

Efecto de la configuración de bombeo en la velocidad de propagación de haces modulados en fibras dopadas con erbio

G. Hernández*, J. M. Ezquerro, M. Nombela, Oscar G. Calderón y Sonia Melle

Escuela Universitaria de Óptica, Universidad Complutense de Madrid, C/ Arcos del Jalón 118, 28037 Madrid, España

<http://www.ucm.es/info/laserlab>

1. Introducción

En este trabajo analizamos la influencia de la configuración de bombeo en la velocidad de propagación de un haz láser de 1536 nm de amplitud modulada a través de amplificadores de fibra dopada con erbio (EDFA). Bajo determinadas condiciones, cuando la fibra óptica es bombeada con otro haz auxiliar de 977 nm se genera un hueco espectral estrecho en la curva de amplificación de los iones de erbio que dopan la fibra. La parte modulada del haz de 1536 nm puede aprovechar dicho hueco de transparencia para viajar a través de la fibra sin ser absorbido, permitiendo velocidades de propagación muy superiores a la velocidad de la luz. En este trabajo veremos que la ganancia del haz de 1536 nm depende de la configuración de bombeo y estudiaremos cómo varía la velocidad de propagación de dicho haz cuando utilizamos distintas configuraciones de bombeo.

La propagación de un haz de luz cuya amplitud ha sido modulada periódicamente a través de un material dopado con erbio ha sido modelada en trabajos anteriores [1]. Consideramos los iones de erbio como un sistema atómico de tres niveles energéticos. La resonancia entre el nivel fundamental ($^4I_{15/2}$) y el primer excitado ($^4I_{13/2}$) tiene lugar a 1536 nm, mientras que la resonancia entre el fundamental y el segundo nivel excitado ($^4I_{11/4}$) se produce a 977 nm. Asumimos un decaimiento rápido desde el estado $^4I_{11/4}$ al $^4I_{13/2}$ lo que nos permite reducir el sistema atómico a un sistema de dos niveles, ver Fig. 1(a) (izquierda). Cuando la fibra de erbio tiene un dopaje elevado (como es nuestro caso) trabajos anteriores muestran efectos de degradación de la ganancia del haz de 1536 nm debidos a procesos de transferencia de energía entre pares de iones excitados adyacentes (“*upconversion processes*”) [2-4]. Teniendo en cuenta estos procesos [1] podemos considerar que los iones de erbio que dopan la fibra son de dos tipos: iones aislados que pueden ser descritos por el sistema de dos niveles mostrado en la Fig. 1(a), e iones apareados caracterizados por un decaimiento muy rápido del estado de pares excitados, ver Fig. 1(b).

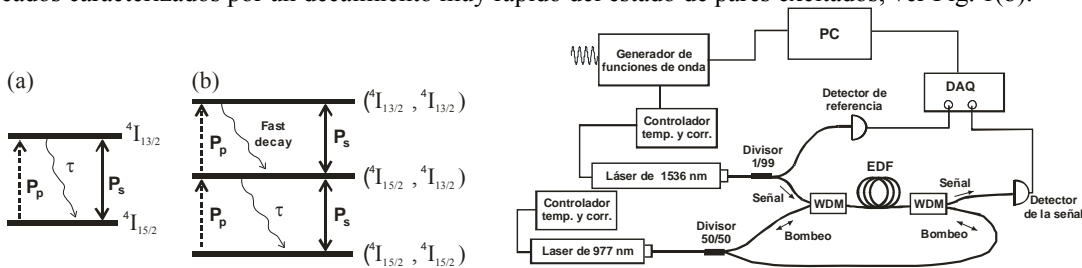


Figura 1. (Izquierda) Niveles de energía de los iones de erbio (a) aislados, (b) en parejas. (Derecha) Sistema experimental empleado para medir la propagación de haces de luz en un amplificador de fibra dopada con erbio (EDFA) donde se muestra la configuración de bombeo bidireccional

El dispositivo experimental se ha esquematizado en la Fig. 1 (derecha). Utilizamos una fibra óptica de 1 metro de longitud dopada con una concentración de iones de erbio 3150 ppm en peso. Por la fibra, se propagan el haz láser de 1536 nm de potencia $P_s = P_0 + P_m \cos(2\pi f_m t)$ (siendo f_m la frecuencia de modulación) y el haz de bombeo de 977 nm de potencia P_p . Utilizamos en tres configuraciones de bombeo distintas: bombeo copropagante, $P_p = P_p^+$ cuando el bombeo se copropaga con la señal de 1536 nm a lo largo de la fibra, bombeo contrapropagante, $P_p = P_p^-$ cuando el bombeo se propaga en dirección

* e-mail: gabrielhernandez_raboso@hotmail.com

opuesta a la señal de 1536 nm y bidireccional, $P_p = P_p^+ + P_p^-$ cuando el bombeo se introduce por ambos extremos de la fibra. El haz de 1536 nm se divide en dos: el 1% se envía directamente a un fotodiodo que se usa de referencia y el 99% restante atraviesa el EDFA llegando a otro fotodiodo. Calculamos el tiempo que se ve adelantada la señal de 1536 nm que atraviesa la fibra respecto de la señal de referencia que viaja por una fibra sin dopar a partir de la correlación entre ambas señales. El “*Fractional advancement*” (F) se define como el avance normalizado con el periodo de la señal modulada. Las ecuaciones de evolución de los haces que se propagan por la fibra vienen dadas por:

$$\frac{dP_o}{dz} = -\frac{\alpha_s P_o}{\omega_c} \left[(1-2k)(1-P_p^+ - P_p^-) + k \left(1 + \frac{P_o}{2} \right) \right] \quad (1)$$

$$\frac{dP_p^+}{dz} = -\frac{\alpha_p P_p^+}{\omega_c} \left[1 + \frac{P_o}{2} + k(P_p^+ + P_p^- - 1) \right] \quad (2)$$

$$\frac{dP_p^-}{dz} = \frac{\alpha_p P_p^-}{\omega_c} \left[1 + \frac{P_o}{2} + k(P_p^+ + P_p^- - 1) \right] \quad (3)$$

$$\frac{d\phi}{dz} = \frac{\alpha_s P_o}{\omega_c} \frac{2\pi f_m \tau}{\omega_c^2 + (2\pi f_m \tau)^2} \left(1 - \frac{3k}{2} \right) (P_p^+ + P_p^- - 1) \quad (4)$$

Donde α_s y α_p son los coeficientes de absorción de la señal de 1536 nm y de bombeo de 977 nm, respectivamente; N_I es la densidad de población del nivel fundamental, N_{II} es la densidad de población de pares de iones en el nivel fundamental, k es el porcentaje de iones que se encuentran en parejas, ω_c es la frecuencia que determina el ancho del hueco de transparencia creado en el espectro de absorción o ganancia y τ es el tiempo de vida del nivel $^4I_{13/4}$.

2. Resultados y discusión

2.1 Máximo “fractional advancement”

Hemos medido la variación del F con la frecuencia de modulación para varias potencias de bombeo (no mostrado en figuras) para las tres configuraciones de bombeo descritas. En los tres casos observamos la misma tendencia general: a bajos niveles de bombeo las señales moduladas sufren un retardo respecto a las de referencia (propagación sublumínica) independientemente del valor de la frecuencia de modulación, mientras que para altos niveles de bombeo obtenemos avance para todas las señales moduladas (propagación superlumínica). Esta transición en el régimen de propagación al aumentar la potencia de bombeo es debida al cambio de absorción a ganancia que sufre la señal. Para potencias de bombeo moderadas, las señales moduladas sufren retardo o avance dependiendo del valor de la frecuencia de modulación. Este comportamiento se debe a la fuerte absorción del bombeo a lo largo de la fibra ya que señales moduladas a altas frecuencias sufren un fuerte avance en el primer tramo de la fibra donde se produce ganancia y sufren un ligero retardo en el resto de la fibra por lo que se obtiene un avance neto a la salida de la fibra. La situación opuesta ocurre para señales moduladas a bajas frecuencias, obteniéndose un retraso neto.

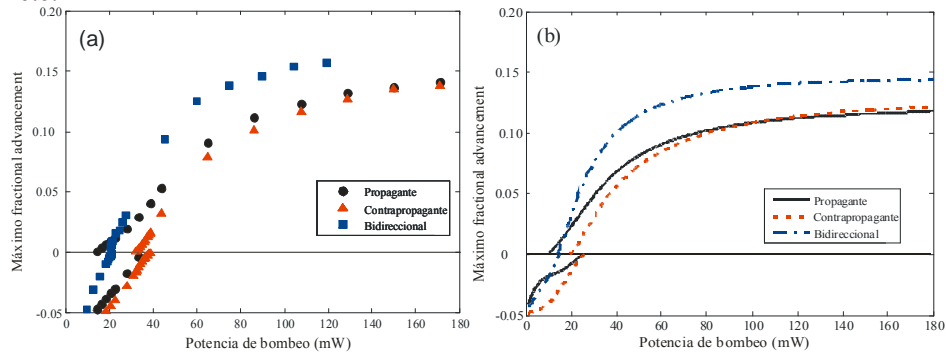


Figura 3: Máximo F frente a la potencia total del bombeo para las tres configuraciones de bombeo: (a) datos experimentales y (b) simulaciones obtenidas integrando el sistema de ecuaciones (1-4).

Para realizar una comparación cuantitativa de las configuraciones de bombeo, hemos representado en la Fig. 3, el máximo F alcanzado en función de la potencia total de bombeo. En la configuración de bombeo bidireccional obtenemos valores de avance mayores que en las configuraciones copropagante y contrapropagante, presentando un valor de avance similar en estas dos últimas configuraciones. Las simulaciones están de acuerdo con los resultados experimentales (ver Fig. 3 b). En conclusión, hemos encontrado que la configuración de bombeo juega un papel importante en el valor del avance de la señal.

Para comprender mejor el origen del aumento de la velocidad de propagación de señales moduladas obtenido en la configuración de bombeo bidireccional, hemos estudiado la ganancia de la señal en el EDFA. Así, hemos medido la ganancia neta para una señal sin modulación en las tres configuraciones de bombeo (resultado no mostrado en figuras), viendo que la mayor ganancia se obtiene en la configuración de bombeo contrapropagante, mientras que la configuración copropagante muestra la menor ganancia neta. Por tanto, la ganancia neta en el EDFA no explica los resultados mostrados en la Fig. 3.

Ahora bien, como el avance de una señal modulada se acumula al irse propagando a lo largo de la fibra, creemos que la variación espacial de la ganancia de la señal a lo largo de la fibra puede explicar el aumento de la velocidad de propagación de señales moduladas obtenido en la configuración de bombeo bidireccional. Por ello hemos analizado la variación espacial de la potencia de la señal y del bombeo en las diferentes configuraciones de bombeo integrando el sistema de ecuaciones (1-4) (ver Fig. 4). Como puede apreciarse la configuración bidireccional presenta un perfil espacial de bombeo más uniforme el cual produce un incremento continuo de la señal a lo largo de la fibra. Aunque la ganancia neta en la configuración bidireccional sea algo menor que en la configuración contrapropagante el continuo crecimiento de la ganancia de la señal en el caso bidireccional hará que a la salida de la fibra el valor del avance sea mayor que en el caso contrapropagante.

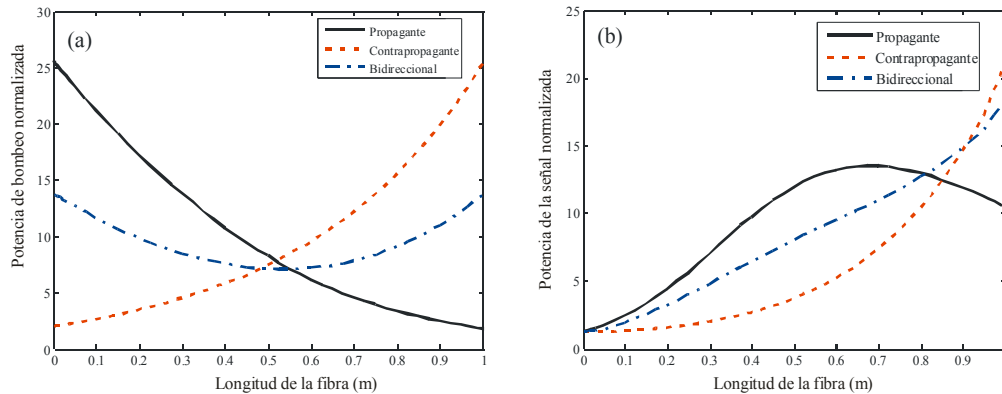


Figura 4: Evolución espacial de la potencia de la señal promedio adimensionalizada (a) y de potencia total de bombeo adimensionalizada a lo largo de la fibra para las tres configuraciones de bombeo.

2.2 Efecto de la longitud de la fibra en la velocidad de propagación de la luz

Como hemos mostrado, el perfil espacial desarrollado por la potencia de bombeo y la señal determinan el comportamiento del F . Por lo tanto, hemos estudiado como los resultados anteriores dependen de la longitud de la fibra. Los resultados anteriores corresponden a fibras de 1 m de longitud. Ahora analizamos el comportamiento del F máximo (respecto a la frecuencia de modulación) en función de la longitud de la fibra para las tres configuraciones de bombeo y para una potencia total de bombeo de 100 mW. Los resultados de las simulaciones se encuentran en la Fig. 5a. Observamos que para longitudes de fibra muy cortas, menores a 0.5 m el avance no depende de la configuración de bombeo. Si incrementamos la longitud de la fibra, en el caso de bombeo bidireccional se obtiene un avance mayor que en las otras dos configuraciones de bombeo, de acuerdo con lo mencionado anteriormente. La longitud de la fibra óptima para obtener el máximo F está en torno a 1.8 m. Experimentalmente hemos medido el valor de F para señales moduladas de distinta frecuencia en las tres configuraciones de bombeo utilizando una fibra de 1.5 m. Los resultados se muestran en la Fig. 5b, en la cual podemos observar que

en la configuración de bombeo bidireccional se obtiene un mayor avance que en las otras dos configuraciones, tal y como muestran las predicciones teóricas.

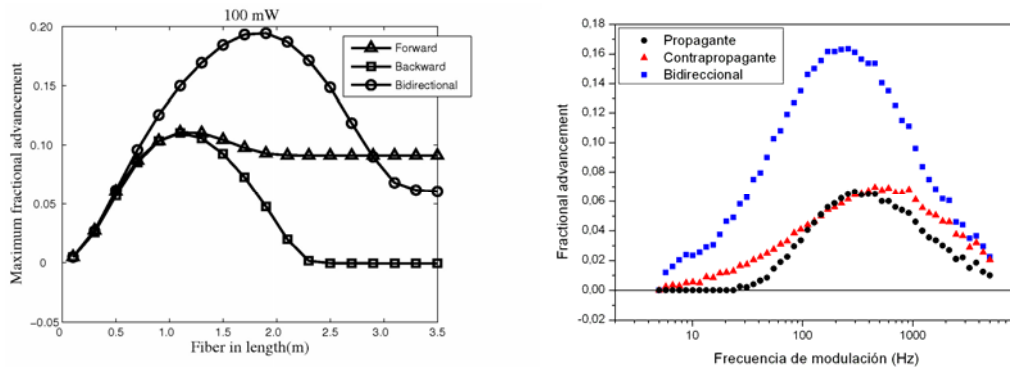


Figura 5: Máximo valor de F obtenido para distintas longitudes de fibra cuando bombeamos la fibra a 100 mW en las distintas configuraciones de bombeo (a). F medido experimentalmente para señales con distinta frecuencia de modulación para una potencia de bombeo total de 100 mW, una fibra de 1.5 m y para las tres configuraciones de bombeo.

3. Conclusiones

Hemos estudiado el papel de la configuración de bombeo en la velocidad de propagación de un haz de luz cuya amplitud está modulada sinusoidalmente a través de una fibra dopada con una alta concentración de iones de erbio. Hemos encontrado que la configuración de bombeo afecta a la velocidad de propagación del haz, siendo la configuración de bombeo bidireccional la que produce mayor avance. Las simulaciones numéricas nos permiten obtener los perfiles espaciales de la potencia de bombeo y de la potencia de la señal a lo largo de la fibra, lo que puede explicar el aumento de la velocidad de propagación del haz obtenida experimentalmente cuando se emplea la configuración de bombeo bidireccional. Además, hemos encontrado que fijada la potencia de bombeo existe una longitud óptima de fibra para la cual el F es máximo.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por los proyectos de investigación PR34/07-15847 y CCG08-UCM/ESP-4220.

Bibliografía

- [1] A. Schweinsberg, N. N. Lepeshkin, M. S. Bigelow, R. W. Boyd, S. Jarabo, "Observation of superluminal and slow light propagation in erbium-doped optical fiber" *Europhys Lett.* **73**, 218 (2006).
- [2] J. Li, K. Duan, Y. Wang, W. Zhao, J. Zhu, Y. Guo, X. Lin, "Modeling and effects of ion pairs in high-concentration erbium-doped fiber lasers", *J. Modern Opt.* **55**, 447 (2008).
- [3] F. Sanchez, P. L. Boudec, P. Francois, G. Stephan, "Effects of ion pairs on the dynamics of erbium-doped fiber lasers" *Phys. Rev. A* **48**, 2220 (1993).
- [4] J. L. Wagener, P. F. Wysocki, M. J. F. Digonnet, H. J. Shaw, D. J. DiGiovanni, "Modeling of ion pairs in erbium-doped fiber amplifiers", *Opt. Lett.* **18**, 2014 (1993).