



Diseño de un amplificador óptico empleando una fibra dopada con erbio

Vanessa Isabel Tardillo^a y Whualkuer Lozano Bartra^{a,b}

^a Facultad de Ciencias Físicas, Universidad Nacional Mayor de San Marcos Ap. Postal 14-0149, Lima 14, Perú.

^b Facultad de Matemática y Ciencias Naturales, Universidad Nacional del Callao, Bellavista-Callao

Recibido: 12-08-2009; Aceptado: 27-10-2009

Resumen

Presentamos una introducción sobre el diseño teórico de un amplificador a fibra dopado con erbio más conocido por su sigla en inglés como EDFA. Estudiamos la ganancia del amplificador en función de la potencia del láser de bombeo (1480 nm y 980 nm) y del tamaño de la fibra dopada con Er^{3+} .

Palabras claves: AFDE; Emisión espontánea; Emisión estimulada; Láser de bombeo.

Design of an optical amplifier using an erbium-doped fiber

Abstract

We present an introduction about the theoretical design of an Erbium doped fiber amplifier more known by its acronym in English as EDFA. We analyzed the gain of the amplifier as a function of the pump laser power (1480 nm and 980 nm) and size of fiber doped with Er^{3+} .

Keywords: EDFA; Spontaneous emission; Stimulated emission; Pump laser.

1. Introducción

Un sistema de comunicación es aquella que transmite información de un lugar a otro, esté separado por algunos kilómetros o por distancias transoceánicas. En el caso de los sistemas de comunicación óptica, donde la transmisión de la luz es realizada a través de fibras ópticas, la señal portadora sufre una atenuación de su potencia debido a las pérdidas intrínsecas del material con que es fabricada la fibra óptica. Esta señal portadora va atenuándose hasta el punto de quedar por debajo del límite de recepción al transmitirse por grandes distancias, necesitando de esta forma ser amplificada. Hoy en día, gracias al desarrollo de las fibras ópticas y de los láseres de diodo, la reducción de las pérdidas en las fibras patrón para telecomunicaciones se han minimizado a 0.2

dB/km en la región de 1.5 μm . Permitiendo así, un espaciamiento mucho mayor entre los amplificadores ópticos [1]. Estos avances han tenido un importante impacto en el campo de telecomunicaciones tales como sistemas de transmisión submarina, redes telefónicas, internet y televisión por cable [2]. En la actualidad, la amplificación óptica ha sido perfeccionada por los grandes avances en la fabricación de fibras ópticas con diferentes dopajes y concentraciones de iones de tierras raras como Er^{3+} , Tm^{3+} , Yb^{3+} . Obteniéndose amplificadores con salidas desde algunos mili Watts hasta varios Watts de potencia y con diferentes ventanas de transmisión óptica. Amplificadores ópticos basados en fibras dopados con erbio (AFDE) [3] fueron una

revolución en sistemas ópticos operando en $1.5\mu\text{m}$. Antiguamente, uno de los procedimientos para la caracterización de amplificadores ópticos, consistía en cortar varios pedazos de fibras para encontrar su longitud óptima de amplificación. Hoy en día, con el propósito de minimizar estas pérdidas se realizan simulaciones computacionales.

En este trabajo simulamos el funcionamiento de un AFDE, relacionando la ganancia del amplificador en función de dos parámetros: la longitud de la fibra dopada con erbio y la potencia de bombeo. Para realizar nuestros cálculos usamos el programa comercial OptiSystem 6.0, el cual fue gentilmente proporcionado por la empresa Optiwave[4].

2. Teoría

La figura 1 muestra un esquema simplificado de los niveles de energía del Er^{3+} , la fuente de bombeo puede ser un láser semiconductor operando en una de las bandas de absorción del ión Er^{3+} (980 o 1480 nm). La luz de bombeo excita los iones de Er^{3+} del estado fundamental para niveles de mayor energía. En la transición del estado excitado para el estado fundamental, un fotón de $1.55\mu\text{m}$ es emitido. Esta emisión puede ser espontánea (decaimiento natural del ión excitado), que representa un ruido, o estimulada (fotones con la misma energía de transición), que representa la ganancia del amplificador. El tiempo de vida del estado excitado, $\tau \approx 10\text{ ms}$, viabiliza el uso de la mayoría de los iones en la amplificación de la señal por emisión estimulada en lugar del decaimiento espontáneo. Mediante la emisión espontánea, el átomo regresa a su estado fundamental, emitiendo un fotón.

En este proceso los fotones son emitidos en direcciones aleatorias y sin relación de fase alguna entre ellos. Para el caso de la emisión estimulada, ésta es iniciada por un fotón incidente, en este proceso el fotón emitido conserva las mismas propiedades del fotón incidente, no solo en energía, sino también en fase.

La configuración básica de un AFDE es mostrada en la figura 2, el cual consiste de un láser semiconductor de bombeo operando en una de las bandas de absorción del erbio, de un acoplador WDM (*Wavelength Division Multiplexer*) cuya función es combinar la

potencia óptica del láser de bombeo y la señal óptica a ser amplificada en una misma fibra, y de algunos metros de fibra dopada con erbio, donde el proceso de amplificación ocurre.

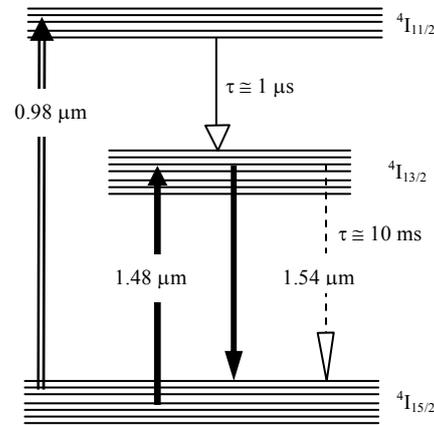


Fig. 1. Diagrama simplificado de los niveles de energía envueltos en la amplificación de la señal en

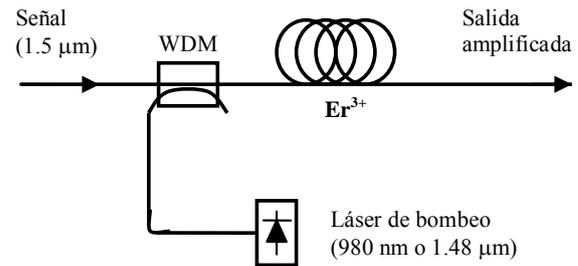


Fig.2. Configuración básica del amplificador a fibra dopada con erbio.

2.1 Modelo Simplificado del Er³⁺

La ganancia de un AFDE depende de un gran número de parámetros, tales como la concentración de los iones de erbio, la longitud del amplificador, el radio del núcleo y la potencia de bombeo. Un modelo de ecuaciones de tasa puede ser adaptado para el AFDE. Este modelo asume que el nivel más alto del sistema, en un modelo de tres niveles, permanece casi vacío debido a una rápida relajación de la población hacia el estado inferior. Para modelar este mecanismo de amplificación, consideramos apenas las densidades de población de los dos estados, ⁴I_{15/2} (N_1) y ⁴I_{13/2} (N_2), los cuales satisfacen las siguientes ecuaciones [3]

$$\frac{\partial N_2}{\partial t} = (\sigma_p^a N_1 - \sigma_p^e N_2) \phi_p + (\sigma_s^a N_1 - \sigma_s^e N_2) \phi_s - \frac{N_2}{T_1} \quad (1)$$

$$\frac{\partial N_1}{\partial t} = (\sigma_p^e N_2 - \sigma_p^a N_1) \phi_p + (\sigma_s^e N_2 - \sigma_s^a N_1) \phi_s - \frac{N_1}{T_1} \quad (2)$$

donde σ_j^a y σ_j^e son las secciones eficaces de absorción y emisión en la frecuencia ω_j con $j = p, s$. Además, T_1 es el tiempo de vida espontánea del estado excitado (alrededor de 10 ms para los AFDE). Las cantidades ϕ_p y ϕ_s representan el flujo de fotones para el bombeo y la señal a ser amplificada respectivamente, definido como $\phi_j = P_j / (a_j h \nu_j)$, donde P_j es la potencia óptica, σ_j es la sección eficaz de transición en la frecuencia ν_j , y a_j es el área de la sección eficaz del modo de la fibra para $j = p, s$.

La potencia de bombeo y la potencia de la señal a ser amplificada varían a lo largo de la longitud del amplificador debido a la absorción, la emisión estimulada y la emisión espontánea. Si despreciamos la contribución de la emisión espontánea, P_s y P_p satisfacen las siguientes ecuaciones [3]:

$$\frac{\partial P_s}{\partial z} = \Gamma_s (\sigma_s^e N_2 - \sigma_s^a N_1) P_s - \alpha P_s \quad (3)$$

$$s \frac{\partial P_p}{\partial z} = \Gamma_p (\sigma_p^e N_2 - \sigma_p^a N_1) P_p - \alpha' P_p \quad (4)$$

donde α y α' se refiere a las pérdidas de la fibra en las longitudes de onda de la señal a ser amplificada y de bombeo, respectivamente. Estas pérdidas pueden ser despreciadas para varias longitudes típicas del amplificador de alrededor de 10 – 20 m. Los factores de confinamiento Γ_s y Γ_p toman en cuenta el hecho de que la región dopada al interior del núcleo proporciona la ganancia para toda la fibra. Los parámetros $s = \pm 1$ en la ecuación (4) depende de la dirección de la propagación del bombeo; $s = -1$, en el caso de un bombeo que se propaga hacia atrás. El principal objetivo de un amplificador es producir una ganancia óptica, la cual se alcanza cuando el amplificador es bombeado ópticamente o eléctricamente para alcanzar la inversión de población. La ganancia óptica, en general, no depende solo de la frecuencia de la señal incidente, sino también de la intensidad del haz en cualquier punto al interior del amplificador.

3. Resultados y Discusión

A continuación mostramos los resultados teóricos para la ganancia del amplificador en función de la potencia de bombeo, de la longitud de la fibra con erbio y de la señal de salida. Estos resultados tienen una buena aproximación con el trabajo de Giles *et. al*, [5]. Para nuestros cálculos, usamos los parámetros de la fibra dopada con erbio mostrados en la Tabla 1 y simulamos una señal en la región de 1.5µm.

Fibra dopada con Er ³⁺	
Longitud	15,0 m
Tiempo de vida metaestable	10,0 ms
Radio del núcleo	1,50 µm
Radio de dopaje del Er ³⁺	1,20 µm
Densidad de iones de Er ³⁺	0,05 ~ wt%
Apertura numérica	0,26
Temperatura	25,0 °C
Temp. Sección de Choque	25,0 °C
Ancho de banda del ruido	10,0 nm

Tabla 1. Parámetros usados en nuestros cálculos

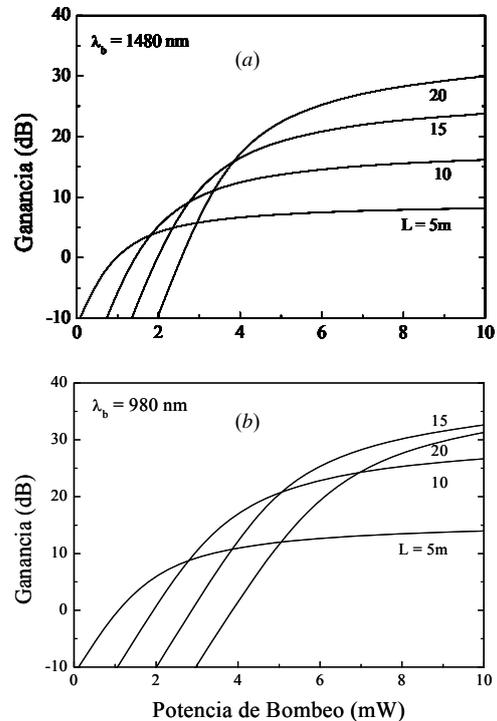


Fig.3. Ganancia del amplificador versus la potencia de bombeo, para varias longitudes de fibra

En la figura 3 se muestra la ganancia del amplificador versus la potencia de bombeo para diferentes tamaños de la fibra de erbio. En la figura 3a, se simuló una señal de entrada en 1.55 μm con una potencia de 100 nW y, como fuente de excitación un láser en 1,48 μm con una potencia de 10 mW. Notamos que para una longitud $L = 5\text{m}$ del amplificador, la ganancia crece hasta 5 dB para luego saturar a una

ganancia en el amplificador con menor longitud de fibra. Esto puede ser corroborado haciendo un estudio de la ganancia del amplificador con la longitud de fibra. En la figura 4a podemos apreciar un gráfico de la ganancia versus la longitud de onda del amplificador, donde la ganancia del amplificador de 30 dB es conseguido usando un láser de bombeo en 1,48 μm con una potencia de 10mW y con una longitud de fibra $L = 28\text{ m}$. En la figura 4b, observamos que podemos obtener ganancias de 30 dB con una longitud de $L = 15\text{m}$ pero usando un láser de bombeo de 980 nm con 10mW de potencia. Como ha sido mostrado en las figuras 3 y 4, para obtener la ganancia deseada debemos elegir correctamente la longitud de la fibra L y la fuente de bombeo P_b .

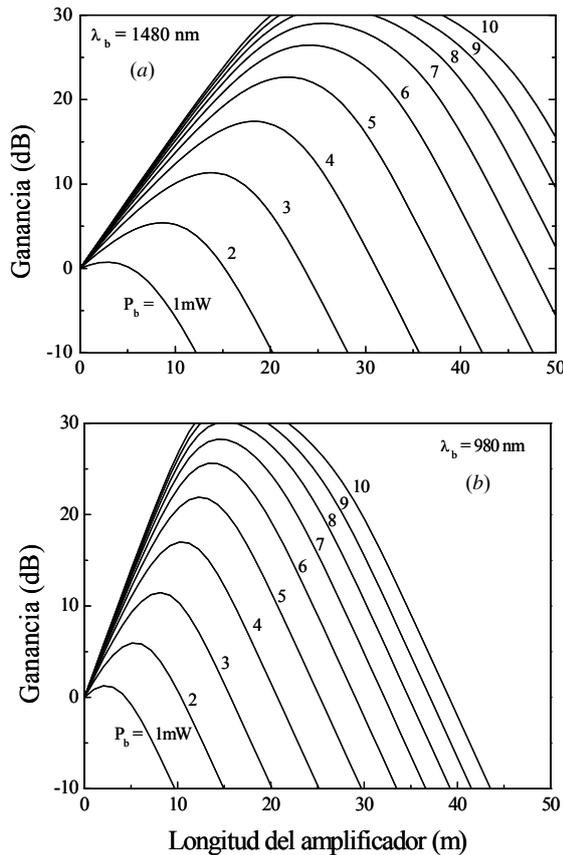


Fig.4. Ganancia versus longitud del amplificador para varios valores de potencia de bombeo.

potencia de bombeo de 3 mW, Sin embargo, para una longitud $L = 20\text{m}$ la saturación se observa a una potencia de bombeo de 10 mW para una ganancia de 30 dB. En la figura 3b, simulamos como fuente de bombeo un láser de 980 nm, manteniendo iguales los otros parámetros descritos anteriormente. En ella observamos, que para una longitud $L = 5\text{m}$ y una potencia de bombeo de 8mW la ganancia satura en 14 dB. En cuanto que, para $L = 15\text{m}$ la ganancia de 32 dB satura a una potencia de bombeo de 10 mW La figura 3 indica que el bombeo con 980 nm proporciona la misma

La figura 5, muestra la variación de la ganancia del amplificador en función de la señal de entrada para un bombeo de 980 nm. Podemos observar que para una señal de entrada de -40 dBm obtenemos una ganancia de aproximadamente 50 dB.

Realizamos también simulaciones para el caso de bombeo simultáneo, bombeando con 1.48 μm y 980 nm, tomando en cuenta los mismos parámetros empleados en la Tabla I. Estos resultados no mostraron ganancias significativas comparadas con los resultados obtenidos aquí, por lo cual decidimos no mostrarlos en este trabajo.

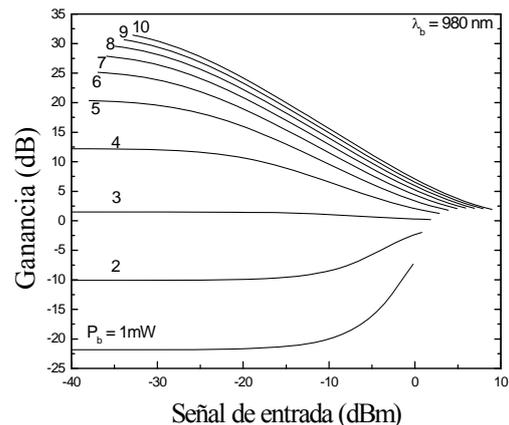


Fig.5. Ganancia del amplificador en función de la señal de entrada del laser CW

4. Conclusiones

Realizamos cálculos numéricos para analizar la variación de la ganancia de nuestro amplificador y verificamos que esta depende principalmente de la fuente de bombeo y de la longitud de la fibra dopada. Los mejores resultados fueron obtenidos usando una fuente de bombeo en 980 nm y una longitud de fibra de 15m, obteniendo una ganancia de hasta 50 dB. Siendo posible diseñar amplificadores con altas ganancias para longitudes de fibra de erbio tan cortas como unos pocos metros.

Agradecimientos

V. Tardillo agradece al Vicerrectorado Académico de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos por el financiamiento de la bolsa otorgada en la realización del presente trabajo.

Referencias

- [1] Govind P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Third Edition, Academic Press, New York – USA, 2001
- [2] Desurvive, E. *Erbium-doped Fiber Amplifiers, Principles and Applications*. Wiley, New York – 1993.
- [3] Govind P. Agrawal, *Fiber-Optic Communication Systems*, Third Edition, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, Kai Chang – Editor, Texas A&M University.
- [4] OptiwaveSystems Inc.
<http://www.optiwave.com/site/products/system.html>
- [5] C. Randy Giles and Emmanuel Desurvire, *Modeling Erbium-Doped Fiber Amplifiers*, *Journal of Lightwave Technology*, Vol 9, N°2 (1991).