

# Láser de fibra usando como filtro óptico fibras monomodo estrechadas no adiabáticas

## Fiber ring laser using non-adiabatic single-mode fiber tapers as a tunable filter

M A QUINTELA<sup>1</sup>, N. BECUE<sup>1</sup>, A. QUINTELA<sup>1</sup>, J.M. LÁZARO<sup>1</sup>, M. LÓMER<sup>1</sup>, S. DÍAZ<sup>2</sup>,  
M. LÓPEZ-AMO<sup>2</sup> Y J M LOPEZ-HIGUERA<sup>1</sup>

1. Grupo de Ingeniería Fotónica, Universidad de Cantabria, Avda. Los Castros s/n
2. Departamento de Ingeniería Eléctrica y electrónica, Universidad Pública de Navarra, Pamplona, Spain.

Persona de contacto: M<sup>a</sup> Ángeles QUINTELA (quintelm@unican.es).

### RESUMEN:

Un láser en anillo de fibra dopada con erbio (LAFDE) con fibras monomodo estrechadas no adiabáticas concatenadas, actuando como filtro sintonizable dentro de la cavidad, es presentado en este artículo. Estas fibras monomodo estrechadas no adiabáticas concatenadas presentan un ancho de banda más estrecho y una profundidad de modulación mayor que un sola fibra estrechada. La sintonización de este filtro óptico se llevó a cabo aplicando una perturbación controlada en las fibras estrechadas. El funcionamiento de este láser se demostró experimentalmente en el laboratorio, obteniendo un rango de sintonización de 20.8nm (1544.5nm-1565.3nm).

**Palabras clave:** láser de fibra, fibra dopada con erbio, fibras estrechadas, filtro sintonizable

### ABSTRACT:

An erbium doped fiber ring laser (EDFRL) that incorporates four non-adiabatic concatenated single-mode fiber tapers (acting as tunable filter in the laser cavity) is presented. These concatenated fiber tapers integrates a filter with a narrower band-pass and a higher modulation depth than a single taper. The tuning of this filter was implemented applying a controlled perturbation in the fiber taper. The proposed laser architecture was successfully demonstrated in the laboratory in which a tuning range of 20.8nm (1544.5nm-1565.3nm) were measured.

**Key words:** fiber laser, erbium doped fiber, fibers tapers, tunable filters

## 1.- Introducción

Desde hace más de 20 años, las fibras estrechadas han sido usadas típicamente como acopladores de fibra [1] y como sensores ópticos de parámetros físicos [2] [3]. Una de las características más importantes de las fibras estrechadas es que la interacción de la luz con el entorno tiene lugar justo en la zona delgada de la fibra. Esta propiedad permite el desarrollo de sensores de humedad o de índice de refracción [4]. Además, en las

fibras estrechadas no adiabáticas, la interferencia entre modos, principalmente entre el LP<sub>01</sub> y LP<sub>02</sub>, se puede emplear, por ejemplo, para medir movimientos angulares y /o estimamientos [5]. Las fibras estrechadas también se pueden emplear como filtros ópticos sintonizables. Estos filtros además de presentar un amplio rango de sintonización, su proceso de fabricación es simple, fiable y barato. Estos filtros ópticos basados en fibra estrechada se pueden incorporar a la cavidad de

un resonador, lo que permite obtener láseres de fibra sintonizables. En este artículo, se presenta un láser en anillo de fibra dopada con erbio (LAFDE) [6] usando como filtro óptico fibras monomodo estrechadas no adiabáticas concatenadas. Perturbaciones externas controladas fueron aplicadas a las fibras estrechadas con el fin de conseguir un filtro sintonizable.

El artículo se organiza de la siguiente forma: en la primera parte se muestran los resultados obtenidos del proceso de fabricación de fibras monomodo estrechadas no adiabáticas junto con su caracterización experimental. En la segunda parte, los resultados del diseño y caracterización de un LAFDE con fibras estrechadas son presentados. Por último, se exponen las conclusiones.

## 2.- Fabricación y caracterización de fibras estrechadas no adiabáticas.

Las fibras estrechas no adiabáticas presentan interesantes propiedades, como la capacidad de medir parámetros externos a partir de la interacción de la luz en la zona estrechada de la fibra [7]. Estas fibras estrechadas se fabrican realizando una rápida transición del diámetro de la fibra. La frecuencia normalizada ( $V$ ) del núcleo de la fibra se reduce proporcionalmente con la disminución del diámetro de la fibra durante el proceso de fabricación. Cuando  $V_{\text{núcleo}} < 1$ , el modo fundamental  $LP_{01}$  es guiado por la cubierta y se puede acoplar con otro modo  $LP_{0m}$ , aunque la principal interacción es con el modo  $LP_{02}$ . Cuando  $V_{\text{núcleo}}$  vuelve a ser  $> 1$  el modo  $LP_{01}$  viaja por el núcleo de la fibra y es guiado de la misma forma que antes de entrar en la fibra estrechada. En conclusión, en una fibra estrecha no adiabática la interacción del modo óptico con el medio externo es grande.

La potencia transmitida en una fibra estrechada depende de la diferencia de fase entre los modos acoplados en la fibra estrechada. Por otro lado, esta diferencia de fase depende de la longitud de interacción entre los modos y de la longitud de onda de transmisión. De esta manera, la respuesta espectral, la cual es cuasi-sinusoidal es función de la longitud de onda, se puede sintonizar cambiando la diferencia de fase por algún medio, por ejemplo,

estirando la fibra estrechada o cambiando las condiciones externas del entorno alrededor de la fibra estrechada.

Las fibras estrechadas usadas en este trabajo han sido fabricadas con una máquina desarrollada en el Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria (<http://www.teisa.unican.es/gif/>). Esta estación de fabricación de fibras estrechadas está compuesta de dos desplazadores de alta precisión que sirven para estirar la fibra, mientras una antorcha de oxi-butano, que genera una llama de tamaño aproximado de 2mm, barre linealmente la fibra. Con esta estación es posible fabricar fibras estrechadas adiabáticas y no adiabáticas.

Una vez fabricadas las fibras estrechadas, para conseguir su sintonización se colocaron entre dos desplazadores. Cuando estos desplazadores se mueven en dirección axial opuesta, la zona estrechada se deforma, y en consecuencia, se produce un desplazamiento de la respuesta espectral. Un ejemplo de la respuesta espectral en transmisión, obtenida experimentalmente, de una fibra estrechada para dos valores de acercamiento entre los extremos de la fibra estrechada ( $100\mu\text{m}$  y  $200\mu\text{m}$ ) se muestra en la Fig. 1, como ilustración de la capacidad de sintonización de estas estructuras.

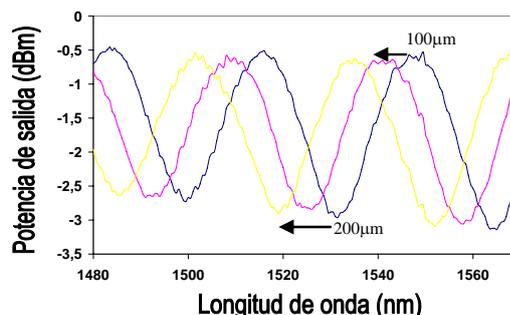


Fig.1: Respuesta espectral de una fibra estrechada no-adiabática y sus cambios con las perturbaciones

Como es de esperar, la respuesta espectral es cuasi-sinusoidal y cambia hacia longitudes de onda menores cuando la fibra estrechada se deforma. El efecto de la variación de la geometría de la fibra estrechada en la variación de la respuesta espectral cuando está sometida a perturbaciones no se ha estudiado aún. Sin embargo, si se ha comprobado expe-

rimentalmente la capacidad de repetición del proceso de fabricación de las fibras estrechadas y de sus efectos asociados. La potencia de salida de la fibra estrechada durante el desplazamiento de 0 a 5mm con una velocidad constante y su retorno a la posición inicial (0mm) para dos longitudes de onda diferentes se puede observar en la Fig. 2. La potencia de salida de la fibra estrechada en el retorno a la posición inicial es claramente un espejo de cuando se desplaza hacia delante, lo que efectivamente demuestra la reproducibilidad de la configuración geométrica de la fibra estrechada para una posición específica del desplazador.

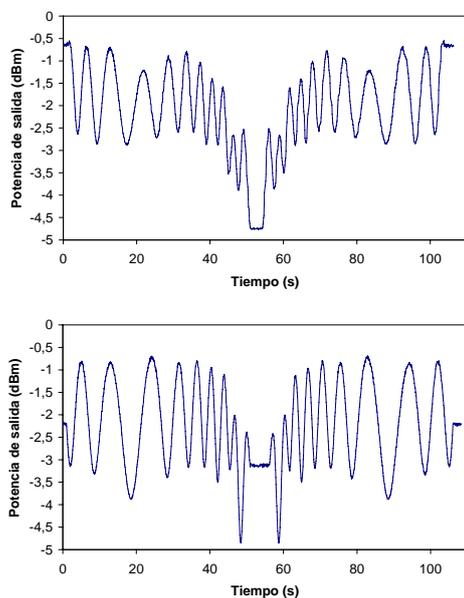


Fig. 2: Potencia de salida de una fibra estrechada durante el desplazamiento (de 0 a 5mm) y (de 5 a 0mm) con una velocidad constante para 2 longitudes de onda, 1450nm y 1590nm.

Por otro lado, los láseres de fibra en anillo pueden alcanzar fácilmente el laseo incluso con fibras de erbio con baja concentración empleando longitudes de la cavidad grandes,

típicamente mayores de 10m. Esto implica que estos láseres van a presentar múltiples modos longitudinales, lo que provoca efectos indeseados, como saltos de modos. Para conseguir láseres de fibra en anillo con un comportamiento monomodo, se requiere un filtro óptico estrecho [8]. La respuesta espectral de fibras estrechadas dispuestas en serie es igual al producto de la respuesta espectral de cada fibra estrechada. En consecuencia, se puede obtener un filtro óptico muy estrecho si se disponen múltiples fibras estrechadas concatenadas. Sin embargo, cada fibra estrechada tiene un mínimo de pérdidas de transmisión de 0.5dB, por lo que el número de fibras estrechadas concatenadas va a estar limitado, en la búsqueda de un compromiso entre el ancho de banda y las pérdidas del filtro.

En este trabajo experimental, se han empleado 4 fibras estrechadas en serie. Estas han sido fabricadas siguiendo el proceso descrito anteriormente con periodos de la respuesta espectral de 80, 40, 20 y 10nm, respectivamente. La respuesta teórica de los 4 filtros en serie se muestra en la Fig. 3. La respuesta espectral total de las fibras estrechadas concatenadas es más estrecha que la de una simple fibra estrechada, además la profundidad de modulación es también mayor.

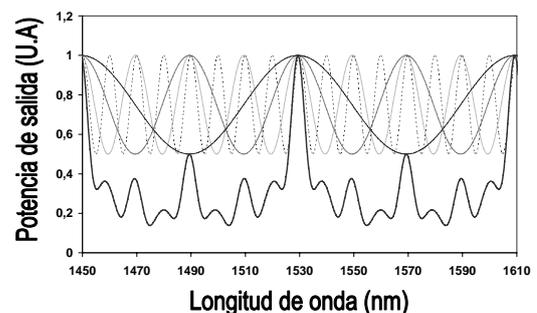


Fig. 3: Respuesta teórica de 4 fibras estrechadas en serie en función de la longitud de onda.

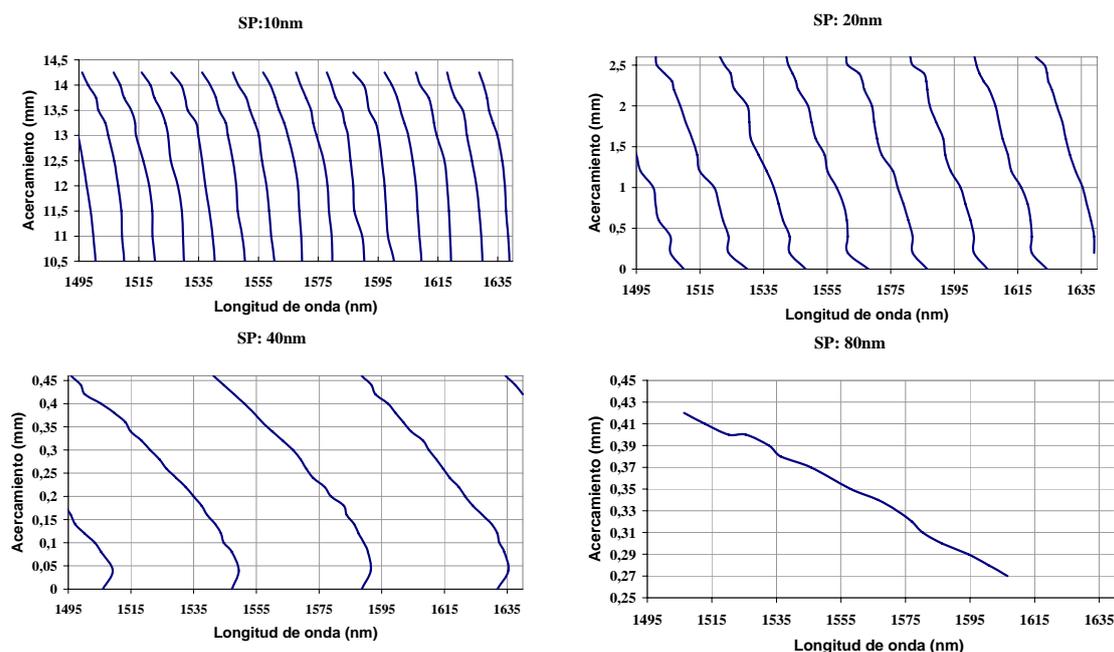


Fig. 4: Longitudes de onda donde la transmisión de cada fibra estrechada es máxima en función del acercamiento de los extremos de cada fibra estrechada para 4 diferentes fibras estrechadas con diferente periodo espectral (SP).

Cada fibra estrechada no-adiabática presenta una respuesta diferente a las perturbaciones externas. En consecuencia, es muy importante caracterizar experimentalmente la dependencia de los cambios espectrales con las perturbaciones para cada fibra estrechada de manera independiente. El cambio de la respuesta espectral en función del acercamiento de los extremos de la fibra estrechada ha sido medido para cada una de las fibras estrechadas. Los resultados experimentales se muestran en la Fig. 4. En estas gráficas se representa las longitudes de onda donde la transmisión de cada fibra estrechada es máxima en función del valor de acercamiento de los extremos de la fibra estrechada. Como se puede observar en la figura, para obtener un desplazamiento de la longitud de onda donde se obtiene el máximo de transmisión hay que aplicar un acercamiento diferente para cada fibra estrechada.

### 3.- Demostración experimental de un láser de fibra en anillo

El esquema del montaje del LAFDE se muestra en la Fig. 5. La cavidad está formada por un filtro en fibra sintonizable a partir de

fibras estrechadas, como se ha descrito en los apartados anteriores, un aislador óptico, un controlador de polarización (PC), un acoplador óptico 3dB y un WDM 1480/1550nm. El filtro sintonizable determina la longitud de onda de láser del LAFDE. El aislador asegura la oscilación unidireccional en la cavidad y el controlador de polarización compensa la ganancia dependiente de polarización. La luz es acoplada a la salida a través de un acoplador óptico. La fibra dopada con erbio fue bombeada con un láser de bombeo a 1480nm. La longitud y el pico de absorción a 1530nm de la fibra dopada con erbio fueron de 26m y 4.4dB/m, respectivamente. Como ejemplo de los resultados obtenidos, en la Fig. 6 se muestra el espectro óptico de salida del LAFDE laseando en 8 longitudes de onda diferentes para una potencia de bombeo de 150mW a 1480nm. Para conseguir la oscilación en una longitud de onda específica, los extremos de cada fibra estrechada tienen que moverse según los resultados experimentales mostrados en la Fig. 4. Además, como era de esperar, cada fibra estrechada tiene una influencia específica en la señal de salida. La fibra estrechada con menor periodo espectral, en este caso 10nm, permite la sintonización

fina del láser. La fibra estrecha con un periodo espectral intermedio, en este caso 20nm y 40nm, reduce los lóbulos secundarios. Finalmente, la fibra estrechada con mayor periodo espectral permite la optimización de la potencia de salida. El rango de sintonización máximo obtenido con este LAFDE fue de 20.8nm (1544.5nm-1565.3nm).

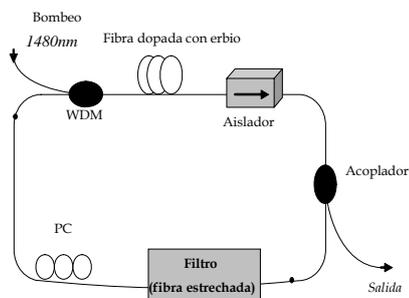


Fig. 5: Montaje experimental de un LAFDE sintonizable.

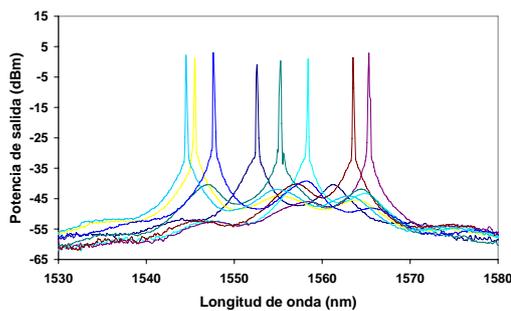


Fig. 6: Espectro óptico de salida de un LAFDE funcionando en diferentes longitudes de onda para una potencia de bombeo de 150mW a 1480nm.

#### 4.- Conclusión

La aplicación de fibras estrechadas como filtro sintonizable en láseres de fibra se presenta en este trabajo. La respuesta espectral de las fibras estrechadas, las cuales son cuasi-sinusoidales, cambia cuando se aplica una perturbación controlada. Además, los cambios de la respuesta espectral dependen del periodo de la respuesta espectral de una fibra estrechada no-adiabática. La evolución de las longitudes de onda en las que se produce el máximo de transmisión en función del acercamiento de los extremos de la fibra estrechada ha sido obtenida experimentalmente para varias fibras estrechadas con diferentes periodos espectrales. Por otro lado, para ob-

tener un filtro óptico con un menor ancho de banda y una profundidad de modulación mayor se han dispuesto varias fibras estrechas en serie. Estas propiedades fueron usadas para diseñar un filtro óptico para su aplicación en láseres de fibra. Se ha montado y verificado experimentalmente un LAFDE con 4 fibras estrechadas no-adiabáticas en serie como filtro óptico. El láser de fibra presenta un rango de sintonización de 20.8nm.

*Agradecimientos:* Este trabajo ha sido en parte realizado con los medios aportados por el proyecto TEC2007-67987-CO2

#### Referencias

- [1] R. G. LAMONT, D. C. JOHNSON and K. HILL, "Power transfer in fused biconical-taper single-mode fiber couplers: dependence on external refractive index," *Applied Optics*, vol. 24, p. 6, 1985.
- [2] L. C. BOBB, H. D. KRUMBOLTZ and P. M. SHANKAR, "Pressure sensor that uses bent biconically tapered single-mode fibers," *Optics Letters*, vol. 16, p. 3, 1991.
- [3] K. Q. KIEU, M. MANSURIPUR, "Biconical fiber taper sensors," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 18, no. 21, p. 2239, 2006.
- [4] J. M. CORRES, F. J. ARREGUI AND I. R. MATIAS, "Design of humidity sensors based on tapered optical fibers," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, p. 8, 2006.
- [5] O. FRAZAO, R. FALATE, J. L. FABRIS AND J. L. SANTOS, "Optical inclinometer based on a single long-period fiber grating combined with a fused taper," *Optics Letters*, vol. 31, p. 3, 2006.
- [6] A. BELLEMARE, "Continuous-wave silica-based erbium-doped fibre lasers," *Progress in Quantum Electronics* 27, p. 211-266, 2003
- [7] J. D. LOVE, W. H. HENRY, W. J. STEWART, R. J. BLACK, S. LACROIX AND F. GONTHIER, "Tapered single-mode fibres and devices. Part I: Adiabatic Criteria," *IEEE Proceedings*, vol. 138, p. 12, 1991.
- [8] S. LACROIX, F. GONTHIER, J. BURES, "All-fiber wavelength filter from successive biconical tapers," *Optics Letters*, vol. 11, no. 10, p. 671, 1986.