

# Caracterización de un amplificador de fibra dopada con erbio a partir de sus parámetros experimentales

M. Bello-Jiménez, E.A. Kuzin y B. Ibarra-Escamilla  
*Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE),  
Luís Enrique Erro No 1, Tonantzintla, Puebla, 72000, México,  
e-mail: mabello@inaoep.mx, ekuz@inaoep.mx, baldemar@inaoep.mx*

R. Tellez-García  
*Instituto Mexicano del Petróleo,  
Eje Central Lázaro Cárdenas No 152, Delegación Gustavo A. Madero, México D.F., 00730, México,  
e-mail: rtellezg@imp.mx*

Recibido el 29 de noviembre de 2006; aceptado el 23 de mayo de 2007

En este artículo presentamos un método sencillo para caracterizar la ganancia de un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA, erbium-doped fiber amplifier) mediante la simulación numérica de la propagación del haz de señal en el amplificador. La simulación se basa en un modelo constituido por las ecuaciones de razón y propagación para una fibra dopada con erbio. La manipulación de este sistema de ecuaciones nos permite hacer un reagrupamiento de los parámetros presentes en un EDFA, a los cuales hemos nombrado parámetros A, B, C, D, y pueden obtenerse experimentalmente a partir de una fibra dopada con erbio. Los resultados obtenidos muestran que la medición de estos parámetros nos permite estimar con mucha precisión la ganancia del amplificador.

*Descriptor:* Erbio; amplificadores de fibra dopada con erbio; amplificadores ópticos.

In this paper we describe a method to characterize the gain of an erbium-doped fiber amplifier (EDFA) through the numerical simulation of the signal beam along the amplifier. The simulation is based on a model constituted by the propagation and rate equations for an erbium-doped fiber. The manipulation of these equations allows us to regroup the parameters present in an EDFA, which we have named the A, B, C, D parameters, and they can be obtained experimentally from an erbium-doped fiber. Experimental results show that the measurement of these parameters allow us to estimate with very good correspondence the amplifier gain.

*Keywords:* Erbium; Erbium-doped fiber amplifiers; optical amplifiers.

PACS: 07.60.Vg; 42.60.Da; 42.81.Cn

## 1. Introducción

El desarrollo de los amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA, erbium-doped fiber amplifiers) surgió con la necesidad de desarrollar un amplificador óptico para la región de menor atenuación para las fibras ópticas ( $<0.25$  dB/Km entre 1530-1620 nm). Hoy en día, los EDFA son una parte fundamental para el desarrollo de láseres de fibra óptica y amplificadores de alta potencia para el estudio de fenómenos no lineales. Por lo tanto, la caracterización de estos amplificadores es un proceso importante que nos permite conocer la ganancia del amplificador.

Existen diferentes métodos propuestos para la caracterizar los EDFA, uno de estos métodos, también llamado método tradicional, se basa en la medición experimental de cada uno de los parámetros presentes en el EDFA para posteriormente dar solución a las ecuaciones de razón y propagación realizando simulaciones numéricas de la propagación del haz de señal en el amplificador [1-4]. Sin embargo, a pesar de obtener buenos resultados con este método, existen limitantes debido a la complejidad para medir cada uno de los parámetros que intervienen en el proceso de amplificación, así como también al empleo de equipo sofisticado con el que no se cuenta en todos los laboratorios de fibras ópticas. Otros métodos se basan en mediciones entre la potencia de entrada

y salida del amplificador, de donde se puede derivar una expresión para estimar la ganancia del amplificador [5,6]. Sin embargo la limitante de este método es que solo está restringido a solo una sola longitud de onda [5] o a una potencia de bombeo determinada [6].

En este artículo se propone método tradicional, en el cual mediante la manipulación de las ecuaciones de propagación y razón es posible reagrupar los parámetros de un EDFA en un nuevo grupo de parámetros, a los cuales hemos nombrado parámetros A, B, C, D, y sirven de base para la caracterización del amplificador. Además, una característica importante de estos parámetros es que pueden ser medidos experimentalmente de manera sencilla empleando equipo convencional presente en cualquier laboratorio de fibras ópticas.

## 2. Modelo de amplificación

Para modelar nuestro amplificador hemos considerado una longitud de onda de bombeo de 980 nm. Para esta longitud de onda los iones de erbio en el nivel fundamental ( ${}^4I_{15/2}$ ) sufren una transición hacia un nivel de energía superior ( ${}^4I_{11/2}$ ), donde los iones presentan un rápido decaimiento no radiativo al nivel metaestable ( ${}^4I_{13/2}$ ). En el nivel metaestable un fotón de señal puede provocar una emisión estimulada liberando un fotón de la misma longitud de on-

da, polarización y fase del fotón de señal incidente [7]. Por otro lado, si los fotones de señal no llegan para producir emisión estimulada, los iones excitados sufren un decaimiento emitiendo un fotón incoherente, ocurriendo así el fenómeno denominado emisión espontánea [7,8]. Estos fotones que se emiten espontáneamente son amplificados por emisión estimulada reduciendo la ganancia de señal y decreciendo la población del estado superior. Como éste es un proceso aleatorio, la emisión puede poseer cualquier frecuencia dentro del espectro de emisión del erbio y es comúnmente conocido como emisión espontánea amplificada (ASE, Amplified Spontaneous Emission) [7,8], la cual consiste de un componente en dirección de la propagación del haz de señal (ASE forward, ASE<sup>+</sup>) y otro en dirección contraria (ASE backward, ASE<sup>-</sup>). En la Fig. 1 se muestra el sistema de tres niveles usado para modelar nuestro amplificador, al cual hemos aso-

ciado una densidad de iones N<sub>1</sub>, N<sub>2</sub> y N<sub>3</sub> para los niveles de energía 1, 2 y 3 correspondientemente.

La transición entre los niveles 1 y 3 son proporcionales al producto del flujo de bombeo φ<sub>p</sub> y la sección transversal de bombeo σ<sub>p</sub>. La transición entre los niveles 2 y 1 son proporcionales al producto del flujo de señal φ<sub>s</sub> y la sección transversal de señal σ<sub>s</sub>. Γ<sub>32</sub> es la probabilidad de transición espontánea no radiativa entre los niveles 3 y 2, y Γ<sub>21</sub> es la probabilidad de transición espontánea radiativa entre los niveles 2 y 1 [7].

Por la casi total ausencia de iones en el nivel excitado y a una rápida relajación al nivel 2, la población del nivel 3 es considerada cero [1,3,7], por lo tanto, aproximamos nuestro modelo a un sistema de dos niveles de donde obtenemos la inversión de población (N<sub>2</sub>/N) en función de las intensidades de señal, bombeo y ASE en la fibra

$$\frac{N_2}{N} = \frac{\frac{\tau\sigma_s^{(a)}\Gamma_s P_s(z)}{ahv_s} + \frac{\tau\sigma_p^{(a)}\Gamma_p P_p(z)}{ahv_p} + \sum_j \frac{\tau\sigma_j^{(a)}\Gamma_j P_{ASE}(v_j)}{ahv_j}}{\tau(\sigma_s^{(a)} + \sigma_s^{(e)})\Gamma_s P_s(z) + \frac{\tau(\sigma_p^{(a)} + \sigma_p^{(e)})\Gamma_p P_p(z)}{ahv_p} + \sum_j \frac{\tau(\sigma_j^{(a)} + \sigma_j^{(e)})\Gamma_j P_{ASE}(v_j)}{ahv_j} + 1}, \quad (1)$$

donde N es la densidad total de iones de erbio. σ<sub>s</sub><sup>(a)</sup>, σ<sub>s</sub><sup>(e)</sup>, σ<sub>p</sub><sup>(a)</sup>, σ<sub>p</sub><sup>(e)</sup>, representan las secciones de cruce de absorción y emisión de señal y bombeo respectivamente. Γ<sub>s,p,j</sub>, son los factores de traslape entre los modos transversales de señal, bombeo, ASE y la distribución de iones de erbio. a, es el área efectiva de la distribución de iones de erbio. v<sub>s,p,j</sub>, son las frecuencias correspondientes a las longitudes de onda de señal, bombeo y ASE. h, es la constante de Planck y τ, es el tiempo de vida de la transición del nivel 2 al 1.

Como los componentes de señal, bombeo y ASE se propagan a lo largo de la fibra, estos toman un comportamiento de ganancia o atenuación debido a emisión y absorción de fotones, así como también a posibles pérdidas intrínsecas de la fibra. Los coeficientes para las pérdidas los expresamos como α<sub>p</sub>, α<sub>s</sub> y α<sub>j</sub> para bombeo, señal y ASE respectivamente, de esta manera las ecuaciones de propagación son representadas de la siguiente forma:

$$\frac{dP_p}{dz} = (N_2\sigma_p^{(e)} - N_1\sigma_p^{(a)})\Gamma_p P_p - \alpha_p P_p, \quad (2)$$

$$\frac{dP_s}{dz} = (N_2\sigma_s^{(e)} - N_1\sigma_s^{(a)})\Gamma_s P_s - \alpha_s P_s, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{ASE}^+(v_j)}{dz} &= (N_2\sigma_j^{(e)} - N_1\sigma_j^{(a)})\Gamma_s P_{ASE}^+(v_j) \\ &+ 2N_2\sigma_j^{(e)}\Gamma_s hv_j \Delta v_j - \alpha_j P_{ASE}^+(v_j), \quad (4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{dP_{ASE}^-(v_j)}{dz} &= -(N_2\sigma_j^{(e)} - N_1\sigma_j^{(a)})\Gamma_s P_{ASE}^-(v_j) \\ &+ 2N_2\sigma_j^{(e)}\Gamma_s hv_j \Delta v_j + \alpha_j P_{ASE}^-(v_j). \quad (5) \end{aligned}$$

En este sistema de ecuaciones, en el segundo miembro de las Ecs. (2)-(5) contienen en su primer término la inversión de población de los iones de erbio, en las Ecs. (4) y (5) el segundo término representa la emisión espontánea y el tercer término representa las pérdidas intrínsecas de la fibra. Dentro estas mismas ecuaciones, el factor 2 es tomado en cuenta por los dos modos de polarización que se propagan en la fibra, y el término Δv representa el ancho espectral para cada línea de emisión del espectro de ASE.

### 3. Parámetros A, B, C, D

La medición en forma experimental de cada uno de los parámetros en las Ecs. (1)-(5) es muy complicada. Por lo tanto, se propone un reagrupamiento de los parámetros a los cua-

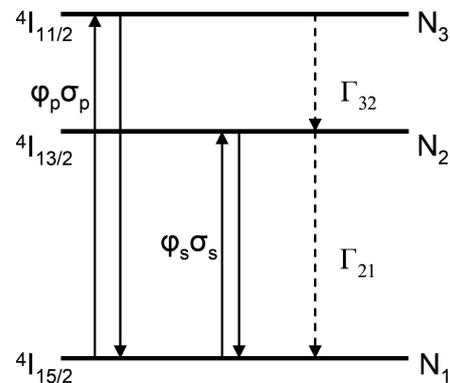


FIGURA 1. Sistema de tres niveles usado para modelar nuestro amplificador.

les hemos nombrado parámetros  $A, B, C$  y  $D$ . Estos parámetros son

$$A(\lambda) = \frac{\tau\sigma_p^{(a)}}{ahv_p} \Gamma_p, \tag{6}$$

$$B(\lambda) = N\sigma_p^{(a)} \Gamma_p, \tag{7}$$

$$C(\lambda) = \frac{\tau\sigma_s^{(a)}}{ahv_s} \Gamma_s, \tag{8}$$

$$D(\lambda) = N\sigma_s^{(a)} \Gamma_s. \tag{9}$$

Considerando este reagrupamiento, las Ecs. (1-5) las podemos expresar de la siguiente forma:

$$\frac{N_2}{N} = \frac{CP_s(z) + AP_p(z) + \sum_j C_j P_j}{(1 + \eta_s) CP_s(z) + (1 + \eta_p) AP_p(z) + \sum_j (1 + \eta(v_j)) C_j P_j(z) + 1}, \tag{10}$$

$$\frac{dP_p}{dz} = \left( \frac{N_2}{N} (1 + \eta_p) - 1 \right) BP_p - \alpha_p P_p, \tag{11}$$

$$\frac{dP_s}{dz} = \left( \frac{N_2}{N} (1 + \eta_s) - 1 \right) DP_s - \alpha_s P_s, \tag{12}$$

$$\frac{dP_{ASE}^+(v_j)}{dz} = \left( \frac{N_2}{N} (1 + \eta(v_j)) - 1 \right) D(v_j) P_{ASE}^+(v_j) + 2 \frac{N_2}{N} \eta(v_j) D(v_j) hv_j \Delta v_j - \alpha_j P_{ASE}^+(v_j), \tag{13}$$

$$\frac{dP_{ASE}^-(v_j)}{dz} = - \left( \frac{N_2}{N} (1 + \eta(v_j)) - 1 \right) D(v_j) P_{ASE}^-(v_j) - 2 \frac{N_2}{N} \eta(v_j) D(v_j) hv_j \Delta v_j + \alpha_j P_{ASE}^-(v_j), \tag{14}$$

donde  $\eta$  es la relación entre los espectros de la sección de cruce de emisión y absorción; la cual se obtiene mediante la relación de McCumber [7].

#### 4. Medición de los parámetros A, B, C y D

Para la medición de los parámetros A, B, C y D empleamos la configuración mostrada en la Fig. 2, donde el haz de bombeo corresponde a una longitud de onda de 980 nm ( $P_{p,in}$ ), el haz de señal corresponde a una longitud de onda de 1550 nm ( $P_{s,in}$ ) y la fibra dopada empleada en el experimento tiene una longitud de 9 metros (EDF-1).

La medición de estos parámetros se obtiene considerando casos particulares para los haces de bombeo y señal. Estas consideraciones predicen por medio de las Ecs. (10)-(12) regiones de igual atenuación para altas y bajas potencias de los haces de bombeo y señal. En la Fig. 3 se muestra la atenuación para el haz de señal en una fibra dopada de 9 m de longitud, la cual se obtuvo midiendo la potencia de salida del haz de señal para diferentes potencias de entrada. Como se aprecia en la grafica la mayor atenuación pertenece a la región de bajas potencias y la de menor atenuación corresponde a la región de altas potencias. La delimitación de estas regiones nos permite establecer cuatro casos particulares para la medición de los parámetros A, B, C y D.

##### Caso 1: No hay potencia de señal y baja potencia de bombeo

Para estas condiciones la inversión de población es considerada cero. Esto nos permite expresar la propagación de la potencia de bombeo, despreciando el efecto de ASE, de la si-

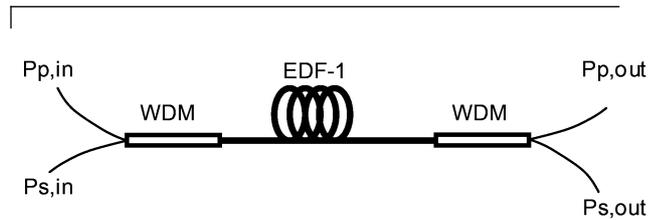


FIGURA 2. Configuración del sistema experimental para determinar los parámetros A, B, C y D.

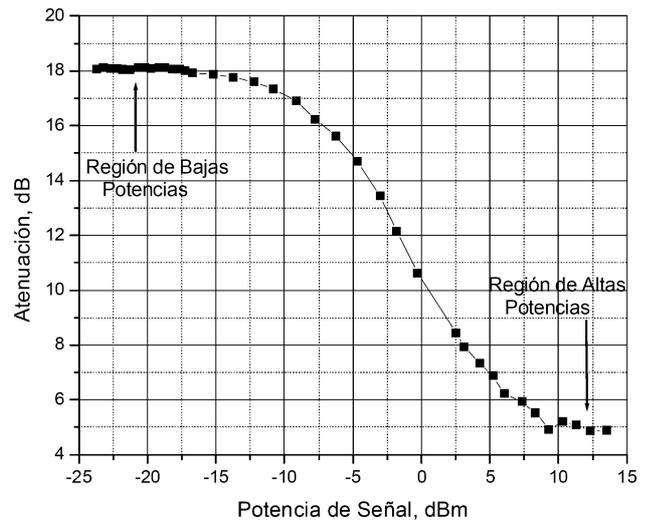


FIGURA 3. Atenuación de la fibra dopada con erbio para las regiones de baja y alta potencia del haz de señal.

guiente forma:

$$\frac{dP_p}{dz} = -(B + \alpha_p)P_p, \tag{15}$$

con solución

$$P_p(z) = P_p(0) \exp(- (B + \alpha_p) z). \tag{16}$$

La solución muestra que midiendo la potencia de salida para una fibra de longitud  $z$ , se obtiene una gráfica cuya pendiente proporciona la información para determinar el parámetro  $B+\alpha_p$ . La Fig. 4 muestra los resultados experimentales para la región de bajas potencias de bombeo.

Tomando la pendiente de la gráfica, obtenemos  $B+\alpha_p=7.55 \times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$ .

**Caso 2: No hay potencia de señal y alta potencia de bombeo**

Para esta condición particular la inversión de población es  $N_2/N \approx AP_p/(AP_p + 1)$ , por lo que la propagación del bombeo despreciando el efecto de ASE es

$$\frac{dP_p}{dz} = -\frac{B}{A} - \alpha_p P_p, \tag{17}$$

con solución

$$\Delta P_p(z) = P_p(0) [1 - \exp(-\alpha_p z)] + \frac{B}{A\alpha_p} [1 - \exp(-\alpha_p z)]. \tag{18}$$

La solución muestra que midiendo

$$\Delta P_p(z)(P_p(0) - P_p(z)),$$

se obtiene una recta cuya pendiente proporciona las pérdidas por longitud  $\alpha_p$ , y la intersección con el eje de  $\Delta P_p$  proporciona la razón  $B/A$ . La Fig. 5 muestra los resultados experimentales para la región de altas potencias de bombeo.

**Caso 3: No hay potencia de bombeo y baja potencia de señal**

Para estas condiciones, la inversión de población nuevamente tiende a cero, por lo que la ecuación (12) la expresamos de la siguiente forma:

$$\frac{dP_s}{dz} = -(D + \alpha_s) P_s, \tag{19}$$

con solución

$$P_s(z) = P_s(0) \exp(- (D + \alpha_s) z). \tag{20}$$

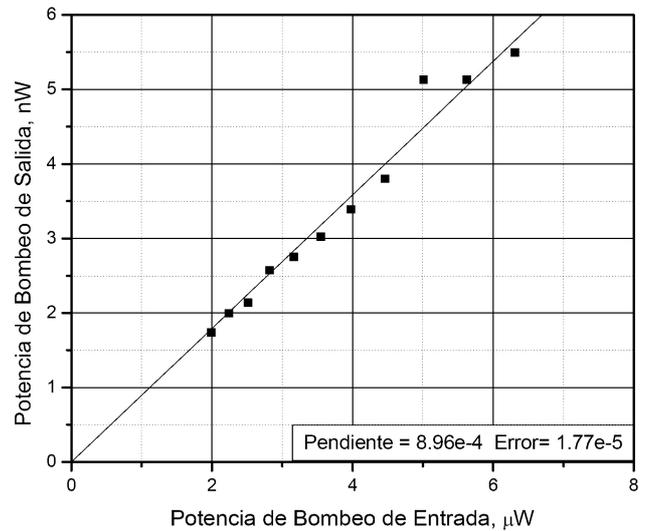


FIGURA 4. Atenuación de la potencia de bombeo para la región de bajas potencias.

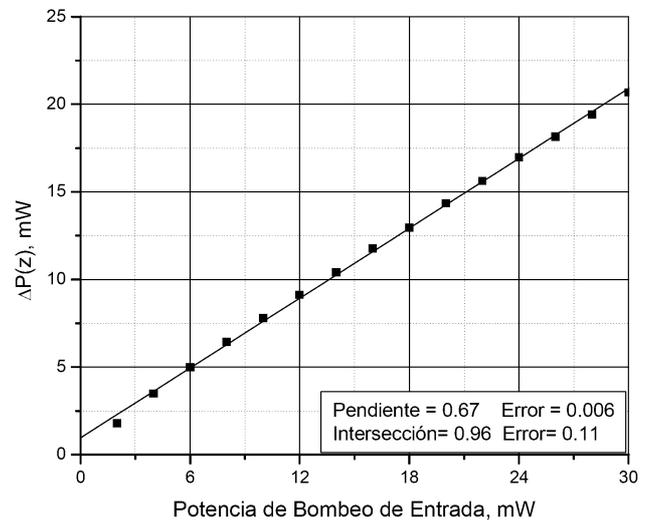


FIGURA 5. Atenuación de la potencia de bombeo para la región de altas potencias.

Considerando las pendientes y las intersecciones de los resultados experimentales, obtenemos  $\alpha_p=1.19 \times 10^{-3} \text{cm}^{-1}$  y  $B/A=1.71 \times 10^{-6} \text{W/cm}$ .

Similarmente al caso 1, midiendo  $P_s(z)$  para la región de bajas potencias, se obtiene una gráfica cuya pendiente proporcionará información para determinar el parámetro  $D+\alpha_s$ . Sin embargo, una característica importante de este parámetro, es su dependencia con el espectro de absorción de la sección de cruce de señal [Ec. (9)]. Por lo tanto, es necesaria su medición para todo su espectro en la fibra.

Para efectuar la medición del espectro del parámetro  $D(\lambda)$ , se obtuvo una aproximación del espectro de absorción, el cual fue normalizado para el valor de  $D$  correspondiente a la longitud de onda medida (1550 nm). Este espectro de absorción es obtenido mediante la relación de McCumber empleando los espectros de emisión mostrados en la Fig. 6.

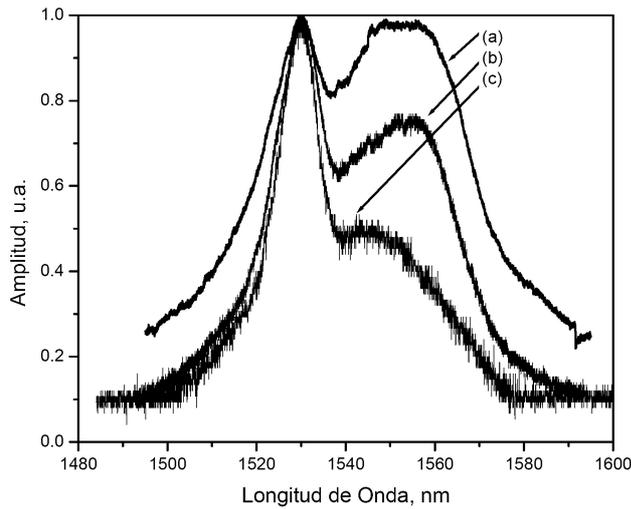


FIGURA 6. Espectros de emisión producidos por diferentes potencias de bombeo. Los espectros (a), (b) y (c) fueron obtenidos por potencias de 2, 3 y 5 mW respectivamente.

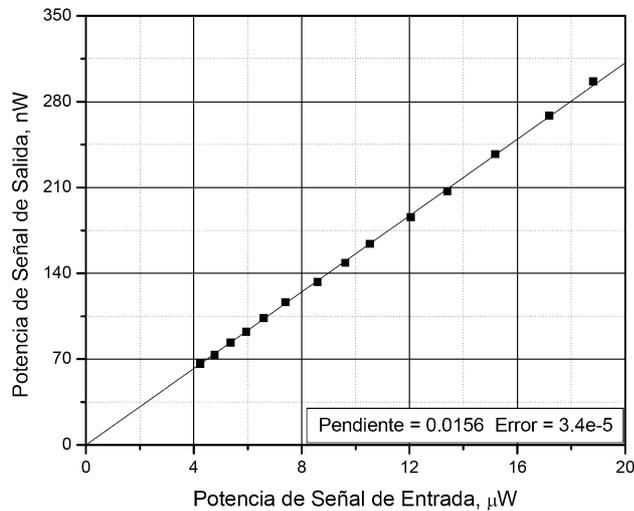


FIGURA 7. Atenuación de la potencia de señal para la región de bajas potencias.

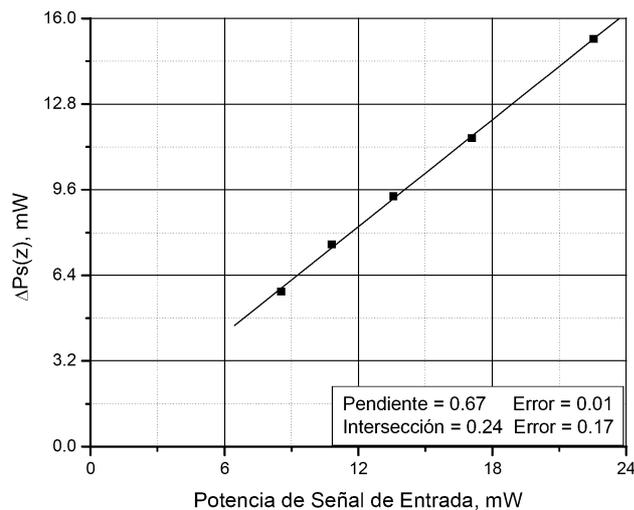


FIGURA 8. Atenuación de la potencia de señal para la región de altas potencias.

El propósito al emplear estos espectros, es determinar el más adecuado para nuestra caracterización; a los cuales hemos clasificado como espectro (a) al producido por una potencia de bombeo de 2 mW, espectro (b) al producido por una potencia 3 mW y espectro (c) al producido por una potencia de 5mW.

En la Fig. 7, se muestran los resultados experimentales al medir la potencia de señal para la región de bajas potencias de señal.

Tomando la pendiente de la gráfica obtenemos  $D+\alpha_s=4.47 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$ .

**Caso 4: No hay potencia de bombeo y alta potencia de señal**

Para esta condición particular, la inversión de población se aproxima a la siguiente relación  $N_2/N \approx CP_s / [(1+\eta_s)CP_s+1]$ , de manera que la Ec. (12) la expresamos de la siguiente forma:

$$\frac{dP_s}{dz} = \left[ \left( \frac{CP_s}{(1+\eta_s)CP_s+1} \right) (1+\eta_s) - 1 \right] DP_s - \alpha_s P_s, \quad (21)$$

con solución

$$\Delta P_s(z) = P_s(0) [1 - \exp(-\alpha_s z)] + \frac{1}{1 + \eta} \frac{D}{C\alpha_s} [1 - \exp(-\alpha_s z)]. \quad (22)$$

La solución muestra que la medición de  $\Delta P_s(z)$ , proporciona información para determinar el parámetro  $\alpha_s$  y la razón  $D/C$ . La Fig. 8 muestra los resultados experimentales obtenidos al medir la potencia de salida en la fibra para la región de altas potencias.

Considerando las pendientes y las intersecciones de los resultados experimentales, obtenemos  $\alpha_s=1.19 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-1}$  y  $D/C=1.03 \times 10^{-6} \text{ W/cm}$ .

Finalmente a partir de la medición de estos parámetros, es posible simular la propagación de las potencias ópticas presentes en un EDFA; permitiéndonos efectuar una comparación entre los resultados experimentales y la simulación.

**5. Resultados**

Para efectuar la caracterización del amplificador se empleó la configuración mostrada en la Fig. 2, la longitud de la fibra dopada fue de 9 metros, la potencia de bombeo se varió de 1 a 20 mW con una longitud de onda de 980 nm, y la potencia de señal fue de 0.1mW para pulsos de 30 ns de duración con una longitud de onda de 1550 nm.

Para la simulación se emplearon los parámetros A, B, C, D, obtenidos anteriormente y los espectros de emisión obtenidos para potencias de bombeo de 2, 3 y 5 mW (mostrados en la Fig. 6). Esta simulación se llevo a cabo resolviendo simultáneamente las Ecs. (10)-(14) mediante las cuales simulamos la amplificación de emisión espontánea ( $ASE^+$  y  $ASE^-$ ) y la ganancia del amplificador.

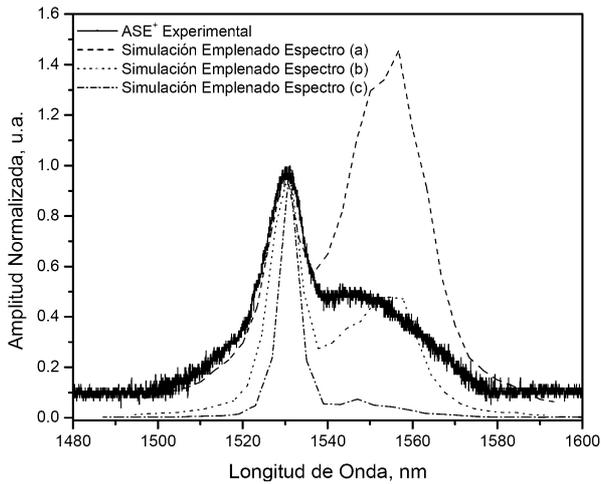


FIGURA 9. ASE<sup>+</sup> para una potencia de bombeo de 5 mW. La línea continua muestra el resultado experimental y las líneas punteadas corresponden a las simulaciones.

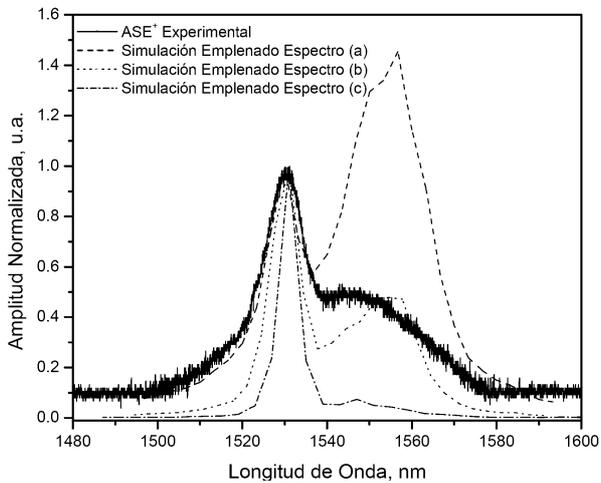


FIGURA 10. ASE<sup>+</sup> para una potencia de bombeo de 15 mW. La línea continua es el resultado experimental y las líneas punteadas corresponden a las simulaciones.

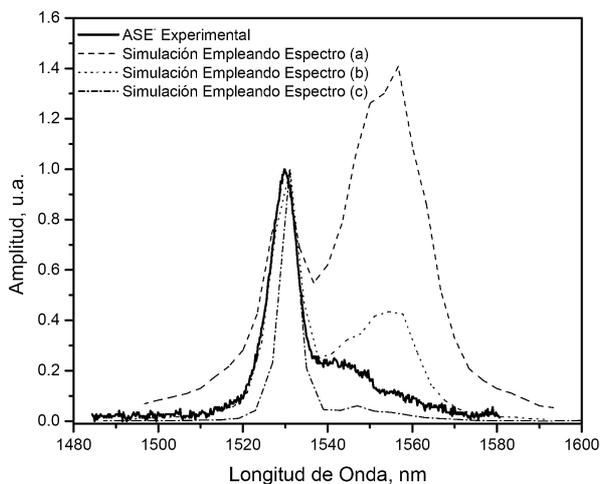


FIGURA 11. ASE<sup>-</sup> para una potencia de bombeo de 5 mW. La línea continua muestra el resultado experimental y las líneas punteadas corresponden a las simulaciones.

En las Figs. 9 y 10 se muestran los espectros de ASE<sup>+</sup> obtenidos experimentalmente para una potencia de 5 y 15 mW. La línea continua representa el resultado experimental y las líneas punteadas representan las simulaciones.

En las Figs. 11 y 12 se muestran los espectros experimentales de ASE<sup>-</sup> para potencias de 5 y 15 mW con sus respectivas simulaciones.

Como se aprecia en las Figs. 9-12, los espectros de emisión simulados difieren al experimental debido a la forma de los espectros empleados en la simulación. Esto se debe principalmente a que los espectros de ASE empleados en la simulación se obtienen aplicando una potencia de bombeo (de 2, 3 y 5 mW en nuestro caso) a la fibra dopada, de manera que al propagarse estos en la fibra presentan atenuación o amplificación. También es evidente que el mejor resultado en nuestras simulaciones se obtiene empleando el espectro producido por una potencia de bombeo de 3 mW (espectro (b)), por lo que consideramos que los efectos de atenuación y amplificación son mínimos para las condiciones en que obtuvo el espectro (b).

Finalmente, en la Fig. 13 se muestra una comparación entre la simulación y los resultados experimentales para la ganancia de señal del amplificador. Esta ganancia es obtenida empleando la configuración de la figura 2, donde la potencia de bombeo de varió de 1 a 20 mW y la longitud de onda del haz de señal fue de 1550 nm.

Como se aprecia en la figura 13, los resultados teóricos difieren al experimental debido a los espectros de emisión empleados en cada una de las simulaciones. Sin embargo, también observamos que es posible obtener resultados muy precisos si empleamos en las simulaciones el espectro de emisión producido por una potencia de bombeo de 3 mW [espectro (b)]. Por lo tanto, es evidente que la medición de los parámetros A, B, C, D, y la elección correcta del espectro de emisión son un factor importante para simular la propagación del haz de señal a través de un EDFA.

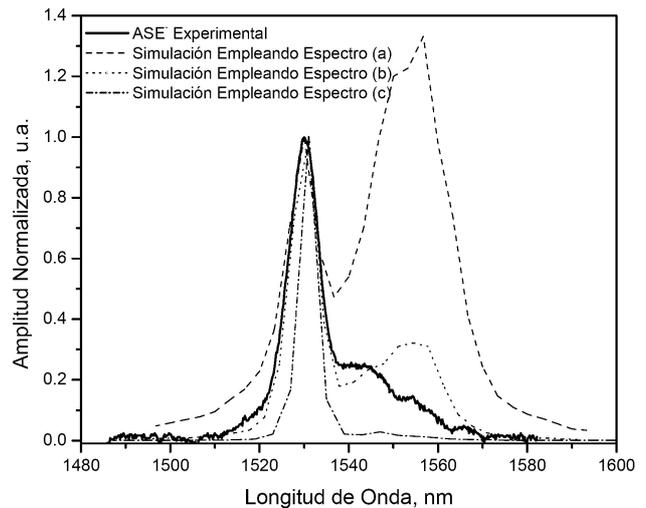


FIGURA 12. ASE<sup>-</sup> para una potencia de bombeo de 15 mW. La línea continua muestra el resultado experimental y las líneas punteadas corresponden a las simulaciones.

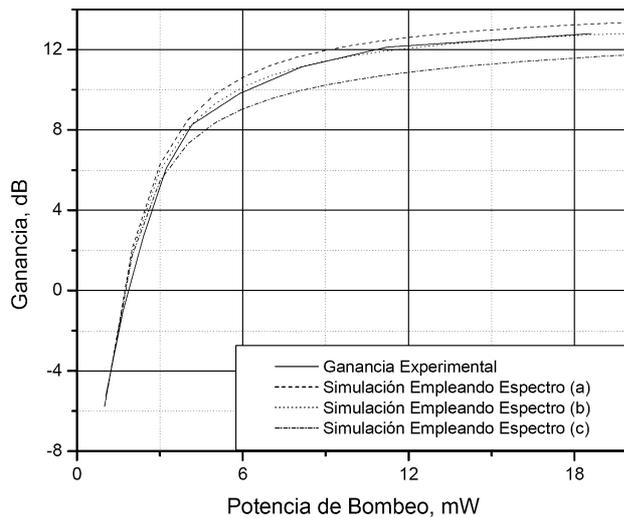


FIGURA 13. Ganancia del amplificador. La línea continua representa los resultados experimentales y los puntos corresponden a las simulaciones.

## 6. Conclusiones

Se ha investigado teórica y experimentalmente un método relativamente sencillo para la caracterización de amplificadores de fibra dopada con erbio. Este método se basa en la medición experimental de los parámetros que intervienen en el proceso de amplificación para posteriormente simular numéricamente la propagación de haz de señal en el amplificador. Una característica importante del método propuesto es que a diferencia

de otros métodos, la medición de los parámetros que intervienen en la amplificación se efectúa haciendo un reagrupamiento de los mismos, a los cuales hemos nombrado parámetros A, B, C, D, y pueden obtenerse experimentalmente con equipo convencional de un laboratorio de fibras ópticas.

Para las simulaciones numéricas la obtención del espectro de emisión juega un papel muy importante dentro de la caracterización de los EDFAs. Un aspecto importante del espectro de emisión es su relación con el parámetro  $D(\lambda)$  (ver caso 3), por lo que al emplear diferentes formas del espectro de emisión obtenemos valores diferentes para  $D(\lambda)$ , ocasionando diferencias entre simulación y experimento. Por lo tanto, concluimos que la mejor aproximación entre simulación y experimento la obtenemos empleando un espectro de emisión en el cual los efectos de atenuación o amplificación sean mínimos. Además debido a la información proporcionada por los espectros de emisión es posible realizar simulaciones numéricas para diferentes longitudes de onda.

Finalmente, haciendo una comparación entre los resultados experimentales y las simulaciones como se observa que en la Fig. 13, el método propuesto nos permite obtener resultados confiables de la ganancia del amplificador, convirtiéndose en una herramienta muy útil en el diseño de EDFAs.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología el apoyo otorgado para el proyecto CONACYT No. 47169.

1. C. Randy Giles y E. Desurvire, *Journal of Lightwave Technology* **9** (1991) 271.
2. C.R. Giles, C.A. Burrus, D.J. DiGiovanni, N.K. Dutta y G. Raybon, *IEEE Photonics Technology Letters* **3** (1991) 363.
3. A. Bellemare, *Progress in Quantum Electronics* **27** (2003) 211.
4. M.V.D. Vermelho, U. Peschel y J. Stewart Aitchison, *Journal of Lightwave Technology* **18** (2000) 401.
5. J.L. Camas Anzuelo, E.A. Kuzin, R. Tellez, B. Ibarra y G. Beltrán, *Rev. Mex. Fís.* **50** (2004) 60.
6. Sanjay Gupta y Li Qian, *Optical Fiber Technology* **11** (2005) 229.
7. P.C. Becker, N.A. Olsson y J.R. Simpson, *Erbium-doped fiber amplifiers: fundamentals and technology* (Ed. Academic Press, San Diego, CA, 1999) p. 131.
8. E. Desurvire and J.R. Simpson, *Journal of light wave technology* **7** (1989) 835.