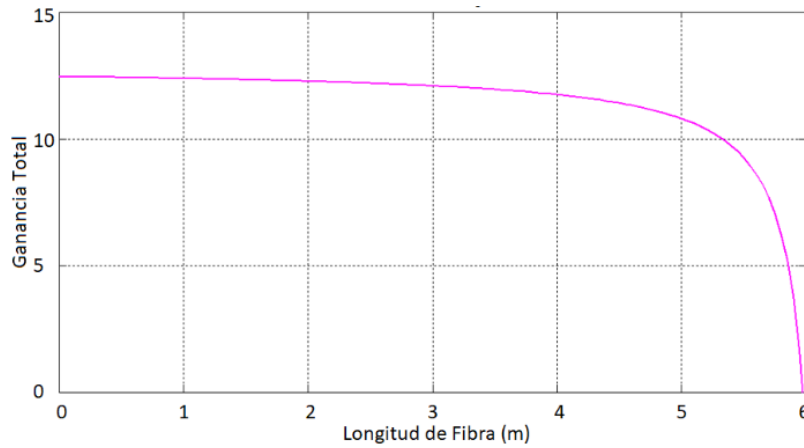
En los gráficos 5.3 y 5.4 se observa la ganancia del amplificador determinada de la ecuación (11) manteniendo constante la longitud de onda de emisión a $\lambda_i=2 \mu\text{m}$ y con barrido a lo largo de la longitud de la fibra (z) para 1 m y 6 m respectivamente, se puede apreciar que cuando se tiene un TDFA con mayor longitud de fibra la ganancia tiene una respuesta constante a lo largo de esta.

Gráfico 5.3 Ganancia total del TDFA para 1 m de longitud de la fibra



Fuente: Elaboración Propia

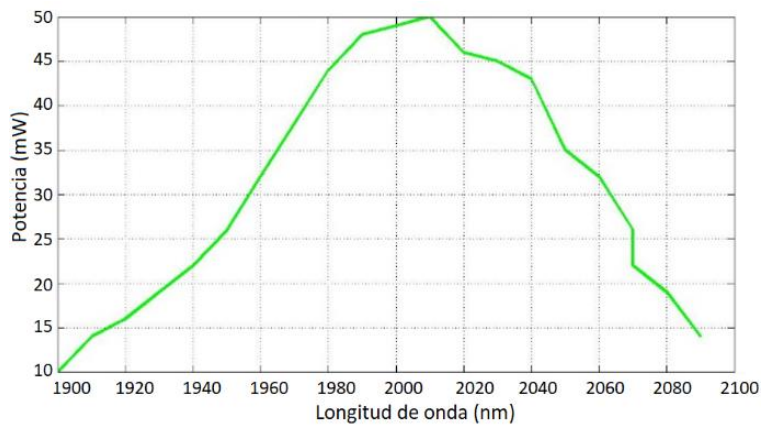
Gráfico 5.4 Ganancia total del TDFA para 6 m de longitud de la fibra



Fuente: Elaboración Propia

Para obtener el ancho de banda de operación del amplificador en sentido de co-propagación, se calcula la potencia de salida del amplificador de la ecuación (13) para diferentes longitudes de onda (λ_i), manteniendo constante la longitud de la fibra (z). En el gráfico 5.5 se muestra la respuesta en longitud de onda optimizada del amplificador en un ancho de banda de 1900 nm a 2100 nm para la longitud de fibra de 6 m en el cual se presenta mayor ganancia, se puede observar que la máxima potencia de emisión del amplificador se encuentra en 2010 nm, con un ancho de banda efectivo del amplificador de 120 nm.

Gráfico 5.5 Respuesta de potencia con respecto a la longitud de onda



Fuente: Elaboración Propia

Una de las características de los amplificadores de fibra dopada con tierras raras, como el TDFA diseñado mostrado en el gráfico 5.5, es que su respuesta en potencia para el ancho de banda de operación no es plana, esto se debe a que las secciones transversales de absorción y emisión del dopante no lo son tampoco, sin embargo, el ancho de banda puede llegar a ser de cientos de nanómetros, pudiendo amplificar varias señales a la vez.

Agradecimiento

Los autores le agradecen a la UAM-Azcapotzalco y al CONACyT por el apoyo para poder llevar a cabo esta investigación.

Conclusiones

En este trabajo se muestra la metodología de diseño de un amplificador de fibra dopada con Tulio basándose en la optimización de los parámetros de diseño variables que son: la potencia de entrada y la longitud de la fibra, con la finalidad de operar en la ventana de comunicaciones ópticas centrada en 2 μm . Se observa que, las condiciones de diseño dependerán de las características que se requieran de amplificación. El ancho de banda efectivo del amplificador propuesto es de 120 nm, teniendo una máxima potencia en la longitud de onda de 2010 nm. Esta misma metodología puede utilizarse para amplificadores ASE de fibra con diferentes dopantes.

Referencias

- [1] A. D. Ellis. (2012). The nonlinear Shannon limit and the need for new fibres. Proc. SPIE Nonlinear Optics and Applications VI, 8434, 84340H. <https://doi.org/10.1117/12.928093>
- [2] M. N. Petrovich, F. Poletti, J. Wooller, A. Heidt, N. K. Baddela, Z. Li, D. R. Gray, R. Slavík, F. Parmigiani, N. Wheeler, J. Hayes, E. Numkam Fokoua, L. Grüner-Nielsen, B. Pálsdóttir, R. Phelan, B. Kelly, M. Becker, N. MacSuibhne, J. Zhao, F. C. Garcia Gunning, A. Ellis, P. Petropoulos, S. Alam, and D. Richardson. (2012). First Demonstration of 2 μm Data Transmission in a Low-Loss Hollow Core Photonic Bandgap Fiber. European Conference and Exhibition on Optical Communication OSA, Th.3.A.5. <https://doi.org/10.1364/ECEOC.2012.Th.3.A.5>
- [3] M. Petrovich et al. (2013). Demonstration of amplified data transmission at 2 μm in a low-loss wide bandwidth hollow core photonic bandgap fiber. Optics express, 21, 28559-28569. <https://doi.org/10.1364/OE.21.028559>
- [4] H. Zhang, N. Kavanagh, Z. Li, J. Zhao, N. Ye, Y. Chen, N. V. Wheeler, J. P. Wooller, J. R. Hayes, S. R. Sandoghchi, F. Poletti, M. N. Petrovich, S. U. Alam, R. Phelan, J. O'Carroll, B. Kelly, L. Grüner-Nielsen, D. J. Richardson, B. Corbett, and F. C. Garcia Gunning. (2015). 100 Gbit/s WDM transmission at 2 μm : transmission studies in both low-loss hollow core photonic bandgap fiber and solid core fiber. Opt. Express, 23, 4946-4951. doi: 10.1364/OE.23.004946.
- [5] S. Aozasa, T. Sakamoto, T. Kanamori, K. Hoshino, K. Kobayashi and M. Shimizu. (2000). Tm-doped fiber amplifiers for 1470-nm-band WDM signals. IEEE Photonics Technology Letters, 12 (10), 1331-1333. doi: 10.1109/68.883820
- [6] Z. Li, Y. Jung, J. M. O. Daniel, N. Simakov, P. C. Shardlow, A. M. Heidt, W. A. Clarkson, S. U. Alam, and D. J. Richardson. (2015). Extreme Short Wavelength Operation (1.65 – 1.7 μm) of Silica-Based Thulium-Doped Fiber Amplifier. Optical Fiber Communication Conference, OSA, Tu2C.1. Recuperado de <https://ieeexplore.ieee.org/document/7121797>
- [7] Z. Li, A. M. Heidt, J. M. O. Daniel, Y. Jung, S. U. Alam, and D. J. Richardson. (2013). Thulium-doped fiber amplifier for optical communications at 2 μm . Opt. Express 21, 9289-9297. <https://doi.org/10.1364/OE.21.009289>
- [8] G. E. Sandoval-Romero, V. Argueta-Díaz, and O. Pottiez. (2009). Theoretical results of the analytical and numerical solutions of superluminescent fiber sources. Phys. Status Solidi, C 6(S1), S227–S230. <https://doi.org/10.1002/pssc.200881339>

- [9] G.G. Pérez-Sánchez, I Bertoldi, Martins, Gallion, Philippe, Alvarez-Chavez, Jose. (2013). Rare Earth-doped Fiber Designs for Superluminescent Sources. *Optical Engineering*, 52. <https://doi.org/10.1117/1.OE.52.8.086110>
- [10] Thulium-Doped PM Optical Fiber, Recuperado de http://www.aic-group.com/alahram2/index.php/products/fiber/fiber2013-10-23-18-40-19_/single-mode-fiber/active-rare-earth-doped-fiber/thulium-doped-pm-optical-fiber-detail
- [11] E. Desurvire and J. R. Simpson. (1989). Amplification of spontaneous emission in erbium-doped single mode fiber. *J. Lightwave Technol.*, 7(5), 835–845. doi: 10.1109/50.19124