

# Control del régimen de propagación de pulsos de luz combinando amplificadores ópticos y absorbentes saturables de fibra dopada con Erblio

J. M. Ezquerro <sup>\*</sup>, Francisco Arrieta-Yáñez, Óscar G. Calderón y Sonia Melle

*Departamento de Óptica. Escuela Universitaria de Óptica. Universidad Complutense de Madrid.  
C/ Arcos de Jalón 118, 28037 Madrid.*

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

## 1. Introducción

Actualmente el control de la velocidad de la luz en fibras ópticas es un campo de importante actividad investigadora debido a su gran trascendencia en tecnologías ópticas relacionadas con la propagación de señales e información [1]. Analizar con detalle cómo se ve afectada esta propagación es una labor minuciosa. Una parte de los esfuerzos se centran en la obtención de regímenes de propagación sub-lumínica (luz lenta) y súper-lumínica (luz rápida) de pulsos de luz.

El método que utilizamos para obtener propagación sub-lumínica o súper-lumínica se basa en la creación de un hueco en el espectro de absorción o de ganancia provocado por las oscilaciones coherentes de los átomos entre los niveles energéticos que la luz ha acoplado. Dicha oscilación ocurre a la diferencia de frecuencia entre los dos haces que inciden sobre el material o frecuencia de batido. Esta técnica es lo que se conoce como Oscilaciones Coherentes de la Población, *CPO*. El primer experimento de luz lenta que utilizó esta técnica se llevó a cabo en el año 2003 por Bigelow et al. en un cristal de Rubí de 7.25 cm de longitud [2].

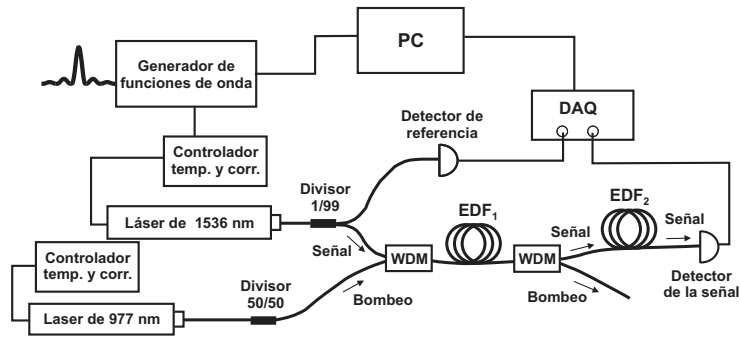
En los últimos años, gran parte de la investigación sobre el control de la propagación de pulsos de luz se ha centrado en fibras de ópticas dopadas con Erblio, (*EDF*), utilizando diversas técnicas [3, 4, 5]. Estas investigaciones están encaminadas a aplicaciones en telecomunicaciones, como sistemas de almacenamiento óptico, sincronización de datos, memorias ópticas y procesado de señales. En nuestro grupo de investigación hemos analizado el comportamiento de señales moduladas en intensidad a través de fibras altamente dopadas con Erblio ante diferentes configuraciones de bombeo. Hemos comprobado como la señal que se propaga en la *EDF* sufre fases de avance (ganancia) y retardo (absorción) en distintas regiones de la fibra. Además se analizó cual es la configuración de bombeo óptima para que a la salida de la *EDF* se produzca el máximo avance neto de la señal [6]. Este trabajo continua con la línea marcada por nuestro grupo de investigación del Dpto. de Óptica de la UCM [7, 8]. Ahora partiendo de pulsos gaussianos sobre un fondo *DC* y analizaremos el efecto combinado en este tipo de señales de dos etapas, una con ganancia y otra seguida en la que sólo se produce absorción. En particular hemos analizado experimentalmente la propagación de un pulso gaussiano de 1536 nm y 2 mW de potencia *DC* a través de dos trozos pequeños de fibra de 10 cm cada una, *EDF*<sub>1</sub> y *EDF*<sub>2</sub>, altamente dopados con Erblio (3150 ppm) con diferentes potencias de bombeo copropagándose con el pulso señal.

## 2. Dispositivo experimental y resultados

El dispositivo experimental es el que se muestra en la Fig. 1. Este consiste en introducir en una fibra dopada con Erblio, *EDF*<sub>1</sub>, un pulso gaussiano de 1536 nm y 2 mW de potencia, manteniendo

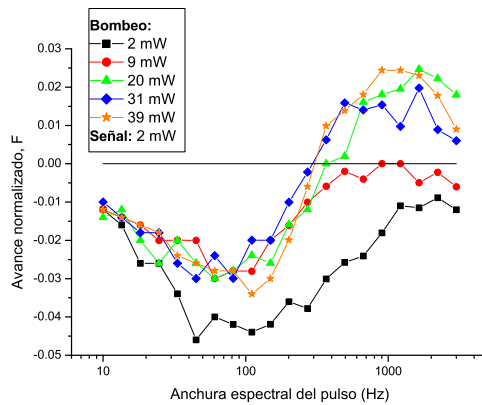
---

<sup>\*</sup>e-mail: josemi@opt.ucm.es



**Figura 1:** Dispositivo experimental usado para la medida del avance o el retardo de la luz en fibras dopadas con Erbio; WDM, divisor de longitud de onda; EDF, fibra dopada con Erbio; DAQ, tarjeta de adquisición de datos; PC, ordenador personal.

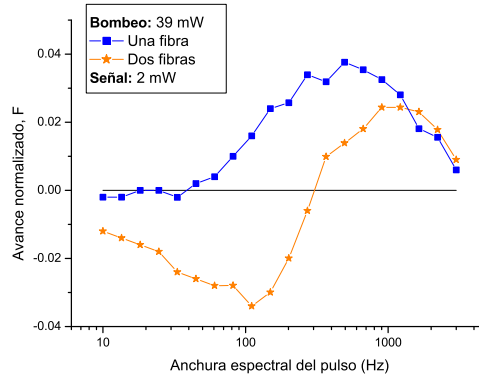
un bombeo constante de  $977 \text{ nm}$  de entrada copropagándose con el pulso señal. Mediante este montaje conseguiremos que esta etapa se comporte como amplificador. A la salida de  $EDF_1$  colocamos un divisor de longitud de onda para extraer la potencia de bombeo que sale y permitimos introducir la señal de  $1536 \text{ nm}$ , directamente en la segunda fibra,  $EDF_2$ , en este caso esta etapa se estaría comportando como un medio absorbente. Posteriormente a la salida de  $EDF_2$  colocamos un detector para medir el avance,  $F$ , que ha experimentado la señal. Donde  $F$  se define como el avance del pulso normalizado a la anchura del pulso.



**Figura 2:** Avance normalizado,  $F$ , frente a la anchura espectral del pulso para diferentes potencias de bombeo, en la situación en la que las dos fibras se encuentran dispuestas una seguida de la otra.

Como se muestra en la Fig. 2, se han utilizado varias potencias de bombeo, 2, 9, 20, 31 y  $39 \text{ mW}$ , con el fin de poner de manifiesto claramente los efectos de avance y retardo, ganancia y absorción, de la señal de  $1536 \text{ nm}$  a través de la fibra de Erbio. Cuando el bombeo es muy pequeño el amplificador produce poco avance y todos los pulsos acaban retrasados. Cuando el bombeo aumenta se observa que los pulsos anchos espectralmente avanzan. Para poder analizar lo que sucede con detalle hemos considerado sólo la potencia de bombeo de  $39 \text{ mW}$ . Para esta potencia de bombeo hemos desconectado en el montaje la fibra  $EDF_2$  y hemos vuelto a medir la señal a la salida, los resultados obtenidos se muestran en la Fig. 3 (símbolos cuadrados).

Podemos observar en la Fig. 3 que para pulsos con anchuras espectrales pequeñas el avance que obtiene la señal a la salida de la  $EDF_1$  es pequeña, por lo que al pasar esta señal por la  $EDF_2$  se obtendrá retardo como se muestra en esta figura. Por el contrario para pulsos con anchuras espectrales del orden de  $250 \text{ Hz}$  la ganancia que puede obtener la señal a la salida de la  $EDF_1$  es mas grande y por lo tanto al pasar esta señal por la  $EDF_2$  se obtendrá avance neto y estaríamos en situación de poder hablar en términos de luz rápida.



**Figura 3:** Avance normalizado,  $F$ , frente a la anchura espectral del pulso para dos configuraciones diferentes: una configuración en la que se considera una fibra con bombeo fijo de  $39\text{ mW}$  y la otra configuración en la que utilizamos las dos fibras una seguida de la otra para el mismo bombeo anterior.

## Bibliografía

- [1] R. W. Boyd, D. J. Gauthier and A. L. Gaeta, “Applications of Slow Light in Telecommunications,” *Opt. Photon. News* **17**, 18-22 (2006).
- [2] M. S. Bigelow, N. N. Lepeshkin and R. W. Boyd, “Observation of ultraslow light propagation in a Rubi crystal at room temperature,” *Phys. Rev. Lett.* **90**, 113903-1-4 (2003).
- [3] A. Schweinsberg, N. N. Lepeshkin, M. S. Bigelow, R. W. Boyd and S. Jarabo, “Observation of superluminal and slow light propagation in erbium-doped optical fiber,” *Europhys. Lett.* **73**, 218-224 (2006).
- [4] K. Y. Song, M. G. Herráez, and L. Thèvenaz, “Observation of pulse delaying and advancement in optical fibers using stimulated Brillouin scattering,” *Opt. Express*, **13**, 82-88 (2005).
- [5] Y. Okawachi, M. S. Bigelow, J. E. Sharping, Z. Zhu, A. Schweinsberg, D. J. Gauthier, R. W. Boyd, and A. L. Gaeta, “Tunable all-optical delays via Brillouin slow light in an optical fiber,” *Phys. Rev. Lett.* **94**, 153902-1-4 (2005).
- [6] J. M. Ezquerro, S. Melle, O. G. Calderón, F. Carreño, M.A. Antón, “Fractional advancement enhancement in Erbium-doped fiber amplifiers by bi-directional pumping,” *Optics and Photonics Congress. Slow and Fast Light 2008*, Boston, Massachusetts, USA, July 13-16, 2008.
- [7] S. Melle, O. G. Calderón, C. E. Caro, E. Cabrera-Granado, M.A. Antón, and F. Carreño, “Modulation-frequency-controlled change from sub- to superluminal regime in highly doped erbium fibers,” *Opt. Lett.* **33**, 827-829 (2008).
- [8] O. G. Calderón, S. Melle, M.A. Antón, F. Carreño, F. Arrieta-Yañez, and E. Cabrera-Granado, “Propagation-induced transition from slow to fast light in highly doped erbium fibers,” *Phys. Rev. A* **78**, 053812-1-8 (2008).