

# Control del periodo espectral de interferencias en tapers de fibras monomodo

N. Becue, F.J. Madruga, C. Galíndez, J.M. Lazaro, J.M. Lopez-Higuera

nicolas.becue@unican.es

Grupo de Ingeniería Fotónica, Dpto. de Tesia – Universidad de Cantabria

Av. Los Castros s/n – c.p. 39005 Santander (España)

**Abstract-** A really simple study of the theoretical aspect of the filters based on non adiabatic tapers in single-mode fibers is presented. It concludes on the possibility to vary the period of the spectral interferences through the variation of the taper diameter. The taper diameter is varied thanks to the stretching of the fiber while it is heated with a movable oxy-butane flame. Some measurements had been done on different tapers built with the same fabrication parameters in order to make the characteristic curve of the period evolution during the fabrication. Then this characteristic is used in order to make tapers with an expected spectral period.

## I. INTRODUCCIÓN

Desde hace más de 20 años los dispositivos basados en tapers sobre fibras monomodo se investigan con gran interés a nivel internacional [1-4]. Múltiples fenómenos se han descubierto y numerosas aplicaciones se han desarrollado. Una de las características más importantes del taper es que en su zona delgada se produce una interacción de la luz con el medio exterior. Esta propiedad permite el desarrollo de sensores de índice o de humedad a través de nanocapas [5]. Además el hecho de fabricar un taper abrupto (no adiabático) provoca interferencias entre los modos (principalmente el modo LP<sub>01</sub> y el modo LP<sub>02</sub>), las cuales pueden ser usadas para detectar una presión mecánica sobre la fibra [6], medir un movimiento angular [7], o de manera más sencilla pueden ser usadas como filtros en frecuencia. Incluso hoy en día esa interacción permite desarrollar nuevos sensores [5] o dispositivos de gran interés y aplicación [8].

La primera parte del artículo describe de manera sencilla el fenómeno que genera las interferencias en tapers no adiabáticos. En la segunda parte se describe un método implementado en el Grupo de Ingeniería Fotónica de la Universidad de Cantabria, para conseguir el Periodo Espectral (PE) deseado durante la fabricación.

## II. TAPER NO ADIABATICO

Existen de manera general, dos tipos de taper, el taper adiabático que minimiza las pérdidas haciendo una transición larga y suave entre el diámetro inicial y el diámetro final del taper. Love & al. [9] presenta los límites geométricos que no se debe sobrepasar a fin de conseguir una micro nano fibra con pocas perdidas [10]. El segundo tipo son los tapers no adiabáticos que presentan propiedades interesantes tales como la posibilidad de medir parámetros exteriores a la fibra gracias a la interacción de la luz con ellos en la zona delgada. Es posible también emplear este tipo de taper como filtro en frecuencia [11].

### A. Generación de interferencias en tapers no adiabáticos

El taper no adiabático se fabrica haciendo una transición rápida del diámetro de la fibra. La frecuencia normalizada  $V_{nucleo}$  del núcleo definida por la ecuación (1), donde  $\rho_{nucleo}$  es el diámetro del núcleo, determina la naturaleza monomodo de la fibra si dicho valor es inferior a 2,405. Su valor baja proporcionalmente con la disminución del diámetro de la fibra durante la fabricación del taper y de hecho la anchura del modo crece hasta llegar a un valor límite  $\approx 1$  que no permite considerar la propagación de la luz en la fibra través de los dos niveles clásicos (núcleo y cubierta). La interacción del modo con el medio exterior es muy grande y la influencia del núcleo desaparece.

$$V_{nucleo} = \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{nucleo}(z) \sqrt{n_n^2 - n_c^2} \quad (1)$$

La frecuencia normalizada referente a la nueva propagación de la luz en la fibra se puede expresar según la ecuación (2) cuyo valor es superior a 100 debido a que  $\rho_{cubierta}$  es mucho más grande que el diámetro del núcleo. La frecuencia normalizada también es dependiente de la raíz cuadrada de la diferencia de índices. La fibra estrechada admite entonces la propagación de modos superiores y la interacción entre ellos.

$$V_{cubierta} = \frac{2\pi}{\lambda} \rho_{cubierta}(z) \sqrt{n_c^2 - n_{aire}^2} \quad (2)$$

La interacción entre los modos durante la fabricación del taper es visible midiendo la transmisión de la fibra (Fig.1). A fin de controlar su perfil, se usa la técnica de estiramiento de la fibra mientras se calienta con una antorcha de oxi-butano que se desplaza a lo largo de la fibra [12].

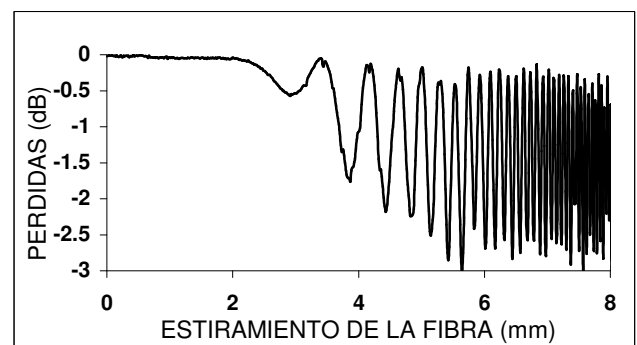


Fig. 1. Pérdidas generadas durante la fabricación de un taper respecto al estiramiento de la fibra.

Cuando  $V_{nucleo}$  es menor que 1, es decir, el modo fundamental del núcleo  $LP_{01}$  es guiado por la cubierta, entonces dicho modo tiene la posibilidad de acoplarse con cualquier modo  $LP_{0m}$ , aunque la interacción principal se hace con el modo  $LP_{02}$  que tiene una distribución más cercana a  $LP_{01}$  que los otros modos. Cuando  $V_{nucleo}$  vuelve a ser  $>1$ , la luz del modo  $LP_{01}$  se transmite en el núcleo y vuelve a ser guiada de la misma manera que lo era antes de entrar en el taper. Los otros modos no son transmitidos y se radian. La parte de energía que se había acoplado con el modo  $LP_{02}$  se pierde, y al contrario, la energía acoplada del modo  $LP_{02}$  al  $LP_{01}$  se transmite hasta el final del taper.

### B. Dependencia en frecuencia

Si se mide la transmisión espectral del taper con un laser sintonizable, se obtiene un espectro como uno de los obtenidos en la Fig. 2. Se consigue un filtro en frecuencia con unas pérdidas mínimas de  $\approx 0.5\text{dB}$  y máximas de  $\approx 4\text{dB}$  y un periodo espectral (PE) variable según el taper fabricado.

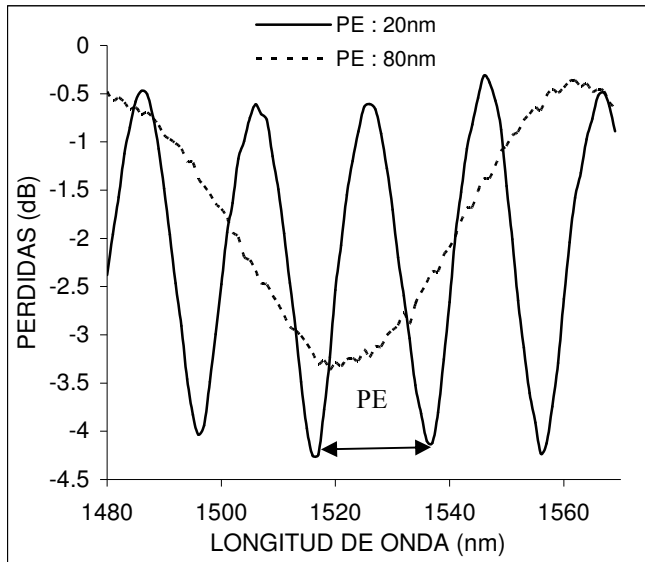


Fig. 2. Filtros obtenidos a partir de las interferencias entre los modos  $LP_{01}$  y  $LP_{02}$  en un taper non adiabático

El periodo de variación de la transmisión depende principalmente de la diferencia entre las constantes de propagación de los modos que interfieren a  $\Delta\beta$  (3) (principalmente  $LP_{01}$  y  $LP_{02}$  en este caso) [9]. Esta ecuación es inversamente proporcional al cuadrado del diámetro del núcleo, en este caso se considera la fibra entera (núcleo y cubierta) dado que  $V_{nucleo} < 1$ , la guía de onda está compuesta de los dos niveles, cubierta y aire, porque el diámetro del núcleo se ha reducido y la propagación en él es despreciable.

$$\Delta\beta = \frac{\lambda(5.520^2 - 2.405^2)}{4\pi\rho^2 n_{cubierta}} \quad (3)$$

El PE depende de la diferencia entre las constantes de propagación  $\Delta\beta$ ; siendo esta inversamente proporcional al diámetro y directamente proporcional a la longitud de onda. Es decir, la disminución del diámetro del taper provocará una disminución del PE.

### III. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Para validar experimentalmente la dependencia del PE con el diámetro del taper, se realiza una caracterización utilizando una estación de fabricación de tapers. En ella se modificará el diámetro del taper mediante un estirado de la fibra, controlando el PE a la salida de taper. La estación de fabricación de tapers [12] compuesta de dos desplazadores de alta precisión sirven para estirar la fibra, mientras una antorcha de oxi-butano genera una llama de tamaño aproximado de 2mm barre linealmente la fibra. La transmisión del taper se mide durante la fabricación usando una fuente de luz y un fotodetector incluido en la estación de fabricación. El proceso de fabricación del taper se puede resumir como sigue: Primero la fibra es fusionada a dos conectores FC/PC, segundo se quita aproximadamente 2cm de cubierta en la zona a tratar y la fibra se limpia con etanol. Finalmente se coloca la fibra en los desplazadores gracias a un sistema de succión que permite posicionar la fibra sobre 2 surcos en V. A través de un software desarrollado en el Grupo de Ingeniería Fotónica se controla los desplazamientos de los motores, los flujos de gases oxígeno y butano, se miden las potencias en el fotodetector (Fig. 3), los almacena y los dispone en tablas y gráficos para su análisis posterior. Los resultados obtenidos durante una fabricación se presentan en la Fig. 1.

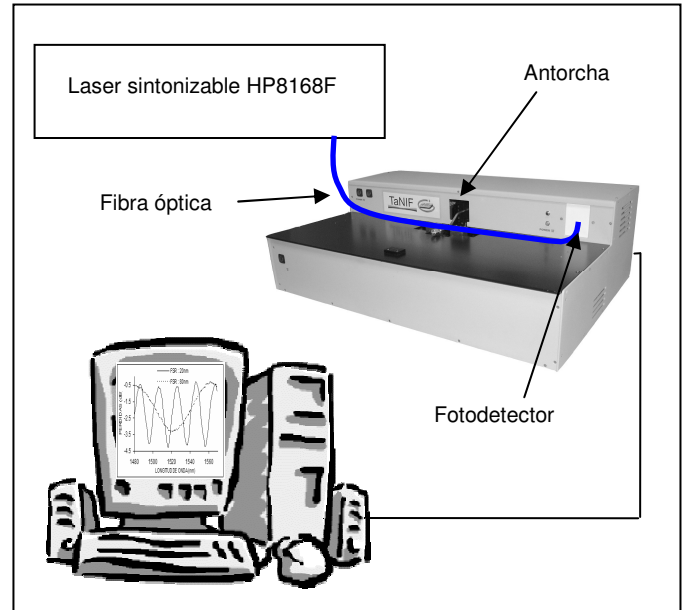


Fig. 3. Montaje experimental que sirve a la fabricación y caracterización de los tapers

### IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Una serie de tapers se fabricaron para determinar la característica del PE respecto al tiempo de fabricación sabiendo que la velocidad de estiramiento de la fibra es constante (8mm/mn). A fin de conseguir datos compatibles para la caracterización, el movimiento de la antorcha ha sido predeterminado durante un tiempo suficientemente largo, el cual permite tener un amplio rango de puntos (Fig. 4). Las transiciones del taper son bastantes pequeñas para generar las interferencias entre los modos. Este mismo patrón de movimientos se ha empleado con cada uno de los tapers.

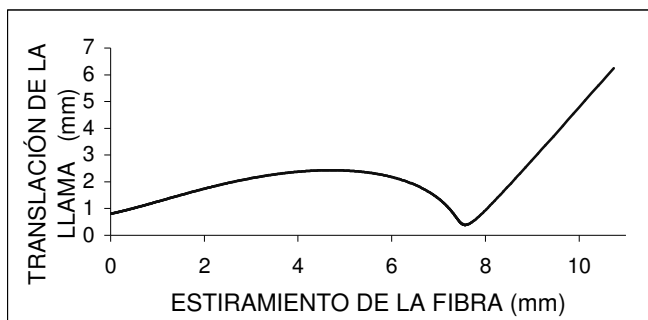


Fig. 4. Movimiento de la antorcha predeterminado para la fabricación de los tapers

Después de un tiempo previamente definido en el programa de fabricación, la llama de oxi-butano y los motores que sirven al estiramiento de la fibra se paran instantáneamente. Después, el PE del taper resultante es medido con un laser sintonizable para establecer la curva que muestra la evolución del PE durante la fabricación del taper.

Más de 20 tapers se han fabricado para determinar la forma de la Fig. 5. Como se predijo, el PE disminuye con el estiramiento de la fibra. La evolución del PE de salida de la fibra durante la fabricación del taper es válida únicamente para este protocolo experimental. Esta evolución depende mucho de la manera como se desplaza la antorcha, de la anchura de la llama y de la velocidad de estiramiento. Para determinar la siguiente curva, se dejó constante cada uno de estos parámetros. Sin esta última condición, la curva no tendría ningún sentido porque no reflejaría la evolución del PE durante una fabricación con parámetros determinados.

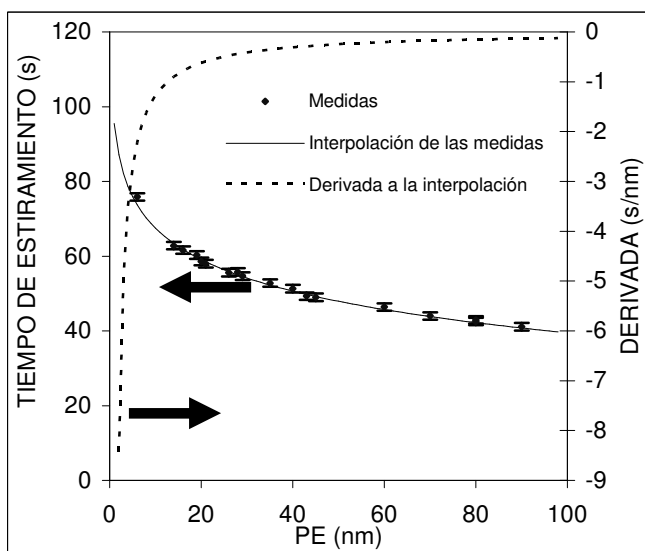


Fig. 5. Evolución del PE respecto al tiempo de fabricación del taper y su derivado

Esta curva permite conseguir un control del periodo espectral de filtros basados en taper no adiabáticos. La derivada de la interpolación de las medidas muestra que el PE disminuye rápidamente al principio de la fabricación, por lo tanto es mucho más difícil de conseguir con precisión un taper de alto PE que un taper de bajo PE. Para una variación en longitud de onda de 1nm entre 90nm y 89nm, la variación del tiempo de fabricación es de 0,0015s mientras que entre 10nm y 9nm es de 0,15s. El estudio con otra curva de desplazamiento de la antorcha durante la fabricación daría

otra caracterización que probablemente podría mejorar la precisión en valores de PE altos.

## V. CONCLUSIONES

Mediante un estudio teórico de las interferencias generadas entre los modos  $LP_{01}$  y  $LP_{02}$  en tapers no adiabáticos en fibras monomodo, se ha fabricado múltiples tapers a partir del diseño de un mismo perfil. La fabricación para cada uno de ellos se interrumpía a distintos momentos a fin de conseguir la evolución del PE durante la fabricación del taper. Esta evolución permite controlar el periodo espectral de las interferencias en tapers de fibras monomodo. Las interferencias tienen una forma sinusoidal, la combinación de tapers de distintos PE puede llevar a controlar el perfil de atenuación espectral [11]. Los resultados de esta comunicación permite fabricar filtros con el perfil de atenuación espectral deseado.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer las aportaciones realizadas a este trabajo desde los proyectos SIRAS TEC2004-05936-C02-02 y CIMA TEC2005-08218-C02-02.

## 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, February 1985.
- [2] W. K. Burns, M. Abebe, C. A. Villarruel, and R. P. Moeller, "Loss Mechanisms in Single-Mode Fiber Tapers," *Journal of Lightwave technology*, vol. LT-4, p. 6, June 1986.
- [3] F. Gonthier, J. Lapierre, C. Veilleux, S. Lacroix, and J. Bures, "Investigation of power oscillations along tapered monomode fibers," *Applied Optics*, vol. 26, p. 6, February 1987.
- [4] R. J. Black, J. Bures, and J. Lapierre, "Finite-cladding fibres : HE<sub>12</sub> and local-normal-mode coupling evolution," *IEE Proceedings*, vol. 138, p. 7, 330 1991.
- [5] 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, November 2006.
- [6] 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, January 1991.
- [7] O. Frazão, 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, October 2006.
- [8] K. Kieu and M. Mansuripur, "Tuning of fiber lasers by use of a single-mode biconic fiber taper," *Optics Letters*, vol. 31, p. 3, July 2006 2006.
- [9] J. D. Love, W. M. Henry, W. J. Stewart, R. J. Black, S. Lacroix, and F. Gonthier, "Tapered single-mode fibres and devices. Part1: Adiabaticity Criteria," *IEE Proceedings*, vol. 138, p. 12, October 1991.
- [10] G. Brambilla, V. Finazzi, and D. J. Richardson, "Ultra-low-loss optical fiber nanotapers," *Optics Express*, vol. 12, p. 6, May 2004.
- [11] S. Lacroix, F. Gonthier, and J. Bures, "All-fiber wavelength filter from successive biconical tapers," *Optics Letters*, vol. 11, p. 3, October 1986.
- [12] T. A. Birks and Y. W. Li, "The Shape of Fiber Tapers," *Journal of Lightwave technology*, vol. 10, p. 7, April 1992.