

Sensibilidad de la anchura del modo con la elongación en Fibras de Cristal Fotónico guiadas por índice

Mode width sensitivity with strain in Index guided Photonic Crystal Fibres

Jose M. LÁZARO⁽¹⁾, Antonio QUINTELA⁽¹⁾, M. Angeles QUINTELA⁽¹⁾, Nicolas BECUE⁽¹⁾ y Jose .M. LÓPEZ-HIGUERA⁽¹⁾

1. Grupo de ingeniería fotónica(Dpto. TEISA), E.T.S.I.I. y de Telecomunicación, Universidad de Cantabria, Avda. Los Castros s/n – c.p. 39005 Santander, España.

Persona de contacto: Jose M. LÁZARO (jmlu@teisa.unican.es).

RESUMEN:

Se estudia el comportamiento de la anchura del modo fundamental en una Fibra de Cristal Fotónico (FCF) guiada por índice cuando se aplica un estiramiento en un rango de valores comprendido entre 0.5 y 2.5%ε. Se identifican las regiones de frecuencia normalizada (Λ/λ) y de la fracción de llenado de aire d/Λ en los que se observa la máxima influencia del estiramiento en la sensibilidad. Finalmente, se analiza y discute su evolución.

Palabras clave: Caracterización y diseño de fibras; anchura del modo fundamental; Fibras de Cristal Fotónico.

ABSTRACT:

The fundamental mode width behaviour is studied for an index guided Photonic Crystal Fibre (PCF) when strain is applied in a range of values between 0.5 and 2.5%ε. The regions of normalized frequency (Λ/λ) and of the filling air fraction d/Λ , in which maximum strain influence is observed, are identified. Finally, its evolution is analyzed and argued.

Key words: Fiber characterization and design; fundamental mode width; Photonic Crystal Fibres.

1.- Introducción

Las Fibras de Cristal Fotónico (FCF) son un nuevo tipo de fibras con propiedades especiales [1-5]. Las FCFs son fibras generalmente de sílice pura formadas por una estructura periódica de agujeros en su sección transversal y que se extiende a lo largo de toda su longitud. Esta periodicidad es rota por la ausencia de uno de los agujeros o por un agujero de mayor diámetro en el centro de la sección transversal, permitiendo de este modo la propagación de la luz a lo largo de la FCF.

Se han demostrado dos mecanismos de propagación diferentes [6], dependiendo del

diseño de la estructura de la fibra. Similar a como ocurre en las fibras estándar de telecomunicaciones, en un tipo de estas FCFs el índice efectivo de la cubierta es menor que el de un núcleo sólido debido a los agujeros de aire en la cubierta, permitiendo el guiado de la luz en el núcleo. Este tipo de FCF se conoce como FCF guiada por índice y en ella la periodicidad no es necesaria [7]. Por otra parte, en las FCFs guiadas por efecto 'band-gap', la luz puede ser confinada dentro de una región de índice bajo – incluso un agujero de aire grande – por reflexión en la estructura periódica transversal de la cubierta [8]. En este caso, no existen modos de propagación para ciertas longitudes de onda a lo lar-

go de la sección transversal de la FCF, con lo que la luz es confinada en su interior.

Debido a su flexibilidad o capacidad de diseñar su comportamiento, las FCFs han sido intensamente exploradas en un amplio rango de aplicaciones. Estas incluyen comunicaciones por fibra óptica [1-5], atrapado o guiado de partículas [9] y en sensores de fibra óptica [10] en los cuales se desea la mayor sensibilidad posible a un parámetro externo (presión, temperatura, estiramiento, etc).

Otros autores han publicado que diferentes valores de los parámetros estructurales de la FCF dan diferentes anchuras del modo fundamental [11, 12]. En este artículo, se estudian las FCF guiadas por índice y se analiza la sensibilidad de la anchura del modo fundamental al estiramiento de la fibra. Estos resultados son muy útiles para el diseño óptico de la FCF guiada por índice como elemento transductor.

Este artículo está organizado de la siguiente forma: en la sección 2 se introducen los principios teóricos usados, en la sección 3 se muestran los resultados numéricos para la anchura del modo fundamental y su sensibilidad, y en la sección 4 se presenta el análisis de los resultados. Finalmente, se muestran las conclusiones obtenidas.

2.- Principios teóricos

En la figura 1 se muestra la sección transversal de una FCF guiada por índice que se caracteriza por dos parámetros estructurales: el periodo o distancia entre agujeros (Λ) y el diámetro de los mismos (d).

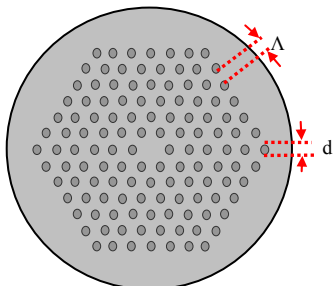


Fig. 1: Ilustración de la sección transversal de una FCF guiada por índice.

En las FCFs se define la fracción de aire (f) como el área de los agujeros relativo al área

total de la estructura hexagonal. Este parámetro es directamente proporcional al cociente del diámetro de los agujeros y el periodo:

$$f = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \left(\frac{d}{\Lambda} \right)^2 \quad (1)$$

En este artículo se analiza el comportamiento de la anchura del modo fundamental (w) al aplicar estiramiento en una FCF guiada por índice. Al aplicar estiramiento hay que considerar dos variaciones en la FCF: variación estructural y variación en el índice de la sílice. En el primer caso, al aplicar un estiramiento a la fibra se va a producir una disminución en el periodo y en el diámetro de los agujeros. Como el volumen permanece constante y considerando una forma cilíndrica perfecta de los agujeros, se puede calcular el nuevo radio de los agujeros aplicando la siguiente expresión:

$$\pi \cdot r_1^2 \cdot h_1 = \pi \cdot r_2^2 \cdot h_2 \Rightarrow r_2 = r_1 \cdot \sqrt{\frac{h_1}{h_2}} \quad (2)$$

donde r_1 y h_1 son el radio y la longitud sin estiramiento y r_2 y h_2 son el radio y la longitud con estiramiento (ver figura 2).

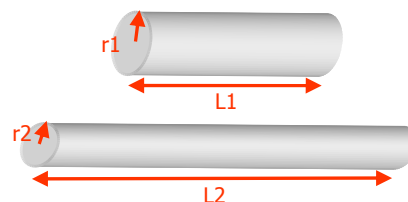


Fig. 2: Parámetros de un agujero en la región de estiramiento: sin estiramiento (arriba) y con estiramiento (abajo).

Además, como el cociente d/Λ se puede considerar constante cuando se aplica un estiramiento, se puede calcular el nuevo periodo por medio de la expresión:

$$\Lambda_2 = \frac{1}{d/\Lambda} \cdot d_2 \quad \text{con} \quad d_2 = 2 \cdot r_2 \quad (3)$$

Por otra parte, se produce un cambio en el índice de refracción de la sílice (Δn_{Si}) si una sección de la fibra con longitud L es estirada una longitud $L + \Delta L$. Este cambio puede ser calculado mediante la expresión:

$$\Delta n_{Si} = -0.5 \cdot n_{Si}^3 \cdot (\rho_{12} - \nu \cdot (\rho_{11} + \rho_{12})) \frac{\Delta L}{L} \quad (4)$$

donde $\rho_{12}=0.252$ y $\rho_{11}=0.113$ son los coeficientes ópticos de estiramiento, $\nu=0.17$ (@25°C) es la razón de Poisson y ΔL es la elongación.

De esta forma, es posible calcular la anchura del modo fundamental con y sin estiramiento para comparar ambos resultados. El cálculo de este parámetro se realiza mediante la definición del segundo momento:

$$w = \sqrt{f_j \cdot A_j} \quad (5)$$

donde f_j es la fracción de la energía del campo en la componente j y A_j es el área del modo para cada componente definida como el campo medio del vector de posición:

$$A_j = \langle \vec{x} \cdot \vec{x} \rangle_j - \langle \vec{x} \rangle_j^2 \quad (6)$$

En este artículo las simulaciones de la anchura del modo fundamental se han realizado con el paquete *Bandsolve* de *Rsoft*.

3.- Resultados

Se ha estudiado el valor de la diferencia de de la anchura del modo fundamental (Δw), debida al estiramiento, para diferentes valores de la frecuencia normalizada (Λ/λ) en función de d/Λ . Este análisis ha sido realizado para varios valores del estiramiento (ϵ). Y. Zhu [13] ha publicado que un caso de este tipo de fibras toleró un máximo estiramiento de 2.75%, por esta razón se analiza un rango entre 0.5 y 2.5 con paso de 0.5. En la figura 3 se muestra el comportamiento de la anchura del modo sin que se aplique estiramiento mientras que en la figura 4 se muestra la sensibilidad que se obtiene con el estiramiento en el rango analizado. Los valores de la anchura del modo han sido divididos entre el periodo para de este modo hacer los resultados validos para cualquier periodo. En cuanto a la sensibilidad, esta se define como variación de anchura del modo con un cierto estiramiento aplicado en tanto por ciento ($\Delta w/\epsilon\%$).

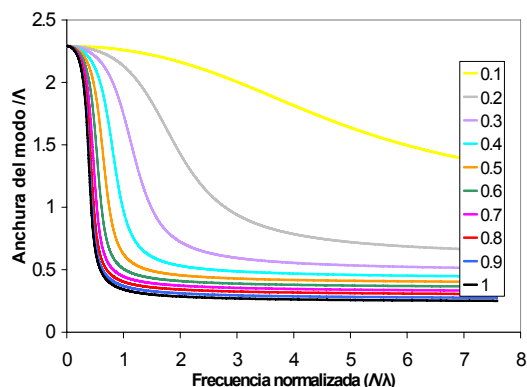


Fig. 3: Anchura del modo fundamental normalizada en función de la frecuencia normalizada, Λ/λ , para distintos valores de d/Λ .

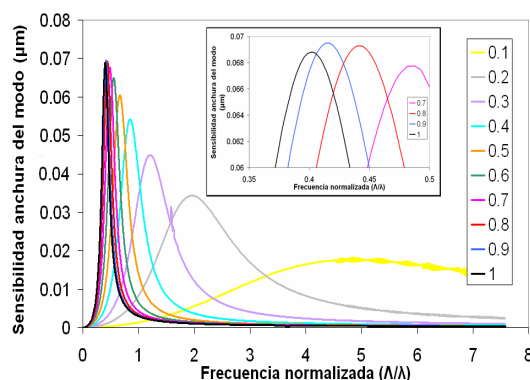


Fig. 4: Sensibilidad de la anchura en función de la frecuencia normalizada, Λ/λ , para distintos valores de d/Λ (insertado se incluye una ampliación de los picos más elevados).

Como se puede ver dependiendo de los parámetros de la estructura (Λ y d) y de la longitud de onda en la que se trabaje, se obtendrá un valor diferente de la anchura del modo. Además, a partir de esta anchura la variación con el estiramiento también será diferente dependiendo de Λ , d y λ .

De la figura 4 se puede obtener también que los valores de máxima sensibilidad se dan para pequeños valores de la frecuencia normalizada (Λ/λ) y que la sensibilidad aumenta al aumentar el cociente d/Λ . Con respecto a este último punto cabe destacar que para valores de d/Λ mayores que 0.7 la sensibilidad deja de aumentar e incluso disminuye. A continuación se da explicación a este comportamiento.

4.- Análisis

Como se ha mencionado al aplicar estiramiento el cambio de la estructura y el cambio

en el índice de la sílice modifican el comportamiento de la fibra. Para ver la causa del comportamiento en la sensibilidad antes mencionado se analizarán estos cambios por separado. En la figura 5 se muestran los valores de máxima sensibilidad en función de d/Λ : considerando los dos cambios, considerando solo el cambio de la estructura de la fibra y considerando solo el cambio de índice.

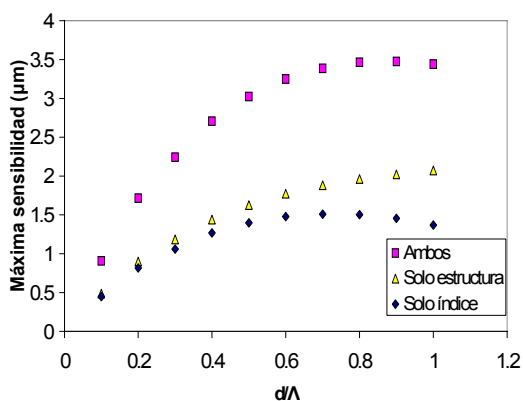


Fig. 5: Evolución de la máxima sensibilidad en función de d/Λ considerando solo el índice, solo la estructura o los dos.

En el caso del cambio en la estructura de la FCF el valor de la sensibilidad no disminuye con valores de d/Λ mayores de 0.7 pero si crece más lentamente. Considerando la variación de d/Λ constante, la variación de la estructura de la FCF solo influirá en la frecuencia normalizada, con la variación del periodo. Por esta razón contra más pendiente haya en la curva que relaciona w/Λ y Λ/λ (figura 3) más sensibilidad se tendrá. Como se puede ver en la figura 3 para valores mayores de 0.7 las pendientes ya son muy similares lo que hace que la sensibilidad varíe menos entre ellas.

Por otro lado, en el caso del cambio de índice de la sílice se observa un decrecimiento en la sensibilidad con valores de d/Λ mayores de 0.7. Este comportamiento es lógico debido a que en los valores altos de fracción de aire la cantidad de sílice en la estructura es bastante reducida con lo que una variación en su índice influye menos.

5.- Conclusiones

Se ha mostrado el comportamiento de las FCFs de sílice guiadas por índice al aplicarlas un estiramiento en el rango de 0.5 a 2.5%. Se han obtenido el valor de la anchura del modo fundamental y de la variación de esta con el estiramiento en función de la frecuencia normalizada (Λ/λ) para distintos valores de d/Λ . De estos resultados se obtiene que la sensibilidad es mayor para valores pequeños de Λ/λ y valores elevados de d/Λ . Con respecto a d/Λ se observó que para valores mayores de 0.7 la sensibilidad dejaba de crecer e incluso disminuía. Se observa así mismo que la sensibilidad alcanza un punto de inflexión en el entorno de $d/\Lambda = 0.7$ pudiendo, a partir de este valor, decrecer. Estos resultados permiten el diseño óptimo de la FCF guiada por índice como elemento transductor.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido en parte realizado con los medios aportados por los proyectos TEC2004-05936-C02 y TEC2005-08218-C02-02.

Referencias

- [1] J.C. KNIGHT, T.A. BIRKS, P.S.J. RUSSELL, and D.M. ATKIN, "All-silica single mode optical fiber with photonic crystal cladding," *Opt. Lett.*, 21, 1547-1549, 1996.
- [2] T.A. BIRKS, J.C. KNIGHT, and P.S.J. RUSSELL, "Endlessly single-mode photonic crystal fiber," *Opt. Lett.*, 22, 961-963, 1997.
- [3] J. BROENG, D. MOGILEVSTEV, S.E. BARKOU, and A. BJARKLEV, "Photonic crystal fibers: A new class of optical waveguides," *Optical Fiber Technology*, 5, 305-330, (1999).
- [4] J.C. KNIGHT, T.A. BIRKS, R.F. CREGAN, P.S.J. RUSSELL, and J.P. SANDRO, "Photonic crystals as optical fibers physics and applications," *Optical Materials*, 11, 143-151, 1999.
- [5] R.S. WINDELER, J.L. WAGENER, and D.J. DIGIOVANNI, "Silica-air microstructured fibers: Properties and applications," *Optical Fiber*

- Communications conference, San Diego(1999).
- [6] A. BJARKLEV, J. BROENG and A. S. BJARKLEV, *“Photonic Crystal Fibres”*, (Kluwer Academic Publishers, 2003)
 - [7] T.M. MONRO, P.J. BENNETT, N.G.R. BRODERICK and D.J. RICHARDSON, *“Holey fibers with random cladding distributions”*, Opt. Lett., 25, 206–8, 2000.
 - [8] J.C. KNIGHT, J. BROENG, T.A. BIRKS and P. St. J. RUSSELL, *“Photonic band gap guidance in optical fibers”*, Science, 282, 1476–8, 1998.
 - [9] M.J. RENN, R. PASTEL, and H.J. LEWANDOWSKI, *“Laser Guidance and Trapping of Mesoscale Particles in Hollow-Core Optical Fibers”*, Physical Review Letters, 82, 7, 1574-7, 1999.
 - [10] John M FINI, *“Microstructure fibres for optical sensing in gases and liquids”*, Meas. Sci. Technol., 15, 1120–1128, 2004.
 - [11] N.A. MORTENSEN, *“Effective area of photonic crystal fibers”*, Opt. Express, 10, 341, 2002.
 - [12] M. KOSHIBA and K. SAITOH, *“Structural dependence of effective area and mode field diameter for holey fibers”*, Opt. Express, 11, 1746, 2003.
 - [13] Y. ZHU, P. SHUM, H. BAY, M. YAN, X. YU, J. HU, J. HAO and C. LU, *“Strain-insensitive and high-temperature long-period gratings inscribed in photonic crystal fiber”*, Optics Letters, 30, 4, 2005.